

Bachelorarbeit

Anh Khang Martin Tieu

Fahrplananalyse für den Nahverkehr am Beispiel
der Simulation und Visualisierung einer Bahnlinie

Anh Khang Martin Tieu

Fahrplananalyse für den Nahverkehr am Beispiel der Simulation und Visualisierung einer Bahnlinie

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Bachelor of Science Angewandte Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Philipp Jenke
Zweitgutachter: Prof. Dr. Michael Köhler-Bußmeier

Eingereicht am: 23.11.2018

Anh Khang Martin Tieu

Thema der Arbeit

Fahrplananalyse für den Nahverkehr am Beispiel der Simulation und Visualisierung einer Bahnlinie

Stichworte

Bahn, U-Bahn, Analyse, Simulation, Visualisierung

Kurzzusammenfassung

Der Öffentliche Nahverkehr spielt insbesondere in der heutigen Gesellschaft eine große und bedeutende Rolle. Er soll eine kostengünstige und praktische Alternative zum eigenen Automobil bieten und ist, was vermehrend für viele immer wichtiger wird, zudem auch weitaus umweltbewusster. Die Fahrpläne sind dabei sowohl auf die Anforderungen der Passagiere sowie auf die der Verkehrsgesellschaft angepasst. Fahren in kleinen Dörfern die Busse zum Beispiel lediglich im 60-Minuten-Takt so fahren in Großstädten die Busse in einer weitaus frequenteren Taktung. Nun stellt sich die Frage nach welchen Kriterien diese Fahrpläne erstellt werden. Welche Anforderungen der Fahrgäste und der Verkehrsgesellschaft werden bei der Erstellung eines Fahrplanes mehr oder weniger berücksichtigt? Diese Frage soll mit Hilfe der Simulation einer U-Bahn und ihrer Fahrgäste mit Hilfe von crowd Simulation beantwortet werden.

Anh Khang Martin Tieu

Title of Thesis

Timetable analysis for local traffic using the example of simulation and visualization of a railway line

Keywords

Train, Metro, Analysis, Simulation, Visualization

Abstract

Public transport plays a major and important role in today's society. It offers a cost-effective and practical alternative to your own automobile and, what is increasingly important for many, is also far more environmentally conscious. The timetables are adapted to the needs of passengers as well as those of the transport industry. Driving in small villages, the buses, for example, only in 60-minute intervals drive in large cities, the buses in a much more frequent clocking. Now the question arises, according to which criteria these timetables are created. Which requirements of the passengers and the transport company are more or less taken into account in the preparation of a timetable? This question should be answered with the help of simulation of a subway and its passengers with the help of crowd simulation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Simulation von Menschenmengen (crowd simulation)	3
2.1.1 Menschen als Fluid	4
2.1.2 Menschen als Zellulärer Automat	5
2.1.3 Menschen als Partikel	5
3 Theoretische Grundlagen	7
3.1 Soziales Kräftemodell der Fußgängerdynamik	7
3.2 Soziales Kräftemodell der Fußgängerdynamik Physik	7
4 Simulation	10
4.1 Programmierung	10
4.1.1 Backend	11
4.1.2 Minimap	12
4.1.3 3D-Visualisierung	13
4.2 Modellierung	14
4.2.1 U-Bahn	14
4.2.2 Station	15
4.2.3 Fußgänger	18
4.3 Vereinfachungen	18
4.4 Im- und Export	19

5	Evaluation	21
5.1	Erwartung	21
5.1.1	Wartezeit	21
5.1.2	Laufstrecke	21
5.1.3	Fahrzeit	22
5.1.4	Simulation von Menschenmengen	22
5.2	Ergebnisse	23
5.2.1	Fahrplan	23
5.2.2	Fahrzeit	25
5.2.3	Wartezeit	26
5.2.4	Laufstrecke	27
5.2.5	Fahrgäste	29
5.2.6	Stationen	30
5.2.7	Simulation von Menschenmengen	32
6	Zusammenfassung	35
6.1	Diskussion	35
6.2	Fazit	36
A	Anhang	41
	Selbstständigkeitserklärung	42

Abbildungsverzeichnis

4.1	UML der Simulation	11
4.2	Minimap der U-Bahn Linie 'U3'	13
4.3	3D-Visualisierung der U-Bahn Linie 'U3'	14
4.4	Beispiel für die Fußgängerverteilung von Google Maps an der Station Barmbek	16
4.5	Fußgängerverteilung für eine Station der Klassifizierung 'Normal' und 'Tag'	17
4.6	Fußgängerverteilung für eine Station der Klassifizierung 'Nacht' und 'Trans- fer'	17
5.1	Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit zur erwarteten Fahrzeit	25
5.2	Vergleich der durchschnittlichen Wartezeit zur erwarteten Wartezeit	26
5.3	Vergleich der durchschnittlichen Laufstrecke zur erwarteten Laufstrecke	27
5.4	Vergleich der Anzahl Fahrgäste an den Stationen zur erwarteten Anzahl	29
5.5	Fahrgastverteilung über den Tag an der Station Barmbek	30
5.6	Fahrgastverteilung an der Station Dehnhaide	31
5.7	Test der Simulation der Menschenmengen. Ein 'Ausweichmanöver' eines Fahrgastes wird dargestellt	32

Tabellenverzeichnis

5.1	Vergleich der Differenzen der Ankunftszeit nur nächsten Station	24
5.2	Berechnung der Antiproportionalität	28
5.3	Vergleich der Messwerte um vier Uhr mit und ohne crowd simulation . . .	32
5.4	Vergleich der Messwerte um 0 Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen	33
5.5	Vergleich der Messwerte um zwölf Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen	33
5.6	Vergleich der Messwerte um neun Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen	34

1 Einleitung

In der modernen Gesellschaft spielt der Öffentliche Nahverkehr eine sehr wichtige Rolle. Allein im Jahr 2017 nutzten rund 10,3 Milliarden Fahrgäste in Deutschland den Öffentlichen Nahverkehr. Damit ersetzen Busse und Bahnen jeden Tag rund 20 Millionen Autofahrten auf deutschen Straßen. Doch wie werden Fahrpläne für Busse und Bahnen erstellt? Ist die Erstellung nur einer gewissen Willkür ausgesetzt oder steckt ein geplantes System dahinter? Welche Auswirkung hat ein Fahrplan auf den Fahrgast?

In der folgenden Arbeit soll diese Frage beantwortet werden. Dabei wird der Fahrplan einer Nahverkehrslinie betrachtet und analysiert. Um diese Frage möglichst akkurat beantworten zu können, wird eine Simulation, bestehend aus zwei Teilsimulationen, erstellt. Zum einen wird dabei 'crowd simulation', also die Simulation von Menschenmengen genutzt, um die Fahrgäste zu simulieren und zum anderen eine Simulation von Bahnen. Es werden dabei von den simulierten Fahrgästen Daten ermittelt, welche einen Einblick darüber geben, wie der Fahrplan und andere Fahrgäste sich auf bestimmte Aspekte des Zeitmanagements des Fahrgastes auswirken. Mit Hilfe solch einer Analyse kann der Fahrplan nämlich angepasst und im Idealfall optimiert werden. Dieses würde zum einen für den Fahrgast ein optimiertes Fahrerlebnis, sei es durch kürzere Wartezeiten oder leerere Busse und zum anderen für die Fahrgesellschaft eine mögliche Einsparung von Kosten bedeuten.

Zudem wird analysiert, wie sehr sich die Simulation der Menschenmengen auf die Ergebnisse auswirkt. Dabei wird es interessant sein zu beobachten, inwiefern die Simulation der Menschenmengen zur Authentizität der Simulation beiträgt.

Zuerst wird dazu betrachtet, welche Arbeit auf dem Gebiet der Simulation der Menschenmengen gemacht wurde. Es wird dann beschrieben, wie eine Simulation der Menschenmengen funktioniert und auf welchen physikalischen Begebenheiten diese beruht. Im Anschluss wird der Aufbau der Simulation und die Modellierung ihrer einzelnen Bestandteile beschrieben. Danach werden die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse

1 Einleitung

dargestellt und gedeutet. Schlussendlich werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und es wird ein Ausblick darüber gegeben, wie weiter verfahren werden kann.

2 Stand der Technik

2.1 Simulation von Menschenmengen (crowd simulation)

'Crowd simulation' (dt. Simulation von Menschenmengen) beschreibt die Simulation einer Menschenmenge. Dabei wird als eine 'crowd' (dt.: Menschenmenge) eine Menge von Menschen bezeichnet, die sich auf einer gemeinsamen Fläche befinden und einen unterschiedlichen Grad an Interaktionen zueinander haben.

Es gibt viele unterschiedliche Anwendungsgebiete für die Simulation von Menschenmengen, darunter unter anderem:

Evakuierung - Die Simulation von Menschenmengen wurde erfolgreich zur Modellierung des Menschenflusses bei einer Notsituation, zum Beispiel beim Brand eines Gebäudes, genutzt.

Architektur - Die Alltagstauglichkeit eines Gebäudes kann mit Hilfe der Simulation von Menschenmengen getestet werden.

Stadtmodellierung - die Simulation von Menschenmengen kann bei der Planung von neuen Städten/ Straßen hilfreich sein, um deren Auslastung korrekt einschätzen zu können.

Unterhaltung - In Computerspielen sowie in Filmen wird die Simulation von Menschenmengen genutzt um ein verstärktes Gefühl von Realismus in Menschenmengen wiedergeben zu können.

Die Ansätze, um die Simulation von Menschenmengen zu modellieren, lassen sich grob in drei Subkategorien einordnen.

Fluid - Es ist zu beobachten, dass die Bewegung einer Menschenmenge auf einem makroskopischen Level der Bewegung eines Fluides sehr ähnlich ist. Mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik wurden erfolgreich Menschenmengen simuliert.

Zellulärer Automat - Diskrete, dynamische Systeme, die ein Netz von Zellen und ihren unmittelbaren Zustand zu ihren umgebenden Zellen beschreibt.

Partikel - Auch bekannt als atomarer oder partikel-basiereter Ansatz. Jeder Mensch in der Menschenmenge wird als individuelle Einheit betrachtet und die Interaktion zwischen ihr und anderen Menschen wird individuell nach den physikalischen oder sozialen Gesetzen modelliert.

Die Simulation von Menschenmengen kann sowohl auf makroskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene betrachtet werden. Auf makroskopischer Ebene sind wir an der realistischen Bewegung der gesamten Menschenmenge interessiert. Dabei spielt die Bewegung individueller Menschen keine Rolle. Betrachten wir jedoch die Simulation von Menschenmengen auf einer mikroskopischen Ebene, sind wir an der Bewegung individueller Menschen interessiert und wollen diese beobachten können.

Je nach Anwendungsgebiet ist die Beobachtung der Menschenmenge auf einem mikroskopischen Level mehr oder weniger interessant. Da hier in der Arbeit der Fahrplan einer Nahverkehrslinie analysiert werden soll, und die Beobachtung des einzelnen Menschen ausschlaggebend für die Analyse ist, ist realistisches Verhalten der Menschen auf einer mikroskopischen Ebene eine Voraussetzung.

Bei der Betrachtung der Ansätze stellt sich heraus, dass Fluid basierte Ansätze am besten für die Arbeit auf makroskopischem Level funktionieren. Von den anderen zwei Ansätzen ist der Partikel-Ansatz der populärere weshalb es zu diesem Ansatz auch die meiste Forschung gibt.

2.1.1 Menschen als Fluid

Henderson demonstrierte 1971, dass es möglich war, den Fußgängerfluss mit Hilfe der Navier-Stokes Gleichungen zu modellieren. Diese Gleichungen beschreiben die Bewegung eines nicht turbulenten Newtonschen Fluid [8].

Auf Hendersons Arbeit aufbauend beschrieb Dirk Helbing 2001 seine Beobachtung über die Ähnlichkeit von mittel bis sehr vollen Fußgängergruppen und der Bewegung von Fluiden und Gasen. Vergleiche zwischen dem Fußgängerfluss und granulatem Fluss (zum Beispiel Sand durch eine Sanduhr) wurden auch gemacht [7].

Hughes Arbeit aus 2003 ist ein weiteres Beispiel für die Modellierung des Menschenmengenflusses nach Fluidgleichungen. In der Arbeit werden die Menschenmengen als 'denkende' Fluide beschrieben. Die Arbeit wird genutzt, um vielfältige Szenarien wie die Schlacht um Agincourt oder den jährlichen muslimischen Haddsch zu simulieren [9].

2.1.2 Menschen als Zellulärer Automat

Zelluläre Automaten sind diskrete dynamische Systeme, deren Verhalten durch lokale Interaktionen charakterisiert ist. Ein Zellulärer Automat besteht aus einem gleichmäßigen Gitter von Zellen, von dem jede Zelle eine endliche Zahl an Zuständen haben kann. In der traditionellen Definition von Zellulären Automaten wird in jedem Zeitschritt der Zustand der Zelle nach den Regeln der benachbarten Zellen neu berechnet. Das berühmteste Beispiel dafür ist John Conways 'Game of Life', bei dem komplexe, organisch ähnliche Wachstumsmuster durch die Anwendung von sehr einfachen Regeln beobachtet werden können [4].

Erweiterungen zu dem Konzept des Zellulären Automaten ermöglichen es, dass nicht nur Nachbarszellen, sondern auch weiter entfernte Zellen seinen Zustand beeinflussen können. Anfänglich wurden diese Ideen für den Verkehrsfluss und später auf komplexere Probleme, wie das Modellieren von Fußgängern angewendet. Blue und Adler und Dijkstra et al. haben sich mit dem Modellieren von Menschenmengen mit Hilfe von Zellulärer Automaten beschäftigt [1][3].

2.1.3 Menschen als Partikel

Craig Reynolds arbeitete in 1987 an der Simulation von Vogelschwärmen, Herden von Landtieren und Fischeschwärmen. Dabei wurde jedes Partikel oder Boid, wie er es nannte, als ein individueller Agent implementiert. Dieser handelte dann nach seiner eigenen Wahrnehmung von seiner Umgebung, den simulierten Gesetzen der Physik und einem einfachen Satz an Verhaltensmustern. 1999 erweiterte er sein Konzept auf das Konzept des 'autonomen Charakters', mit dem Schwerpunkt auf Spielen und Animationen [10][11].

Bouvier et al. beschreiben 1997 ein allgemeines Partikelsystem, welches sowohl Anwendung in der Simulation von Menschenmengen als auch in der Simulation beim Einsatz eines Airbags findet [2].

Helbing und Molar stellten 1998 das 'social force model for pedestrian dynamics' vor [5]. Die Bewegung eines Menschen kann mit Hilfe von sozialen Kräften, welche intern die Motivation für individuelle Bewegungen und Aktionen darstellen, beschrieben werden. Mit Hilfe dieser drei Kräfte lässt sich eine Gleichung für die 'Gesamtmotivation' erstellen. Da diese 'Gesamtmotivation' an Verhaltensänderungen gekoppelt ist, wird hier vom 'social force model' gesprochen. Helbing et al. haben im Jahr 2000 dieses 'social force model' bei der Simulation von einer Notsituation, dem Fliehen aus einem Gebäude, mit beeindruckenden Resultaten angewendet [6].

Thalman et al. modellierten 1999 virtuelle Menschen anhand ihrer Wahrnehmungen, Emotionen und ihres Verhaltens. In jedem Zeitschritt wird die Wahrnehmung des Menschen angepasst, welche Auswirkung auf die Emotionen und folglich auf das Verhalten hat. Auf der Arbeit aufbauend haben Ulicny und Thalman 2001 ein System von Regeln beschrieben, welche deren Antworten auf bestimmte Situationen bestimmen [13][14].

Sung et al. definierten 2004 ein probabilistisches Modell für Fußgänger, welches Bewegung von einem Zustand in den nächsten erlaubt. Es funktioniert dabei ähnlich wie in einem endlichen Automaten, jedoch verlaufen die Berechnungen in Echtzeit [12].

3 Theoretische Grundlagen

Die Simulation von Menschenmengen wird mit Hilfe des 'social force model for pedestrian dynamics' [5] simuliert. Dieses hat bereits in vergangenen Arbeiten beeindruckende, realitätsnahe Resultate gezeigt und wird deshalb auch in dieser Arbeit verwendet.

3.1 Soziales Kräftemodell der Fußgängerdynamik

Fußgänger sind 'sozialen Kräften' ausgesetzt. Diese 'Kräfte' werden nicht direkt von der Umgebung des Fußgängers ausgeübt, sondern sind ein Maß für die inneren Beweggründe eines Individuums, bestimmte Handlungen (Bewegungen) durchzuführen. Diese Beweggründe lassen sich in drei essentielle Teile aufteilen

Acceleration - Die Geschwindigkeit eines Fußgänger verändert sich im Laufe der Zeit, während er versucht seine optimale Geschwindigkeit zu erreichen.

Repulsion - Auf jeden Fußgänger wirkt eine abstoßende Kraft von anderen Fußgängern und Hindernissen.

Attraction - Fußgänger werden manchmal von anderen Fußgängern oder Objekten angezogen.

In der folgenden Arbeit wird der Begriff 'Fußgänger', austauschbar mit dem Begriff 'Fahrgast', welcher ein bestimmter Typ von Fußgänger ist, genutzt.

3.2 Soziales Kräftemodell der Fußgängerdynamik Physik

In diesem Ansatz werden Fahrgäste als Partikel betrachtet. Nach Newtons zweitem Gesetz lässt sich die Kraft, die auf solch ein Partikel wirkt, wie folgt darstellen:

$$\vec{F}_{total} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3.1)$$

Die Kraft \vec{F}_{total} , die auf einen Fußgänger wirkt, lässt sich in vier unterschiedliche Kräfte aufteilen: Die Beschleunigungskraft, die Abstoßungskraft und die Anziehungskraft. Dabei wirkt die Abstoßungskraft sowohl von anderen Fußgängern als auch von Hindernissen.

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{acceleration} + \vec{F}_{repulsion} + \vec{F}_{obstacle} + \vec{F}_{attraction} \quad (3.2)$$

Als Beschleunigungskraft wird die Anziehungskraft definiert, die das Ziel eines Fußgängers, auf diesen Fußgänger wirkt. Dabei wird sie wie in Formel 2.3 dargestellt:

$$\vec{F}_{acceleration} = \frac{1}{t_{relax}} (v_{desired} \cdot \vec{z}_E - \vec{v}_{current}) \cdot m \quad (3.3)$$

Dabei ist $v_{desired}$ die vom Fußgänger erwünschte Geschwindigkeit, $\vec{v}_{current}$ der Vektor seiner jetzigen Geschwindigkeit, \vec{z}_E der Einheitsvektor der vom Fußgänger auf sein Ziel zeigt, t_{relax} die Relaxionszeit des Fußgängers und m die Masse des Fußgängers.

Die Abstoßungskraft $\vec{F}_{repulsion}$ stellt die Kraft da, welche die Fußgänger gegenseitig auf sich wirken lassen. Fußgänger versuchen beim Erreichen ihres Zieles nicht in andere Fußgänger hineinzulaufen. Diese Kraft ist wie folgt dargestellt:

$$\vec{F}_{repulsion} = \begin{cases} A \cdot e^{\frac{r-d}{B}} \cdot \vec{d}_E, & \text{if } d < r_{repulsion} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dabei sind A, B, r Konstanten, d der Abstand der zwei Fußgänger, \vec{d}_E der Einheitsvektor zwischen den zwei Fußgängern und $r_{repulsion}$ der Abstoßungsradius. In dieser Arbeit wird $r_{repulsion}$ eine Konstante sein, die für alle Passagiere gleichermaßen gilt. Die Abstoßungskraft $\vec{F}_{repulsion}$ wirkt zudem nur, wenn man sich innerhalb des Abstoßungsradius $r_{repulsion}$ befindet. Befindet man sich außerhalb dieses Radius, wirkt sich keine Kraft aufeinander aus.

Eine weitere Kraft, welche auf die Fußgänger wirkt, ist die Abstoßungskraft von Hindernissen $\vec{F}_{obstacle}$. Sie beschreibt die Abstoßungskraft, die Hindernisse, wie zum Beispiel

Mauern oder Mülleimer auf einen Fußgänger haben. Diese Kraft wird durch folgende Gleichung dargestellt:

$$\vec{F}_{obstacle} = \begin{cases} A_{obstacle} \cdot \left(1 - \frac{r_{obstacle}}{d}\right) \cdot \vec{d}_E, & \text{if } d \leq r_{obstacle} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.5)$$

$A_{obstacle}$ ist dabei eine Konstante, welche bestimmt, wie groß die von dem Hindernis ausgehende Kraft ist, $r_{obstacle}$ ist die Länge, bei der die Abstoßungskraft des Hindernisses wirkt, \vec{d}_E ist der Einheitsvektor vom Fußgänger zum Hindernis und d der Abstand von dem Fußgänger zum Hindernis. Die Abstoßungskraft betrifft lediglich Fußgänger, welche sich innerhalb der Länge $r_{obstacle}$ zur Mauer befinden. Ist die Entfernung zum Hindernis null, so ist die vom Hindernis ausgehende Kraft unendlich, da man sich nicht innerhalb eines Hindernisses befinden kann.

Straßenkünstler, Freunde oder Werbeplakate werden durch die Kraft $\vec{F}_{attraction}$ dargestellt. Diese wird aber in der folgenden Arbeit vernachlässigt:

$$\vec{F}_{attraction} = 0 \quad (3.6)$$

Schlussendlich lässt sich die Beschleunigung des Fußgängers durch Newtons 2. Gesetz errechnen.

$$\frac{\vec{F}_{total}}{m_{ped}} = \vec{a}_{total} \quad (3.7)$$

Dabei beschreibt \vec{F}_{total} die gesamte, auf den Fußgänger wirkende Kraft, m_{ped} die Masse des Fußgängers und \vec{a}_{total} die gesamte Beschleunigung.

4 Simulation

Um Fahrpläne einer Nahverkehrslinie mit Hilfe der Simulation von Menschenmengen analysieren zu können wird ein Simulationsprogramm entwickelt. Es soll in dem Programm eine U-Bahn Linie mit ihren Fahrgästen zum einen simuliert und zum anderen visualisiert werden.

4.1 Programmierung

Das Programm wird aus drei Teilen bestehen:

1. Das Backend, welches die U-Bahn Linie und ihre Passagiere simuliert.
2. Eine Minimap, welches die Simulation zweidimensional darstellt
3. Eine dreidimensionale Darstellung der Simulation

Das Backend wird mit Hilfe der Programmiersprache Java 8 geschrieben. Dieses geschieht in der IntelliJ Entwicklungsumgebung. Zur Versionskontrolle und für das Build Management werden Git und Maven respektiv genutzt. Die Minimap wird mit der JPanel Bibliothek in Java erstellt. Zur Erstellung der dreidimensionalen Darstellung wird die JMonkey Bibliothek zu Hilfe gezogen.

Das Programm soll eine U-Bahn Linie einlesen können und daraus folgend eine Simulation von der U-Bahn Linie und ihre Visualisierung liefern. Zuletzt werden dann Messdaten exportiert die dann analysiert werden können.

4.1.1 Backend

Die Simulation wurde mit Hilfe der Programmiersprache Java 8 und der in Abbildung 4.1 dargestellte UML Diagramm entwickelt. Die Simulation der U-Bahn wird mit Hilfe der Klassen Train, Wagon, Station, Line und Track umgesetzt.

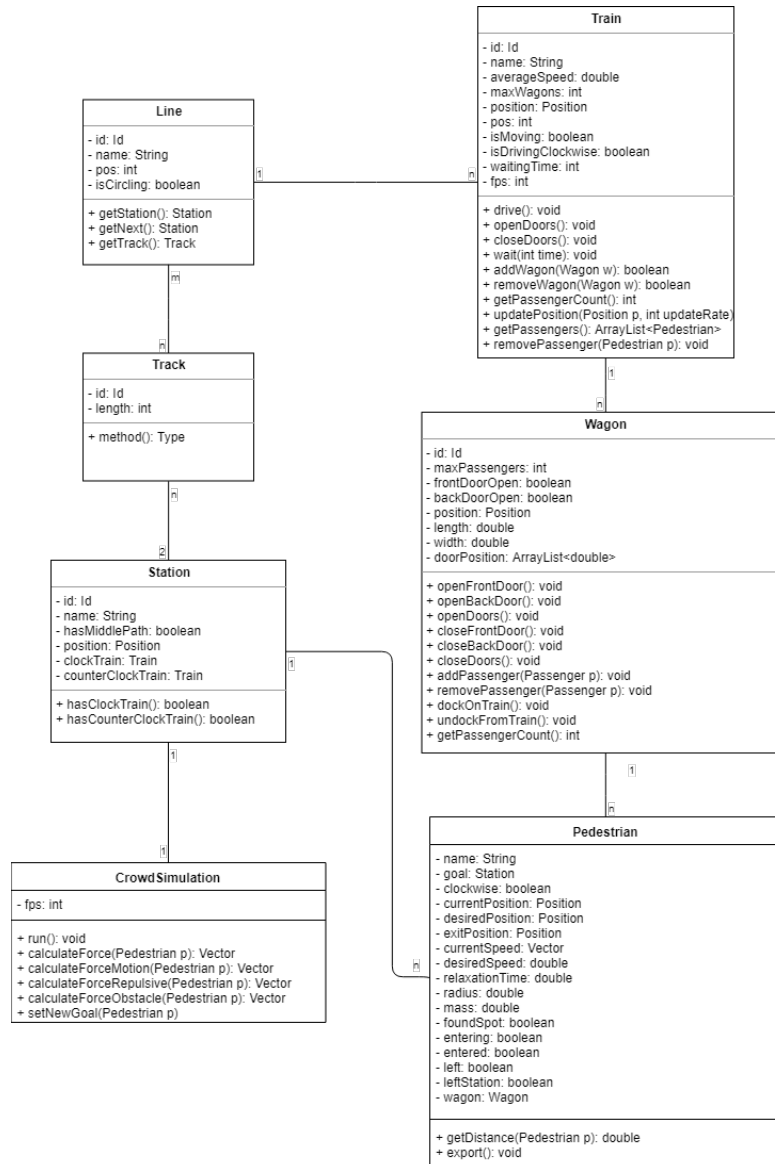


Abbildung 4.1: UML der Simulation

Zur Darstellung der Simulation der Menschenmengen dienen hingegen die Klassen Crowd-

Simulation und Pedestrian. Jeder Fahrgast wird dabei durch eine Instanz der Klasse Pedestrian dargestellt, dessen Attribute die Eigenschaften wie jetzige und gewünschte Geschwindigkeit und seine Intentionen darstellt. Die Klasse CrowdSimulation simuliert mit Hilfe der in Kapitel 3.2 vorgestellten Formeln die auf die Fahrgast wirkenden Kräfte. Jede Station hat dabei genau ein Objekt der Klasse CrowdSimulation, wodurch die Stationen als geschlossenes System betrachtet werden und nur eine Kraft von einem Objekt auf den Fußgänger wirken kann, wenn sich diese auch in der gleichen Station befindet.

4.1.2 Minimap

Die Minimap (miniature map) bietet eine einfache Visualisierung im zweidimensionalen Bereich, um die Simulation darzustellen. Sie wurde mit Hilfe der JPanel Bibliothek erstellt und nutzt sowohl den MouseWheelListener, MouseListener und MouseMotionListener um mit ihr zu interagieren. Sie nutzt für die Darstellung die Daten aus dem Backend. Auf ihr sind alle relevanten Information dargestellt.

- Fahrgäste - Als schwarze Punkte.
- Züge - Jeder Wagon wird als roter Punkt dargestellt.
- Bahnsteige - Werden durch grüne Rechtecke abgegrenzt.
- Gleise - Werden durch schwarze Linien visualisiert.

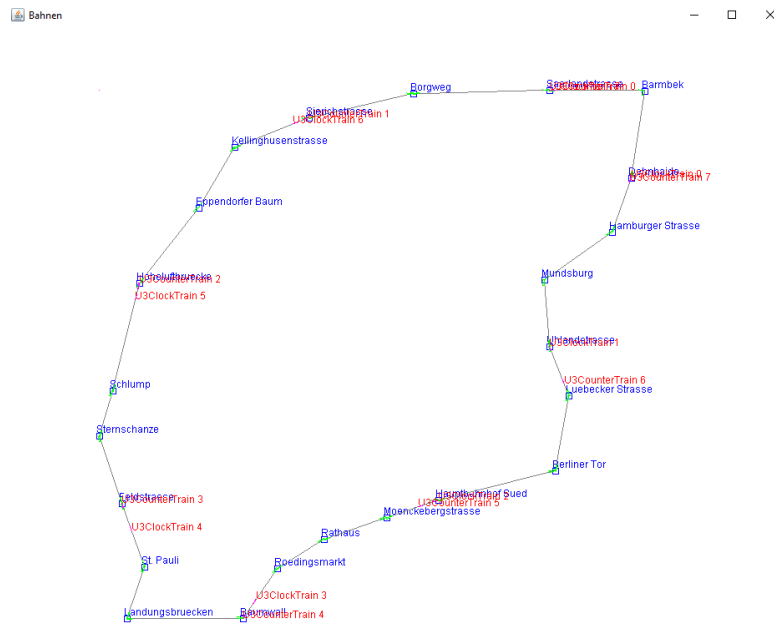


Abbildung 4.2: Minimap der U-Bahn Linie 'U3'

4.1.3 3D-Visualisierung

Die dreidimensionale Visualisierung wird durch die JMonkey Bibliothek dargestellt. Hier werden, wie bei der Minimap, die Daten aus dem Backend genommen, um sie dann graphisch darzustellen. Es wurden für die Objekte nur Dummy-Darstellungen gewählt: Diese Dummy Darstellungen können durch detailgenauere Modelle ersetzt werden.

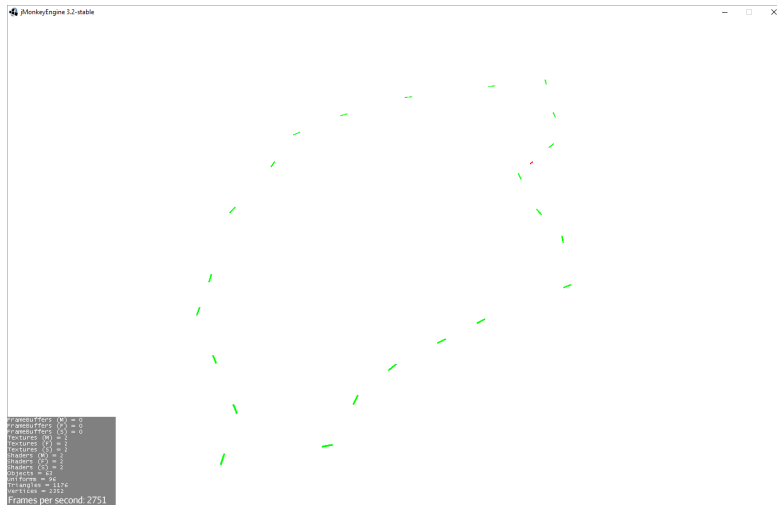


Abbildung 4.3: 3D-Visualisierung der U-Bahn Linie 'U3'

4.2 Modellierung

4.2.1 U-Bahn

Die U-Bahn ist nach dem Hamburger U-Bahn-Modell der DT5 modelliert. Sie fährt autonom ihre Linie mit einer konstanten Geschwindigkeit, die durch den Fahrplan und eigenen Messungen ermittelt wurden, ab.

$$v_{avg} = \frac{s(t_{total})}{t_{total} - t_{wait}} \quad (4.1)$$

v_{avg} ist dabei die durchschnittliche Geschwindigkeit, welche die U-Bahn fährt. Sie errechnet sich aus dem Quotienten der gesamten zurückgelegten Strecke $s(t_{total})$ und der Gesamtfahrzeit t_{total} minus der Wartezeit an den Stationen t_{wait} .

Die Zeit, welche die U-Bahn an den Stationen hält, ist für alle Stationen konstant und wurde ebenfalls durch Messungen ermittelt.

$$t_{station} = \frac{t_{wait}}{n_{station}} \quad (4.2)$$

$t_{station}$ ist dabei die durchschnittliche Wartezeit an einer Station. Sie errechnet sich aus dem Quotienten der Gesamtwartezeit t_{wait} und der Anzahl der Stationen $n_{station}$.

4.2.2 Station

Stationen sind auch nach den Hamburger U3 Stationen modelliert. Die Länge der Stationen ist durch die Länge des Zuges gegeben. Beobachtungen haben ergeben, dass U3-Stationen von ihren Ausmaßen unterschiedlich sind, weshalb bei der Breite der Station ein Schätzwert von 8 Metern genutzt wird. Der Fußgängerzustrom, der an einer Station erfolgt, wird zum einen durch den aus den offiziellen Angaben des HVV gegebenen Werten für die Passagieranzahl pro Tag pro Station sowie aus den 'popular times', dargestellt in Abbildung 4.4, von Google Maps ermittelt.

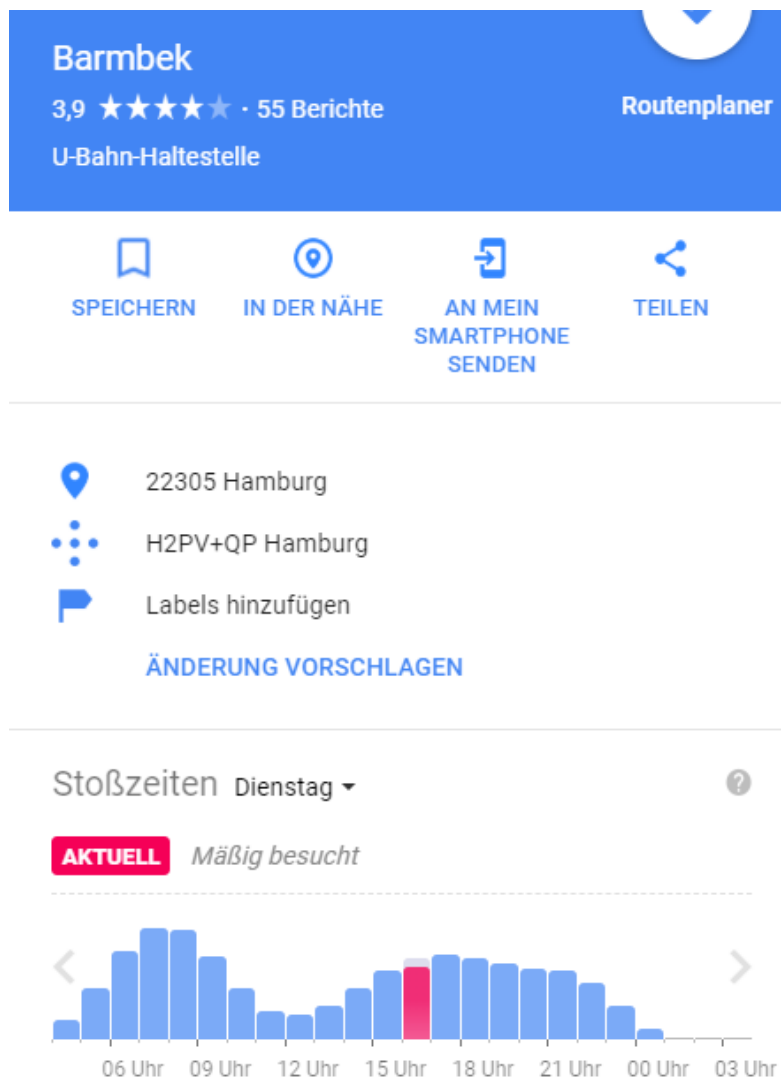


Abbildung 4.4: Beispiel für die Fußgängerverteilung von Google Maps an der Station Barmbek

Über die Google Places API lässt sich durch die Daten von 'popular times' der Fußgängerzustrom pro Stunde für jede Station ermitteln. Da diese Information nicht für jede Station verfügbar ist, werden die U-Bahn-Stationen mit Hilfe der vorhandenen Daten in vier unterschiedliche Typen klassifiziert.

- Normal - Eine normale Station. Die Station ist in einem Wohn- oder Arbeitsgebiet.
- Transfer - Eine Umsteigestation. Auf der Station fahren mindestens zwei Linien.

- Tag - Eine Station, die in einem Attraktionsgebiet liegt.
- Nacht - Eine Station, die an einem Nachtattraktionsgebiet liegt.

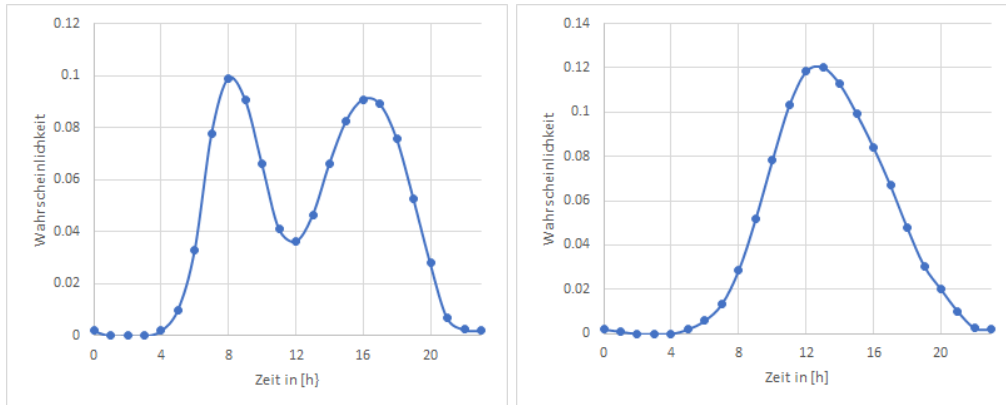


Abbildung 4.5: Fußgängerverteilung für eine Station der Klassifizierung 'Normal' und 'Tag'

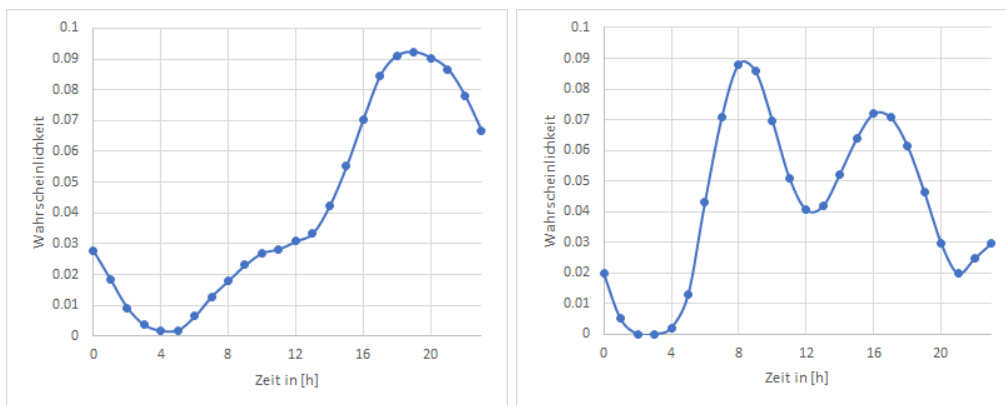


Abbildung 4.6: Fußgängerverteilung für eine Station der Klassifizierung 'Nacht' und 'Transfer'

In Abbildung 4.5 und 4.6 sind die Fahrgastverteilungen für die vier unterschiedlichen Klassifikationen der Stationen abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeit angegeben. Diese Fahrgastverteilungen wurden mit Hilfe der aus Google Maps 'popular times' exportierten Daten modelliert.

Mit Hilfe dieser Daten lässt sich nun der Fahrgaststrom an einer Station zu jeder Stunde ermitteln. Innerhalb dieser Stunde sind die Fahrgäste homogen verteilt.

4.2.3 Fußgänger

Fahrgäste sind anhand ihrer Eigenschaften nicht voneinander zu unterscheiden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrgäste eine Station als Start oder Ziel festlegt, hängt von dem Fahrgaststrom der Station ab.

$$p_n = \frac{F_n}{F_{total}} \quad (4.3)$$

Dabei beschreibt p_n die Wahrscheinlichkeit, die Station n als Start oder Ziel auszuwählen, F_n den Fahrgaststrom für die Station n und F_{total} den summierten Fahrgaststrom für alle Stationen. Start und Ziel müssen nicht identisch sein. Fahrgäste betreten eine Station an einer der zwei Ein- und Ausgänge. Sie betreten dabei die Station in der der Zug fährt, welcher die geringste Anzahl von Station abfahren muss, um sein Ziel zu erreichen. Sie suchen sich dann zufällig einen Platz auf der Station aus und versuchen diesen zu erreichen. Ist die Position erreicht, fangen sie an, auf den Zug zu warten. Sobald ein Zug in der Station hält, versuchen die Fahrgäste, den Zug zu betreten, unabhängig davon ob sie ihre Zielposition erreicht haben oder nicht. Sie suchen sich beim Einsteigen des Zuges immer die Tür aus, die am nächsten zu ihnen ist. Im Zug angekommen, warten die Fahrgäste darauf, dass der Zug ihre Zielstation erreicht. Hat der Zug die vom Fahrgast erstrebte Zielstation erreicht, steigt dieser aus dem Zug aus und versucht, die Station über eine der zwei Ausgänge zu verlassen.

4.3 Vereinfachungen

Eine Simulation ist eine vereinfachte Abbildung der Realität. Da eine vollständige Simulation aufgrund des Zeitlichen-, Programmier- und Rechenaufwandes unrealistisch ist werden einige Vereinfachungen vorgenommen.

- Beschleunigung der U-Bahn - Auf eine Simulierung der Beschleunigung der U-Bahn wurde verzichtet. Stattdessen wird für die Bahn eine Durchschnittsgeschwindigkeit ermittelt die sich anhand der Fahrtdauer und -strecke berechnen lässt. Diese Vereinfachung wird zu keiner bemerkenswerten Änderung führen da die Fahrtzeit durch die errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen den Stationen gleich bleibt. Ein Wagon wird als geschlossenes System dargestellt, weshalb die Beschleunigung der U-Bahn für die Fahrgäste zu vernachlässigen ist.

- Gleise zwischen den Stationen - Gleise haben in der Realität Krümmungen und sind daher nie komplett gerade. Die Simulation geht von komplett geraden Gleisen aus. Dieses würde zu einer kürzeren Fahrzeit führen, da eine Gerade immer der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ist. Dem wird mit der Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit entgegengewirkt.
- Bahnsteige sind in deren Fahrtrichtung aufgeteilt - Da Gleise komplett gerade verlaufen, wird es ein Problem bei der Darstellung und der Simulation der Stationen geben. Daher werden die Bahnsteige in jeweils ihre Fahrrichtungen aufgeteilt.
- Höhenunterschiede auf den Gleisen - U-Bahn Strecken sind teilweise nicht komplett eben, was zu Höhenunterschieden auf dem Gleis und folglich zu einem längeren Gleis führt. Diese Unterschiede sind jedoch so gering, dass diese vernachlässigt werden können.
- Der angegebene Fahrgaststrom an den Stationen bezieht sich auf Fahrgäste, die die Station betreten und verlassen. Da zwischen den Fahrgästen, die die Station betreten und verlassen nicht differenziert wird, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die eine Hälfte des Fahrgaststromes die Station betritt und die andere Hälfte die Station verlässt.

4.4 Im- und Export

U-Bahn Linien werden mit Hilfe einer .csv Datei importiert. Dabei geben die ersten zwei Zeilen den Namen der Linie an sowie ob die Linie eine Kreislinie ist.

```
Liniename  
Kreislinie(true/false)
```

Daraufhin beschreibt jede weitere Zeile eine Station. Dabei wird eine Station wie folgt beschrieben:

```
Stationsname;Längengrad;Breitengrad;Passagiere/Tag;Klassifizierung
```

Stationen vor und nach einer Station sind mit dieser verbunden. Ist eine Station eine Kreislinie, ist die erste Station mit der letzten verbunden.

Exportiert werden von den Fußgängern verzeichnete Daten.

- Start - Startstation des Fahrgastes.
- Ziel - Zielstation des Fahrgastes.
- Wartezeit - Zeit, die ein Fahrgast auf den Zug wartet.
- Fahrzeit - Zeit, die ein ein Fahrgast im Zug verbringt.
- Aussteigezeit - Zeit, die ein Fahrgast benötigt um die Station, nach verlassen des Zuges, zu verlassen.
- Fahrgäste Start - Anzahl der Gesamtfahrgäste die sich, beim Betreten der Station, in der Station befinden.
- Fahrgäste Ziel - Anzahl der Gesamtfahrgäste die sich, beim Verlassen der Station, in der Station befinden.
- Strecke - Die vom Fahrgast zu Fuß zurückgelegte Strecke.

5 Evaluation

5.1 Erwartung

Die Simulation wird für einen Tag durchgeführt und die in Kapitel 4.4 genannten Daten werden erhoben.

5.1.1 Wartezeit

Bei der durchschnittlichen Wartezeit wird folgender Wert erwartet

$$t_{wait,avg} = \frac{t_{next} - t_{wait}}{2} \quad (5.1)$$

Dabei ist die durchschnittliche Wartezeit $t_{wait,avg}$, t_{next} die Zeit zwei zwischen aufeinander folgender Züge in einem Bahnhof und t_{wait} die Wartezeit eines Zuges. Dieser Wert wird anhand der homogenen Verteilung der Fahrgäste über die Zeit erwartet.

5.1.2 Laufstrecke

Die durchschnittliche zurückgelegte Strecke wird im Idealfall

$$s_{avg} = \sqrt{l^2 + w^2} + \frac{w}{2} \quad (5.2)$$

sein. Dabei ist s_{avg} die durchschnittlich zurückgelegte Strecke und l und w die effektive Länge und Breite der Station auf der sich die Fahrgäste befinden können. Da aus der Simulation der Menschenmengen folgt, dass Fahrgäste anderen Fahrgästen ausweichen, wird hier ein höherer Wert erwartet.

5.1.3 Fahrzeit

Die durchschnittliche Fahrzeit lässt sich aufgrund der ungleichen Verteilung der Fahrgäste auf die Stationen schwer einschätzen. Geht man davon aus, dass die Fahrgäste auf den Stationen gleichmäßig verteilt werden, so ist sie:

$$t_{drive,avg} = \frac{t_{all}}{4} \quad (5.3)$$

Dabei ist $t_{drive,avg}$ die durchschnittliche Fahrzeit und t_{all} die Zeit, um alle Stationen in der Linie einmal abzufahren. Da man in beide Richtungen fahren kann, wird t_{all} durch 2, und dann nochmal durch 2 für den Mittelwert geteilt.

5.1.4 Simulation von Menschenmengen

Es wird verglichen, wie sich die Simulation von Menschenmengen auf die von den Fahrgästen aufgezeichneten Daten auswirkt. Dazu werden alle in Kapitel 3.2 aufgezählten Kräfte bis auf $F_{acceleration}$ auf 0 gesetzt. Allgemein ist zu sagen, dass eine Einschätzung hier extrem schwierig ist, da es viele unterschiedliche Faktoren gibt, die einen Einfluss auf das Endresultat haben können. Hier müssen für die Erwartungen unterschiedliche Szenarien betrachtet werden.

Leere Stationen - Sind die Stationen vorwiegend leer, wird erwartet, dass sich keine Unterschiede zwischen der Simulation mit und ohne der Simulation von Menschenmengen feststellen lässt. Die auf 0 gesetzten Kräfte sind dabei vorwiegend 0 oder sehr gering und somit zu vernachlässigen.

Mittelvolle Stationen - Sind die Stationen überwiegend mittelvoll, wird erwartet, dass die durchschnittliche Laufstrecke höher ist als mit der Simulation von Menschenmengen. Fahrgäste treffen beim Versuch, ihr Ziel zu erreichen, öfter auf andere Fahrgäste. Dies führt dazu, dass sie ein 'Ausweichmanöver' einleiten, welches die Laufstrecke dementsprechend erhöht. Die erhöhte Laufstrecke wird jedoch nicht die Warte- oder Fahrzeit beeinträchtigen, da zum einen die Fahrzeit davon komplett unbeeinträchtigt ist und zum anderen die erhöhte Laufstrecke nicht zu einer erhöhten Wartezeit führen kann, da Fußgänger sofort versuchen, eine Bahn zu betreten, sobald sie in der Station ist, unbeeinträchtigt davon, ob sie ihr vorheriges Ziel bereits erreicht haben oder nicht. Eine erhöhte Wartezeit, welche sich durch öfteres

verpassen von Bahnen durch Fahrgäste widerspiegelt, ist zwar denkbar, jedoch bei dieser noch geringen Auslastung der Station, nicht zu erwarten.

Volle Stationen - Die Stationen sind überwiegend voll. Dies kann dazu führen, dass Fahrgäste, anstatt auszuweichen, anfangen, langsamer zu werden oder stehen zu bleiben, da aufgrund der Auslastung der Station kein Platz zum Ausweichen ist. Dies führt dazu, dass die durchschnittliche Laufstrecke ähnlich lang wie bei einer leeren Station ist. Diese Verlangsamung der Fußgänger kann dazu führen, dass sie es aufgrund ihrer geringeren Geschwindigkeit nicht rechtzeitig in die haltende Bahn schaffen. Daher ist eine höhere durchschnittliche Wartezeit zu erwarten.

5.2 Ergebnisse

Hier werden die Ergebnisse der Simulation präsentiert.

5.2.1 Fahrplan

In Tabelle 5.1 lässt sich die Zeit zwischen der Ankunft von zwei Stationen im Format hh:mm:ss ablesen. Dabei wurden selbstgemessene Zeiten, die Zeiten aus dem Fahrplan und die durch die Simulation generierten Zeiten betrachtet. Die selbstgemessenen Zeiten wurden beim Fahren der U-Bahn Linie aufgenommen. Dabei wurde jedes mal, wenn die Bahn in einer Station komplett zum stillstand kommt oder wenn die Bahn anfängt zu fahren, die Zeit notiert. Die Zeiten aus dem Fahrplan sind die, von der Verkehrsgesellschaft veröffentlichten Fahrpläne, für die U-Bahn. Wird die Summe der Fahrzeiten betrachtet, welches der Zeit einer kompletten Fahrt der Kreislinie entspricht, wird erkannt, dass Messwerte und Simulationswerte bis auf eine Sekunde übereinstimmen. Dies ist auch zu erwarten, da die Simulation auf die Zeiten der Messwerte aufbaut. Werden hingegen die Werte der Simulation mit dem Fahrplan verglichen gibt es eine größere Differenz von 34 Sekunden oder 1,5%. Die lässt sich damit erklären, dass bei dem Fahrplan nur Werte auf die Minute genau angegeben werden.

Wird die die Differenz von Messwert zu Simulation verglichen sieht man zum Beispiel bei der Station 'Rathaus' Unterschiede von 41 Sekunden oder 51,37%. Diese lassen sich durch die konstante Wartezeit des Zuges in der Simulation erklären. Für die Simulation wurde immer ein konstanter Wert für die Wartezeit angenommen, während unter

reellen Umständen die Wartezeit stark variiert. Deswegen kann es vereinzelt zu großen Differenzen kommen.

Station	Messwerte	Fahrplan	Simulation
Barmbek	00:02:00	00:02:00	00:02:00
Dehnhaide	00:01:11	00:01:00	00:01:21
Hamburger Strasse	00:01:32	00:02:00	00:01:44
Mundsburg	00:01:23	00:01:00	00:01:29
Uhlandstrasse	00:01:12	00:02:00	00:01:17
Luebecker Strasse	00:01:42	00:02:00	00:01:38
Berliner Tor	00:02:00	00:02:00	00:02:16
Hauptbahnhof Sued	00:01:20	00:01:00	00:01:18
Moенckebergstrasse	00:01:13	00:01:00	00:01:28
Rathaus	00:02:00	00:02:00	00:01:19
Roedingsmarkt	00:01:24	00:01:00	00:01:24
Baumwall	00:01:45	00:02:00	00:02:13
Landungsbruecken	00:01:40	00:02:00	00:01:27
St. Pauli	00:01:31	00:01:00	00:01:33
Feldstrasse	00:01:48	00:03:00	00:01:33
Sternschanze	00:01:10	00:01:00	00:01:20
Schlump	00:02:00	00:02:00	00:02:08
Hoheluftbruecke	00:01:38	00:01:00	00:01:54
Eppendorfer Baum	00:01:15	00:02:00	00:01:32
Kellinghusenstrasse	00:02:22	00:01:00	00:01:40
Sierichstrasse	00:02:20	00:02:00	00:02:05
Borgweg	00:01:43	00:02:00	00:02:01
Saarlandstraße	00:02:26	00:02:00	00:01:53
Summe	00:38:35	00:38:00	00:38:34

Tabelle 5.1: Vergleich der Differenzen der Ankunftszeit nur nächsten Station

5.2.2 Fahrzeit

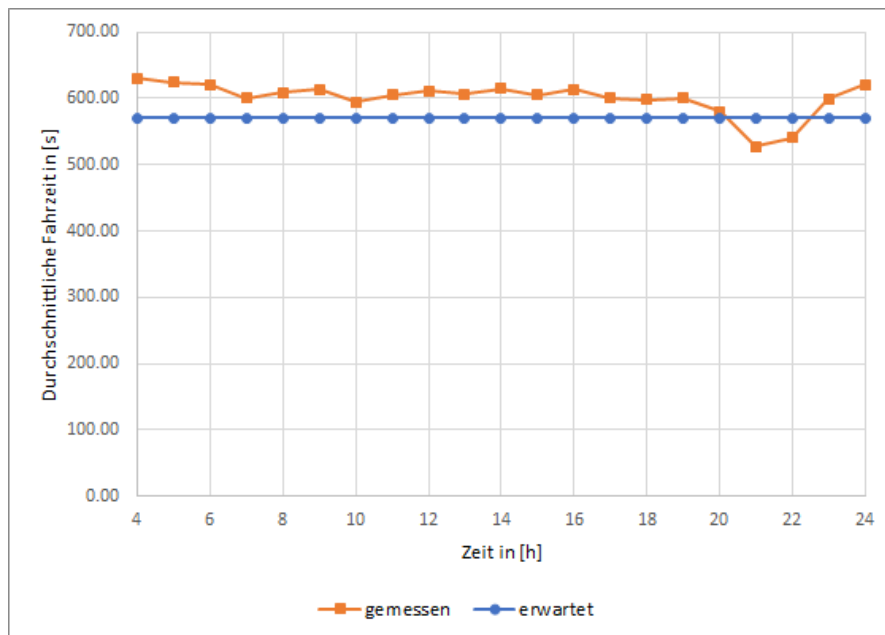


Abbildung 5.1: Vergleich der durchschnittlichen Fahrzeit zur erwarteten Fahrzeit

In Abbildung 5.1 wird die durchschnittlich gemessene Fahrzeit in Orange und die durchschnittlich erwartete Fahrzeit in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die durchschnittliche Fahrzeit in Sekunden abgebildet. Die durchschnittlich gemessene Fahrzeit beträgt 602,09s und die erwartete 570s. Somit beträgt der Fehler 5,63%. Wie bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben, ist es hier aufgrund der unterschiedlichen Fahrgastströme der Stationen schwierig eine akkurate Schätzung abzugeben. Damit ist der Fehler von 5,63% vollkommen akzeptabel. Die größere Differenz der Messwerte zu den erwarteten Werten um vier Uhr lässt sich durch die geringe Anzahl von Passagieren um diese Uhrzeit erklären. Diese ist mit 894 weitaus geringer als zu anderen Uhrzeiten und liefert somit weniger repräsentative Daten als zu anderen Uhrzeiten.

5.2.3 Wartezeit

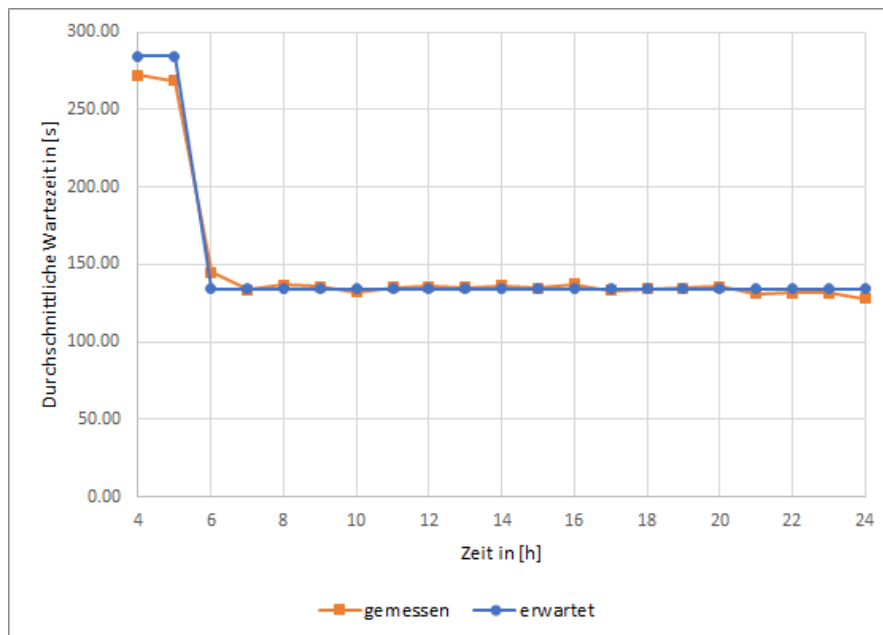


Abbildung 5.2: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeit zur erwarteten Wartezeit

In Abbildung 5.2 wird die durchschnittlich gemessene Wartezeit in Orange und die durchschnittliche erwartete Wartezeit in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die durchschnittliche Wartezeit in Sekunden abgebildet. Die durchschnittlich gemessene Wartezeit beträgt 149,04s und die erwartete 148,79s. Somit beträgt der Fehler 0,11%. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, ist dieser geringe Fehlerwert aufgrund der hohen Anzahl von Fahrgästen zu erwarten gewesen. Durch die hohe Gesamtanzahl von Fahrgästen wird hier ein sehr realistisches Ergebnis erzeugt. Wieder auffällig sind die Werte von vier bis sechs Uhr. Diese lassen sich ebenfalls durch die geringe Anzahl der Fahrgäste zu diesen Uhrzeiten erklären.

5.2.4 Laufstrecke

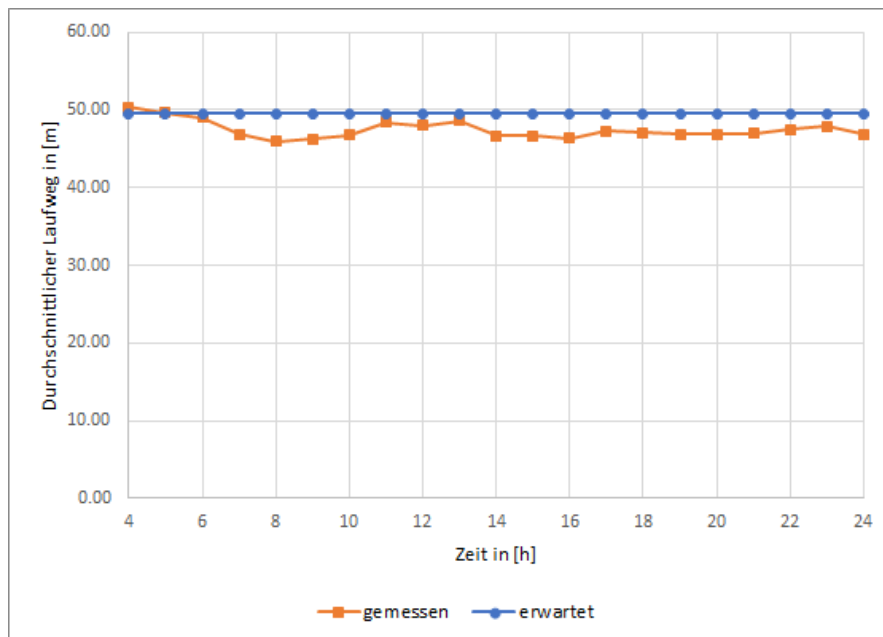


Abbildung 5.3: Vergleich der durchschnittlichen Laufstrecke zur erwarteten Laufstrecke

In Abbildung 5.3 wird die durchschnittlich gemessene Laufstrecke in Orange und die durchschnittliche erwartete Laufstrecke in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die durchschnittliche Laufzeit in Metern abgebildet. Entgegen der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Erwartungen sind die gemessenen Laufstrecken, außer um vier und fünf Uhr niedriger als die erwarteten Laufstrecken. Wurde in den Erwartungen beschrieben, dass man mit höheren Werten durch das Ausweichen der Fahrgäste rechnen lässt sich der geringer gemessene Wert durch eine sehr volle Station erklären. Hier sind die Stationen so voll, dass es Fahrgästen wieder schwer fällt auszuweichen und ihre gewünschte Zielposition in einer bestimmten Zeit zu erreichen. Beides führt zu einem geringer gemessenen Wert. Betrachtet man dabei die Werte, lässt sich eine gewisse Antiproportionalität feststellen.

$$\Delta \text{Laufstrecke} \sim \frac{1}{\text{Passagiere}} \quad (5.4)$$

Hour	gemessene Laufstrecke	erwartete Laufstrecke	Δ Laufstrecke	Fahrgäste	Fahrgäste/ Δ Laufstrecke
4	50.11	49.57	-0.54	894	-1664
5	49.66	49.57	-0.09	4700	-55278
6	48.99	49.57	0.58	15627	27052
7	46.89	49.57	2.68	28503	10644
8	45.92	49.57	3.65	39007	10689
9	46.20	49.57	3.38	37848	11207
10	46.71	49.57	2.86	31782	11113
11	46.71	49.57	2.86	25717	8992
12	47.36	49.57	2.21	18109	8187
13	45.84	49.57	3.73	17744	4756
14	46.65	49.57	2.92	29020	9944
15	46.65	49.57	2.92	34214	11721
16	46.34	49.57	3.23	39724	12281
17	47.32	49.57	2.25	40002	17744
18	47.11	49.57	2.46	32412	13177
19	46.86	49.57	2.71	25612	9435
20	46.85	49.57	2.72	19256	7085
21	47.00	49.57	2.58	12558	4874
22	47.43	49.57	2.15	11757	5480
23	47.91	49.57	1.66	10257	6171
24	46.83	49.57	2.74	6525	2380

Tabelle 5.2: Berechnung der Antiproportionalität

In Tabelle 5.2 sieht man, dass sich die Werte, bis auf einige Ausnahmen, bei ungefähr 10000 einpendeln. Daher lässt sich sagen, dass mit zunehmender Anzahl von Fahrgästen auf einer Station die Laufstrecke der Fahrgäste sinkt.

5.2.5 Fahrgäste

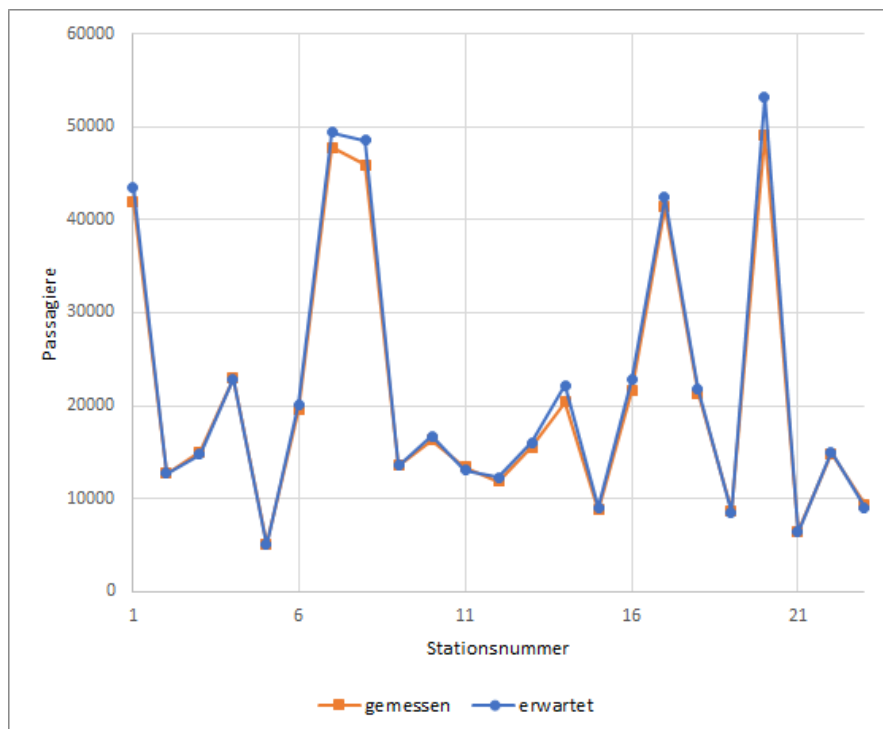


Abbildung 5.4: Vergleich der Anzahl Fahrgäste an den Stationen zur erwarteten Anzahl

In Abbildung 5.4 wird die gemessene Anzahl von Fahrgästen in Orange und die durchschnittlich erwartete Anzahl von Fahrgästen in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Stationsnummer und auf der y-Achse die Anzahl der Fahrgäste abgebildet. Es lässt sich eine leichte Abweichung der Messwerte aus der Simulation zu den erwarteten Werten erkennen. Der durchschnittliche Fehler liegt dabei bei 1,7%. Dieser Unterschied ist aufgrund der Stationsauswahl, welche zwar mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, aber dennoch zufällig geschieht, zu erklären. Aufgrund der zufälligen Stationsauswahl liegt Unterschied im akzeptablen Bereich. Zudem sind diese Durchschnittswerte, die von Tag zu Tag also schwanken.

5.2.6 Stationen

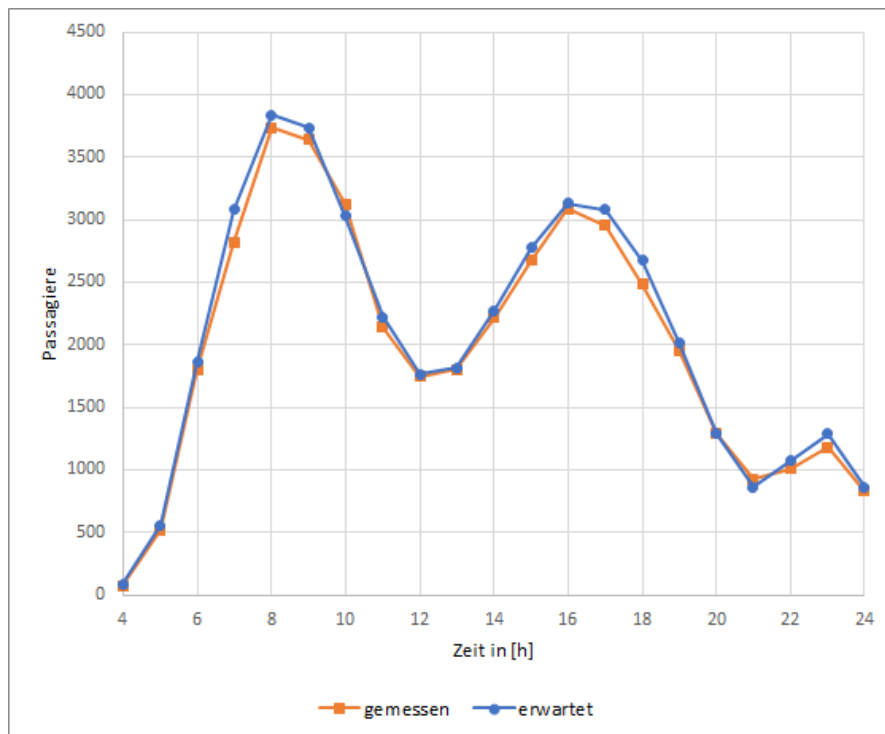


Abbildung 5.5: Fahrgastverteilung über den Tag an der Station Barmbek

In Abbildung 5.5 wird die gemessene Anzahl von Fahrgästen an der Station Barmbek in Orange und die durchschnittlich erwartete Anzahl von Fahrgästen in Barmbek in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die Anzahl von Fahrgästen abgebildet. Man kann erkennen, dass zwischen gemessenen und erwarteten Wert kein großer Unterschied festzustellen ist. Auf den Tag verteilt ergibt sich dadurch ein Gesamtfehler von 3,47%

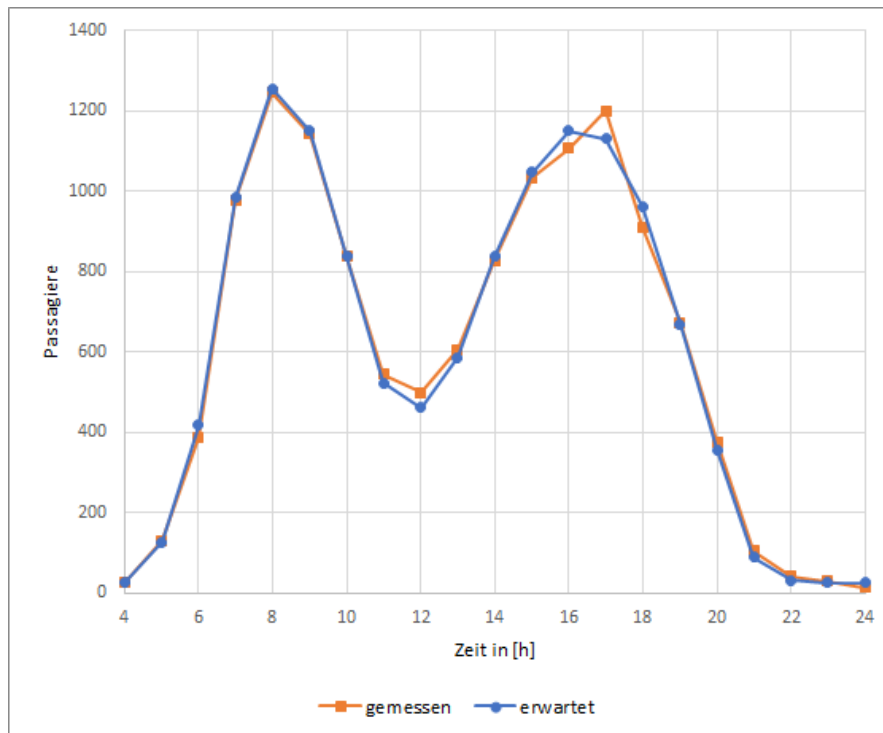


Abbildung 5.6: Fahrgastverteilung an der Station Dehnhaide

In Abbildung 5.5 wird die gemessene Anzahl von Fahrgästen an der Station Dehnhaide in Orange und die durchschnittlich erwartete Anzahl von Fahrgästen in Dehnhaide in Blau abgebildet. Dabei wird auf der x-Achse die Uhrzeit in Stunden und auf der y-Achse die Anzahl von Fahrgästen abgebildet. Die erwartete Anzahl ist dabei sehr nahe der gemessenen Anzahl von Fahrgästen mit einem durchschnittlichen Fehler von 0,19%.

5.2.7 Simulation von Menschenmengen

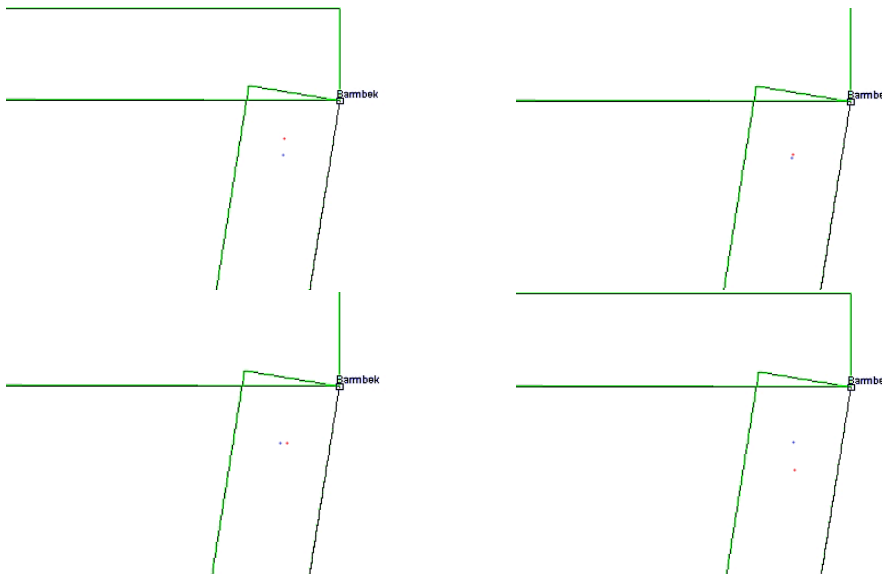


Abbildung 5.7: Test der Simulation der Menschenmengen. Ein 'Ausweichmanöver' eines Fahrgastes wird dargestellt

In Abbildung 5.7 ist zu sehen, wie sich ein Fahrgast, dargestellt als roter Punkt, von einer Position (oben links) zu einer anderen Position (unten rechts) bewegen möchte. Auf dem Weg zur neuen Position trifft er auf einen anderen Fahrgast, dargestellt als blauer Punkt (oben rechts) und weicht diesem dann aus (unten links) bevor er schlussendlich sein Ziel erreicht.

	mit CS	ohne CS	Differenz
Wartezeit in [s]	272,23	275,67	-1,25%
Fahrzeit in [s]	630,19	637,27	-1,11%
Laufstrecke in [m]	50,35	49,89	0,91%

Tabelle 5.3: Vergleich der Messwerte um vier Uhr mit und ohne crowd simulation

Vier Uhr wurde als Uhrzeit für leere Stationen ausgewählt, da die durchschnittliche Anzahl von Fahrgästen an den Stationen 2,31 ist. Vergleicht man die Werte für die Wartezeit, Fahrzeit und Laufstrecke, so lassen sich nur minimale Unterschiede feststellen. Diese lassen sich durch die Varianz bei der Auswahl der Positionen an den Stationen erklären. Daher lässt sich sagen, dass die Erwartung in 5.1.4 mit den Messwerten übereinstimmt.

	mit CS	ohne CS	Differenz
Wartezeit in [s]	128,28	132,01	-2,82%
Fahrzeit in [s]	620,83	617,94	0,47%
Laufstrecke in [m]	47,72	46,83	1,89%

Tabelle 5.4: Vergleich der Messwerte um 0 Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen

Mitternacht wurde als Uhrzeit für mittelvolle Stationen ausgewählt, da die durchschnittliche Anzahl von Fahrgästen an den Stationen 8,68 ist. Beim Betrachten der Werte für die Wartezeit, Fahrzeit und Laufstrecke, lassen sich zwar nur minimale Unterschiede feststellen, jedoch sind diese signifikant größer als um vier oder neun Uhr sind. Wie in Kapitel 5.1.4 erwähnt, wurde hier mit einer geringeren durchschnittlichen Laufstrecke gerechnet, wenn die Simulation der Menschenmengen nicht aktiv ist. Die lässt sich hier mit den Messwerten und einer Differenz von 1,89% auch bestätigen. Auffällig jedoch ist hier die große Differenz von 2,82% in der Wartezeit. Erwartet wurde, dass hier ähnliche Werte gemessen werden. Begründen lässt sich die große Differenz mit der Varianz. Ist der Fehler mit 2,82% im Vergleich zu den Messwerten aus vier und neun Uhr jedoch relativ groß, liegen diese jedoch beide noch unter dem erwarteten Wert von 132,01s.

	mit CS	ohne CS	Differenz
Wartezeit in [s]	135,72	133,48	1,68%
Fahrzeit in [s]	611,4	609,12	0,37%
Laufstrecke in [m]	47,99	46,63	1,89%

Tabelle 5.5: Vergleich der Messwerte um zwölf Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen

Betrachtet man nun die Messwerte um zwölf Uhr, bei der die durchschnittliche Anzahl von Fahrgästen an den Stationen 14,94 ist, lässt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei den Messwerten um Mitternacht feststellen. Ist keine Simulation von Menschenmengen aktiv, verringert sich die durchschnittliche Laufstrecke, in diesem Fall um 1,89%.

	mit CS	ohne CS	Differenz
Wartezeit in [s]	135,98	134,23	1,31%
Fahrzeit in [s]	613,64	610,32	0,55%
Laufstrecke in [m]	46,20	46,46	0,56%

Tabelle 5.6: Vergleich der Messwerte um neun Uhr mit und ohne Simulation von Menschenmengen

Neun Uhr wurde als Uhrzeit für volle Stationen ausgewählt, da die durchschnittliche Anzahl von Fahrgästen an den Stationen 30,38 beträgt. Beim Vergleich der Werte für die Wartezeit, Fahrzeit und Laufstrecke, lassen sich nur minimale Unterschiede feststellen. Die geringen Unterschiede lassen sich wieder durch die Varianz erklären. Werden die Werte mit den Erwartungen in 5.1.4 verglichen zeigt sich, dass eine erhöhte Fahrgastzahl nicht zu einer erhöhten Wartezeit geführt hat. Es lässt sich also erkennen, dass Fahrgäste nicht aufgrund erhöhter Hindernisse öfter den Zug verpassen.

6 Zusammenfassung

6.1 Diskussion

Werden die in Kapitel 5.2 vorgestellten Ergebnisse betrachtet, lässt sich feststellen, dass eine realistische Simulation der Hamburger U-Bahn Linie 'U3' erstellt wurde. Sowohl der Fahrplan in Kapitel 5.2.1 als auch der Fahrgaststrom an den einzelnen Stationen in Kapitel 5.2.5 und 5.2.6 wurden realitätsnah simuliert. Die Ergebnisse haben also gezeigt, dass die Simulation hinreichend genau die eingegebenen Daten korrekt verarbeitet.

Zudem wurde die Funktion der Simulation der Menschenmengen und ihr Einfluss auf die Simulation in Kapitel 5.2.7 erfolgreich gezeigt. Fahrgäste haben dabei ein Verhaltensmuster gezeigt (siehe 5.7), welches mit dem zu erwartenden Verhaltensmuster übereinstimmt.

Dabei hat der Vergleich zwischen der Simulation mit und ohne der Simulation der Menschenmengen gezeigt, dass sich das durch die Simulation der Menschenmengen entstehende Verhaltensmuster auf die Messergebnisse auswirkt. Die aus der Erfahrung und den Überlegungen, wie sich das durch die Simulation der Menschenmengen generierte Verhaltensmuster auf die Messergebnisse auswirkt, wurden in Kapitel 5.1 mit Hilfe der Messergebnisse ziemlich genau bestätigt. Zwar waren die Änderungen nur marginal, dennoch wurden signifikante Änderungen in den Ergebnissen beobachtet, welche die Erwartungen bestätigten.

Beim Betrachten der Ergebnisse stellt sich einem die Frage, wie sinnvoll die Simulation der Menschenmengen für die Fahrplananalyse ist. Auf makroskopischer Ebene betrachtet sind die Unterschiede der Messergebnisse zwischen der Simulation mit der Simulation von Menschenmengen zur Simulation ohne Simulation von Menschenmengen nur sehr gering. Hier muss die durch die Simulation der Menschenmengen erhöhte Messgenauigkeit in der Simulation mit der gebrauchten Rechenleistung, um die Simulation zu führen, abgewogen werden.

Zudem wird es auf mikroskopischer Ebene auch Unterschiede geben. Sind die Eigenschaften der Fahrgäste in der Realität extrem unterschiedlich, wurde in der Simulation vereinfacht von einem Fahrgast mit immer gleichen Eigenschaften ausgegangen. Änderungen im Fahrplan haben unterschiedliche Auswirkungen auf unterschiedliche Altersgruppen wie zum Beispiel Rentner.

Betrachtet man nun die Ergebnisse im Ganzen lässt sich erkennen, dass gerade die Erwartungswerte von Wartezeit (Kapitel 5.1.1), Fahrzeit (Kapitel 5.1.3) und Laufstrecke (Kapitel 5.1.2) ziemlich genau mit denen der Messwerte übereinstimmen.

Grund hierfür sind die in Kapitel 4.3 erwähnten Vereinfachungen. So ist der Fahrgaststrom zum Beispiel in einer Stunde homogen verteilt. Das heißt, dass nach einem bestimmten Zeitintervall jedes mal ein Fahrgast die Station betritt. Dieses entspricht jedoch nicht der Realität. Ist die U-Bahn Station nicht an eine weitere Linie angebunden, so ist die Vereinfachung noch annehmbar. Ist die U-Bahn Station jedoch an weitere Bus- oder U-Bahn-Linien angebunden, so hängt der Fahrgaststrom stark von den jeweiligen Fahrplänen der anderen Linien ab.

Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt, ist eine Simulation lediglich eine vereinfachte Abbildung der Realität. Die hier in der Arbeit beschriebene Simulation ist dabei keine Ausnahme. Die Ergebnisse aus der Simulation müssen folglich mit Vorsicht betrachtet werden. Da viele Aspekte aus der Realität fehlen, ist somit ein Vergleich der Messergebnisse aus der Simulation mit den Messungen aus der Realität sehr schwer.

Zudem macht die Betrachtung einer einzigen U-Bahn-Linie weniger Sinn. Fahrpläne einzelner Linien sind aufeinander abgestimmt. So gibt es zum Beispiel viele Umsteigestation bei denen die Ankunftszeiten so aufeinander abgestimmt sind, dass ein Umsteigen von der einen Linie ohne langes Warten in die nächste Linie möglich ist.

6.2 Fazit

Die Arbeit hat sich damit auseinandergesetzt, inwiefern sich die Eigenschaften und Variablen eines Fahrplans auf das Zeit-Management eines Fahrgastes auswirken und wie man diese Eigenschaften und Variablen modifizieren kann, um dieses Zeitmanagement zu verbessern. Gleichzeitig wurde versucht zu zeigen, welche Auswirkung die Simulation der Menschenmengen auf die Ergebnisse bei der Untersuchung hat. Zu diesem Zweck

wurde eine Simulation einer U-Bahn Linie und ihrer Fahrgäste mit Hilfe der Simulation von Menschenmengen entwickelt.

Die Ergebnisse zeigen dabei, dass mit Hilfe eines Fahrplanes direkt eingeschätzt werden kann, wie sich dieser auf die Fahrgäste auswirkt. Es konnten dabei mehrere Daten über den Fahrgast ermittelt werden, die zur Optimierung eines Fahrplans führen. Es wurde dabei gezeigt, dass die zu erwarteten Messwerte vom Fahrplan, also der Zeit zwischen zwei Zügen oder Bussen, abhängt.

Interessant war dabei auch zu sehen, wie sich die Simulation der Menschenmengen auf die Simulation auswirkt. Die Unterschiede in den Messwerten sind zwar im Gesamtkontext nur marginal, zeigen jedoch dass diese auch bei der Simulation von Fahrgästen in Nahverkehrslinien Sinn machen. Denn die Änderungen, die an den Messergebnissen zu sehen sind, sind konsistent mit den Erwartungen. Dabei wurde gezeigt, dass unterschiedlich dichte Menschenmengen zu unterschiedlichen Veränderungen der Messergebnisse der Simulation führen. So lässt sich sagen, dass die Simulation der Menschenmengen zur Authentizität der Simulation beiträgt, man jedoch abwägen muss, inwiefern sich dieser Rechenaufwand lohnt.

Gleichzeitig lässt sich anhand der Ergebnisse erkennen, dass eine Analyse eines einzelnen Fahrplans weniger Sinn ergibt. Um den Fahrplan einer Nahverkehrslinie wirklich aussagekräftig analysieren zu können, muss der Nahverkehr in seiner Gesamtheit simuliert werden. Sinnvoll ist es also, weitere Nahverkehrslinien in die Simulation einzubinden. Dieses würde auch einige Probleme der Vereinfachungen (zum Beispiel die homogene Verteilung des Fahrgaststroms) direkt lösen.

Zudem können Szenarien, wie zum Beispiel das Blockieren eines Gleises durch einen Notteinsatz oder der Ausfall einer Linie, simuliert werden. Bei dem ersten Szenario lässt sich ermitteln, wie sich eine Blockierung auf das Zeit-Management der Fahrgäste auswirken würde. Beim zweiten Szenario lässt sich eine Umleitungslinie und deren Fahrplan anhand der betroffenen Fahrgäste bestimmen.

Zusätzlich kann mit Hilfe der Simulation von Menschenmengen beobachtet werden, wie sich die Anpassungen der Fahrpläne auf bestimmte Menschengruppen auswirkt. Dabei sind gerade Problemgruppen wie Rentner und Kleinkinder interessant zu beobachten.

Außerdem wäre eine Erweiterung denkbar, bei der sich ermitteln lässt, wie nützlich zum Beispiel eine neue U-Bahn-Station ist. Mit Hilfe von Umfragen ließe sich ermitteln, wie

sehr sich die Auslastung dadurch an der alten und der neuen Station ändert. Damit ließe sich der Wert einer solchen Erweiterung bestimmen.

Diese Arbeit hat als Proof-of-Concept gezeigt, was mit Hilfe der Simulierung einer Nahverkehrslinie und der Simulierung von Menschenmengen möglich ist. Es ist sinnvoll, bei der Analyse, Erstellung oder Optimierung eines Fahrplanes diesen auch zu simulieren, da er die Änderungen am Fahrplan für die Fahrgäste, realitätsnah darstellen kann. Um jedoch wirklich vergleichbare Ergebnisse aus der Simulation generieren zu können, muss mehr Arbeit in die Umsetzung der in Kapitel 4.3 erwähnten Vereinfachungen gesteckt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] ADLER, Jeffrey ; BLUE, Victor: *Cellular Automata Microsimulation of Bidirectional Pedestrian Flows*. 2000. – URL <https://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1678-17>
- [2] BOUVIER, Eric ; COHEN, Eyal ; NAJMAN, Laurent: *From Crowd Simulation to Airbag Deployment: Particle Systems, a New Paradigm of Simulation*. URL https://www.researchgate.net/publication/220051121_From_Crowd_Simulation_to_Airbag_Deployment_Particle_Systems_a_New_Paradigm_of_Simulation, 1997
- [3] DIJKSTRA, J. ; TIMMERMANS, H. ; JESSURUN, A.: *A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualising Simulated Pedestrian Acitivity*. URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-0709-5_4, 2000
- [4] GARDNER, Martin: *Mathematical Games: Conway's Game of Life*. 1970
- [5] HELBING, Dirk: *Social force model for pedestrian dynamics*. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8659.2004.00783.x>, 1998
- [6] HELBING, Dirk: *Simulating Dynamical Features of Escape Panic*. URL <https://www.nature.com/articles/35035023>, 2000
- [7] HELBING, Dirk: *Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems*. 2001. – URL <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0012229>
- [8] HENDERSON, L. F.: *The Statistics of Crowd Fluids*. 1971. – URL <http://dx.doi.org/10.1038/229381a0>
- [9] HUGHES, Roger L.: *The Flow of Human Crowds*. 2003. – URL <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161136>

- [10] REYNOLDS, Craig W.: *Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model*. URL <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=37406>, 1987
- [11] REYNOLDS, Craig W.: *Steering Behaviors for Autonomous Characters*. URL <https://www.red3d.com/cwr/papers/1999/gdc99steer.pdf>, 1999
- [12] SUNG, Mankyu ; GLEICHER, Michael ; CHENNEY, Stephen: *Scalable Behaviors for Crowd Simulation*. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8659.2004.00783.x>, 2004
- [13] THALMANN, Daniel ; MUSSE, Soraia R. ; KALLMANN, Marcello: *Virtual Humans' Behavior: Individuals, Groups and Crowds*. URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-3646-0_18, 1999
- [14] ULICNY, Branislav ; THALMANN, Daniel: *Crowd Simluation for Interactive Virtual Environments and VR Training Systems*. 2001. – URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.2441&rep=rep1&type=pdf>

A Anhang

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ort

Datum

Unterschrift im Original