



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit
Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Bedeutung und Einfluss von Fahrtreppen am Beispiel Bahnhofsevakuierung

Bachelorarbeit

von

Name, Vorname: Magendiran, Nirushitha

Matrikel-Nr.: 1620234

Kamen, den 11.11.2021

Bearbeitungszeitraum: 07.07.2021 – 11.11.2021

Betreuer: Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Zweitbetreuerin: Basma Khelfa

Betreuende Mitarbeiter (JSC): Dr. Christoph Gnendiger

Dr. Mohcine Chraibi

Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Ort und Datum:

Unterschrift:

Inhaltsverzeichnis

Bedeutung und Einfluss von Fahrtreppen am Beispiel Bahnhofsevakuierung

Eidesstaatliche Erklärung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Verzeichnis verwendeter Gleichungen	VII
Zusammenfassung	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Herangehensweise.....	1
2 Stand der Wissenschaft	2
2.1 Mathematische Modellierung von Fußgängerdynamiken	2
2.1.1 Fluss	3
2.1.2 Dichte	4
2.1.3 Geschwindigkeit.....	4
2.1.4 Fundamentaldiagramme	5
2.2 Erläuterung der verschiedenen Fußgängermodelle	7
2.3 Fahrtreppen	9
2.3.1 Definition	9
2.3.2 Funktionsweise.....	9
2.3.3 Anwendungsbereiche	11
2.4 Freie Bewegungsgeschwindigkeit von Personen auf Fahrtreppen.....	13
2.4.1 Fahrende Fahrtreppen.....	14
2.4.2 Stehende Fahrtreppen	14
2.5 Evakuierung im Bahnhof	15
2.5.1 Aufbau eines Bahnhofs	15
2.5.2 Evakuierung im Bahnhof	17
2.6 Fußgängersimulation.....	18
2.6.1 Gängige Softwares in der Simulationsanalyse.....	18
2.6.2 Fußgängersimulation mit JuPedSim.....	20
3 Simulation und Ergebnisanalyse	22
3.1 Rahmenbedingungen des Evakuierungsszenarios.....	22

3.2	Simulation	23
3.3	Ergebnisanalyse	25
4	Zusammenfassung und Ausblick	37
5	Literaturverzeichnis.....	38
6	Anhang	1
6.1	Excel-Tabellen	1
6.1.1	Simulationsergebnisse bei 50 Agenten mit einem Radius von 0,20 m	1
6.1.2	Simulationsergebnisse bei 50 Agenten mit einem Radius von 0,28 m	2
6.1.3	Simulationsergebnisse bei 200 Agenten mit einem Radius von 0,20 m	3
6.1.4	Simulationsergebnisse bei 200 Agenten mit einem Radius von 0,28 m	7
6.2	Verwendete Geometriedatei.....	12

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1:</i> Beziehung zwischen der Strömung und der Dichte (Daamen).....	5
<i>Abbildung 2:</i> Aufbau einer Fahrtreppe. (Quelle: Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH, Berlin)	11
<i>Abbildung 3:</i> Seitenansicht der simulierten Geometrie. Die Simulation besitzt zwei Ebenen. Die Fahrtreppe hat eine Breite von 1 m, eine Länge von 10 m und die Höhe beträgt 6 m. Der Start der Simulation befindet sich auf der unteren Ebene.....	24
<i>Abbildung 4:</i> Draufsicht auf die Geometrie der Simulation.	24
<i>Abbildung 5:</i> Diagramm für 50 Personen (Agenten) ohne Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.....	25
<i>Abbildung 6:</i> Diagramm für 50 Personen (Agenten) mit Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.	26
<i>Abbildung 7:</i> Diagramm für 200 Personen (Agenten) ohne Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.....	26
<i>Abbildung 8:</i> Diagramm für 200 Personen mit Gepäck ($r = 0,28$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.	27
<i>Abbildung 9:</i> Fundamentaldiagramm für 50 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.....	30
<i>Abbildung 10:</i> Fundamentaldiagramm für 50 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.....	30
<i>Abbildung 11:</i> Fundamentaldiagramm für 200 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.....	31
<i>Abbildung 12:</i> Fundamentaldiagramm für 200 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.....	31
<i>Abbildung 13:</i> Diagramm für 50 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.	34
<i>Abbildung 14:</i> Diagramm für 50 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.	34
<i>Abbildung 15:</i> Diagramm für 20 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.	35

Abbildung 16: Diagramm für 200 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.35

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1:</i> Freie Bewegungsgeschwindigkeiten auf Gehwegen, Treppen (Mohd, Khairul Afzan Mohd Lazi und Masria) und Fahrtreppen (Sukor et al.) die in verschiedenen Ländern und Studien ermittelt wurden.....	13
<i>Tabelle 2:</i> Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten ohne Gepäck.....	28
<i>Tabelle 3:</i> Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten ohne Gepäck.....	28
<i>Tabelle 4:</i> Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten mit Gepäck.....	29
<i>Tabelle 5:</i> Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten mit Gepäck.....	29
<i>Tabelle 6:</i> Mittlere Personendichte in P/m ² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten ohne Gepäck.....	33
<i>Tabelle 7:</i> Mittlere Personendichte in P/m ² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten mit Gepäck.....	33
<i>Tabelle 8:</i> Mittlere Personendichte in P/m ² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten ohne Gepäck.....	33
<i>Tabelle 9:</i> Mittlere Personendichte in P/m ² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten mit Gepäck.....	33
<i>Tabelle 10:</i> Vergleich der mittleren Personendichten in P/m ² bei 50 Agenten und 200 Agenten ohne Gepäck im Zusammenhang mit den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s	36
<i>Tabelle 11:</i> Vergleich der mittleren Personendichten in P/m ² bei 50 Agenten und 200 Agenten ohne Gepäck im Zusammenhang mit den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s	36

Verzeichnis verwendeter Gleichungen

(1)	$q = k \cdot u$	3
(2)	$J = \Delta N / \Delta t$	3
(3)	$J = \rho \cdot v \cdot b$	3
(4)	$\rho = N / A$	4
(5)	$D = \sum f / A$	4
(6)	$v = \Delta s / \Delta t$	4
(7)	$2 \times \text{Stufenhöhe} + 1 \times \text{Stufentiefe} = 63 \text{ cm.}$	14
(8)	$\rho = J / v \cdot b$	32

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Bedeutung und dem Einfluss den Fahrtreppen im Rahmen einer Räumung oder Evakuierung haben können. Dafür wurde ein vereinfachtes Modell einer sich aufwärts Bewegenden Fahrtreppe simuliert. Die modellierte Fahrtreppe hat in den durchgeführten Simulationen eine Länge von 10 m, eine Höhe von 6 m und eine Breite von 1 m. Im Zuge der Simulation wurden verschiedene Fahrtreppengeschwindigkeiten gewählt, um Aussagen zur Abhängigkeit der Fahrtreppengeschwindigkeit und der Evakuierungsgeschwindigkeit tätigen zu können. Des Weiteren wurden die Unterschiede zwischen zu Evakuierenden ohne Gepäckstücke und mit Gepäckstücken untersucht. Die Simulationen wurden mit dem Simulationsprogramms JuPedSim durchgeführt.

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Einordnung der Thematik in den Stand der Wissenschaft. Dabei werden die Vorgehensweisen der Modellierung der Fußgängerdynamiken, Fahrtreppen und Bahnhöfe näher erläutert. Anschließend wurden die verschiedenen Fußgängersimulationsprogramme erläutert, sowie die Rahmenbedingungen der in dieser Arbeit durchgeführten Simulation. Als nächstes wurden die Simulationsergebnisse beschrieben und diskutiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Diagrammen und in Tabellen. Der Einfluss der unterschiedlichen Parameter wurde dabei verglichen. Abschließend wurden die Simulationsergebnisse interpretiert und die Problematik der Einbindung von Fahrtreppen bei einer Evakuierung wurde diskutiert.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Täglich nehmen wir als Fußgänger am Verkehrsgeschehen teil und befinden uns dabei auf großen Plätzen des öffentlichen Verkehrs, wie beispielsweise an Bahnhöfen. An diesen Orten ist eine hohe Personendichte nicht unüblich und führt zu Stockungen in der Bewegungsdynamik der Fußgänger und kann auch Sicherheitsrisiken bergen. Anbetracht dessen spielt die Evakuierungsdynamik eine besondere Rolle. Unter einer Evakuierung wird grundsätzlich ein Ausgang von einem Bereich zu einem sicheren Ort aufgrund einer potenziellen oder tatsächlichen Bedrohung verstanden.

1.2 Problemstellung

Fußgänger, die sich in einem begrenzten räumlichen Bereich bewegen, repräsentieren ein komplexes dynamisches System aufgrund ihrer unterschiedlichen Ziele, Fähigkeiten, Strategien, ihrer gegenseitigen Interaktion und die geometrischen Bewegungsbeschränkungen.

Die Untersuchung dieser Dynamiken ist ein komplexes Forschungsfeld und umfasst verschiedene Wissensbereiche, die von soziologischen bis zu physikalischen Modellen reichen. Erkenntnisse der Dynamik von Fußgängerströmen sind für die Optimierung bei der Gestaltung und Planung von Evakuierungsszenarien von zentraler Bedeutung.

Verschiedene Möglichkeiten die Fußgängerdynamik zu beschreiben sind unter anderem die Geschwindigkeit, die Dichte und der Personenfluss. Die empirischen Beziehungen zwischen der Personendichte und dem Personenfluss können in Form von Fundamentaldiagrammen dargestellt werden. So unterschiedlich die Fundamentaldiagramme, durch die unterschiedlichen Daten auch ausfallen, so gibt es eine charakteristische Eigenschaft der Fundamentaldiagramme die gleich zu bleiben scheint.

Zudem wird der Rolle der Fahrtreppen im Rahmen einer Evakuierung häufig keine Beachtung geschenkt. So gibt es viele Gründe für die eingeschränkte Nutzung von Fahrtreppen in Notsituationen, da insbesondere die Möglichkeit besteht, dass die Personen zur Gefahr hin und nicht von der Gefahr wegtransportiert werden. Ungeachtet dieser Bedenken wurden Fahrtreppen sowohl im Eingeschalteten Zustand als auch im Abgeschalteten Zustand mit guten Ergebnissen in einigen Evakuierungsszenarien eingesetzt (Ohtake und Kishimoto; Daamen et al.).

1.3 Herangehensweise

In der Arbeit wird der Einfluss von Fahrtreppen bei der Evakuierung über Bahnhöfe untersucht. Als Szenario für die Simulation mit JuPedSim wird zunächst eine normale Treppe mit angrenzender Fahrtreppe betrachtet. Untersucht wird die maximale Förderleistung der Gesamtanlage in Abhängigkeit vom Zustand der Fahrtreppe. Weitere Variationsmöglichkeiten betreffen unter anderem die Eigenschaften der zu evakuierenden Personen und das zugrunde liegende Modell.

2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft zu der mathematischen Modellierung von Fußgängerdynamiken und zu den verschiedenen Fußgängermodellen erläutert. Danach erfolgt eine Definition der Fahrtreppe und es werden die Funktionsweise und die Anwendungsbereiche beschrieben. Weiterhin werden die freien Bewegungsgeschwindigkeiten von Fußgängern auf fahrenden und stehenden Treppen vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Beschreibung über den generellen Aufbau eines Bahnhofs. Des Weiteren wird die Problematik einer Bahnhofsevakuiierung anhand von Studien aus dem öffentlichen Raum erläutert. Abschließend erfolgt zunächst eine Beschreibung der Merkmale und der Komponenten von Fußgängersimulation. Daraufhin werden einige gängige Fußgängersimulationsprogramme und deren Anwendungsbereiche beschrieben.

2.1 Mathematische Modellierung von Fußgängerdynamiken

Bevor die mathematische Modellierung von Fußgängerdynamik vorgestellt wird, erfolgt eine Definition des Begriffes Fußgänger.

Bei einem Fußgänger handelt es sich um jede Person, die zu Fuß unterwegs ist, um dorthin zu gelangen, wo sie hinmöchte. Die Definition wird üblicherweise ausgeweitet, sodass Menschen mit Behinderungen, die Rollstühle oder andere Mobilitätshilfen verwenden miteingeschlossen werden.

Die Forschung der Fußgängerverhalten wird seit mehreren Jahrzehnten untersucht. Die durchgeführten empirischen Studien basierten hauptsächlich auf direkter Beobachtung, Fotos und Zeitrafferfilmen. Die Hauptziele dieser Studien waren die Erarbeitung eines Nutzgradkonzeptes, Gestaltungselementen von Fußgängeranlagen oder Planungsrichtlinien. Letztere haben meist die Form von Regressionsrelationen, die jedoch für die Vorhersage von Fußgängerströmen in Fußgängerzonen und Gebäuden mit außergewöhnlicher Architektur oder unter extremen Bedingungen, wie Evakuierungen, nicht gut geeignet sind (Dirk Helbing, Illes J. Farkas, Peter Molnar, and Tamas Vicsek).

Die mathematische Modellierung von Fußgängerdynamiken dient dazu reale Verkehrsdynamiken zu reproduzieren und zu beschreiben. Bevor eine mathematische Betrachtung erfolgen kann, ist es notwendig, das menschliche Verhalten einer Bewegung zu verstehen. Diese Betrachtung erfolgte durch Schadschneider et al. und brachte drei voneinander abhängige Entscheidungsebenen hervor:

- die strategische Ebene: Aktivitätenwahl
- die taktische Ebene: Wegeauswahl und
- die operationale Ebene: Bewegungsverhalten.

In der strategischen Ebene werden langfristige Entscheidungen getroffen, wie die Festlegung der Reihenfolge der Handlungen. Hierbei handelt es sich um wissensbasiertes Verhalten. Aufgrund dieser Entscheidungen werden in der taktischen Ebene, mittel- bis kurzfristige Entscheidungen getroffen, wie die Auswahl der gewünschten Route. Die taktische Ebene lässt sich demnach als

ein Regelbasiertes Verhalten in Reaktion auf die Umgebung beschreiben. Diese Entscheidungen resultieren dann in die operative Ebene. Hierbei handelt es sich um die Ausführung der Entscheidung aus der taktischen Ebene und wird auch als wissensbasiertes Verhalten beschrieben

Das Ziel einer Modellierung ist es, komplexe Beobachtungen der Realität zu reproduzieren und die Modellgrundlagen zu validieren. Die Grundlage der Modellierungen beruhen auf den grundlegenden Verhaltensweisen und den Bewegungscharakteristiken der Fußgänger, die die Einrichtungen nutzen. Die Bewegungscharakteristik der Fußgänger kann mit Hilfe von verschiedenen Messgrößen ausgedrückt werden. Diese sind die Geschwindigkeit, die Dichte und der Fluss des Fußgängerstroms.

Anhand der Messgrößen wird eine quantitative Aussage über die Simulation ermöglicht. Die Beziehung der Messgrößen kann in Fundamentaldiagrammen dargestellt werden.

In der Verkehrsflusstheorie wird der Zusammenhang zwischen den makroskopischen Verkehrsmerkmalen: *Fluss* (q), *Dichte* (k) und *Geschwindigkeit* (u), als grundlegender Zusammenhang wie folgt beschrieben (Daamen):

$$(1) \quad q = k \cdot u$$

Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Messgrößen definiert und die Berechnungsmethoden vorgestellt.

2.1.1 Fluss

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Ansätze, um den Personenfluss zu berechnen.

Beim ersten Ansatz wird der Fluss (J) als ein Maß definiert, wie viele Personen ΔN in einem Zeitintervall Δt eine Messstelle passieren (Rogsch 2014).

$$(2) \quad J = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Der zweite nachfolgend betrachtet den Fluss in Anlehnung der Dynamik von Flüssigkeiten. Der Fluss (J) stellt demnach das Produkt aus der Dichte (ρ), der Geschwindigkeit (v) und der Breite des Weges (b) dar (Rogsch 2014).

$$(3) \quad J = \rho \cdot v \cdot b$$

Bezogen auf den Fußgängerverkehr bezeichnet der Fluss die Anzahl der Fußgänger, die in einer bestimmten Zeiteinheit einen Querschnitt einer Einrichtung passieren. Die gängige Einheit für

den Durchfluss ist $P/(m \cdot s)$. Die Formel steht für Fußgänger pro Meter Breite pro Sekunde. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Berechnung des Personenflusses anhand der Gleichung (2).

2.1.2 Dichte

Ähnlich wie bei der Berechnung des Personenflusses gibt es auch bei der Ermittlung der Personendichte zwei verschiedene Ansätze. Grundsätzlich ist die Dichte (ρ) als Anzahl der Fußgänger, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem Gebiet aufhalten definiert.

Die geläufigste Berechnung der Personendichte erfolgt über nachfolgend dargestellte Gleichung. Die Personendichte (ρ) stellt den Quotienten aus der Personenzahl (N) und der Grundfläche (A), die die Personen beanspruchen dar (Rogsch 2014).

$$(4) \quad \rho = \frac{N}{A}$$

Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Personendichte wurde erstmals von Predtetschinski und Milinski formuliert. Die Personendichte stellt den Quotienten aus der Personenzahl (N) und der Grundfläche (A), die die Personen beanspruchen dar. Die Dichte wird hier mit D bezeichnet. $\sum f$ ist der Gesamte, auf die Grundfläche projizierte Platzbedarf der Personen und A die betrachtete Grundfläche. Zur Ermittlung des Platzbedarfs wird eine Ellipse als senkrechte Projektion des menschlichen Körpers angenommen. Die Breite wird an den Schultern, die Länge in Höhe der Brust gemessen (Predtetschinski und Milinski)

$$(5) \quad D = \frac{\sum f}{A}$$

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Berechnung der Personendichte anhand der Umstellung der Flussgleichung (2).

2.1.3 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit (v) steht für die durchschnittliche Geschwindigkeit von Fußgängern, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einer Fläche aufhalten. Die Berechnung erfolgt durch den Quotienten aus dem zurückgelegten Weg Δs der dafür benötigten Zeit Δt .

$$(6) \quad v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

2.1.4 Fundamentaldiagramme

Die Fundamentaldiagramme haben ihren Ursprung in der Verkehrstechnik und wurden zur Visualisierung der Zustandsgleichungen des Verkehrsflusses genutzt. Mithilfe von Fundamentaldiagrammen ist es möglich unterschiedliche Verkehrsphasen zu beschreiben. Dabei ist die Betrachtung der Stausituationen relevant.

Diese Stausituationen treten ebenfalls bei Fußgängersimulationen auf, daher ist eine Betrachtung der Fundamentaldiagramme hilfreich. Obwohl eine Vielzahl von Fundamentaldiagrammen existieren, werden diese durch gleiche Eigenschaften charakterisiert. Der Fluss nimmt zunächst bis zu einem Maximum zu, flacht dann ab und geht in einen Stau über.

Die fundamentale Beziehung zwischen den Messgrößen, Fluss, Dichte und Geschwindigkeit wird üblicherweise durch die drei miteinander verbundenen Fundamentaldiagramme dargestellt: dem Flussdichte-, Geschwindigkeitsdichte- und Geschwindigkeitsflussdiagramm.

Eine typische hypothetische Beziehung zwischen einer Verkehrsströmung und der Dichte ist in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 1) dargestellt.

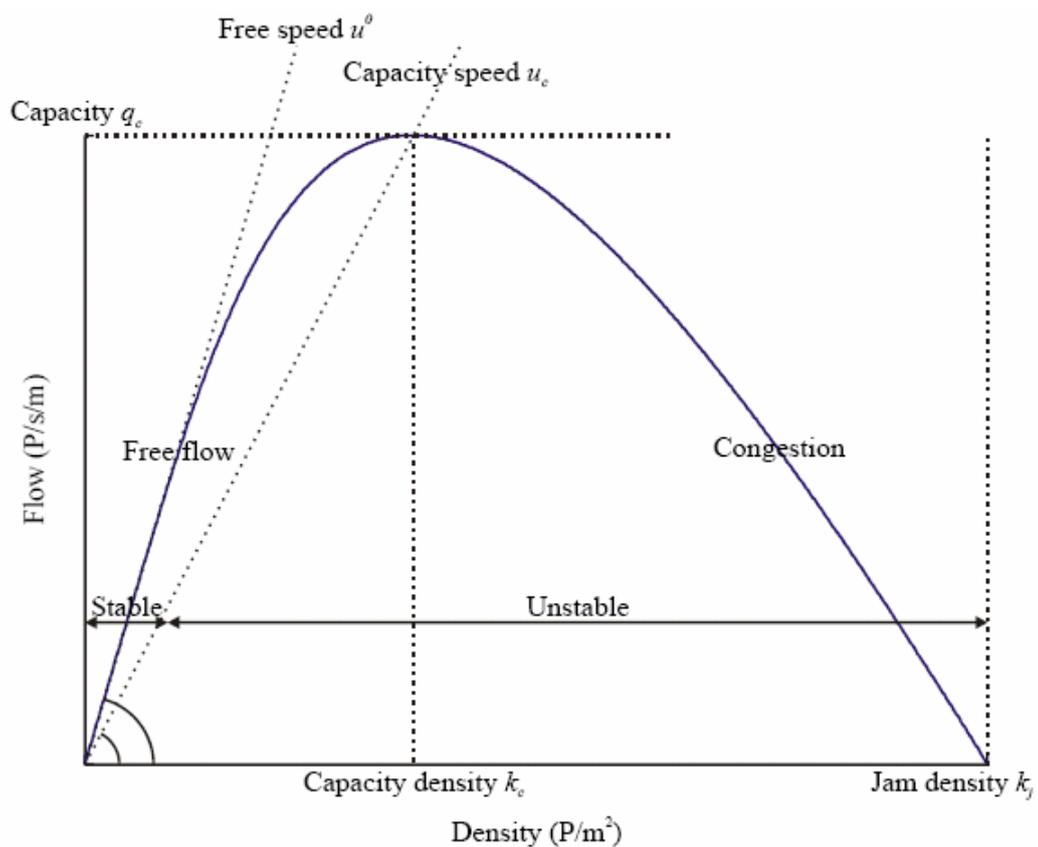


Abbildung 1: Beziehung zwischen der Strömung und der Dichte (Daamen).

2 Stand der Wissenschaft

Zunächst werden die Begrifflichkeiten, die im Diagramm zu finden sind, erläutert. Unter der *freien Geschwindigkeit* (u^0) wird die Geschwindigkeit eines Verkehrsstroms unter Bedingungen des freien Flusses verstanden und entspricht der Steigung der Funktion $q(k)$ im Ursprung. Die *Kapazität* (q_c) beschreibt den maximalen oder den kritischen Durchfluss. Bei der *Kapazitätsdichte* (k_c) handelt es sich um die Dichte, bei dem der Durchfluss gleich der Kapazität ist. Bei der *Kapazitätsgeschwindigkeit* (u_c) handelt es sich um die Geschwindigkeit, wenn der Durchfluss der Kapazität entspricht. Unter der *Staudichte* (k_j) wird die Dichte bei extrem beengten Bedingungen verstanden, wenn sowohl die Geschwindigkeit als auch der Durchfluss gleich Null sind. Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann eine Unterteilung basierend auf der Dynamik von Störungen oder der Stabilität in einen *stabilen Bereich* oder einen *instabilen Bereich* eingeteilt werden. Der instabile Bereich kennzeichnet sich hierbei durch eine Abnahme der Geschwindigkeit mit einer zunehmenden Dichte. Der stabile Bereich hingegen durch eine konstante Geschwindigkeit. Des Weiteren erfolgt eine Unterteilung in eine *freie Flussregion* und eine *Überlastregion*. Der freie Flussbereich kennzeichnet den Teil, in dem die Dichten kleiner als die Kapazitätsdichten sind. Im Gegensatz dazu kennzeichnet die Überlastregion den Teil, in dem die Dichten größer als die Kapazitätsdichten sind (Ziemer; Malveira)

2.2 Erläuterung der verschiedenen Fußgängermodelle

Es existieren viele verschiedene Arten von Fußgängermodellen. Jede dieser Modelle beruhen auf bestimmten Annahmen und vernachlässigen bestimmte Aspekte. Nachfolgend werden die verschiedenen Arten kurz vorgestellt und voneinander abgegrenzt.

So gibt es Modellansätze, die sich in der Betrachtungsweise der Fußgänger unterscheiden, zum einem den *mikroskopischen* zum anderen den *makroskopischen* Ansatz. Bei dem mikroskopischen Ansatz werden die Fußgänger individuell betrachtet. Das ermöglicht eine Analyse der speziellen Eigenschaften der einzelnen Fußgänger. Bei dem makroskopischen Ansatz wird die Menschenmasse als ein Ganzes betrachtet. Die Fußgänger als Einzelpersonen können dabei nicht unterschieden werden. Stattdessen wird der Zustand des Systems durch Zeit- und Raummittelwerte von Dichte, Geschwindigkeit und Fluss beschrieben (Chraibi et al.).

Ansätze mit der Beschreibung eines Systems von Fußgängern, anhand der drei variablen Basisvariablen: Raum, Zeit und Zustand, unterscheiden sich in ihren Betrachtungsmerkmalen. Diese können sowohl *diskrete Merkmale* als auch *stetige Merkmale* aufweisen. Bei einer Modellierung mit diskreten Merkmalen können nur endlich viele Ausprägungen angenommen werden. Bei einer Modellierung mit stetigen Merkmalen können unendlich viele Ausprägungen angenommen werden (Chraibi et al.).

Die Darstellung der Dynamiken von Fußgängern kann anhand von *deterministischer Modellierung* oder *stochastischer Modellierung* erfolgen. Die deterministische Modellierung basiert auf bekannten oder hypothetischen physikalischen Gesetzen, mathematischen Gesetzen oder Gesetzen aus anderen Disziplinen. Dieselben Eingabewerte werden daher immer zu denselben Bewegungen führen. Im Gegensatz dazu steht die stochastische Modellierung. Hier werden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen genutzt. Somit werden bei gleichbleibenden Eingabewerten unterschiedliche Bewegungen erzielt. Die stochastische Modellierung ermöglicht zwar eine realistischere Darstellung komplexer Fußgänger Massen, jedoch werden physikalische Prozesse nicht berücksichtigt (Chraibi et al.).

Hinzu gibt es Modellansätze, welche sich in der Betrachtungsweise der Fußgängerbewegung unterscheiden. So gibt es *beschleunigungsbasierte*, *geschwindigkeitsbasierte* und *regelbasierte* Modelle. Bei dem Beschleunigungsbasierten und Geschwindigkeitsbasierten Ansatz erfolgt die Bestimmung der neuen Position der Fußgänger durch die Lösung von Differentialgleichungen. Basiert die Bewegung der Fußgänger auf der Beschleunigung, ist das Lösen einer Differentialgleichung zweiter Ordnung erforderlich. Bei der Simulation von Fußgängern wird der beschleunigungsbasierte Ansatz in der Regel eher selten genutzt, da bei einer Beschreibung der Wechselwirkung der Kräfte auch die Trägheit mit in Betracht gezogen werden muss. Die Trägheit von Fußgängern ist jedoch kaum vorhanden. Bei Geschwindigkeitsbasierten Modellen hingegen ist eine Lösung einer Differentialgleichung erster Ordnung erforderlich. Dieser Modellansatz beruht auf Kollisionsvermeidung und Geschwindigkeitsoptimierungsprinzipien. Dadurch ist diese Art von Modellen für Simulationen leicht berechenbar und wird häufiger verwendet. Eine weitere Möglichkeit, ist der regelbasierte Modellansatz. Dieser beruht im Gegensatz zu den

2 Stand der Wissenschaft

zwei vorherigen Ansätzen nicht auf Differentialgleichungen. Dieser Modellansatz basiert auf den Entscheidungen, die der Fußgänger tätigt. Diese Entscheidungen geben Auskunft über die angestrebte Position und/oder die Geschwindigkeit, zudem wird die gewünschte Bewegungsrichtung als auch mögliche Hindernisse berücksichtigt (Chraibi et al.).

Zur Anpassung empirischer Daten werden sowohl *heuristische Verfahren* als auch *Verfahren, die auf Grundprinzipien* basieren, genutzt. Charakteristisch für heuristische Verfahren ist die hohe Anzahl an Interaktionstermen, die durch Parameter des Modells definiert werden. Bei Verfahren, die auf den Grundprinzipien basieren, werden die bestimmten Parameter als grundlegend angenommen. Eine klare Abgrenzung beider Verfahren voneinander ist nicht möglich (Chraibi et al.).

Modelle mit einer *hohen Wiedergabetreue* zielen darauf ab die Komplexität von Entscheidungen zu erfassen und die Fußgängerbewegung realistisch darzustellen. Modelle mit *geringer Wiedergabetreue* hingegen betrachten Fußgänger als einfache Teilchen ohne jegliche Reizreaktionen und ohne die Fähigkeit zur Entscheidungsfindung (Chraibi et al.).

2.3 Fahrtreppen

Fahrtreppen werden in der heutigen Zeit in der Planung von öffentlichen Gebäuden mit einbezogen. Diese ermöglichen eine inklusionsgerechte Gestaltung und eine bequeme Zugänglichkeit für Fußgänger. Sie verfügen über eine hohe Transportkapazität, sind offen und befördern Personen kontinuierlich. Zudem sorgen sie für eine gleichmäßige Frequentierung von Personen auf mehreren Ebenen und können eine Lenkung des Personenstroms bewirken.

2.3.1 Definition

Bei Fahrtreppen, die umgangssprachlich Rolltreppen genannt werden, handelt es sich um ein Personenbeförderungsmittel zur Überwindung von Höhendistanz, bei dem sich durch bewegende Metallsegmente Treppenstufen ausbilden.

Die Euronorm EN 115 definiert die Fahrtreppen unter 3.1.9 wie folgt:

„kraftbetätigte, geneigte, sich kontinuierlich bewegende Treppe zum Heben und Senken von Personen, bei der die den Nutzer aufnehmende Fläche (z. B. Stufe) horizontal verbleibt“. DIN EN 115-1

Fahrtreppen werden als Maschinen klassifiziert, daher müssen diese im Brandfall oder im Notfall abgeschaltet werden. Zudem können diese nicht als fest eingebaute Treppen betrachtet werden.

Des Weiteren sind die Geschwindigkeiten der Fahrtreppen standardisiert, sie dürfen sich nur mit Geschwindigkeiten von 0,5 m/s, 0,65 m/s oder maximal 0,75 m/s fortbewegen.

2.3.2 Funktionsweise

Eine Fahrtreppe besteht aus zwei Ketten, die sich um zwei Zahnradpaare drehen. Die Ketten bestehen aus ineinandergeschlungenen Stufen. Am oberen Ende der Fahrtreppe befindet sich ein Elektromotor, der das Getriebe antreibt, um die Ketten zu drehen. In den gängigen Fahrtreppen ist ein 100-PS-Elektromotor verbaut (Harris)

Der Motor und das Kettensystem sind in einem Fachwerk montiert. Der Rahmen bezieht sich auf die Metallstruktur, die sich zwischen den beiden Etagen erstreckt. Die Ketten sind durch einen Seilzug miteinander verbunden. Der Seilzug erstreckt sich vom Anfang bis zum Ende der Fahrtreppe. Durch das Rotieren der Zahnräder wird durch eine mechanische Kraftübertragung der Seilzug bewegt und damit die Stufen in Bewegung gebracht (Harris).

Im Gegensatz zu einem Förderband, das eine ebene Fläche bewegt, bewegt sich die Kette in mehreren Schritten. Während sich die Kette bewegt, bleiben die Stufen horizontal. Oben und unten an der Rolltreppe sind die Stufen gegeneinander gefaltet, um eine ebene Plattform zu bilden (Harris).

Jede Stufe der Rolltreppe verfügt über zwei Rädersatz, die sich entlang zweier separater Schienen drehen. Das Rad am oberen Ende der Stufe ist mit der rotierenden Kette verbunden und wird vom Antriebszahnrad, mittels eines Seilzuges, oben an der Rolltreppe gezogen. Die Räder der anderen Gruppe gleiten hinter dem ersten Satz Räder entlang der Schiene (Harris).

2 Stand der Wissenschaft

Zwischen den beiden Bahnen wird ein bestimmter Abstand sichergestellt, sodass jede Stufe horizontal gehalten wird. Am oberen und unteren Ende der Rolltreppe sind die Schiene in einer horizontalen Position angebracht, so dass die Stufen abgeflacht sind. In jeder Stufe befinden ist Reihe von Rillen, um die beiden Stufen während des Abflachungsprozesses miteinander zu verbinden. Dies erleichtert den Ein- und Ausstieg für die Passanten und verringert die Gefahren des Stolperns (Harris).

Neben dem Drehen des Hauptkettenblattes kann der Motor in der Fahrtreppe auch den Handlauf bewegen. Der Handlauf ist nur ein Gummiförderer, der um eine Reihe von Rädern zirkuliert. Das Förderband ist so konfiguriert, dass es sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Stufen bewegt.

Die Breiten von Fahrtreppen können an unterschiedlichen Anforderungen von Fußgängerverkehr, Fahrgeschwindigkeit, Entfernung und Nutzung angepasst werden. Bei der Festlegung der geeigneten Breite wird in der Regel zwischen drei Standard-Designbreiten unterschieden. Es gibt die Breiten 61, 82 und 102 cm. Das Modell mit der Breite von 61 cm eignet sich nur für jeweils eine Person und werden verwendet, wenn der Verkehr begrenzt oder der verfügbare Platz zu knapp ist. Bei einer Breite von 82 cm wird dem Nutzer mehr Flexibilität geboten und ermöglicht genügend Platz für eine weitere Person. Die Breite von 102 cm bietet Platz für zwei Personen und ist darüber hinaus breit genug für zwei Fahrspuren (Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige).

Der übliche Standard der Neigung von Fahrtreppen liegt zwischen 30° und 35° . Bei einer Neigung von circa 30° ist der höchste Fahrkomfort und die größte Sicherheit für die Benutzer zu erwarten. Eine Neigung von 35° stellt die wirtschaftlichste Lösung dar, da sie weniger Raum benötigen und die Herstellung auch preisgünstiger ist. Allerdings wird die Neigung von 35° bei Förderhöhen über sechs Metern als zu steil empfunden. Aus diesem Grund ist diese Neigung bei Förderhöhen über sechs Metern gemäß der EN 115 nicht zulässig (Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige; DIN EN 115-1).



Abbildung 2: Aufbau einer Fahrtreppe. (Quelle: Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH, Berlin)

2.3.3 Anwendungsbereiche

Das Fahrtreppensystem ermöglicht hingegen zu einem Aufzug nicht den Aufstieg auf mehrere Dutzend Stockwerke, ist jedoch beispielsweise für den Nahverkehr gut geeignet. Dies liegt an der hohen Lastrate der Fahrtreppe. Wird die maximale Kapazität des Aufzugs erreicht, muss abgewartet werden, bis das angegebene Stockwerk erreicht wird und zu den anderen Personen zurückkehren kann, um den Aufzug erneut zu beladen. Auf der Fahrtreppe wird eine Person, solange sie die obere Ebene erreicht, Platz für andere schaffen und sorgt damit für einen kontinuierlichen Personenfluss.

Es gibt zwei gängige Arten von Fahrtreppen. Zum einem die *Kaufhaustreppe* zum anderen die *Verkehrstreppe* (Unger).

2 Stand der Wissenschaft

Die *Kaufhaustreppen* finden eine Anwendung in Innenräumen von Gebäuden. Die Charakteristik der Kaufhaustreppe zeichnet sich dadurch aus, dass das Traggerüst nicht verzinkt wird und die einzelnen Komponenten der Fahrtreppe weniger robust hergestellt werden, wie Verkehrsfahrtreppen. Zudem wird bei dieser Fahrtreppenart häufig ein Flachhandlauf montiert (Unger).

Verkehrstreppen hingegen können aufgrund ihrer Eigenschaften und der Witterungsbeständigkeit der verwendeten Materialien nicht nur im Innenbereich sondern auch im Außenbereich genutzt werden. Die elektrischen Kontakte werden bei dieser Fahrtreppenart üblicherweise in IP65 eingesetzt (Unger).

An Bahnhöfen an denen eine Vielzahl von Fußgängern aussteigen, bilden sich zu Stoßzeiten, Engpässe an den Fahrtreppen. Die Fußgänger benötigt mehr Zeit zum Durchfahren der Strecke.

Hinzukommend lassen sich anhand der optimalen Geschwindigkeiten von Fahrtreppen drei verschiedene Anwendungsbereiche bzw. Empfehlungen unterscheiden.

Bei einem kontinuierlichem Kundenfluss wird eine Geschwindigkeit von 0,5 m/s genutzt. Diese Art von Fahrtreppen eignet sich für den kommerziellen Bereich. Sie bieten eine Kombination aus optimaler Sicherheit, einer ausreichenden Förderleistung und einem minimalen Platzbedarf. Diese Geschwindigkeit wird aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften als weltweiter Standard genutzt (Unger).

Für einen stoßweisen Förderbedarf, geschuldet durch eine stoßweise Ankunft von Personen wie etwa an Bahnhöfen oder in U-Bahnstationen, empfiehlt sich eine Geschwindigkeit von 0,65 m/s. Um bei dieser Art der Anwendung eine optimale Sicherheit gewährleisten zu können, sind bei diesen Geschwindigkeiten längere Horizontalläufe und größere Übergangsbögen vorgeschrieben.

Eine Geschwindigkeit von 0,75 m/s ist bei einer extremen Förderleistung möglich. Diese sind aber nicht empfehlenswert, da die praktische Förderleistung nicht mehr ansteigt und sich zudem die Sturzgefahr für beispielsweise ältere Personengruppen im An- und Abtritts-Bereich erhöht.

2.4 Freie Bewegungsgeschwindigkeit von Personen auf Fahrtreppen

Die Grundlage des Modells muss auf den Verhaltensweisen von Fußgängern beruhen, die die Fahrtreppen nutzen. In der Vergangenheit wurden vergleichbare Studien gemacht, wodurch es umfangreiche Literatur zu den Fähigkeiten von Fußgängern in Bezug auf ihre Fahreigenschaften gibt und wie Fußgänger den verfügbaren Raum innerhalb eines Systems nutzen.

Fußgänger bewegen sich unterschiedlich schnell. Die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit mit der sich die Fußgänger fortbewegen steht im Zusammenhang mit der Motivation, dem Alter, der jeweiligen Fitness des Fußgängers und der Umgebung und die Last, die mit sich geführt wird. In der Vergangenheit wurden viele Messungen der freien Geschwindigkeit für verschiedene Arten von Infrastrukturen durchgeführt. Darunter befinden sich Gehwege, Durchgänge, Treppen und Fahrtreppen. In Tabelle 1 sind die horizontalen Geschwindigkeiten einseitiger Strömungen auf Gehwegen/Durchgängen, Treppen und Fahrtreppen angegeben. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Geschwindigkeiten auf Gehwegen und Durchgängen höher sind als bei vertikalen Bewegungen, wie es bei Treppen üblich ist. Bei den Treppen und Fahrtreppen sind die Geschwindigkeiten in absteigender Richtung höher als in aufsteigender Richtung.

	Autor und Jahreszahl	Betrachtungsort	Freie Bewegungsgeschwindigkeit (m/min)	
	Gehwege/Durchgänge	Oeding (1963)	Deutschland	89,9
Older (1968)		Vereinigtes Königreich	78,64	
Navin & Wheeler (1969)		Vereinigten Staaten	97,6	
Fruin (1971)		Vereinigten Staaten	81,4	
Gerilla (1995)		Philippinen	83,23	
Sarsam und Abdulameer (2015)		Irak	51,31	
Tanaboriboon et al. (1991)		Singapur	73,9	
Treppen				Aufwärts
	Fruin	Vereinigten Staaten	33,6	39
	Weidmann	Schweiz	36,6	41,4
Fahrtreppen				
	Sukor et al (2018)	Malaysia	45,3	47,16

Tabelle 1: Freie Bewegungsgeschwindigkeiten auf Gehwegen, Treppen (Mohd, Khairul Afzan Mohd Lazi und Masria) und Fahrtreppen (Sukor et al.) die in verschiedenen Ländern und Studien ermittelt wurden.

2.4.1 Fahrende Fahrtreppen

Um die durchschnittliche Geschwindigkeit von Fußgängern auf einer fahrenden Fahrtreppe zu bestimmen, werden zunächst die Rahmenbedingungen bestimmt. So ist zu differenzieren, ob die Fußgänger zusätzlich zur bereits vorhandenen Geschwindigkeit der Fahrtreppe noch einen Anteil aus eigener individueller Gehgeschwindigkeit beitragen, wodurch eine höhere Gehgeschwindigkeit erreicht werden wird. Bei der im weiteren Verlauf der Thesis folgenden Simulation werden die Fußgänger als stehend betrachtet. Somit wird der Eigenteil zur Erhöhung der Gehgeschwindigkeit vernachlässigt. Jedoch gibt es Studien, die die unterschiedlichen Bewegungen von Fußgängern auf Fahrtreppen untersucht haben (Ohtake und Kishimoto; Ding et al.; Li et al.). Diese Studien basieren auf Feldmodellen und wurden in verschiedenen Ländern getätigt. Derartige Studien bieten nur eine Sofortaufnahme der Situation und bieten keine hohe Reproduzierbarkeit.

2.4.2 Stehende Fahrtreppen

Neben den bereits beschriebenen fahrenden Fahrtreppen, kann es vorkommen, dass die Fahrtreppen aufgrund eines Gefahrenfalls ausgeschaltet werden. Obgleich es aus Sicherheitsgründen nicht erlaubt ist, Fahrtreppen als einen Rettungsweg zu nutzen, so ist es möglich, dass Personen sich in Notsituationen dazu entscheiden, die Fahrtreppe zu nutzen. Die Nutzung der Fahrtreppe wird aufgrund möglicher Staubildungen auf dem regulären Rettungsweg als schneller empfunden. Jedoch ist zu beachten, dass das Stufenmaß für Fahrtreppen anders konzipiert wird als das einer regulären Treppe. Das Stufenmaß einer regulären Treppe entspricht nachfolgender Faustregel:

$$(7) \quad 2 \times \text{Stufenhöhe} + 1 \times \text{Stufentiefe} = 63 \text{ cm.}$$

Dieser Wert richtet sich nach der Schrittlänge des Menschen, welches zwischen 59 cm und 65 cm liegt.

Das Stufenmaß von Fahrtreppen hingegen orientiert sich nicht an diesen Wert. Bei Fahrtreppen orientiert sich das Steigungsverhältnis der Stufen an die Standsicherheit, die für die Nutzer gewährleistet werden soll (Gruevska).

2.5 Evakuierung im Bahnhof

Laut Schadschneider et al. gibt es zwei besondere Umstände für eine Evakuierung. Zu einem das Vorhandensein einer oder mehrerer Gefahren. Zum anderen das Fehlen der strategischen Ebene der Entscheidungsfindung. Beide Umstände haben das Ziel, an einen sicheren Ort zu gelangen.

2.5.1 Aufbau eines Bahnhofs

Bei einem Bahnhof handelt es sich um eine Einrichtung mit Bahnsteigen und zugehörigen Gebäuden für einen Zug zum Aufnehmen und Absetzen von Fahrgästen. Der Bahnhof ist eine der berühmtesten Schöpfungen der industriellen Revolution, und der Schienenverkehr ist für den Transport von Gütern und Personen unverzichtbar geworden.

Die effiziente Gestaltung des Bahnhofs soll eine homogene Struktur und einen logischen Fahrgastfluss schaffen, der ein einfaches, nahtloses, sicheres Ankommen, Warten und Umsteigen auf andere Verkehrsträger ermöglicht (Railway Stations 2021)

Bahnhöfe werden anhand folgender Merkmale klassifiziert (Railway Stations 2021):

- Territoriale Größe
- Geografische Lage
- Funktion
- Häufigkeit der Nutzung:
 1. Typ 1 > 50.000 ankommende Passagiere/Tag
 2. Typ 2 > 30.000 ankommende Passagiere/Tag
 3. Typ 3 > 10.000 – 30.000 ankommende Passagiere/Tag
 4. Typ 4 < 10.000 ankommende Passagiere/Tag

- Stufe der Angebotsqualität
- Rolle im städtischen Verkehrsnetz
- Verkehrsreichweite
 1. Fernverkehr
 2. Fern- und Regionalverkehr
 3. Hoher Regionalverkehr
 4. Mittlerer Regionalverkehr
 5. Geringer Regionalverkehr

2 Stand der Wissenschaft

Ein Bahnhof ist ein großes Konstrukt, das sowohl das Bahnhofsgebäude als auch andere Einrichtungen umfasst. Der Bahnhofsbereich wird in der Regel durch einen Haupteingang als Mittelpunkt gekennzeichnet, um die Orientierung für die Nutzer zu erleichtern und Funktionen zu bündeln.

Ein logisch konzipierter und organisierter Bahnhof begrenzt die Wartezeit der Fahrgäste auf den Umstieg. Der Bahnhof sollte leicht verständlich und schnell zu orientieren sein. Die Gehzeiten zu den Bahnsteigen werden durch den Einbau von steigungsgetrennten Durchgängen minimiert. Bahnhöfe werden normalerweise in vier Hauptbereiche unterteilt. Den Ankunftsbereich, den Servicebereich, den Kommunikationsbereich und den Plattformbereich (Railway Stations 2021).

Bei dem Ankunftsbereich handelt es sich um den äußeren Bereich und dient zum Aufnehmen und Absetzen von Personen. In der Regel besteht dieser Bereich aus Bushaltestellen, Parkplätzen, Taxiständen und Fußwegen. Diese Zone kann sich auf beiden Seiten eines Bahnhofs befinden, wobei sich die Hauptseite an einer Bushaltestelle befindet. Dem folgt eine Seite mit den Parkplätzen. Diese Art von Unterteilung ermöglicht eine Verbesserung der Integration verschiedener Verkehrsträger auch in verkehrsreichen Stadtvierteln. Sie ermöglichen einfache Verkehrs- und Bewegungsmuster in der Bahnhofsumgebung (Railway Stations 2021).

Der Servicebereich kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Einige beziehen sich direkt auf die Reise und weitere die nicht zwangsläufig erforderlich sind. Zu den wichtigsten Dienstleistungen der Servicezone gehören der Fahrkartenverkauf, die Fahrkartenautomaten, die Informationsschalter, die Verkehrsinformationen, die Toiletten und der Wartebereich. Weitere zusätzliche Dienstleistungen sind die Gepäckaufbewahrungen, Kioske, Restaurants, Geldautomaten, Parkplätze Hotels und Geschäfte. Die wichtigen Dienstleistungen sind in der Regel so platziert, dass sie sich in den Hauptkorridoren und Kreuzungen befinden. Die weniger relevanten Dienstleistungen sind hingegen über den restlichen Bahnhof verteilt platziert. Die Trennung von wichtigen Dienstleistungen und weniger wichtigen kommerziellen Dienstleistungen ermöglichen einen reibungslosen Betrieb (Railway Stations 2021).

Der Kommunikationsbereich verbindet den Ankunftsbereich mit den Bahnsteigen in der Regel über den Servicebereich. Er hilft, die funktionale Leistung des Bahnhofs durch gut gestaltete barrierefreie Aufzüge, Fahrtreppen, Treppen, Brücken und Unterführungen zu verbessern. Der Kommunikationsbereich wird so konzipiert, dass er optisch klar ersichtlich ist, gut abgegrenzt ist und auch über eine gute Beleuchtung verfügt (Railway Stations 2021).

Der Plattformbereich ermöglicht den Personen das Ein- und das Aussteigen aus Zügen. Auf den Bahnsteigen im Plattformbereich sind Warteplätze vorzusehen. Zudem sollten diese auch geschützt werden, um den Komfort beim Warten zu fördern. Plattformbereiche können in Fußgängerzonen für langsame und schnelle Personen, Sitzgelegenheiten, Unterstände und Verkehrsinformationen eingeteilt werden (Railway Stations 2021).

2.5.2 Evakuierung im Bahnhof

Öffentliche Orte, zu denen auch Bahnhöfe gehören, sind meist stark besuchte Orte an denen Personen an täglichen öffentlichen Aktivitäten teilnehmen. Sie gehören für viele zu den unverzichtbaren Bestandteilen im Alltäglichem Leben.

Bei einer Bahnhofsevakuierung ist davon auszugehen, dass der Personenstrom im Vergleich zum Normalbetrieb, stark zunehmen wird. Viele Personen, die den Bahnhof nur vorhaben zu passieren, müssen unter Umständen aussteigen und sich an einen sicheren Ort begeben. Aufgrund des Überlebensinstinktes ist auch die erwartete Gehgeschwindigkeit der zu Evakuierenden während der Evakuierung viel höher als die normale Gehgeschwindigkeit. Laut Helbing (Dirk Helbing, Illes J. Farkas, Peter Molnar, and Tamas Vicsek) werde sich aber dieser Effekt gegenteilig auswirken. So wird davon ausgegangen, dass sich die tatsächliche Geschwindigkeit aufgrund des sich bildenden Staus verlangsamen wird. Tatsächlich ist die durchschnittliche Evakuierungsgeschwindigkeit immer niedriger als die normale Gehgeschwindigkeit, weil eine Beschränkung von Ausgang, Treppe und Durchgang vorliegt. Offenbar ist die anzunehmende Dichte des Fußgängerstroms im Notfall viel höher als in einer normalen Situation. Eine hohe Dichte ist ein weiterer Grund, der zu einer geringen Evakuierungsgeschwindigkeit und einem ernsthaften Stau während der Evakuierung führt.

2.6 Fußgängersimulation

Die Simulation von Fußgängern erlangt eine immer größere Relevanz. In vielen Fällen ist es sowohl nicht möglich als auch nicht sinnvoll das Verhalten von Fußgängern in bestimmten Situationen empirisch zu beobachten und zu analysieren. Durch die wachsende Urbanisierung der Städte, ist es erforderlich Menschenmengen und Fußgängerbewegungen zu ermitteln, um diese Ergebnisse in die Planung von (Groß-)Veranstaltungen, baulichen Anlagen, in der Entwicklung von Evakuierungsszenarien und in der Analyse des menschlichen Verhaltens mit einfließen lassen zu können. Viele der zu ermittelnden Szenarien existieren noch nicht. Entsprechende Testbauten mit Testpersonen sind teuer, aufwändig in der Umsetzung sind und mit Sicherheitsrisiken verbunden sind, dienen Simulationen als praktische Alternative.

Bevor eine Simulation gestartet werden kann, werden zunächst notwendig grundlegende Parameter festgelegt. Diese dienen dazu das Szenario zu beschreiben und dienen als Eingabeparameter für das Simulationsmodell.

Welche Eingabeparameter das jeweilige Modell benötigt hängt stark vom Modell und seiner Implementierung ab. Wichtige Parameter, die für die Simulation mit makroskopischen Modellen benötigt werden sind, nachfolgend aufgelistet.

- Platzbedarf einer Person/ maximalen Dichten
- Simulationszeit (um sowohl den Rechenaufwand als auch die Datenmenge gering zu halten, sollte die Simulationszeit begrenzt werden)
- Geschwindigkeitsverteilung
- Gruppengrößenverteilung

Für die simulierten Fußgänger werden dann zufällige Werte entsprechend der Verteilung bestimmt. Mit der Eingabeparameter werden auf der Grundlage des gewählten Simulationsmodells, die Simulationsergebnisse erzeugt. Die erzeugten Ergebnisse können je nach Simulationsmodell und angewendetem Szenario unterschiedliche Inhalte und Strukturen haben.

2.6.1 Gängige Softwares in der Simulationsanalyse

Wie bereits im Vorfeld erwähnt erlangt die Simulation von Fußgängerströmen immer mehr an Relevanz. Entsprechend des steigenden Interesses in der Forschung existiert bereits eine Vielzahl an Programmen für Fußgängersimulationen. Laut (KRETZ 2007) existierten im Jahre 2007 etwa 50 Programme bzw. Modellierungsansätze. Nachfolgend werden einige Softwares vorgestellt, wobei das Augenmerk hier auf frei verfügbare Programme gelegt wurde (Berkhahn et al.).

So gibt es das Simulationsprogramm VISSIM, das für *Verkehr In Städten – Simulationsmodell* steht und in den 90er Jahren entwickelt wurde. Bei der Software handelt es sich um ein mikroskopisches und raumdiskretes Verkehrssimulationsprogramm der Firma PTV AG. Das Modell ermöglicht es den motorisierten Individualverkehr, den Güterverkehr, den Schienen- und Straßengebundenen öffentlichen Verkehr, Fußgänger und Fahrradfahrer abzubilden. Zudem bietet VISSIM verschiedene Analysemöglichkeiten, um detaillierte numerische Ergebnisse oder auch 3D-Animationen für verschiedene Szenarien auszugeben werden. Das Programm bietet

2 Stand der Wissenschaft

verschiedene LOS-Schemata für die Auswertung der Ergebnisse. VISSIM nutzt das Social-Force-Modell zur Berechnung der Fußgängerdynamiken. Des Weiteren beschreibt das Modell die Interaktion von Menschen als soziale Kräfte und Fußgänger werden hier als selbstgetriebene Teilchen dargestellt. Diese stehen in Wechselwirkung über abstoßende Kräfte mit anderen Fußgängern und Wänden (PTV GROUP)

Bei NetLogo handelt es sich um eine Multi Agenten Simulation, welches von Wilensky 1999 verfasst wurde und am Center for Connected Learning and Computer Based Modeling seither kontinuierlich weiterentwickelt wird. Mithilfe dieses Modells besteht die Möglichkeit komplexe Systeme zu simulieren. Dabei ist es möglich den simulierten Personen Anweisungen zu geben, die alle unabhängig voneinander arbeiten. Dies ermöglicht den Zusammenhang zwischen dem Verhalten auf der Mikroebene und den Mustern auf der Makroebene zu betrachten (Wilensky).

Ein weiteres Simulationsprogramm ist das Programm PedGo womit Evakuierungsanalysen durchgeführt werden. Dieses Programm wurde von der Firma TraffGo HAT GmbH in Duisburg entwickelt. Bei PedGo handelt es sich ebenfalls um eine Multi Agenten Simulation, welches auf einem zellularen Automaten aufbaut. Die simulierten Personen bewegen sich hier von Zelle zu Zelle. Das Programm besteht aus drei verschiedenen Komponenten: dem Editor, dem Simulator und dem Viewer (TraffGo HT GmbH).

Bei dem nächsten Programm handelt es sich um den *Fire Dynamic Simulator with Evacuation*, kurz FDS+ Evac. Das Programm wurde in Zusammenarbeit mit dem National Institute of Standards and Technology, dem U.S Department of Commerce und dem VTT Building and Transport aus Finnland entwickelt, um Brand- und Evakuierungssimulationen durchzuführen. Das zugrunde liegende Programm ist in der Programmiersprache Fortran 2003 geschrieben. Das Begleitprogramm Smokeview, dient der graphischen Darstellung der Simulationsergebnisse und ist in den Programmiersprachen C/OpenGL geschrieben. Das Evakuierungsberechnungsmodul, welches von VTT entwickelt wurde, ist als Unterprogramm in FDS implementiert (Korhonen).

Bei dem Simulationsprogramm JWalkerS handelt es sich um ein Simulationsmodell, das auf einem modifizierten Soziale Kräfte-Modell basiert und die Bewegungen der Fußgänger mathematisch beschreibt. Das Programm ist in der Programmiersprache Java geschrieben und wurde am Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover entwickelt. In dem Programm wird das Gebiet, in dem sich die Fußgänger bewegen, als Objekt modelliert. Der Objektraum weist eine zweidimensionale Geometrie auf, mit dem dazugehörigen Koordinatensystem und einen Verweis auf alle Fußgänger im Gebiet. Jeder einzelne Fußgänger entspricht in der Simulation ebenfalls einem Objekt. (BASt-Bericht FE 77.452/2000)

2.6.2 Fußgängersimulation mit JuPedSim

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Simulationsprogramm handelt es sich um JuPedSim. Die Bezeichnung JuPedSim steht für Jülich Pedestrian Simulator. Das Programm wurde im Jahre 2015 im Forschungszentrum Jülich von Kemloh Wagoum et al. entwickelt.

Das Simulationsprogramm ist plattformunabhängig, welches unter der LGPL-Lizenz veröffentlicht wurde. Das Programm wurde in der Programmiersprache C++ und Python verfasst. Das Grundkonzept setzt sich aus vier losen gekoppelten Komponenten zusammen, die unabhängig voneinander genutzt werden können.

- **JPScore**, welche die Bewegungen und das Verhalten der Fußgänger berechnet.
- **JPSvis**, welches zur Visualisierung der berechneten Bewegungen der Fußgänger.
- **JPSreport**, welcher dazu dient unterschiedliche Ergebnisse zu erlangen.
- **JPSeditor**, hierbei handelt es sich um eine grafische Benutzeroberfläche, die das Erstellen der Geometrie ermöglicht.

Das Simulationsprogramm implementiert mehrere Modellierungsansätze für die Berechnung der Trajektorien. Es stehen beispielsweise verschiedene Kräfte-basierte Modelle, wie das generalisierte Zentrifugalkraftmodell (Chraibi et al. 2010) und diverse Geschwindigkeitsbasierte Modelle, wie u.a. das kollisionsfreie Geschwindigkeitsmodell (Chraibi et al.) zur Verfügung.

Die Abbildungen der Fußgänger erfolgen durch eine Ellipse, welche von der Geschwindigkeit der Fußgänger abhängt. Im Ruhezustand wird ein durchschnittlicher erwachsener Mann durch eine Ellipse mit den Maßen 0,45m x 0,6m angenähert werden. Auf dieser Grundlage wird das Modell durch die Einbeziehung verschiedener erschwerender Faktoren gestärkt. In weiteren Simulationen werden durch eine Variation der Maße und Geschwindigkeit der Ellipsen, Fußgänger mit Gepäck und verschiedene Altersgruppen abgedeckt.

Eine weitere wichtige Komponente des Simulationsprogrammes stellt das *Routing* dar. Dabei handelt es sich um Routenwahl-Algorithmen. Ziel des Algorithmus ist die Festlegung der Laufwege von Fußgängern (Kemloh Wagoum et al.).

Zum Standardalgorithmus zählt der *Global shortest path* (global kürzester Weg) Algorithmus, welcher alle Ausgänge aus der Geometrie erfasst.

Bei dem *local shortest path* (lokal kürzester Weg) Algorithmus wird der nächstgelegene Ausgang gesucht, um den aktuellen Raum oder Bereich zu verlassen.

Ein weiterer Algorithmus ist der *Quickest path* (schnellster Weg) Algorithmus und ermöglicht den Fußgängern auf die aktuelle Verkehrslage zu reagieren.

Als vierte Möglichkeit steht der Algorithmus der kognitiven Landkarte zur Verfügung.

Für die Anwendung von JuPedSim werden mindestens zwei Eingabedateien, mit einer xml-Format Struktur benötigt. Zum einem die Geometriedatei und zum anderen die Projektdatei. Mit Hilfe von diesen werden dann über den JPScore die Trajektorien der Fußgänger berechnet. In

dem Simulationsprogramm werden die Fußgänger als *agents* bezeichnet. Im weiteren Verlauf wird diese Bezeichnung für die Fußgänger genutzt werden (Kemloh Wagoum et al.).

Die Geometriedatei stellt die Struktur des zu evakuierenden Gebäudes dar. Die Geometrie wird für das Simulationsprogramm in Räume (*rooms*) unterteilt. Diese werden wiederum in Unterräume (*subrooms*) gegliedert. Die Räume und die Unterräume werden durch Wände und Türen begrenzt. Eine Tür zwischen zwei Unterräumen wird als *crossing* bezeichnet. Die Tür zwischen zwei Räumen oder eine Tür zwischen einem Raum und einem Bereich, indem ein Agent als evakuiert gilt, wird als *transitions* bezeichnet. Des Weiteren können der Geometrie weitere Ebenen, durch Treppen oder Fahrtreppen hinzugefügt werden. Erste Visualisierung der Geometriedatei können mithilfe von JPSvis erfolgen. Dabei ist es wichtig, dass die Zuordnungen logisch sein müssen, da ansonsten bei der Berechnung der Simulation Fehler auftreten können und zu einem Abbruch der Berechnung führen wird (Kemloh Wagoum et al.).

Die Projektdatei enthält die Informationen, die zur Simulation der Agentenbewegungen benötigt werden. Eingangs muss angegeben werden, mit welcher Geometriedatei gearbeitet wird und wie die berechneten Trajektorien abgespeichert werden sollen. In der Projektdatei besteht auch die Möglichkeit, falls Türen vorhanden sind, den Status als offen bzw. geschlossen zu definieren. Des Weiteren werden die Eigenschaften der Agenten vorgegeben. Dazu gehört der Standort in welchem Unterraum sich die Agenten befinden, wie viele Agenten simuliert werden sollen, die verwendete Routenwahl und das für die Berechnung genutzte Modell. Nach der Berechnung der Trajektorien mit JPScore können auch diese mit JPSvis dargestellt werden (Kemloh Wagoum et al.).

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Dieses Kapitel befasst sich mit der in der Arbeit durchgeführten Simulation. Dafür erfolgt zunächst eine Beschreibung der festgelegten Rahmenbedingungen und des Aufbaus der Simulation. Anschließend wird der Ablauf der Simulation beschrieben. Abschließend erfolgt eine Auswertung und Analyse der Simulationsergebnisse.

3.1 Rahmenbedingungen des Evakuierungsszenarios

Fahrtreppen wurden so konzipiert, dass sie der Größe und den körperlichen Fähigkeiten der menschlichen Fortbewegung entsprechen. Aus diesem Grund basiert das Modell ebenfalls auf diesen Größen. In der Arbeit wird ein vereinfachtes Modell einer Fahrtreppe verwendet. Das Modell wird bezüglich Aufbau und Gestaltung einer häufig genutzten Fahrtreppe im öffentlichen Raum mit den nachfolgenden Maßen charakterisiert:

- Länge: 12 Meter
- Höhe: 6 Meter
- Breite: 1 Meter
- Neigungswinkel: 37 °

In der nachfolgenden Simulation entsprechen die Maße der modellierten Agenten 0,2 m. Diese werden als Erwachsene angenommen.

Auf eine konkrete Simulierung eines Bahnhofes wurde aufgrund der Komplexität bewusst verzichtet. Da die simulierte Fahrtreppe aber den Standardbedingungen einer im öffentlichen Raum genutzten Fahrtreppe entspricht, sind die Ergebnisse auf eine Evakuierung über Fahrtreppen im Bahnhof anwendbar. Die freie Fläche, über welche die Agenten in dieser Arbeit das Treppenende passieren und damit als evakuiert gelten, könnte im Bahnhof die Durchgangshalle darstellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Räumungszeiten einer sich aufwärts bewegendes Fahrtreppe betrachtet.

Es können keine Angaben zu Gruppenbildungen getätigt werden, daher werden die Agenten, welche die Fahrtreppe betreten, als sich rational verhaltend angenommen. Im Rahmen dieser Simulation besitzen die Agenten keine besonderen Verhaltensweisen bzw. Eigenschaften wie z.B. die Reaktionszeit oder mitgeführte Lasten damit einfache Ergebnisse erzeugt werden und eine einfachere Interpretation ermöglichen. Zudem werden die Agenten als stehend angenommen und lediglich die Bewegung der Fahrtreppe sorgt für die Fortbewegung der Agenten.

3.2 Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss mehrerer Parameter untersucht. Insgesamt wurden zwanzig Simulationen mit einer unterschiedlichen Agentenanzahl und unterschiedlichem Durchmesser der Agenten durchgeführt.

Zunächst wird untersucht, welchen Einfluss die Fahrtreppengeschwindigkeit auf die Räumungsgeschwindigkeit der Agenten hat. Die Geschwindigkeit der Fahrtreppen wurde für diesen Zweck im Rahmen der Simulationen variiert. Dafür wurden vier verschiedene Fahrtreppengeschwindigkeiten simuliert. Da es sich bei der ersten Geschwindigkeit um 0 m/s handelte wurde diese nicht simuliert, da die Agenten als auf der Fahrtreppe stehend angenommen werden. Nachfolgend sind die simulierten Geschwindigkeiten aufgeführt:

- 0,25 m/s
- 0,50 m/s
- 0,65 m/s
- 1,00 m/s.

Des Weiteren wurde der Einfluss verschiedener Radien untersucht. Die Agenten wurden dafür zunächst mit einem Radius von 0,2 m simuliert, dieser stellte dabei den Raumbedarf einer Erwachsenen Person ohne Gepäck bzw. ohne eine Last dar. Als nächstes wurde ein Radius von 0,28 m simuliert, dieser stellte den Raumbedarf einer Erwachsenen Person mit einem Gepäckstück bzw. einer Last dar.

Die oben aufgeführten Simulationen wurden zunächst mit 50 Agenten und im Anschluss mit 200 Agenten ausgeführt. Diese unterschiedlichen Agentenanzahl von 50 bis 200 dient dazu, die Dichteveränderungen und die Geschwindigkeitsveränderungen in Abhängigkeit von der Agentenanzahl zu erfassen. Die Bewegungen der Agenten werden mit dem collision-free-speed-Modell berechnet. Die Agenten wählen ihren Weg zum Ziel mithilfe des *global shortest* – Modell.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb.3, Abb.4) zeigen die modellierte Geometrie der Fahrtreppe und die zwei Ebenen in verschiedenen Ansichten. Die Agenten befinden sich zu Anfang der Simulation in der oberen Ebene mit einem Durchgang zu einer 10 m langen und 1 m breiten Treppe mit einer Höhe von 6 m und einer Neigung von 37°. Im Laufe der Simulation bewegen sich die Agenten über die Fahrtreppe, die sich abwärts bewegt, hinunter und verlassen über den Ausgang den Simulationsbereich und gelten danach als evakuiert.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

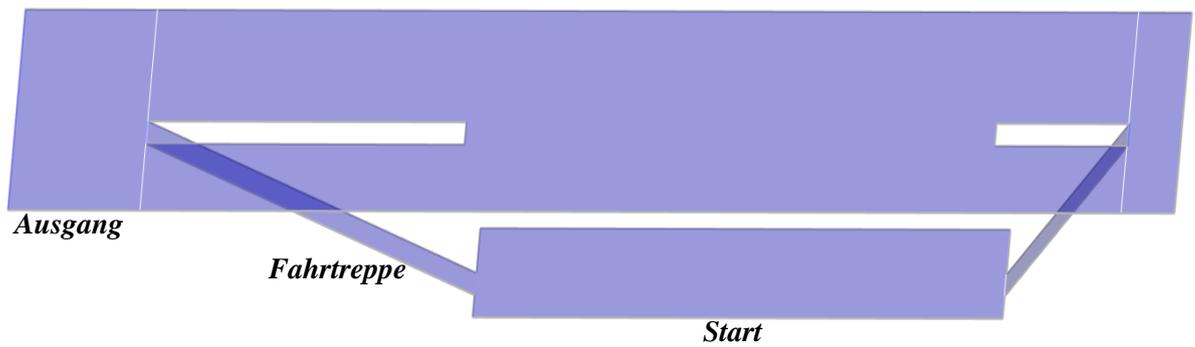


Abbildung 3: Seitenansicht der simulierten Geometrie. Die Simulation besitzt zwei Ebenen. Die Fahrtreppe hat eine Breite von 1 m, eine Länge von 10 m und die Höhe beträgt 6 m. Der Start der Simulation befindet sich auf der unteren Ebene.

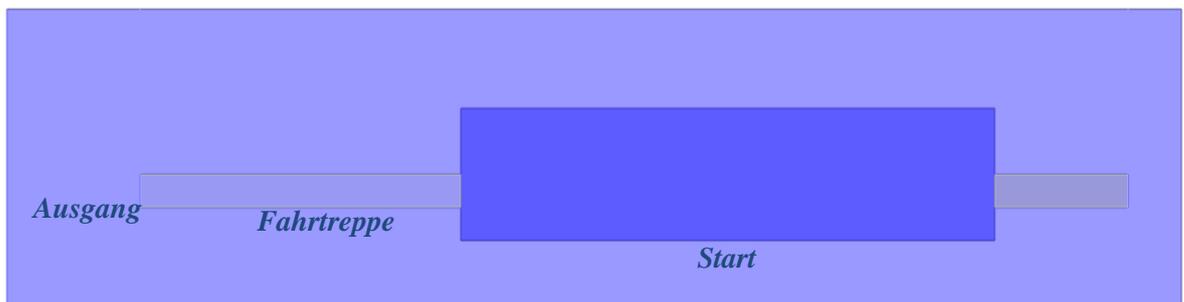


Abbildung 4: Draufsicht auf die Geometrie der Simulation.

3.3 Ergebnisanalyse

In diesem Unterkapitel werden die aus der Simulation hervorgegangenen Messwerte in Form des mittleren Personenflusses, der Evakuierungszeit und der mittleren Personendichte dargestellt und analysiert. Anhand dieser Ergebnisse werden Rückschlüsse daraus gezogen, inwiefern die Veränderungen der Parameter die Simulationsergebnisse beeinflussen.

Die erlangten Ergebnisse gehen aus den zwanzig Simulationsdurchgängen hervor. Durch eine größere Anzahl an Berechnung, beispielsweise durch Änderung des Startwerts (seed), können präzisere Aussagen getroffen werden. Bei einer Wiederholung der Untersuchungen sind jedoch ähnliche Ergebnisse zu erwarten.

Zunächst werden die Simulationsergebnisse der Evakuierungszeiten mit 50 Agenten und 200 Agenten betrachtet. Im Anschluss werden die Simulationsergebnisse anhand der mittleren Geschwindigkeit und der mittleren Personendichte mit 50 Agenten und 200 Agenten betrachtet. Abschließend werden die ermittelten Ergebnisse gegenübergestellt und es wird versucht ein Zusammenhang herzustellen.

Wie bereits erläutert, erfolgt nun die Betrachtung der Ergebnisse, die bei der Simulierung der Evakuierungszeiten der Agenten hervorgegangen sind. Nachfolgend sind vier Abbildungen abgebildet. Die ersten zwei Abbildungen (Abb.5 und Abb.6) zeigen die Ergebnisse, die bei der Simulierung mit 50 Agenten hervorgegangen sind. Die weiteren zwei Abbildungen (Abb.7 und Abb.8) zeigen die Ergebnisse, die bei der Simulierung mit 200 Agenten hervorgegangen sind.

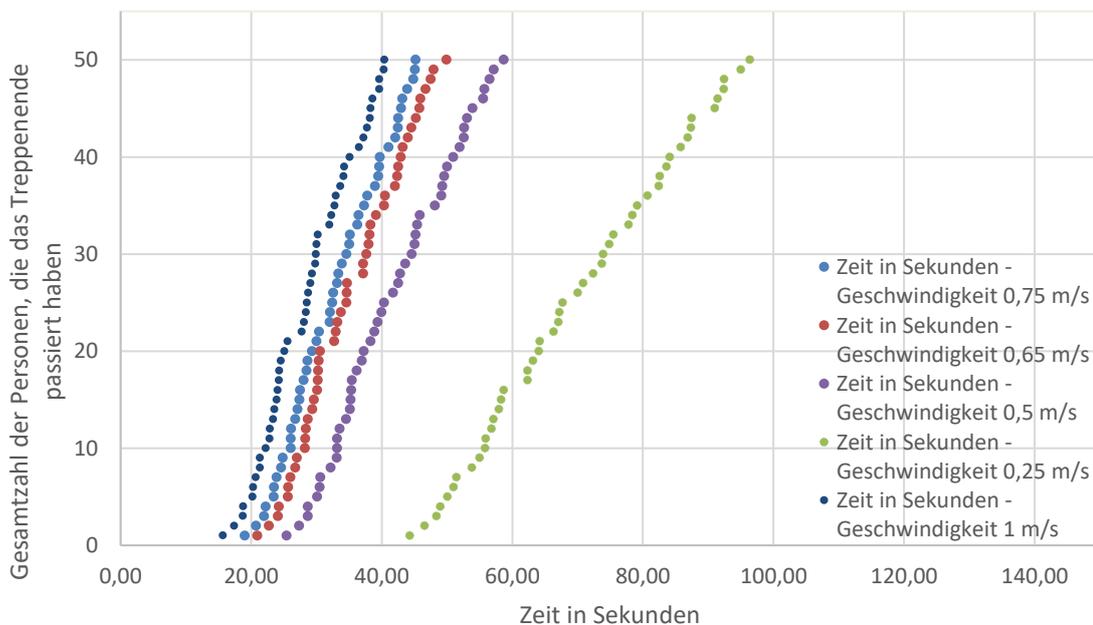


Abbildung 5: Diagramm für 50 Personen (Agenten) ohne Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

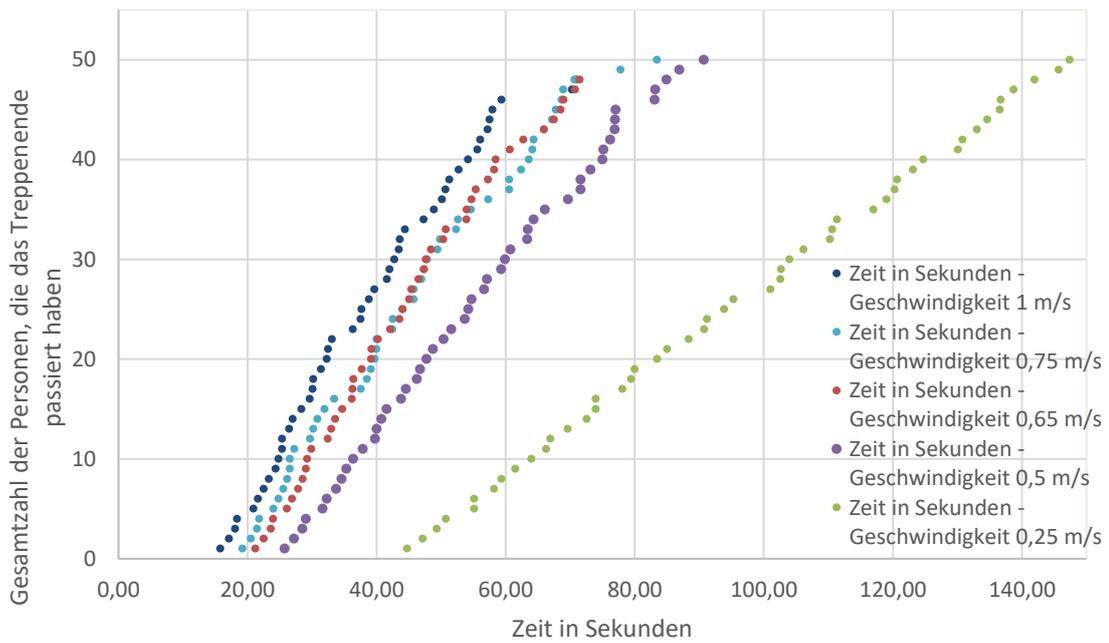


Abbildung 6: Diagramm für 50 Personen (Agenten) mit Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppeneinde passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppeneinde passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.

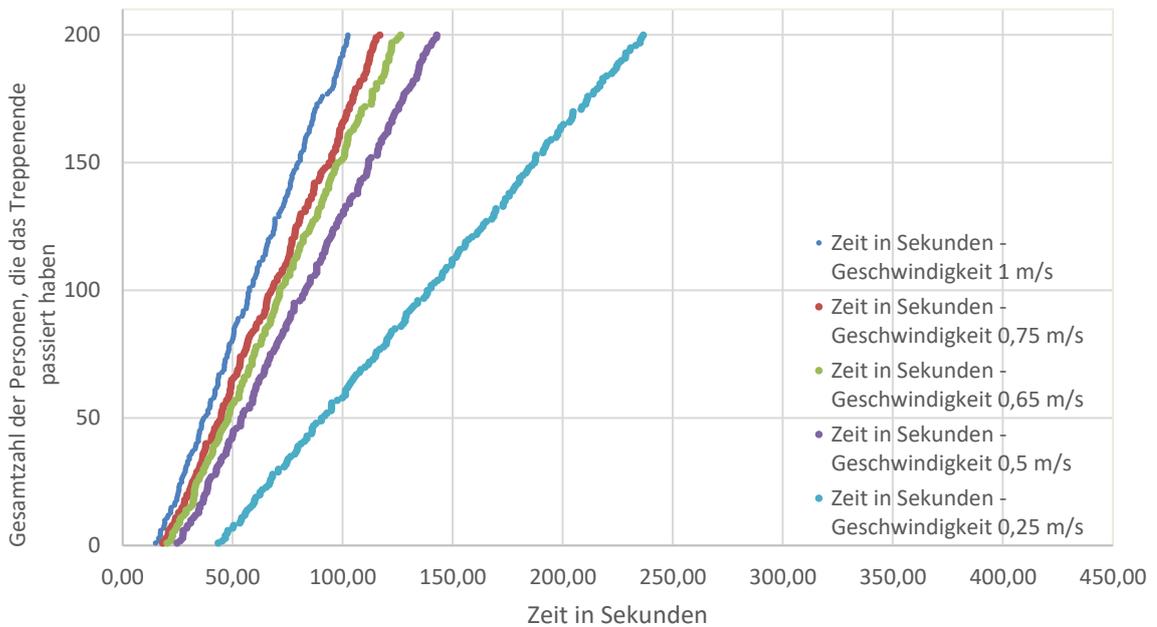


Abbildung 7: Diagramm für 200 Personen (Agenten) ohne Gepäck ($r = 0,20$ m), die das Treppeneinde passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppeneinde passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

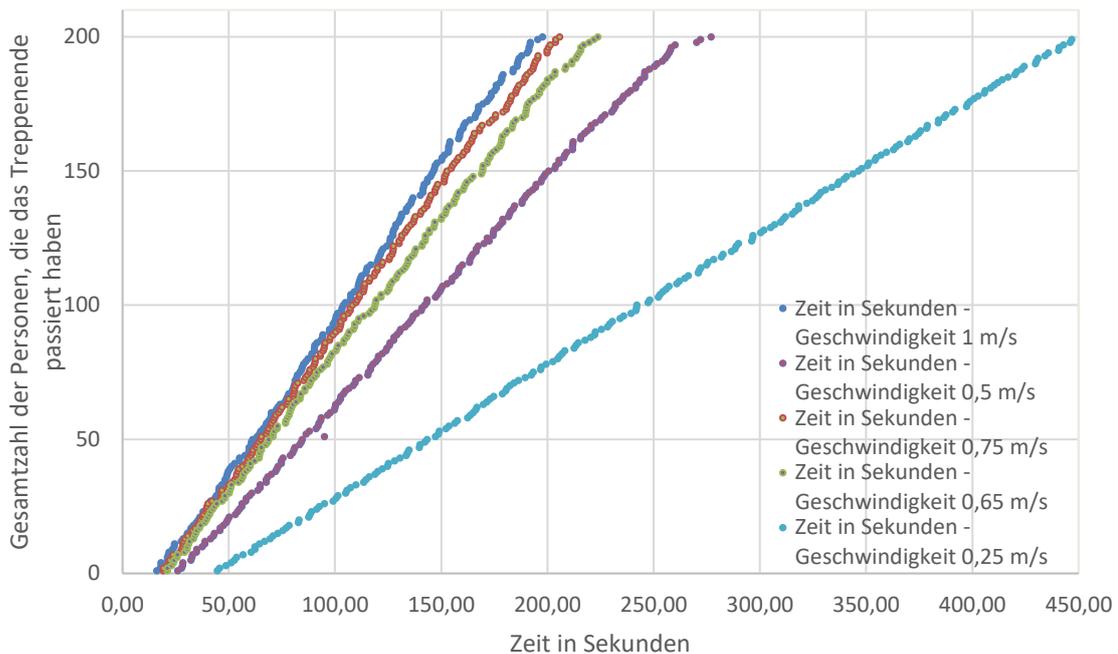


Abbildung 8: Diagramm für 200 Personen mit Gepäck ($r = 0,28$ m), die das Treppenende passieren. Die Anzahl der Personen in Sekunden, die das Treppenende passieren, sind über der Evakuierungszeit aufgetragen.

Bei den Diagrammen ist zu erkennen, dass bei einer erhöhten Geschwindigkeit der Fahrtreppe die Evakuierungszeiten der simulierten Umgebung sinkt. Auch ist zu sehen, dass bei einem erhöhten Platzbedarf der Agenten, die Evakuierungszeiten der Agenten nahezu um das doppelte ansteigt.

Auffällig ist, dass sowohl bei den verschiedenen Fahrtreppengeschwindigkeiten als auch bei den gewählten verschiedenen Radien der Agenten, eine gleichbleibende Stagnation des Verlaufs der Evakuierung ersichtlich ist. Die Stagnation ergibt sich dadurch, dass die Agenten nicht schnell genug auf die Fahrtreppe gelangen können und sich dadurch vor der Fahrtreppe anstauen, bis diese die Fahrtreppe betreten können. Diese Stagnierung simuliert die Staubbildung, die sich bei der Simulation aller Geschwindigkeiten wiederholt. Das zeigt, dass sich eine Staubbildung und eine Verzögerung des Flusses auch durch eine Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit nicht verhindern lässt, da eine maximale Beanspruchung der Fahrtreppen bei allen Durchläufen gegeben ist.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Durch die Aufbereitung der Simulationsergebnisse, ist es möglich den mittleren Personenfluss in Sekunden zu berechnen und zu analysieren. Betrachten wir zunächst den mittleren Personenfluss der 50 Agenten ohne Gepäck (Tab. 2) und der 200 Agenten ohne Gepäck (Tab. 3), so wird eine Ähnlichkeit der Werte deutlich. Obwohl die Werte nicht übereinstimmen, ist ein gleichbleibender Verlauf der Werte bemerkbar.

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlerer Personenfluss in P/s
0,00	0,00
0,25	0,96
0,50	1,50
0,65	1,70
0,75	1,91
1,00	2,02

Tabelle 2: Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten ohne Gepäck.

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlerer Personenfluss in P/s
0,00	0,00
0,25	1,04
0,50	1,69
0,65	1,89
0,75	2,03
1,00	2,29

Tabelle 3: Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten ohne Gepäck.

Ähnlich verhält es sich bei der Betrachtung der Werte für die Fahrtreppengeschwindigkeiten von 0,25 m/s, 0,5 m/s und 0,65 m/s bei den 50 Agenten mit Gepäck (Tab. 4) und bei den 200 Agenten mit Gepäck (Tab. 5). Der mittlere Personenfluss nimmt für die Fahrtreppengeschwindigkeiten von 0,75 m/s und 1 m/s bei 50 Agenten mit Gepäck danach ab. Der mittlere Personenfluss bei 200 Agenten nimmt bei diesen Werten jedoch weiter zu. Diese Abweichungen werden durch mögliche die Simulationsfehler begründet, eine Änderung des Startwerts brachte keine Veränderung der Werte hervor.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlerer Personenfluss in P/s
0,00	0,00
0,25	0,49
0,50	0,81
0,65	0,96
0,75	0,93
1,00	0,87

Tabelle 4: Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten mit Gepäck.

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlerer Personenfluss in P/s
0,00	0,00
0,25	0,49
0,50	0,81
0,65	0,99
0,75	1,08
1,00	1,11

Tabelle 5: Mittlerer Personenfluss in P/s bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten mit Gepäck.

Dennoch lassen sich anhand der Ergebnisse zeigen, dass die Agenten mit Gepäck dazu neigen, sich langsamer fortzubewegen als die Agenten ohne Gepäck. Dieses Phänomen bleibt dabei unabhängig von der Agentenanzahl verhältnismäßig immer gleich.

Nachfolgend werden die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt. Die ersten beiden Abbildungen (Abb. 9 und Abb. 10) bilden die Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei 50 Agenten ab und die darauffolgenden zwei Diagramme (Abb. 11 und Abb. 12) bilden die Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei 200 Agenten ab. Bei dieser Analyse wurden die abfallenden Werte, die in Abbildung 10 zu sehen sind, vernachlässigt.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

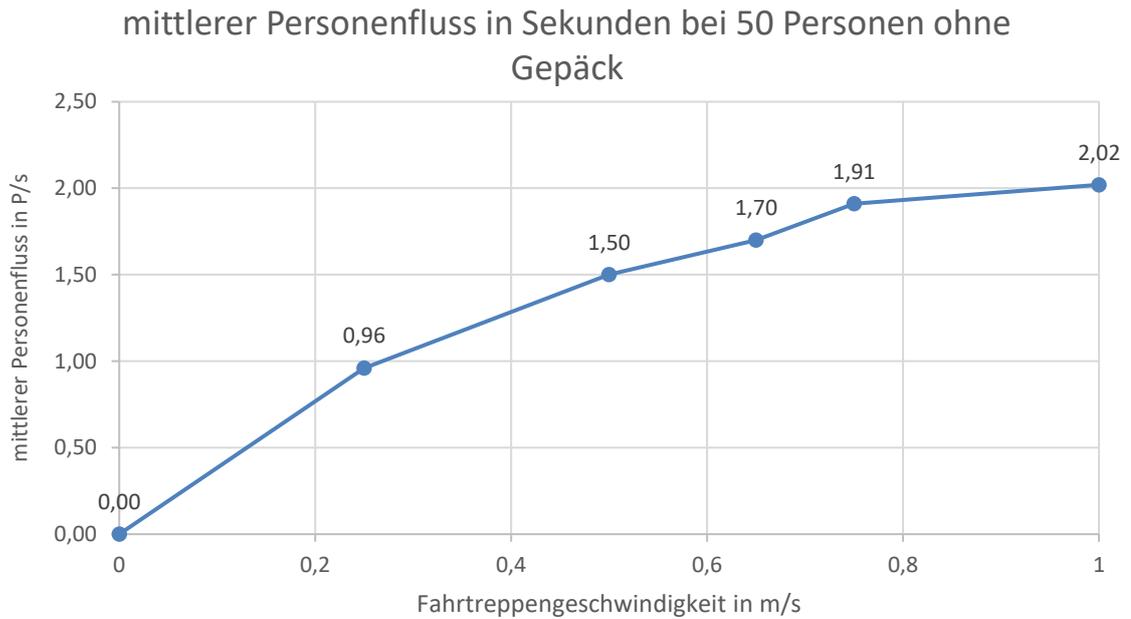


Abbildung 9: Fundamentaldiagramm für 50 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.

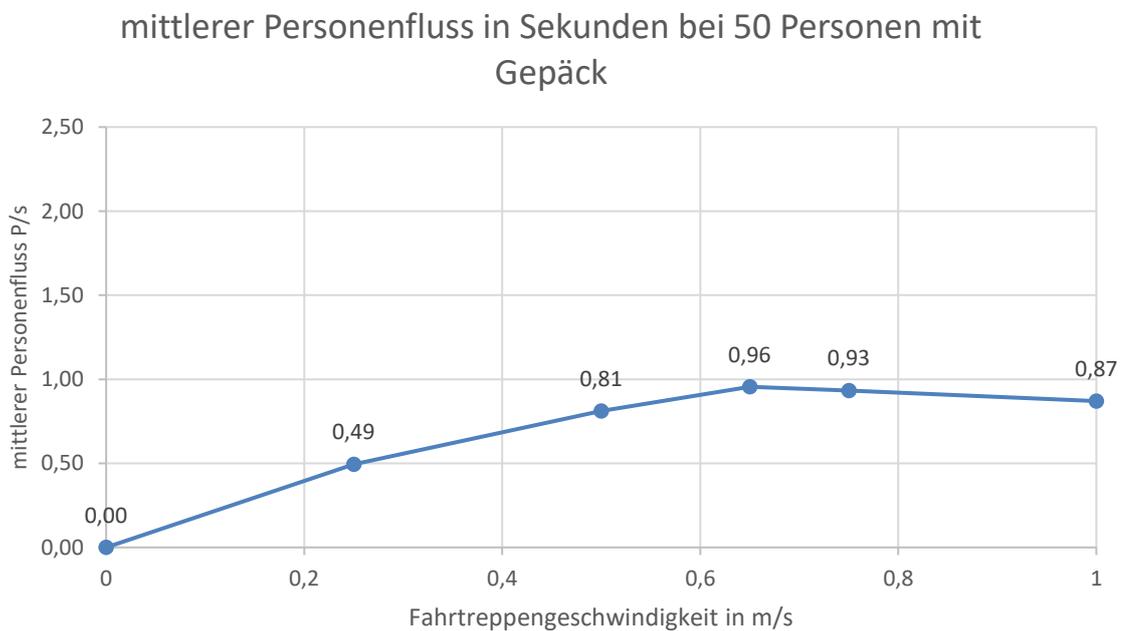


Abbildung 10: Fundamentaldiagramm für 50 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

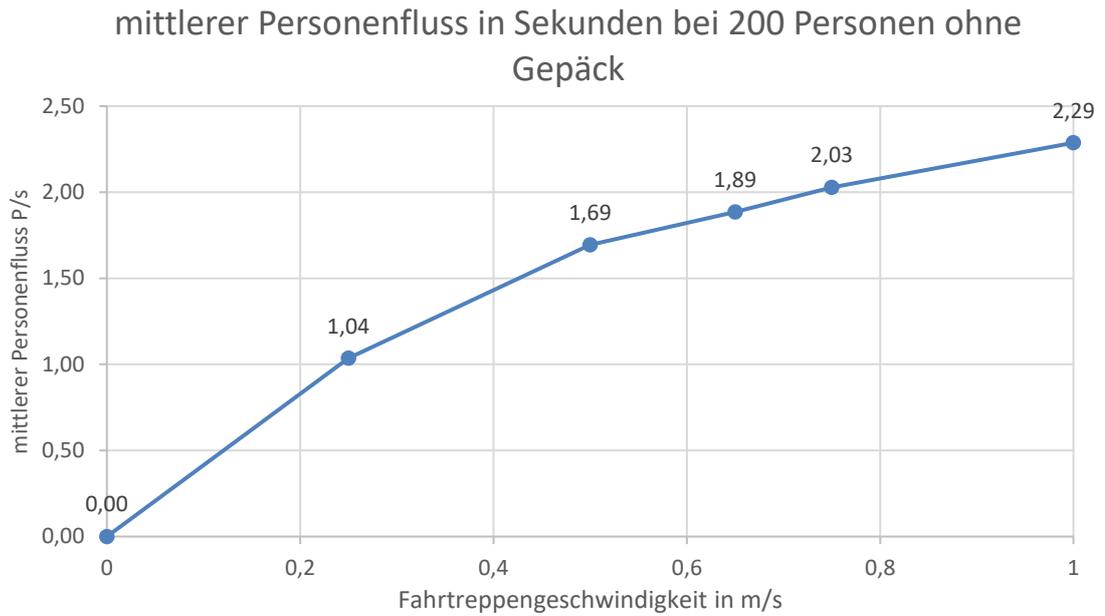


Abbildung 11: Fundamentaldiagramm für 200 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.

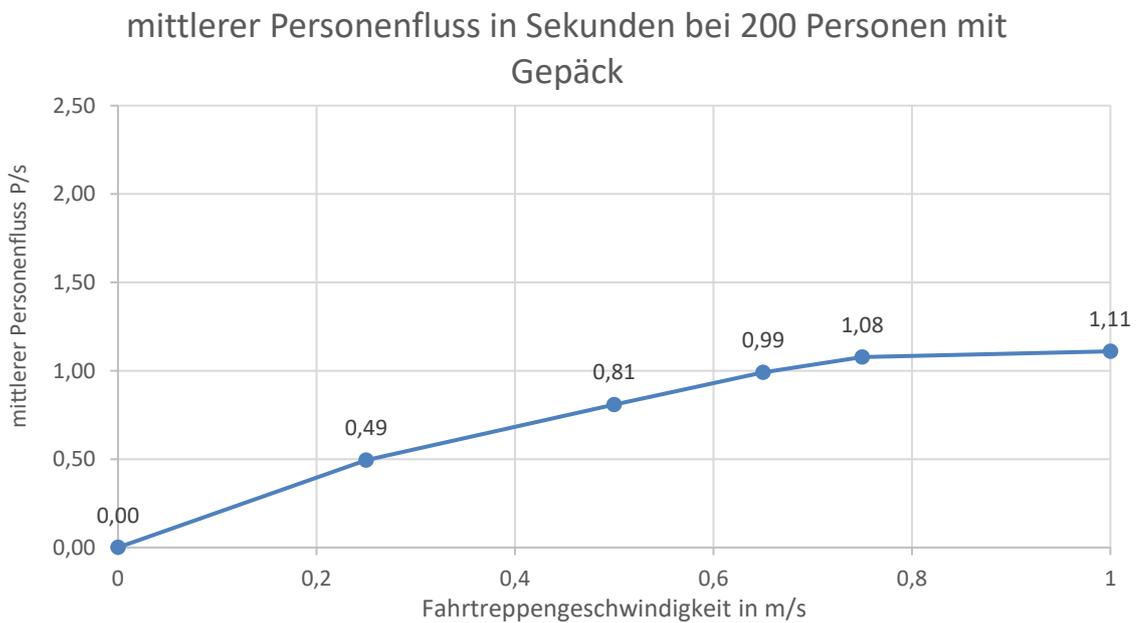


Abbildung 12: Fundamentaldiagramm für 200 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. Der mittlere Personenfluss (P/s) ist über den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Bei der Betrachtung der Diagramme fällt auf, dass der Personenfluss, wie zu erwarten, mit zunehmender Geschwindigkeit der Fahrtreppe zunimmt. Weiter fällt auf, dass bei der Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeiten von 0,25 m/s auf 0,5 m/s die Werte der Personendichte stärker zunehmen (+ 0,32 – 0,65 m/s) als bei einer Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit von 0,75 m/s auf 1,0 m/s zu sehen sind (+ 0,03 – 0,26 m/s).

Diese Tatsache ist ein klares Beispiel dafür, wie ein verbesserter Input, in diesem Fall eine Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit, tatsächlich für einen besseren Output, in diesem Fall die Räumung, sorgt. Denn durch die Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit können mehr Agenten auf die Fahrtreppe gelangen.

Als nächstes werden die Simulationsergebnisse der mittleren Personendichte über den verschiedenen Fahrtreppengeschwindigkeiten abgebildet. Die Personendichte gibt dabei die Anzahl der Agenten pro Flächeneinheiten an.

Die Berechnung der mittleren Personendichte erfolgte durch die ermittelten Ergebnisse der Simulationen, indem nachfolgende Formel verwendet wurde.

$$(8) \quad \rho = \frac{J}{v \cdot b}$$

ρ = mittlere Personendichte

v = Fahrtreppengeschwindigkeit

J = mittlerer Personenfluss

b = Fahrtreppenbreite

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt zunächst in tabellarischer Form. Anschließend werden die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt. Die ersten beiden Abbildungen (Abb. 13 und Abb. 14) bilden die Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei 50 Agenten ab und die darauffolgenden zwei Diagramme (Abb. 15 und Abb. 16) bilden die Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei 200 Agenten ab.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	Mittlere Personendichte in P/m ²
0,25	3,84
0,50	3,00
0,65	2,62
0,75	2,55
1,00	2,02

Tabelle 6: Mittlere Personendichte in P/m² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten ohne Gepäck

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	Mittlere Personendichte in P/m ²
0,25	1,96
0,50	1,62
0,65	1,48
0,75	1,24
1,00	0,87

Tabelle 7: Mittlere Personendichte in P/m² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 50 Agenten mit Gepäck

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlere Personendichte in P/m ²
0,25	4,16
0,50	3,38
0,65	2,91
0,75	2,71
1,00	2,29

Tabelle 8: Mittlere Personendichte in P/m² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten ohne Gepäck

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	mittlere Personendichte in P/m ²
0,25	1,96
0,50	1,62
0,65	1,52
0,75	1,44
1,00	1,11

Tabelle 9: Mittlere Personendichte in P/m² bei einer Evakuierungssimulation über eine Fahrtreppe mit 200 Agenten mit Gepäck

Bei der Betrachtung der Diagramme (Abb.13, Abb.14, Abb.15 und Abb.16) der Simulationen wird ersichtlich, dass je geringer die Fahrtreppengeschwindigkeit ist, desto höher ist die mittlere

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Personendichte. Die hohe Dichte resultiert daraus, dass sich die Agenten aufgrund der geringen Fahrtreppengeschwindigkeit im Bereich vor der Fahrtreppe anstauen.

Mit der ansteigenden Fahrtreppengeschwindigkeit nimmt auch die Mittlere Personendichte ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch eine höhere Fahrtreppengeschwindigkeit mehr Agenten schneller auf die Fahrtreppe gelangen können, um eine schnelle Räumung zu ermöglichen.

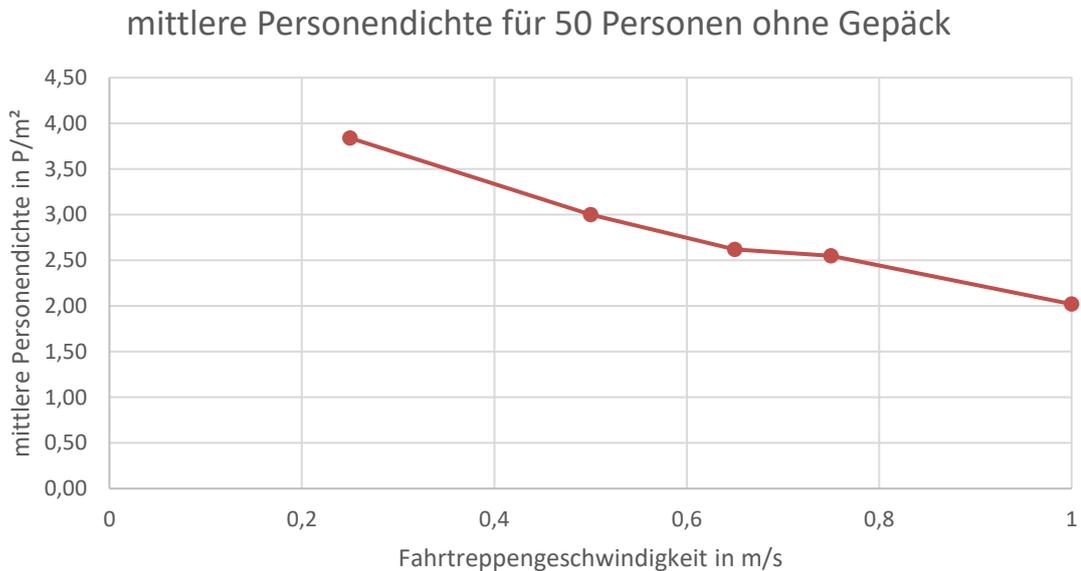


Abbildung 13: Diagramm für 50 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.

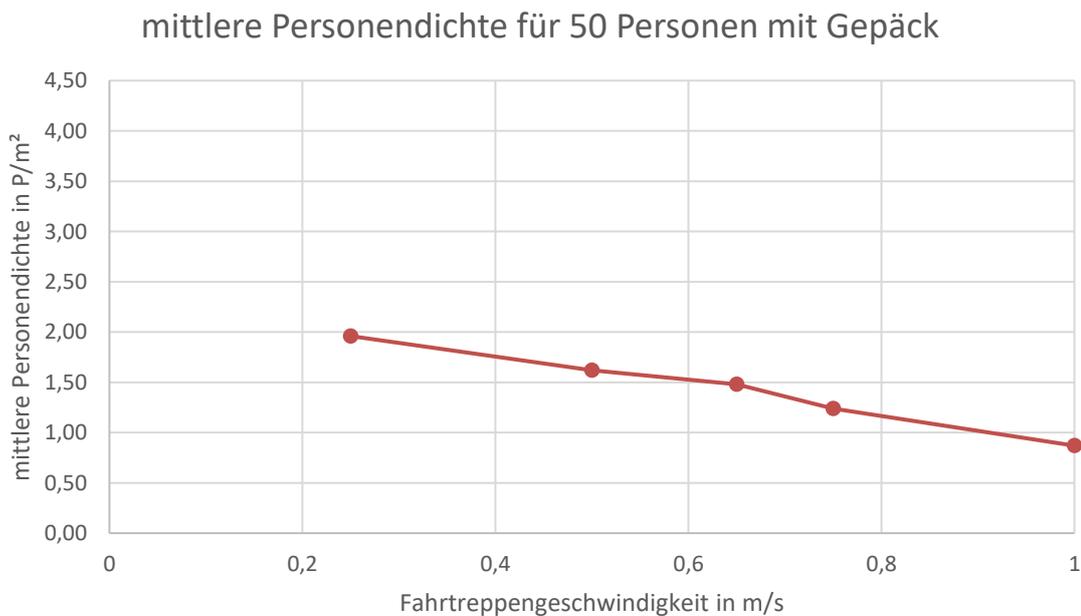


Abbildung 14: Diagramm für 50 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

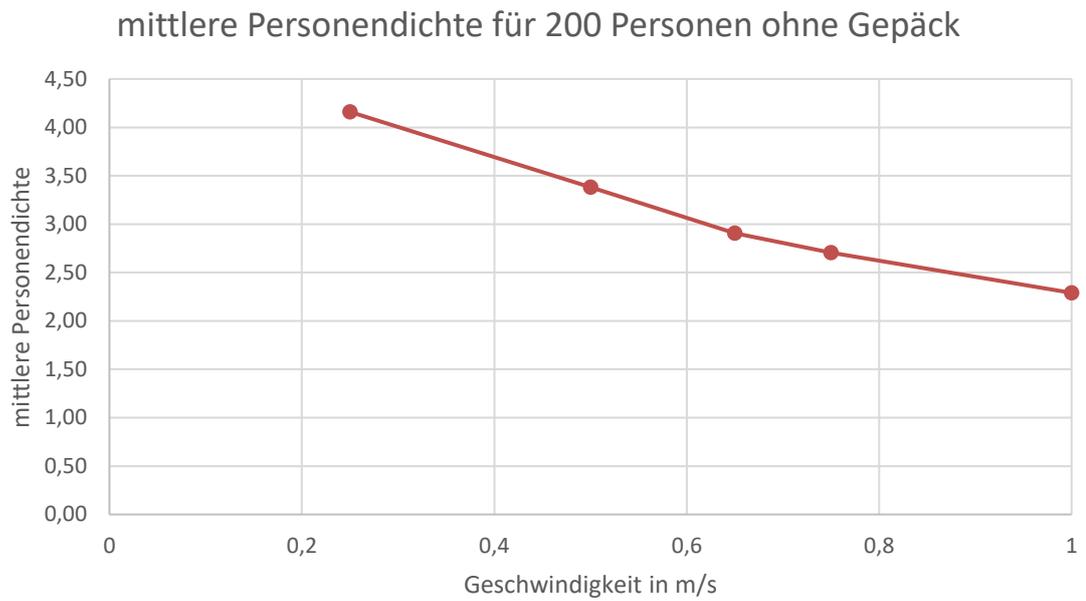


Abbildung 15: Diagramm für 20 Personen ohne Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.

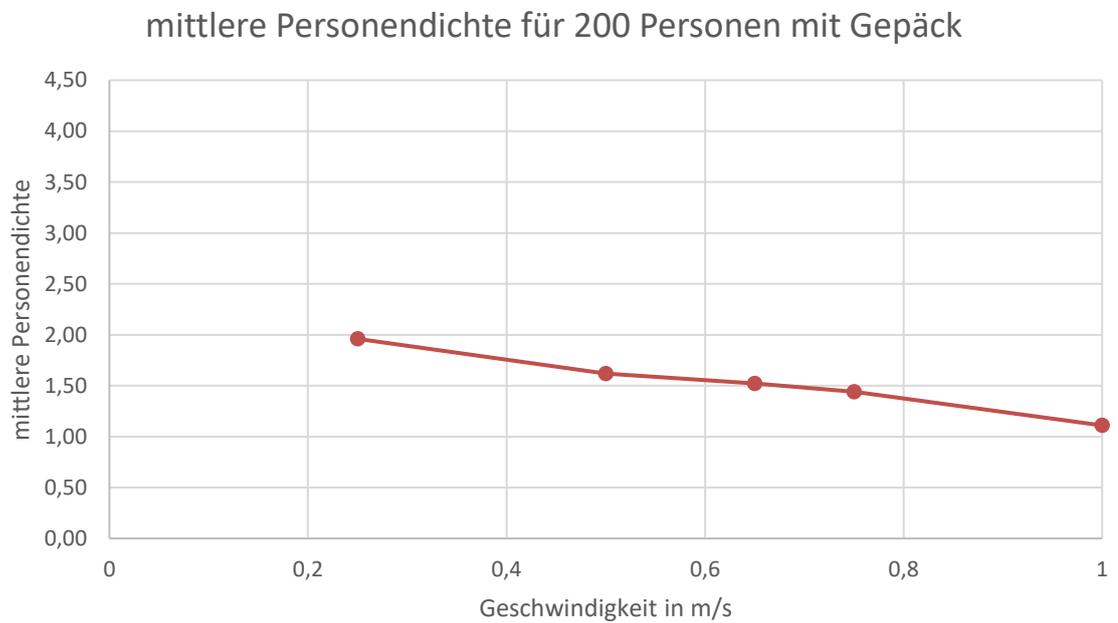


Abbildung 16: Diagramm für 200 Personen mit Gepäck auf einer aufsteigenden Fahrtreppe. In rot ist die mittlere Personendichte (P/m^2) über den Fahrtreppengeschwindigkeiten (m/s) aufgetragen.

3 Simulation und Ergebnisanalyse

Bei der Betrachtung aller Simulationsergebnisse fällt auf, dass sich die Werte trotz der unterschiedlichen Agentenanzahl ähneln. Wie zu erwarten ist die Räumungszeit bei 200 Agenten verglichen mit der Räumungszeit bei 50 Agenten sowohl mit als auch ohne Gepäck höher.

Bei einem Vergleich der mittleren Personendichten bei einer unterschiedlichen Anzahl von Agenten fällt auf, dass die Werte zwar in ähnlicher Weise abfallen, die Werte bei 200 Agenten aber höher bleiben.

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	Mittlere Personendichte in P/m² (50 Agenten ohne Gepäck)	Mittlere Personendichte in P/m² (200 Agenten ohne Gepäck)
0,25	3,84	4,16
0,50	3,00	3,38
0,65	2,62	2,91
0,75	2,55	2,71
1,00	2,02	2,29

Tabelle 10: Vergleich der mittleren Personendichten in P/m² bei 50 Agenten und 200 Agenten ohne Gepäck im Zusammenhang mit den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s

Anders verhält es sich zu Anfang bei einem Vergleich der mittleren Personendichten, der 50 bzw. 200 Agenten mit Gepäckstücken. Bei einer Fahrtreppengeschwindigkeit von 0,25 m/s und 0,50 m/s sind die mittleren Personendichten, in dieser Simulation, gleich. Anschließend nimmt die mittlere Personendichte bei der Simulation von 50 Agenten in größeren Schritten ab, wohingegen die Abnahme der Dichte bei einer Agentenzahl von 200 langsamer abnimmt.

Fahrtreppengeschwindigkeit in m/s	Mittlere Personendichte in P/m² (50 Agenten mit Gepäck)	Mittlere Personendichte in P/m² (200 Agenten mit Gepäck)
0,25	1,96	1,96
0,50	1,62	1,62
0,65	1,48	1,52
0,75	1,24	1,44
1,00	0,87	1,11

Tabelle 11: Vergleich der mittleren Personendichten in P/m² bei 50 Agenten und 200 Agenten ohne Gepäck im Zusammenhang mit den Fahrtreppengeschwindigkeiten in m/s

Das könnte sich dadurch erklären lassen, dass bei einer höheren Geschwindigkeit der Fahrtreppe und einer geringeren Anzahl von Agenten, diese schneller evakuiert werden können. Bei 200 Agenten führt die höhere Geschwindigkeit der Fahrtreppe zwar auch zu einer schnelleren Evakuierung, doch durch die größere Anzahl an Agenten, nimmt der Werte der Personendichte langsamer ab. Es ist zu vermuten, dass sich dieser Verlauf bei einer Erhöhung der Agentenzahl ähnlich verhalten wird. Demnach würde eine Variation der Fahrtreppengeschwindigkeit mit zunehmender Agentenanzahl, zu immer geringeren Dichteunterschieden führen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, das Problem der Fahrgastströme auf den Fahrtreppen in Bahnhöfen, die von den Fußgängern beim Verlassen von Bahnhöfen benutzt werden zu untersuchen. Dafür wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell erstellt, indem eine Variierung der Fahrtreppengeschwindigkeit und der Anzahl der Fußgänger vorgenommen wurde.

Nach den Untersuchungen der Simulationsergebnisse, hat sich ergeben, dass eine Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit zwar zu einer schnelleren Räumung führen kann, jedoch die Staubildungen im Verlauf der Evakuierung

dennoch auftreten. In Extremsituation erweisen sich gerade diese Stauungen als gefährlich für Personen. Auch wurde in dieser Arbeit keine Kombination von verschiedenen Parametern in einer Simulation untersucht. Es ist unwahrscheinlich, dass sich lediglich Personen ohne bzw. mit Gepäck auf der Fahrtreppe befinden.

Zudem wurde bei der Literaturrecherche für die Arbeit deutlich, dass die Untersuchung von Evakuierungsszenarien in Bahnhöfen zwar immer mehr zunimmt, jedoch spezifizieren sich die wenigsten Forschungen nur auf die Fahrtreppen. Das liegt daran, dass die Bedeutung und der Einfluss den Fahrtreppen im Rahmen einer Evakuierung innehaben können, noch nicht weitreichend untersucht wurden. Daher erweist es sich als sinnvoll, verschiedene Simulationen in diesem Bereich durchzuführen, um einen positiven Einfluss im Rahmen einer Evakuierung validieren zu können.

Die Organisation der Evakuierung von öffentlichen Räumen, wie z.B. Bahnhöfen, über Fahrtreppen stellt sich als schwierig dar, da dies eine regelmäßige Wartung und Steuerung der Fahrtreppen mit sich bringt. In der Elbphilharmonie wird ein Konzept einer Totalevakuierung über Fahrtreppen derzeit angewandt. Da es sich bei der Elbphilharmonie um kein öffentliches Gebäude handelt, kann die maximale Personenanzahl begrenzt und kontrolliert werden. Jedoch ist diese Personenbegrenzung und -kontrolle bei einer Evakuierung im öffentlichen Raum nicht realisierbar. Trotz Allem wäre es relevant die Verfahren, wie beispielsweise:

- die Abschaltung der Fahrtreppen die zum Gefahrenherd führen,
- Anpassung der Stufen um sie fluchtwegtauglich zu machen,
- Überdimensionierung der Stufenketten, um einer Überbelastung vorzuzorgen,

für den öffentlichen Raum in der Zukunft zu untersuchen und falls möglich zu implementieren (Dipl.-Ing. Jens-Christian Voss, Friedberg (Bayern)).

Somit ist festzustellen, dass die Evakuierung über Fahrtreppen im öffentlichen Raum noch weitreichend erforscht werden muss, bevor diese im Ernstfall als Evakuierungsweg genutzt werden können.

5 Literaturverzeichnis

BASt-Bericht FE 77.452/2000.

Berkhahn, Volker; Milbradt, Peter; Höcker, Mario; Rinke, Nils; Abed, Wassim Abu: Simulationen der Fussgängerdynamik ermöglichen sichere Evakuierungen.

Chraibi, Mohcine; Ezaki, Takahiro; Tordeux, Antoine; Nishinari, Katsuhiko; Schadschneider, Andreas; Seyfried, Armin (2015): Jamming transitions in force-based models for pedestrian dynamics. In: *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 92 (4), S. 42809. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.042809.

Chraibi, Mohcine; Seyfried, Armin; Schadschneider, Andreas (2010): Generalized centrifugal-force model for pedestrian dynamics. In: *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 82 (4 Pt 2), S. 46111. DOI: 10.1103/PhysRevE.82.046111.

Chraibi, Mohcine; Tordeux, Antoine; Schadschneider, Andreas; Seyfried, Armin (2018): Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics. In: Robert A. Meyers (Hg.): *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–22.

Daamen, W. (2004): *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. PhD Thesis: Department of Transport & Planning, Delft University of Technology, the Netherlands.

Daamen, W.; Bovy, P. H. L.; Hoogendoorn, S. P. (2006): Choices between stairs, escalators and ramps in stations. In: J. Allan, C. A. Brebbia, A. F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone und C. J. Goodman (Hg.): *Computers in Railways X. COMPRAIL 2006*. Prague, Czech Republic, 10.07.2006 - 12.07.2006. Southampton, UK: WIT Press, S. 3–12.

Ding, Shige; Dong, Wei; Sun, Xinya; Wang, Haixia (2019): A Dynamic Risk Analysis Method for Escalator of Rail Transit Hub Based on Characteristic Quantity. In: 2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). 2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). Xiamen, China, 05.07.2019 - 07.07.2019: IEEE, S. 581–588.

Dipl.-Ing. Jens-Christian Voss, Friedberg (Bayern): *Rechtliche Neuerungen*.

Dirk Helbing, Illes J. Farkas, Peter Molnar, and Tamas Vicsek: *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*.

Gruevska, Julia (2019): *Körper und Räume*. Wiesbaden: Vieweg (Studien Zur Interdisziplinären Anthropologie Ser). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=i5CCDwAAQBAJ>.

Harris, Tom (2001): *How Escalators Work. Steppin' Out*. Hg. v. HowStuffWorks.com. Online verfügbar unter <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/escalator.htm>, zuletzt geprüft am 09.11.2021.

Kemloh Wagoum, Armel Ulrich; Chraibi, Mohcine; Lämmel, Gregor (2015): *Jupedsim. an open framework for simulating and analyzing the dynamics of pedestrians: Transportation Research Group of India*. Online verfügbar unter

https://www.researchgate.net/publication/289377829_JuPedSim_an_open_framework_for_simulating_and_analyzing_the_dynamics_of_pedestrians.

Korhonen, Timo (2014): Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide (FDS 6.1.0, Evac 2.5.0, DRAFT).

Li, Wenhong; Gong, Jianhua; Yu, Ping; Shen, Shen (2016): Modeling, simulation and analysis of group trampling risks during escalator transfers. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 444, S. 970–984. DOI: 10.1016/j.physa.2015.10.091.

Malveira, Daniel Monte (2019): Analysis of Walking and Route Choice Behavior of Pedestrians inside Public Transfer Stations. A Study on how pedestrians behave in the approaching vicinity of level-change facilities, and how it affects their walking and route-choice behavior. Examensarbeit. Königliche Technische Hochschule, Stockholm, Schweden. Online verfügbar unter <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1374700/FULLTEXT01.pdf>.

Mohd, Khairul Afzan Mohd Lazi; Masria, Mustafa (2015): Pedestrian Behaviour at Stairways and Escalator: A Review. In: Rohana Hassan, Marina Yusoff, Anizahyati Alisibramulisi, Norliyati Mohd Amin und Zulhabri Ismail (Hg.): InCIEC 2014. Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2014. Singapore: Springer (Springer eBook Collection Engineering).

Ohtake, Tetsuo; Kishimoto, Tatsuya (2017): A Study on the Pedestrians' Walking Behaviour on Escalators at Railway Stations. In: *Journal of the City Planning Institute of Japan* (Vol 52 No.3).

Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige.

Predtetschenski, Wsewolod; Milinski, Anatoli (1971): Personenströme in Gebäuden. Köln-Braunsfeld: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller.

PTV GROUP (Hg.): PTV Visum 2020 - Neue Funktionen im Überblick. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.ptvgroup.com/fileadmin/user_upload/Products/PTV_Visum/Documents/Release-Highlights/Ueberblick_Visum2020.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2021.

Railway Stations (2021). Online verfügbar unter https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Railway_stations.

Rogsch, Christian (2014): Simulationsmethode für Brandschutz und Evakuierung. Grundlagen - Anwendung - Erweiterung. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140514-112006-6>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Schadschneider, Andreas; Klüpfel, Hubert; Kretz, Tobias; Rogsch, Christian; Seyfried, Armin (2009): Fundamentals of Pedestrian and Evacuation Dynamics. In: J. Davim, Ana Bazzan, Franziska Klügl und Ana L. C. Bazzan (Hg.): Multi-agent systems for traffic and transportation engineering. Hershey, Pa.: Information Science Reference (Advances in Mechatronics and Mechanical Engineering), S. 124–154.

5 Literaturverzeichnis

DIN EN 115-1, 2018: Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen – Teil 1: Konstruktion und Einbau.

Sukor, Nur Sabahiah Abdul; Nain, Farah Hanin Mohd; Ismail, Irwina; Ismail, Mohd Ashraf Mohamad (2018): Analysis of pedestrian walking characteristics at vertical facilities in underground train station. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 352, S. 12031. DOI: 10.1088/1757-899X/352/1/012031.

TraffGo HT GmbH: Handbuch PedGo/AENEAS. Version 2.6.1. Hg. v. TraffGo HT GmbH. Duisburg. Online verfügbar unter <https://www.traffgo-ht.com/downloads/pedestrians/downloads/documents/Handbuch.pdf>, zuletzt geprüft am 09.11.2021.

Unger, Dieter (2013): Aufzüge und Fahrtreppen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wilensky, U. (1999): The NetLogo 6.2.1 User Manual. Hg. v. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Online verfügbar unter <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/NetLogo%20User%20Manual.pdf>.

Ziemer, Verena: Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerdynamik: Empirische Untersuchung von Experimenten eindimensionaler Bewegung sowie quantitative Beschreibung von Stau-Charakteristika. In: IAS Series, Bd. 42.

6 Anhang

6.1 Excel-Tabellen

6.1.1 Simulationsergebnisse bei 50 Agenten mit einem Radius von 0,20 m

Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,25 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,5 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,65 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,75 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 1 m/s	Gesamtzahl der Personen, die das Treppende passiert haben
44,30	25,45	20,95	19,00	15,70	1
46,55	27,35	22,70	20,75	17,40	2
48,40	28,70	24,10	22,00	18,75	3
49,00	28,70	24,25	22,20	18,80	4
50,05	30,10	25,60	23,45	20,20	5
51,00	30,50	25,65	23,50	20,30	6
51,45	30,60	26,00	23,90	20,70	7
53,80	32,20	26,75	24,60	21,35	8
55,00	33,10	27,00	24,85	21,35	9
55,85	33,15	28,25	26,05	22,20	10
55,95	33,15	28,30	26,05	22,80	11
56,80	33,55	28,40	26,10	22,85	12
57,10	34,55	28,70	26,75	23,35	13
57,95	35,15	29,35	27,10	23,55	14
58,30	35,25	29,60	27,40	23,90	15
58,70	35,35	30,10	27,50	24,05	16
62,35	35,45	30,20	28,05	24,25	17
62,35	36,15	30,25	28,50	24,30	18
63,15	36,95	30,35	28,65	24,55	19
64,05	37,25	30,55	29,30	25,10	20
64,20	38,30	32,70	30,00	25,55	21
66,35	38,90	32,95	30,40	27,75	22
67,05	39,35	33,20	32,05	28,10	23
67,20	39,95	33,75	32,10	28,40	24
67,70	40,35	34,60	32,40	28,55	25
70,00	41,75	34,65	32,55	28,75	26
70,85	42,55	34,70	33,15	29,05	27
72,40	42,80	37,15	33,35	29,30	28
73,70	43,60	37,15	33,90	29,80	29
73,90	44,60	37,65	34,60	29,90	30
74,85	45,05	38,00	35,05	30,00	31
75,50	45,20	38,15	35,15	30,20	32
77,80	45,45	38,30	36,25	32,00	33
78,40	45,85	39,15	36,45	32,30	34
79,15	48,15	40,35	37,30	32,75	35
80,70	49,15	40,50	37,80	32,95	36
82,45	49,30	42,05	39,00	33,65	37
82,60	49,55	42,40	39,45	34,15	38

6 Anhang

83,60	50,00	42,55	39,60	34,25	39
84,10	50,95	42,90	39,70	35,10	40
85,80	51,95	43,20	41,05	36,50	41
86,90	52,60	44,00	42,10	37,20	42
87,35	52,65	44,55	42,50	37,75	43
87,45	53,05	45,25	42,55	38,20	44
91,00	53,90	45,80	42,95	38,30	45
91,45	55,55	45,95	43,15	38,60	46
92,40	55,75	46,70	43,90	39,60	47
92,45	56,50	47,50	44,85	39,60	48
95,00	57,15	47,95	45,10	40,30	49
96,40	58,70	49,90	45,20	40,40	50

6.1.2 Simulationsergebnisse bei 50 Agenten mit einem Radius von 0,28 m

Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,25 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,5 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,65 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,75 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 1 m/s	Gesamtzahl der Personen, die das Treppende passiert haben
44,75	25,75	21,20	19,25	15,80	1
47,15	27,20	22,50	20,50	17,15	2
49,35	28,50	23,60	21,45	18,10	3
50,75	29,05	23,95	21,80	18,40	4
55,10	31,65	26,10	24,00	20,90	5
55,10	32,30	26,90	24,80	21,60	6
58,20	33,75	27,85	25,55	22,50	7
59,35	34,60	28,55	26,15	23,30	8
61,50	35,35	29,05	26,55	24,35	9
64,00	36,35	29,25	26,55	24,80	10
66,30	37,85	29,90	27,25	25,35	11
66,95	39,75	32,45	29,70	25,35	12
69,60	40,00	33,00	30,20	26,45	13
72,55	40,75	33,60	30,85	27,00	14
73,95	41,55	34,70	31,95	28,35	15
73,95	43,80	36,20	33,45	29,65	16
78,10	44,55	36,25	37,55	30,10	17
79,45	46,25	36,40	38,50	30,20	18
80,00	46,75	37,70	39,10	31,40	19
83,50	47,75	39,15	39,70	32,30	20
85,05	48,75	39,20	39,95	32,50	21
88,35	50,40	40,20	40,00	33,10	22
90,75	51,60	42,10	42,45	36,30	23
91,20	53,65	43,55	42,50	37,50	24
93,85	54,20	44,05	44,00	37,65	25
95,30	54,70	45,05	45,75	38,80	26
101,05	56,65	45,40	45,75	39,65	27
102,55	57,10	46,50	46,95	41,60	28
102,65	59,30	47,35	47,35	42,00	29

6 Anhang

103,95	59,90	47,65	47,85	42,75	30
106,15	60,75	48,45	49,45	43,45	31
110,25	63,35	50,35	49,85	43,60	32
110,60	63,45	50,75	52,35	44,40	33
111,35	64,35	53,90	52,65	47,30	34
117,00	66,10	53,95	54,60	48,90	35
119,00	69,65	54,70	57,30	50,15	36
120,25	71,60	55,35	60,55	50,70	37
120,65	71,60	57,25	60,55	51,30	38
123,10	73,15	58,20	62,40	52,75	39
124,70	75,00	58,45	63,60	54,15	40
130,10	75,15	60,65	64,15	55,60	41
130,80	76,20	62,75	64,35	56,05	42
133,05	76,90	65,95	65,95	57,20	43
134,65	76,95	67,50	67,20	57,50	44
136,55	77,05	68,55	67,80	57,95	45
136,70	83,10	69,00	68,70	59,35	46
138,70	83,20	70,75	68,95	70,25	47
141,95	84,95	71,45	70,65	70,90	48
145,70	86,90		77,80		49
147,40	90,70		83,45		50

6.1.3 Simulationsergebnisse bei 200 Agenten mit einem Radius von 0,20 m

Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,25 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,5 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,65 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,75 m/s	Zeit in Sekunden Geschwindigkeit 1 m/s	Gesamtzahl der Personen, die das Treppende passiert haben
43,40	24,60	20,15	18,10	14,80	1
45,20	26,15	21,70	18,85	16,20	2
46,55	27,10	22,10	19,75	16,25	3
46,65	27,25	22,60	20,50	17,05	4
47,50	27,40	22,65	20,65	17,10	5
47,80	27,50	23,60	20,80	17,25	6
49,95	29,00	24,40	21,75	18,45	7
50,45	29,50	24,80	22,40	18,80	8
53,10	30,75	25,75	23,60	19,10	9
53,75	31,00	25,80	23,80	19,15	10
54,00	32,10	26,45	24,05	20,10	11
55,40	33,00	27,65	25,25	20,65	12
55,85	34,40	28,75	25,45	21,75	13
56,55	34,50	28,80	26,55	21,75	14
57,90	35,00	30,40	27,05	22,00	15
58,95	35,00	31,60	27,85	23,50	16
59,80	36,35	31,80	28,00	23,75	17
59,95	36,70	32,05	28,15	24,50	18
60,45	36,80	32,25	29,00	24,70	19
62,25	37,20	32,50	29,25	25,00	20

6 Anhang

62,40	38,10	32,55	30,15	25,25	21
63,40	38,35	32,55	30,55	25,50	22
65,10	38,50	32,80	30,90	25,55	23
66,50	38,70	33,15	31,40	25,85	24
66,95	38,80	33,55	31,70	26,70	25
67,20	39,45	34,65	32,45	26,70	26
67,90	40,20	34,95	33,05	27,20	27
68,00	42,10	35,55	33,40	27,75	28
70,60	42,55	36,60	33,75	28,25	29
70,75	42,55	36,70	34,55	28,50	30
73,30	42,95	37,35	35,05	28,75	31
74,25	43,80	37,75	35,35	29,40	32
74,70	44,60	38,50	36,10	29,50	33
75,05	44,75	38,80	36,20	30,20	34
76,25	45,60	39,85	36,35	30,20	35
78,15	46,85	40,65	36,55	31,15	36
78,95	47,00	40,90	37,05	31,65	37
79,40	47,35	40,95	37,45	32,85	38
79,55	47,85	41,15	37,65	33,15	39
80,90	47,90	42,40	37,85	33,40	40
82,55	48,40	43,00	40,15	34,35	41
83,50	49,50	43,65	40,35	34,35	42
83,75	49,80	43,75	40,50	34,45	43
85,70	50,10	44,05	41,15	34,75	44
86,00	50,30	44,70	41,65	34,85	45
86,00	51,50	45,40	41,70	35,60	46
86,60	53,40	46,15	42,60	35,75	47
87,80	53,50	46,80	43,00	35,80	48
90,10	53,55	47,55	43,95	36,20	49
90,35	53,75	47,70	44,70	36,80	50
91,70	54,55	48,10	44,80	37,80	51
92,80	54,55	48,50	44,80	38,70	52
94,70	55,30	48,60	45,15	38,75	53
94,80	57,50	48,90	45,50	39,35	54
94,85	57,60	49,30	45,75	39,70	55
95,00	58,80	50,35	47,05	39,70	56
97,50	58,95	51,00	47,10	40,05	57
99,80	58,95	52,65	48,00	41,30	58
101,05	59,45	52,70	48,30	41,70	59
101,10	59,60	52,80	48,75	41,95	60
101,20	60,20	53,30	48,80	41,95	61
102,10	60,50	53,35	49,10	42,60	62
102,85	60,70	54,05	49,15	43,15	63
103,65	61,70	54,35	49,20	43,15	64
104,50	61,75	55,10	49,45	43,20	65
105,20	62,55	55,15	50,55	43,45	66
106,15	63,85	56,65	51,70	43,65	67

6 Anhang

107,50	64,20	57,00	52,05	45,15	68
108,15	64,40	57,25	52,35	46,05	69
110,10	64,65	57,55	52,95	46,20	70
111,45	65,80	58,65	53,2	46,20	71
112,10	65,95	58,65	53,3	46,45	72
113,65	66,45	58,70	53,4	46,60	73
114,75	66,90	59,15	53,5	47,35	74
114,95	67,10	59,70	54,9	47,50	75
115,35	68,35	59,95	55,3	47,95	76
116,70	68,95	60,25	56	48,25	77
118,45	69,70	60,55	56,25	48,25	78
119,75	69,90	62,70	56,55	48,45	79
119,80	70,55	62,80	56,75	49,45	80
120,10	71,10	63,30	57,05	49,95	81
121,00	72,00	63,35	57,6	50,20	82
121,70	72,60	64,50	58,3	50,35	83
122,20	72,90	64,60	59,1	50,50	84
123,60	74,00	64,85	60,3	50,60	85
126,45	74,10	65,95	60,4	50,95	86
127,45	74,55	66,85	60,95	51,50	87
128,30	75,30	67,15	62,1	52,20	88
128,35	76,00	67,15	62,25	52,45	89
128,70	76,20	67,90	63,85	54,20	90
128,90	76,35	68,25	64,35	54,65	91
130,15	77,65	68,85	64,55	54,80	92
131,30	77,70	69,05	65,1	56,15	93
132,20	77,90	69,25	65,15	56,30	94
133,90	77,90	69,70	65,25	56,50	95
134,00	80,35	70,05	65,50	56,55	96
136,75	81,55	70,75	65,80	56,85	97
137,85	81,60	71,15	66,05	56,95	98
138,35	82,50	71,15	66,85	56,95	99
138,40	82,80	71,25	67,45	57,50	100
140,00	83,35	71,65	68,25	57,50	101
140,10	84,20	72,80	68,50	59,05	102
141,55	85,10	73,70	68,95	59,25	103
143,05	85,20	73,95	70,10	59,30	104
144,80	85,35	74,20	70,25	60,05	105
145,15	87,25	75,80	71,10	60,40	106
145,40	88,05	75,85	72,25	60,90	107
146,60	88,10	75,90	72,40	61,05	108
147,10	88,10	77,30	73,45	61,20	109
149,35	88,15	77,35	73,95	62,00	110
149,70	89,50	77,45	74,70	62,05	111
149,70	89,95	77,85	75,05	63,55	112
151,45	90,70	79,10	75,40	63,70	113
151,95	90,80	79,30	75,80	64,65	114

6 Anhang

152,50	91,75	79,55	75,90	64,90	115
153,10	91,95	80,15	76,10	65,00	116
155,25	92,15	80,35	76,25	65,25	117
155,65	92,65	80,80	76,75	65,65	118
155,80	92,90	81,80	76,85	66,00	119
157,10	93,80	81,90	76,90	66,15	120
158,75	94,50	82,00	78,00	67,25	121
160,70	95,05	83,15	78,15	68,20	122
161,30	95,25	84,40	78,30	68,30	123
162,50	95,65	84,85	78,50	68,80	124
163,60	97,00	85,25	78,70	69,00	125
164,00	97,15	85,90	79,80	69,05	126
165,20	97,85	86,35	80,15	69,10	127
167,65	98,15	87,55	80,30	69,15	128
168,45	98,95	88,45	80,65	70,80	129
168,70	100,20	88,55	80,95	70,85	130
169,40	100,25	88,70	82,80	71,60	131
169,50	101,15	89,10	82,90	72,20	132
172,70	101,20	90,15	83,95	72,85	133
172,90	103,00	90,25	84,15	73,15	134
173,60	103,05	90,65	84,40	73,65	135
173,85	103,40	91,10	85,65	73,70	136
175,60	104,5	91,40	85,70	74,45	137
175,60	106,65	92,25	86,60	74,90	138
177,20	106,65	92,35	86,60	75,10	139
177,70	106,80	93,45	86,95	75,80	140
178,40	107,10	93,50	87,00	76,10	141
179,55	107,85	93,70	87,15	76,15	142
180,30	107,90	94,10	88,95	76,35	143
180,35	109,25	94,55	89,45	76,85	144
181,60	110,60	94,95	89,85	76,90	145
183,20	110,90	95,80	90,00	77,50	146
183,80	111,00	96,15	90,90	77,85	147
184,45	111,45	96,65	91,85	78,90	148
185,95	111,60	96,85	93,55	79,10	149
187,15	111,65	97,70	93,75	79,60	150
187,45	111,85	99,40	94,9	80,60	151
187,50	112,85	100,40	94,9	80,60	152
187,80	115,55	100,75	95	80,70	153
190,90	115,7	100,85	95,7	81,15	154
191,20	115,9	101	96,7	82,15	155
191,90	116,25	101,2	96,75	82,40	156
192,40	116,5	101,8	97,3	82,45	157
192,90	117,5	101,95	97,65	82,70	158
194,50	117,55	102,3	97,8	82,90	159
196,85	118,4	102,35	98,3	83,20	160
197,65	119,2	102,4	98,4	83,65	161

6 Anhang

197,70	120,35	103,25	98,45	84,65	162
198,80	120,55	104,7	98,7	84,80	163
199,10	120,65	105,2	99,35	85,05	164
200,20	121,2	106,1	99,55	85,80	165
203,00	122,25	106,65	100,05	85,85	166
203,95	122,35	107,15	100,9	86,40	167
204,40	122,95	107,3	101,3	86,50	168
204,45	123,3	108,3	101,7	86,60	169
204,55	123,85	108,3	101,9	87,05	170
208,30	125,3	108,6	102,85	87,35	171
208,70	125,4	110,1	102,9	88,10	172
210,30	125,95	112,9	103,45	88,30	173
210,65	126,9	113	104,35	89,60	174
211,00	127,35	113,35	104,6	90,15	175
211,35	127,55	113,35	104,65	90,80	176
213,75	127,9	113,4	105,25	92,90	177
214,10	128,85	113,45	105,45	94,00	178
215,60	130	115,1	105,8	95,10	179
216,75	130,85	115,25	107,3	95,75	180
216,90	131,6	115,25	107,55	95,95	181
218,05	132	117,45	108	96,00	182
218,05	133,45	117,5	109,55	96,20	183
219,80	133,55	118,45	109,6	96,80	184
222,15	134,15	119	110,3	97,05	185
223,20	134,35	119,2	110,75	97,45	186
224,20	134,6	119,45	110,9	97,85	187
224,45	134,8	119,6	111,05	98,25	188
225,25	135,1	119,65	111,6	98,55	189
226,50	135,9	120,85	111,95	98,65	190
228,35	136,45	121	112,05	98,90	191
228,40	136,45	121,05	112,35	99,90	192
228,65	137,7	121,55	112,45	99,90	193
230,35	138,1	121,95	113,25	100,45	194
230,80	138,6	122,05	113,65	100,6	195
233,20	140,05	122,15	113,9	101,45	196
235,10	140,5	122,3	114,2	101,75	197
235,25	141,15	124,2	115	101,75	198
235,75	142,45	125,25	115,1	102,1	199
236,55	142,7	126,2	116,75	102,25	200

6.1.4 Simulationsergebnisse bei 200 Agenten mit einem Radius von 0,28 m

Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,25 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,5 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,65 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 0,75 m/s	Zeit in Sekunden - Geschwindigkeit 1 m/s	Gesamtzahl der Personen, die das Treppenende passiert haben
44,45	25,95	21,00	19,05	16,00	1
45,50	27,65	21,10	19,10	17,80	2
48,65	28,15	23,00	20,95	17,95	3

6 Anhang

51,00	28,35	23,95	21,90	18,00	4
52,55	32,10	24,25	22,15	21,05	5
53,65	32,60	25,65	23,55	21,10	6
56,65	32,80	25,70	23,55	21,55	7
60,35	34,70	29,10	27,00	21,75	8
62,20	34,75	30,25	27,90	23,40	9
62,25	37,40	30,35	28,10	24,20	10
64,40	38,65	31,10	28,50	24,30	11
66,80	38,70	31,45	28,65	27,55	12
69,40	41,35	33,30	29,30	28,50	13
70,65	42,75	33,80	30,55	30,15	14
73,05	43,10	34,30	32,85	30,35	15
75,45	45,70	34,95	32,85	31,75	16
76,95	45,90	36,20	34,05	32,20	17
78,30	47,35	36,70	35,35	33,30	18
82,70	48,70	38,55	36,10	34,60	19
83,00	49,30	39,35	36,65	35,55	20
87,50	50,05	39,90	37,75	36,35	21
88,15	52,95	40,90	37,95	37,80	22
88,95	54,05	41,25	39,15	37,85	23
91,35	55,00	42,45	39,45	39,40	24
92,50	56,05	43,20	39,70	40,45	25
94,90	56,20	44,20	40,10	41,05	26
99,05	57,80	46,80	42,00	41,35	27
100,35	58,20	48,05	46,05	43,40	28
101,25	59,65	48,15	46,25	44,05	29
104,90	60,70	50,15	46,45	45,15	30
105,55	63,65	50,45	46,55	45,20	31
107,25	64,60	50,85	49,65	45,40	32
109,75	64,70	51,20	49,90	46,70	33
113,45	67,45	54,55	51,40	48,05	34
114,50	67,50	55,80	52,65	48,15	35
116,05	68,25	56,40	53,55	48,95	36
118,65	69,95	56,75	53,55	49,15	37
120,05	71,95	57,80	54,20	49,60	38
122,20	72,45	59,00	54,70	50,45	39
124,55	73,10	59,95	56,35	51,25	40
125,00	74,65	60,15	58,10	52,65	41
128,00	74,70	62,10	58,80	55,00	42
130,55	75,35	64,20	59,30	55,00	43
133,45	78,95	64,40	60,35	57,55	44
134,05	80,00	64,50	61,05	59,25	45
134,75	80,60	65,20	61,35	59,50	46
139,55	81,05	65,30	62,90	59,50	47
139,95	83,30	67,35	63,25	60,55	48
142,20	84,00	68,35	64,05	60,55	49
143,25	84,50	68,75	64,95	61,15	50

6 Anhang

147,20	94,95	70,65	65,20	63,35	51
148,55	86,35	70,75	67,75	64,30	52
148,95	87,80	71,25	68,50	64,90	53
152,10	90,95	72,70	68,80	66,15	54
153,50	91,85	72,80	70,10	67,15	55
156,25	92,40	76,65	70,10	67,65	56
157,55	93,10	76,70	70,95	68,70	57
162,35	93,40	77,50	71,45	69,70	58
163,55	96,40	78,30	72,05	69,90	59
164,95	97,60	78,60	73,50	70,00	60
166,10	99,70	79,05	74,15	72,15	61
166,75	99,95	79,45	74,95	72,95	62
169,70	100,20	80,25	77,30	74,00	63
171,45	101,55	81,65	77,75	76,35	64
172,85	102,50	83,35	78,15	77,05	65
174,60	102,60	83,65	80,20	77,60	66
178,65	103,90	83,85	80,50	78,05	67
180,15	104,85	85,65	80,80	79,75	68
180,80	106,50	85,70	80,90	80,30	69
182,35	108,40	87,70	81,35	80,65	70
184,20	109,30	88,25	82,40	81,10	71
186,20	109,65	88,70	85,30	81,10	72
189,40	111,30	90,05	86,00	81,90	73
192,35	115,35	91,15	86,85	82,25	74
193,20	115,75	91,45	87,85	83,45	75
196,70	116,65	93,10	88,05	84,25	76
196,95	116,75	94,40	89,65	84,50	77
199,30	117,85	96,35	90,20	85,10	78
202,45	119,15	96,45	90,60	86,20	79
204,75	120,20	97,15	90,70	87,15	80
205,70	120,35	98,00	93,00	88,80	81
206,85	122,15	98,50	93,10	89,00	82
208,10	123,80	100,40	94,40	90,25	83
212,50	124,30	100,85	94,80	90,25	84
213,35	125,50	101,45	95,00	90,40	85
214,40	125,80	103,80	95,30	91,45	86
217,60	127,50	104,15	97,40	93,25	87
220,30	127,65	105,45	97,60	94,05	88
222,15	129,04	106,05	99,05	94,15	89
222,50	130,15	106,60	100,30	97,25	90
225,25	130,75	108,60	101,90	97,35	91
228,25	133,00	109,10	102,35	98,95	92
229,20	134,30	109,20	102,65	99,05	93
230,40	135,30	110,65	102,70	99,75	94
234,15	136,30	111,10	104,00	100,25	95
235,75	136,70	113,45	104,05	100,55	96
239,20	138,20	116,00	106,10	101,20	97

6 Anhang

241,45	140,45	117,05	107,10	103,00	98
241,80	140,80	118,40	107,10	103,20	99
241,90	142,20	118,65	108,10	103,90	100
247,35	143,10	118,95	109,70	104,85	101
248,05	143,20	119,25	110,35	107,20	102
252,15	147,15	121,65	111,30	107,40	103
252,85	148,15	121,65	111,50	107,40	104
254,25	149,10	124,45	113,25	108,95	105
255,70	149,75	125,35	113,50	110,85	106
257,10	150,55	125,50	113,75	110,90	107
260,75	152,70	126,25	113,80	111,10	108
261,95	154,75	127,10	116,05	111,40	109
264,55	155,05	128,70	116,45	111,95	110
266,25	156,60	129,15	118,25	112,55	111
270,95	157,95	130,00	118,65	114,45	112
271,30	158,15	131,75	119,70	114,75	113
272,05	158,60	132,95	119,85	115,05	114
274,85	159,85	133,65	121,85	116,75	115
275,45	163,30	134,30	122,35	119,75	116
278,20	163,45	134,50	125,30	120,15	117
281,85	164,00	135,80	125,70	120,75	118
282,60	164,70	137,00	126,75	121,25	119
286,50	166,30	137,55	127,20	121,70	120
288,15	166,35	137,95	127,30	122,45	121
288,70	167,30	140,85	127,40	124,25	122
289,90	170,10	141,05	130,00	125,60	123
296,05	172,50	142,40	130,05	125,80	124
296,55	171,55	142,50	131,20	125,95	125
296,70	174,30	142,55	131,30	127,15	126
300,30	174,40	144,25	132,85	127,15	127
301,75	174,75	144,30	133,50	127,50	128
304,95	176,55	146,40	134,25	128,20	129
306,75	177,65	146,65	135,70	128,55	130
309,65	178,90	146,90	136,85	129,95	131
310,90	178,90	149,90	137,25	130,45	132
312,00	181,50	150,20	137,60	131,20	133
315,15	182,05	151,75	140,00	131,30	134
316,50	182,55	152,20	140,45	133,40	135
318,15	183,75	152,45	141,85	133,60	136
318,20	184,40	153,75	143,30	134,65	137
322,00	187,95	155,95	143,45	135,65	138
324,70	188,00	155,95	144,20	135,90	139
326,35	189,15	156,90	144,55	136,55	140
327,50	189,90	157,15	145,10	140,05	141
328,55	191,25	157,95	146,95	141,25	142
330,75	192,85	160,15	147,05	141,25	143
333,80	194,30	160,60	147,70	141,50	144

6 Anhang

336,40	194,60	161,25	148,25	141,85	145
337,10	196,90	161,95	151,20	143,25	146
339,45	197,25	163,90	151,40	143,50	147
340,65	198,20	164,85	151,50	144,95	148
343,75	198,95	168,90	152,20	145,50	149
346,25	200,50	169,45	152,65	146,30	150
347,80	203,35	169,45	154,65	146,75	151
350,55	203,75	169,65	155,20	147,05	152
351,20	205,30	171,60	156,15	148,00	153
354,05	205,30	171,80	157,25	150,00	154
354,60	207,55	172,70	158,10	150,35	155
356,85	208,00	173,05	159,85	151,40	156
359,50	208,90	174,30	160,70	153,20	157
362,85	211,65	175,75	162,05	153,35	158
364,00	211,75	177,25	162,30	153,35	159
365,65	211,85	177,85	163,10	153,80	160
369,50	211,95	178,15	164,10	154,00	161
370,45	215,40	178,30	164,40	158,15	162
373,10	215,75	178,75	165,25	158,50	163
374,65	217,25	180,25	165,55	158,70	164
375,50	218,70	180,90	167,90	159,20	165
378,45	220,45	183,15	168,05	160,25	166
378,70	220,45	183,55	169,20	160,50	167
383,90	222,40	183,90	172,50	161,25	168
384,05	224,90	185,10	173,85	163,45	169
386,65	225,60	188,20	175,30	165,85	170
387,55	226,95	189,60	175,50	166,10	171
390,70	230,20	189,75	179,05	167,05	172
391,70	231,00	190,00	180,55	167,40	173
397,15	231,90	190,20	180,80	167,50	174
397,60	232,00	190,70	181,40	169,50	175
398,85	233,80	191,65	182,30	171,45	176
400,70	235,20	193,35	182,55	172,40	177
402,70	235,80	195,15	183,10	173,45	178
405,45	237,80	196,20	184,85	173,55	179
405,95	239,15	196,30	185,25	175,05	180
408,50	241,40	197,25	185,75	175,80	181
410,20	241,50	198,35	186,55	175,85	182
411,90	243,00	199,65	188,40	177,55	183
414,05	243,65	199,95	189,30	178,30	184
416,80	245,55	201,85	189,40	178,35	185
419,95	245,60	203,40	190,30	178,95	186
420,80	245,70	203,50	191,85	183,65	187
423,10	247,85	208,15	193,00	183,80	188
424,30	250,30	208,70	193,35	185,65	189
429,55	251,55	211,35	193,75	185,75	190
430,00	253,95	211,60	194,30	186,05	191

6 Anhang

430,80	255,30	213,35	195,35	186,50	192
434,15	256,15	213,95	195,50	187,70	193
435,60	257,05	214,90	199,65	190,40	194
440,45	257,65	215,65	199,70	191,05	195
440,80	258,25	215,70	200,55	191,25	196
442,75	260,00	216,95	201,20	191,75	197
445,90	270,10	219,50	203,65	191,90	198
446,75	271,95	221,80	203,80	195,30	199
	277,00	223,60	205,65	197,65	200

6.2 Verwendete Geometriedatei

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<geometry version="0.8" caption="second life" unit="m"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://134.94.2.137/jps_geometry.xsd">

<rooms>
  <room id="0" caption="subway">
    <subroom id="0" caption="dummy_caption" class="subroom" A_x="0" B_y="0" C_z="0">
      <polygon caption="wall" type="wall">
        <vertex px="0" py="1"/>
        <vertex px="0" py="0"/>
      </polygon>
      <polygon caption="wall" type="wall">
        <vertex px="0" py="0"/>
        <vertex px="20" py="0"/>
      </polygon>
      <polygon caption="wall" type="wall">
        <vertex px="20" py="0"/>
        <vertex px="20" py="1"/>
      </polygon>
      <polygon caption="wall" type="wall">
        <vertex px="20" py="2"/>
        <vertex px="20" py="4"/>
      </polygon>
      <polygon caption="wall" type="wall">
        <vertex px="20" py="4"/>
        <vertex px="0" py="4"/>
      </polygon>
      <polygon caption="wall" type="wall">
```

6 Anhang

```
<vertex px="0" py="4"/>
<vertex px="0" py="2"/>
</polygon>
</subroom>
<subroom id="1" caption="dummy_caption" class="escalator" A_x="-0.5" B_y="0" C_z="0">
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="0" py="1"/>
    <vertex px="-12" py="1"/>
  </polygon>
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="0" py="2"/>
    <vertex px="-12" py="2"/>
  </polygon>
  <up px="-12" py="2"/>
  <down px="0" py="2"/>
</subroom>
<subroom id="2" caption="dummy_caption" class="stair" A_x="1.2" B_y="0" C_z="-24">
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="20" py="1"/>
    <vertex px="25" py="1"/>
  </polygon>
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="20" py="2"/>
    <vertex px="25" py="2"/>
  </polygon>
  <up px="25" py="2"/>
  <down px="2" py="2"/>
</subroom>
<crossings>
<crossing id="0" subroom1_id="0" subroom2_id="1">
  <vertex px="0" py="1"/>
  <vertex px="0" py="2"/>
</crossing>
<crossing id="1" subroom1_id="0" subroom2_id="2">
  <vertex px="20" py="1"/>
  <vertex px="20" py="2"/>
</crossing>
</crossings>
</room>
<room id="1" caption="Hall">
  <subroom id="0" caption="dummy_caption" class="subroom" A_x="0" B_y="0" C_z="6">
    <polygon caption="wall" type="wall">
      <vertex px="-12" py="7"/>
```

6 Anhang

```
<vertex px="25" py="7"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="-12" py="-2"/>
  <vertex px="0" py="-2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="25" py="1"/>
  <vertex px="20" py="1"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="20" py="1"/>
  <vertex px="20" py="2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="20" py="2"/>
  <vertex px="25" py="2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="-12" py="1"/>
  <vertex px="0" py="1"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="0" py="1"/>
  <vertex px="0" py="2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="0" py="2"/>
  <vertex px="-12" py="2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="internal">
  <vertex px="25" py="-2"/>
  <vertex px="20" py="-2"/>
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="0" py="-2"/>
  <vertex px="20" py="-2"/>
</polygon>
</subroom>
<subroom id="1" caption="dummy_caption" class="subroom" A_x="0" B_y="0" C_z="6">
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="-12" py="-2"/>
    <vertex px="-17" py="-2"/>
```

6 Anhang

```
</polygon>
<polygon caption="wall" type="wall">
  <vertex px="-17" py="7"/>
  <vertex px="-12" py="7"/>
</polygon>
</subroom>
<subroom id="2" caption="dummy_caption" class="subroom" A_x="0" B_y="0" C_z="6">
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="25" py="-2"/>
    <vertex px="27" py="-2"/>
  </polygon>
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="27" py="-2"/>
    <vertex px="27" py="7"/>
  </polygon>
  <polygon caption="wall" type="wall">
    <vertex px="27" py="7"/>
    <vertex px="25" py="7"/>
  </polygon>
</subroom>
<crossings>
<crossing id="2" subroom1_id="0" subroom2_id="2">
  <vertex px="25" py="-2"/>
  <vertex px="25" py="1"/>
</crossing>
<crossing id="3" subroom1_id="0" subroom2_id="2">
  <vertex px="25" py="2"/>
  <vertex px="25" py="7"/>
</crossing>
<crossing id="4" subroom1_id="0" subroom2_id="1">
  <vertex px="-12" py="-2"/>
  <vertex px="-12" py="1"/>
</crossing>
<crossing id="5" subroom1_id="0" subroom2_id="1">
  <vertex px="-12" py="2"/>
  <vertex px="-12" py="7"/>
</crossing>
</crossings>
</room>
</rooms>
<transitions>
<transition id="6" caption="No_Name" type="emergency" room1_id="0" subroom1_id="1" room2_id="1" subroom2_id="1">
  <vertex px="-12" py="1"/>
```

6 Anhang

```
<vertex px="-12" py="2"/>
</transition>
<transition id="7" caption="No_Name" type="emergency" room1_id="0" subroom1_id="2" room2_id="1" subroom2_id="2">
  <vertex px="25" py="1"/>
  <vertex px="25" py="2"/>
</transition>
<transition id="8" caption="No_Name" type="emergency" room1_id="1" subroom1_id="1" room2_id="-1" subroom2_id="-1">
  <vertex px="-17" py="-2"/>
  <vertex px="-17" py="7"/>
</transition>
</transitions>
</geometry>
```