

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Methoden zur Intervallstabilisierung bei Linien des innerstädtischen öffentlichen Verkehrs

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von

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

und

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Maly**

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Volker Hartl-Benz

Matr.Nr.: 00003213

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/230, A-1040 Wien

Wien, im November 2017

.....

Volker Hartl-Benz

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Maly, bedanken, der mich mit wertvollen Rückmeldungen zu Inhalten, Aufbau und Methodik und auch durch sein generelles Interesse bei der Verfassung der Diplomarbeit unterstützt hat. Mein Dank gilt auch Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich den Wiener Linien und denjenigen Mitarbeitern danken, die Daten zum Betrieb und ihr Expertenwissen zur Verfügung gestellt haben und so zum Gelingen der Diplomarbeit beigetragen haben.

Abschließend danke ich allen, die mich während des Studiums begleitet und unterstützt haben. Im Speziellen möchte ich dabei meine Familie, Kollegen und Arbeitgeber nennen.

Kurzfassung

Linien des innerstädtischen öffentlichen Verkehrs mit kurzen Intervallen und hohem Fahrgastaufkommen besitzen eine Grundtendenz zu Intervallabweichungen. Diese entstehen durch zunächst geringfügige Verspätungen, die sich durch die dadurch ausgelösten längeren Fahrgastwechselzeiten an den Haltestellen von selbst verstärken und ohne Gegenmaßnahmen schließlich zur Pulkbildung führen. Folgen dieses Vorgangs sind Betriebsunregelmäßigkeiten und erhöhte Wartezeiten für die Fahrgäste an den Haltestellen.

Verkehrsbetriebe begegnen diesem Phänomen üblicherweise durch den Einbau von Ausgleichszeiten in den Fahrplänen, meistens an den Endhaltestellen. Dadurch sollen Verspätungen kompensiert und der fahrplanmäßige Betrieb aufrechterhalten werden. Neue Ansätze gehen angesichts von kurzen Intervallen im innerstädtischen Bereich vom Konzept eines vorgegebenen Fahrplans ab und konzentrieren sich stattdessen auf die Gewährleistung von stabilen Intervallen. Das Verfahren backward headway verfolgt dieses Ziel und sieht dynamische Ausgleichszeiten an einem oder mehreren Kontrollpunkten im Linienverlauf vor. An diesen Kontrollpunkten werden die Fahrzeuge jeweils um die mit einem Parameter α gewichtete Fahrzeugfolgezeit zum nachfolgenden Fahrzeug verzögert und dadurch fortlaufend an einen Gleichgewichtswert angenähert. Ein weiterer Parameter β legt einen Minimalwert für die Fahrzeugfolgezeiten am Kontrollpunkt fest.

Das Verfahren wurde in einer leicht abgeänderten Form in einer Simulation des Betriebs der Wiener Straßenbahnlinie 43 angewendet. Diese Linie besitzt ein hohes Fahrgastaufkommen und starke Tendenzen zu instabilen Intervallen. Für die Simulation waren Daten über die Fahrzeiten zwischen den einzelnen Haltestellen, die Anzahl der Fahrgäste und die Dauer des Fahrgastwechsels in Abhängigkeit von der Anzahl der ein- und aussteigenden Personen notwendig. Diese Eingangsdaten wurden teilweise durch Messungen erhoben, teilweise von den Wiener Linien zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und die Dauer des Fahrgastwechsels wurden jeweils als Zufallsgrößen modelliert und sind durch Mittelwert und Standardabweichung definiert. Die Simulation wurde mittels MATLAB in jeweils für Haupt- und Nebenverkehrszeit repräsentativen Zeiträumen durchgeführt.

Die Simulation zeigt, dass bei Anwendung der backward headway – Methode bei geeigneter Wahl von α und β gegenüber dem planmäßigen Ist-Zustand erheblich kürzere und gleichzeitig stabile Intervalle möglich sind. Bei der Wahl von Anzahl und Position der Kontrollpunkte muss eine Abwägung zwischen möglichst stabilen und kurzen Intervallen und möglichst kurzen Reisezeiten für die Fahrgäste getroffen werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen auch, dass das Verfahren backward headway im Vergleich zum derzeitigen Betriebskonzept eine Reduktion um ein bis zwei Fahrzeuge in der Hauptverkehrszeit bei weiterhin stabilen Intervallen ermöglicht. Dabei wird auch das gegenwärtige planmäßige Intervall von 180 s in der Hauptverkehrszeit eingehalten. Diese Ergebnisse sind ein Hinweis darauf, dass Potential zu einer ökonomischeren Betriebsführung vorhanden ist. Schließlich ist ein weiterer Vorteil des Verfahrens, dass durch seine Anwendung die manuellen dispositiven Eingriffe voraussichtlich stark reduziert werden können.

Abstract

Lines of urban public transport with short intervals and high passenger demand have a basic tendency to interval deviations. These are caused by initially slight delays. At following stops, more than the usual number of passengers will have arrived and these will take longer to load. This will lead to a further growth of the delays. Without countermeasures, this process finally leads to the bunching phenomenon. The consequences are operating irregularities and increased waiting times for passengers at the stops.

Traffic operators usually tackle this problem by installing slack in the timetables, mostly at the end stops. Thereby delays shall be compensated and the scheduled operations shall be maintained. Due to short intervals in the inner city areas, new approaches refuse the concept of a pre-defined schedule and instead focus on ensuring regular intervals. The backward headway method pursues this goal and provides dynamic slack times at one or more control points in the course of the line. At these control points, the vehicles are each delayed by a weighted headway to the following vehicle and thereby continuously converge to an equilibrium value. α is a control parameter which is used to weight the headways. A further parameter β specifies a minimum value for the headways at the control point.

The method was applied in a slightly modified way in a simulation of the operation of the Viennese tram line 43. Due to high passenger demand and short intervals, this line has strong tendencies to unstable intervals. For the simulation, data on the travel times between individual stops and the number of passengers were needed. Furthermore, data was required on how dwell times depend on the number of persons entering and leaving a vehicle. These data were partly collected by measurements, partly provided by the public transport operator Wiener Linien. The travel times between the stops and the dwell times were modeled as random variables and are defined by mean value and standard deviation. The simulation was carried out by means of MATLAB in periods of time which are representative for peak and off-peak hours.

The simulation shows that if the backward headway method is applied and α and β are chosen properly, intervals are considerably shorter and more stable compared to the scheduled current state. The most stable and shortest intervals and the shortest possible travel times for the passengers cannot be attained at the same time. Therefore, when choosing the number and position of the control points, a trade-off between this two aims must be found. The results of the simulation also show that the backward headway method allows deploying one or two vehicles less, compared to the current operating concept in the rush hour. Stable intervals and the current scheduled interval of 180 s can be maintained with the reduced number of deployed vehicles. These results are an indication that there is potential for more efficient operations. Finally, another advantage of the method is that manual dispatching could be greatly reduced.

Inhalt

Danksagung.....	2
Kurzfassung.....	3
Abstract.....	4
1. Einleitung.....	8
1.1. Motivation und Zielsetzung.....	8
1.2. Vorgehensweise	8
1.3. Aufbau der Arbeit.....	9
2. Grundlagen.....	10
2.1. Fahrplan.....	10
2.2. Disposition.....	12
2.2.1. Ziele und Maßnahmen der Disposition.....	12
2.2.2. Rechnergestützte Betriebsleitsysteme	13
2.3. Fahrplanabhängigkeit der Ankunftszeit von Fahrgästen an Haltestellen.....	15
2.4. Abweichungen vom Intervall.....	17
2.4.1. Entstehung.....	17
2.4.2. Mathematisches Modell.....	19
3. Methoden zur Intervallstabilisierung	22
3.1. Allgemeines.....	22
3.2. Das Verfahren „backward headway“	23
3.3. Weitere Methoden zur Intervallstabilisierung.....	28
3.3.1. „Forward headway“	28
3.3.2. „Two-Way headway“	28
3.3.3. „Simple control“	28
4. Untersuchungsobjekt: Wiener Straßenbahnlinie 43.....	30
4.1. Allgemeines.....	30
4.2. Intervalle	31
4.3. Fahrzeiten.....	32
4.4. Ausgleichs- und Umlaufzeiten.....	33
4.5. Planmäßiger Fahrzeugauslauf.....	33
5. Simulation.....	35

5.1.	Eingangsdaten.....	35
5.1.1.	Haltestellen.....	35
5.1.2.	Fahrzeuge.....	36
5.1.3.	Fahrzeiten.....	36
5.1.4.	Fahrgastzahlen.....	39
5.1.5.	Fahrgastwechselzeiten.....	46
5.2.	Umsetzung mittels MATLAB.....	48
5.2.1.	Varianten.....	48
5.2.2.	Varianten 1 und 2: Simulation des betrieblichen Ist-Zustands.....	49
5.2.3.	Variante 3: Simulation des Verfahrens backward headway.....	51
5.2.4.	Variante 4: Simulation des Verfahrens backward headway mit reduzierter Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen.....	53
6.	Ergebnisse.....	55
6.1.	Allgemeines.....	55
6.2.	Intervalle.....	55
6.2.1.	Vorgangsweise.....	55
6.2.2.	Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr.....	56
6.2.3.	Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr.....	56
6.2.4.	Anwendung backward headway.....	57
6.3.	Umlaufzeiten.....	60
6.3.1.	Vorgangsweise.....	60
6.3.2.	Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr.....	61
6.3.3.	Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr.....	62
6.3.4.	Anwendung backward headway.....	62
6.4.	Ausgleichszeiten.....	66
6.4.1.	Vorgangsweise und Allgemeines.....	66
6.4.1.	Anwendung backward headway.....	66
6.5.	Reduktion der Fahrzeuge im Umlauf.....	70
7.	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	77
	Abkürzungsverzeichnis.....	79
8.	Abbildungsverzeichnis.....	80
9.	Tabellenverzeichnis.....	82
10.	Literaturverzeichnis.....	84

11. Anhang.....	85
11.1. Anhang A: MATLAB – Skripts.....	85
11.1.1. Hauptberechnung Ist-Zustand.....	86
11.1.2. Hauptberechnung Anwendung backward headway	89
11.1.3. FGWZ-Berechnung	98
11.1.4. Berechnung Ausgleichszeiten	99
11.2. Anhang B: Intervalle, Fahrzeiten und einzuhaltende Zeitabstände aus Kapitel 6. ...	103
11.2.1. Intervalle.....	103
11.2.2. Umlaufzeiten.....	108
11.2.3. Ausgleichszeiten.....	113
11.2.4. Reduktion der Fahrzeuge im Umlauf bei fünf Kontrollpunkten.....	117

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielsetzung

Linien des innerstädtischen öffentlichen Verkehrs mit kurzen Intervallen und großem Fahrgastaufkommen besitzen eine Grundtendenz zu instabilen Intervallen. Als Folge davon ist Pulkbildung (auch Konvoifahren genannt) von Fahrzeugen ein häufig auftretendes Phänomen. Es bezeichnet das direkte Hintereinanderfahren von zwei oder mehr Fahrzeugen einer Linie. Die Tendenz zu instabilen Intervallen kann verhindert werden, wenn ausreichende Kontrolle über das Intervall ausgeübt wird. Geschieht das nicht, verstärken sich die Intervallabweichungen von selbst und führen zur Pulkbildung. Diese verursacht stark variierende und längere durchschnittliche Wartezeiten für die Fahrgäste, da das verspätete Fahrzeug wesentlich mehr Fahrgäste befördert als das dahinter fahrende. Weitere Folgen sind Unregelmäßigkeiten im Betrieb und stark variierende Nutzung von Platzkapazitäten in den Fahrzeugen. Das öffentliche Image der Verkehrsbetriebe kann darunter leiden.¹

In den letzten Jahren finden moderne Ortungsmöglichkeiten und rechnergestützte Betriebsleitsysteme zunehmend Einsatz im innerstädtischen öffentlichen Verkehr. Auf Basis dieser neuen Möglichkeiten sind mehrere Verfahren entwickelt worden, die eine Stabilisierung der Intervalle mit Hilfe von dynamisch festgelegten Ausgleichszeiten zum Ziel haben. Diese Ausgleichszeiten werden an definierten Punkten – sogenannten „Kontrollpunkten“ – entlang der Strecke in den Betriebsablauf eingebaut. In der vorliegenden Arbeit soll eines dieser Verfahren zur Intervallstabilisierung angewendet werden. Das dazu ausgewählte Verfahren „backward headway“ ist einfach zu implementieren und arbeitet im Unterschied zu anderen Methoden ausschließlich mit dem Einsatz von Ausgleichszeiten, also mit dem Verlangsamen eines Fahrzeugs. Als Folge der stabileren Intervalle ist eine höhere Kundenzufriedenheit zu erwarten. Möglicherweise erlaubt das Verfahren auch den Einsatz von weniger Fahrzeugen bei gleichbleibenden Intervallen, d.h. eine ökonomischere Betriebsweise. Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen der Anwendung von backward headway auf eine ausgewählte Linie des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu untersuchen.

1.2. Vorgehensweise

Als Untersuchungsgegenstand wurde die Wiener Straßenbahnlinie 43 ausgewählt. Auf dieser Linie gibt es ein hohes Fahrgastaufkommen (FG-Aufkommen); häufig treten Abweichungen von den planmäßigen Intervallen und Pulkbildung auf. Die folgenden Betrachtungen fokussieren daher auf Linien des ÖPNV im Straßenraum. Bei diesen sind im Unterschied zu den vom Straßenraum getrennten Verkehrsmitteln wie der U-Bahn die Fahrzeiten zwischen zwei Haltestellen breiter gestreut, was Intervallabweichungen begünstigt. Grund dafür sind Einflüsse aus dem Straßenverkehr wie z.B. Behinderungen durch andere Fahrzeuge oder Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA).

¹ Vgl. z.B. <https://www.morgenpost.de/berlin/article114078830/M29-ueber-den-Bus-der-Hoelle-spricht-ganz-Berlin.html>, Zugriff am 9.10.2017.

Die Anwendung der Methode backward headway wird modellhaft beschrieben und mittels des Programms MATLAB simuliert. Für die Simulation sind Daten beispielsweise zu Fahrgastaufkommen, durchschnittlichen Fahrzeiten zwischen den Haltestellen, Fahrgastwechselzeiten etc. notwendig. Diese Daten wurden teilweise von den Wiener Linien zur Verfügung gestellt, teilweise durch eigene Messungen erhoben.

Es wird zunächst eine Simulation des derzeitigen betrieblichen Ist-Zustandes durchgeführt. Anschließend wird der Betrieb unter Anwendung des Verfahrens backward headway simuliert. Dabei werden die zur Verfügung stehenden Parameter dieses Verfahrens wie z.B. die Anzahl und Position der Kontrollpunkte variiert. Es können damit Aussagen darüber getroffen werden, wie sich Intervalle, Umlauf- und Ausgleichszeiten mit der Variation dieser Parameter verändern. Das größte Fahrgastaufkommen und damit auch die größte Wahrscheinlichkeit für Intervallabweichungen bestehen in der Hauptverkehrszeit. Die Untersuchung des Verfahrens backward headway wird daher für den Zeitraum von 15-19 Uhr durchgeführt, der als für die Hauptverkehrszeit repräsentativ betrachtet wird. Für den Ist-Zustand wird zusätzlich der Betriebszustand in der Nebenverkehrszeit im Zeitraum von 10-12 Uhr untersucht, damit die Qualität und Funktionsweise der Simulation des Ist-Zustandes besser eingeschätzt werden kann.

Die Ergebnisse dieser Simulationen werden jeweils hinsichtlich Intervallen, Umlaufzeiten der Fahrzeuge und Ausgleichszeiten ausgewertet und miteinander verglichen. Dadurch sind Aussagen über die Auswirkungen der Anwendung des Verfahrens backward headway im Vergleich zum derzeitigen Betriebsmodus möglich.

1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen für die Abhandlungen dieser Arbeit beschrieben. Diese beinhalten den Fahrplan und seine Aufgaben sowie mögliche Maßnahmen der Disposition zur Gewährleistung oder Wiederherstellung des Fahrplans. Danach wird der Prozess der Pulkbildung in einem mathematischen Modell dargestellt. Abschließend erfolgt eine Klärung der für die Entstehung von Intervallinstabilitäten wichtigen Frage, inwiefern die Ankunftszeit von Fahrgästen an Haltestellen abhängig vom Fahrplan ist.

Kapitel 3 stellt einige Methoden zur Intervallstabilisierung vor. Dabei wird hauptsächlich auf das Verfahren backward headway näher eingegangen, auf dessen Basis die Simulation durchgeführt wird.

In Kapitel 4 erfolgt eine Darstellung des derzeitigen betrieblichen Planzustandes. Kapitel 5 beschäftigt sich schließlich mit den Simulationen des Betriebs. Dabei werden die Eingangsdaten in die Simulationen erläutert und die Implementierung mittels MATLAB beschrieben.

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Kapitel 6 diskutiert. In Kapitel 7 finden sich schließlich eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

2. Grundlagen

2.1. Fahrplan

Unter einem Fahrplan wird laut Pachl für die Eisenbahn „*allgemein die vorausschauende Festlegung des Fahrtverlaufs der Züge verstanden.*“² Diese allgemeine Definition eines Fahrplans wird in der vorliegenden Arbeit auch für innerstädtische Verkehrsmittel wie Straßenbahn und Bus verwendet.

Im Eisenbahnbetrieb bei Vollbahnen ist das Fahren in einer vorgegebenen Fahrplanlage aus verschiedenen Gründen wichtig. Hansen und Pachl geben folgende Funktionen von Fahrplänen an³:

- a) Koordination der Zugtrassen zur optimalen Ausnutzung der Infrastrukturkapazität,
- b) Gewährleistung von Vorhersehbarkeit und damit Sicherheit des Zugverkehrs,
- c) Voraussetzung für Zugsicherung und -steuerung,
- d) die Erzeugung von Fahrplandaten, die weiterverarbeitet werden können, z.B. zur Fahrgastinformation,
- e) Ermöglichung von Fahrzeug- und Personalplanung.

Darüber hinaus können noch weitere Funktionen angeführt werden:

- f) Schaffung von Planbarkeit für die Kunden im Güter- und Personenverkehr,
- g) Möglichkeit der Generierung von Fahrplanschemen wie dem Taktfahrplan,
- h) Erfüllung der Fahrplanaushangpflicht im Personenverkehr, sofern es eine gibt (wie beispielsweise in §22 (2) Eisenbahngesetz 1957⁴ und in §12 (1) Eisenbahn-Beförderungs- und Fahrgastrechtegesetz⁵ in Österreich oder in §40 (4) Personenbeförderungsgesetz⁶ in Deutschland festgelegt).

Bei in kurzen Intervallen verkehrenden Linien des innerstädtischen ÖPNV im Straßenraum sind nicht alle dieser Fahrplanfunktionen relevant. Die Fahrzeuge fahren auf Sicht und nicht im Raumabstand. Die Fahrplanfunktionen a und b spielen daher keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Eine mit der Vollbahn vergleichbare Sicherung und Steuerung des Verkehrs (Funktion c) gibt es bei Straßenbahn und Bus im Regelfall nicht. Eine Ausnahme können Straßenbahnsysteme bilden, die auf komplexen eigenen Gleiskörpernetzen verkehren. Aufgrund der Fokussierung auf Linien mit kurzen Intervallen spielt das Thema der exakten Planbarkeit einer Reise (Funktion f) nur eine untergeordnete Rolle. Die Anschlusssicherung ist im Regelbetrieb erfüllt, ohne dass spezielle Abstimmungsmaßnahmen im Fahrplan vorgenommen werden müssen. Umsteigezeiten von wenigen Minuten sind immer gegeben. Auch ein Taktfahrplan (Funktion g) ist bei Intervallen von wenigen Minuten ohne Relevanz. Als im innerstädtischen ÖPNV von Bedeutung verbleiben folgende Fahrplanfunktionen:

² Pachl, 2013, S.169.

³ Vgl. Hansen/Pachl, 2008, S.9.

⁴ Eisenbahngesetz 1957, BGBl. Nr. 60/1957.

⁵ Eisenbahnbeförderungs- und Fahrgastrechtegesetz, BGBl. I Nr. 40/2013.

⁶ Personenbeförderungsgesetz, BGBl. I Nr. 40/1990.

- Erzeugung von Fahrplandaten,
- Ermöglichung von Fahrzeug- und Personalplanung,
- Erfüllung der Fahrplanausgangspflicht im Personenverkehr.

Die vorausschauende Festlegung des Fahrtverlaufs kann zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen. Festlegungen zu Ankunfts- und/oder Abfahrtszeiten von Fahrzeugen an den Haltestellen können lange im Vorhinein getroffen werden, im Zeitraum von Monaten oder sogar Jahren. Sie können aber auch kurzfristig erfolgen, im Zeitraum von Stunden oder Minuten vor den im Fahrplan angegebenen Zeiten. In allen Fällen, in denen die Zuordnung im Vorhinein getroffen wird, wird sie extern festgelegt. Es werden immer Zeiten vorgegeben, die das Fahrpersonal der Fahrzeuge einzuhalten versucht. Dementsprechend wird diese Art der Fahrplangestaltung im Folgenden „Fahren in einer vorgegebenen Fahrplananlage“ genannt. Der vorab konstruierte Fahrplan beschreibt den Soll-Betriebsablauf.⁷

Denkbar wäre aber auch, dass ein Fahrtablauf nicht im Vorhinein festgelegt wird, sondern erst im aktuellen Augenblick entsteht. Eine vorausschauende Festlegung des Fahrtverlaufs gibt es in diesem Fall nicht mehr. Eine derartige Betriebsgestaltung würde ohne einen Fahrplan im definierten Sinn funktionieren. Diese Art der Betriebsgestaltung wird im Folgenden „Fahren in einer dynamischen Fahrplananlage“ genannt. Verfahren, die auf dieser Basis arbeiten, fokussieren anstelle der Einhaltung eines Fahrplans meistens auf die Einhaltung oder Generierung eines stabilen Intervalls.⁸

In der Realität kann es aus den verschiedensten Gründen zu Abweichungen vom Fahrplan kommen. Darauf hat bereits Potthoff 1962 hingewiesen und die Abweichungen in Anlehnung an das Phänomen bei der Informationsübertragung als „*statistisches Rauschen der Verkehrsströme*“ bezeichnet.⁹ Die Ursachen für die Fahrplanabweichungen können im Fall von im Straßenraum verkehrenden Linien des öffentlichen Verkehrs beispielsweise unterschiedlich lange Stehzeiten vor VLSA oder Verkehrsbehinderungen durch Dritte sein. Auch Variationen im Fahrgastandrang oder unterschiedlich lange FG-Wechselzeiten können Abweichungen von den Fahrplanzeiten verursachen.

Die Fahrzeit zwischen den Haltestellen kann bei vorgegebenem Fahrzeugtyp und bekannter Strecke rechnerisch oder auch grafisch bestimmt werden. Bei im Straßenraum verkehrenden Linien wird oft eine vereinfachte Vorgangsweise gewählt und die Fahrzeit mittels Messungen bestimmt.¹⁰ Die Dauer der Aufenthaltszeit an einer Haltestelle kann bei bekanntem Fahrgastzufluss zur Haltestelle entweder anhand von Erfahrungswerten geschätzt oder bei zusätzlichen Kenntnissen über die FG-Wechselzeit pro Fahrgast berechnet werden.

⁷ Vgl. Pacht, 2013, S.169.

⁸ Vgl. z.B. Daganzo, 2009, S.913ff., oder Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.481ff.

⁹ Potthoff, 1962, S.15.

¹⁰ Vgl. Rüger, 1974, S.36

2.2. Disposition

2.2.1. Ziele und Maßnahmen der Disposition

Disposition bezeichnet die Tätigkeiten zur Regulierung und Beeinflussung des Betriebsablaufs auf der Grundlage einer Erfassung und Analyse des aktuellen Betriebszustandes.¹¹ Konkrete Ressourcen (Fahrzeuge und Personal) sollen dabei in den verschiedenen Störungssituationen zeitnah eingesetzt werden.

Durch Intervallinstabilitäten können Verspätungen, Pulkbildung und auch größere Betriebsstörungen entstehen. Verkehrsbetriebe versuchen, diese Betriebsstörungen durch dispositive Eingriffe zu beseitigen. Konzepte zur automatischen Intervallstabilisierung und Verhinderung von Pulkbildung können auch als im Hintergrund selbstständig ablaufende, kontinuierliche Dispositionsmaßnahmen gesehen werden.

Die Ziele der dispositiven Maßnahmen sind¹²:

- Eindämmung der Störung: Es soll z.B. verhindert werden, dass weitere Fahrzeuge in unterbrochene Streckenabschnitte einfahren und dort „stranden“. Auch die Ausbreitung von Verspätungen auf andere Linien durch Anschlussbeziehungen oder Fahrzeugübergänge soll verhindert werden. Als Fahrzeugübergang wird der Wechsel eines Fahrzeugs von einer Linie auf eine andere bezeichnet. Schließlich kann eine Störung auch Auswirkungen auf die Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung haben, die gering gehalten werden sollen.
- Auf den gestörten Streckenabschnitten soll ein zumindest eingeschränkter Betrieb möglichst schnell wiederaufgenommen werden.
- Während Bestehen der Störung sollen z.B. durch Schaffung von Ausweichmöglichkeiten und Fahrgastinformation darüber Ersatzmaßnahmen angeboten werden.

Störungen sind unvorhergesehene Ereignisse, die die Anwendung von Maßnahmen zur Wiederherstellung der planmäßigen Betriebsabwicklung notwendig machen. Als Störung bezeichnet man¹³:

- Eine Unterbrechung des Laufwegs,
- (Große) Verspätungen,
- Kapazitätsengpässe durch unvorhergesehene Nachfrage,
- Personalausfall und
- Fahrzeugausfall.

Wird der Laufweg beispielsweise durch eine Baustelle unterbrochen, können verschiedene dispositive Maßnahmen ergriffen werden, wie z.B.¹⁴:

- Einrichtung eines Gleiswechselbetriebs, d.h. (bei Vorhandensein von zwei Gleisen) Betrieb in beide Richtungen auf dem nicht unterbrochenen Gleis.

¹¹ Vgl. Schnieder, 2015, S.151.

¹² Ebd., S.152.

¹³ Ebd., S.152.

¹⁴ Ebd., S.153ff.

- Einrichtung eines Kehrbetriebs: Die Fahrzeuge wenden zu beiden Seiten des gesperrten Streckenabschnitts. Das Wenden vor dem planmäßigen Endpunkt wird als „Kurzwende“ oder „Kurzführung“ bezeichnet.
- Einrichtung eines Pendelbetriebs auf dem gestörten Streckenabschnitt oder auf Teilen davon. Diese Betriebsform schließt an mindestens einer Endstelle an die planmäßige Linie an und ermöglicht eine (teilweise) Bedienung von andernfalls nicht angefahrenen Haltestellen. Ein Pendelbetrieb kann z.B. bei einer baustellenbedingten Umleitung einer Linie auf Teilen der gesperrten Strecke eingerichtet werden. Diese Maßnahme ist in Planung und Durchführung aufwendig und wird meistens nur bei geplanten Baustellen eingesetzt.
- Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs.

Verspätungen können mannigfaltige Ursachen haben. Beispiele für Auslöser von Verspätungen sind zu gering angesetzte Fahrzeiten und Fahrgastwechselzeiten, fehlende Ausgleichszeiten, Störungen an Weichen, Sicherungsanlagen und Fahrzeugen, Verkehrsbehinderungen, ungewöhnlich starker Fahrgastandrang oder Witterungseinflüsse. Verspätungen auf Linien mit mittlerem oder hohem Fahrgastaufkommen haben eine Tendenz zur Selbstverstärkung. Durch Abwarten von Anschlüssen oder den Übergang eines Fahrzeugs auf eine andere Linie können sich die Verspätungen auch auf andere Linien des Netzes ausbreiten.

Dispositive Maßnahmen zur Eindämmung der Verspätungen und Wiederherstellung des planmäßigen Betriebs sind z.B.¹⁵:

- Einsatz von Reservefahrzeugen, die die fahrplanmäßige Position des verspäteten Fahrzeugs übernehmen. Dazu ist allerdings das Vorhalten von Reservefahrzeugen notwendig.
- Kurzwende eines Fahrzeugs und Einsatz in der Gegenrichtung an Stelle eines verspäteten Fahrzeugs,
- Anpassung der zeitlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen zur Wiederherstellung von stabilen Intervallen,
- Aufgabe von Anschlussbeziehungen, um die Übertragung von Verspätungen auf andere Linien eines Netzes zu verhindern.

Die dispositiven Maßnahmen bei Kapazitätsengpässen, Personal- und Fahrzeugausfällen werden mangels Relevanz für das Thema dieser Arbeit nicht erörtert.

2.2.2. Rechnergestützte Betriebsleitsysteme

Die Computertechnik wird seit ihrem Aufkommen fortschreitend auch bei der Disposition von Betriebsabläufen eingesetzt. Das hat in den letzten Jahrzehnten zur Entwicklung von „Rechnergestützten Betriebsleitsystemen“ (RBL) geführt. RBL ermöglichen einen Gesamtüberblick über den Betriebszustand eines Verkehrssystems. Hauptbestandteile eines RBL sind Ortungs-, Kommunikations- und Datenverarbeitungseinrichtungen in den Fahrzeugen

¹⁵ Ebd., S.166ff.

und in einer oder mehreren zentralen Dispositionsstellen.¹⁶ Je nach Funktionalität können auch Kommunikationseinrichtungen zum Fahrgast zu den Bestandteilen eines RBL zählen.

Die Grundfunktionen von RBL sind¹⁷:

1. **Betriebssteuerung:** Das RBL erfasst (beispielsweise über GPS) alle Standorte der teilnehmenden Fahrzeuge. Darauf aufbauend wird ein Vergleich der Ankunfts- und Abfahrtszeiten mit den im RBL hinterlegten fahrplanmäßigen Soll-Zeiten durchgeführt. Die festgestellten Abweichungen werden dem Fahrpersonal und den Mitarbeitern der Dispositionsstelle angezeigt, die darauf reagieren können. Das RBL kann bei Abweichungen auch Maßnahmen zur Wiederherstellung der gewünschten Betriebszustände entweder automatisch einleiten oder der Dispositionsstelle vorschlagen.
2. **Fahrgastinformation:** Für die Nutzer von öffentlichen Verkehrsmitteln sind die Fortschritte in der Fahrgastinformation der sichtbarste Ausdruck des Einsatzes von RBL. Dadurch sind Echtzeitinformationen an Haltestellen, in Fahrzeugen oder auf Mobiltelefonen und im Internet möglich. Die Fahrgäste bekommen aktuelle Informationen zu Abfahrtszeiten, Verspätungen und Störungen.
3. **Qualitätsmanagement:** Vom RBL gelieferte Daten zu Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit und Anschlusssicherheit ermöglichen systematische statistische Auswertungen und die Erstellung von Qualitätskennziffern. In weiterer Folge können Betriebsabläufe und Störungen analysiert und das Verkehrssystem optimiert werden.¹⁸ Die Daten können auch für die Angebotsplanung verwendet werden.

Der Grundfunktion „Betriebssteuerung“ lassen sich folgende Ziele zuordnen:

- Der Betriebsablauf soll optimiert werden. Damit können möglicherweise Einsparungen in den Bereichen Personal, Fahrzeug, Energie und Infrastruktur erzielt werden.
- Die Fahrplan- und Intervalleinhaltung soll verbessert werden.
- Die Anschlusssicherung soll verbessert werden.
- Generell soll eine schnelle und adäquate Reaktion im Störfall ermöglicht werden.
- Beschleunigungsmaßnahmen im ÖPNV sollen unterstützt werden.

Die Fahrplan- und Intervalleinhaltung kann beispielsweise durch Eingriffe des RBL in Verkehrslichtsignalanlagen zur Beschleunigung des ÖPNV verbessert werden. Auch die Einrichtung von temporären Fahrplänen im Störfall ist grundsätzlich möglich. Diese können beispielsweise die Priorität auf die Einhaltung von Intervallen statt auf die Einhaltung der ursprünglich vorgesehenen Fahrplanzeiten legen. In so einem Fall kann ein RBL den Fahrzeugen automatisch geänderte Fahrplanzeiten sowie eventuell einzuhaltende Ausgleichszeiten zur Erreichung der neuen Fahrplanlagen übermitteln.

Systematisches Erkennen von Intervallabweichungen und die möglichst frühzeitige Einleitung von Gegenmaßnahmen sind erst möglich, seit es automatische Methoden zur Fahrzeugortung

¹⁶ Vgl. Boltze et al., 2005, S.41ff.

¹⁷ Vgl. Reupke, 2004, S.49.

¹⁸ Vgl. Boltze et al., 2005, S.42.

gibt.¹⁹ Hierfür können unterschiedliche technische Systeme oder eine Kombination von diesen verwendet werden²⁰:

- Bei der punktuellen Ortung erfolgt die Positionsbestimmung mittels elektromechanischen Kontakten oder Ortsbaken (die Daten werden dabei per Induktion, Infrarot oder Funk übertragen).²¹
- Eine kontinuierliche Ortung der Fahrzeuge kann mittels satellitengestützten Systemen wie GPS oder Galileo durchgeführt werden. Auch zellengestützte Systeme (Mobilfunk) können eine kontinuierliche Ortung gewährleisten.
- Eine andere Möglichkeit zur kontinuierlichen Ortung nutzt den Umstand, dass der ÖPNV üblicherweise als Linienverkehr mit definierter Strecke organisiert ist. Von einem bekannten Anfangspunkt aus kann daher die Position eines Fahrzeugs mittels eines Wegstreckenzählers bestimmt werden. Durch Haltestellenortsinformationen (Türfreigabemeldung) kann die Genauigkeit erhöht werden.

2.3. Fahrplanabhängigkeit der Ankunftszeit von Fahrgästen an Haltestellen

Ein wichtiger Faktor für die Entstehung von Intervallabweichungen ist die zeitliche Verteilung des Zuflusses der Fahrgäste zu den Haltestellen. Erfolgt dieser Zufluss kontinuierlich, begünstigt das sich selbst verstärkende Verspätungs- und Verfrühungsprozesse. Kommt ein Großteil der Fahrgäste hingegen immer erst kurz vor der planmäßigen Abfahrt eines Kurses zur Haltestelle, haben geringe Verspätungen keine selbstverstärkenden Auswirkungen.

Ein Beispiel soll das verdeutlichen: Eine Linie verkehrt im 10-Minuten-Takt. Fahrzeug 1 soll planmäßig um 10:25 Uhr an der Haltestelle 1 sein. Zehn Fahrgäste wollen an dieser Haltestelle in Fahrzeug 1 einsteigen. Sie alle kommen kurz vor der planmäßigen Abfahrt – um 10:24 Uhr – zur Haltestelle. Fahrzeug 1 ist aber drei Minuten verspätet und erreicht die Haltestelle erst um 10:28 Uhr. Für die dort einsteigenden Fahrgäste ergibt sich zwar eine Verspätung von drei Minuten, ansonsten hat die Verspätung von Fahrzeug 1 keine Konsequenzen. Insbesondere sind inzwischen auch nicht mehr Fahrgäste zur Haltestelle gekommen. Die Fahrgäste des nächsten, um 10:35 Uhr verkehrenden Fahrzeugs 2 kommen erst um 10:34 zur Haltestelle. Somit ändert sich die Fahrgastwechselzeit im Vergleich zum pünktlichen Verkehrszustand nicht. Es kommt bei Fahrzeug 1 zu keinen sich selbst verstärkenden Verspätungen, und auch die folgenden Fahrzeuge bleiben von der Verspätung von Fahrzeug 1 unbeeinflusst.

Die Frage, ob und wann sich Fahrgäste bei ihrer Ankunft bei der Haltestelle nach dem Fahrplan orientieren, ist bereits mehrmals untersucht worden. So spricht bereits Rüger 1974 davon, dass bei in kurzen Intervallen verkehrenden Linien des öffentlichen Verkehrs ein vom Fahrplan unabhängiger gleichmäßiger Zustrom der Fahrgäste zu den Haltestellen stattfindet.²² Das gilt

¹⁹ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.482.

²⁰ Vgl. Boltze et al., 2005, S.44.

²¹ Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Rechnergestütztes_Betriebsleitsystem, Zugriff am 3.8.2017.

²² Vgl. Rüger, 1974, S. 79.

nach Rüger bis zu einem Intervall von fünf Minuten. Eine neuere Quelle gibt ein Intervall von bis zu 10 bis 12 Minuten für die USA an.²³

Eine Schweizer Studie zu diesem Sachverhalt aus dem Jahr 2006 stellt eine Untersuchung im Raum Zürich an und kommt zu differenzierteren Ergebnissen:²⁴ Ob Fahrgäste zufällig oder zeitlich gezielt an einer Haltestelle ankommen, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Einfluss haben die Taktfolge, die Merkbarkeit des Takts, die Tageszeit sowie die subjektiv empfundene Pünktlichkeit einer Linie über einen längeren Zeitraum. In der morgendlichen Hauptverkehrszeit (HVZ) gibt es den größten Anteil an Fahrgästen, die gezielt zu einem bestimmten Fahrplankurs zur Haltestelle kommen. Grund dafür ist, dass bei den täglichen Nutzern (Arbeits- und Ausbildungspendler) am häufigsten Kenntnisse über den Fahrplan vorhanden sind. Dabei ist bei Intervallen von weniger als fünf Minuten der Fahrgastzufluss noch zufällig. Ab einem Intervall von fünf Minuten beginnt ein Teil der Fahrgäste, sich nach den veröffentlichten Abfahrtszeiten auszurichten (vgl. Abbildung 1). Voraussetzung dafür ist, dass die Pünktlichkeit einer Linie über einen längeren Zeitraum von den Fahrgästen als gut wahrgenommen wird. Die Fahrpläne von als unpünktlich wahrgenommenen Linien werden hingegen kaum beachtet. Die Fahrgäste erscheinen in so einem Fall in zufälliger Verteilung und damit in einem annähernd gleichmäßigen Zufluss an den Haltestellen.

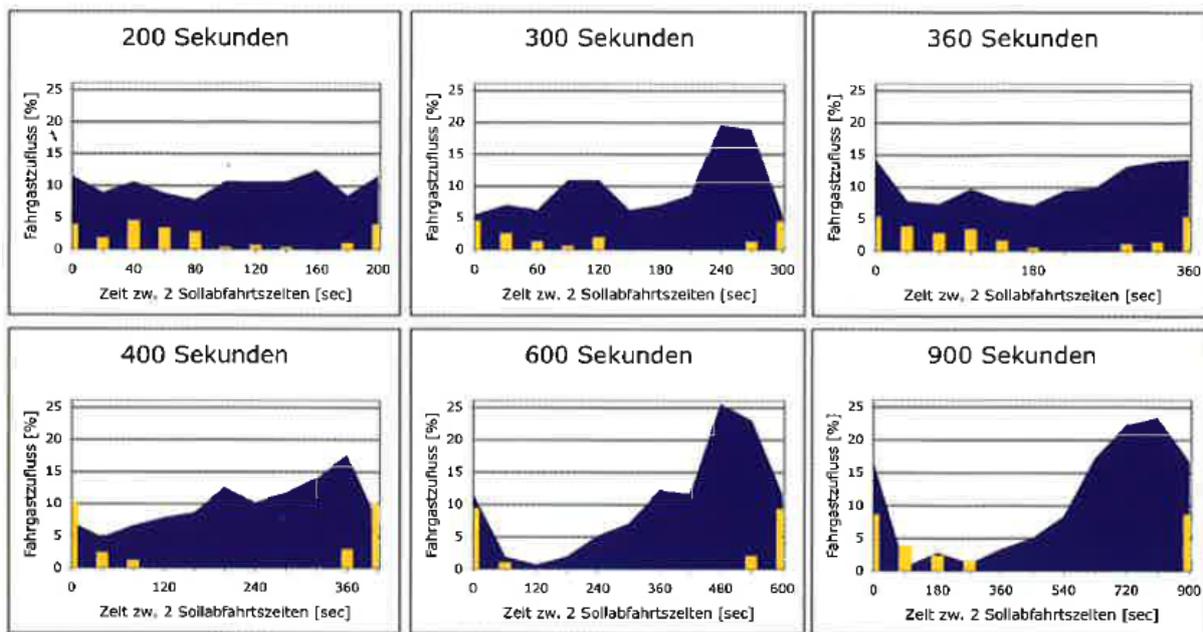


Abbildung 1: Zeitlich mikroskopische Verteilung der Passagierzuflüsse (blau) und Fahrzeugabfahrtszeiten (gelb) an Haltestellen zwischen den Sollabfahrtszeiten in Abhängigkeit der verschiedenen Intervalle zur morgendlichen Hauptverkehrszeit²⁵

Der Einfluss der Merkbarkeit lässt sich in Abbildung 1 gut erkennen. So ist der Anteil der am Fahrplan orientierten Fahrgäste beim gut merkbaren Fünf-Minuten-Takt deutlich größer als beim längeren Sechs-Minuten-Takt. In der abendlichen Hauptverkehrszeit ist der Anteil der gezielt zur Haltestelle gehenden Passagiere bereits reduziert. Noch deutlicher ist der

²³ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S. 481.

²⁴ Vgl. Weidmann/Lüthi, 2006, S.16 ff.

²⁵ Abbildung aus: Weidmann/Lüthi, 2006, S.17.

Unterschied bei den Nebenverkehrszeiten (NVZ, nicht dargestellt). Hier ist erst beim sehr gut merkbaren Zehn-Minuten-Takt eine gezielte Ankunft eines Teils der Passagiere an der Haltestelle erkennbar.²⁶

Ein Eintreffen eines großen Teils der Fahrgäste kurz vor der planmäßigen Abfahrt ist bei keinem der in Abbildung 1 dargestellten Intervalle erkennbar. Ab einem Intervall von 10 Minuten ist bei einem Teil der Fahrgäste aber eine Beeinflussung der Ankunftszeit an den Haltestellen durch die fahrplanmäßigen Abfahrtszeiten festzustellen. Zumindest bis zu dieser zeitlichen Grenze kann daher davon ausgegangen werden, dass der FG-Zufluss zu den Haltestellen kontinuierlich erfolgt. Damit ist eine Voraussetzung für sich selbst verstärkende Verspätungs- und Verfrühungsprozesse erfüllt.

2.4. Abweichungen vom Intervall

2.4.1. Entstehung

Das Phänomen der Pulkbildung (engl. „bus bunching“) ist seit langem bekannt und wurde bereits 1964 von Newell und Potts beschrieben.²⁷ Im deutschen Sprachraum formulierte Rüger 1974 ähnliche Erkenntnisse.²⁸

Die folgenden Betrachtungen setzen eine in regelmäßigen Intervallen verkehrenden Linie des ÖPNV sowie einen kontinuierlichen Zufluss der Fahrgäste zu den Haltestellen voraus. Erreicht ein Fahrzeug eine Haltestelle mit einer leichten Verspätung, sind an dieser Haltestelle mehr Fahrgäste (FG) aufzunehmen als bei fahrplanmäßiger Ankunft (vgl. Kapitel 2.3). Das Aus- und Einsteigen der Fahrgäste dauert daher länger. Die Verspätung wächst in weiterer Folge von Haltestelle zu Haltestelle mehr an.

Das Folgefahrzeug hingegen findet von Haltestelle zu Haltestelle weniger Fahrgäste vor, wodurch sich der Fahrgastwechsel verkürzt. Das Fahrzeug erfährt eine Verfrühung und befindet sich immer mehr vor seiner vorgegebenen Fahrplanlage, bis es schließlich das vordere Fahrzeug einholt. Das nächste Fahrzeug muss aufgrund der Verfrühung des Fahrzeugs vor ihm wieder mehr Fahrgäste transportieren und fällt daher wieder hinter seine Fahrplanzeit zurück. Aufgrund dieses Zusammenhangs besitzen Verkehrsmittel, die in regelmäßigen, kurzen Intervallen verkehren, immer eine Tendenz zur Fahrplanabweichung und zum paarweisen Fahren.

²⁶ Vgl. Weidmann/Lüthi, 2006, S.18.

²⁷ Vgl. Newell/Potts, 1964, S.388ff.

²⁸ Vgl. Rüger, 1974, S.79f.

Abbildung 2 zeigt das grundsätzliche Verhalten der Fahrtverläufe bei Pulkbildung. Die durchgehenden Linien repräsentieren die vorgesehenen Fahrplanlagen der Fahrzeuge. Die unterbrochenen Linien zeigen die Abweichungen, die aufgrund einer geringfügigen Verspätung von Fahrzeug 2 bei Haltestelle 1 entstehen.

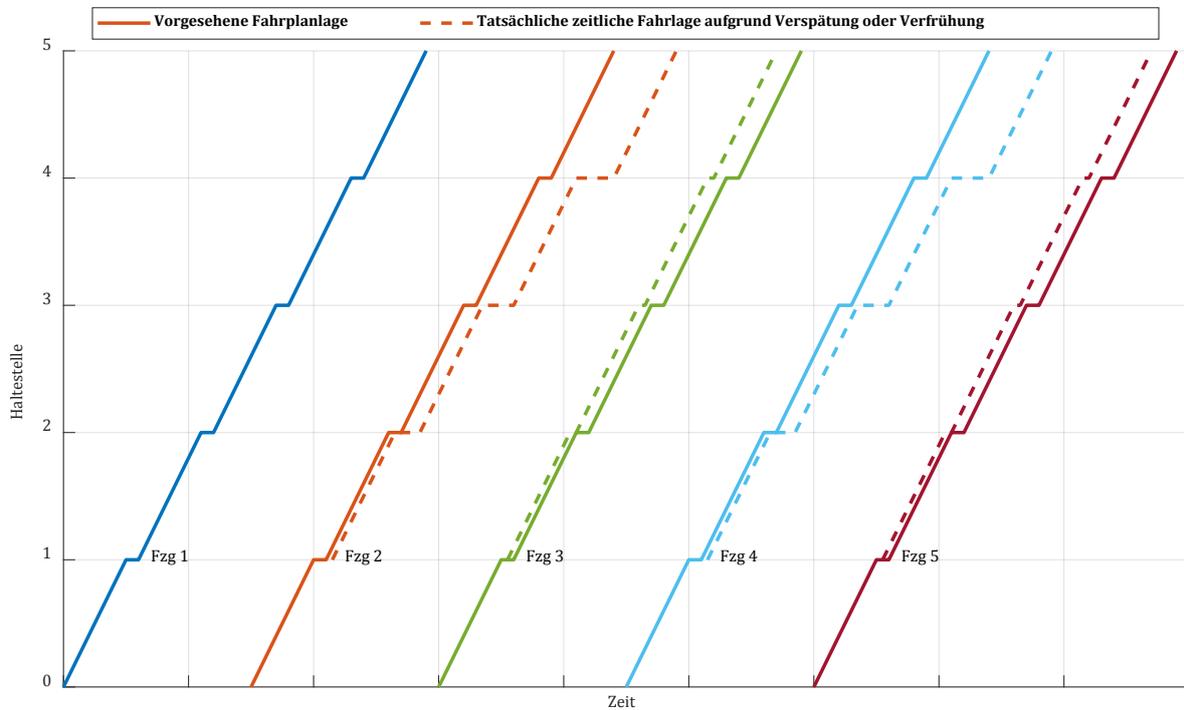


Abbildung 2: Abweichungen vom regelmäßigen Intervall aufgrund einer Initialverspätung²⁹

Abbildung 3 zeigt die Auswirkung der Verspätung von Fahrzeug 2 aus Abbildung 2 auf den Besetzungsgrad und die Fahrzeugfolgezeiten dieses und des folgenden Fahrzeugs. Der Besetzungsgrad gibt die Auslastung eines Fahrzeugs an. Da Fahrzeug 2 verspätet an der Haltestelle eintrifft, verlängert sich die dortige FG-Wechselzeit. Dadurch erhöht sich die Verspätung auf Fahrzeug 1 weiter, und die Auslastung von Fahrzeug 2 steigt an. Demgegenüber sinkt die Auslastung bei Fahrzeug 3.³⁰

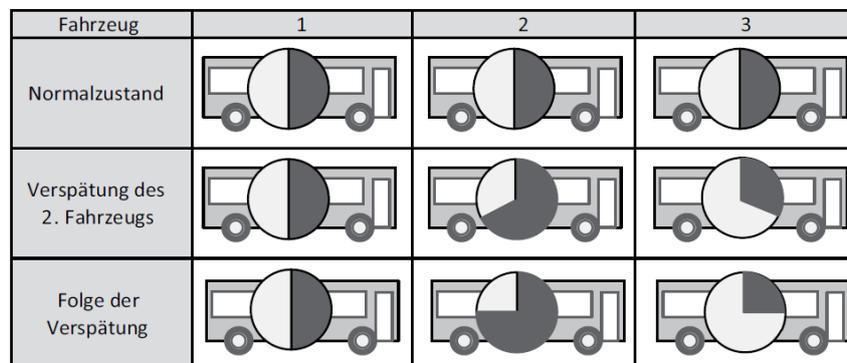


Abbildung 3: Verspätungsauswirkung auf Besetzungsgrad und Fahrzeugfolgezeit³¹

²⁹ Abb. nach Newell/Potts, 1964, S.389.

³⁰ Vgl. Schnieder, 2015, S.165.

³¹ Abb. aus: Schnieder, 2015, S.165. Grafik dort in Anlehnung an FGSV 1999.

2.4.2. Mathematisches Modell

Im Folgenden wird die Entstehung von Intervallabweichungen nach dem von Newell und Potts entworfenen Modell dargestellt.³² Dafür wird folgende Notation verwendet:

$m \dots$ Fahrzeugkurs Nr. 0, 1, 2, 3, ...

$s \dots$ Haltestelle Nr. 0, 1, 2, 3, ...

$t_{ms} \dots$ Zeit, zu der ein Fahrzeug m die Haltestelle s verlässt (gemessen von $t_{00} = 0$)

$t_{FZ,ms-1,s} \dots$ Fahrzeit von Fahrzeug m zwischen $s - 1$ und s

$k_{ms} \dots \frac{\text{Fahrgastzuflussrate zu Haltestelle } s}{\text{Fahrgasteinstiegsrate von Fahrzeug } m}$, wobei $0 < k_{ms} < 1$

$t_{PI} \dots$ Planmäßiges Intervall

$\gamma \dots$ Initialverspätung von Fahrzeug 1 an der Haltestelle 1

k_{ms} beschreibt das Verhältnis von FG-Zuflussrate zu FG-Einstiegsrate. Die FG-Zuflussrate gibt über den Zufluss von Fahrgästen zu einer Haltestelle s pro Zeiteinheit Auskunft. Die FG-Einstiegsrate beschreibt, wie viele Fahrgäste pro Zeiteinheit in ein Fahrzeug m einsteigen können. Newell und Potts nahmen an, dass beim FG-Wechsel der Einstiegsvorgang wesentlich länger dauert als der Ausstiegsvorgang. Daher werden nur die einsteigenden Fahrgäste berücksichtigt und die FG-Einstiegsrate danach benannt. Je höher die FG-Einstiegsrate ist, desto niedriger ist k_{ms} , und desto geringer ist die Tendenz zu Fahrplanabweichung und Pulkbildung. Ebenerdige Fahrzeugeinstiege, eine ausreichende Anzahl von Türen und kurze Öffnungs- und Schließzeiten ebendieser erhöhen die FG-Einstiegsrate eines Fahrzeugs und senken damit die FG-Wechselzeit.

Die Zuflussdauer bezeichnet die Zeit, die an einer Haltestelle s zwischen der Abfahrt von Fahrzeug $m - 1$ und Ankunft von Fahrzeug m vergeht. Die Grundannahmen für die folgenden Ausführungen sind, dass die FG-Zuflussrate und die FG-Einstiegsrate konstant sind. Zwischen der Anzahl der Fahrgäste an einer Haltestelle s , der FG-Zuflussrate und der FG-Einstiegsrate bestehen folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} &\text{Anzahl FG, die bei Haltestelle } s \text{ in das Fahrzeug } m \text{ einsteigen} = \\ &= \text{FG-Zuflussrate} \cdot \text{Zuflussdauer} = \text{FG-Einstiegsrate} \cdot \text{Einstiegsdauer} \end{aligned} \quad (1)$$

Daher gilt:

$$\text{Einstiegsdauer} = \frac{\text{FG-Zuflussrate}}{\text{FG-Einstiegsrate}} \cdot \text{Zuflussdauer} = k_{ms} \cdot \text{Zuflussdauer} \quad (2)$$

Die Überlegungen zur Einstiegsdauer in Fahrzeug m an der Haltestelle s

³² Vgl. Newell/Potts, 1964, S.388ff.

$$\text{Einstiegsdauer} = t_{ms} - t_{ms-1} - t_{FZ,ms-1,s} \quad (3)$$

und zur Zuflussdauer an der Haltestelle s

$$\text{Zuflussdauer} = t_{ms} - t_{m-1s} \quad (4)$$

führen mit (2) auf

$$t_{ms} - t_{ms-1} - t_{FZ,ms-1,s} = k_{ms} \cdot (t_{ms} - t_{m-1s})$$

$$t_{ms} - k_{ms} \cdot t_{ms} = t_{ms-1} + t_{FZ,ms-1,s} - k_{ms} \cdot t_{m-1s}$$

$$(1 - k_{ms}) \cdot t_{ms} = t_{ms-1} - k_{ms} \cdot t_{m-1s} + t_{FZ,ms-1,s} \quad (5)$$

In weiterer Folge wird vereinfachend angenommen, dass das Verhältnis von FG-Zufluss- und FG-Einstiegsrate k_{ms} und die Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen $t_{FZ,ms-1,s}$ konstant über alle Fahrzeuge und Haltestellen sind:

$$k_{ms} = k, \quad t_{FZ,ms-1,s} = t_{FZ} \quad (6)$$

Mit den vereinfachten Ausdrücken wird (5) zu

$$(1 - k) \cdot t_{ms} = t_{ms-1} - k \cdot t_{m-1s} + t_{FZ} \quad (7)$$

Eine weitere Annahme ist, dass alle Fahrzeuge die Haltestelle 0 mit gleichbleibendem zeitlichen Abstand t_{pI} verlassen:

$$t_{m0} = m \cdot t_{pI} \quad (8)$$

Damit ist die Zuflussdauer der Fahrgäste bei planmäßigem Verkehr bei jeder Haltestelle exakt t_{pI} und die Einstiegsdauer immer $k \cdot t_{pI}$ (aus (2)).

Der Zeitpunkt t_{ms} , zu dem ein Fahrzeug m die Haltestelle s verlässt, setzt sich aus den Fahrzeiten zwischen den Haltestellen, den Einstiegszeiten an den Haltestellen und der zeitlichen Position des Fahrzeugkurses im Fahrplangefüge zusammen. D.h.:

$$t_{ms} = s \cdot t_{FZ} + k \cdot t_{pI} \cdot s + m \cdot t_{pI}$$

$$t_{ms} = (m + ks) \cdot t_{pI} + st_{FZ} \quad (9)$$

Nun wird der Fall betrachtet, dass Fahrzeug 1 in der Haltestelle 1 eine Verspätung γ erfährt. Dabei bleiben (7) und (8) unverändert. (9) wird für Fahrzeug 1 bei Haltestelle 1 zu

$$t_{11} = (1 + k) \cdot t_{pI} + t_{FZ} \quad (10)$$

Für Fahrzeug 0 (das keine zusätzliche Verspätung erfährt) wird (9) an der Haltestelle s ($s \geq 0$) zu

$$t_{os} = (0 + ks) \cdot t_{PI} + st_{FZ} = s \cdot (kt_{PI} + t_{FZ}) \quad (11)$$

Newell und Potts erhalten aus dem System der Gleichungen (7), (8), (10) und (11) für $m, s \geq 1$ folgende Lösung:

$$t_{ms} = (m + ks)t_{PI} + st_{FZ} + \gamma \frac{(s + m - 2)!}{(s - 1)! (m - 1)!} \left[\frac{k}{k - 1} \right]^{m-1} \left[\frac{1}{1 - k} \right]^{s-1} \quad (12)$$

Für den Fall $\gamma = 0$ wird (12) wieder zu (9).

Zur Veranschaulichung wird am Beispiel der Fahrzeuge 1 und 2 die durch (12) beschriebene Tendenz zum Verspätungs- bzw. Verfrühungszuwachs gezeigt. Fahrzeug 1 hat eine Verspätung erfahren:

$$t_{1s} = (1 + ks)t_{PI} + st_{FZ} + \gamma \left[\frac{1}{1 - k} \right]^{s-1} \quad (13)$$

Der Ausdruck $\gamma \left[\frac{1}{1 - k} \right]^{s-1}$ gibt die Zeit an, die sich das Fahrzeug hinter dem Fahrplan befindet. Aus $0 < k < 1$ ergibt sich, dass

$$\frac{1}{1 - k} > 1 \quad (14)$$

Mit zunehmendem s wird der Verspätungsterm daher immer größer. Fahrzeug 1 fällt immer mehr hinter die vorgegebenen Fahrplanzeiten zurück.

Die Abfahrtszeiten von Fahrzeug 2 ergeben sich aus (12) mit der Vereinfachung $\frac{s!}{(s-1)!} = s$ wie folgt:

$$t_{2s} = (2 + ks)t_{PI} + st_{FZ} + \gamma s \left[\frac{k}{k - 1} \right]^1 \left[\frac{1}{1 - k} \right]^{s-1} \quad (15)$$

Der Ausdruck $\gamma s \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[\frac{1}{1-k} \right]^{s-1}$ gibt die Abweichung vom Fahrplan an. Aus $0 < k < 1$ folgt, dass $\frac{k}{k-1} < 0$. Der Ausdruck $\gamma s \left[\frac{k}{k-1} \right]^1 \left[\frac{1}{1-k} \right]^{s-1}$ ist somit negativ und gibt eine Verfrühung an, die mit fortschreitendem Fahrtverlauf immer größer wird. Das Vorzeichen von $\left[\frac{k}{k-1} \right]^{m-1}$ wechselt mit m . Die Fahrzeuge geraten daher abwechselnd hinter bzw. vor die Fahrplanzeiten.

Dieses einfache Modell nach Newell und Potts beschreibt unter idealisierten Rahmenbedingungen die Entstehung von Intervallabweichungen. Ein Gleichungssystem, das ein tatsächliches Betriebsgeschehen abbilden soll, wäre komplexer als das angeführte. Es müsste z.B. berücksichtigen, dass k und t_{FZ} in der Realität nicht konstant, sondern von Zeit, Fahrzeug und Haltestelle abhängige Variablen sind.

3. Methoden zur Intervallstabilisierung

3.1. Allgemeines

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, zwei Fahrzeuge, die zu eng hintereinander fahren, zu separieren.³³ Die erste Strategie besteht darin, das erste Fahrzeug schneller fahren zu lassen. In der Praxis ist das aber aufgrund des häufig dichten Verkehrsaufkommens in Städten schwierig oder gar nicht umsetzbar. Eine Umsetzungsoption wäre beispielsweise, Haltestellen auszulassen. Dadurch würden aber einerseits Fahrgäste an diesen Haltestellen zurückgelassen, andererseits könnten die Fahrgäste an diesen Haltestellen auch nicht aussteigen. Sie müssten auf das nächste Fahrzeug warten bzw. an der Haltestelle davor oder danach aussteigen. Manche Autoren halten eine derartige Strategie vor dem Hintergrund von kurzen Intervallen im innerstädtischen Bereich trotzdem für vertretbar.³⁴ Andere Ansätze schlagen Überholvorgänge, die Limitierung der Zahl an einsteigenden Fahrgästen oder Halte nur zum Aussteigen vor.³⁵ Aufgrund der schwierigen Umsetzbarkeit von Strategien zur Beschleunigung von Fahrzeugen werden diese hier nicht weiter betrachtet.

Die üblicherweise angewendete, zweite Strategie besteht darin, das zweite Fahrzeug langsamer fahren zu lassen. Dazu werden (bei Vorhandensein eines Fahrplans) im Fahrplan Ausgleichzeiten vorgesehen.³⁶ Für eine Strecke wird eine Fahrplanzeit kalkuliert, innerhalb derer ein Fahrzeug die Strecke bewältigen soll. Auf diese kalkulierte Zeit wird zusätzlich die Ausgleichszeit aufgeschlagen. An definierten Punkten wartet das Fahrzeug die Ausgleichszeit ab, üblicherweise an einer oder beiden Endhaltestellen. Die Ausgleichszeit, die ein Fahrzeug an den Endhaltestellen einhalten muss, ist länger, wenn es sich vor den Fahrplanzeiten befindet, und kürzer, wenn es Verspätung hat.³⁷ Bei großen Verspätungen kann es sein, dass die vorgesehene Ausgleichszeit nicht ausreicht. In diesem Fall verlässt das Fahrzeug die Endhaltestelle nach seinem Eintreffen unmittelbar wieder und nimmt einen Teil seiner Verspätung mit.

Im oben beschriebenen Ablauf ist der Einsatz von Ausgleichzeiten an das Konzept von vorgegebenen Fahrplanlagen gebunden. Ziel ist die Gewährleistung der pünktlichen Abfahrt an den definierten Punkten. Die Gewährleistung eines stabilen Intervalls ist eine Folge davon. Viele städtische Verkehrsbetriebe gehen nach diesem Prinzip vor.

Bei der Kalkulation der Ausgleichzeiten muss zwischen zwei konkurrierenden Aspekten abgewogen werden: Einerseits sollen sie groß genug sein, um ein zuvor festgelegtes Verspätungsausmaß kompensieren zu können. Andererseits reduzieren die Ausgleichzeiten die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Fahrzeugs auf seinem Umlauf. Für ein bestimmtes angestrebtes Intervall auf einer Strecke sind umso mehr Fahrzeuge notwendig, je größer die Ausgleichzeiten sind. Wirtschaftliche Aspekte sprechen also dafür, die Ausgleichzeiten so klein wie möglich zu halten. Dieses Spannungsfeld wird im weiteren Verlauf der Arbeit aber nicht mehr weiter ausgeführt. Die vorliegende Arbeit soll die grundlegende Wirksamkeit von

³³ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, S.482.

³⁴ Ebd.

³⁵ Ebd.

³⁶ Vgl. Daganzo, 2009, S.913.

³⁷ Vgl. Xuan et al, 2011, S.1832.

Methoden zur Intervallstabilisierung erheben, weshalb die Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten nicht erforderlich ist.

3.2. Das Verfahren „backward headway“

Auch das nachfolgend beschriebene idealisierte Modell arbeitet mit einer Verlangsamung der Fahrzeuge. Es verfolgt dabei aber das Prinzip des Fahrens in einer dynamischen Fahrplanlage (vgl. Kapitel 2.1). Das Modell wurde 2012 von Bartholdi und Eisenstein publiziert.³⁸ Diese gehen davon aus, dass ein vorab festgelegtes, statisches Intervall in vielen Fällen nicht das optimale Intervall ist. Dieses sei nicht statisch und üblicherweise vorab nicht bekannt. Das optimal erreichbare Intervall verändere sich mit der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, dem Verkehrsaufkommen, dem Verhalten des Fahrpersonals und der Fahrgastnachfrage. Zuvor in einem Fahrplan festgelegte Zielintervalle könnten sich an variierende Rahmenbedingungen nicht anpassen. Ist die FG-Nachfrage in einem Linienabschnitt z.B. unerwartet gering, sind die Zielintervalle zu kurz und führen zu nicht genutzten Fahrzeugkapazitäten. Umgekehrt können zuvor festgelegte Intervalle bei hoher FG-Nachfrage zu lang sein, was zu hoher Fahrzeugauslastung und damit oft zu Intervallinstabilität führt.

Bartholdi und Eisenstein schlagen ein Verfahren vor, dass sowohl die Idee eines Fahrens in einer vorgegebenen Fahrplanlage als auch die Idee eines vorgegebenen Intervalls verwirft. Vielmehr sollen die Fahrzeugfolgezeiten durch den Einsatz von ständig neu berechneten Ausgleichszeiten laufend in Richtung eines Gleichgewichtszustands korrigiert werden. Dieser passt sich den sich verändernden Umständen kontinuierlich an. Das vorgestellte Verfahren sei in der Lage, auch bei größeren Störungen (z.B. Ausfall eines Fahrzeugs) für eine Stabilisierung des Intervalls zu sorgen. Die Ziele des Verfahrens sind eine Verringerung der Variation zwischen den Intervallen und im Durchschnitt kürzere Intervalle.

³⁸ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.481ff.

Im Anschluss wird das Verfahren mathematisch erläutert³⁹. Dazu wird folgende Notation verwendet:

- i ... Fahrzeugkurs Nr. 1, 2, ..., n
- FFZ_i ... (Tatsächliche) Fahrzeugfolgezeit zwischen Fahrzeugkurs $i + 1$ und Fahrzeugkurs i
- n ... Gesamtanzahl der Fahrzeuge einer Linie
- x_1^t ... Position von Fahrzeug 1 zum Zeitpunkt t
- \bar{v} ... Durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf der gesamten oder auf einem Teil der Linie
- α ... Faktor, mit dem die Fahrzeugfolgezeit am Kontrollpunkt angepasst wird
- β ... Minimalwert für die Fahrzeugfolgezeit am Kontrollpunkt
- FFZ^* ... Fahrzeugfolgezeit im Gleichgewichtszustand

Die Notation unterscheidet sich von der des Modells von Newell und Potts in Kapitel 2.4.2. Die Größen des einen Modells können nicht ohne weiteres in das andere Modell übertragen werden, weswegen eine jeweils eigene Notation verwendet wurde. So bezeichnet m bei Newell und Potts die verschiedenen Fahrzeugkurse. Im Gegensatz dazu werden diese bei Bartholdi und Eisenstein zu jedem Zeitpunkt t neu durchnummeriert und das letzte Fahrzeug als Fahrzeug n bezeichnet.

Ebenso wie Verfahren, die einen Zielfahrplan oder ein Zielintervall anstreben, arbeitet die vorliegende Methode mit der systematischen Verwendung von Ausgleichszeiten an zuvor definierten Kontrollpunkten. Zur Veranschaulichung wird im Folgenden eine Linie des öffentlichen Verkehrs angenommen, auf der die Fahrzeuge zirkulieren (vgl. Abbildung 4). Die Linie besitzt einen Kontrollpunkt, der ein betrieblicher Endpunkt (z.B. eine Wendeschleife), aber auch ein beliebiger Punkt auf der Strecke sein kann. Das gerade eben am Kontrollpunkt angelangte Fahrzeug wird als Fahrzeug 1 bezeichnet. Die weiteren Fahrzeuge werden in Fahrtrichtung durchnummeriert, bis zum hinter Fahrzeug 1 folgenden Fahrzeug, das Fahrzeug n genannt wird. Die Fahrzeugfolgezeit FFZ_i ist der Zeitabstand zwischen Fahrzeug $i + 1$ und dem Folgefahrgzeug i . In dieser Methode wird die Ausgleichszeit, die Fahrzeug $i + 1$ am Kontrollpunkt einhalten muss, auf Basis der Fahrzeugfolgezeit FFZ_i des Folgefahrgzeugs i berechnet. Diese Fahrzeugfolgezeit wird auch die „rückwärtige Fahrzeugfolgezeit“ („backward headway“) von Fahrzeug $i + 1$ genannt.⁴⁰ FFZ_n steht folglich für die Fahrzeugfolgezeit zwischen den Fahrzeugen n und 1, FFZ_1 für die zwischen den Fahrzeugen 1 und 2 usw. Die von Fahrzeug 1 am Kontrollpunkt einzuhaltende Ausgleichszeit wird mit

$$\alpha \cdot FFZ_n \tag{16}$$

festgelegt. α ist ein zwischen 0 und 1 frei wählbarer Faktor, mit dem die Anfälligkeit einer Linie für Intervallabweichungen berücksichtigt werden kann.

³⁹ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.481ff.

⁴⁰ Vgl. Xuan et al, 2011, S.1831ff.

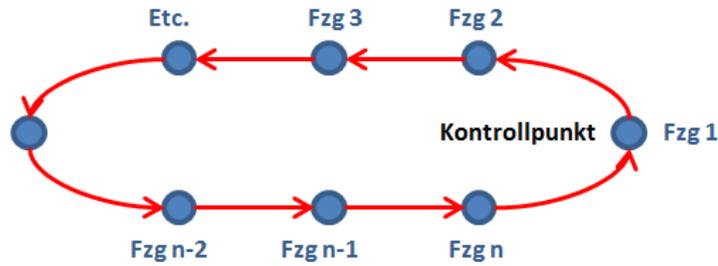


Abbildung 4: Auf einer ÖV-Linie zirkulierende Fahrzeuge

Im Folgenden wird erläutert, wie mit Hilfe von Gleichung (16) die Fahrzeugfolgezeiten laufend an den Gleichgewichtswert FFZ^* angenähert werden. Für das idealisierte Modell wird angenommen, dass n Fahrzeuge mit einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} auf der Linie des ÖV zirkulieren. Die Länge der Linie wird normalisiert mit 1 angegeben. Es gibt einen Kontrollpunkt bei 0 (gleichzeitig 1). Zu jedem Zeitpunkt hat jedes Fahrzeug eine Position $x_i \in (0,1)$ entlang der Linie. Die Zeitpunkte, zu denen die Fahrzeuge am Kontrollpunkt eintreffen, werden mit $t = 1, 2, \dots$ indiziert. Zu jedem solchen Zeitpunkt werden die Fahrzeuge neu nummeriert. Das gerade am Kontrollpunkt eingetroffene Fahrzeug ist immer Fahrzeug 1, das nächste in Fahrtrichtung Fahrzeug 2, etc. Zu jedem Zeitpunkt t bezeichnet der Vektor $x^t = (x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t)$ die Position der Fahrzeuge, wobei $x_1^t = 0$ und $x_1^t < x_2^t < \dots < x_n^t < 1$. Im Gegensatz zur Formulierung bei Bartholdi und Eisenstein wird die Möglichkeit einer identen Position von zwei Fahrzeugen, ausgedrückt durch das Vergleichszeichen \leq , als physikalisch ausgeschlossen angesehen.⁴¹

Im störungsfreien Zustand gilt für die Fahrzeugfolgezeit

$$FFZ_i^t = (x_{i+1}^t - x_i^t) / \bar{v} \quad (17)$$

für alle Fahrzeuge außer für Fahrzeug 1, das nach (16) im Kontrollpunkt eine Ausgleichszeit von $\alpha \cdot FFZ_n^t$ zum Vorderfahrzeug einhalten muss.

Die Fahrzeugfolgezeiten für alle Fahrzeuge im Gleichgewichtszustand, die sich auf der idealisierten Linie mit einem Kontrollpunkt (wie in Abbildung 4 dargestellt) bewegen, werden mit

$$FFZ^* = \frac{1}{(n - \alpha)\bar{v}} \quad (18)$$

definiert. $\frac{1}{\bar{v}}$ beschreibt die Umlaufzeit der Fahrzeuge auf der Linie, deren Länge normalisiert mit 1 angegeben wird.

Im idealisiert störungsfreien Zustand ändert sich die Position der Fahrzeuge zwischen den Zeitpunkten t und $t + 1$ wie folgt:

$$x_1^{t+1} = 0 \quad (19)$$

⁴¹ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.483.

$$x_2^{t+1} = x_1^t + (FFZ_n^t - \alpha FFZ_n^t)\bar{v} \quad (20)$$

x_2^{t+1} und x_1^t beschreiben die Positionen desselben Fahrzeugs zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Fahrzeug 1 wird zum Zeitpunkt $t + 1$ zu Fahrzeug 2 umbenannt. Fahrzeug n ist das Fahrzeug, das sich zum Zeitpunkt t hinter Fahrzeug 1 befindet. FFZ_n^t beschreibt die Fahrzeugfolgezeit zwischen Fahrzeug n und Fahrzeug 1 zum Zeitpunkt t . Auch die Fahrzeugfolgezeiten zwischen allen anderen Fahrzeugen sind gleich FFZ_n^t , da von einem störungsfreien Zustand ausgegangen wird. αFFZ_n^t beschreibt die Ausgleichszeit, die Fahrzeug 1 zum Zeitpunkt t am Kontrollpunkt zusätzlich zur FG-Wechselzeit einhalten muss. Die Zeit FFZ_n^t steht allen Fahrzeugen zwischen den Zeitpunkten t und $t + 1$ zur Fortbewegung und zum FG-Wechsel zur Verfügung. Sie wird für Fahrzeug 1 um die Ausgleichszeit αFFZ_n^t reduziert. Da x_1 zu jedem Zeitpunkt 0 ist (Fahrzeug befindet sich am Kontrollpunkt), kann die Gleichung umgeschrieben werden zu

$$x_2^{t+1} = FFZ_n^t(1 - \alpha)\bar{v} \quad (21)$$

Für $i = 3, \dots, n$ gilt:

$$x_i^{t+1} = x_{i-1}^t + FFZ_n^t\bar{v} \quad (22)$$

Bei ideal ungestörtem Betrieb ändert sich die Fahrzeugfolgezeit zwischen den Fahrzeugen zu verschiedenen Zeitpunkten nicht. Aus (17) kann für alle $i = 3, \dots, n$ geschrieben werden:

$$\begin{aligned} FFZ_i^{t+1} &= \frac{x_{i+1}^{t+1} - x_i^{t+1}}{\bar{v}} = \frac{x_i^t}{\bar{v}} + \frac{FFZ_n^t\bar{v}}{\bar{v}} - \left(\frac{x_{i-1}^t}{\bar{v}} + \frac{FFZ_n^t\bar{v}}{\bar{v}} \right) = \frac{x_i^t - x_{i-1}^t}{\bar{v}} \\ &= FFZ_{i-1}^t \end{aligned} \quad (23)$$

Gleichung (23) beschreibt die Konstanz der Fahrzeugfolgezeiten bei ideal störungsfreiem Betrieb für alle Fahrzeuge $i = 2, \dots, n$.

So kann z.B. für Fahrzeug 2 die Fahrzeugfolgezeit zum Zeitpunkt $t + 1$ angegeben werden als

$$\begin{aligned} FFZ_2^{t+1} &= \frac{x_3^{t+1} - x_2^{t+1}}{\bar{v}} = \frac{x_2^t - x_1^t}{\bar{v}} + FFZ_n^t - FFZ_n^t(1 - \alpha) \\ &= \frac{x_2^t}{\bar{v}} + \alpha FFZ_n^t = (FFZ_1^t - \alpha FFZ_n^t) + \alpha FFZ_n^t = FFZ_1^t \end{aligned} \quad (24)$$

Unter Berücksichtigung von (21) und (23) gilt:

$$FFZ_1^{t+1} = \alpha FFZ_n^{t+1} + \frac{x_2^{t+1}}{\bar{v}} = \alpha FFZ_{n-1}^t + FFZ_n^t(1 - \alpha) \quad (25)$$

Gleichung (25) besagt, dass die Fahrzeugfolgezeit zwischen den Fahrzeugen 1 und 2 zum Zeitpunkt $t + 1$ dem zeitlichen Abstand entspricht, den Fahrzeug 2 zu diesem Zeitpunkt vom Kontrollpunkt entfernt ist, erhöht um die Ausgleichszeit, die Fahrzeug 1 am Kontrollpunkt noch einhalten muss (und die vom zeitlichen Abstand von Fahrzeug n zu Fahrzeug 1 abhängt). Das entspricht wiederum der Ausgleichszeit, die Fahrzeug n zum Zeitpunkt t am Kontrollpunkt einhalten muss (und der vom zeitlichen Abstand von Fahrzeug $n - 1$ zu Fahrzeug n abhängt), erhöht um die Zeit, die Fahrzeug 1 zwischen t und $t + 1$ zur Fortbewegung zur Verfügung steht.

Gleichung (25) gibt den stabilen Zustand des Systems für das erste Fahrzeug an. Die Gleichung verändert zum Zeitpunkt $t + 1$ die Folgezeit jedes neu am Kontrollpunkt ankommenden Fahrzeugs zum Vorderfahrzeug. Die neue Fahrzeugfolgezeit setzt sich aus der mit $(1 - \alpha)$ gewichteten Folgezeit desselben Fahrzeugs zum Zeitpunkt t und der mit α gewichteten Folgezeit des nachfolgenden Fahrzeugs zum Zeitpunkt t zusammen. Wenn die vorherige Folgezeit des am Kontrollpunkt ankommenden Fahrzeugs groß war, dann ist die neue Folgezeit kleiner, und umgekehrt. Im Ergebnis werden die Fahrzeugfolgezeiten ständig an FFZ^* angenähert.

Aus (18) folgt, dass $1/(n\bar{v})$ die kleinste gemeinsame mögliche Fahrzeugfolgezeit für n Fahrzeuge ist, die mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} verkehren. Allerdings verfügt ein derartiges System über keine Ausgleichszeiten und damit über keine Möglichkeit, Störungen durch den Einsatz derselben wieder in den Griff zu bekommen. α wird daher im Regelfall größer als 0 anzusetzen sein.

Der Gleichgewichtswert FFZ^* , der die Fahrzeugfolgezeiten im Gleichgewicht angibt, wird von verschiedenen Größen beeinflusst. Der Faktor α und damit die Ausgleichszeiten werden von der Betriebsführung vorgegeben. Die durchschnittliche Geschwindigkeit \bar{v} ist abhängig vom Verkehrsgeschehen und der Fahrgastnachfrage und damit nicht konstant. Die Anzahl der auf einer Linie verkehrenden Fahrzeuge n wird zwar im Vorhinein festgelegt, kann sich aber durch ein schadhaftes Fahrzeug verringern. FFZ^* passt sich den sich ändernden Umständen ständig an.

Bisher wurde das vorgestellte Modell auf Basis eines Kontrollpunkts beschrieben. Es können aber auch mehrere Kontrollpunkte vorgesehen werden, beispielsweise bei langen Linien oder nach störungsanfälligen Streckenabschnitten. Bei jedem Kontrollpunkt erfolgt eine Annäherung der Zeitabstände der aufeinanderfolgenden Fahrzeuge.

Für mehrere Kontrollpunkte mit der Anzahl k , denen jeweils ein Faktor α_j mit $j = 1, \dots, k$ zugeordnet ist, wird Gleichung (18) erweitert zu

$$FFZ^* = \frac{1}{(n - \sum_{j=1}^k \alpha_j) \bar{v}} \quad (26)$$

Die Berechnung der an einem Kontrollpunkt einzuhaltenden FFZ verhält sich unabhängig von der Berechnung der FFZ an anderen Kontrollpunkten. Daher können Kontrollpunkte eingerichtet oder entfernt werden, ohne den Betrieb zu stören. Das ermöglicht Experimente in der Praxis mit einer variierenden Anzahl von Kontrollpunkten an verschiedenen Orten.

Aufgrund von Untersuchungen ihrer Methode hinsichtlich deren Wirksamkeit gegen Pulkbildung kommen Bartholdi und Eisenstein zum Schluss, dass die eingebauten Ausgleichszeiten bei starker Tendenz zur Pulkbildung nicht ausreichen, um die Intervalle zu stabilisieren.⁴² Sie führen daher eine zusätzliche Bedingung ein: Der zeitliche Abstand der Abfahrt von zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen darf am Kontrollpunkt eine Mindestzeit von $\beta > 0$ nicht unterschreiten. Es gilt daher: Erreicht Fahrzeug 1 zum Zeitpunkt $t + 1$ einen Kontrollpunkt, muss es eine Ausgleichszeit von $\alpha \cdot FFZ_n$ einhalten. Die Fahrzeugfolgezeit zum

⁴² Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.485f.

Vorderfahrzeug muss aber jedenfalls $\beta > 0$ betragen, gerechnet ab der Abfahrt des Vorderfahrzeugs vom Kontrollpunkt.

Bartholdi und Eisenstein empfehlen, für β einen kleineren Wert zu wählen, als er im Normalbetrieb ohne Störungen vorkommt. Beispielsweise könnte für β das Intervall gewählt werden, das bei einem fiktiven Betrieb ohne Fahrgäste und ohne anderen Verkehr oder Einflüsse von außen erwartet werden würde.

3.3. Weitere Methoden zur Intervallstabilisierung

3.3.1. „Forward headway“

Diese Methode zur Kontrolle von Fahrzeugfolgezeiten und Verhinderung von Pulkbildung wurde 2009 an der University of California in Berkeley entwickelt.⁴³ Das Verfahren versucht, ohne Vorschaltung eines Zielfahrplans direkt ein vorgegebenes Zielintervall zu erreichen. Auf Basis von Echtzeitdaten werden laufend Ausgleichszeiten ermittelt, die ein Fahrzeug an Kontrollpunkten einhalten muss. Grundlage für die Berechnungen ist der zeitliche Abstand eines Fahrzeugs zum Vorderfahrzeug (daher „forward headway“). Bei diesem Verfahren besteht allerdings der Nachteil, dass die errechneten Ausgleichszeiten in seltenen Fällen auch negativ werden können. Das hätte zur Folge, dass das betroffene Fahrzeug schneller fahren müsste, um Zeit aufzuholen. Im realen Betrieb ist das in vielen Fällen aufgrund der Rahmenbedingungen nicht möglich. Wegen der ausschließlichen Orientierung auf das Vorderfahrzeug ist es den Fahrzeugen auch nicht möglich, eine entstehende Lücke nach hinten durch Verlangsamung zu schließen.

3.3.2. „Two-Way headway“

Um die genannten Nachteile der Methode forward headway zu beheben, entwarfen Daganzo und Pilachowski 2011 ein neues Verfahren.⁴⁴ Darin wird sowohl der Abstand zum vorausfahrenden als auch der zum nachfolgenden Fahrzeug in die Berechnungen miteinbezogen.

3.3.3. „Simple control“

Dieses Verfahren wurde 2011 ebenfalls von Mitgliedern der University of California entwickelt.⁴⁵ Es geht von der Tatsache aus, dass andere Verfahren (z.B. die beiden soeben vorgestellten sowie das Verfahren backward headway) zwar die Stabilität der Intervalle unterstützen, aber keinen Verkehr nach einem vorgegebenen Fahrplan ermöglichen. Die Autoren schlagen die Hinterlegung eines virtuellen Fahrplans vor. An den Kontrollpunkten werden die Abweichungen der tatsächlichen Ankunftszeiten von den im virtuellen Fahrplan hinterlegten Ankunftszeiten festgestellt. Die Korrektur der Abweichungen erfolgt mit Hilfe von dynamischen Ausgleichszeiten. Der virtuelle Fahrplan wird in jedem Fall hinterlegt, auch wenn kein Fahrplan öffentlich für die Fahrgäste publiziert wird. Nach Angaben der Autoren werden durch dieses Verfahren um 40 % weniger Ausgleichszeiten benötigt als bei konventionellen

⁴³ Vgl. Daganzo, 2009, S.913-921.

⁴⁴ Vgl. Daganzo/Pilachowski, 2011, S.267-277.

⁴⁵ Vgl. Xuan/Argote/Daganzo, 2011, S.1831-1845.

fahrplanbasierten Verfahren. Das Verfahren sei auch den anderen angeführten Methoden zur Sicherstellung der Intervallstabilität überlegen.

4. Untersuchungsobjekt: Wiener Straßenbahnlinie 43

4.1. Allgemeines

In Kooperation mit den Wiener Linien wurde die Straßenbahnlinie 43 für die Untersuchung ausgewählt. In diesem Kapitel wird die planmäßige Betriebssituation auf dieser Linie dargestellt. Die Wiener Linien stellten dazu die Fahrgastzahlen, Soll-Fahrplandaten und Daten zum Fahrzeugeinsatz zur Verfügung.

Die Linie 43 umfasst inklusive Anfangs- und Endhaltestelle 15 Haltestellen. Sie führt – von der Innenstadt aus gesehen – von der Station Schottentor am Ring in Richtung Westen bis zur Endhaltestelle Neuwaldegg. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Linie.



Abbildung 5: Haltestellen und Umsteigemöglichkeiten auf der Linie 43⁴⁶

In Abbildung 5 finden sich auch sämtliche Umsteigemöglichkeiten (Stand März 2017). So bestehen etwa bei der Haltestelle Schottentor Anschlüsse zur U-Bahn-Linie U2 und zu zahlreichen Straßenbahnlinien. Bei der Haltestelle Alser Straße wird die U-Bahn-Linie U6 gekreuzt, in Hernals die S-Bahn-Linie S45. An zahlreichen anderen Haltestellen bestehen Umsteigemöglichkeiten zu verschiedenen Bus- und Straßenbahnlinien.

Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, soll beispielhaft sowohl die Haupt- als auch die Nebenverkehrszeit untersucht werden. In der Hauptverkehrszeit kommt es zu hohem FG-Aufkommen. Infolgedessen ist die Wahrscheinlichkeit für Intervallabweichungen in dieser Zeit am größten. Das Verfahren backward headway kann daher am wirkungsvollsten in der HVZ ausgetestet werden. Um den derzeitigen betrieblichen Ist-Zustand auch außerhalb der HVZ beurteilen zu können, wird die Untersuchung dafür auch in der NVZ durchgeführt. Als

⁴⁶ Abbildung aus http://www.netzplanwien.at/wp-content/uploads/2013/12/Linienerlauf_43.pdf, Zugriff am 16.3.2017.

repräsentativ für HVZ und NVZ und damit als Basis für die Auswertungen werden die Zeiträume zwischen 15 und 19 Uhr sowie zwischen 10 und 12 Uhr betrachtet.

4.2. Intervalle

Die Linie 43 ist eine der Straßenbahnlinien mit dem höchsten Fahrgastaufkommen in Wien. Aus diesem Grund fahren die Fahrzeuge im Zeitraum von ca. 7 bis 19 Uhr in kurzen Intervallen von zwei bis fünf Minuten.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die planmäßigen Intervalle an Schultagen im Herbst 2014 in beiden Fahrtrichtungen (FR) zwischen 7 und 20 Uhr.⁴⁷ Die Untersuchungszeiträume zwischen 10 und 12 Uhr sowie zwischen 15 und 19 Uhr sind durch strichpunktierte und strichlierte Linien gekennzeichnet. Im Zeitraum zwischen 15 und 19 Uhr betragen die planmäßigen Intervalle in beide Fahrtrichtungen großteils zwischen 3,0 und 3,75 Minuten. In FR Schottentor liegt das planmäßige Intervall ab etwa 18:30 Uhr bei 4,0 bis 4,25 Minuten. Im Zeitraum zwischen 10 und 12 Uhr betragen die planmäßigen Intervalle in FR Neuwaldegg durchgehend 4,0 Minuten. In FR Schottentor betragen die Intervalle bis etwa 11:30 Uhr ebenfalls 4,0 Minuten, danach 3,75 Minuten.

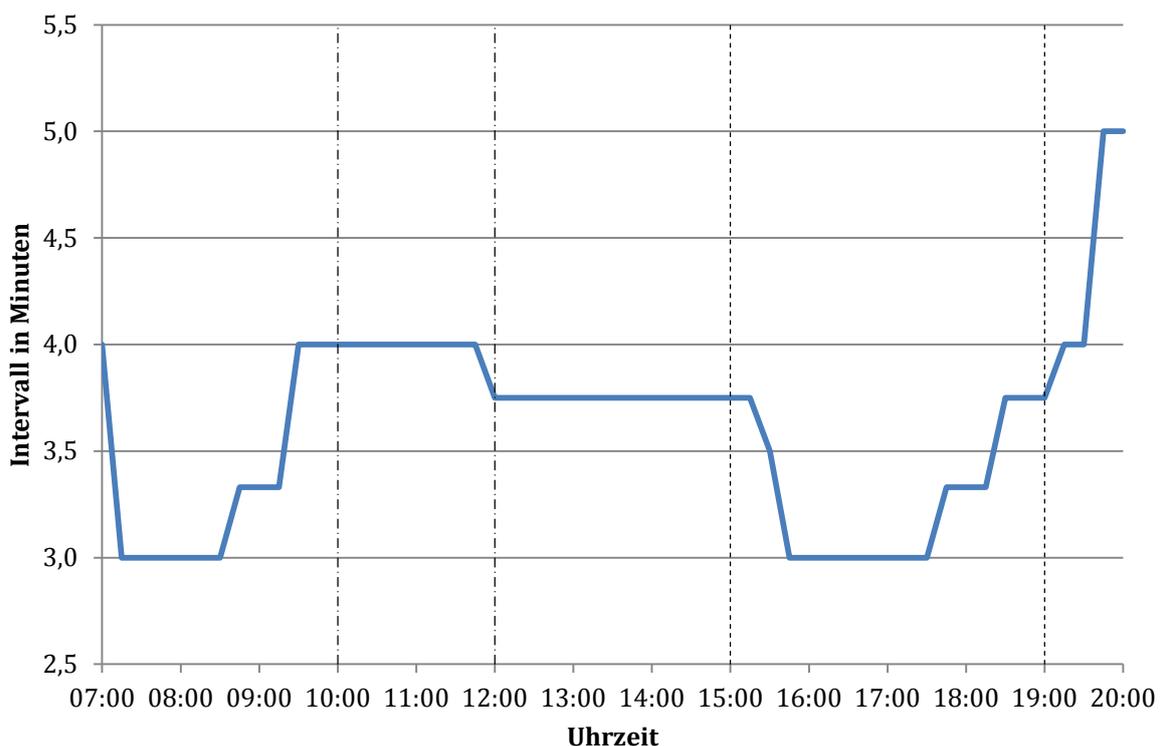


Abbildung 6: Planmäßige Intervalle in FR Neuwaldegg zwischen 7 und 20 Uhr⁴⁸

⁴⁷ Laut Vertretern der Wiener Linien gibt es dabei im Vergleich zur Situation im Herbst/Winter 2016/2017 keine wesentlichen Änderungen.

⁴⁸ Datenquelle: Wiener Linien.

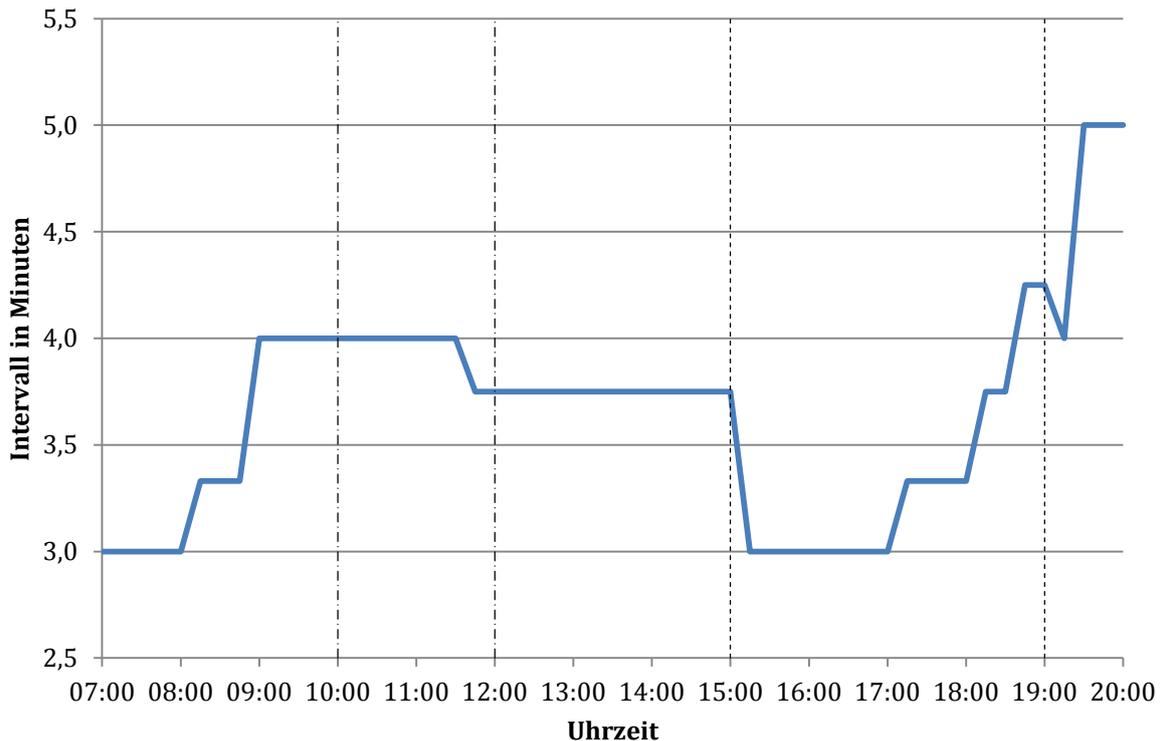


Abbildung 7: Planmäßige Intervalle in FR Schottentor zwischen 7 und 20 Uhr⁴⁹

4.3. Fahrzeiten

Die planmäßigen Fahrzeiten zwischen den Endhaltestellen Neuwaldegg und Schottentor schwanken im Tagesverlauf. In der HVZ sind aufgrund des größeren Verkehrsaufkommens längere Fahrzeiten vorgesehen. Während der NVZ zwischen 10 bis 12 Uhr ist in FR Schottentor planmäßig eine halbe Minute mehr Fahrzeit vorgesehen als in FR Neuwaldegg, während die Situation in der HVZ zwischen 15 und 18:30 Uhr umgekehrt ist (vgl. Tabelle 1). Gegen 19 Uhr ist in FR Schottentor bereits zu erkennen, dass die verkehrsschwächere abendliche NVZ begonnen hat und dementsprechend die planmäßigen Fahrzeiten kürzer werden.

Tabelle 1: Planmäßige Fahrzeiten zwischen den Endhaltestellen der Linie 43 zwischen 10 und 12 sowie zwischen 15 und 19 Uhr⁵⁰

Uhrzeit	Fahrzeit in Minuten	
	FR Neuwaldegg	FR Schottentor
10:00 – 12:00	23,0	23,5
15:00 – 18:30	24,5	24,0
18:30 – 19:00	24,5	23,5

⁴⁹ Datenquelle: Wiener Linien

⁵⁰ Datenquelle: Wiener Linien

4.4. Ausgleichs- und Umlaufzeiten

Für die Intervallstabilisierung sieht der Fahrplan der Linie 43 Ausgleichszeiten an den End- und gleichzeitig Anfangshaltestellen Neuwaldegg und Schottentor vor. An der Haltestelle Schottentor benutzen sowohl die Linie 43 als auch die Linie 44 das dort zur Verfügung stehende Schleifengleis. Das bedeutet, dass dort keine langen Ausgleichszeiten vorgesehen werden können, um die andere Linie nicht zu behindern. Planmäßig wird in beiden Untersuchungszeiträumen für jeden Zug der Linie 43 eine Minute als Ausgleichszeit am Schottentor vorgesehen. Im realen Betrieb wird diese Minute aber zu einem großen Teil für den Fahrgastwechsel benötigt. Dauert der FG-Wechsel kürzer als eine Minute, wird die Fahrt ohne Abwarten der Ausgleichszeit fortgesetzt.⁵¹ An der End- und Anfangshaltestelle Neuwaldegg können hingegen längere Ausgleichszeiten eingeplant werden, wie Tabelle 2 zeigt.

Tabelle 2: Vorgesehene Ausgleichszeiten in Neuwaldegg zwischen 10 und 12 sowie zwischen 15 und 19 Uhr⁵²

Zeitraum	Dauer der Ausgleichszeit
10:00 – 11:30	8,5 Minuten
11:30 – 12:00	Schrittweise Reduktion von 8,25 auf 6,5 Minuten
15:00 – 16:00	Zwischen 4,5 und 8,0 Minuten
16:00 – 17:15	4,5 Minuten
17:15 – 19:00	Zwischen 4,5 und 8,0 Minuten

Die Dauer eines Fahrzeugumlaufs setzt sich ausgehend von der Anfangshaltestelle Neuwaldegg aus der Fahrzeit Neuwaldegg – Schottentor, der Ausgleichszeit am Schottentor, der Fahrzeit Schottentor – Neuwaldegg und der dortigen Ausgleichszeit zusammen. Aus den bisherigen Ausführungen ist ersichtlich, dass die planmäßigen Fahrzeugumlaufzeiten in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen schwanken. Sie variieren im Zeitraum 15 bis 19 Uhr zwischen minimal 52,5 und maximal 57,5 Minuten. Zwischen 10 und 11:30 Uhr dauert ein Umlauf laut Plan 56,0 Minuten. Danach sinken die Umlaufzeiten mit der Reduktion der Ausgleichszeiten in Neuwaldegg bis 12 Uhr schrittweise auf 54,0 Minuten.

4.5. Planmäßiger Fahrzeugauslauf

Im Zeitraum zwischen 15 und 17:45 Uhr sind 18 Züge im Einsatz.⁵³ Ab etwa 17:45 bis 19 Uhr verringert sich diese Anzahl schrittweise auf 15 Züge.

Bei 13 der eingesetzten 18 Züge handelt es sich um Niederflurfahrzeuge der fast baugleichen Typen B und B1 vom Hersteller Siemens (vgl. Abbildung 8). Die restlichen fünf Züge sind

⁵¹ Auskunft von Vertretern der Wiener Linien und eigene Zeitmessungen.

⁵² Datenquelle: Wiener Linien.

⁵³ Datenquelle: Wiener Linien.

Hochflurfahrzeuge der älteren Bauart E1 mit Anhängern der Bauart c3 oder c4 (vgl. Abbildung 9). Diese Züge wurden von den Firmen SGP und Lohner hergestellt.

Zwischen 10 und 12 Uhr sind 14 Züge im Einsatz, davon 10 Niederflurfahrzeuge.



Abbildung 8: Straßenbahn Type B1⁵⁴



Abbildung 9: Straßenbahn Type E1+c4⁵⁵

⁵⁴ Abbildung aus https://de.wikipedia.org/wiki/Ultra_Low_Floor, Zugriff am 20.3.2017.

⁵⁵ Abbildung aus http://www.strassenbahnjournal.at/wiki/index.php?title=Type_E1, Zugriff am 20.3.2017.

5. Simulation

5.1. Eingangsdaten

5.1.1. Haltestellen

Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die Entfernungen zwischen den Haltestellen. Die gesamte Linie 43 hat eine Linienlänge von ca. 6 km je Fahrtrichtung. Die Entfernungen zwischen den Haltestellen unterscheiden sich in den beiden FR aufgrund der unterschiedlichen Lage der Haltestellen. Die unterschiedlichen Gesamtlängen je Fahrtrichtung entstehen aufgrund der jeweiligen Situierung der Endhaltestellen an den Schleifengleisen. Tabelle 3 und Tabelle 4 dienen als ergänzende Information und werden im weiteren Verlauf der Simulation nicht mehr benötigt.

Tabelle 3: Entfernungen zwischen den Haltestellen in FR Schottentor⁵⁶

Haltestelle	Entfernung in Meter	Entfernung kumuliert in Meter
Neuwaldegg	0	0
Himmelmutterweg	488	488
Dornbacher Straße	573	1061
Güpferlingstraße	580	1641
Hernals	562	2203
Wattgasse	551	2754
Rosensteingasse	480	3234
Elterleinplatz	443	3677
Palffygasse	292	3969
Alser Straße	407	4376
Brünnlbaggasse	352	4728
Skodagasse	264	4992
Lange Gasse	130	5122
Landesgerichtsstraße	507	5629
Schottentor	373	6002

⁵⁶ Datenquelle: Wiener Linien.

Tabelle 4: Entfernungen zwischen den Haltestellen in FR Neuwaldegg⁵⁷

Haltestelle	Entfernung in Meter	Entfernung kumuliert in Meter
Schottentor	0	0
Landesgerichtsstraße	421	421
Lange Gasse	407	828
Skodagasse	195	1023
Brünnlbadgasse	177	1200
Alser Straße	436	1636
Palffygasse	411	2047
Elterleinplatz	359	2406
Rosensteingasse	389	2795
Wattgasse	465	3260
Hernals	562	3822
Güpferringstraße	587	4409
Dornbacher Straße	484	4893
Himmelmutterweg	583	5476
Neuwaldegg	425	5901

Für die Simulation des Betriebs wird als Beginn der Linie die Haltestelle Neuwaldegg definiert. Diese wird von 27 Zwischenhaltestellen gefolgt. Die danach befindliche Endhaltestelle Neuwaldegg ist gleichzeitig wieder die Anfangshaltestelle für den nächsten Umlauf eines Fahrzeugs.

5.1.2. Fahrzeuge

Die Simulation wird unter der Voraussetzung durchgeführt, dass ausschließlich Fahrzeuge der Typen B und B1 verkehren. Aus den eigenen Messungen ist bekannt, dass die Ein- und Ausstiegsvorgänge bei den Hochflurfahrzeugen der Type E1 länger dauern als bei Niederflurfahrzeugen. Zur Reduktion der Komplexität der Simulation wird eine Berücksichtigung dieser unterschiedlichen mittleren FG-Wechselzeiten unterlassen.

5.1.3. Fahrzeiten

Für die Simulation müssen die in der Realität auftretenden Mittelwerte und Streuungen der Fahrzeiten zwischen den einzelnen Haltestellen bekannt sein. Insbesondere ist es notwendig, zwischen den Fahrzeiten und FG-Wechselzeiten unterscheiden zu können. Ebenso muss zwischen FG-Wechselzeiten und darüber hinausgehenden Haltestellenaufenthaltszeiten unterschieden werden. Es kommt beispielsweise regelmäßig vor, dass sich ein Fahrzeug aufgrund einer VLSA länger in einer Haltestelle befindet, als das der FG-Wechsel erfordern würde. In der Simulation müssen diese Zeiten als Fahrzeiten und nicht als FG-Wechselzeiten betrachtet werden. Zur Ermittlung dieser Daten wurden Zeitmessungen vor Ort durchgeführt.

⁵⁷ Datenquelle: Wiener Linien.

Aus der so gewonnenen Stichprobe wurde eine empirische Verteilungsfunktion errechnet, die als Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit angenommen wurde.

Insgesamt wurden die Daten von 105 Fahrten auf den Relationen Schottentor-Neuwaldegg und Neuwaldegg-Schottentor erhoben, wobei nicht alle Fahrten die jeweils gesamte Relation umfassten. Es waren auch nicht immer alle gemessenen Daten verwendbar. So mussten einige Werte aufgrund von Baustellen, Kurzführungen von Fahrzeugen oder Messfehlern verworfen werden. Die Anzahl der gemessenen Fahrzeiten zwischen zwei Haltestellen schwankt zwischen 18 Werten auf der Relation Hernals-Wattgasse und 49 Werten auf der Relation Schottentor-Landesgerichtsstraße. Die geringe Anzahl an gemessenen Fahrzeiten zwischen Hernals und Wattgasse hat ihre Ursache in einer länger andauernden Baustelle zwischen diesen beiden Haltestellen. Für die meisten Fahrzeiten zwischen zwei Haltestellen liegen zwischen 35 und 50 gemessene Werte vor. Tabelle 5 zeigt die Anzahl der Messwerte zwischen jeweils zwei Haltestellen.

Tabelle 5: Anzahl an gemessenen Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle

Neuwaldegg	28	Schottentor	49
Himmelmutterweg	36	Landesgerichtsstraße	37
Dornbacher Straße	32	Lange Gasse	48
Güpferlingstraße	37	Skodagasse	45
Hernals	18	Brünnlbaggasse	47
Wattgasse	45	Alser Straße	48
Rosensteingasse	45	Palfygasse	48
Elterleinplatz	44	Elterleinplatz	47
Palfygasse	44	Rosensteingasse	46
Alser Straße	41	Wattgasse	22
Brünnlbaggasse	43	Hernals	49
Skodagasse	42	Güpferlingstraße	40
Lange Gasse	35	Dornbacher Straße	34
Landesgerichtsstraße	43	Himmelmutterweg	30

Die Messungen wurden an insgesamt 18 Schultagen von Montag bis Freitag im Zeitraum vom 3. März bis zum 8. Juni 2017 durchgeführt. Es wurden nur Fahrzeiten der Fahrzeugtypen B und B1 gemessen. Die Messzeiten lagen zwischen 10 und 12 Uhr sowie zwischen 15 und 19 Uhr. Es stellte sich heraus, dass Mittelwerte, Standardabweichungen, Maxima und Minima der Fahrzeiten bei beiden Untersuchungszeiträumen in einem ähnlichen Bereich lagen. Es wurden daher alle Messwerte im Ganzen betrachtet. Die gemessenen Werte für beide Fahrtrichtungen werden in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 6: Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle in FR Schottentor (in min:s)

	Mittelwert	Standardabweichung	Maximum	Minimum
Neuwaldegg	01:08	00:11	01:38	00:53
Himmelmutterweg	01:12	00:06	01:29	01:00
Dornbacher Straße	01:26	00:11	01:57	01:14
Güpferlingstraße	01:53	00:24	02:43	01:10
Hernals	02:28	00:29	03:08	01:54
Wattgasse	01:27	00:18	02:06	01:02
Rosensteingasse	01:31	00:18	02:27	01:06
Elterleinplatz	00:54	00:13	01:30	00:40
Palffygasse	01:24	00:22	02:40	00:53
Alser Straße	01:45	00:13	02:08	01:23
Brünnlbaggasse	00:52	00:09	01:21	00:39
Skodagasse	00:37	00:11	01:13	00:22
Lange Gasse	01:37	00:23	02:15	00:57
Landesgerichtsstraße	01:24	00:17	02:36	01:06
Schottentor				
Gesamt	19:38			

Tabelle 7: Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle in FR Neuwaldegg (in min:s)

	Mittelwert	Standardabweichung	Maximum	Minimum
Schottentor	01:54	00:28	03:08	01:09
Landesgerichtsstraße	01:31	00:30	02:34	00:52
Lange Gasse	00:50	00:18	01:36	00:32
Skodagasse	00:31	00:04	00:45	00:25
Brünnlbaggasse	02:01	00:24	03:00	01:10
Alser Straße	01:23	00:21	02:37	00:49
Palffygasse	01:06	00:14	01:40	00:47
Elterleinplatz	01:42	00:26	03:11	01:06
Rosensteingasse	01:33	00:30	03:17	00:51
Wattgasse	02:41	00:35	04:01	01:43
Hernals	01:50	00:23	03:14	01:26
Güpferlingstraße	01:13	00:16	02:02	00:52
Dornbacher Straße	01:25	00:10	01:46	01:12
Himmelmutterweg	01:18	00:11	01:49	01:04
Neuwaldegg				
Gesamt	20:58			

Die Fahrzeiten werden neben der Entfernung zwischen den Haltestellen und dem Geschwindigkeitsprofil von verschiedenen Faktoren bestimmt. Das können beispielsweise

Wartezeiten an den VLSA, Beeinflussungen aus dem übrigen Straßenverkehr oder das individuelle Fahrverhalten des Fahrpersonals sein.

Wird eine VLSA vom Straßenbahnfahrzeug beeinflusst, besteht kein oder nur geringer Einfluss auf die Fahrzeit. Besteht keine Beeinflussung der VLSA, dann kann es zu Wartezeiten vor dieser kommen. Die Wartezeit entfällt, wenn das Straßenbahnfahrzeug die VLSA während einer Grünphase erreicht. Nach oben sind die Wartezeiten mit der Dauer eines Signalumlaufs der VLSA begrenzt.

Da sich Straßenbahnen den Verkehrsraum mit anderen Verkehrsteilnehmern (KFZ, Fahrräder, Fußgänger) teilen, kommt es in vielen Fällen zu Einwirkungen durch diese, was zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Fahrzeit führen kann.

Als ein dritter wichtiger Einflussfaktor kann das individuelle Fahrverhalten des Fahrpersonals genannt werden. Das Fahrverhalten verändert sich abhängig von persönlicher Einstellung, Tagesverfassung und Betriebsbedingungen.

Aufgrund der Existenz von mehreren voneinander unabhängigen Einflussgrößen kann von einer Normalverteilung der Fahrzeiten ausgegangen und auf statistische Tests zu Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung verzichtet werden. Die Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen wird in der Simulation als durch Mittelwert und Standardabweichung definierte Zufallsgröße angenommen, der sich durch die Beeinflussungen verlängern oder verkürzen kann. Es werden dafür die Mittelwerte und Standardabweichungen der Fahrzeiten aus Tabelle 6 und Tabelle 7 herangezogen. Als Ober- und Untergrenzen der Fahrzeiten werden die gemessenen Maxima und Minima festgelegt, die ebenfalls in den genannten Tabellen zu finden sind.

5.1.4. Fahrgastzahlen

Die Fahrgastzahlen wurden von den Wiener Linien zur Verfügung gestellt. Die dazugehörigen Zählungen fanden an Schultagen von September bis Dezember 2016 statt. Die Fahrgastzahlen pro Schultag für die FR Schottentor sind in Tabelle 8, für die FR Neuwaldegg in Tabelle 9 zu finden. Grafische Aufbereitungen der Fahrgastzahlen finden sich in Abbildung 10 und Abbildung 11.

Tabelle 8: Fahrgastzahlen pro Schultag in FR Schottentor

Haltestelle	Einsteiger	Aussteiger	Belegung
Neuwaldegg	2369		2369
Himmelmutterweg	1708	187	3890
Dornbacher Straße	1929	235	5584
Güpferlingstraße	3969	857	8696
Hernals	5149	2275	11570
Wattgasse	6022	2014	15578
Rosensteingasse	5934	2519	18993
Elterleinplatz	6329	3257	22065
Palffygassee	2179	1677	22567
Alser Straße	4771	10987	16351
Brünnlbaggasse	1288	1027	16612
Skodagasse	1240	3410	14442
Lange Gasse	1628	3413	12657
Landesgerichtsstraße	408	1946	11119
Schottentor	0	11119	0

Tabelle 9: Fahrgastzahlen pro Schultag in FR Neuwaldegg

Haltestelle	Einsteiger	Aussteiger	Belegung
Schottentor	11351	2129	11351
Landesgerichtsstraße	1204	1173	11713
Lange Gasse	1871	965	11455
Skodagasse	2385	3747	12667
Brünnlbaggasse	931	2324	12633
Alser Straße	10978	5552	19864
Palffygassee	1988	5274	19528
Elterleinplatz	3861	5240	17837
Rosensteingasse	3097	4643	15660
Wattgasse	1751	4025	12171
Hernals	1990	1546	9518
Güpferlingstraße	926	1090	6419
Dornbacher Straße	186	4086	5059
Himmelmutterweg	117	2129	4086
Neuwaldegg	0	1173	0

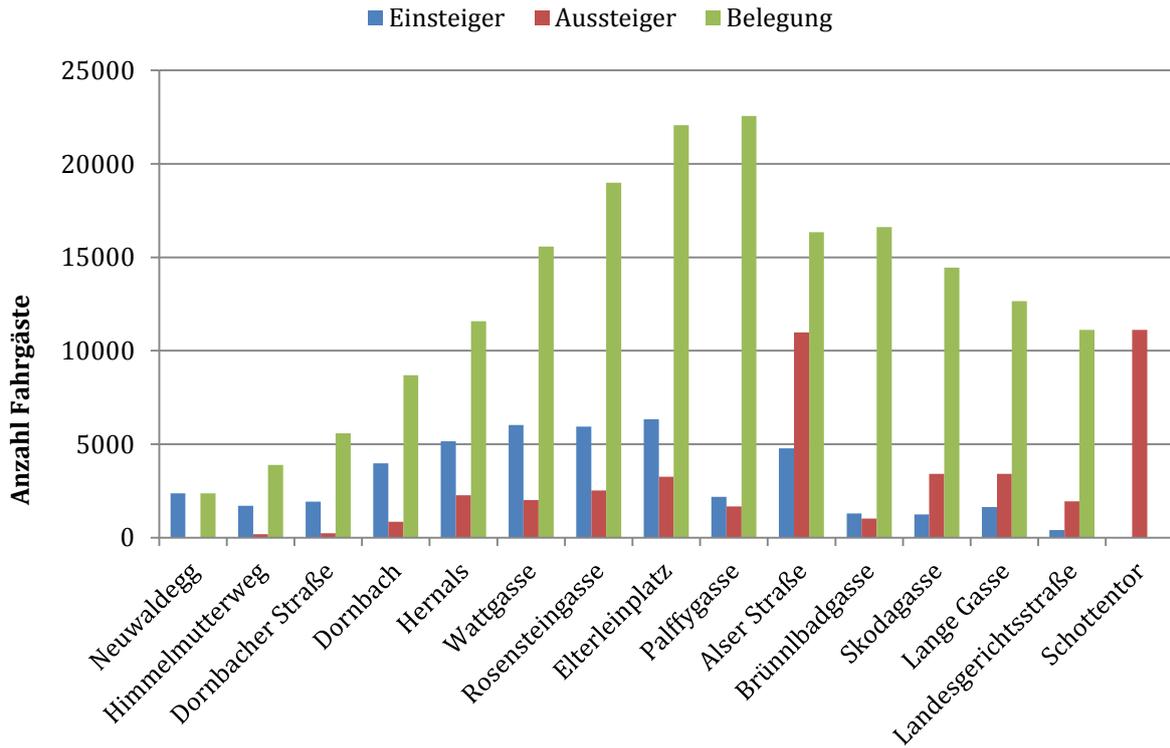


Abbildung 10: Fahrgastzahlen der Linie 43 pro Schultag in FR Schottentor

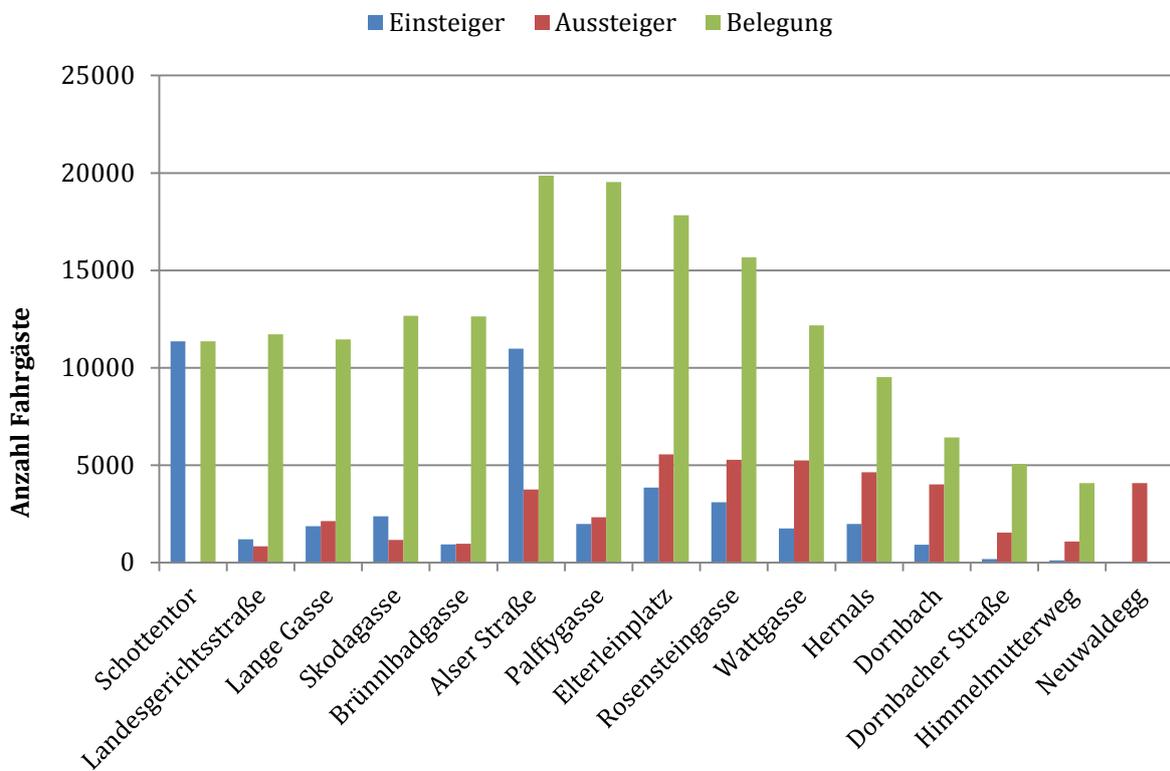


Abbildung 11: Fahrgastzahlen der Linie 43 pro Schultag in FR Neuwaldegg

Es standen keine Daten über die mittlere Anzahl von Ein- und Aussteigern je Haltestelle in der HVZ und NVZ zur Verfügung. Daher wurden Tagesganglinien zur vereinfachenden Abschätzung der FG-Zahlen in den Untersuchungszeiträumen herangezogen. Sie beschreiben die über alle

Betriebsstunden eines Tages aufgeteilte Fahrgastnachfrage. Abbildung 12 zeigt die Tagesganglinie für die FG-Belegung an der Haltestelle (HS) Palffygasse in FR Schottentor. Abbildung 13 bietet die gleiche Übersicht für die HS Alser Straße in FR Neuwaldegg. Die FG-Belegung erreicht zwischen den Haltestellen Palffygasse und Alser Straße in beiden Fahrtrichtungen ein Maximum (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11). Daher wurden als Grundlage für die Abschätzung der FG-Zahlen die Tagesganglinien dieser beiden Haltestellen ausgewählt.

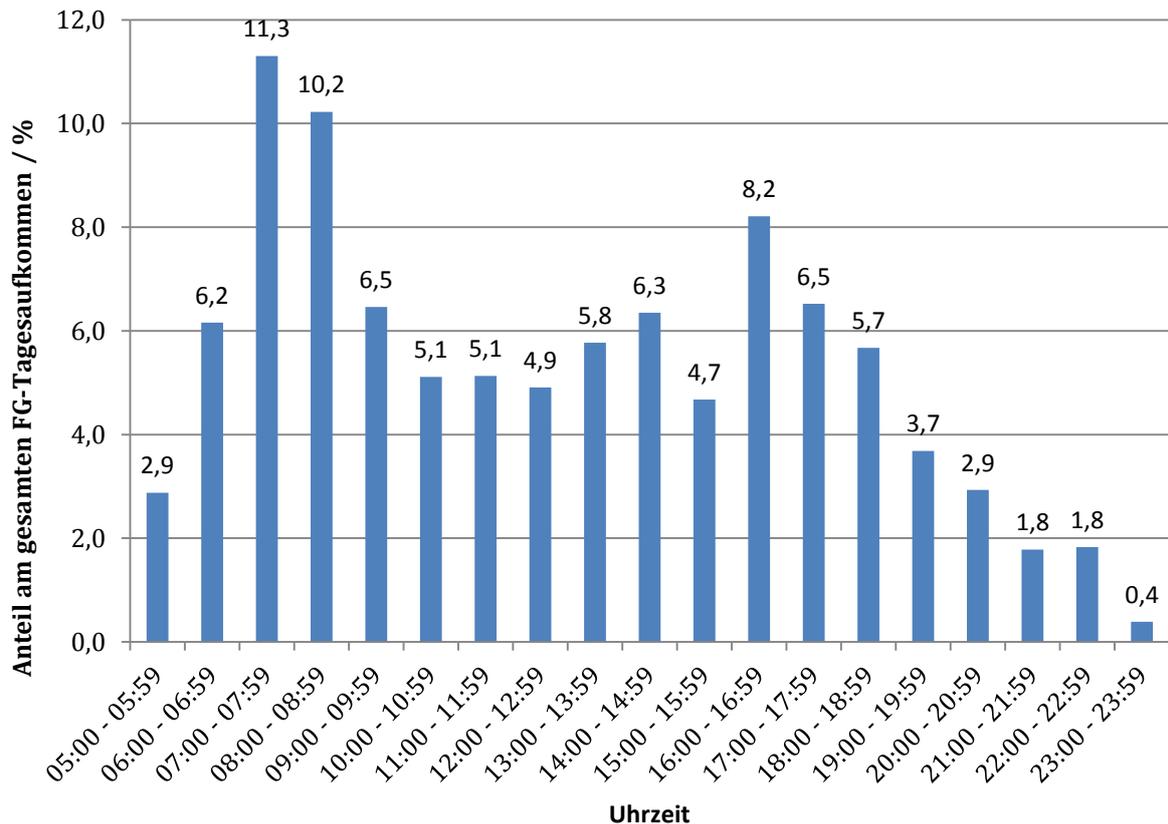


Abbildung 12: Tagesganglinie der Belegung an der HS Palffygasse in FR Schottentor⁵⁸

⁵⁸ Datenquelle: Wiener Linien. Datenerhebung an Schultagen von September bis Dezember 2016.

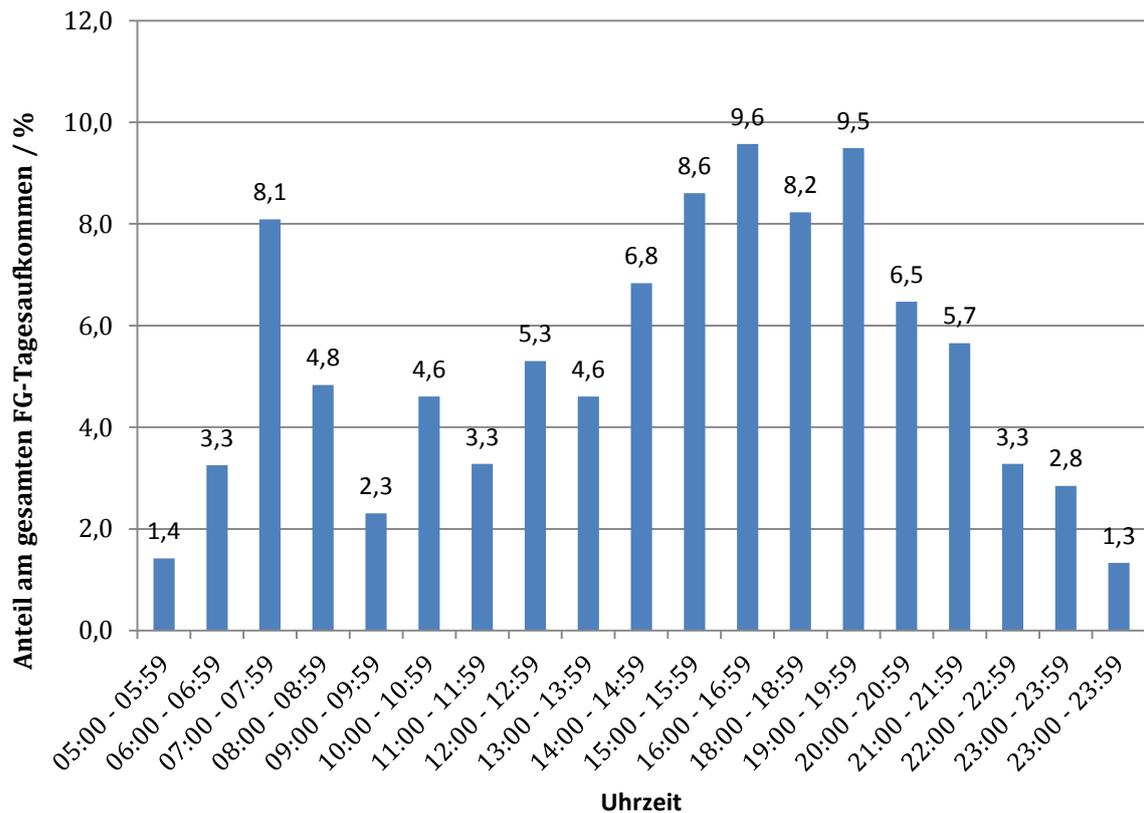


Abbildung 13: Tagesganglinie der Belegung an der HS Alser Straße in FR Neuwaldegg⁵⁹

Als vereinfachende Annahme wird im Folgenden vorausgesetzt, dass die Fahrzeugbelegung und die Anzahl an Ein- und Aussteigern direkt voneinander abhängen. Die Verteilung der Anzahl an Ein- und Aussteigern ist in dem Fall ident zur Verteilung der Belegung. Die Verteilung des FG-Aufkommens hängt zu einem großen Teil von Einflussgrößen wie Beginn und Ende von Arbeits- und Schulzeiten etc. ab. Als weitere vereinfachende Näherung wird angenommen, dass sich diese Einflussgrößen auf alle Haltestellen gleichermaßen auswirken. Unter diesen Voraussetzungen kann daher angenommen werden, dass bei allen Haltestellen in beiden Fahrtrichtungen die gleichen Verteilungscharakteristiken bestehen wie bei den Haltestellen Palffygasse bzw. Alser Straße.

⁵⁹ Datenquelle: Wiener Linien. Datenerhebung an Schultagen von September bis Dezember 2016.

Für die Untersuchungszeiträume wurde jeweils die mittlere Anzahl der Ein- und Aussteiger für eine Stunde abgeschätzt. Aus den Zahlen für die FR Schottentor aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass im Zeitraum von 15 – 19 Uhr insgesamt 25,08 % der Fahrgäste eines Tages befördert werden. Pro Stunde ergibt das durchschnittlich 6,27 %. In FR Neuwaldegg werden im Zeitraum von 15 bis 19 Uhr insgesamt 35,90 % der Fahrgäste eines Tages transportiert (vgl. Abbildung 13). Das ergibt pro Stunde durchschnittlich 8,98 %.

Auf Basis dieser Anteile sowie der Gesamtzahlen aus Tabelle 8 und Tabelle 9 ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten mittleren Anzahlen von Ein- und Aussteigern pro Stunde für den Zeitraum von 15 bis 19 Uhr.

Tabelle 10: Durchschnittliche Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Stunde im Zeitraum 15-19 Uhr

FR Schottentor			FR Neuwaldegg		
Haltestelle	Ein-steiger	Aus-steiger	Haltestelle	Ein-steiger	Aus-steiger
Neuwaldegg	149	0	Schottentor	1019	0
Himmelmutterweg	107	12	Landesgerichtsstraße	108	76
Dornbacher Straße	121	15	Lange Gasse	168	191
Güpferlingstraße	249	54	Skodagasse	214	105
Hernals	323	143	Brünnlbaggasse	84	87
Wattgasse	378	126	Alser Straße	986	336
Rosensteingasse	372	158	Palffygasse	179	209
Elterleinplatz	397	204	Elterleinplatz	347	499
Palffygasse	137	105	Rosensteingasse	278	474
Alser Straße	299	689	Wattgasse	157	471
Brünnlbaggasse	81	64	Hernals	179	417
Skodagasse	78	214	Güpferlingstraße	83	361
Lange Gasse	102	214	Dornbacher Straße	17	139
Landesgerichtsstraße	26	122	Himmelmutterweg	11	98
Schottentor	0	697	Neuwaldegg	0	367
Gesamt	2819	2817		3830	3830

Die durchschnittliche Anzahl der Ein- und Aussteiger im Zeitraum von 10 bis 12 Uhr wurde analog zum Zeitraum 15 bis 19 Uhr berechnet. In FR Schottentor werden zwischen 10 und 12 Uhr insgesamt 10,24 % der Fahrgäste eines Tages befördert. Das sind pro Stunde durchschnittlich 5,12 %. In FR Neuwaldegg fallen in der gleichen Zeit pro Stunde durchschnittlich 3,94 % der Fahrgäste eines Tages an. Tabelle 11 listet die mittlere Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Stunde für den Zeitraum von 10 bis 12 Uhr auf.

Tabelle 11: Durchschnittliche Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Stunde im Zeitraum 10-12 Uhr

FR Schottentor			FR Neuwaldegg		
Haltestelle	Einsteiger	Aussteiger	Haltestelle	Einsteiger	Aussteiger
Neuwaldegg	121	0	Schottentor	447	0
Himmelmutterweg	87	10	Landesgerichtsstraße	47	33
Dornbacher Straße	99	12	Lange Gasse	74	84
Güpferlingstraße	203	44	Skodagasse	94	46
Hernals	264	116	Brünnlbaggasse	37	38
Wattgasse	308	103	Alser Straße	433	148
Rosensteingasse	304	129	Palfygasse	78	92
Elterleinplatz	324	167	Elterleinplatz	152	219
Palfygasse	112	86	Rosensteingasse	122	208
Alser Straße	244	563	Wattgasse	69	206
Brünnlbaggasse	66	53	Hernals	78	183
Skodagasse	63	175	Güpferlingstraße	36	159
Lange Gasse	83	175	Dornbacher Straße	7	61
Landesgerichtsstraße	21	100	Himmelmutterweg	5	43
Schottentor	0	569	Neuwaldegg	0	161
Gesamt	2299	2302		1679	1681

5.1.5. Fahrgastwechselzeiten

Für die Erhebung der Fahrgastwechselzeiten wurde am 7. März 2017 die Dauer des Fahrgastwechsels an verschiedenen Haltestellen der Linie 43 gemessen. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Messergebnisse. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, eine Aussage über die Dauer des Fahrgastwechsels in Abhängigkeit von der Anzahl der Ein- und Aussteiger treffen zu können. Es wurden dabei ausschließlich Ein- und Aussteigevorgänge bei den Niederflurstraßenbahnen der Typen B und B1 gemessen.

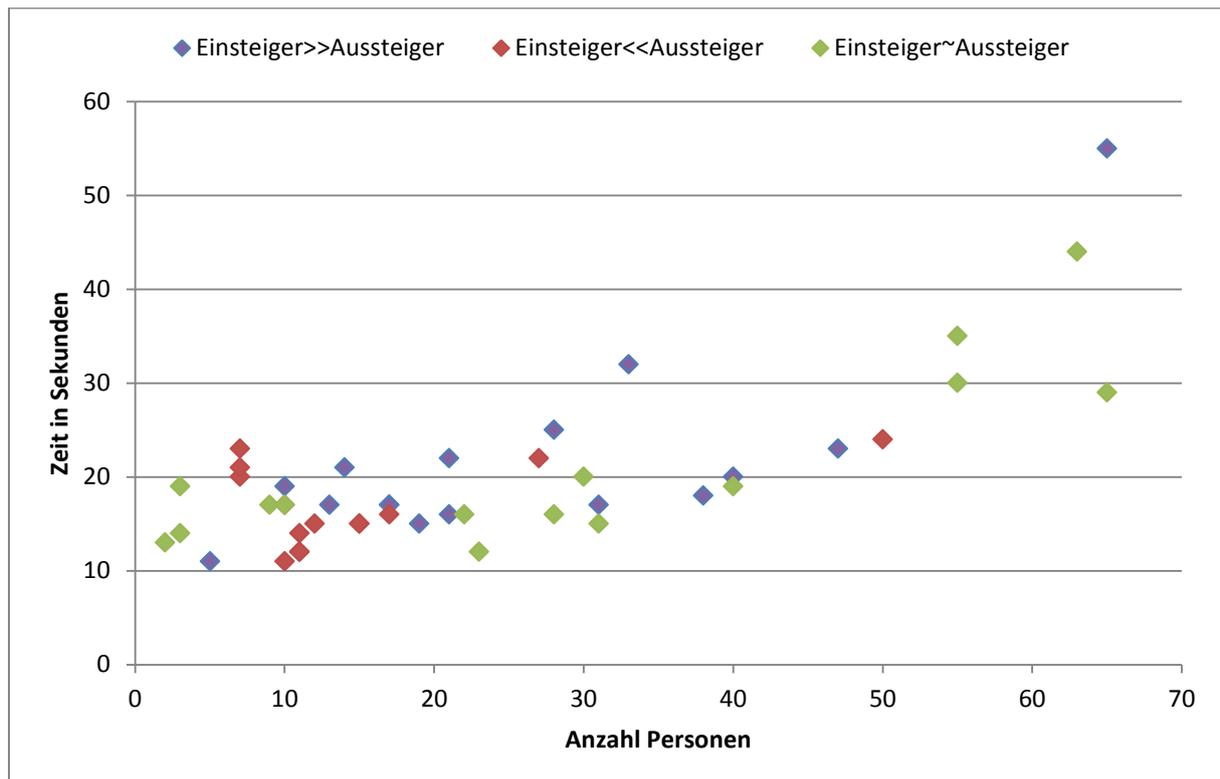


Abbildung 14: Gemessene FG-Wechselzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der ein- und aussteigenden Personen (N=45)

In der Literatur wird beschrieben, dass für die Dauer des FG-Wechsels v.a. die Zahl der Einsteiger ausschlaggebend ist.⁶⁰ Um diese Hypothese überprüfen zu können, werden die Messwerte in drei Gruppen unterteilt. In die erste Gruppe werden alle Messwerte eingeordnet, bei denen die Anzahl der Einsteiger deutlich größer ist als die Anzahl der Aussteiger (lila Markierungen in Abbildung 14). Die zweite Gruppe umfasst alle Messwerte, bei denen die Anzahl der Einsteiger deutlich kleiner ist als die Anzahl der Aussteiger (rote Markierungen). In die dritte Gruppe schließlich fallen all jene Messwerte, bei denen die Anzahl der Einsteiger in etwa gleich groß ist wie die Anzahl der Aussteiger (grüne Markierungen). Abbildung 14 zeigt, dass die Dauer des FG-Wechsels sowohl in der Gruppe Einsteiger >> Aussteiger als auch in der Gruppe Einsteiger ~ Aussteiger mit steigender Anzahl von Personen zunimmt. Für die Gruppe Einsteiger << Aussteiger kann keine klare Aussage getroffen werden, da hier kein Messwert für eine FG-Wechselzeit mit mehr als 50 Ein- und Aussteigern vorliegt. Bis zu dieser Personenanzahl

⁶⁰ Vgl. Daganzo, 2009, S.915.

ist kein auffälliger Unterschied zwischen den Messwerten dieser Gruppe und den Messwerten der beiden anderen Gruppen festzustellen.

Dass die Zahl der Aussteiger keinen oder vernachlässigbaren Einfluss auf die Dauer des FG-Wechsels hätte, lässt sich aus Abbildung 14 nicht ablesen. Vielmehr ist die Dauer des FG-Wechsels in der Gruppe Einsteiger~Aussteiger offenbar auch von der Zahl der Aussteiger abhängig. Trotz des Mangels an Daten für die Gruppe Einsteiger<<Aussteiger kann für die weitere Arbeit daher angenommen werden, dass die Dauer des FG-Wechsels sowohl von der Anzahl der Ein- als auch der Aussteiger abhängt.

Die Messergebnisse legen nahe, dass zwischen den FG-Wechselzeiten und der Anzahl an Ein- und Aussteigern ein exponentieller Zusammenhang besteht. Diese Beobachtung wurde auch in Gesprächen von Mitarbeitern der Wiener Linien bestätigt. Bartholdi und Eisenstein beschreiben das Verhältnis von FG-Wechselzeit zu Anzahl an Ein- und Aussteigern als „superlinear“.⁶¹ Sie führen an, dass bei hoher Auslastung eines Fahrzeugs der FG-Wechsel durch die im Fahrzeug befindlichen Passagiere verzögert wird. Bei den Messungen vor Ort konnte beobachtet werden, dass die Dauer des FG-Wechsels auch aufgrund von Platzmangel an den Haltestellen verlängert wird.

Um das Verhältnis der Anzahl von Ein- und Aussteiger zur FG-Wechselzeit im Mittel beschreiben zu können, wird in das Diagramm aus Abbildung 14 eine exponentielle Funktion eingefügt. Die Funktion wird vom Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel als Trendlinie mit

$$y = 13,231 \cdot e^{0,0144x} \quad (27)$$

angegeben. Abbildung 15 zeigt die gemessenen FG-Wechselzeiten mit der beschriebenen Trendlinie. Zusätzlich wurden jeweils drei exponierte Maximal- und Minimalwerte mit Parabeln verbunden, um für die Simulation Ober- und Untergrenzen für die Dauer des FG-Wechsels zu erhalten. Die obere Grenze wird durch die Funktion

$$f(x) = 0,0064x^2 + 0,0892x + 22,0609 \quad (28)$$

angegeben. Die untere Grenze wird durch die Funktion

$$f(x) = 0,0049x^2 - 0,0259x + 10,0073 \quad (29)$$

bestimmt.⁶²

⁶¹ Vgl. Bartholdi/Eisenstein, 2012, S.485.

⁶² Berechnung auf <http://www.arndt-bruenner.de/mathe/10/parabeldurchdreipunkte.htm>, Zugriff am 3.4.2017.

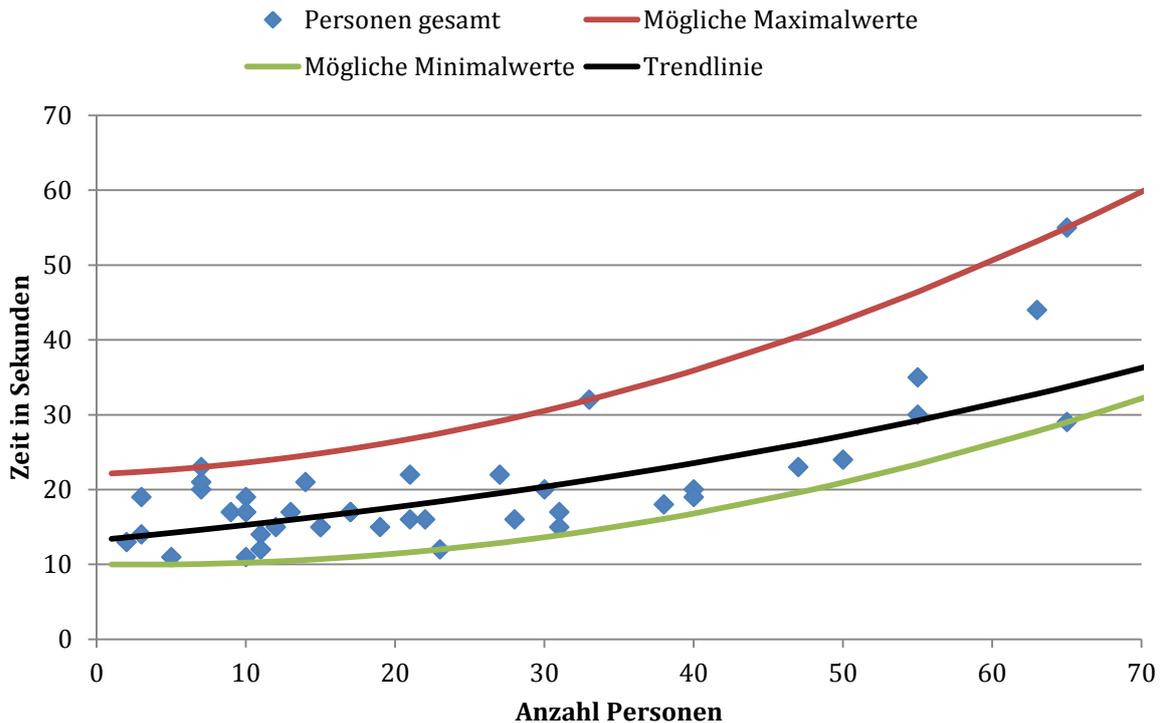


Abbildung 15: Gemessene FG-Wechselzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der ein- und aussteigenden Personen mit Trendlinie und Ober- und Untergrenzen (N=45)

Die Dauer des FG-Wechsels wird neben den erwähnten Faktoren Anzahl an ein- und aussteigenden Personen, Auslastung und örtliche Situation an der Haltestelle von weiteren Einflussgrößen bestimmt. Diese Größen können beispielsweise das Alter der Personen, körperliche Konstitution, Mitführen von Kinderwägen oder Rollstühlen, generelle Aufmerksamkeit, Auskunftswünsche an das Fahrpersonal oder das absichtliche Verhindern des Schließens der Türen aufgrund verspäteter anderer Fahrgäste sein. Diese Faktoren sind voneinander unabhängig. Es kann daher von einer Normalverteilung der FG-Wechselzeiten ausgegangen werden. Die jeweiligen Mittelwerte werden durch die Trendlinie repräsentiert. Werden die gemessenen Zeiten jeweils um den Wert des exponentiellen Trends korrigiert, so weisen sie eine Standardabweichung von 5,43 Sekunden auf.

5.2. Umsetzung mittels MATLAB

5.2.1. Varianten

Es wurden mehrere Varianten der Betriebssimulation durchgeführt:

- Variante 1: Betrieblicher Ist-Zustand im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr,
- Variante 2: Betrieblicher Ist-Zustand im Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr,
- Variante 3: Anwendung des Verfahrens backward headway im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr mit unterschiedlicher Anzahl von Kontrollpunkten,
- Variante 4: Anwendung des Verfahrens backward headway im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr mit fünf Kontrollpunkten und reduzierter Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen (17, 16 und 15 Fahrzeuge).

Die zugehörigen MATLAB-Skripts finden sich im Anhang dieser Arbeit in Kapitel 11.1.

5.2.2. Varianten 1 und 2: Simulation des betrieblichen Ist-Zustands

Analog zum planmäßigen Betrieb wurde für den Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr der Einsatz von 18, für den Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr der Einsatz von 14 Fahrzeugen angenommen (vgl. Kapitel 4.5). Abfahrtsort aller Fahrzeuge ist Neuwaldegg. Die Fahrzeuge zirkulieren auf dem Umlauf Neuwaldegg-Schottentor-Neuwaldegg. Es wurden pro Fahrzeug 16 Umläufe simuliert, um den Betrieb über einen längeren Zeitraum darstellen und die Auswirkungen von Intervallabweichungen beobachten zu können. Die Abfahrtszeiten der Fahrzeuge in Neuwaldegg wurden durch das jeweilige planmäßige Intervall bestimmt. Dieses wurde für die HVZ zunächst mit 180 s, für die NVZ zunächst mit 240 s festgelegt (vgl. Kapitel 4.2). Dadurch erfolgt auch die Berücksichtigung der in Neuwaldegg einzuhaltenden Ausgleichszeiten. So dauert beispielsweise in der HVZ bei 18 eingesetzten Fahrzeugen und einem Soll-Abfahrtsintervall von 180 s der Umlauf eines Fahrzeugs planmäßig $18 \cdot 180 \text{ s} = 3240 \text{ s}$ (54,0 min). Liegt die so definierte planmäßige Abfahrtszeit eines Fahrzeugs in Neuwaldegg zeitlich nach der in der Simulation errechneten möglichen Abfahrtszeit dieses Fahrzeugs, muss die restliche Zeit bis zum Erreichen der planmäßigen Abfahrtszeit abgewartet werden. Ist das Fahrzeug dagegen verspätet und die planmäßige Abfahrtszeit bereits erreicht oder verstrichen, kann es ohne Einhalten einer Ausgleichszeit abfahren.

Bei der Simulation kam es in der HVZ allerdings sehr schnell zu Intervallabweichungen und schließlich zur Pulkbildung. Da keine manuellen Eingriffsmöglichkeiten wie z.B. eine vorzeitige Wende von Fahrzeugen zur Verfügung standen, verstärkte sich der Prozess immer mehr. Die Pulkbildung dauerte den gesamten restlichen Simulationszeitraum und umfasste alle eingesetzten Fahrzeuge. Das entspricht grundsätzlich durchaus der tatsächlichen Betriebsituation: Die Linie 43 wurde für die Untersuchung gewählt, weil es nach Angaben der Wiener Linien dort regelmäßig zu Intervallabweichungen und Pulkbildungen kommt. Auch Beobachtungen im Zuge der Erhebungen untermauern diesen Befund. V.a. in der Hauptverkehrszeit zwischen 15 und 19 Uhr konnten an jedem Messtag zwei oder mehrere direkt hintereinander fahrende Fahrzeuge beobachtet werden. Die Dispositionsstelle der Wiener Linien löst dieses Problem üblicherweise durch Kurzführungen von Fahrzeugen (vorzeitige Wende). Da diese Möglichkeit in der Simulation nicht zur Verfügung stand, verstärkte sich der Pulkbildungseffekt von selbst immer mehr.

Trotz dieses Vorgangs sollte eine Vergleichbarkeit mit der danach durchgeführten Simulation des Betriebs unter Anwendung des Verfahrens backward headway hergestellt werden. Dafür wurden abweichend von den Parametern des realen Betriebs die Soll-Abfahrtsintervalle und damit die Ausgleichszeiten in Neuwaldegg sowohl in der HVZ als auch in der NVZ verändert. Die Soll-Abfahrtsintervalle wurden schrittweise von 150 s auf 300 s erhöht. Die Schrittweite betrug 15 s. Es wurden auch Soll-Abfahrtsintervalle gewählt, die kürzer als die planmäßigen waren, um erweiterte Aussagen über die Auswirkungen der Veränderung der Soll-Abfahrtsintervalle unter den Bedingungen der Simulation treffen zu können.

Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten eines Fahrzeugs an den Haltestellen werden durch die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und die FG-Wechselzeiten an den Haltestellen bestimmt. Die Fahrzeiten zwischen den HS sind als Zufallsgrößen modelliert, deren statistische Eigenschaften durch Messungen abgeschätzt wurden (vgl. Kapitel 5.1.3). Die FG-Wechselzeit an einer Haltestelle ist ebenfalls als Zufallsgröße modelliert (vgl. Kapitel 5.1.5). Sie ist abhängig von der Anzahl an Fahrgästen, die an der Haltestelle ein- oder aussteigen wollen. Die Anzahl dieser ein- und aussteigenden Fahrgäste errechnet sich aus den FG-Zahlen aus Tabelle 10 und Tabelle 11 und der Zeit, die zwischen der Ankunftszeit eines Fahrzeugs an einer HS und der Abfahrtszeit des vorhergehenden Fahrzeugs von dieser HS liegt (Fahrzeugfolgezeit). Als Mindestdauer für den FG-Wechsel wurden 10 s festgelegt, was der kürzesten gemessenen Dauer eines FG-Wechsels entspricht (vgl. Abbildung 15). Es wurde zunächst keine Maximaldauer für den FG-Wechsel festgelegt. In der Simulation zeigte sich aber, dass es ohne die Festlegung einer Maximaldauer zu extrem langen, unrealistischen FG-Wechselzeiten kommt. Der höchste gemessene Wert für den FG-Wechsel beträgt 55 s. Wie in Kapitel 5.1.5 erwähnt, wird die Dauer des FG-Wechsels neben der Anzahl der Ein- und Aussteiger auch noch von einigen anderen Faktoren beeinflusst. Es liegt die Vermutung nahe, dass der FG-Wechsel länger als 55 s dauern kann, wenn diese Faktoren begünstigend im Sinne einer Verlängerung des FG-Wechsels einwirken. Als Höchstdauer für den Fahrgastwechsel wurden 90 Sekunden festgelegt.

Die Berechnung der FG-Wechselzeiten des ersten Fahrzeugs im ersten Umlauf muss getrennt vom Vorgehen bei den restlichen Fahrzeugen betrachtet werden. Beim ersten Fahrzeug steht keine Fahrzeugfolgezeit zum Vorderfahrzeug zur Verfügung, mit deren Hilfe die Anzahl der an einer Haltestelle ein- und aussteigenden Fahrgäste berechnet werden könnte. Bei den Messungen wurden neben den Fahrzeiten zwischen den Haltestellen auch die FG-Wechselzeiten an den Haltestellen erfasst. Aus diesen Daten wurden für das erste Fahrzeug im ersten Umlauf durch Mittelwert und Standardabweichung definierte Zufallsgrößen für die Dauer des FG-Wechsels generiert.

Bei der Verwendung von Zufallsgrößen muss darauf geachtet werden, dass die Ergebnisse nicht durch die zufällige Häufung von Werten in eine Richtung verzerrt werden. Zu diesem Zweck wurden in der Betriebssimulation Stichproben der Zufallsgrößen Fahrzeit (200 Realisierungen je Station und Fahrzeug) und FG-Wechselzeit des ersten Fahrzeugs (200 Realisierungen je Station) vorab gezogen. Diese Werte wurden danach für alle Simulationen als Eingangsdaten gleich gewählt, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. So wurden für jedes berücksichtigte Soll-Abfahrtsintervall in Neuwaldegg zwischen 150 und 300 s mit 18 in der HVZ eingesetzten Fahrzeugen und je 16 Fahrzeugumläufen $18 \cdot 16 \cdot 200 = 57.600$ Umläufe berechnet. Aus den so gewonnenen Ankunfts- und Abfahrtszeiten wurden Mittelwerte und Standardabweichungen als beschreibende Größen errechnet.

Die Fahrzeugfolgezeit zwischen zwei Fahrzeugen an einer Haltestelle ist vorab nicht bekannt. Die davon abhängende Zufallsvariable FG-Wechselzeit konnte daher nicht analog zu den Fahrzeiten vorab in größerer Zahl, sondern musste für jedes Fahrzeug bei jeder Haltestelle einzeln realisiert werden.

Auch bei Pulkbildung besteht an einer Haltestelle ein Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen. Es wurde daher angenommen, dass ein Fahrzeug erst dann an einer Haltestelle ankommen kann, wenn seit der Abfahrt des Vorderfahrzeugs mindestens 15 s vergangen sind.

5.2.3. Variante 3: Simulation des Verfahrens backward headway

Backward headway ist ein auch im Echtbetrieb relativ einfach zu implementierendes Verfahren. Im Unterschied zum Verfahren forward headway arbeitet das Verfahren ausschließlich mit dem Einsatz von Ausgleichszeiten, also mit dem Verlangsamen eines Fahrzeugs. Eine im realen Betrieb oft nicht durchführbare Beschleunigung eines Fahrzeugs, wie sie bei forward headway vorkommen kann, ist bei backward headway ausgeschlossen. Zusätzlich hat das Verfahren den Vorteil, dass Ereignisse, die hinter einem Fahrzeug stattfinden (z.B. Verzögerung des nachfolgenden Fahrzeugs durch den KFZ-Verkehr), bei der Berechnung der Ausgleichszeiten berücksichtigt werden.

Grundsätzlich erfolgt die Berechnung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den Haltestellen bei dieser Variante in gleicher Weise wie bei der Simulation des Ist-Zustands. Es werden aber keine durch das Soll-Abfahrtsintervall vorgegebenen Ausgleichszeiten in Neuwaldegg eingehalten, sondern mittels Gleichung (16) - $\alpha \cdot FFZ_n$ - errechnete Ausgleichszeiten an den Kontrollpunkten.

Es wurden mehrere Varianten der Simulation mit verschiedener Anzahl und Positionierung der Kontrollpunkte durchgeführt.

- a) Ein Kontrollpunkt in Neuwaldegg,
- b) drei Kontrollpunkte in Neuwaldegg, Alser Straße (FR Schottentor), Alser Straße (FR Neuwaldegg),
- c) fünf Kontrollpunkte in Neuwaldegg, Wattgasse, Alser Straße, Alser Straße, Wattgasse,
- d) sechs Kontrollpunkte in Neuwaldegg, Hernals, Alser Straße, Schottentor, Alser Straße, Hernals.

Die Auswahl der Kontrollpunkte wurde im Hinblick auf eine möglichst geringe negative Beeinflussung der Reisezeiten der Fahrgäste getroffen. Als Reisezeit wird für die vorliegende Arbeit die Zeit definiert, die für einen Fahrgast vom Erreichen der Einstiegshaltestelle bis zum Verlassen des Fahrzeugs an der Ausstiegshaltestelle vergeht. Die Reisezeit setzt sich damit aus der Wartezeit an der Haltestelle, den Fahrzeiten zwischen den Haltestellen, den Aufenthaltszeiten an den Haltestellen und eventuell einzuhaltenden Ausgleichszeiten zusammen. Damit unterscheidet sich die hier verwendete Definition beispielsweise von der bei Rüger, der den Begriff der Reisezeit für die Betriebssituation auf Vollbahnen definiert und die für den Ansatz dieser Arbeit wenig geeignet ist.⁶³

Die Haltestelle Neuwaldegg ist eine Endhaltestelle der Linie 43. Dort eingehaltene Ausgleichszeiten bewirken keine längeren Reisezeiten für die Fahrgäste. Gleiches gilt für die Haltestelle Schottentor. An der Haltestelle Alser Straße gibt es aufgrund der

⁶³ Vgl. Rüger, 1974, S.36.

Umsteigemöglichkeit zur U6 einen relativ großen Anteil an Ein- und Aussteigern. Es gibt relativ betrachtet weniger durchfahrende Fahrgäste, die von einer Ausgleichszeit am stärksten betroffen wären. Des Weiteren ist die Haltestelle quer zwischen den beiden Fahrbahnen einer hochrangigen Straße angeordnet. Dadurch entstehen Wartezeiten vor den VLSA, die die Überquerung der Straße nach eigenen Beobachtungen häufig zeitintensiv machen. Möglicherweise könnte ein Teil der Ausgleichszeiten durch die Wartezeiten vor den VLSA abgedeckt werden. Auch die Haltestelle Hernals ist zwischen zwei VLSA gelegen. Ein dort situierter Kontrollpunkt könnte von ähnlichen Effekten profitieren. Zusätzlich besteht in Hernals ein größerer Umsteigeknoten zur S-Bahn.

Die Anordnung von mehr als sechs Kontrollpunkten wurde als nicht sinnvoll erachtet, weil mit der Anzahl der Kontrollpunkte auch die Ausgleichszeiten ansteigen, die von den betroffenen Fahrgästen als unangenehm erlebt werden. Bei insgesamt sechs Kontrollpunkten auf der Strecke ist längstens alle fünf Haltestellen ein Kontrollpunkt vorgesehen. Es wurde angenommen, dass es nicht sinnvoll ist, Kontrollpunkte in noch engerem Abstand anzuordnen. Mit c sollte untersucht werden, ob damit ähnlich stabile Intervalle wie bei d erreicht werden können. Zusätzlich sollten mögliche Veränderungen durch die Verlegung der Kontrollpunkte von der HS Hernals in die HS Wattgasse analysiert werden. Weiters konnte bei c der Kontrollpunkt an der Haltestelle Schottentor und damit der betriebliche Konflikt mit der Linie 44 (vgl. Kapitel 4.4) vermieden werden.

Die Ergebnisse der Simulation des Betriebs unter Anwendung des Verfahrens backward headway hängen von den Parametern α und β ab. Für α wurden Werte zwischen 0 und 1 in 0,1-Schritten verwendet. Bei mehreren Kontrollpunkten wurde der Kontrollparameter α_j für jeden Kontrollpunkt gleich gewählt. Für den Faktor β (Mindest-FFZ zwischen zwei Fahrzeugen) wurden Werte zwischen 120 und 210 Sekunden in einer Schrittweite von 15 Sekunden angenommen. Die Simulation des Betriebs wurde für sämtliche möglichen Kombinationen zwischen α und β durchgeführt. Analog zur Simulation des betrieblichen Ist-Zustandes wurden für jede Kombination aus α und β 57.600 Umläufe berechnet.

FFZ_n ist die Fahrzeugfolgezeit zwischen dem zum Zeitpunkt t am Kontrollpunkt ankommenden Fahrzeug 1 und dem darauffolgenden Fahrzeug n . Zur Bestimmung der Position von Fahrzeug n wurde die Ankunftszeit von Fahrzeug 1 am Kontrollpunkt mit den Ankunfts- und Abfahrtszeiten von Fahrzeug n an den Haltestellen verglichen. Danach wurde FFZ_n auf Basis der Mittelwerte der Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und der Mittelwerte der FG-Wechselzeiten in den Haltestellen berechnet. Ein Beispiel soll die Vorgehensweise verdeutlichen: In HS 10 befindet sich ein Kontrollpunkt. Fahrzeug n hält sich zum Zeitpunkt t in HS 7 auf. FFZ_n setzt sich aus den Mittelwerten der Fahrzeiten zwischen HS 7 und 8, HS 8 und 9 und HS 9 und 10 sowie aus den Mittelwerten der FG-Wechselzeiten in HS 8 und HS 9 zusammen. Zusätzlich wurde berücksichtigt, wie lange sich Fahrzeug n zum Zeitpunkt t bereits in HS 7 aufhält. Ist diese Aufenthaltsdauer kürzer als der Mittelwert der FG-Wechselzeiten für HS 7, dann wird die Zeitdifferenz zu FFZ_n hinzugezählt. Analog wird vorgegangen, wenn sich Fahrzeug n zum Zeitpunkt t auf der Strecke zwischen zwei Haltestellen befindet.

Da die Berechnung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten für jeden Umlauf eines Fahrzeugs sequentiell erfolgt, sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten des nachfolgenden Fahrzeugs n zum Zeitpunkt t noch nicht verfügbar. Es wurden daher vor der Berechnung eines neuen Umlaufs eines Fahrzeuges vorläufige Ankunfts- und Abfahrtszeiten für das Folgefahrzeug n errechnet. Dafür wurden die bereits vorhandene Realisierung der Fahrzeiten von Fahrzeug n zwischen den Haltestellen, voraussichtliche FG-Wechselzeiten in Abhängigkeit von der voraussichtlichen Anzahl der Ein- und Aussteiger und die voraussichtlich an den Kontrollpunkten abzuwartenden Ausgleichszeiten herangezogen. Als voraussichtlich abzuwartende Ausgleichszeiten wurde der Durchschnitt der Ausgleichszeiten der letzten fünf Fahrzeuge angenommen.

Die Schätzung der Ausgleichszeiten des Folgefahrzeugs n an den Kontrollpunkten kann von den in der nächsten Sequenz berechneten tatsächlich eingehaltenen Ausgleichszeiten abweichen. Damit können sich auch die tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten von n von den vorläufigen unterscheiden. Folglich ist es auch möglich, dass die auf FFZ_n basierende Ausgleichszeit von Fahrzeug 1 am Kontrollpunkt von jener fiktiven Ausgleichszeit abweicht, die bei genauerer Berechnung der Position von n und damit genauerer Kenntnis von FFZ_n einzuhalten gewesen wäre. Diese Abweichung ist umso geringer, je stabiler die Intervalle sind, weil in diesem Fall die vorläufigen und die tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten in einem ähnlichen Bereich sind. Damit gibt es auch keinen oder nur einen geringen Unterschied zwischen den errechneten und theoretischen fiktiven Ausgleichszeiten. Bei instabilen Intervallen können die Abweichungen größer sein. Genau genommen wird die Simulation daher nicht mit dem Verfahren backward headway, sondern mit einem auf diesem basierenden, aber etwas abgewandelten Verfahren durchgeführt.

5.2.4. Variante 4: Simulation des Verfahrens backward headway mit reduzierter Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen

Nach der Auswertung von Variante 3 war klar, dass die Anwendung des Verfahrens backward headway stabilere und kürzere Intervalle als im derzeitigen Planzustand ermöglicht. Es sollte daher in einem weiteren Schritt überprüft werden, ob die derzeitigen Planintervalle (180 s in der HVZ) auch mit einer verringerten Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen erreicht werden können. Zusätzlich sollten auch die Auswirkungen auf die Intervallstabilität analysiert werden. Im günstigsten Fall würde durch die Fahrzeugreduktion eine ökonomischere Betriebsführung bei zumindest gleichbleibenden Intervallen und Intervallstabilität möglich.

Die Betriebssimulation mit reduzierter Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen wurde analog zur Variante c mit fünf Kontrollpunkten durchgeführt. Variante c hatte ebenso wie Variante d sehr stabile Resultate im Hinblick auf die Intervalle erbracht. Variante c hat gegenüber Variante d jedoch den Vorteil, dass es wie bereits erwähnt keinen Kontrollpunkt an der Haltestelle Schottentor und damit keinen betrieblichen Konflikt mit der Linie 44 gibt.

Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge wurde auf 17, 16 und schließlich auf 15 reduziert. Eine weitere Reduktion erwies sich als nicht sinnvoll, weil damit ein Intervall von etwa 180 s nicht mehr erreicht werden konnte. Das Abfahrtsintervall in Neuwaldegg für den jeweils ersten Umlauf der Fahrzeuge (180 s bei 18 eingesetzten Fahrzeugen) wurde an die verringerte Anzahl

an Fahrzeugen angepasst. Es betrug bei 17 Fahrzeugen $3240 \text{ s} / 17 = 190 \text{ s}$, bei 16 Fahrzeugen $3240 \text{ s} / 16 = 202,5 \text{ s}$ und bei 15 Fahrzeugen $3240 \text{ s} / 15 = 216 \text{ s}$. 3240 s ist die Dauer eines Fahrzeugumlaufs bei 18 eingesetzten Fahrzeugen und einem Intervall von 180 s.

Wie schon bei den bisherigen Varianten wurden auch in Variante 4 für jedes Fahrzeug jeweils 16 Fahrzeugumläufe Neuwaldegg-Neuwaldegg berechnet. Abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge unterschied sich die berechnete Anzahl der Fahrten. Sie betrug bei 18 Fahrzeugen $18 \cdot 16 = 288$, bei 17 Fahrzeugen 272, bei 16 Fahrzeugen 256 und bei 15 Fahrzeugen 240 Fahrten. Ebenso wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurden Stichproben der Zufallsgrößen Fahrzeit und FG-Wechselzeit des ersten Fahrzeugs gezogen. Durch die Reduktion der Fahrzeuganzahl veränderte sich auch die Anzahl der berechneten Fahrten. Statt $18 \cdot 16 \cdot 200 = 57.600$ Umläufe wurden beispielsweise bei Reduktion auf 17 Fahrzeuge nur $17 \cdot 16 \cdot 200 = 54.400$ Umläufe berechnet. Es musste daher überprüft werden, welche Veränderungen sich dadurch bei den Mittelwerten und Standardabweichungen der Fahrzeiten zwischen den HS ergaben und ob die Ergebnisse nach wie vor vergleichbar waren. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Mittelwerte und Standardabweichungen der Fahrzeiten bei allen vier Varianten nur geringfügig im Zehntelsekundenbereich voneinander unterschieden (siehe Tabelle 40 und Tabelle 41 in Kapitel 11.2.4 im Anhang). Die Fahrzeiten zwischen den HS belaufen sich im Mittel je nach Relation zwischen 31 und 161 s (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7). Angesichts dieser Verhältnisse wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse dadurch nur unwesentlich und damit vernachlässigbar beeinflusst werden. Ein Vergleich zwischen den vier Varianten ist zulässig.

6. Ergebnisse

6.1. Allgemeines

Für die Errechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen von Intervallen, Umlauf- und Ausgleichszeiten wurden an sämtlichen Haltestellen die Ankunfts- und Abfahrtszeiten aller Fahrzeuge ausgewertet. Tabellen mit allen errechneten Werten, auf denen die Grafiken dieses Kapitels basieren, finden sich im Anhang in Kapitel 11.2.

6.2. Intervalle

6.2.1. Vorgangsweise

Für die Bestimmung des Intervalls wurde an jeder Haltestelle für jedes Fahrzeug die Fahrzeugfolgezeit zum nächsten Fahrzeug ermittelt. Für alle so erhaltenen FFZ aus allen Umläufen und Realisierungen wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Dieser Vorgang wurde bei der Ist-Situation in der HVZ und NVZ für jedes Soll-Abfahrtsintervall in Neuwaldegg und für jede Kombination von α und β bei der Anwendung der backward headway - Methode durchgeführt.

6.2.2. Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr

Als Vergleichsbasis werden zunächst die Ergebnisse der Simulation für den Ist-Zustand vorgestellt. Abbildung 16 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle für die Hauptverkehrszeit von 15 bis 19 Uhr. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurde, kam es in der Simulation in vielen Fällen zu starker Pulkbildung, die im realen Betrieb so nicht auftritt. Intervallabweichungen und Pulkbildung sind an hohen Werten für die Standardabweichung erkennbar. Um realistischere Werte zu erzielen und die Intervallabweichungen reduzieren zu können, wurden die zur Verfügung stehenden Ausgleichszeiten in Neuwaldegg erhöht. Zu diesem Zweck wurde das Soll-Intervall zwischen den Fahrzeugen, das bei der Abfahrt in Neuwaldegg eingehalten werden muss, schrittweise variiert (vgl. Kapitel 5.2.2). Wie aus Abbildung 16 ersichtlich ist, werden die stabilsten Intervalle (geringste Standardabweichung) bei einem Soll-Abfahrtsintervall von 225 s erreicht. Für diesen Fall beträgt der Mittelwert der Intervalle 196 s und die Standardabweichung 224 s. Auch mit Berücksichtigung der erhöhten Ausgleichszeiten ist also der Wert für die Standardabweichung und dementsprechend die Häufigkeit von Abweichungen vom Intervall sehr groß.

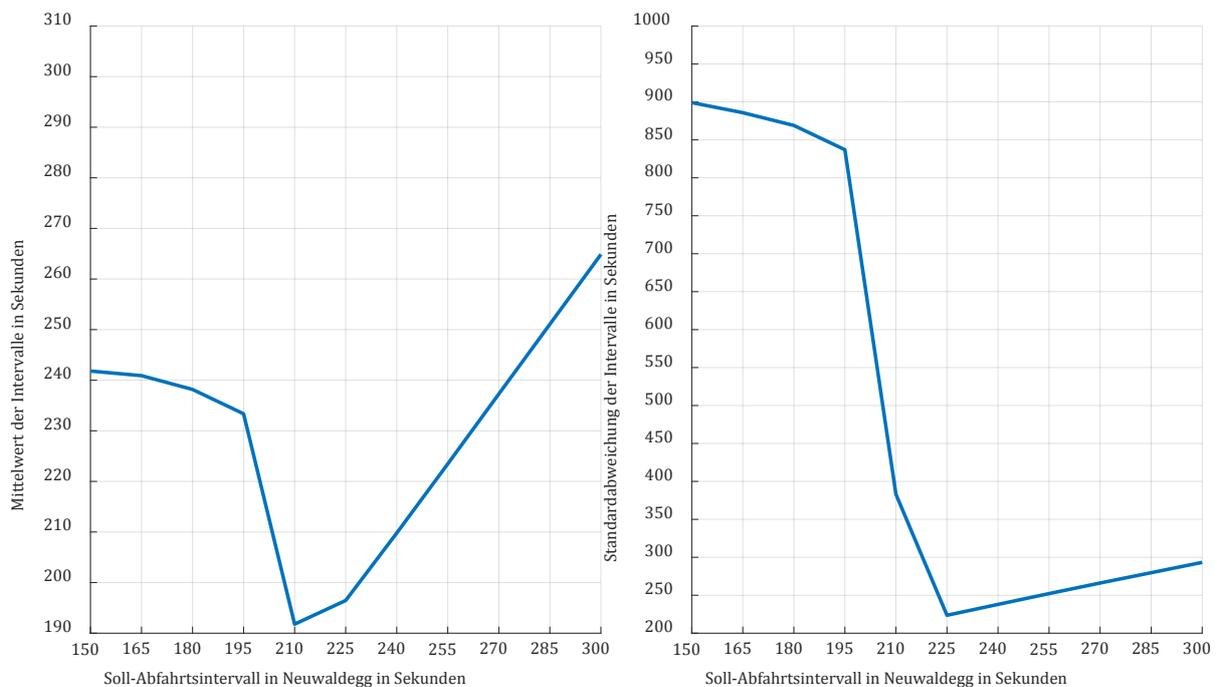


Abbildung 16: Intervalle - Ist-Zustand 15-19 Uhr

6.2.3. Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr

In der Nebenverkehrszeit von 10 bis 12 Uhr besteht weniger Fahrgastaufkommen als in der HVZ. Es sind planmäßig nur 14 statt 18 Fahrzeuge im Einsatz. Das planmäßige Intervall in der NVZ beträgt 240 s statt 180 s in der HVZ. Trotz des niedrigeren FG-Aufkommens zeigt sich in der Simulation des Betriebs in der NVZ aufgrund der geringeren Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen ein ähnliches Bild wie in der HVZ. Die geringste Standardabweichung tritt bei einem Soll-Abfahrtsintervall von 255 s in Neuwaldegg auf und beträgt 229 s. Der Mittelwert der Intervalle liegt hier bei ebenfalls 229 s. Abbildung 17 veranschaulicht die Ergebnisse. Auch diese niedrigste

in der Simulation des Betriebs in der NVZ erreichte Standardabweichung ist im Vergleich zum Mittelwert des Intervalls sehr hoch. Damit treten Intervallabweichungen und Pulkbildungen auch in der NVZ häufig auf. Beobachtungen im Zuge der Erhebungen weisen aber darauf hin, dass es in der NVZ im realen Betrieb nur in seltenen Fällen zur Pulkbildung kommt. Das bedeutet, dass das Ergebnis der Simulation des Betriebs in der NVZ von der Realität abweicht. Die wahrscheinliche Ursache dafür ist ebenso wie bei der Simulation der Ist-Situation in der HVZ das Fehlen der Möglichkeiten der realen Disposition wie z.B. Kurzführungen.

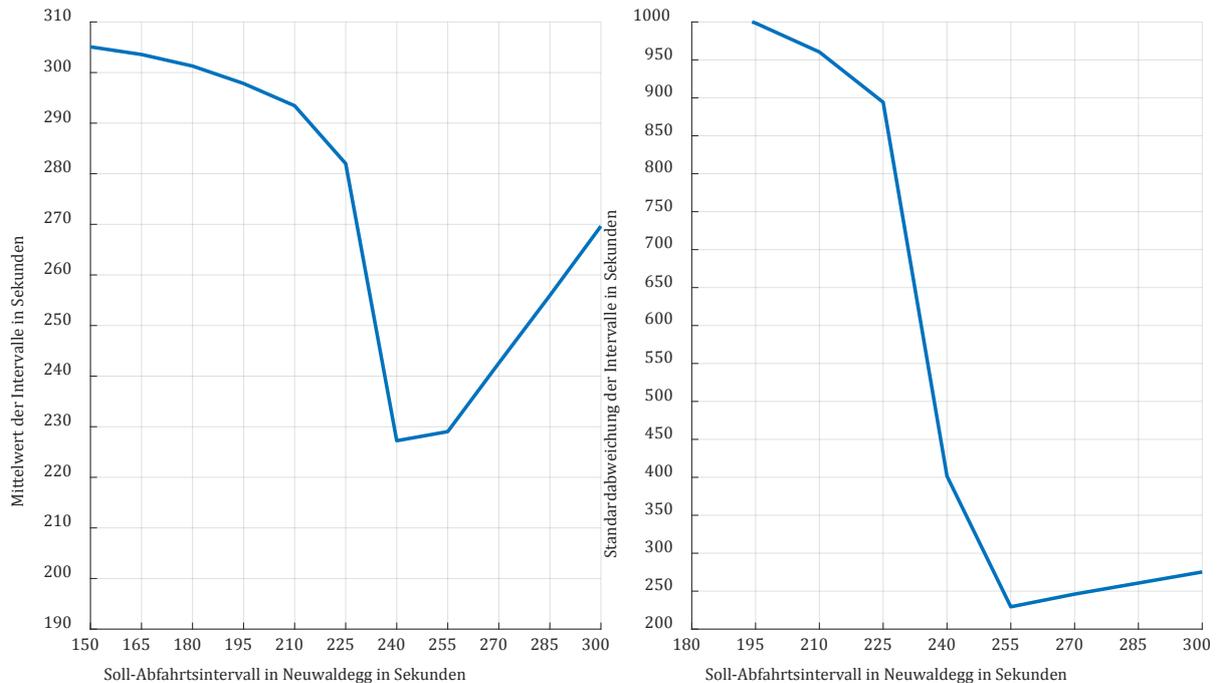


Abbildung 17: Intervalle - Ist-Zustand 10-12 Uhr

6.2.4. Anwendung backward headway

Abbildung 18 bis Abbildung 21 zeigen die Ergebnisse für die Varianten a bis d (einer, drei, fünf und sechs Kontrollpunkte) in grafischer Form. Aus diesen Abbildungen ist ersichtlich, dass Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle bei allen Varianten in Abhängigkeit von α vielfach ein ausgeprägtes Minimum zeigen. Sowohl niedrige als auch hohe α -Werte führen zu höheren Intervallmittelwerten und Standardabweichungen. Bei höheren β -Werten (je nach Anzahl der Kontrollpunkte ab 180 oder 195 s) tritt der Effekt nur bei höheren α -Werten auf.

Allgemein sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle bei niedrigerem β größer. Sind gleichzeitig auch die α -Werte niedrig, so sind die Intervalle relativ instabil und lange. Weder durch α noch durch β werden ausreichend lange Ausgleichszeiten zur Verfügung gestellt. Steigt α an, so erhöhen sich daraus die einzuhaltenden Ausgleichszeiten. Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle erreichen ihr Minimum, wenn das ansteigende α das zu geringe β ausreichend ausgleicht. Im Gegensatz dazu bestimmt bei größeren β -Werten ab ca. 180 s (abhängig von der Anzahl der Kontrollpunkte) der β -Wert das Minimum von Mittelwerten und Standardabweichungen. Erkennbar ist das z.B. in Abbildung 19 bei $\beta = 195$ s daran, dass Intervallmittelwert und Standardabweichung bereits bei $\alpha = 0$ sehr niedrig sind und sich mit steigendem α zunächst nicht ändern. Erst bei größeren α -Werten (im Beispiel bei $\alpha = 0,5$) wird

der Einfluss daraus auf die errechneten Ausgleichszeiten merkbar. Das Ansteigen der Ausgleichszeiten führt aber in diesen Fällen dazu, dass die Intervalle instabiler werden und die Länge der Intervalle ansteigt. Die Dauer der Ausgleichszeit für das Erreichen der minimalen Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle ist hier von β begrenzt.

Bei höheren α -Werten sind die errechneten Ausgleichszeiten zu lange, wodurch die Länge der Intervalle ansteigt und die Instabilität erhöht ist. Der α -Wert, ab dem das der Fall ist, ist von der Anzahl der Kontrollpunkte abhängig. Gleichzeitig ist auch ein Zusammenhang mit β vorhanden. Zunächst wird der maßgebliche α -Wert kleiner, wenn β höher ist. Ab $\beta = 195$ s kehrt sich der Zusammenhang um und der maßgebliche α -Wert steigt an. So hat α beispielsweise bei drei Kontrollpunkten (Abbildung 19) und $\beta = 210$ s erst ab 0,8 einen Einfluss auf den Intervallmittelwert und ab 0,9 einen Einfluss auf die Standardabweichung. Die Wahl von β spielt auch dahingehend eine Rolle, als dass bei größeren β -Werten Mittelwert und Standardabweichung der Intervalle auch bei größeren α generell niedriger sind. Das ist insofern auffällig, da Mittelwert und Standardabweichungen in diesem Bereich nach dem soeben Ausgeführten v.a. von α abhängig sind. Vermutlich kommen die größeren β -Werte aber auch hier noch in vielen Fällen zur Ausgleichszeitenberechnung an den Kontrollpunkten zur Anwendung und verringern dadurch Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle.

Aus den Auswertungen kann geschlossen werden, dass ausreichend große Ausgleichszeiten am Kontrollpunkt eine Voraussetzung für stabile und gleichzeitig kurze Intervalle sind. Kürzere Intervallmittelwerte sind eine Folge von zunehmender Intervallstabilität und damit abnehmender Häufigkeit von Pulkbildung. Für das Erreichen von möglichst kurzen und stabilen Intervallen ist es eine Voraussetzung, dass β groß genug gewählt wird. Wird β aber zu groß gewählt ($\beta = 210$ s, vgl. z.B. Abbildung 19), erhöhen sich die Intervallmittelwerte wieder. Bei den Varianten c und d (fünf und sechs Kontrollpunkte) sinken die Standardabweichungen der Intervalle ab $\alpha = 0,9$ wieder ab. Die Ursache für das Phänomen der sinkenden Standardabweichungen bei sehr hohem α ist unklar.

Bei einem Vergleich der Varianten a bis d lässt sich feststellen, dass die Intervalle mit zunehmender Anzahl von Kontrollpunkten sowohl stabiler als auch kürzer werden. Die kürzesten Intervalle treten bei sechs Kontrollpunkten, $\beta = 180$ s und $\alpha = 0,2$ mit im Mittel 156 s auf. Die Standardabweichung der Intervalle beträgt dabei 66 s. Die kleinste Standardabweichung tritt bei sechs Kontrollpunkten, $\beta = 195$ s und $\alpha = 0,3$ auf und beträgt 61 s. Der dazugehörige Intervallmittelwert beträgt 159 s. Bei einem Kontrollpunkt werden die geringsten Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle bei höheren α -Werten erreicht als bei drei, fünf und sechs Kontrollpunkten.

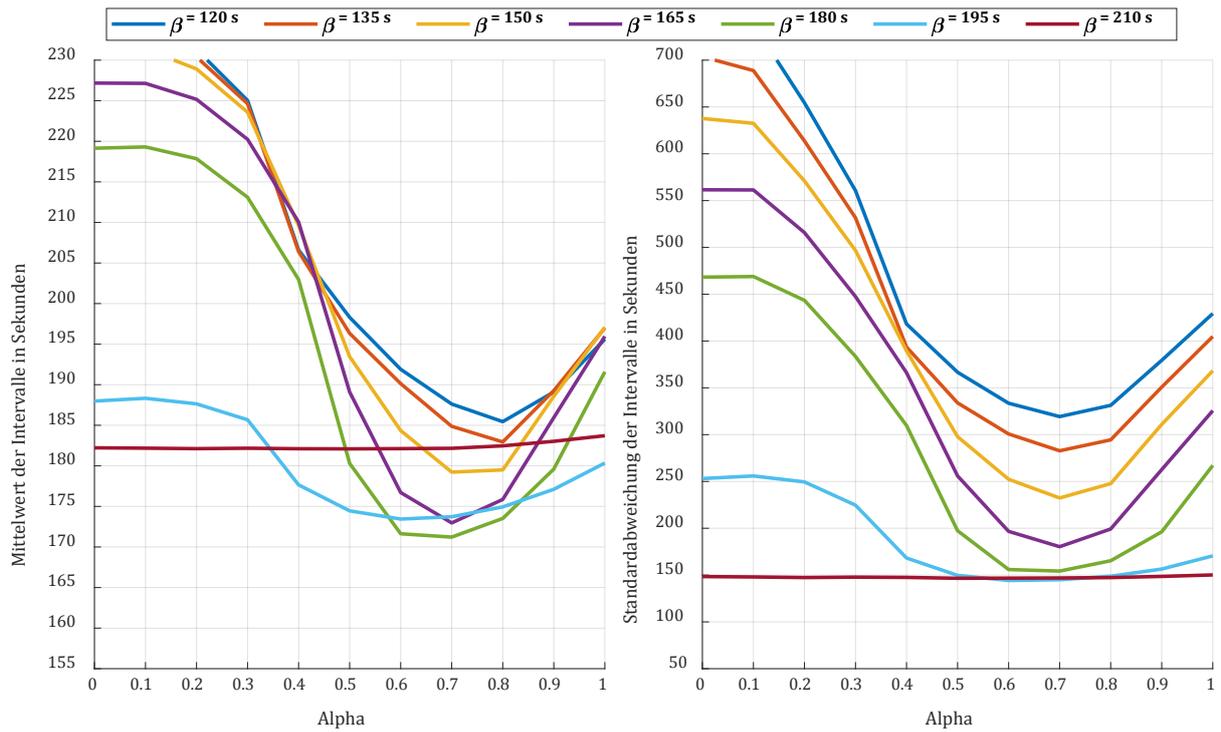


Abbildung 18: Intervalle - ein Kontrollpunkt

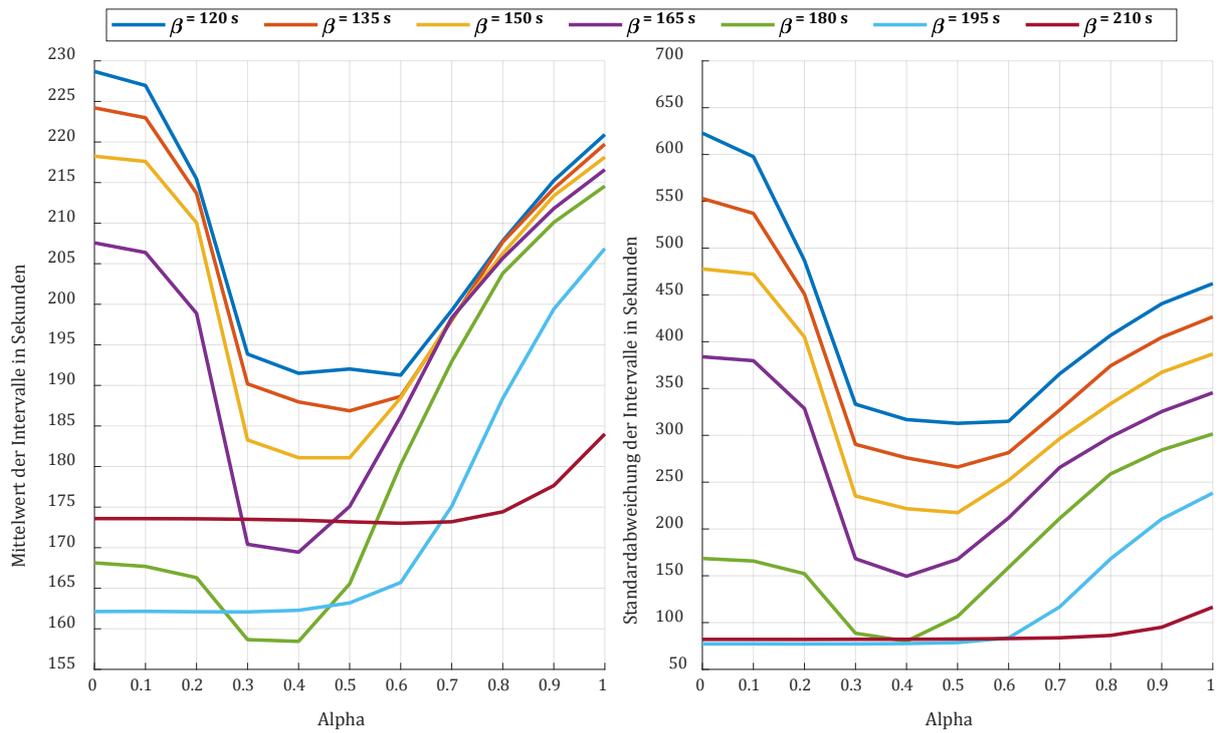


Abbildung 19: Intervalle - drei Kontrollpunkte

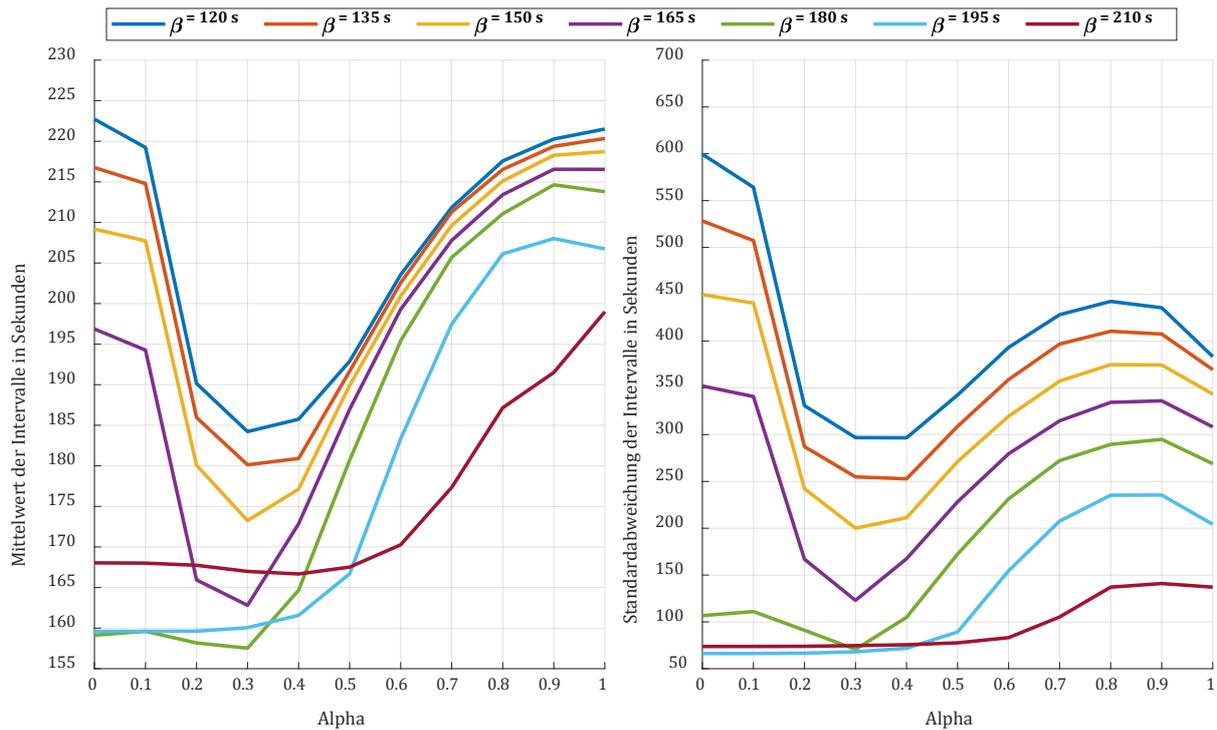


Abbildung 20: Intervalle - Fünf Kontrollpunkte

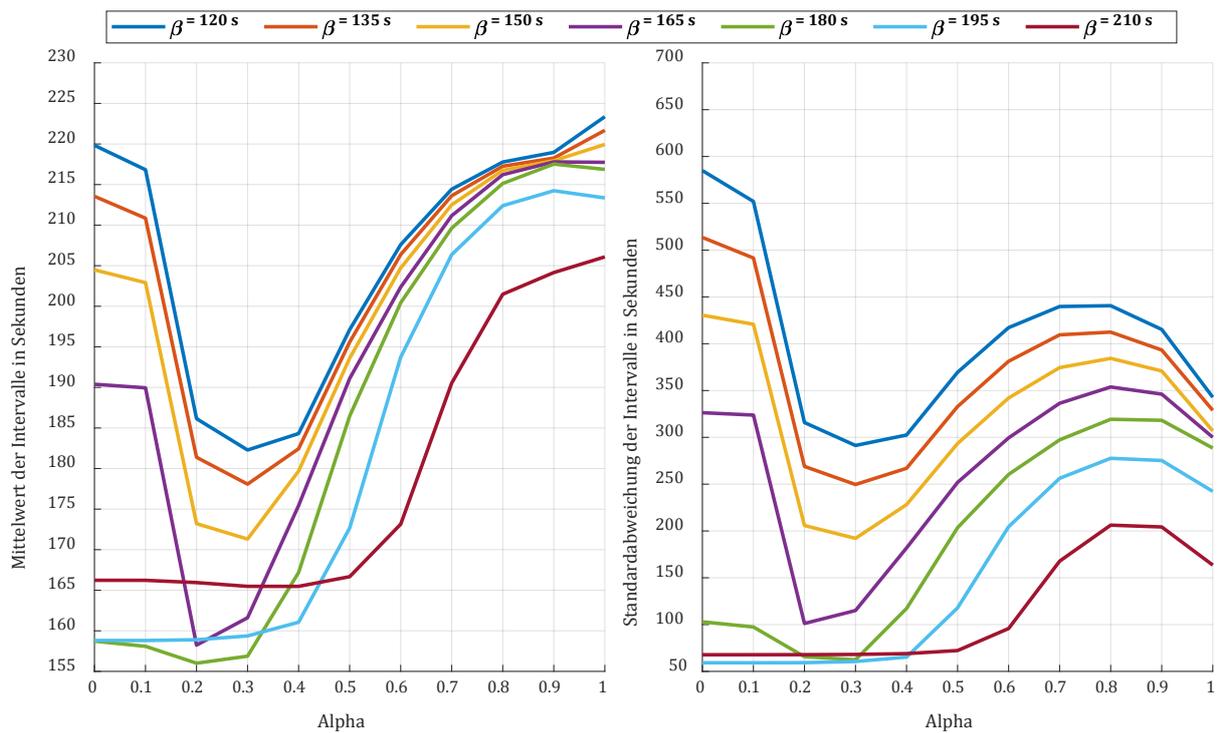


Abbildung 21: Intervalle - Sechs Kontrollpunkte

6.3. Umlaufzeiten

6.3.1. Vorgangsweise

Als Umlaufzeiten werden die Fahrzeiten für einen Fahrzeugumlauf von Neuwaldegg bis Neuwaldegg bezeichnet. Für die Ermittlung wurde die Differenz von Abfahrtszeit und

Ankunftszeit eines Fahrzeugs in Neuwaldegg berechnet. Ausgleichzeiten in Neuwaldegg sind daher in den Umlaufzeiten nicht berücksichtigt. Daten zur Umlaufzeit erlauben Aufschlüsse über die für Passagiere relevante Reisezeit. Lange Umlaufzeiten bedeuten entweder starke Pulkbildung oder lange Ausgleichszeiten an den Kontrollpunkten. Beides ist für Passagiere unangenehm.

6.3.2. Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 15-19 Uhr

Konsequenzen von Pulkbildung sind erhöhte FG-Wechselzeiten bzw. Wartezeiten hinter Fahrzeugen mit langen Haltestellenaufenthalten. Als Folge davon verlängern sich auch die Umlaufzeiten der Fahrzeuge. Ausreichend lange Ausgleichszeiten sind also auch eine Voraussetzung für die Gewährleistung von kurzen und stabilen Umlaufzeiten. Aufgrund dieses Zusammenhangs treten die stabilsten Umlaufzeiten mit einer Standardabweichung von 165 s ebenso wie die stabilsten Intervalle (vgl. Kapitel 6.2.2) beim gleichen Soll-Abfahrtsintervall von 225 s in Neuwaldegg auf. Die kürzesten Umlaufzeiten entstehen hingegen ebenso wie die kürzesten Intervalle bei einem Soll-Abfahrtsintervall von 210 Sekunden und betragen im Mittel 3749 s (62,5 Minuten). Die dazugehörige Standardabweichung beträgt 403 s. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse in grafischer Form.

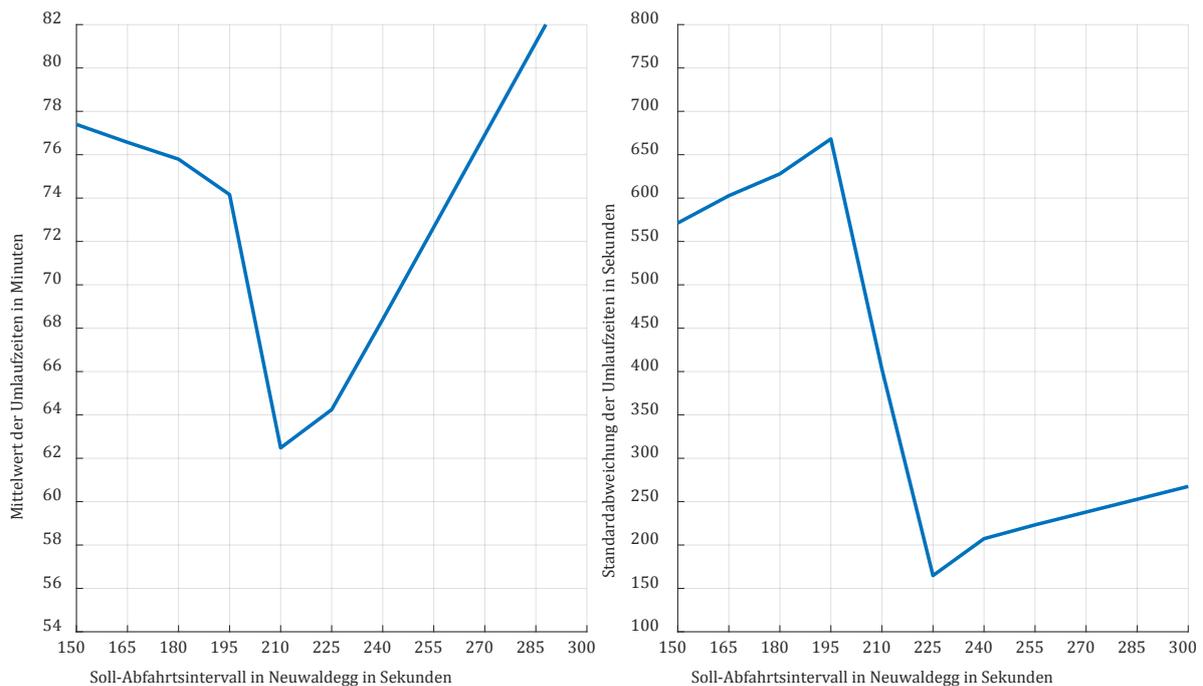


Abbildung 22: Umlaufzeiten - Ist-Zustand 15-19 Uhr

Es fällt auf, dass die errechneten Umlaufzeiten größer sind als die in Kapitel 4.3 dargestellten planmäßigen Zeiten. Diese betragen für einen Umlauf Neuwaldegg-Neuwaldegg (ohne Ausgleichszeit in Neuwaldegg) in der Zeit zwischen 15 Uhr und 18:30 Uhr 49,5 Minuten. Für die Differenz sind zwei Erklärungen denkbar. Zum einen waren die im Realbetrieb gemessenen Umlaufzeiten in den meisten Fällen ebenfalls länger als die planmäßigen Umlaufzeiten. Es darf also vermutet werden, dass die planmäßigen Zeiten auch im realen Betrieb nur in günstigen Fällen erreicht werden. Dafür sind auch die dort häufig vorkommenden Intervallabweichungen und Pulkbildungen ein Indiz. Zum anderen kommt auch bei den Umlaufzeiten das schon

mehrfach erwähnte Problem der fehlenden dispositiven Eingriffsmöglichkeiten in der Simulation zum Tragen. Durch die dadurch häufig entstehenden Pulkbildungen vergrößern sich die durchschnittlichen Umlaufzeiten und die Standardabweichungen der Umlaufzeiten ebenfalls.

6.3.3. Ist-Situation im Untersuchungszeitraum 10-12 Uhr

Die kleinsten Mittelwerte der Umlaufzeiten in der NVZ treten analog zu den kleinsten Mittelwerten der Intervalle (vgl. Kapitel 6.2.3) bei einem Soll-Abfahrtsintervall von 240 s in Neuwaldegg auf. Der Mittelwert der Umlaufzeit beträgt dabei 3337 s (55,6 Minuten), die Standardabweichung 432 s (vgl. Abbildung 23). Die kleinste Standardabweichung der Umlaufzeiten wird ebenso wie die kleinste Standardabweichung der Intervalle bei einem Soll-Abfahrtsintervall von 255 s erreicht und beträgt 146 s. Die errechneten Umlaufzeiten sind zwar kürzer als jene in der HVZ, aber noch immer länger als die in Kapitel 4.3 beschriebenen planmäßigen Zeiten, die 47,5 Minuten betragen. Als Gründe dafür kommen die bereits in Kapitel 6.3.2 angeführten in Betracht.

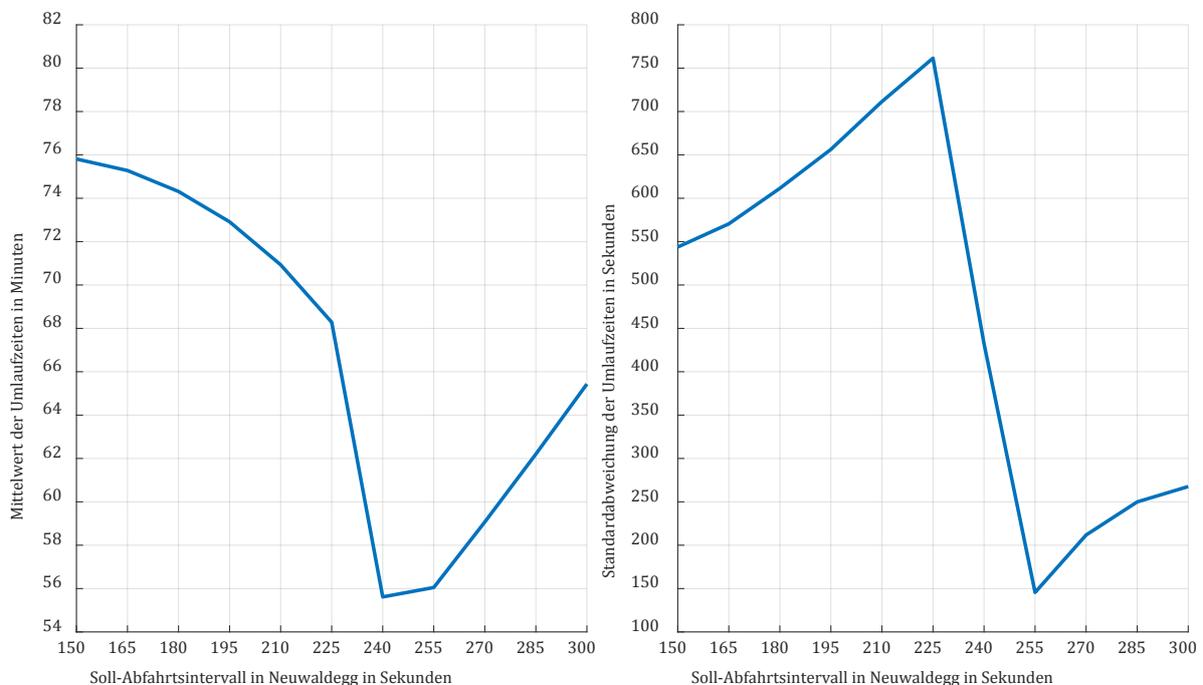


Abbildung 23: Umlaufzeiten - Ist-Zustand 10-12 Uhr

6.3.4. Anwendung backward headway

Die Ergebnisse der Varianten a bis d finden sich in Abbildung 24 bis Abbildung 27 in grafischer Darstellung. Die Mittelwerte der Umlaufzeiten zeigen ähnlich wie die Intervalle in Abhängigkeit von α vielfach ein ausgeprägtes Minimum. Mit steigender Anzahl von Kontrollpunkten erscheint die U-Form ausgeprägter. Bei den Standardabweichungen der Umlaufzeiten ist hingegen keine eindeutige Form erkennbar.

Aufgrund des in Kapitel 6.3.2 erläuterten Zusammenhangs zwischen Ausgleichszeiten, Intervallen und Umlaufzeiten stellen sich die Abhängigkeiten zwischen α und β für die Umlaufzeiten ähnlich dar wie für die Intervalle: Bei niedrigem β und niedrigem α stehen keine ausreichend langen Ausgleichszeiten zur Verfügung. Die Intervalle sind instabil. Es kommt zu

Pulkbildungen, weswegen auch die Mittelwerte und Standardabweichungen der Umlaufzeiten erhöht sind. Mit ansteigendem α wird das niedrige β kompensiert, bis Mittelwerte und Standardabweichungen ihr Minimum erreichen. Bei einer geringeren Anzahl an Kontrollpunkten ist der dafür benötigte α -Wert größer als bei einer größeren Anzahl an Kontrollpunkten. Dagegen werden bei höheren β -Werten (abhängig von der Anzahl der Kontrollpunkte ab ca. $\beta = 180$ s) die Minimalwerte von Mittelwert und Standardabweichung bei niedrigem α -Wert erreicht. Dieser niedrige α -Wert hat noch keinen oder nur geringen Einfluss auf die Berechnung der Ausgleichszeiten. Je größer β ist, desto größer wird auch der Wert, bei dem α relevant wird. Unabhängig von der Wahl von β gilt, dass bei höheren α -Werte die Dauer der Ausgleichszeiten zu lange ist und dadurch Intervalle und damit auch die Umlaufzeiten instabiler und länger werden.

Ein Vergleich der Varianten a bis d zeigt, dass die Mittelwerte der Umlaufzeiten für $\beta = 180$ s und $\beta = 195$ s bei drei Kontrollpunkten kleiner sind als bei einem Kontrollpunkt. Für die anderen β -Werte steigen die Umlaufzeiten von einem auf drei Kontrollpunkte an. Bei β -Werten bis 165 s sind die Mittelwerte bei fünf und sechs Kontrollpunkten gegenüber den Mittelwerten bei drei Kontrollpunkten etwas niedriger. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich in der erhöhten Intervallstabilität zu suchen (vgl. Kapitel 6.2.4). Im Gegensatz dazu sind die Mittelwerte der Umlaufzeiten bei β -Werten ab 180 s vermutlich aufgrund der längeren Ausgleichszeiten erhöht. Bei einer größeren Anzahl von Kontrollpunkten werden zwar die Intervalle stabiler, aber durch die längeren Ausgleichszeiten kann die Umlaufzeit trotzdem länger sein. Die kürzesten Umlaufzeiten werden bei drei Kontrollpunkten, $\beta = 180$ s und $\alpha = 0,3$ mit einem Mittelwert von 3274 s (54,6 Minuten) erzielt. Die Standardabweichung der Umlaufzeiten beträgt in dem Fall 170 s. Die kleinste Standardabweichung und damit die stabilste Umlaufzeit tritt ebenfalls bei drei Kontrollpunkten, $\beta = 195$ s und $\alpha = 0,3$ auf und beträgt 63 s. Dabei beläuft sich der Mittelwert der Umlaufzeit auf 3369 s (56,2 Minuten).

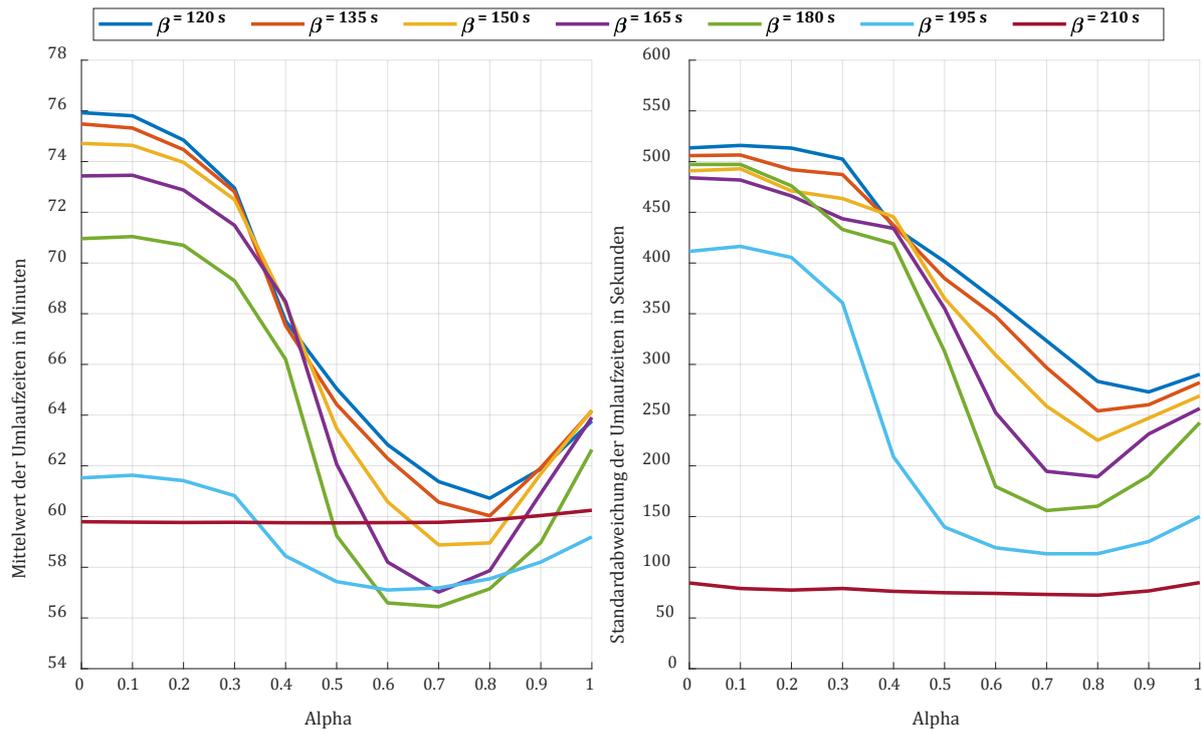


Abbildung 24: Umlaufzeiten - ein Kontrollpunkt

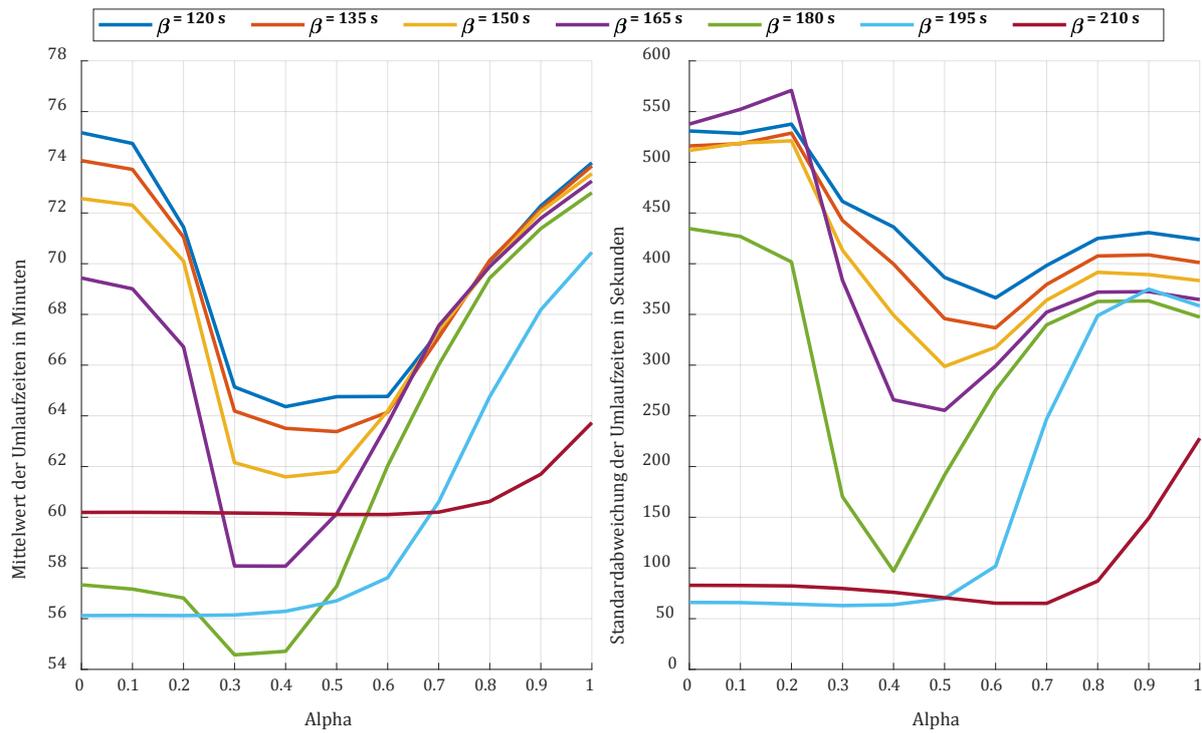


Abbildung 25: Umlaufzeiten - drei Kontrollpunkte

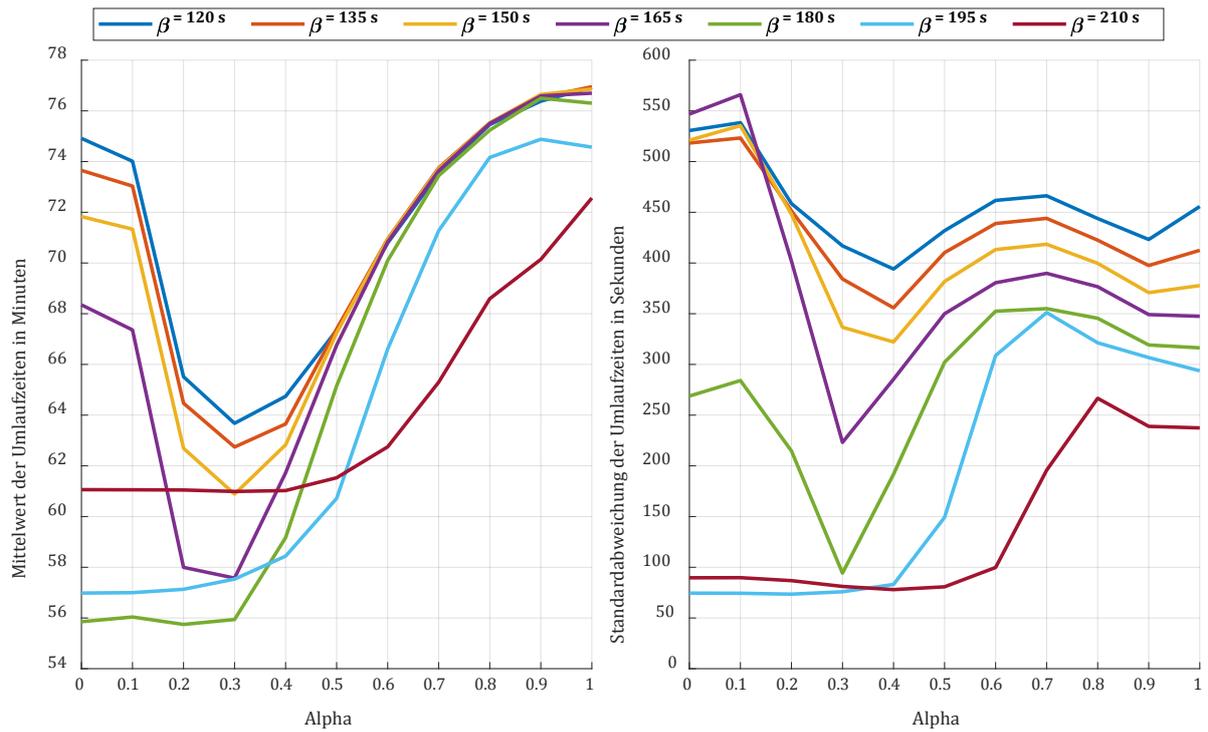


Abbildung 26: Umlaufzeiten - fünf Kontrollpunkte

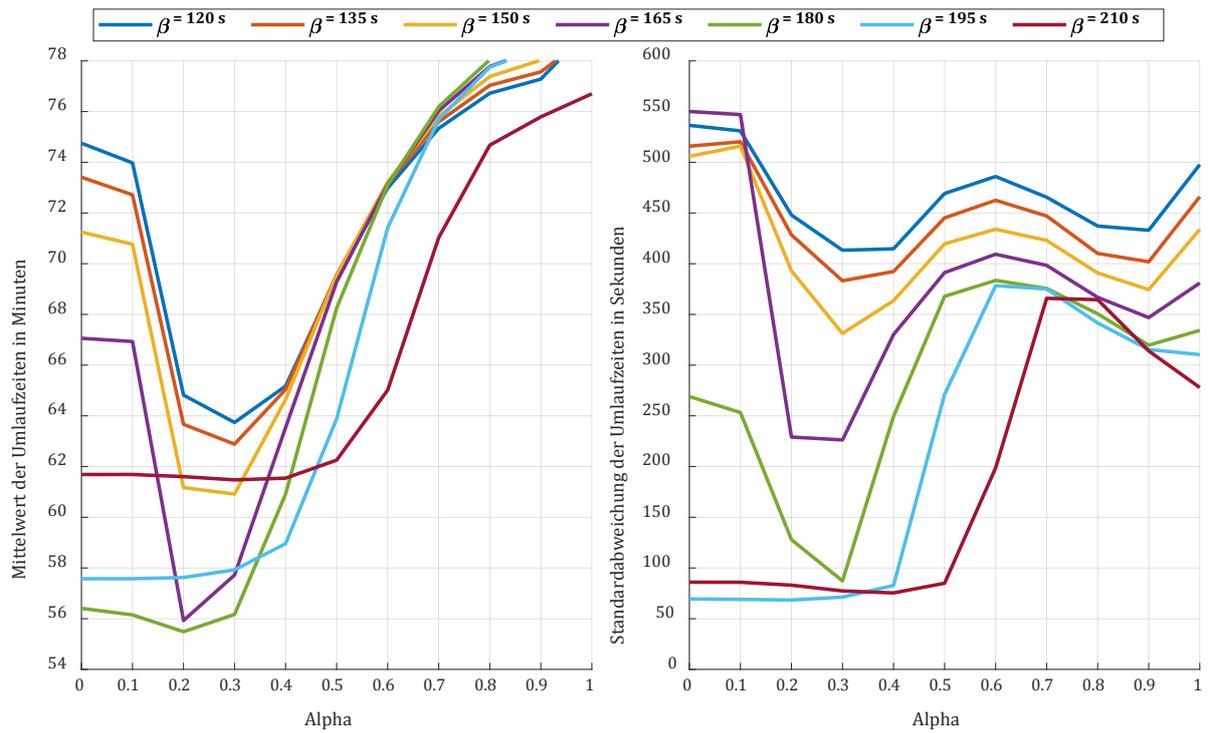


Abbildung 27: Umlaufzeiten - sechs Kontrollpunkte

6.4. Ausgleichszeiten

6.4.1. Vorgangsweise und Allgemeines

Zur Ermittlung von Mittelwerten und Standardabweichungen der Ausgleichszeiten wurden die Aufenthaltszeiten der Fahrzeuge an den Kontrollpunkten herangezogen. Davon wurden die dortigen FG-Wechselzeiten in Abzug gebracht, die für die vorliegende Arbeit nicht als Teil der Ausgleichszeiten angesehen werden.

Von einer genauen Auswertung der Ausgleichszeiten in den betrieblichen Ist-Situationen wurde abgesehen. Diese Zeiten sind Hilfsmittel, um ein sinnvolles Funktionieren der Simulation zu gewährleisten. Im Gegensatz dazu stellen die beim Verfahren backward headway verwendeten Ausgleichszeiten und ihre Variation grundlegende Elemente der Funktionsweise des Verfahrens dar. Bei mehreren Kontrollpunkten wurde die Summe der Ausgleichszeiten für die Auswertungen herangezogen.

Je niedriger die Dauer der Ausgleichszeiten ist, desto geringer sind auch die Zeiten, die ein Fahrgast eventuell an einer Haltestelle in einem stehenden Fahrzeug verbringen muss. Damit ist die Reisezeit für einen Fahrgast umso kürzer, je geringer die abzuwartenden Ausgleichszeiten sind. Allerdings gilt das nur solange, als nicht durch instabile Intervalle lange Wartezeiten für die an den Haltestellen wartenden Fahrgäste entstehen oder die Weiterfahrt durch Pulkbildung verzögert wird. Das bedeutet, dass eine Abwägung zwischen möglichst kurzen Reisezeiten und möglichst stabilen Intervallen getroffen werden muss. Für die Erreichung von stabilen Intervallen ist es vorteilhaft, mehrere Kontrollpunkte einzurichten (vgl. Kapitel 6.2.4). Dabei könnten die Kontrollpunkte so platziert werden, dass die Reisenden vom Abwarten der Ausgleichszeiten möglichst wenig betroffen sind (vgl. Kapitel 5.2.3).

6.4.1. Anwendung backward headway

Abbildung 28 bis Abbildung 31 zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Varianten a bis d. Mit zunehmender Anzahl an Kontrollpunkten erhöhen sich die Ausgleichszeiten, die die Fahrzeuge auf ihrem Umlauf insgesamt einhalten müssen. Ebenso steigen die Mittelwerte der Ausgleichszeiten aufgrund der Formel $\alpha \cdot FFZ_n$ mit zunehmendem α -Wert an. Aus Abbildung 28 ist ersichtlich, dass dieser Anstieg bei kleinen β -Werten stärker ist und schon bei kleinerem α erfolgt als bei großen β -Werten. Die Ursache dafür ist (wie bereits in Kapitel 6.2.4 ausgeführt), dass die Ausgleichszeiten bei größerem β zunächst v.a. von diesem β -Wert bestimmt werden und erst bei größerem α eine Beeinflussung durch dieses erfolgt. Dieser Zusammenhang ist auch in Variante b (Abbildung 29) noch erkennbar, während er in den Varianten c und d verschwunden ist und vermutlich durch andere Einflüsse und Wechselwirkungen überlagert wird. Bei Variante a und teilweise auch bei Variante b gilt grundsätzlich, dass die Mittelwerte der Ausgleichszeiten umso größer sind, je größer der β -Wert ist. Bei den Varianten c und d gilt dieser Grundsatz zwar in manchen Bereichen nach wie vor, aber vielfach entwickeln sich die Mittelwerte abhängig von β sehr unterschiedlich (vgl. Abbildung 30 und Abbildung 31). Bei $\beta = 120$ s bis $\beta = 165$ s fallen die Mittelwerte der Ausgleichszeiten bei α -Werten von 0,2 bis 0,3 ab und steigen ab $\alpha = 0,4$ wieder an. Je größer β ist

und je mehr Kontrollpunkte vorhanden sind, desto stärker ausgeprägt ist dieser Prozess. Er hat seine Ursache in den Intervallen, die für die genannten β -Werte bei α -Werten von 0,2 bis 0,4 am kürzesten und stabilsten sind (vgl. Kapitel 6.2.4). Dadurch sind auch kürzere Ausgleichszeiten möglich und notwendig. Kurze Ausgleichszeiten und stabile Intervalle bedingen sich hier gegenseitig. Bei β -Werten zwischen 180 s und 210 s sind die Mittelwerte der Ausgleichszeiten bei kleineren α -Werten zunächst relativ konstant. Beginnend bei $\alpha = 0,4$ erfolgt danach ein Anstieg der Mittelwerte, der umso später erfolgt, je größer β ist. Der Grund hierfür ist ebenfalls bei den Intervallen zu suchen. Diese sind bei den genannten β -Werten bei niedrigen α -Werten kurz und stabil. Erst bei größeren α -Werten (abhängig von der Anzahl der Kontrollpunkte und β bei α -Werten zwischen 0,4 und 0,6) steigen die Ausgleichszeiten durch ebendiese α -Werte an und verursachen längere und instabile Intervalle, die wiederum auf die Ausgleichszeiten zurückwirken.

Mit zunehmendem α steigen auch die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten an. Generell wird der Anstieg der Standardabweichungen durch die größere Dauer der Ausgleichszeiten und den bei zu großen Werten für α instabilen Intervallen verursacht. Bei kleineren β -Werten sind größere Anstiege der Standardabweichungen zu verzeichnen. Grund dafür ist, dass die Intervallabweichungen bei kleinen β -Werten relativ groß sind und daher die Dauer der benötigten Ausgleichszeiten stark schwankt. Bei höheren β -Werten steigen die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten durch die Dominanz von β erst bei größeren α -Werten an. Die Mittelwerte der Ausgleichszeiten bei größeren β sind zwar grundsätzlich größer, schwanken aber aufgrund der stabileren Intervalle weniger.

Die Entwicklung der Standardabweichungen der Ausgleichszeiten steht ebenso wie diejenige der Mittelwerte in einem Zusammenhang mit der Stabilität der Intervalle. So ist bei den β -Werten 150 s, 165 s und 180 s v.a. bei den Varianten c und d ein starkes Absinken der Standardabweichungen der Ausgleichszeiten bei α -Werten von 0,2 bis 0,4 zu beobachten. Ihre Ursache hat diese Abnahme analog zur Situation bei den Mittelwerten in den stabilen und kurzen Intervallen in diesem Bereich. Ab einem α -Wert von 0,4 oder 0,5 (je nach β -Wert und der Anzahl an Kontrollpunkten) steigen die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten wieder an. Bei den β -Werten 120 s und 135 s ist ein durchgehender Anstieg der Standardabweichungen mit steigendem α zu beobachten. Zwar finden sich auch bei diesen β -Werten die stabilsten und kürzesten Intervalle bei α -Werten von 0,2 bis 0,4. Die Intervalle für $\beta = 120$ s und $\beta = 135$ s sind aber selbst in diesem Bereich im Vergleich zu anderen β -Werten lang und instabil, was den ungebrochenen Anstieg der Standardabweichungen der Ausgleichszeiten begründet. Bei β -Werten von 195 s und 210 s sind die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten bei niedrigeren α -Werten niedrig und relativ konstant. Bei höheren Werten für α steigen die Standardabweichungen abhängig von β und der Anzahl an Kontrollpunkten ebenso wie die Mittelwerte aufgrund zunehmender Intervallabweichungen und Intervalldauer an. Bei den Varianten c und d kann für alle β -Werte bei $\alpha = 1$ eine Abnahme der Standardabweichungen der Ausgleichszeiten festgestellt werden. Wie schon bei den Intervallen (vgl. Kapitel 6.2.4) ist die Ursache für diese Abnahme unklar.

In Abbildung 28 ist gut erkennbar, dass bei $\alpha = 0$ die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten bei kleinen β -Werten klein, bei großen β -Werten relativ groß sind (Ausnahme: $\beta = 210$ s). In dieser Situation bestimmt alleine β die Dauer der Ausgleichszeiten. Mit dem Wirksamwerden von α stehen zunächst bei den kleineren β -Werten zunehmend längere Ausgleichszeiten zur Verfügung. Da die Intervalle mit steigendem α zwar zunächst stabiler werden (vgl. z.B. Abbildung 18), aber gleichzeitig die Dauer der Ausgleichszeiten ansteigt, wachsen die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten bei kleineren β -Werten stark an. Hingegen bleiben sie bei größeren β -Werten konstant oder beginnen erst später zuzunehmen, auch aufgrund der grundsätzlich kürzeren und stabileren Intervalle. In diesen Fällen wird die Dauer der Ausgleichszeiten erst bei einem größeren α -Wert vergrößert, wodurch die Intervalle instabiler werden (vgl. Kapitel 6.2.4). Dadurch vergrößern sich auch die Standardabweichungen der Ausgleichszeiten. Durch diese Vorgänge kehrt sich die Reihenfolge der Standardabweichungen der Ausgleichszeiten im Vergleich zu $\alpha = 0$ um: Sie sind nun für kleine β -Werte groß und für große β -Werte klein. Ähnliche Prozesse finden auch bei den Varianten b bis d statt.

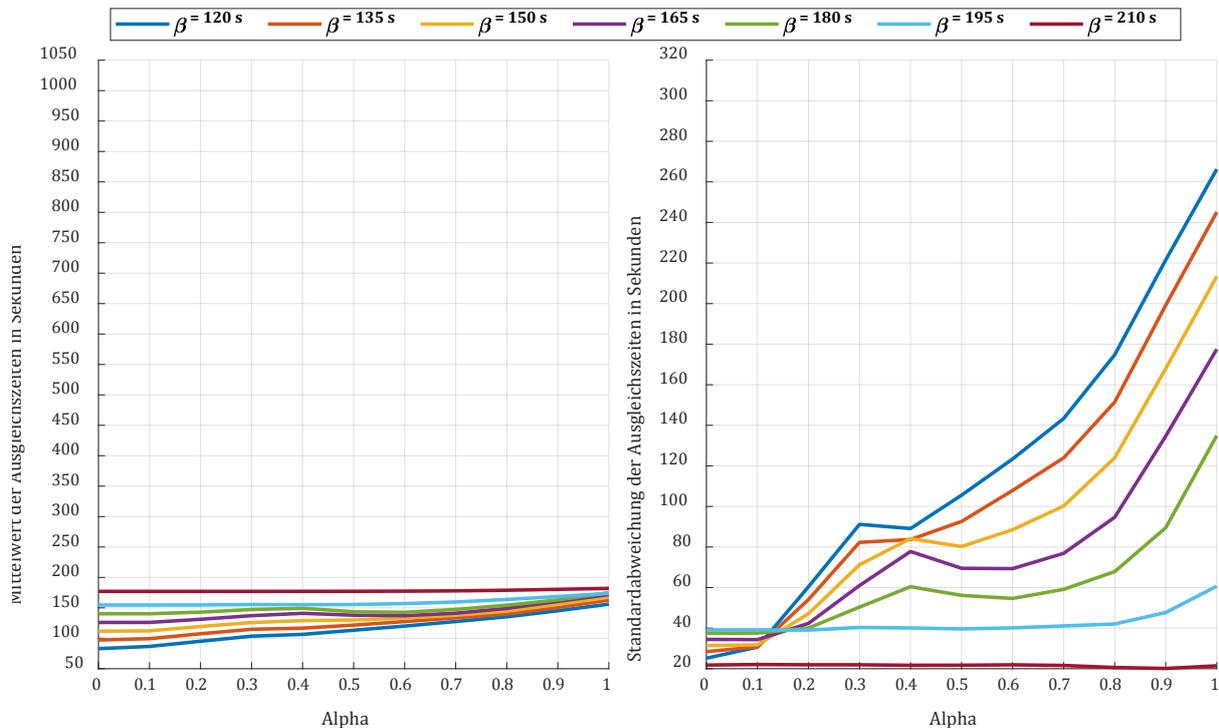


Abbildung 28: Ausgleichszeiten - ein Kontrollpunkt

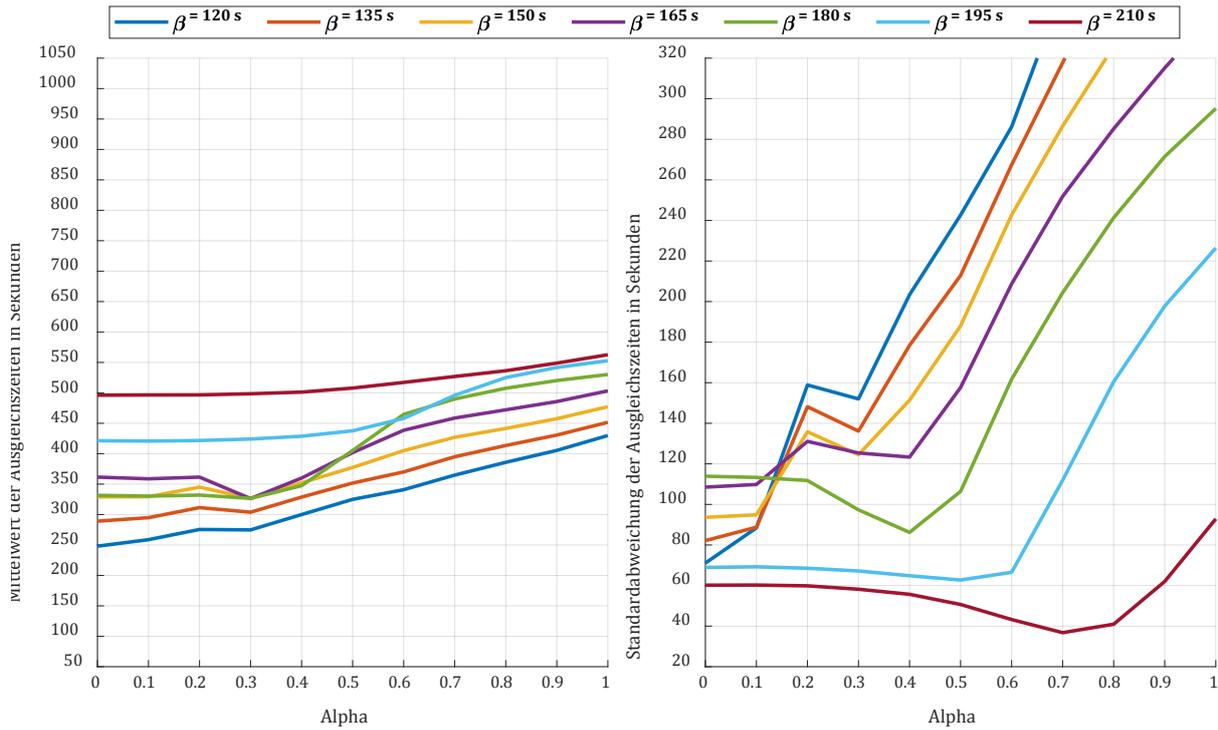


Abbildung 29: Ausgleichszeiten - drei Kontrollpunkte

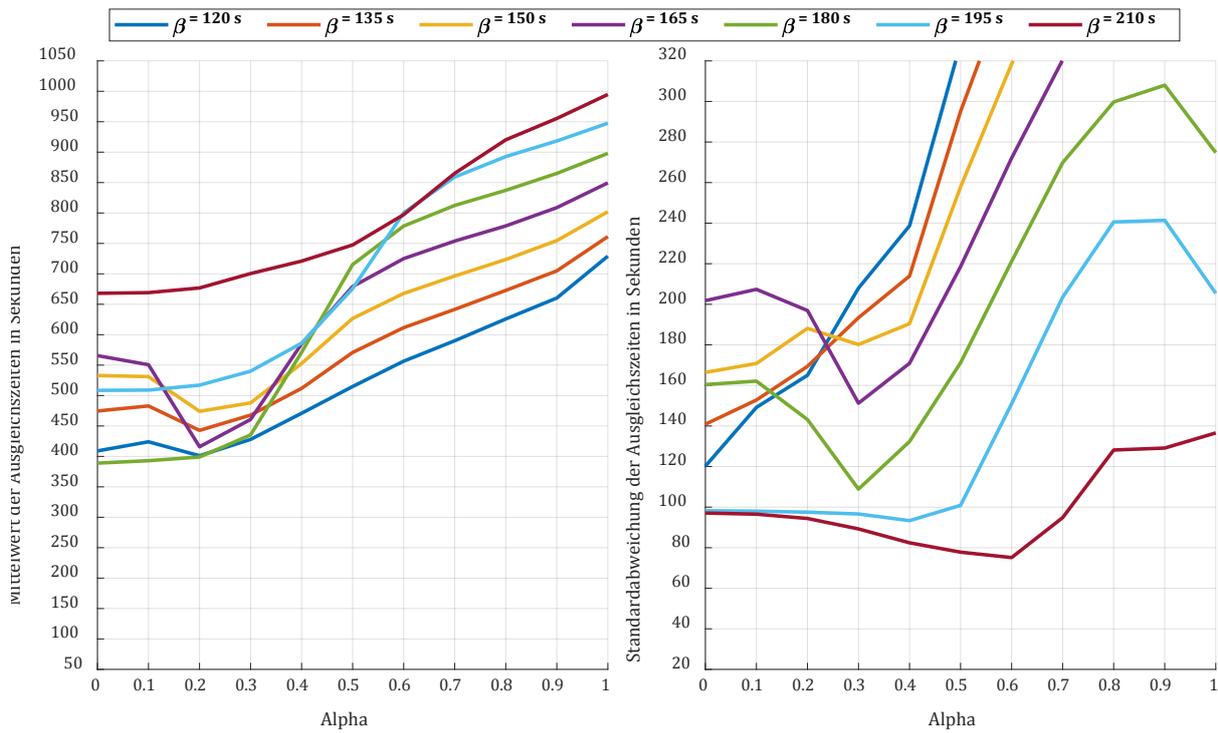


Abbildung 30: Ausgleichszeiten - fünf Kontrollpunkte

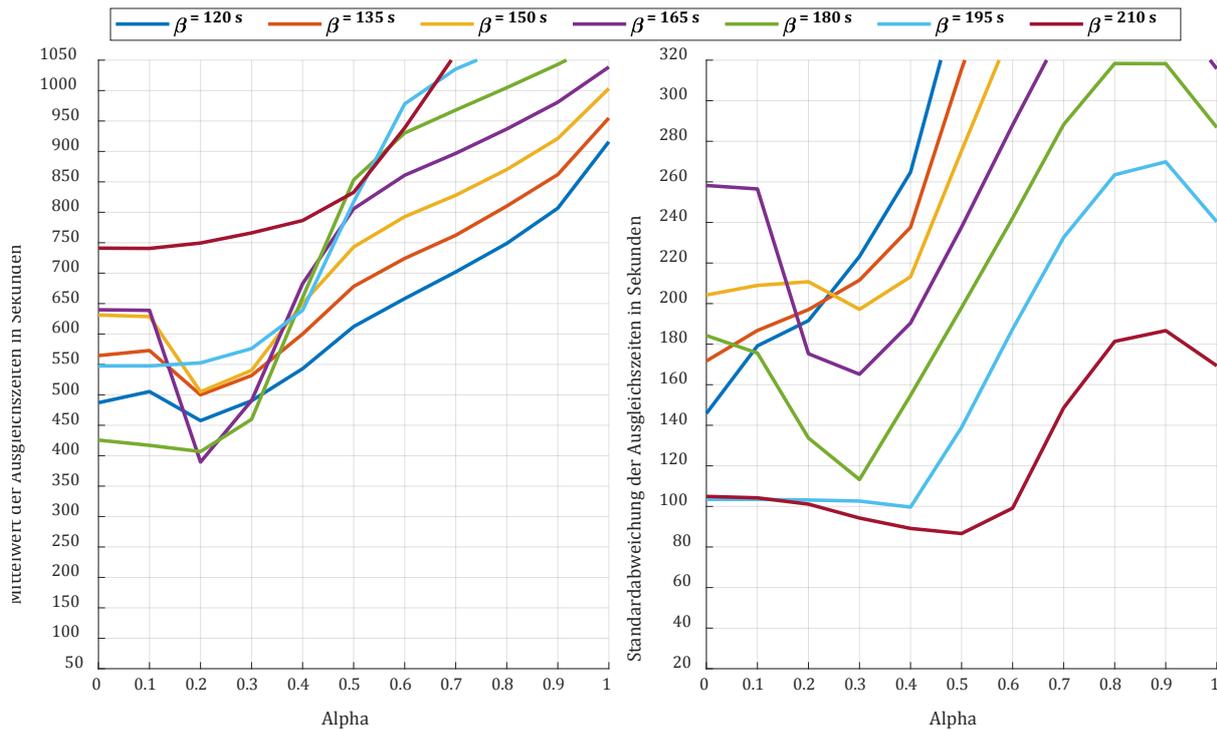


Abbildung 31: Ausgleichszeiten - sechs Kontrollpunkte

6.5. Reduktion der Fahrzeuge im Umlauf

Die Simulation des Betriebes mit reduzierter Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen wurde analog zur Variante c mit fünf Kontrollpunkten durchgeführt. Die grundsätzlichen Charakteristika der Auswertungen zu Intervallen, Umlaufzeiten und Ausgleichszeiten sind in den Kapiteln 6.2, 6.3 und 6.4 zu finden. Die Ergebnisse der Auswertungen bei Reduktion auf 17, 16 und 15 Fahrzeuge unterscheiden sich davon nur im Detail und werden im Folgenden beschrieben. Die grafische Darstellung von Intervallen, Umlaufzeiten und Ausgleichszeiten findet sich in Abbildung 32 bis Abbildung 40.

Bei einer Reduktion der Fahrzeuganzahl werden zunehmend auch bei größeren β -Werten die durch β gewährleisteten Mindestausgleichszeiten zu kurz, um stabile Intervalle zu erzeugen. Daher verhalten sich die Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle auch bei größeren β -Werten analog zu denen bei kleineren β -Werten: Bei niedrigen α -Werten können keine ausreichend langen Ausgleichszeiten zur Verfügung gestellt werden. Erst mit ansteigendem α erreichen Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle ihr Minimum und steigen danach wieder an. Je weniger Fahrzeuge im Umlauf sind, desto größer werden die β -Werte, bei denen sich Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle derart verhalten. Bei 15 Fahrzeugen verhalten sich Mittelwerte und Standardabweichungen auch bei $\beta = 210$ s in dieser Weise. Dagegen werden bei 16 Fahrzeugen und $\beta = 210$ s die Minima von Mittelwerten und Standardabweichungen von β bestimmt. Bei 17 Fahrzeugen ist das zusätzlich auch bei $\beta = 195$ s der Fall. Ansteigende α -Werte führen in diesen Fällen zu instabileren und längeren Intervallen. Generell verlängern sich durch die Fahrzeugreduktion zwangsläufig die Intervalle. Eine Erhöhung der Standardabweichungen ist dagegen nur teilweise festzustellen. Grundsätzlich

kann festgehalten werden, dass β umso größer gewählt werden muss, je weniger Fahrzeuge im Umlauf sind, um noch stabile und kurze Intervalle zu erhalten.

Durch die Abhängigkeiten zwischen Ausgleichszeiten, Intervallen und Umlaufzeiten verhalten sich auch die Mittelwerte und Standardabweichungen der Umlaufzeiten analog zu den Intervallen. Auch hier wird bei größeren β -Werten der Einfluss von α auf das Erreichen von kurzen und stabilen Umlaufzeiten größer. Die niedrigsten Mittelwerte und Standardabweichungen der Umlaufzeiten sind grundsätzlich bei hohen β -Werten zu finden und steigen mit der Reduktion der Fahrzeuge an.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Fälle im Detail dargestellt. Bei Reduktion auf 17 Fahrzeuge werden die kleinsten Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle bei β -Werten von 195 s und 210 s erreicht. Für $\beta = 195$ s liegt das kürzeste Intervall bei $\alpha = 0,2$ und beträgt im Mittel 168 s mit einer Standardabweichung von 72 s. Die Werte für $\beta = 210$ s liegen in einem sehr ähnlichen Bereich. Bei $\alpha = 0,2$ beträgt der Mittelwert der Intervalle 172 s, die Standardabweichung 69 s. Die kleinsten und stabilsten Umlaufzeiten treten bei den gleichen Werten für α und β wie die Intervalle auf. Bei $\beta = 195$ s und $\alpha = 0,2$ dauern die Umläufe im Mittel 3341 s (55,7 Minuten) bei einer Standardabweichung von 119 s, während die Umläufe bei $\beta = 210$ s und $\alpha = 0,2$ im Mittel bei 3475 s (57,9 Minuten) mit einer Standardabweichung von 76 s liegen.

Beim Einsatz von 16 Fahrzeugen treten die kleinsten Mittelwerte und Standardabweichungen für Intervalle und Umläufe bei $\beta = 210$ s auf, während sie bei $\beta = 195$ s im Vergleich bereits höher sind. Die kürzesten und stabilsten Intervalle werden bei $\beta = 210$ s und $\alpha = 0,1$ erreicht. Der Mittelwert beträgt dabei 181 s, die Standardabweichung 70 s. Die Intervalle sind im Vergleich zur Reduktion auf 17 Fahrzeuge zwar naturgemäß länger, aber nicht instabiler. Die kürzesten Umlaufzeiten treten ebenfalls bei $\beta = 210$ s und $\alpha = 0,1$ auf. Sie betragen im Mittel 3344 s (55,7 Minuten), bei einer Standardabweichung von 99 s. Damit sind die Umlaufzeiten fast ident mit denen bei Reduktion auf 17 Fahrzeuge.

Schließlich treten die geringsten Mittelwerte und Standardabweichungen der Intervalle und Umläufe bei Reduktion auf 15 Fahrzeuge ebenfalls bei $\beta = 210$ s auf. Bei $\alpha = 0,3$ beträgt der Intervallmittelwert 200 s und die Standardabweichung 106 s. Im Vergleich zu 16 eingesetzten Fahrzeugen sind die Intervalle sowohl länger als auch instabiler geworden. Auch das derzeitige Planintervall von 180 s wird nicht erreicht. Die auch bei $\alpha = 0,3$ erzielten kürzesten und stabilsten Umlaufzeiten betragen im Mittel 3462 s (57,7 Minuten), bei einer Standardabweichung von 168 s. Im Vergleich zu 16 Fahrzeugen sind die Umlaufzeiten damit länger und instabiler.

Die Dauer der Ausgleichszeiten erhöht sich bei 16 und 17 eingesetzten Fahrzeugen gegenüber 18 eingesetzten Fahrzeugen nicht. So ergibt beispielsweise die Wahl von $\beta = 180$ s und $\alpha = 0,3$ bei 18 eingesetzten Fahrzeugen kurze und stabile Intervalle und Umlaufzeiten (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 26). Die einzuhaltenden Ausgleichszeiten belaufen sich im Mittel auf 435 s, bei einer Standardabweichung von 109 s. Demgegenüber beträgt die Ausgleichszeit bei 17 Fahrzeugen, $\beta = 195$ s und $\alpha = 0,2$ (den Werten für α und β , bei denen wie oben beschrieben die kürzesten und stabilsten Intervalle und Umlaufzeiten auftreten) im Mittel 416 s, bei einer

Standardabweichung von 125 s. Bei 16 Fahrzeugen, $\beta = 210$ s und $\alpha = 0,1$ beträgt der Mittelwert der Ausgleichszeit 415 s und die Standardabweichung 128 s. Erst bei einer Reduktion auf 15 Fahrzeuge erhöhen sich die Ausgleichszeiten und betragen bei $\beta = 210$ s und $\alpha = 0,3$ im Mittel 504 s, bei einer Standardabweichung von 162 s.

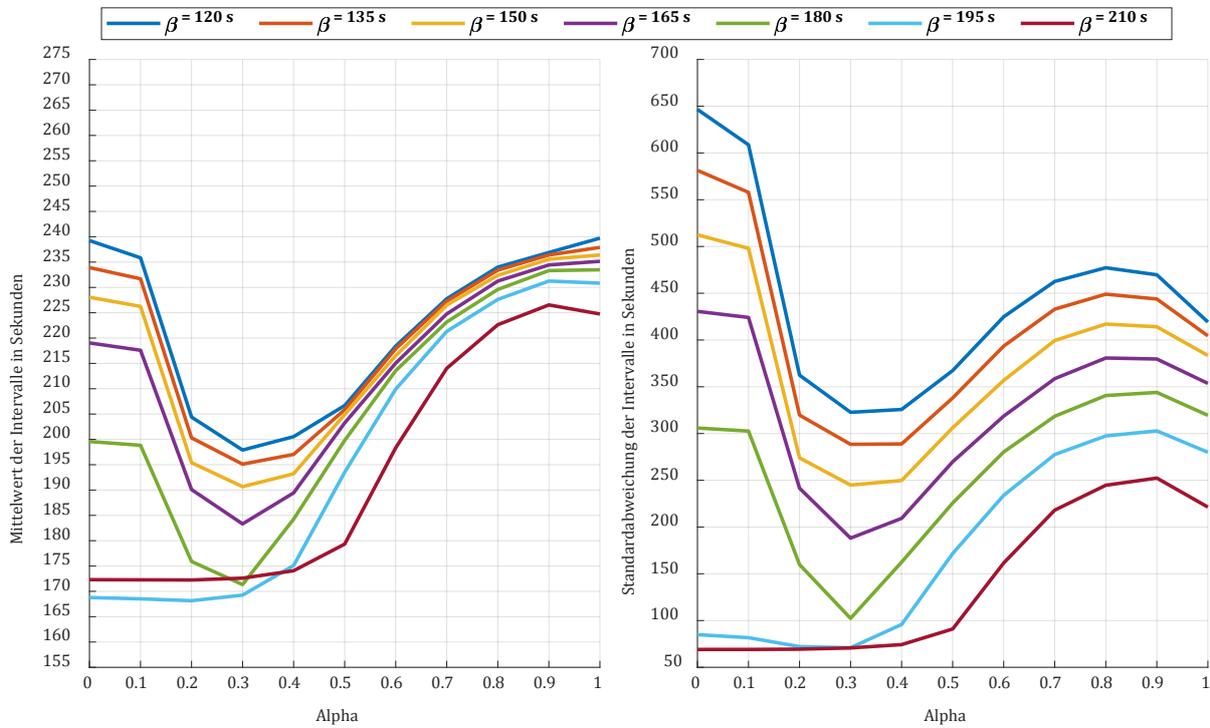


Abbildung 32: Intervalle bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

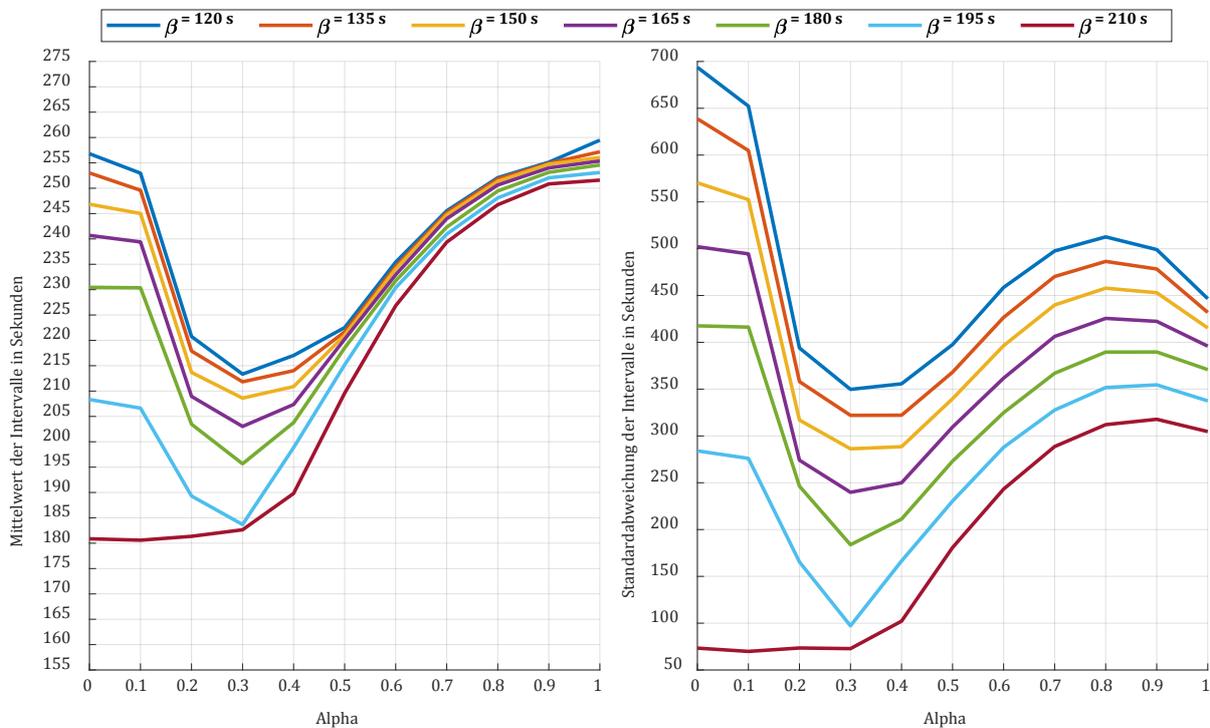


Abbildung 33: Intervalle bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

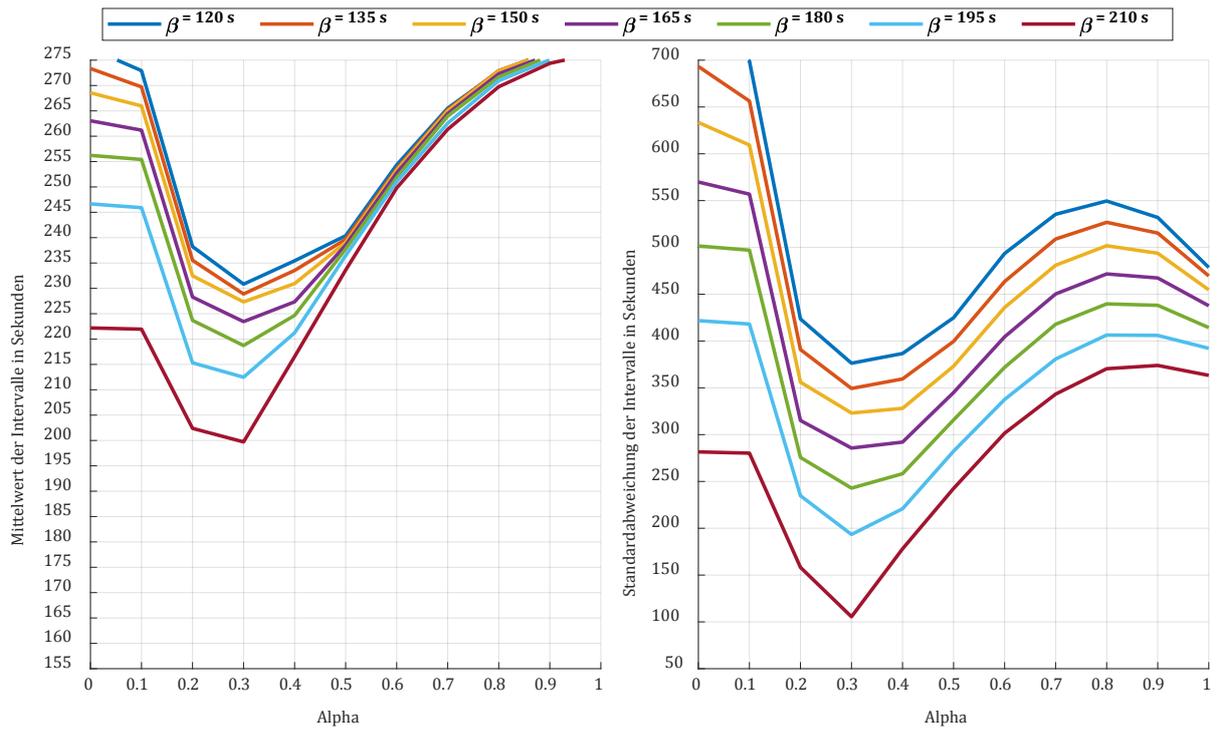


Abbildung 34: Intervalle bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

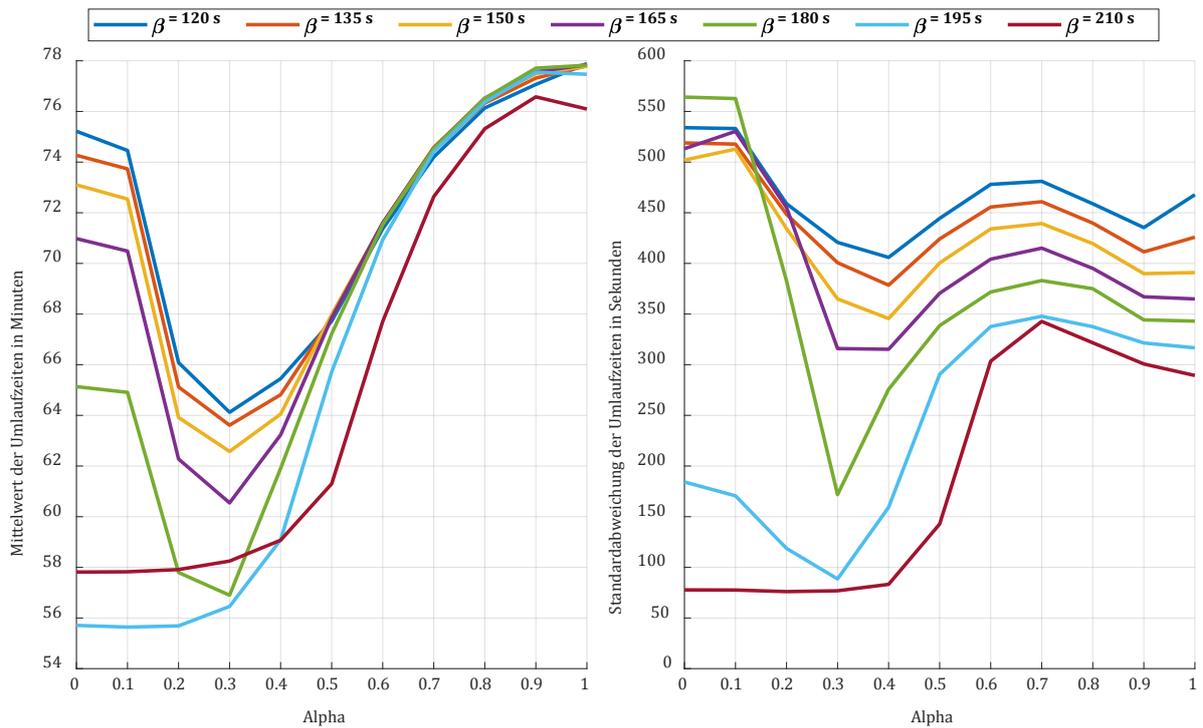


Abbildung 35: Umlaufzeiten bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

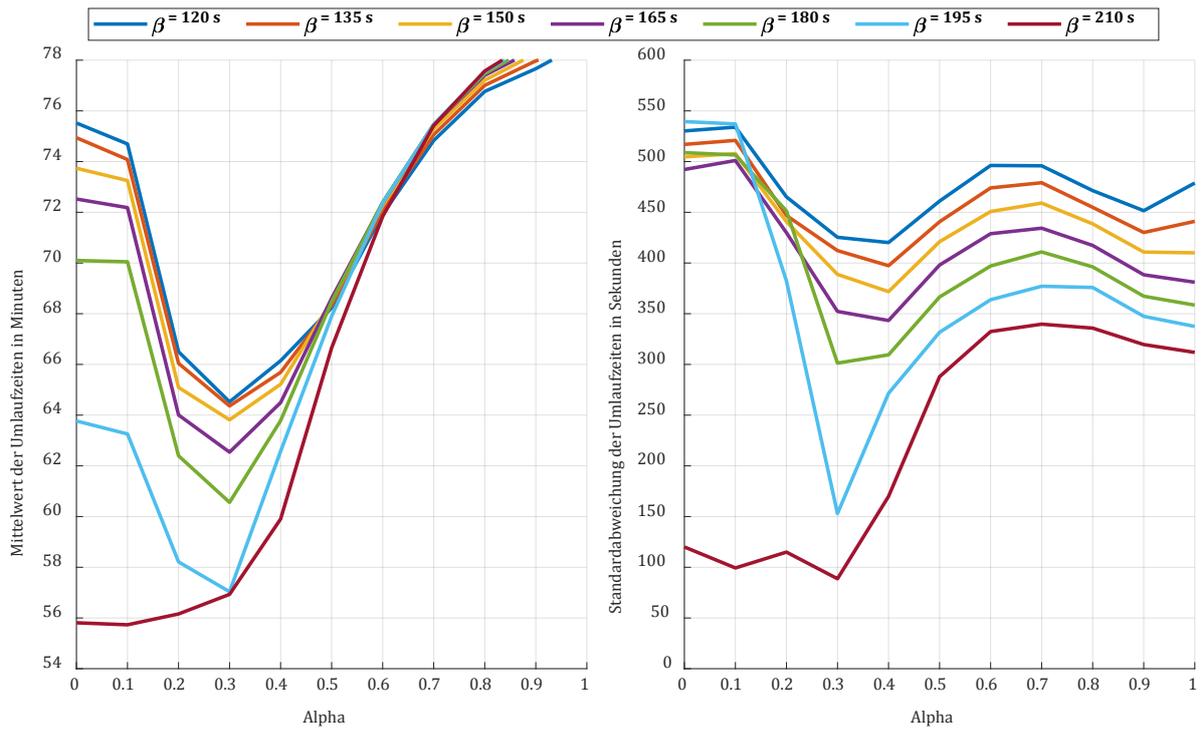


Abbildung 36: Umlaufzeiten bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

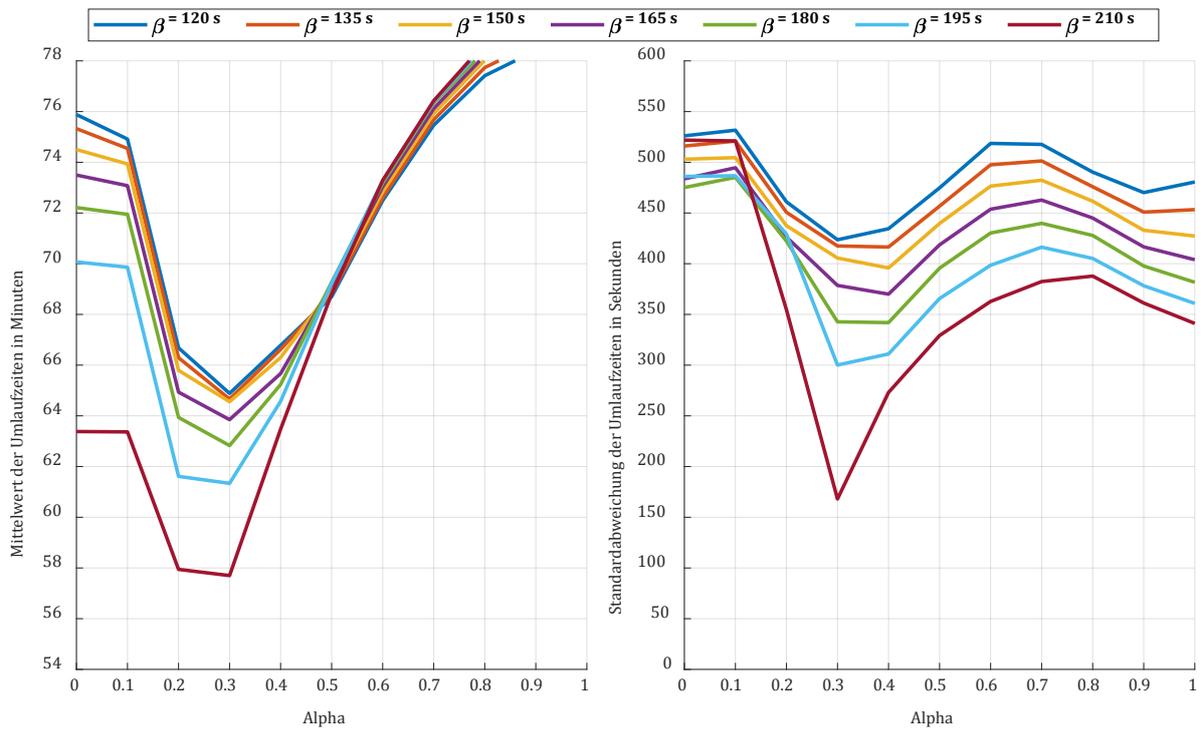


Abbildung 37: Umlaufzeiten bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

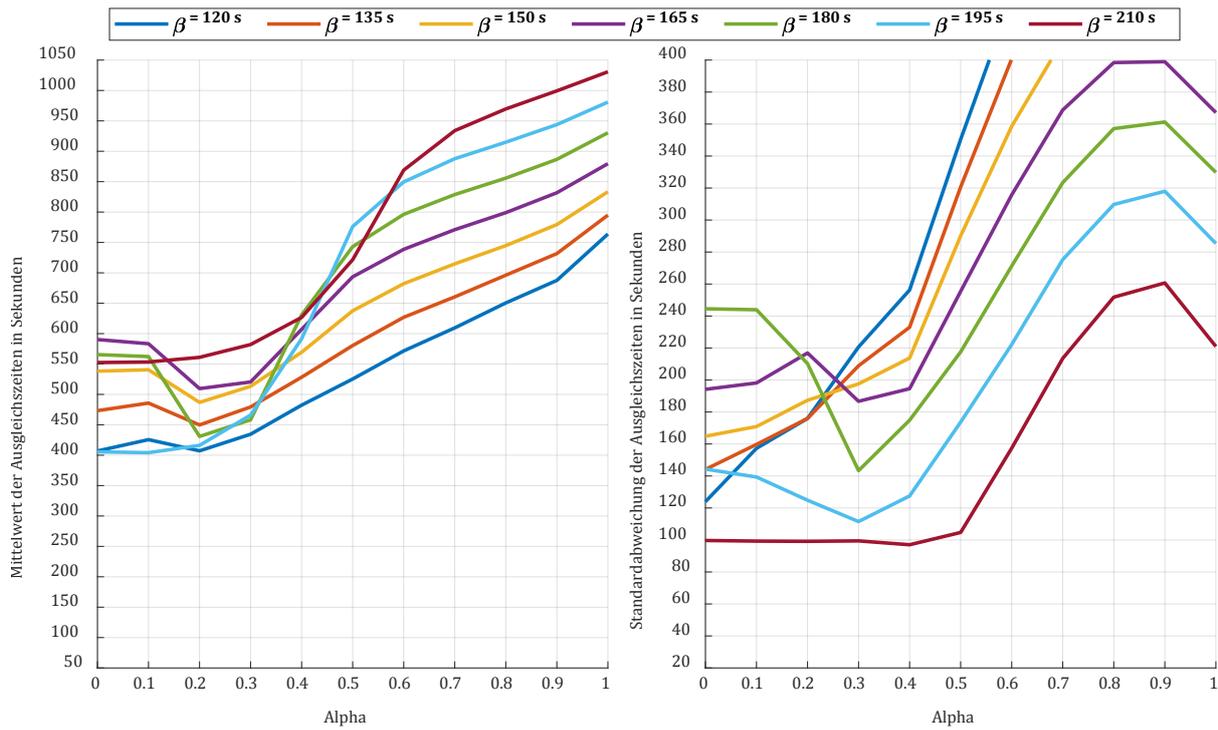


Abbildung 38: Ausgleichszeiten bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

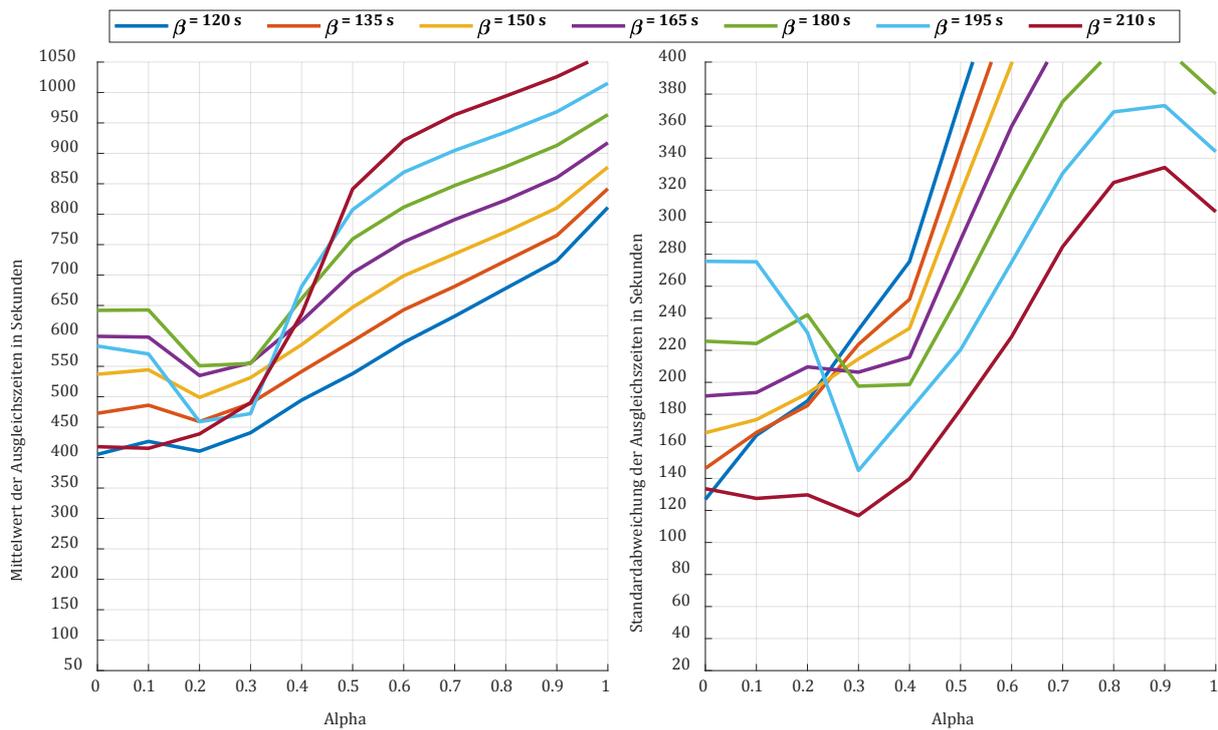


Abbildung 39: Ausgleichszeiten bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

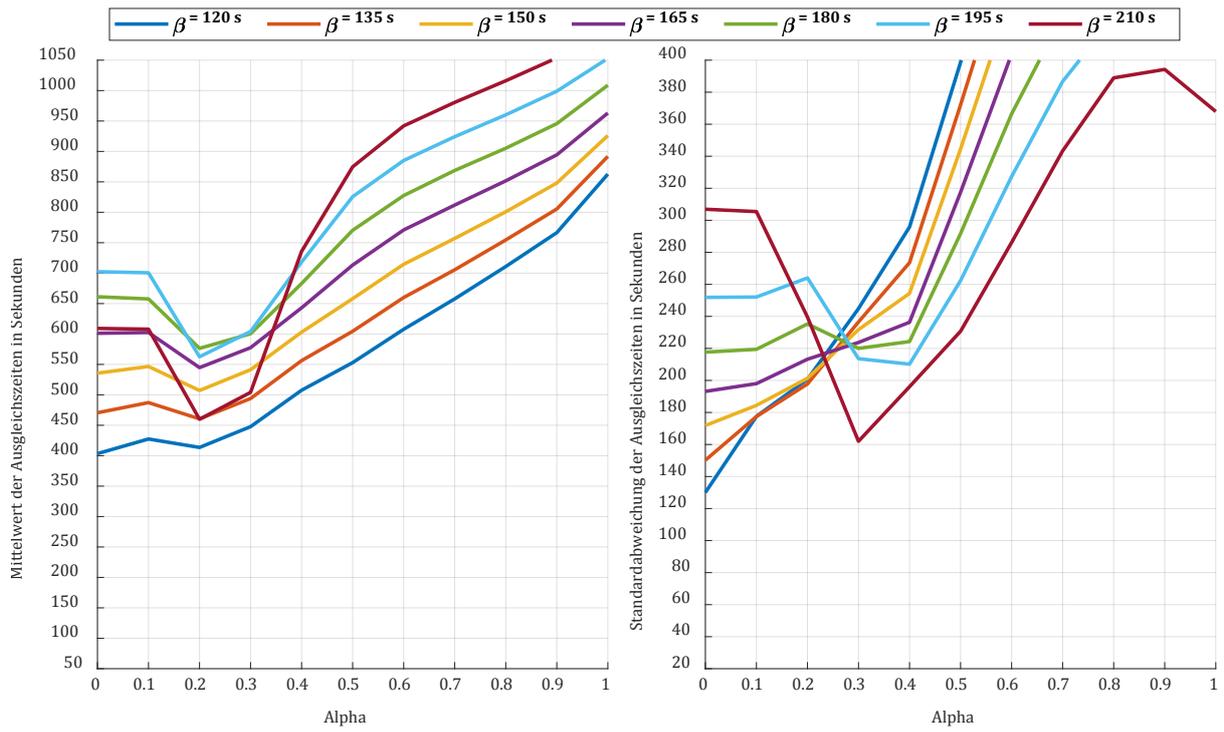


Abbildung 40: Ausgleichszeiten bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten

7. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Simulation wurde sowohl für den betrieblichen Ist-Zustand auf der Wiener Straßenbahnlinie 43 als auch für den Betrieb bei Anwendung des Verfahrens backward headway – in einer leicht abgeänderten Form – durchgeführt. Bei der Anwendung des backward headway –Verfahrens wurden Varianten mit einem, drei, fünf und sechs Kontrollpunkten mit jeweils sämtlichen möglichen Kombinationen von α und β simuliert. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich Intervallen, Umlauf- und Ausgleichszeiten ausgewertet.

Durch die dargelegten Schwierigkeiten bei den Simulationen des Ist-Zustandes sowohl in der HVZ als auch der NVZ sind die Ergebnisse daraus nur bedingt für einen Vergleich mit den Simulationen unter Anwendung der Methode backward headway tauglich. Vergleiche können aber mit den skizzierten Parametern des planmäßigen Betriebs auf der Straßenbahnlinie 43 gezogen werden. Die folgenden Aussagen beziehen sich rein auf die Bedingungen in der HVZ.

Gegenüber dem planmäßigen Ist-Zustand kann festgestellt werden, dass bei Anwendung der backward headway – Methode je nach Wahl von α und β erheblich kürzere mittlere Intervalle möglich sind. Das Intervall beträgt im planmäßigen Zustand 180 s. Im Vergleich dazu beträgt es beispielsweise bei sechs Kontrollpunkten, $\beta = 180$ s und $\alpha = 0,2$ im Mittel 156 s, bei einer Standardabweichung von 66 s, was auf stabile Intervalle hinweist. Auch bei drei und fünf Kontrollpunkten gibt es Kombinationen von α und β , die kurze und stabile Intervalle ermöglichen.

α und β stehen in wechselseitiger Beziehung zueinander. Abhängig von β gibt es Bereiche für α , in denen sowohl die Intervalle als auch die Umlaufzeiten verhältnismäßig kurz und stabil sind. Auch die Ausgleichszeiten sind in diesen Bereichen vergleichsweise niedrig. Generell wirken zu hohe α -Werte kontraproduktiv, da durch sie die Ausgleichszeiten zu lange und damit Intervalle instabil werden und ihre Länge ansteigt. Dagegen wirken sich höhere β -Werte bei passender Wahl von α positiv auf die Dauer und Stabilität von Intervallen und Umlaufzeiten aus.

Die Umlaufzeiten hängen von den Intervallen ab. Kurze und stabile Umlaufzeiten treten dann auf, wenn auch die Intervalle stabil sind. Die Zusammenhänge zwischen α und β sind daher für die Umlaufzeiten in gleicher Weise vorhanden wie für die Intervalle. Generell sind die Umlaufzeiten im Vergleich zum planmäßigen Zustand länger, weil in der Simulation Kontrollpunkte auch abseits der Endhaltestelle vorgesehen sind, an denen Ausgleichszeiten eingehalten werden müssen. Diese Ausgleichszeiten entsprechen in etwa der Differenz zwischen den Umlaufzeiten bei Anwendung des Verfahrens backward headway und denen im planmäßigen Zustand.

Die im planmäßigen Zustand in der HVZ vorgesehenen Ausgleichszeiten schwanken, betragen aber zumeist 270 s (4,5 Minuten). Wenn mit der Methode backward headway stabile und kurze Intervalle erreicht werden sollen, dann liegen die dafür benötigten Ausgleichszeiten über diesem Wert.

Bei der Festlegung der Anzahl von Kontrollpunkten muss eine Abwägung zwischen möglichst kurzen Reisezeiten für die Fahrgäste und möglichst stabilen, kurzen Intervallen durchgeführt werden. Je mehr Kontrollpunkte vorhanden sind, desto öfter müssen Ausgleichszeiten eingehalten werden. Höhere Ausgleichszeiten ermöglichen zwar stabile Intervalle, bewirken aber eventuell eine Verlängerung der Reisezeit. Das Abwarten von Ausgleichszeiten ist für die Fahrgäste eines in der Haltestelle stehenden Fahrzeugs unangenehm. Auf der anderen Seite muss aber beachtet werden, dass stabile Intervalle eine Voraussetzung für kurze Umlaufzeiten sind. Des Weiteren würde ein Teil der durch die Ausgleichszeiten verursachten Verzögerungen aufgrund der erhöhten Intervallstabilität und der damit verbundenen geringeren Wartezeiten für die Fahrgäste an den Haltestellen kompensiert werden.

Eine in der Simulation nicht untersuchte Möglichkeit ist die Zuweisung von unterschiedlichen α - und β -Werten. Damit könnten die Ausgleichszeiten bei Kontrollpunkten mit hohem FG-Aufkommen niedrig gehalten und im Gegenzug bei schwach frequentierten Kontrollpunkten längere Ausgleichszeiten vorgesehen werden. Auf diese Weise könnten die negativen Auswirkungen auf die Fahrgäste reduziert werden. Eventuell könnten die Kontrollpunkte auch so angeordnet werden, dass nur eine geringe Anzahl an Fahrgästen von den Verzögerungen durch Ausgleichszeiten betroffen wäre. Eine andere nicht untersuchte Option ist die Anordnung von sehr vielen Kontrollpunkten, beispielsweise an jeder Haltestelle. Bei niedrigen Werten für α - und β könnten auf diese Weise möglicherweise stabile und kurze Intervalle bei gleichzeitig kurzen, auf die gesamte Strecke verteilten Ausgleichszeiten erreicht werden.

Bei der Simulation des Betriebs mit fünf Kontrollpunkten und schrittweiser Reduktion von 18 auf 15 eingesetzte Fahrzeuge verlängern sich zwangsläufig die Mittelwerte der Intervalle. Dagegen bleiben die Intervalle bei entsprechender Wahl von α und β zunächst stabil und werden erst beim Einsatz von 15 Fahrzeugen merkbar instabiler. Je weniger Fahrzeuge im Einsatz sind, desto größer muss β gewählt werden, um kurze und stabile Intervalle und Umlaufzeiten zu erzielen. Beim Einsatz von 15 Fahrzeugen reicht schließlich auch $\beta = 210$ s nicht mehr aus, um diese Vorgabe zu erreichen. Das derzeitige Planintervall von 180 s wird beim Einsatz von 17 und 16 Fahrzeugen erreicht, bei Reduktion auf 15 Fahrzeuge überschritten. Die Mittelwerte der Umlaufzeiten vergrößern sich bei Reduktion auf 17 und 16 Fahrzeuge nur geringfügig, bei 15 Fahrzeugen dagegen merkbar. Auch die Dauer der Ausgleichszeiten erhöht sich bei 17 und 16 Fahrzeugen gegenüber dem Einsatz von 18 Fahrzeugen nicht. Sie sinkt sogar geringfügig, während der Einsatz von nur 15 Fahrzeugen wiederum erhöhte Ausgleichszeiten nach sich zieht. Diese Ergebnisse legen nahe, dass eine Reduktion auf 16 oder 17 Fahrzeuge in der HVZ möglich ist.

Die Ergebnisse der Simulation des Betriebs unter Anwendung des Verfahrens backward headway sind sehr vielversprechend. Dispositive Eingriffe könnten durch die automatisierten Eingriffe an den Kontrollpunkten vermutlich stark reduziert werden. Ein Test des Verfahrens im Echtbetrieb würde fundierte Aussagen über die Eignung des Verfahrens zur Intervallstabilisierung und zur ökonomischeren Betriebsführung durch Fahrzeugreduktion ermöglichen.

Abkürzungsverzeichnis

FFZ	Fahrzeugfolgezeit
FG	Fahrgast
FR	Fahrtrichtung
HS	Haltestelle
HVZ	Hauptverkehrszeit
NVZ	Nebenverkehrszeit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
VLSA	Verkehrslichtsignalanlage

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitlich mikroskopische Verteilung der Passagierzuflüsse (blau) und Fahrzeugabfahrtszeiten (gelb) an Haltestellen zwischen den Sollabfahrtszeiten in Abhängigkeit der verschiedenen Intervalle zur morgendlichen Hauptverkehrszeit	16
Abbildung 2: Abweichungen vom regelmäßigen Intervall aufgrund einer Initialverspätung.....	18
Abbildung 3: Verspätungsauswirkung auf Besetzungsgrad und Fahrzeugfolgezeit	18
Abbildung 4: Auf einer ÖV-Linie zirkulierende Fahrzeuge.....	25
Abbildung 5: Haltestellen und Umsteigemöglichkeiten auf der Linie 43	30
Abbildung 6: Planmäßige Intervalle in FR Neuwaldegg zwischen 7 und 20 Uhr	31
Abbildung 7: Planmäßige Intervalle in FR Schottentor zwischen 7 und 20 Uhr	32
Abbildung 8: Straßenbahn Type B1	34
Abbildung 9: Straßenbahn Type E1+c4	34
Abbildung 10: Fahrgastzahlen der Linie 43 pro Schultag in FR Schottentor	41
Abbildung 11: Fahrgastzahlen der Linie 43 pro Schultag in FR Neuwaldegg.....	41
Abbildung 12: Tagesganglinie der Belegung an der HS Palffygasse in FR Schottentor	42
Abbildung 13: Tagesganglinie der Belegung an der HS Alser Straße in FR Neuwaldegg	43
Abbildung 14: Gemessene FG-Wechselzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der ein- und aussteigenden Personen (N=45)	46
Abbildung 15: Gemessene FG-Wechselzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der ein- und aussteigenden Personen mit Trendlinie und Ober- und Untergrenzen (N=45)	48
Abbildung 16: Intervalle - Ist-Zustand 15-19 Uhr	56
Abbildung 17: Intervalle - Ist-Zustand 10-12 Uhr	57
Abbildung 18: Intervalle - ein Kontrollpunkt.....	59
Abbildung 19: Intervalle - drei Kontrollpunkte.....	59
Abbildung 20: Intervalle - Fünf Kontrollpunkte.....	60
Abbildung 21: Intervalle - Sechs Kontrollpunkte	60
Abbildung 22: Umlaufzeiten - Ist-Zustand 15-19 Uhr	61
Abbildung 23: Umlaufzeiten - Ist-Zustand 10-12 Uhr	62
Abbildung 24: Umlaufzeiten - ein Kontrollpunkt	64
Abbildung 25: Umlaufzeiten - drei Kontrollpunkte	64
Abbildung 26: Umlaufzeiten - fünf Kontrollpunkte	65
Abbildung 27: Umlaufzeiten - sechs Kontrollpunkte	65
Abbildung 28: Ausgleichszeiten - ein Kontrollpunkt	68
Abbildung 29: Ausgleichszeiten - drei Kontrollpunkte	69
Abbildung 30: Ausgleichszeiten - fünf Kontrollpunkte	69
Abbildung 31: Ausgleichszeiten - sechs Kontrollpunkte	70
Abbildung 32: Intervalle bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten	72
Abbildung 33: Intervalle bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten	72
Abbildung 34: Intervalle bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten	73
Abbildung 35: Umlaufzeiten bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	73
Abbildung 36: Umlaufzeiten bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	74
Abbildung 37: Umlaufzeiten bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	74

Abbildung 38: Ausgleichszeiten bei 17 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	75
Abbildung 39: Ausgleichszeiten bei 16 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	75
Abbildung 40: Ausgleichszeiten bei 15 Fahrzeugen und fünf Kontrollpunkten.....	76

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Planmäßige Fahrzeiten zwischen den Endhaltestellen der Linie 43 zwischen 10 und 12 sowie zwischen 15 und 19 Uhr	32
Tabelle 2: Vorgesehene Ausgleichszeiten in Neuwaldegg zwischen 10 und 12 sowie zwischen 15 und 19 Uhr	33
Tabelle 3: Entfernungen zwischen den Haltestellen in FR Schottentor	35
Tabelle 4: Entfernungen zwischen den Haltestellen in FR Neuwaldegg.....	36
Tabelle 5: Anzahl an gemessenen Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle	37
Tabelle 6: Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle in FR Schottentor (in min:s).....	38
Tabelle 7: Fahrzeiten bis zur jeweils nächsten Haltestelle in FR Neuwaldegg (in min:s)	38
Tabelle 8: Fahrgastzahlen pro Schultag in FR Schottentor.....	40
Tabelle 9: Fahrgastzahlen pro Schultag in FR Neuwaldegg	40
Tabelle 10: Durchschnittliche Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Stunde im Zeitraum 15-19 Uhr	44
Tabelle 11: Durchschnittliche Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Stunde im Zeitraum 10-12 Uhr	45
Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung der Intervalle – Ist-Situation in der HVZ	103
Tabelle 13: Mittelwert und Standardabweichung der Intervalle – Ist-Situation in der NVZ	103
Tabelle 14: Mittelwert der Intervalle in s – ein Kontrollpunkt.....	104
Tabelle 15: Standardabweichung der Intervalle in s – ein Kontrollpunkt.....	104
Tabelle 16: Mittelwert der Intervalle in s – drei Kontrollpunkte.....	105
Tabelle 17: Standardabweichung der Intervalle in s – drei Kontrollpunkte.....	105
Tabelle 18: Mittelwert der Intervalle in s – fünf Kontrollpunkte.....	106
Tabelle 19: Standardabweichung der Intervalle in s – fünf Kontrollpunkte.....	106
Tabelle 20: Mittelwert der Intervalle in s – sechs Kontrollpunkte.....	107
Tabelle 21: Standardabweichung der Intervalle in s – sechs Kontrollpunkte.....	107
Tabelle 22: Mittelwert und Standardabweichung der Umlaufzeiten – Ist-Situation in der HVZ	108
Tabelle 23: Mittelwert und Standardabweichung der Umlaufzeiten – Ist-Situation in der NVZ	108
Tabelle 24: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – ein Kontrollpunkt	109
Tabelle 25: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – ein Kontrollpunkt.....	109
Tabelle 26: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – drei Kontrollpunkte	110
Tabelle 27: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – drei Kontrollpunkte	110
Tabelle 28: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – fünf Kontrollpunkte	111
Tabelle 29: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – fünf Kontrollpunkte	111
Tabelle 30: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – sechs Kontrollpunkte	112
Tabelle 31: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – sechs Kontrollpunkte	112
Tabelle 32: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – ein Kontrollpunkt	113
Tabelle 33: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – ein Kontrollpunkt	113
Tabelle 34: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – drei Kontrollpunkte.....	114
Tabelle 35: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – drei Kontrollpunkte	114

Tabelle 36: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – fünf Kontrollpunkte	115
Tabelle 37: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – fünf Kontrollpunkte	115
Tabelle 38: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – sechs Kontrollpunkte	116
Tabelle 39: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – sechs Kontrollpunkte	116
Tabelle 40: Mittelwerte der Fahrzeiten bei unterschiedlicher Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen in s	117
Tabelle 41: Standardabweichungen der Fahrzeiten bei unterschiedlicher Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen in s	118
Tabelle 42: Mittelwert der Intervalle in s bei 17 Fahrzeugen	119
Tabelle 43: Standardabweichung der Intervalle in s bei 17 Fahrzeugen	119
Tabelle 44: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 17 Fahrzeugen	120
Tabelle 45: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 17 Fahrzeugen	120
Tabelle 46: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 17 Fahrzeugen	121
Tabelle 47: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 17 Fahrzeugen	121
Tabelle 48: Mittelwert der Intervalle in s bei 16 Fahrzeugen	122
Tabelle 49: Standardabweichung der Intervalle in s bei 16 Fahrzeugen	122
Tabelle 50: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 16 Fahrzeugen	123
Tabelle 51: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 16 Fahrzeugen	123
Tabelle 52: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 16 Fahrzeugen	124
Tabelle 53: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 16 Fahrzeugen	124
Tabelle 54: Mittelwert der Intervalle in s bei 15 Fahrzeugen	125
Tabelle 55: Standardabweichung der Intervalle in s bei 15 Fahrzeugen	125
Tabelle 56: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 15 Fahrzeugen	126
Tabelle 57: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 15 Fahrzeugen	126
Tabelle 58: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 15 Fahrzeugen	127
Tabelle 59: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 15 Fahrzeugen	127

10. Literaturverzeichnis

Bartholdi III, John J.; Eisenstein, Donald D.: A self-coordinating bus route to resist bus bunching, in: Transportation Research Part B 46, 2012, S. 481-491

Boltze, Manfred; Wolfermann, Axel; Schäfer, Petra: Leitfaden Verkehrstelematik, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Darmstadt 2005

Daganzo, Carlos F.: A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analyses and comparisons, in: Transportation Research Part B 43, 2009, S. 913-921

Daganzo, Carlos F.; Pilachowski, Josh: Reducing bunching with bus-to-bus cooperation, in: Transportation Research Part B 45, 2011, S. 267-277

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen, Köln 1999

Hansen, Ingo; Pacht, Jörn (Hrsg.): Railway timetable and traffic, Hamburg 2008

Newell, Gordon Frank; Potts, Renfrey Burnard: Maintaining a bus schedule, in: Proceedings of the 2nd Australian Road Research Board, vol. 2, 1964, S. 388-393

Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs, Wiesbaden 2013

Potthoff, Gerhart: Verkehrsströmungslehre, Band 1: Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen, Berlin 1962

Reupke, Hartmut: RBL mit Zukunft – Zukunft mit RBL?, in: Der Nahverkehr 04/2004, S.48-51

Rüger, Siegfried: Städtischer öffentlicher Personenverkehr, Berlin 1974

Schnieder, Lars: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr, Berlin 2015

Weidmann, Ulrich; Lüthi, Marco: Die Fahrplanabhängigkeit der Fahrgastankunft an Haltestellen, in: Der Nahverkehr 12/2006, S. 16-19

Xuan, Yiguang; Argote, Juan; Daganzo, Carlos F.: Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis, in: Transportation Research Part B 45, 2011, S. 1831-1845

https://de.wikipedia.org/wiki/Rechnergestütztes_Betriebsleitsystem, Zugriff am 03.08.2017

<https://www.morgenpost.de/berlin/article114078830/M29-ueber-den-Bus-der-Hoelle-spricht-ganz-Berlin.html>, Zugriff am 09.10.2017

11. Anhang

11.1. Anhang A: MATLAB - Skripts

11.1.1. Hauptberechnung Ist-Zustand

```
%Berechnung des Ist-Zustands
close all
clear variables

%Anzahl Haltestellen:
h=28;

%Anzahl Fahrzeuge:
f=14;

%Planmäßige Umlaufzeit:
UmlPlan=3360;           %=56 Minuten

%Anzahl Umläufe:
nUml=16;

%Anzahl Kurse:
k=f*nUml;

Fahrzeiten_und_FG_Wechselzeiten

load fz_fgwz.mat           %Zuvor berechnete Fahrzeiten aller Fzg und FGW-Zeiten des ersten Fahrzeugs (200 Durchläufe)

%Anzahl Wiederholungen der Basisberechnung:
WiederholungBasis=200;

%Planmäßiges Intervall bei Abfahrt der Fahrzeuge ab Neuwaldegg:
IntervallAbfahrtGesamt=150:15:300;
AnzahlIntervall=length(IntervallAbfahrtGesamt);

Anz4d=zeros(h,k,WiederholungBasis,AnzahlIntervall);
Afz4d=zeros(h,k,WiederholungBasis,AnzahlIntervall);
FahrzeitenImUmlauf4d=zeros(k-(f+1),1,WiederholungBasis,AnzahlIntervall);

for s=1:AnzahlIntervall

    IntervallAbfahrt=IntervallAbfahrtGesamt(s);

    for r=1:WiederholungBasis

        fz=fzmatrix3d(:, :, r);
        fgwl=fgwlmatrix3d(:, :, r);

        %Abfahrtszeiten für Fahrzeug 1 & generell für die ersten Fahrten der Fahrzeuge in HS Neuwaldegg:
        xy=zeros(h,k);
        xy(1,1:f)=0:IntervallAbfahrt:IntervallAbfahrt*(f-1);           %Abfahrtszeiten für die ersten Fahrten der Fahrzeuge
```

```

xy(2:end,1)=fz(1:end-1,1)+fgw1(1:end-1);
afz=zeros(h,k);
afz(:,1)=cumsum(xy(:,1));
afz(1,:)=xy(1,:);

%Ankunftszeiten für Fahrzeug 1 an allen HS (NG an erster Stelle, HMW an letzter)
anz=zeros(h,k);
anz(1,1:f)=0:IntervallAbfahrt:(f-1)*IntervallAbfahrt; %Eigentlich nicht richtig, weil es ja hier noch keine Ankunftszeiten gibt.
Annahme: Abfahrt=Ankunft.
anz(2:end,1)=fz(1:end-1,1)+fgw1(1:end-1);
anz=cumsum(anz);

for j=2:k
    if j<(f+1) %Einschränkung auf jeweils erste Fahrt eines Fahrzeugs
        for i=2:h
            anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
            Mindestzeitabstand_Ankunft %damit auch Mindestabstand von 15s für Wartezeit wz

            wz=anz(i,j)-afz(i,j-1); %Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis Ankunft
zweites FZ)

            afg=round(wz*fgzfl(i),0); %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

            FGWZ_Berechnung

            afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;

            Mindestzeitabstand_Abfahrt

        end

    else %ab jeweils zweitem Kurs eines Fahrzeugs muss die "Ankunftszeit" des Vorkurses und Ausgleichszeit in Neuwaldegg berücksichtigt
werden!

        for i=1:h
            if i<2 %Berechnung der Abfahrtszeit in Neuwaldegg

                anz(i,j)=afz(h,j-f)+fz(h,j-f); %Ankunftszeiten in NG ab dem zweiten Kurs eines Fahrzeugs
                Mindestzeitabstand_Ankunft %damit auch Mindestabstand von 15s für Wartezeit wz

                wz=anz(i,j)-afz(i,j-1); %Wartezeit in NG zwischen zwei Fahrzeugen

                afg=round(wz*fgzfl(i),0); %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

                FGWZ_Berechnung

                afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;

                Mindestzeitabstand_Abfahrt
            end
        end
    end
end

```

```

Intervalls)      if afz(i,j)<IntervallAbfahrt*(j-1)      %In NG darf nicht vor dem Fahrplan weggefahren werden (einem Vielfachen des
                 afz(i,j)=IntervallAbfahrt*j;
                 end

                 else      %alle anderen zweiten Kurse ab Himmelmutterweg

                 anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
                 Mindestzeitabstand_Ankunft      %damit auch Mindestabstand von 15s für Wartezeit wz

                 wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);

                 afg=round(wz*fgzfl(i),0);

                 FGWZ_Berechnung

                 afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;
                 Mindestzeitabstand_Abfahrt

                 end

                 end

                 end

                 end

                 Fahrzeiten=(anz(1,2+f:end)-afz(1,2:end-f))';

                 Anz4d(:, :, r, s)=anz(:, :);
                 Afz4d(:, :, r, s)=afz(:, :);
                 FahrzeitenImUmlauf4d(:, :, r, s)=Fahrzeiten(:, :);

                 end

                 display 'Intervall fertig', (s)

                 end

```

11.1.2. Hauptberechnung Anwendung backward headway

```
%Fahrzeitenberechnung mit Anwendung der "Backward-headway"-Methode
close all
clear variables

%Anzahl Haltestellen:
h=28;

%Anzahl Fahrzeuge:
f=18;

%Anzahl der berücksichtigten Fahrzeuge für Durchschnittsberechnungen für Prognose:
FzgPrognose=5;

%Planmäßiges Intervall bei Abfahrt der Fahrzeuge des ersten Umlaufs:
IntervallAbfahrt=180;

%Planmäßige Umlaufzeit:
UmlPlan=3240;           %=54 Minuten

%Anzahl Umläufe:
nUml=16;

%Anzahl Kurse:
k=f*nUml;

%Position der Kontrollpunkte:
kp=[0 1 10 20];           %Muss auf erster Indexposition immer eine 0 haben (für Berechnung weiter unten)

Fahrzeiten_und_FG_Wechselzeiten

load fz_fgwz.mat           %Zuvor berechnete Fahrzeiten aller Fzg und FGW-Zeiten des ersten Fahrzeugs (200 Durchläufe)

%Anzahl Wiederholungen der Basisberechnung:
WiederholungBasis=200;

%Unterteilung Alpha:
AlphaGesamt=(0:0.1:1);
UnterteilungAlpha=length(AlphaGesamt);

%Unterteilung Beta:
BetaGesamt=(120:15:210);
UnterteilungBeta=length(BetaGesamt);

Anz5d=zeros(h,k,WiederholungBasis,UnterteilungAlpha,UnterteilungBeta);
Afz5d=zeros(h,k,WiederholungBasis,UnterteilungAlpha,UnterteilungBeta);
KPAufenthalt5d=zeros(size(kp,2)-1,k-(f+3),WiederholungBasis,UnterteilungAlpha,UnterteilungBeta);
Pufferzeit5d=zeros(size(kp,2)-1,k-(f+3),WiederholungBasis,UnterteilungAlpha,UnterteilungBeta);
```

```

FahrzeitenImUmlauf5d=zeros(k-(f+1+3),1,WiederholungBasis,UnterteilungAlpha,UnterteilungBeta);

for t=1:length(BetaGesamt)

%Mindest-FFZ an den Kontrollpunkten:
Beta=BetaGesamt(t);

for s=1:length(AlphaGesamt)

%Alpha-Werte der Kontrollpunkte:
Alpha=[0 AlphaGesamt(s) AlphaGesamt(s) AlphaGesamt(s)];           %Muss auf erster Indexposition immer eine 0 haben (für Berechnung weiter unten)

for r=1:WiederholungBasis

fz=fzmatrix3d(:,:,r);
fgwl=fgwlmatrix3d(:,:,r);

%Abfahrtszeiten für Fahrzeug 1 & generell für die ersten Fahrten der Fahrzeuge in HS Neuwaldegg:
xy=zeros(h,k);
xy(1,1:f)=0:IntervallAbfahrt:(f-1)*IntervallAbfahrt;           %Abfahrtszeiten für die ersten Fahrten der Fahrzeuge
xy(2:end,1)=fz(1:end-1,1)+fgwl(1:end-1);
afz=zeros(h,k);
afz(:,1)=cumsum(xy(:,1));
afz(1,:)=xy(1,:);           %AFZ: NG an erster Stelle

%Ankunftszeiten für Fahrzeug 1 an allen HS (NG an erster Stelle, HMW an letzter) & für die ersten Fahrten in NG
anz=zeros(h,k);
anz(1,1:f)=0:IntervallAbfahrt:(f-1)*IntervallAbfahrt;           %Sind Abfahrtszeiten! Eigentlich natürlich nicht richtig, weil es ja hier
                                                                    noch keine Ankunftszeiten gibt. Aber Grafik ist so verständlicher.

anz(2:end,1)=fz(1:end-1,1)+fgwl(1:end-1);
anz(:,1)=cumsum(anz(:,1));

%Prognose Fahrzeiten für Fzg 2 und 3 (noch ohne Kontrollpunkte und Ausgleichszeiten) ab HS HMW:

for j=2:3

for i=2:h

anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
Mindestzeitabstand_Ankunft

wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);           %Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis Ankunft zweites FZ)
                                                                    %Durch Mindestzeitabstand_Ankunft ist auch Mindestabstand von 15s für Wartezeit wz gegeben
afg=round(wz*fgzfl(i),0);           %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

FGWZ_Berechnung

afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;

```

```

        Mindestzeitabstand_Abfahrt

    end
end

%Errichtung Feedbackschleife durch Einbau der Methode nach Bartholdi:

AufenthKP=zeros(1,length(kp));

anzprognose1=zeros(h,k);
anzprognose2=zeros(h,k);

afzprognose1=zeros(h,k);
afzprognose2=zeros(h,k);

FFZKontrolleVorl=zeros(h,k);
FGWZKontrolleVorl=zeros(h,k);
WZKontrolleVorl=zeros(h,k);
LetzteHSAnnKontrolle=zeros(h,k);
LetzteHSAnmKontrolle=zeros(h,k);
LetzteHSAbnKontrolle=zeros(h,k);
LetzteHSAbmKontrolle=zeros(h,k);

    for j=1:(k-3) %letzten beiden Fzg haben nicht mehr genügend (=2) Folgefahrzeuge (dort nur mehr Prognose der
Fahrzeiten)

        idxkp=1; %Zählindex für die Zuordnung des richtigen Kontrollpunkts

        if j<(f+1) %Einschränkung auf jeweils erste Fahrt eines Fahrzeugs

            for i=2:h

                if any(kp==i) %Befindet sich an der Position von i ein Kontrollpunkt?

                    if kp(2)==1 && i==kp(3) %Falls sich ein KP in NG befindet, muss im ersten Umlauf ein Indexwert übersprungen werden
                        idxkp=idxkp+2;
                    end

                    if j>1

                        anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
                        Mindestzeitabstand_Ankunft

                        wz=anz(i,j)-afz(i,j-1); %Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis Ankunft
zweites FZ)

                        %Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

                        afg=round(wz*fgzfl(i),0); %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

FGWZ_Berechnung
Berechnung_Ausgleichszeiten

if fgwz<AufenthKP(idxkp)                                %Berücksichtigung der berechneten Ausgleichszeit
    AglZeit=AufenthKP(idxkp)-fgwz;
else
    AglZeit=0;
end

afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz+AglZeit;
Mindestzeitabstand_Abfahrt

AfzBeta(i,j)=afz(i,j-1)+Beta;                          %Berücksichtigung von Beta
if AfzBeta(i,j)>afz(i,j)
    afz(i,j)=AfzBeta(i,j);
end

FGWZKontrolleVorl(i,j)=fgwz;
WZKontrolleVorl(i,j)=wz;

end

else
    if i>kp(2)                                          %Neuberechnung nur, wenn sich HS nach dem ersten Kontrollpunkt befindet
        if j>1                                          %Fahrzeiten etc. -berechnung wieder nur ab zweitem Fahrzeug, weil es bei
erstem Fahrzeug keinen vorangehenden Zeitpunkt t gibt

            anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
            Mindestzeitabstand_Ankunft

            wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);                    %Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis
Ankunft zweites FZ)                                     %Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

            afg=round(wz*fgzf1(i),0);                  %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

            FGWZ_Berechnung

            afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;
            Mindestzeitabstand_Abfahrt

            FGWZKontrolleVorl(i,j)=fgwz;
            WZKontrolleVorl(i,j)=wz;

        end
    end
end
end

```

```

end
else
berücksichtigt werden
for i=1:h
if any(kp==i)
idxkp=idxkp+1;
if i==1
anz(i,j)=afz(h,j-f)+fz(h,j-f);
Mindestzeitabstand_Ankunft

wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);

afg=round(wz*fgzfl(i),0);

FGWZ_Berechnung
Berechnung_Ausgleichszeiten
if fgwz<AufenthKP(idxkp)
AglZeit=AufenthKP(idxkp)-fgwz;
else
AglZeit=0;
end

afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz+AglZeit;
Mindestzeitabstand_Abfahrt

AfzBeta(i,j)=afz(i,j-1)+Beta;
if AfzBeta(i,j)>afz(i,j)
afz(i,j)=AfzBeta(i,j);
end

FGWZKontrolleVorl(i,j)=fgwz;
WZKontrolleVorl(i,j)=wz;
else
anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
Mindestzeitabstand_Ankunft

wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);

afg=round(wz*fgzfl(i),0);

```

%ab jeweils zweitem Kurs eines Fahrzeugs muss die Ankunftszeit des Vorkurses in NG

%Befindet sich an der Position von i ein Kontrollpunkt?

%Berechnung der An- und Abfahrtszeit in Neuwaldegg

%Ankunftszeiten in NG ab dem zweiten Kurs eines Fahrzeugs

%Wartezeit in NG zwischen zwei Fahrzeugen
%Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

%Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

%Berücksichtigung der berechneten Ausgleichszeit

%Berücksichtigung von Beta

%Berechnung für KP bei allen zweiten Kurse ab Himmelmutterweg

%Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

```

FGWZ_Berechnung
Berechnung_Ausgleichszeiten

if fgwz<AufenthKP(idxkp)                                %Berücksichtigung der berechneten Ausgleichszeit
    AglZeit=AufenthKP(idxkp)-fgwz;
else
    AglZeit=0;
end

afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz+AglZeit;
Mindestzeitabstand_Abfahrt

AfzBeta(i,j)=afz(i,j-1)+Beta;                          %Berücksichtigung von Beta
if AfzBeta(i,j)>afz(i,j)
    afz(i,j)=AfzBeta(i,j);
end

FGWZKontrolleVorl(i,j)=fgwz;
WZKontrolleVorl(i,j)=wz;
end

else                                                    %Kein KP, normale Zeitenberechnung

if i>kp(2)                                             %Neuberechnung nur, wenn sich HS nach dem ersten Kontrollpunkt befindet
                                                        %Für alle zweiten Kurse ab Himmelmutterweg

    anz(i,j)=afz(i-1,j)+fz(i-1,j);
    Mindestzeitabstand_Ankunft

    wz=anz(i,j)-afz(i,j-1);                            %Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

    afg=round(wz*fgzfl(i),0);

    FGWZ_Berechnung

    afz(i,j)=anz(i,j)+fgwz;
    Mindestzeitabstand_Abfahrt

    FGWZKontrolleVorl(i,j)=fgwz;
    WZKontrolleVorl(i,j)=wz;

end
end
end

%Berechnung der näherungsweisen afz und anz für die nächsten drei Kurse, damit für den nächsten Kurs die
%Ausgleichszeiten errechnet werden können

```

```

for q=(j+1):(j+2)
if q<=f %Einschränkung auf jeweils erste Fahrt eines Fahrzeugs
    for i=2:h

        anz(i,q)=afz(i-1,q)+fz(i-1,q);
        Mindestzeitabstand_Ankunft_q

        if any(kp==i) %Befindet sich an der Position von i ein Kontrollpunkt?

            if j<FzgPrognose %Berechnung der durchschnittlichen Aufenthaltszeit am KP; Berücksichtigung der vorgegeben
                Anzahl an Fzg für die Prognose
                AnzHilfsvektor=anz(i,1:j);
                AfzHilfsvektor=afz(i,1:j);
            else
                AnzHilfsvektor=anz(i,j-(FzgPrognose-1):j);
                AfzHilfsvektor=afz(i,j-(FzgPrognose-1):j);
            end

            DSAZKP=sum(AfzHilfsvektor-AnzHilfsvektor)/size(AfzHilfsvektor,2);

            afz(i,q)=anz(i,q)+DSAZKP;

        else %Kein KP bei i

            wz=anz(i,q)-afz(i,q-1); %Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis Ankunft
            zweites FZ) %Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

            afg=round(wz*fgzfl(i),0); %Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

            FGWZ_Berechnung

            afz(i,q)=anz(i,q)+fgwz;
        end

        Mindestzeitabstand_Abfahrt_q

        anzprognose1(i,j+1)=anz(i,j+1);
        anzprognose2(i,j+2)=anz(i,j+2);

        afzprognose1(i,j+1)=afz(i,j+1);
        afzprognose2(i,j+2)=afz(i,j+2);

    end

else %ab jeweils zweitem Kurs eines Fahrzeugs muss die "Ankunftszeit" des Vorkurses in Neuwaldegg berücksichtigt werden!

    for i=1:h
        if i==1 %Berechnung der Ankunftszeit in Neuwaldegg
            anz(i,q)=afz(h,q-f)+fz(h,q-f);
        end
    end
end

```

```

else
anz(i,q)=afz(i-1,q)+fz(i-1,q);
end

Mindestzeitabstand_Ankunft_q

if any(kp==i)
anzHilfsvektor=anz(i,j-(FzgPrognose-1):j);
vorgegeben Anzahl an Fzg für die Prognose AfzHilfsvektor=afz(i,j-(FzgPrognose-1):j);
DSAZKP=sum(AfzHilfsvektor-AnzHilfsvektor)/size(AfzHilfsvektor,2);
afz(i,q)=anz(i,q)+DSAZKP;
else
wz=anz(i,q)-afz(i,q-1);
zweites FZ)
afg=round(wz*fgzfl(i),0);
FGWZ_Berechnung
afz(i,q)=anz(i,q)+fgwz;
end

Mindestzeitabstand_Abfahrt_q

anzprognose1(i,j+1)=anz(i,j+1);
anzprognose2(i,j+2)=anz(i,j+2);

afzprognose1(i,j+1)=afz(i,j+1);
afzprognose2(i,j+2)=afz(i,j+2);

end

end

end

end

%Kontrollgrößen:
HSAufenthalt=round(afz-anz);

```

%Ankunftszeiten aller anderen zweiten Kurse ab Himmelmutterweg

%Befindet sich an der Position von i ein Kontrollpunkt?

%Berechnung der durchschnittlichen Aufenthaltszeit am KP; Berücksichtigung der

%Kein KP bei i

%Berechnung der Wartezeit an einer HS zwischen zwei Fahrzeugen (Abfahrt erstes bis Ankunft

%Mindestabstand von 15s für wz gegeben durch Berechnung Mindestzeitabstand_Ankunft

%Berechnung der Anzahl der an der HS ein-/aussteigenden Personen

%Aufenthalt in den Haltestellen

```

KPAufenthalt=round(MatrixGross2Redux(HSAufenthalt, kp));
KPAufenthalt=KPAufenthalt(:, f+1:end-3);
DSKPAufenthalt=mean(KPAufenthalt');
FFZKontrolle1=round(MatrixGross2Redux(FFZKontrolleVor1, kp));
FFZKontrolle=FFZKontrolle1(:, f+1:end-3);
DSFFZ=mean(FFZKontrolle');
FGWZKontrolle=round(FGWZKontrolleVor1);
FGWZKontrolle=FGWZKontrolle(:, f+1:end-3);
FGWZursprglKP=round(MatrixGross2Redux(FGWZKontrolle, kp));
Pufferzeit=KPAufenthalt-FGWZursprglKP;
DSPufferzeit=mean(Pufferzeit');
FFZnKontrolle=round(MatrixGross2Redux(FFZnKontrolleVor1, kp));
FFZnKontrolle=FFZnKontrolle(:, f+1:end);
DSFFZn=mean(FFZnKontrolle');
WZKontrolle1=round(WZKontrolleVor1);
WZKontrolle=WZKontrolle1(:, 2:end-3);
Fahrzeiten=(anz(1, 2+f:end-3)-afz(1, 2:end-(f+3)))';
Fahrzeit_Abweichung_VorKP;
DSFahrzeitVorKP=mean(FahrzeitVorKP');
DSAbweichungFZvorKP=mean(AbweichungFZvorKP');
DSFahrzeiten=mean(Fahrzeiten);
StabFahrzeiten=std(Fahrzeiten);

Anz5d(:, :, r, s, t)=anz(:, :);
Afz5d(:, :, r, s, t)=afz(:, :);
KPAufenthalt5d(:, :, r, s, t)=KPAufenthalt(:, :);
Pufferzeit5d(:, :, r, s, t)=Pufferzeit(:, :);
FahrzeitenImUmlauf5d(:, :, r, s, t)=Fahrzeiten(:, :);

end

end

end

```

%Aufenthalt in den Kontrollpunkten

%Errechneter Abstand zum Vorderfahrzeug

%In den KPs aufgrund der Ausgleichszeitberechnung verbrachte Zeit

11.1.3. FGWZ-Berechnung

```
fgwz=13.231*exp(0.0144*afg)+5.43*randn;

if fgwz>0.0064240716*afg^2+0.0891909814*afg+22.0608836207      %Berücksichtigung der Obergrenze
    fgwz=0.0064240716*afg^2+0.0891909814*afg+22.0608836207;
end

if fgwz<0.0048941799*afg^2+0.0259259259*afg+10.0072751323    %Berücksichtigung der Untergrenze
    fgwz=0.0048941799*afg^2+0.0259259259*afg+10.0072751323;
end

if fgwz>90            %Maximaldauer des FG-Wechsels
    fgwz=90;
end
```

11.1.4. Berechnung Ausgleichszeiten

```
anzhoch1=MatrixQuer2Hoch(anz,f); %Matrizen und Vektoren uebereinander anordnen
anzhoch=[anzhoch1 anzhoch1]; %Zwei nebeneinander, damit auch das letzte Fzg ein Folgefzg hat
afzhoch1=MatrixQuer2Hoch(afz,f);
afzhoch=[afzhoch1 afzhoch1];
mwfzhoch=repmat(mwfz,nUml,1);
mwfgwhoch=repmat(mwfgw,nUml,1);

UmlFertiglVorl=floor(j/f); %Wie viele Umlaeufe sind fuer Fzg 1 bereits fertig absolviert (abhaengig von j)? Floor - abrunden
UmlFertigl=zeros(1);

if mod(j,f)==0 %Fertiger Umlauf erst, wenn auch letztes Fzg vorbei ist (z.B. bei 18 Fzg ist erst bei 19. der erste Umlauf vorbei)
    UmlFertigl=UmlFertiglVorl-1;
else
    UmlFertigl=UmlFertiglVorl;
end

AnKP=anz(kp(idxxp),j); %Ankunftszeit von Fahrzeug 1 (Neunummerierung auf "1" zu diesem Zeitpunkt) am Kontrollpunkt
a=zeros(h*nUml,1);
HilfAnKP=a+AnKP; %Vektor, der nur aus der Ankunftszeit am KP besteht

%Aufenthaltsorte des Folgefahrzeugs n zum Zeitpunkt des Eintreffens von Fzg 1 im KP:

idxAnn=anzhoch(:,j-f*UmlFertigl+1)<HilfAnKP; %Index: Bei welchen HS ist Ankunftszeit des naechsten Fzgs (n) kleiner als Ankunftszeit v. Fzg
1 im KP? D.h.: Wo ist das Fzg angekommen, wenn 1 den KP erreicht?

if mod(j,f)==0 %Bei letztem Fzg muss beachtet werden, dass n schon im naechsten Umlauf ist.
    idxAnn(kp(idxxp)+h*(UmlFertigl+1):end)=0; %ab KP sollen die Werte jedenfalls 0 sein
else
    idxAnn(kp(idxxp)+h*UmlFertigl:end)=0; %ab KP sollen die Werte jedenfalls 0 sein
end

LetzteHSAnn=sum(idxAnn); %Letzte HS, bei der die Ankunft von n vor der Ankunft von 1 am KP war

UmlaufFertignVorl=floor((j+1)/f); %Wie viele Umlaeufe hat Fzg n zum Zeitpunkt der Ankunft von Fzg 1 im KP bereits absolviert
UmlaufFertign=zeros(1);
if mod((j+1),f)==0 %Fertiger Umlauf erst, wenn die erste HS wieder erreicht ist
    UmlaufFertign=UmlaufFertignVorl-1;
else
    UmlaufFertign=UmlaufFertignVorl;
end

idxAbn=afzhoch(:,j-f*UmlFertigl+1)<HilfAnKP; %Bei welchen HS ist die Abfahrtszeit von n kleiner als die Ankunftszeit von 1 am KP?
if mod(j,f)==0 %Fzg n bereits im naechsten Umlauf
```

```

    idxAbn(kp(idxkp)+h*(UmlFertigl+1):end)=0;
else
    idxAbn(kp(idxkp)+h*UmlFertigl:end)=0;
end

LetzteHSAbn=sum(idxAbn); %Letzte HS, bei der die Abfahrt von n vor der Ankunft von 1 am KP war

%Berechnung der Fahrzeugfolgezeit zwischen den Fzg n und 1 (FFZn) zum Zeitpunkt des Eintreffens von Fzg 1 im KP:
if LetzteHSAnn>0 %Nur, wenn bereits ein nächstes Fahrzeug n auf der Strecke ist
    ZeitInHSn=anzhoch(kp(idxkp)+h*UmlFertigl,j-UmlFertigl*f)-anzhoch(LetzteHSAnn,j-UmlFertigl*f+1); %Zeitdauer, die Fzg n bei Eintreffen von
1 am KP bereits in der HS steht.
    if LetzteHSAnn==1 %Wenn Fzg n gerade gestartet ist (1.Umlauf), dann gibt es in NG keine Zeit in der HS
        RestZeitInHSn=0;
        ZeitInHSn=0;
    else
        RestZeitInHSn=mwfgwhoch(LetzteHSAnn-1)-ZeitInHSn; %Restdauer, die Fzg n voraussichtlich (Berechnung nach Mittelwert) noch an der HS
stehen wird.
        if RestZeitInHSn<0
            RestZeitInHSn=0;
        end
        if ZeitInHSn>mwfgwhoch(LetzteHSAnn-1) %FÜR DOKUMENTATION: Schätzung des Abstands zum Folgefahrzeug auf Basis der Mittelwerte,
nicht auf Basis der Nachfrage
            ZeitInHSn=mwfgwhoch(LetzteHSAnn-1); %Begrenzung der Maximalzeit in HS auf den Mittelwert. Grund: Es können sonst extrem hohe,
unrealistische Werte auftreten (Aufschaukelung durch wartende Vorderfahrzeuge).
        end
    end
    ZeitAufStrecken=anzhoch(kp(idxkp)+h*UmlFertigl,j-UmlFertigl*f)-afzhoch(LetzteHSAbn,j-UmlFertigl*f+1); %Zeitdauer, die sich Fzg n bei
Eintreffen von 1 am KP bereits auf der Strecke zur nächsten HS befindet.
    RestZeitAufStrecken=mwfhoch(LetzteHSAbn)-ZeitAufStrecken; %Restdauer, die Fzg n voraussichtlich
(Berechnung nach Mittelwert) noch bis zur nächsten HS benötigen wird.
    if RestZeitAufStrecken<0
        RestZeitAufStrecken=0;
    end
    if ZeitAufStrecken>mwfhoch(LetzteHSAbn)
        ZeitAufStrecken=mwfhoch(LetzteHSAbn);
    end
end

%Berechnung des Abstandes durch Fahrzeiten zw. n und 1
if LetzteHSAnn>LetzteHSAbn %Fzg n steht in einer HS, wenn Fzg 1 am KP ankommt

```

```

RestZeitAufStrecken=0;
ZeitAufStrecken=0;
HilfVar1=-2;

    AbstFzn=mwfhoch(LetzteHSAnn:kp(idxkp)-1+h*UmlaufFertign);
weil n jedenfalls in einer HS vor dem KP steht

else
    RestZeitInHSn=0;
    ZeitInHSn=0;
    HilfVar1=-1;

    if LetzteHSAbn==kp(idxkp)-1+h*UmlaufFertign
        AbstFzn=0;
    else
        AbstFzn=mwfhoch(LetzteHSAnn+1:kp(idxkp)-1+h*UmlaufFertign);
    end

end

AbstandFahrzeitn=sum(AbstFzn);

%Berechnung des Abstandes durch FGW-Zeiten zw. n und 1

if LetzteHSAnn>kp(idxkp)+h*UmlaufFertign-2
    AbstFGWzn=0;
else
    AbstFGWzn=mwfgwhoch(LetzteHSAnn:kp(idxkp)+h*UmlaufFertign-2);
nicht NG wie in den anderen Matrizen
end

AbstandFGWZeitn=sum(AbstFGWzn);
oder in HS)

FFZn=RestZeitInHSn+AbstandFahrzeitn+RestZeitAufStrecken+AbstandFGWZeitn;

if FFZn<15
    FFZn=15;
end

AufenthKP(idxkp)=Alpha(idxkp)*FFZn;

else
    FFZn=0;
    AufenthKP(idxkp)=0;
end

```

```

%Hilfvariable für die spätere Berechnung von AbstandFGWZeitm

%Summe der Fahrzeiten zw. n und KP; Abstandskontrolle nicht nötig,

%Fzg n befindet sich auf der Strecke, wenn Fzg 1 am KP ankommt

%Hilfvariable für die spätere Berechnung von AbstandFGWZeitm

%Abstandskontrolle zw n und 1

%Summe der Fahrzeiten zwischen n und KP

%Summe der Fahrzeiten zwischen Fzg 1 und Fzg n

%Abstandskontrolle zw. n und 1

%ok, weil Matrix mwfgwhoch um eins verschoben ist (1.HS ist HM,

%Summe der FG-Wechselzeiten zw. 1 und n (egal, ob n auf Strecke

%FFZ zwischen n und 1

%Wenn noch kein Fzg n auf der Strecke ist

```

```
AufenthKPKontrolleVorl(i,j)=AufenthKP(idxkp);  
FFZnKontrolleVorl(i,j)=FFZn;  
LetzteHSAnnKontrolle(i,j)=LetzteHSAnn;  
LetzteHSAbnKontrolle(i,j)=LetzteHSAbn;
```

11.2. Anhang B: Intervalle, Fahrzeiten und einzuhaltende Zeitabstände aus Kapitel 6.

11.2.1. Intervalle

Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung der Intervalle - Ist-Situation in der HVZ

Soll-Intervall	Intervall in s	Standardabweichung in s
150	242	899
165	241	886
180	238	869
195	233	837
210	192	383
225	196	224
240	210	238
255	223	252
270	237	266
285	251	280
300	265	293

Tabelle 13: Mittelwert und Standardabweichung der Intervalle - Ist-Situation in der NVZ

Soll-Intervall	Intervall in s	Standardabweichung in s
150	305	1060
165	304	1048
180	301	1028
195	298	998
210	293	960
225	282	894
240	227	402
255	229	229
270	243	246
285	256	261
300	270	275

Tabelle 14: Mittelwert der Intervalle in s – ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	236	234	231	227	219	188	182
0,1	235	234	231	227	219	188	182
0,2	231	230	229	225	218	188	182
0,3	225	225	224	220	213	186	182
0,4	207	206	210	210	203	178	182
0,5	198	196	193	189	180	174	182
0,6	192	190	184	177	172	173	182
0,7	188	185	179	173	171	174	182
0,8	185	183	179	176	174	175	182
0,9	189	189	189	186	180	177	183
1	196	197	197	196	192	180	184

Tabelle 15: Standardabweichung der Intervalle in s – ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	756	704	638	562	468	253	148
0,1	738	689	633	561	469	256	148
0,2	654	614	571	516	443	249	147
0,3	561	532	497	447	384	225	148
0,4	418	394	389	366	310	168	147
0,5	367	334	298	256	197	150	147
0,6	334	301	252	197	156	144	147
0,7	319	283	232	180	154	145	147
0,8	331	294	248	199	165	149	147
0,9	379	351	311	263	196	156	149
1	429	405	368	326	267	170	150

Tabelle 16: Mittelwert der Intervalle in s – drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	229	224	218	208	168	162	174
0,1	227	223	218	206	168	162	174
0,2	215	214	210	199	166	162	174
0,3	194	190	183	170	159	162	173
0,4	191	188	181	169	158	162	173
0,5	192	187	181	175	166	163	173
0,6	191	189	188	186	180	166	173
0,7	199	198	198	198	193	175	173
0,8	208	208	206	206	204	188	174
0,9	215	214	213	212	210	199	178
1	221	220	218	217	215	207	184

Tabelle 17: Standardabweichung der Intervalle in s – drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	623	553	478	384	168	77	82
0,1	598	537	472	380	166	77	82
0,2	487	451	405	329	152	77	82
0,3	333	290	235	168	89	77	82
0,4	317	276	222	150	80	78	82
0,5	313	266	217	168	107	79	82
0,6	315	282	252	212	159	84	83
0,7	366	327	296	266	211	117	84
0,8	407	374	334	298	259	168	86
0,9	441	405	367	325	284	211	95
1	462	427	387	346	301	238	117

Tabelle 18: Mittelwert der Intervalle in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	223	217	209	197	159	160	168
0,1	219	215	208	194	160	160	168
0,2	190	186	180	166	158	160	168
0,3	184	180	173	163	158	160	167
0,4	186	181	177	173	165	162	167
0,5	193	192	190	187	181	167	168
0,6	204	203	201	199	195	183	170
0,7	212	211	210	208	206	197	177
0,8	218	217	215	213	211	206	187
0,9	220	219	218	217	215	208	192
1	222	220	219	217	214	207	199

Tabelle 19: Standardabweichung der Intervalle in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	600	528	450	352	107	66	74
0,1	564	507	441	341	111	66	74
0,2	331	287	242	167	91	67	74
0,3	297	255	200	123	71	68	75
0,4	297	253	211	167	105	72	76
0,5	342	309	271	228	172	89	78
0,6	393	359	320	280	231	155	83
0,7	428	397	357	315	272	208	105
0,8	442	410	375	334	290	235	137
0,9	436	407	374	336	295	235	141
1	383	369	343	308	269	204	137

Tabelle 20: Mittelwert der Intervalle in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	220	214	204	190	159	159	166
0,1	217	211	203	190	158	159	166
0,2	186	181	173	158	156	159	166
0,3	182	178	171	162	157	159	165
0,4	184	182	180	175	167	161	165
0,5	197	196	194	191	186	173	167
0,6	208	206	205	202	200	194	173
0,7	214	214	213	211	210	206	191
0,8	218	217	217	216	215	212	201
0,9	219	218	218	218	218	214	204
1	223	222	220	218	217	213	206

Tabelle 21: Standardabweichung der Intervalle in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	585	514	431	326	103	59	68
0,1	552	492	421	324	97	59	68
0,2	316	269	206	101	66	59	68
0,3	291	250	192	115	62	61	68
0,4	302	267	228	182	117	65	69
0,5	370	333	293	252	204	118	72
0,6	417	381	342	299	260	205	96
0,7	440	410	374	336	297	256	168
0,8	441	412	384	354	319	278	206
0,9	415	393	371	346	318	275	204
1	343	329	307	300	289	242	164

11.2.2. Umlaufzeiten

Tabelle 22: Mittelwert und Standardabweichung der Umlaufzeiten – Ist-Situation in der HVZ

Soll-Intervall	Umlaufzeit in s	Standardabweichung in s
150	4644	571
165	4594	603
180	4548	628
195	4450	668
210	3749	403
225	3855	165
240	4104	207
255	4359	223
270	4615	238
285	4870	253
300	5126	268

Tabelle 23: Mittelwert und Standardabweichung der Umlaufzeiten – Ist-Situation in der NVZ

Soll-Intervall	Umlaufzeit in s	Standardabweichung in s
150	4549	544
165	4517	570
180	4459	611
195	4375	656
210	4256	711
225	4097	761
240	3337	432
255	3363	146
270	3544	212
285	3732	250
300	3926	268

Tabelle 24: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4556	4529	4483	4406	4258	3692	3588
0,1	4548	4519	4478	4408	4262	3698	3587
0,2	4491	4468	4438	4373	4242	3685	3586
0,3	4377	4369	4350	4289	4158	3649	3586
0,4	4063	4052	4102	4109	3972	3507	3585
0,5	3903	3865	3809	3724	3555	3446	3585
0,6	3770	3737	3635	3492	3396	3426	3586
0,7	3683	3634	3533	3421	3387	3431	3586
0,8	3643	3602	3538	3472	3429	3453	3592
0,9	3712	3716	3701	3655	3539	3492	3602
1	3826	3850	3852	3835	3758	3552	3615

Tabelle 25: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	513	506	491	484	497	411	85
0,1	516	506	493	482	497	416	79
0,2	513	492	471	466	476	405	77
0,3	502	487	464	444	433	361	79
0,4	436	437	446	434	419	209	76
0,5	401	385	365	355	313	140	75
0,6	363	347	309	252	180	119	74
0,7	323	297	259	195	156	113	73
0,8	283	254	225	189	160	113	72
0,9	273	260	247	231	190	125	77
1	290	282	269	257	243	150	85

Tabelle 26: Mittelwert der Umlaufzeiten in s - drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4510	4444	4354	4166	3440	3367	3612
0,1	4484	4423	4338	4141	3430	3368	3612
0,2	4287	4263	4206	4003	3409	3367	3611
0,3	3908	3851	3729	3485	3274	3369	3610
0,4	3862	3810	3696	3484	3283	3377	3609
0,5	3885	3803	3708	3608	3437	3402	3607
0,6	3886	3849	3852	3822	3722	3457	3607
0,7	4039	4025	4042	4053	3961	3636	3612
0,8	4200	4208	4194	4193	4166	3886	3637
0,9	4337	4329	4323	4307	4283	4091	3702
1	4439	4431	4413	4395	4368	4227	3824

Tabelle 27: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s - drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	531	516	512	538	435	66	83
0,1	528	518	519	552	427	66	83
0,2	538	529	521	571	402	64	82
0,3	461	443	413	384	170	63	80
0,4	436	400	349	266	97	64	76
0,5	386	346	299	255	192	70	71
0,6	366	337	318	299	275	102	65
0,7	398	380	364	352	340	247	65
0,8	425	408	392	372	363	349	87
0,9	431	409	389	372	363	375	149
1	424	401	383	365	347	358	228

Tabelle 28: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4495	4419	4310	4101	3351	3419	3664
0,1	4441	4382	4280	4042	3362	3420	3663
0,2	3931	3868	3761	3480	3345	3428	3663
0,3	3821	3765	3653	3454	3356	3452	3659
0,4	3885	3819	3770	3703	3550	3506	3661
0,5	4041	4044	4035	4006	3909	3643	3692
0,6	4247	4257	4256	4250	4206	3997	3765
0,7	4411	4425	4423	4418	4407	4277	3918
0,8	4528	4531	4532	4530	4514	4450	4115
0,9	4583	4592	4599	4595	4590	4493	4209
1	4616	4617	4612	4602	4578	4474	4354

Tabelle 29: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	531	518	521	547	269	74	90
0,1	538	523	535	566	284	74	90
0,2	459	451	448	402	215	74	87
0,3	417	384	337	223	94	76	81
0,4	394	356	322	285	192	83	78
0,5	432	410	382	350	302	149	81
0,6	462	439	413	381	352	309	100
0,7	466	444	418	390	355	351	196
0,8	444	423	400	377	346	321	267
0,9	423	398	371	349	319	307	239
1	456	413	378	347	316	294	237

Tabelle 30: Mittelwert der Umlaufzeiten in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4485	4405	4275	4023	3384	3455	3701
0,1	4439	4363	4246	4016	3369	3455	3701
0,2	3889	3820	3670	3356	3329	3457	3696
0,3	3824	3773	3655	3463	3370	3476	3688
0,4	3910	3902	3879	3812	3655	3537	3693
0,5	4170	4174	4173	4157	4095	3833	3735
0,6	4379	4388	4393	4388	4386	4285	3901
0,7	4520	4536	4549	4562	4571	4542	4262
0,8	4603	4622	4643	4667	4682	4665	4480
0,9	4637	4654	4682	4710	4740	4710	4547
1	4762	4745	4736	4722	4736	4705	4602

Tabelle 31: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	536	516	506	550	269	69	86
0,1	531	520	516	547	253	69	86
0,2	448	428	393	229	128	68	83
0,3	413	383	331	226	87	71	77
0,4	415	392	364	330	249	83	75
0,5	469	445	420	391	368	271	85
0,6	486	463	434	409	384	378	199
0,7	466	447	423	398	376	375	366
0,8	437	410	391	367	351	341	365
0,9	433	402	374	347	320	315	314
1	498	466	434	381	334	310	278

11.2.3. Ausgleichszeiten

Tabelle 32: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s - ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	83	97	112	126	140	155	177
0,1	87	99	112	126	140	155	177
0,2	95	107	119	131	143	155	177
0,3	103	115	126	137	147	155	177
0,4	106	117	129	141	149	155	177
0,5	113	122	130	138	144	155	177
0,6	120	127	133	137	143	157	177
0,7	128	134	138	141	147	160	178
0,8	135	140	145	149	154	164	179
0,9	145	151	156	161	163	169	180
1	156	163	168	172	175	174	182

Tabelle 33: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s - ein Kontrollpunkt

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	25	28	31	34	37	39	22
0,1	31	31	32	34	38	39	22
0,2	60	54	47	42	40	39	22
0,3	91	82	71	61	50	40	22
0,4	89	84	84	78	60	40	22
0,5	106	93	80	70	56	40	22
0,6	123	108	89	69	55	40	22
0,7	143	124	100	77	59	41	22
0,8	175	151	124	95	68	42	21
0,9	222	199	168	135	90	48	20
1	266	245	213	178	135	61	21

Tabelle 34: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	248	289	329	362	332	421	496
0,1	259	295	329	359	330	421	496
0,2	275	311	345	362	332	422	497
0,3	275	304	327	326	327	424	499
0,4	300	329	352	360	347	429	501
0,5	325	352	377	402	405	438	508
0,6	341	370	405	439	465	458	517
0,7	365	395	427	459	490	496	527
0,8	386	413	441	472	508	525	536
0,9	405	431	458	486	520	542	549
1	430	452	477	503	530	553	563

Tabelle 35: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – drei Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	71	82	94	109	114	69	60
0,1	88	89	95	110	113	69	60
0,2	159	148	136	131	112	69	60
0,3	152	136	125	125	97	67	58
0,4	203	178	151	123	86	65	56
0,5	243	213	188	158	106	63	51
0,6	286	267	243	209	162	67	43
0,7	354	318	287	252	204	112	37
0,8	408	368	326	285	241	160	41
0,9	454	408	362	315	272	198	62
1	485	439	391	343	295	226	93

Tabelle 36: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	409	475	533	566	389	509	668
0,1	424	483	531	551	393	509	669
0,2	401	443	474	416	399	517	677
0,3	428	468	488	461	435	540	700
0,4	471	512	553	585	571	586	721
0,5	515	571	627	679	715	676	747
0,6	556	612	668	725	779	800	797
0,7	590	642	696	754	812	859	865
0,8	626	673	724	779	837	893	920
0,9	660	705	755	809	865	918	955
1	729	761	802	849	898	948	995

Tabelle 37: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – fünf Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	120	141	166	202	160	98	97
0,1	149	153	171	207	162	98	97
0,2	165	169	188	197	143	98	94
0,3	208	193	180	151	109	97	89
0,4	239	214	190	171	132	93	82
0,5	329	295	258	219	171	101	78
0,6	404	363	318	272	221	151	75
0,7	453	411	366	320	270	203	95
0,8	475	437	392	349	300	241	128
0,9	468	432	394	352	308	241	129
1	430	400	362	321	275	205	137

Tabelle 38: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	487	564	631	640	426	547	741
0,1	505	573	629	639	417	548	741
0,2	458	500	505	390	407	553	749
0,3	490	532	540	491	460	576	766
0,4	543	600	650	683	660	639	786
0,5	612	678	743	806	853	817	833
0,6	658	724	793	861	930	978	939
0,7	702	762	828	897	968	1035	1061
0,8	749	810	870	937	1005	1070	1120
0,9	807	862	921	981	1043	1104	1159
1	916	955	1003	1039	1085	1145	1210

Tabelle 39: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s – sechs Kontrollpunkte

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	146	172	204	258	184	103	105
0,1	179	187	209	257	176	103	104
0,2	192	197	211	175	134	103	101
0,3	223	212	197	165	113	103	94
0,4	265	238	213	190	155	100	89
0,5	358	316	275	238	198	139	87
0,6	432	385	336	288	242	187	99
0,7	473	430	383	336	288	233	149
0,8	470	437	403	363	318	263	181
0,9	439	406	377	348	318	270	187
1	423	387	350	316	287	240	169

11.2.4. Reduktion der Fahrzeuge im Umlauf bei fünf Kontrollpunkten

Tabelle 40: Mittelwerte der Fahrzeiten bei unterschiedlicher Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen in s

Haltestelle	Anzahl Fahrzeuge im Einsatz – Mittelwert der Fahrzeit bis zur Haltestelle ...			
	18	17	16	15
Himmelmutterweg	68,3	68,3	68,3	68,3
Dornbacher Straße	72,0	72,0	72,0	72,0
Güpferlingstraße	86,8	86,8	86,8	86,8
Hernals	113,2	113,2	113,2	113,2
Wattgasse	148,6	148,6	148,6	148,6
Rosensteingasse	87,6	87,6	87,6	87,6
Elterleinplatz	91,6	91,6	91,7	91,7
Palffygasse	55,0	55,0	55,0	54,9
Alser Straße	84,7	84,7	84,7	84,7
Brünnlbaggasse	105,0	105,0	105,0	105,0
Skodagasse	52,3	52,3	52,3	52,3
Lange Gasse	37,4	37,4	37,4	37,4
Landesgerichtsstraße	97,0	96,9	96,9	96,9
Schottentor	85,2	85,2	85,2	85,2
Landesgerichtsstraße	114,5	114,5	114,5	114,5
Lange Gasse	92,3	92,3	92,3	92,3
Skodagasse	51,4	51,4	51,4	51,5
Brünnlbaggasse	31,1	31,1	31,1	31,1
Alser Straße	121,2	121,2	121,2	121,2
Palffygasse	83,3	83,3	83,3	83,3
Elterleinplatz	66,5	66,5	66,5	66,5
Rosensteingasse	103,0	103,0	102,9	102,9
Wattgasse	94,0	94,0	94,1	94,0
Hernals	161,3	161,4	161,3	161,2
Güpferlingstraße	111,7	111,7	111,8	111,7
Dornbacher Straße	73,7	73,7	73,7	73,7
Himmelmutterweg	85,4	85,4	85,5	85,5
Neuwaldegg	78,5	78,5	78,5	78,5

Tabelle 41: Standardabweichungen der Fahrzeiten bei unterschiedlicher Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen in s

Haltestelle	Anzahl Fahrzeuge im Einsatz – Standardabweichung der Fahrzeit bis zur Haltestelle ...			
	18	17	16	15
Himmelmutterweg	10,15	10,16	10,16	10,14
Dornbacher Straße	5,85	5,85	5,84	5,84
Güpferlingstraße	9,72	9,72	9,73	9,73
Hernals	22,81	22,80	22,81	22,81
Wattgasse	23,79	23,79	23,77	23,80
Rosensteingasse	16,54	16,54	16,52	16,51
Elterleinplatz	16,74	16,76	16,76	16,76
Palfygasse	11,41	11,43	11,42	11,43
Alser Straße	20,39	20,40	20,39	20,39
Brünnlbaggasse	12,07	12,06	12,06	12,05
Skodagasse	8,43	8,44	8,45	8,45
Lange Gasse	10,17	10,17	10,16	10,17
Landesgerichtsstraße	21,17	21,18	21,18	21,18
Schottentor	14,97	14,96	14,97	14,98
Landesgerichtsstraße	26,67	26,68	26,68	26,70
Lange Gasse	26,93	26,90	26,87	26,89
Skodagasse	15,45	15,45	15,45	15,46
Brünnlbaggasse	3,77	3,77	3,77	3,78
Alser Straße	23,48	23,49	23,50	23,47
Palfygasse	20,08	20,06	20,07	20,06
Elterleinplatz	12,78	12,78	12,77	12,77
Rosensteingasse	24,14	24,14	24,14	24,13
Wattgasse	28,07	28,07	28,09	28,07
Hernals	33,10	33,10	33,09	33,04
Güpferlingstraße	20,14	20,14	20,16	20,13
Dornbacher Straße	14,67	14,69	14,69	14,70
Himmelmutterweg	9,02	9,03	9,03	9,03
Neuwaldegg	10,03	10,03	10,03	10,02

Tabelle 42: Mittelwert der Intervalle in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	239	234	228	219	200	169	172
0,1	236	232	226	218	199	169	172
0,2	204	200	195	190	176	168	172
0,3	198	195	191	183	171	169	173
0,4	201	197	193	189	184	175	174
0,5	207	206	205	203	200	194	179
0,6	218	218	217	215	214	210	198
0,7	228	227	226	225	223	221	214
0,8	234	233	232	231	230	228	223
0,9	237	236	236	234	233	231	227
1	240	238	236	235	233	231	225

Tabelle 43: Standardabweichung der Intervalle in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	647	581	512	431	306	85	69
0,1	609	558	498	424	303	82	69
0,2	362	320	274	242	160	72	69
0,3	323	288	245	188	102	71	71
0,4	326	289	250	209	162	96	74
0,5	367	338	306	270	226	172	91
0,6	425	393	357	319	280	234	162
0,7	463	433	399	359	318	278	218
0,8	477	449	417	381	341	297	245
0,9	470	444	414	380	344	303	252
1	419	404	383	354	319	280	221

Tabelle 44: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4513	4456	4386	4259	3908	3342	3469
0,1	4467	4424	4352	4229	3895	3338	3469
0,2	3965	3907	3835	3737	3468	3341	3475
0,3	3847	3817	3754	3633	3414	3387	3495
0,4	3927	3889	3843	3794	3714	3545	3544
0,5	4063	4071	4079	4071	4033	3943	3678
0,6	4282	4295	4295	4296	4292	4256	4063
0,7	4452	4466	4476	4473	4472	4465	4358
0,8	4568	4580	4586	4591	4591	4582	4519
0,9	4624	4639	4649	4654	4663	4653	4595
1	4673	4668	4667	4671	4669	4648	4566

Tabelle 45: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	534	519	502	513	564	184	78
0,1	533	518	513	530	563	171	78
0,2	459	448	434	455	383	119	76
0,3	421	401	365	316	172	89	77
0,4	406	378	346	315	276	159	83
0,5	444	424	400	371	339	290	143
0,6	478	456	434	404	372	338	304
0,7	481	461	439	415	383	348	343
0,8	459	440	419	395	375	338	322
0,9	435	411	390	367	344	321	301
1	468	426	391	365	343	317	289

Tabelle 46: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	407	473	538	590	565	406	552
0,1	426	486	541	583	562	404	553
0,2	407	450	487	510	431	416	561
0,3	434	479	513	520	458	466	582
0,4	482	528	569	607	631	592	627
0,5	525	580	638	693	743	776	722
0,6	572	627	682	739	796	850	869
0,7	609	660	715	771	829	888	934
0,8	650	696	745	799	856	915	970
0,9	688	732	779	832	887	944	999
1	764	795	833	880	930	981	1031

Tabelle 47: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 17 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	124	144	165	194	245	144	100
0,1	157	160	171	198	244	139	99
0,2	176	176	187	217	210	125	99
0,3	221	209	198	187	143	111	99
0,4	256	233	214	195	175	127	97
0,5	350	321	290	255	218	174	105
0,6	439	401	359	316	271	222	157
0,7	494	454	412	369	323	275	213
0,8	514	480	441	398	357	310	252
0,9	505	473	438	399	361	318	261
1	470	438	405	367	330	285	221

Tabelle 48: Mittelwert der Intervalle in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	257	253	247	241	230	208	181
0,1	253	250	245	239	230	207	181
0,2	221	218	214	209	203	189	181
0,3	213	212	209	203	196	184	183
0,4	217	214	211	207	204	199	190
0,5	223	222	221	220	219	215	210
0,6	235	235	234	233	232	230	227
0,7	246	245	245	244	242	241	239
0,8	252	252	251	251	249	248	247
0,9	255	255	255	254	253	252	251
1	259	257	256	255	255	253	252

Tabelle 49: Standardabweichung der Intervalle in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	694	639	570	502	418	284	73
0,1	652	605	552	494	416	276	70
0,2	394	358	317	274	246	165	73
0,3	350	322	286	240	184	97	73
0,4	356	322	289	250	211	166	102
0,5	398	368	340	310	273	230	181
0,6	459	427	396	362	325	288	243
0,7	498	470	440	406	367	328	289
0,8	513	486	458	426	390	352	312
0,9	499	478	453	422	390	355	318
1	447	432	415	396	371	337	305

Tabelle 50: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4531	4496	4424	4351	4206	3826	3349
0,1	4482	4445	4395	4331	4203	3795	3344
0,2	3990	3963	3906	3840	3744	3493	3370
0,3	3872	3862	3829	3752	3634	3422	3416
0,4	3969	3941	3913	3870	3827	3754	3594
0,5	4094	4100	4110	4117	4108	4074	3999
0,6	4316	4324	4337	4342	4344	4342	4310
0,7	4490	4504	4517	4527	4527	4528	4525
0,8	4606	4620	4633	4644	4648	4652	4654
0,9	4660	4678	4695	4706	4717	4724	4729
1	4725	4714	4720	4732	4742	4747	4744

Tabelle 51: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	530	517	505	492	509	539	120
0,1	534	521	508	501	507	537	99
0,2	465	447	441	430	451	382	115
0,3	425	412	389	352	301	153	89
0,4	420	397	372	343	309	272	170
0,5	461	441	421	398	367	332	288
0,6	496	474	451	429	397	364	332
0,7	496	479	459	434	411	377	340
0,8	471	455	439	417	396	376	336
0,9	452	430	411	388	367	347	320
1	479	441	410	381	358	337	312

Tabelle 52: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	405	473	537	599	642	583	418
0,1	427	486	544	598	643	570	415
0,2	411	459	499	535	551	459	439
0,3	441	489	531	556	555	472	490
0,4	494	541	586	625	661	681	636
0,5	538	592	647	704	759	807	841
0,6	589	643	699	755	811	869	921
0,7	632	681	735	791	847	905	963
0,8	678	723	771	823	878	935	994
0,9	723	765	810	860	913	968	1026
1	811	842	877	917	964	1015	1065

Tabelle 53: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 16 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	127	146	168	191	226	276	134
0,1	167	169	177	194	224	275	128
0,2	188	185	193	210	242	231	130
0,3	233	224	215	206	198	145	117
0,4	275	252	234	216	199	182	140
0,5	377	345	318	289	256	220	183
0,6	474	436	399	360	318	275	229
0,7	534	497	458	417	375	330	285
0,8	551	520	487	450	408	369	325
0,9	538	510	479	444	409	373	334
1	503	472	443	412	380	344	307

Tabelle 54: Mittelwert der Intervalle in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	277	273	269	263	256	247	222
0,1	273	270	266	261	255	246	222
0,2	238	236	232	228	224	215	202
0,3	231	229	227	223	219	212	200
0,4	235	234	231	227	225	221	217
0,5	240	240	239	239	238	236	234
0,6	254	254	253	253	252	251	250
0,7	266	265	265	264	264	263	261
0,8	273	273	273	272	272	271	270
0,9	277	277	276	276	276	275	274
1	282	281	279	278	278	278	277

Tabelle 55: Standardabweichung der Intervalle in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	748	693	633	570	502	422	282
0,1	699	656	609	557	497	418	280
0,2	424	391	356	315	276	235	158
0,3	376	349	323	286	243	193	106
0,4	387	360	328	292	258	221	178
0,5	425	400	373	345	316	282	243
0,6	494	464	436	405	372	338	302
0,7	535	509	481	450	418	381	343
0,8	550	527	502	472	440	406	370
0,9	532	515	494	467	438	406	374
1	479	470	455	438	414	392	363

Tabelle 56: Mittelwert der Umlaufzeiten in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	4553	4520	4470	4410	4333	4204	3803
0,1	4495	4473	4436	4385	4317	4192	3802
0,2	4001	3978	3948	3896	3836	3697	3477
0,3	3893	3880	3873	3831	3770	3680	3462
0,4	4007	3997	3978	3940	3914	3874	3808
0,5	4122	4129	4140	4149	4156	4154	4129
0,6	4350	4356	4370	4382	4390	4396	4397
0,7	4528	4541	4555	4567	4580	4583	4586
0,8	4645	4664	4681	4693	4704	4714	4721
0,9	4704	4723	4742	4758	4773	4784	4797
1	4777	4774	4778	4791	4808	4822	4832

Tabelle 57: Standardabweichung der Umlaufzeiten in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	526	516	503	484	475	486	522
0,1	532	521	505	495	485	487	521
0,2	461	451	438	426	422	429	355
0,3	424	418	406	379	343	300	168
0,4	435	416	396	370	342	311	273
0,5	475	457	440	419	396	366	329
0,6	519	498	477	454	430	399	363
0,7	518	501	482	463	440	416	382
0,8	490	476	462	445	428	405	388
0,9	470	451	433	417	398	378	361
1	481	453	427	404	382	361	341

Tabelle 58: Mittelwert der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	403	471	536	601	661	702	609
0,1	427	487	547	602	658	701	608
0,2	414	461	507	545	576	563	460
0,3	448	494	541	578	600	604	504
0,4	508	556	603	643	683	718	736
0,5	553	604	658	713	770	826	875
0,6	608	660	715	771	828	885	942
0,7	658	706	757	812	869	924	981
0,8	711	755	801	852	905	960	1016
0,9	767	805	848	894	946	999	1054
1	863	892	926	963	1009	1053	1104

Tabelle 59: Standardabweichung der einzuhaltenden Ausgleichszeiten in s bei 15 Fahrzeugen

α	β (in s)						
	120	135	150	165	180	195	210
0	130	150	172	193	218	252	307
0,1	178	177	184	198	219	252	305
0,2	201	198	201	213	235	264	240
0,3	245	237	232	224	220	214	162
0,4	296	274	254	236	224	210	196
0,5	399	372	345	318	292	262	231
0,6	511	474	440	404	366	327	286
0,7	576	541	505	466	428	387	343
0,8	593	565	535	501	465	427	389
0,9	578	552	525	494	461	427	394
1	539	515	488	461	431	401	368