



Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation  
Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

## Implementierung, Analyse und Evaluierung der Erweiterung des Social Force Models für wartenden Fußgänger

---

**Sonja Germscheid**

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Umweltingenieurwesen

Autor: Sonja Germscheid  
1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann  
2. Betreuer: Dipl.-Inf. (FH) Peter Kielar, M.Sc.

Ausgabedatum: 01. November 2016

Abgabedatum: 01. April 2017



## **Abstract**

In the following bachelor thesis the pedestrian simulator MomenTUMv2 of the chair of computational modelling and simulation has been extended by a behavioural pattern for waiting pedestrians. So far waiting pedestrians were simulated as standing still. Therefore the already implemented Social Force Model was extended by the model for waiting pedestrians, which was introduced by Johansson et al. in “Waiting pedestrians in the social force model“. Within this bachelor thesis different pedestrian models will be presented. The oscillation behaviour of the waiting pedestrians will be analysed and suggestions for improvement will be made. The implementation of the waiting pedestrians has been successful and the general behaviour of the waiting pedestrians is as predicted. Nevertheless it is important to choose the right parameters to avoid excessive oscillation.

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen der folgenden Bachelorarbeit soll das Social Force Model um wartende Fußgänger erweitert werden. Hierbei sollte die Erweiterung in den Fußgängersimulator MomenTUMv2 des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung und Simulation implementiert, analysiert und evaluiert werden.

Zuerst werden hierzu vier verschiedene Fußgängermodelle vorgestellt. Bei den Modellen kann man generell in makroskopische Modelle, die Eigenschaften der Gesamtheit an Fußgängern betrachtet, und mikroskopische Modelle, die das Verhalten der einzelnen Fußgänger nachstellen, unterschieden werden. Des Weiteren kann eine Aufteilung in kontinuierliche und diskrete Modelle vorgenommen werden. Insbesondere soll hierbei auf das Social Force Model nach Helbing und Molnár eingegangen werden. In diesem wird das Verhalten der Fußgänger durch richtungsbehafteten Kräfte bestimmt.

Auf diesem Modell aufbauend, wird die Erweiterung des Social Force Models um wartende Fußgänger von Johansson et al. erläutert. Dieser Ansatz stellt drei Modelle vor, in denen das Verhalten der wartenden Fußgänger entweder durch ihre Wunschgeschwindigkeit oder ihre Warteposition bestimmt wird.

Zuletzt sollen die Ergebnisse der Implementierung vorgestellt werden. Hierbei werden anhand eines Beispielszenarios die Funktionsweise und Eigenschaften der erfolgreichen Implementierung erläutert. Ebenso wird das Oszillationsverhalten anhand einer Parameteranalyse betrachtet. Zuletzt wird die Implementierung evaluiert und es werden einige Verbesserungsvorschläge gemacht.



# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	II
Zusammenfassung .....	II
1 Einführung und Motivation .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit .....	1
2 Aktueller Forschungsstand .....	2
2.1 Vergleiche der Fußgänger Modelle .....	2
2.2 Transportmodelle .....	2
2.3 Diskretes Netzwerk .....	6
2.4 Cellular Automata Modell .....	8
2.5 Social Force Model .....	9
2.5.1 Beschleunigungskraft .....	10
2.5.2 Abstoßende Kraft gegen andere Fußgänger .....	10
2.5.3 Abstoßende Kraft gegen Hindernisse .....	11
2.5.4 Anziehende Kraft zu Orten von besonderem Interesse .....	12
2.5.5 Erweiterung um die richtungsabhängige Gewichtung .....	12
2.5.6 Erweiterung um eine angepasste bevorzugte Geschwindigkeit .....	13
2.5.7 Die Gesamtkraft .....	13
2.6 Integration des Social Force Models in einer Verhaltensarchitektur für Fußgänger .....	14
3 Modelle mit wartenden Fußgängern .....	16
3.1 Ansatz von Johansson et al. ....	16
3.1.1 Modell der bevorzugten Geschwindigkeit .....	17
3.1.2 Modell der bevorzugten Positionen .....	18
3.1.3 Modell der anpassbaren, bevorzugten Position .....	20
3.2 Vergleich zu dem Model von Davidich et al. ....	21
4 Ergebnisse der Implementierung der wartenden Fußgänger .....	23
4.1 Erläuterung der Funktionsweise der Implementierung .....	23
4.1.1 Beispielszenario .....	23
4.1.2 Verhalten eines einzelnen wartenden Fußgänger .....	23
4.1.3 Verhalten mehrerer wartender Fußgänger .....	28
4.2 Analyse des Oszillationsverhaltens .....	32



4.2.1	Verhalten bei einem vorbeilaufenden Fußgänger .....	33
4.2.2	Verhalten bei einem zweiten wartenden Fußgänger .....	35
4.2.3	Verhalten im Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition .....	38
5	Evaluierung des Modells und Verbesserungsvorschläge .....	40
6	Anhang .....	43
6.1	Quellcode des Wartemodells und der Fußgängererweiterung.....	43
6.2	Parameterwerte der Szenarien .....	43
6.3	Tabellen zum Oszillationsverhalten .....	43
7	Literaturverzeichnis.....	46

---

# 1 Einführung und Motivation

## 1.1 Einführung

In den letzten paar Jahrzehnten wurde die Nutzung von Computern und digitaler Technik für die Allgemeinheit zugänglich, erschwinglich und alltäglich. Mit jedem Jahr steigt die Rechenleistung von Computern, Smartphones und Tablets. Auch in den Ingenieursberufen wird nur noch selten von Hand gerechnet. Stattdessen werden Programme genutzt um maximale Belastungen zu berechnen, Prozesse zu visualisieren, Sicherheitsstandards einzuhalten, Maschinen und Gebäude effizient zu gestalten und Infrastrukturen darzustellen und zu prüfen. Hierfür wird oft zuerst ein Szenario oder eine Maschine digital modelliert. Danach können verschiedene Berechnungen und Simulationen darauf angewendet werden um die Effizienz zu prüfen [1].

Eine solche Simulation, die auf Gebäude und Großveranstaltungen angewandt werden kann, ist die von Fußgängern. Mit Fußgänger Simulationen kann man die Bewegungen einer Menschenmenge abschätzen und so Verkehrswege für den Fall von Bränden, Evakuierungen und mögliche Massenpaniken verbessern [2 – 5]. Sie sind im Gegenzug zu Experimenten sicherer, da sich keine Probanden verletzen können. Zusätzlich können in der Simulation die Parameter, wie Gebäudegeometrien, Anzahl und Geschwindigkeit der Fußgänger, angepasst werden. Somit können mehr Vergleichsdaten erstellt werden, als mit Experimenten zeitlich möglich wären.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Ermittlung der Effizienz von Verkehrsströmen, wie in Bahnhöfen oder großen Veranstaltungsstätten. Dies ist wichtig um Verkehrswegen richtig für den Normalbetrieb als auch für Evakuierungen zu dimensionieren. Um Verkehrsströme nachzustellen, wird oft das Social Force Model nach Helbing und Molnár [6] angewendet, welches die Beschleunigung zur gewünschten Geschwindigkeit, Interaktionen der Fußgänger mit anderen Fußgängern oder Hindernissen und anziehende Effekte abbildet.

Selten werden jedoch wartende Passanten, zum Beispiel vor Informationsschildern oder am Bahnsteig, in den Modellen beachtet. Da laufende Fußgänger diesen ausweichen müssen, werden die Fußgänger Ströme verlangsamt [7]. Um weiterhin einen ausreichend hohen Fußgängerstrom zu garantieren und Engstellen zu erkennen ist es wichtig diese Komponente der wartenden Fußgänger in Simulationen zu implementieren.

## 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Erweiterung des Social Force Model nach Helbing und Molnár um wartende Fußgänger in MomenTUMv2 implementiert werden. Die Erweiterung folgt dem Ansatz von Johansson, Peterson und Tapani [7]. Des Weiteren soll diese analysiert und evaluiert werden.

Zuerst werden verschiedene Ansätze zu Fußgängermodellierungen vorgestellt und Zusammenhänge erläutert. Insbesondere wird hier das Ausgangsmodell für die Erweiterung, das Social Force Model nach Helbing, erklärt. Im nächsten Teil werden die einzelnen

Komponenten des Wartemodells nach Johansson et al. und ein Vergleich zu dem Wartemodell von Davidich et al. [8], basierend auf einem Cellular Automata Modell, gezogen werden. Daraufhin wird die Funktionsweise der Implementierung anhand eines Beispielszenario dargestellt. Ebenso wird das Oszillationsverhalten der Fußgänger im Modell der bevorzugten Warteposition analysiert. Im letzten Teil dieser Arbeit werden mögliche Verbesserungsvorschläge zu dem Modell vorgestellt.

## 2 Aktueller Forschungsstand

### 2.1 Vergleiche der Fußgänger Modelle

Generell können Fußgänger Modelle in makro- und mikroskopische Modelle aufgeteilt werden, sowie in diskrete und kontinuierliche Ansätze (vgl. Abbildung 1).

	Makroskopisch	Mikroskopisch
Kontinuierlich	1D-/2D Transportmodelle	Social Force Model
Diskret	Diskretes Netzwerk	Cellular Automata

Abbildung 1 – Schematische Unterteilung der Fußgängermodelle mit Beispielmodellen [9]

Während sich makroskopische Modelle auf Eigenschaften der Gesamtheit an Fußgängern, wie die Dichte und die Verteilung im Raum, konzentrieren, beschreiben mikroskopische Modelle den einzelne Fußgänger und deren Verhalten [10]. Mikroskopische Modelle können eine detaillierte Auflösung von der Handlungsweise einzelner Fußgänger wiedergeben, wodurch die Ergebnisse sehr vertrauenswürdig werden. Gleichzeitig sind der Rechenaufwand und die Komplexität dieser Modelle höher als bei makroskopischen Ansätzen [11]. Zu den mikroskopischen Modellen zählt das Social Force Model sowie der Zellenautomat. Makroskopische Ansätze können Transportmodelle, die mit partiellen Differentialgleichung beschrieben werden, oder auf diskreten Netzwerkmodellen basieren [9, 12]. Im Folgenden sollen diese vier verschiedenen Ansätze vorgestellt werden.

### 2.2 Transportmodelle

Die ersten makroskopischen Transportmodelle entstanden in den 1970ern. 1971 gelang es Henderson erfolgreich Fußgänger mit idealen Gasen zu vergleichen. Hierzu unterteilte er die Fußgänger in drei Laufverhalten – Rennend, Laufend und Stehend. Er nahm die Daten von nicht zu dichten, einheitlichen Fußgängergruppen auf, wie Studenten auf einem Campus oder Fußgänger an Kreuzungen, und ermittelte die Geschwindigkeitsverteilung dieser empirisch.

Die empirische Geschwindigkeitsverteilung ist der von der Maxwell-Boltzmann Verteilung für die Teilchengeschwindigkeit von idealen Gasen bei richtiger Parameterwahl so ähnlich, dass Henderson die Analogien von ideellen Gasen mit einheitlichen, nicht zu dichten Fußgängergruppen gefolgert hat.

So entstand die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Geschwindigkeit  $P(|V|)$  wie in Formel ( 2. 1 ), welche auf Gruppen angewendet werden kann, deren einzelne Fußgänger sich voneinander statistisch unabhängig bewegen, die sich im Gleichgewicht befinden und sich auf einer kontinuierlichen zwei dimensional Fläche bewegen [13].

$$P(|V|) := \frac{1}{N} \frac{dN_v}{dv} = \frac{\pi}{4} \frac{v^2}{\bar{v}^2} e^{-\frac{\pi}{4} \frac{v^2}{\bar{v}^2}} \quad ( 2. 1 )$$

- mit
- $N$  Anzahl der Fußgänger
  - $\mathbf{V}$  Geschwindigkeitsvektor der Fußgänger
  - $v := |\mathbf{V}|$  skalare Geschwindigkeit eines Fußgänger
  - $v_{q.Mw.}$  quadratischer Mittelwert der Geschwindigkeiten  $v$
  - $\bar{v} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} v_{q.Mw.}$

Mittlerweile wird die Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger oft als Normalverteilt für Berechnungen angenommen (vgl. Abbildung 2). Die Wunschgeschwindigkeit erreicht ein Fußgänger, wenn er sich von seiner Umgebung ungehindert bewegen kann. Er wird also nicht von anderen Fußgänger oder Hindernissen blockiert oder beeinflusst. Der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung ist abhängig von der Fußgängerdichte. Sobald die Dichte sehr hoch ist, kann sich der Fußgänger nicht mehr so schnell bewegen, da er mehr auf seine Umgebung achten muss um Zusammenstöße mit anderen Fußgängern zu vermeiden. Somit nimmt die mittlere Geschwindigkeit der Fußgänger ab [9].

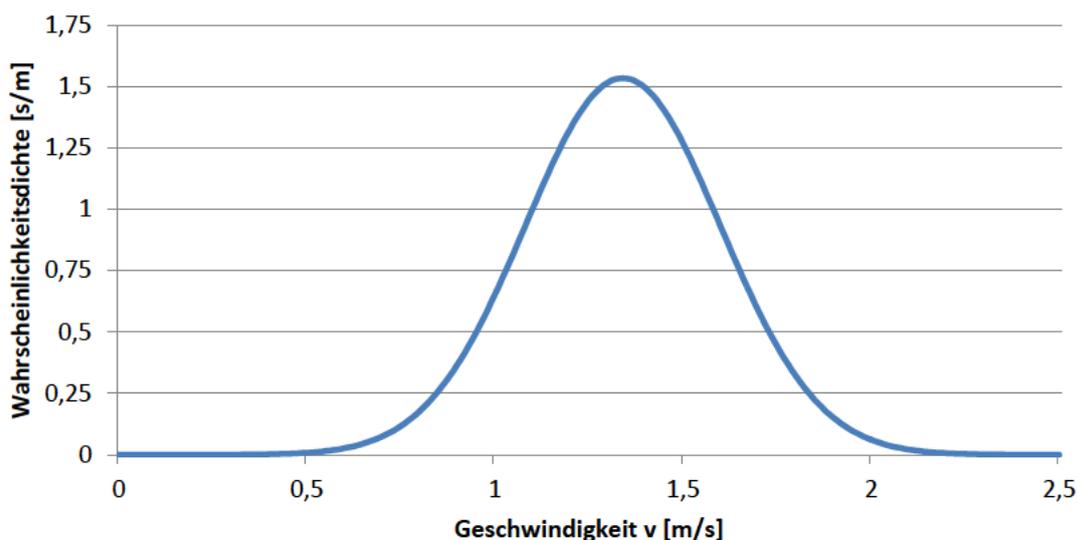


Abbildung 2 – Normalverteilte Geschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit  $v$  ist normalverteilt. Wenn die Fußgängerdichte so gering ist, dass sie die Geschwindigkeit der Fußgänger nicht beeinflusst, kann als typischer Mittelwert  $v=1,34$  m/s und als Standardabweichung  $\sigma = 0,26$  verwendet werden [14].

Ein weiterer wichtiger Teil der makroskopischen Modelle ist die Transportgleichung, welche die statistische Verteilung der Fußgänger im Raum beschreibt.

1974 wendete Henderson die Boltzmann'sche Transportgleichung auf Fußgänger an. Diese beschreibt die statistische Verteilung von verdünntem Gas in einem Raum. Henderson konnte so die Fortbewegung einer Fußgängermenge beschreiben [15]. In den 1990ern nutzte Helbing diesen Ansatz, verbesserte und bewies ihn mathematisch. Mit diesem gaskinetischen Ansatz konnte Helbing makroskopische Gleichungen für die Dichte von Masse, Impuls und Energie sowie einige Zusatzterme für fußgängerspezifische Eigenheiten herausarbeiten [16].

Im Folgenden soll ein klassisches kontinuierliches, makroskopisches Transportmodell vorgestellt werden. In den makroskopischen Ansätzen wird nicht der einzelne Fußgänger betrachtet, sondern viel mehr Eigenschaften, die durch die Gesamtheit der Fußgänger definiert sind. Hierbei ist vor allem die Fußgängerdichte zu erwähnen, für die sich die Partielle Differential Gleichung ( 2. 2 ) ergibt.

Dieses Modell kann auf eindimensionale Szenarien, wie zum Beispiel langen Straßen, angewandt werden. Hierbei handelt es sich um ein Modell erster Ordnung, bei dem der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Fußgängerdichte durch die explizite Formel ( 2. 4 ) gegeben ist. Das im Folgenden erläuterte Konzept für ein kontinuierliches, makroskopisches Transportmodell basiert auf [9].

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v(\rho(x,t); x, t) \rho(x, t)) = f(x, t) \quad \text{in } \Omega \times [0, T] \quad (2.2)$$

mit	• $v(\rho(x, t); x, t)$	Geschwindigkeit eines Fußgängers
	• $f(x, t)$	Herkunft und Ziel der Fußgänger – Quellen & Senken
	• $\Omega \subset \mathbb{R}$	Wertebereich von Interesse
	• $\rho(x, t)$	Dichte der Fußgänger

Zur Vereinfachung könnte man die Geschwindigkeit der Fußgänger als konstant ansetzen. Hierbei wird die Geschwindigkeit  $v$  unabhängig von der Dichte angenommen. Somit lässt sich die Formel ( 2. 3 ) daraus schließen.

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \rho(x, t) = f(x, t) \quad \text{in } \Omega \times [0, T[ \quad (2.3)$$

Jedoch ist die Annahme, dass sich alle Fußgänger mit einer unveränderlichen Geschwindigkeit bewegen, realitätsfern. So wird stattdessen die Formel ( 2. 4 ) eingeführt, in der die Geschwindigkeit von der Fußgängerdichte abhängt.

Die Formel ( 2. 4 ) spiegelt eine mögliche Form des Fundamental Diagramms wieder. Das Fundamentale Diagramm beschreibt den Zusammenhang zwischen Fußgängerdichte und Geschwindigkeit. Je höher die Dichte der Fußgänger ist, desto langsamer kann sich der einzelne Fußgänger bewegen. Die genaue Form des fundamentalen Diagramms wird weiterhin diskutiert und ist möglicherweise von der Anwendung abhängig. Abbildung 3 zeigt eine mögliche Form, die von Weidemann bestimmt wurde [14].

$$v(v_{ff}, \rho; x, f) = v(v_{ff}, \rho) = v_{ff} \cdot 1 - e^{\left(-\gamma \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{max}}\right)\right)} \quad (2.4)$$

mit	• $v_{ff}$	Wunschgeschwindigkeit
	• $\rho$	Fußgängerdichte
	• $\gamma$	Parameter

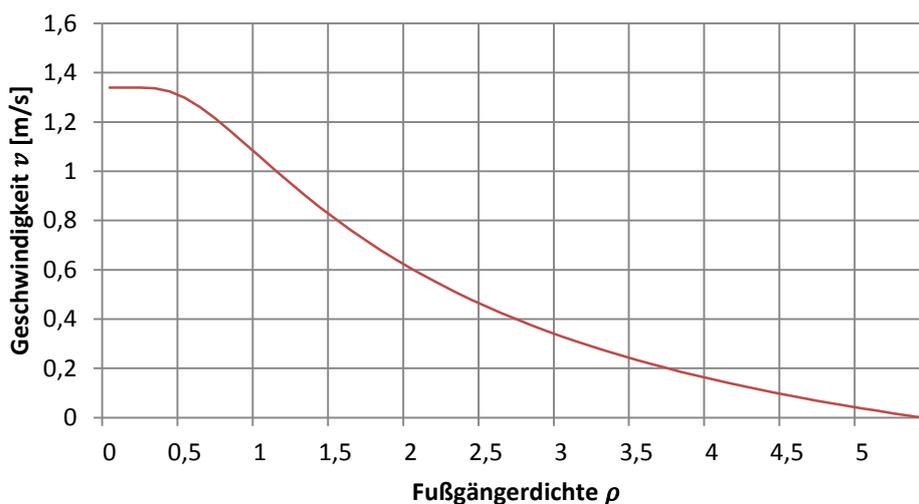


Abbildung 3 – Fundamentales Diagramm

Das Fundamentale Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der Fußgängerdichte  $\rho$  und der Geschwindigkeit  $v$  dar. Je dichter eine Menschenmenge ist, desto langsamer können sich die Fußgänger in der Menge bewegen. Hierfür wurde die Formel  $v(v_{ff}, \rho) = v_{ff} \cdot 1 - \exp(-\gamma(1/\rho - 1/\rho_{max}))$  verwendet, mit  $v_{ff} = 1.34$ ,  $\gamma = 1.913$  und  $\rho_{max} = 5.4$  [14].

## 2.3 Diskretes Netzwerk

Ein weiterer makroskopischer Ansatz basiert auf Graphen. Dieses wird oft für die Berechnung von Evakuierungszeiten von Veranstaltungsorten wie Stadien oder Gebäuden genutzt. Im Folgendem soll der Grundsatz dieser Berechnungen erläutert werden, basierend auf [17].

Der Graph für die Berechnungen wird als diskretes, gerichtetes Netzwerk aus Knoten und Kanten dargestellt (vgl. Abbildung 4). Die Knoten repräsentieren hierbei zum Beispiel Räume, welche durch die Attribute Raumkapazität und Inhalt charakterisiert werden. Somit kann dargestellt werden, wie viele Menschen sich aktuell im Raum befinden und wie viele maximal im Raum Platz haben. Die Kanten stellen Verbindungen und Wege zwischen den Räumen dar. Sie besitzen die Eigenschaften der Reisezeit und der Reisekapazität. Hiermit kann widerspiegelt werden, wie viel Zeit für den Übergang von einem Knoten zum anderen benötigt wird und wie viele Personen gleichzeitig auf diesem Weg zum nächsten Knoten/Raum gelangen können. Die Reisezeit wird als konstant angesehen.

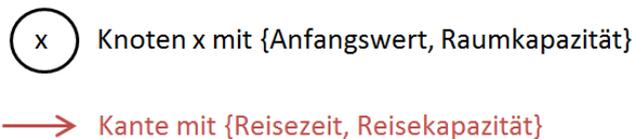
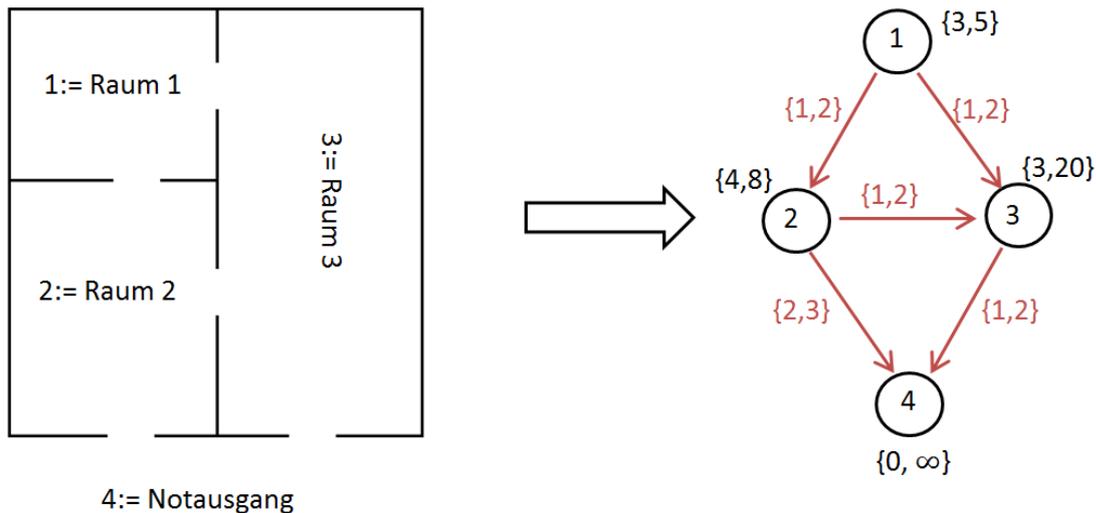


Abbildung 4 – Herleitung des Statischen Netzwerks

Der Grundriss eines Gebäudes wird in einen Graphen umgewandelt. Hierbei symbolisieren die Knoten die verschiedenen Räume mit einer Anfangszahl an Menschen, die sich im Raum befinden, sowie der Kapazität an  $n$ , die der Raum aufnehmen kann. Die Kanten stellen Verbindungen zwischen Räumen dar, die durch ihre Reisezeit und der Reisekapazität charakterisiert sind [17].

Um aus diesem statischen ein dynamisches Netzwerk zu erhalten, werden Zeiträume eingeführt. In diesen Zeitschritten werden die möglichen Übergänge der Evakuierten zu anderen Räumen und somit die zeitliche Ausweitung des Netzwerkes dargestellt. Je kleiner die Zeiträume gewählt werden, desto genauer wird der Ablauf der Evakuierung berechnet. Werden die Zeiträume jedoch zu klein gewählt, kann das Netzwerk zu kompliziert werden.

Um die Generierung und Absorbierung der Fußgänger zu modellieren, werden Überquellen und Übersenken eingeführt. Die Überquelle, verteilt je nach Szenario, zum Zeitpunkt 0 die Fußgänger zu den verschiedenen Knoten. Die Übersenke kann als sicherer Raum verstanden werden, zu dem die Fußgänger flüchten können. Sobald sie hier angekommen sind, werden sie aus dem Netzwerk genommen.

Fußgänger haben innerhalb eines Zeitschrittes die Möglichkeit im Raum zu bleiben oder zu dem nächsten Knoten zu gehen, bis sie die Supersenke erreicht haben. Hierbei werden die Übergänge und das Nachrücken durch die Zeit- und Raumkapazität beschränkt.

Mit dieser Basis können Engstellen identifiziert werden, die mittlere Evakuierungszeit für eine gewissen Anzahl an Personen und die Anzahl an Evakuierten innerhalb eines bestimmten Zeitraumes mit verschiedenen Modellen, die an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden sollen, berechnet werden.

## 2.4 Cellular Automata Modell

Das Cellular Automata Modell ist ein mikroskopisches, diskretes Fußgängermodell, das auf Basis eines Rasternetzes arbeitet, welches zum Beispiel aus Hexagonen, Dreiecken oder Rechtecken bestehen kann. Das im Folgenden erläuterte diskrete, mikroskopische Verhaltensmodell basiert auf dem Konzept von [18], in welchem ein hexagonales Netz verwendet wird.

Die sechseckigen Rasterzellen können entweder leer, von einem Fußgänger besetzt oder von einem Hindernis gefüllt sein (vgl. Abbildung 5). Jedem Fußgänger wird eine Wunschgeschwindigkeit zugewiesen, mit der er sich im Modell bewegt. Die Wunschgeschwindigkeit ist als Normalverteilt definiert und wird, wie auch bei dem Transportmodell, durch die Fußgängerdichte beeinflusst.

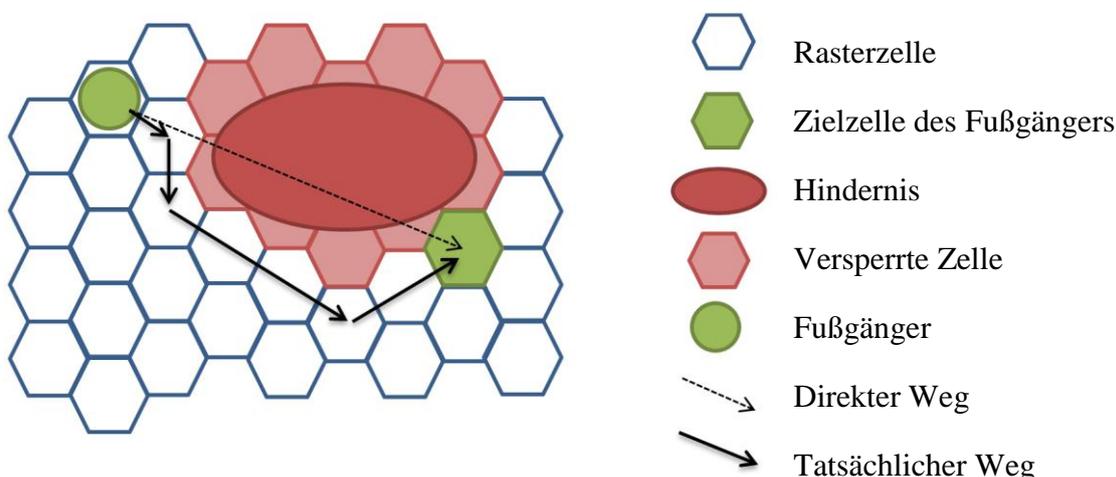


Abbildung 5 – Cellular Automata Modell

Die hexagonalen Rasterzellen in dem Cellular Automata Model können entweder frei, besetzt oder von einem Hindernis gefüllt sein. Der Fußgänger wird, sobald er seine Position ändert, die Rasterzelle mit dem minimalen Gesamtpotential  $\phi_{Gesamt}(x,y)$  wählen. Das Gesamtpotential setzt sich aus dem Navigationspotential  $\phi_N(x,y)$ , das zur Zielzelle hin abnimmt, und aus dem Fußgängerpotential  $\phi_F(x,y)$ , das andere Fußgänger umgibt, zusammen [18].

In jedem Zeitschritt werden die Positionen der Fußgänger im Modell aktualisiert, indem einige Fußgänger ausgewählt werden, die sich von einer Zelle zur Nächsten bewegen dürfen. Hierbei befolgen die Auswahl der Fußgänger und dessen neuen Standortes Regeln.

Es gilt, dass Fußgänger mit einer höheren Geschwindigkeit öfter ausgewählt werden als Fußgänger mit einer geringeren Geschwindigkeit. Somit kann die Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger, die jeweils zuvor zugeteilt wurde, durch die Häufigkeit des Positionswechsels im Modell nachgestellt werden.

Bei der Auswahl des neuen Standortes gilt, dass die Fußgänger durch Potentiale gelenkt, die in das Navigationspotential  $\phi_N(x,y)$  und das Fußgängerpotential  $\phi_F(x,y)$  unterschieden werden können. Je höher der Wert des Potentials in einer Rasterzelle ist, desto weniger

wahrscheinlich wird der Fußgänger diese als neuen Standort einnehmen. Sobald der Fußgänger seine Position aktualisiert, wird er die nächste Rasterzelle mit dem geringsten Gesamtpotential, siehe Formel ( 2. 5 ), einnehmen.

Das Navigationspotential  $\phi_N(x, y)$  ist das Vermögen des Zielortes auf den Fußgänger anziehend zu wirken. Es wirkt über das gesamte Rasterfeld und sein Wert sinkt, je näher die aktuelle Rasterzelle des Fußgängers zur seiner Zielzelle ist. Somit wird der Fußgänger zu seinem Ziel gelenkt.

Das Fußgängerpotential  $\phi_F(x, y)$  ist dahingegen das Vermögen von einer anderen Person auf den aktuellen Fußgänger abstoßend zu wirken. Im Gegensatz zu dem Navigationspotential wirkt es nicht im gesamten Rasterfeld, sondern nur in der Umgebung der Person, von der der aktuellen Fußgänger abgestoßen wird. Mit dem Fußgängerpotential wird garantiert, das die Fußgänger engeren Kontakt miteinander vermeiden.

$$\phi_{Gesamt}(x, y) = \phi_N(x, y) + \phi_F(x, y) \quad (2.5)$$

## 2.5 Social Force Model

In den 1990ern entwickelte Helbing das Social Force Model. Dieses Modell basiert auf der sozialen Feldtheorie von dem Psychologen Kurt Lewin. In dieser wendet Lewin die physikalische Feldtheorie auf das menschliche Verhalten an. Lewin betrachtet den Menschen als ein komplexes psychologisches Energiefeld. Orte und Objekte können Menschen zu bestimmten Handlungen motivieren. Diese psychologische Kraft wird Valenz genannt. Aus der Summe der Kräfte, welche als Vektoren angenommen werden, kann das Verhalten einer Person bestimmt werden. Sobald sich das Energiefeld um eine Person herum ändert, ändert sich auch sein Verhalten. Das Verhalten eines Menschen sieht Lewin als Funktion der Person und dessen Umwelt. Er begrenzt diese auf den sogenannten Lebensraum, welche das subjektiv wahrgenommene Umfeld bzw. die psychologische Gesamtsituation ist [19 – 21].

Helbing hat diesen psychologischen Ansatz auf laufende Fußgänger angewendet. Hierbei sind die Kräfte, die auf die Fußgänger einwirken, positive und negative Beschleunigungen in verschiedene Richtungen, welche das Laufverhalten eines Fußgängers bestimmen. Diese Kräfte werden unterteilt in eine Beschleunigungskraft  $F_{\alpha}^0$ , eine abstoßende Kraft  $F_{\alpha\beta}$  zu anderen Fußgängern, eine abstoßende Kraft  $F_{\alpha B}$  zu Hindernissen und eine anziehende Kraft  $F_{\alpha i}$  zu Orten von besonderem Interesse [6].

In den folgenden Abschnitten sollen diese Kräfte genauer vorgestellt werden, basierend auf den Arbeiten [2] und [6].

### 2.5.1 Beschleunigungskraft

Die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^0$ , wie in der Formel ( 2. 6 ) definiert, spiegelt das Verlangen des Fußgängers wieder, sein Ziel zu erreichen. Hierdurch werden Richtungsänderungen sowie Be- und Entschleunigungen bewirkt, sobald der Vektor der aktuellen Geschwindigkeit  $\dot{x}_\alpha$  nicht dem Vektor der bevorzugten Geschwindigkeit  $v_\alpha^0(t)$  entspricht. Die hierbei verwendete Entspannungszeit  $\tau_\alpha$  ist der Zeitraum, in dem der Fußgänger von der aktuellen Geschwindigkeit auf die bevorzugte Geschwindigkeit beschleunigt. Die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^0$  bewirkt eine Umlenkung des Fußgängers aus seiner aktuellen Laufbahn hin zu seinem eigentlichen Ziel (vgl. Abbildung 6).

$$F_\alpha^0(\dot{x}_\alpha, v_\alpha^0(t)) := \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0(t) - \dot{x}_\alpha) \quad (2.6)$$

- mit
- $\dot{x}_\alpha$  aktuelle Geschwindigkeit des Fußgängers (Vektor)
  - $\tau_\alpha$  Entspannungszeit (Skalar)
  - $v_\alpha^0(t) := v_\alpha^0 e_\alpha(t)$  bevorzugte Geschwindigkeit des Fußgängers (Vektor)
  - $v_\alpha^0$  bevorzugte Geschwindigkeit des Fußgängers (Skalar)
  - $e_\alpha(t) := \frac{x_\alpha^k - x_\alpha(t)}{\|x_\alpha^k - x_\alpha(t)\|}$  bevorzugte Richtung des Fußgängers (Vektor)
  - $x_\alpha$  aktuelle Position des Fußgängers (Vektor)
  - $x_\alpha^k$  nächstes Ziel des Fußgängers (Vektor)

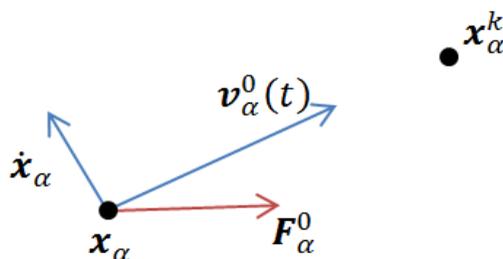


Abbildung 6 – Beschleunigungskraft  $F_\alpha^0$

Die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^0$  wirkt auf den Fußgänger mit der Position  $x_\alpha$ , der aktuellen Geschwindigkeit  $\dot{x}_\alpha$ , der bevorzugten Geschwindigkeit  $v_\alpha^0(t)$  und dem Ziel  $x_\alpha^k$ . Sobald die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^0(t)$  nicht der aktuellen Geschwindigkeit  $\dot{x}_\alpha$  entspricht, wird der Fußgänger die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^0$  erfahren, welche ihn in die Richtung des Zieles umlenkt.

### 2.5.2 Abstoßende Kraft gegen andere Fußgänger

Fußgänger halten zueinander eine gewisse Distanz. Einerseits um nicht miteinander zusammenzustößen, andererseits um nicht in die Privatsphäre des anderen einzudringen. Wenn diese kulturell bedingte Distanz nicht eingehalten wird, so kann dies als unangenehm oder aggressive wahrgenommen werden [22]. In dem Social Force Model, wird dieses Verhalten durch die abstoßende Kraft  $F_{\alpha\beta}$  modelliert und der Fußgänger wird Anderen

ausweichen. Die Kraft  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}$  wird durch das Abstoßpotential  $V_{\alpha\beta}$  definiert und kann mit der Formel ( 2. 7 ) beschrieben werden.

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta}(\mathbf{x}_{\alpha\beta}) := -\nabla_{\mathbf{x}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\mathbf{x}_{\alpha\beta})] \quad ( 2. 7 )$$

- mit
- $V_{\alpha\beta}[b(\mathbf{x}_{\alpha\beta})]$  Abstoßpotential gegen andere Fußgänger (Skalar)
  - $\mathbf{x}_{\alpha\beta} := \mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}$  Vektor zwischen den aktuellen Positionen der beiden Fußgänger
  - $s_{\beta} := v_{\beta}\Delta t$  Zurückgelegter Weg des Fußgängers  $\beta$  innerhalb von  $\Delta t$  (Skalar)
  - $2b := \sqrt{(\|\mathbf{x}_{\alpha\beta}\| + \|\mathbf{x}_{\alpha\beta} - v_{\beta}\Delta t\mathbf{e}_{\beta}\|)^2 - (v_{\beta}\Delta t)^2}$   
Kleine Halbachse der Ellipse (Skalar)

Das Abstoßpotential  $V_{\alpha\beta}$  wird von Helbing als monoton abnehmende Funktion von  $b$  beschrieben, welches ellipsenförmige Äquipotenziallinien in die Bewegungsrichtung hat. Somit kann der Platz, den der Fußgänger für seinen nächsten Schritt benötigt, dargestellt und Ausweichmanöver berechnet werden. Helbing hat hierfür unter anderem die Formel  $V_{\alpha\beta}(b) = V_{\alpha\beta}^0 e^{-b/\sigma}$  mit  $V_{\alpha\beta}^0 = 2.1 \frac{m^2}{s^2}$  und  $\sigma = 0.3 m$  genutzt. Somit wird das Abstoßpotential erhöht, je kleiner der Abstand zwischen den beiden Fußgängern  $\|\mathbf{x}_{\alpha\beta}\|$  ist bzw. je größer  $s_{\beta}$  ist. Hierbei kann  $s_{\beta}$  mit der Schrittgröße des Fußgängers  $\beta$  verglichen werden kann.

### 2.5.3 Abstoßende Kraft gegen Hindernisse

Die abstoßenden Kräfte  $\mathbf{F}_{\alpha B}$  gegen Hindernisse, wie zum Beispiel Wände oder Straßen, definiert Helbing ähnlich wie die Kräfte gegen andere Fußgänger, wie in Formel ( 2. 8 ) beschrieben. Er nutzt das Abstoßpotential  $U_{\alpha B}$  um das Verhalten von Fußgängern widerzuspiegeln Hindernisse zu meiden und einen Sicherheitsabstand zu halten. So kann der Fußgänger ohne verletzt zu werden oder unnötig viel Achtsamkeit während des Laufens aufzubringen, seinen Weg zurücklegen.

$$\mathbf{F}_{\alpha B}(\mathbf{x}_{\alpha B}) := -\nabla_{\mathbf{x}_{\alpha B}} U_{\alpha B}(\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|) \quad (2.8)$$

mit  $\bullet U_{\alpha B}(\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|)$  Abstoßpotential gegen Hindernisse (Skalar)

Hierbei nutzt Helbing beispielsweise die monoton abnehmende Funktion  $U_{\alpha B}(\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|) = U_{\alpha B}^0 e^{-\frac{\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|}{R}}$  mit  $U_{\alpha B}^0 = 10 \frac{m^2}{s^2}$  und  $R = 0.2 m$ . Je größer somit der Abstand  $\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|$  zwischen Fußgänger und Hindernis ist, desto kleiner wird das Abstoßpotential  $U_{\alpha B}$ .

#### 2.5.4 Anziehende Kraft zu Orten von besonderem Interesse

Die anziehenden Kräfte  $\mathbf{F}_{\alpha i}$  dürfen nicht mit der Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_{\alpha}^0$  verwechselt werden. Im Gegensatz zu der Beschleunigungskraft wird die anziehende Kraft  $\mathbf{F}_{\alpha i}$  nicht durch ein Ziel hervorgerufen, sondern durch ein kurzzeitig interessantes Objekt oder eine Person. So kann die anziehende Wirkung von zum Beispiel Fenstern, Schildern, Straßenkünstlern oder Freunden repräsentiert werden. Diese Kraft wird durch das monoton zunehmende Anziehungspotential  $W_{\alpha i}(\|\mathbf{x}_{\alpha i}\|, t)$  hervorgerufen. Jedoch ist, im Gegensatz zu den abstoßenden Potentialen  $V_{\alpha\beta}[b(\mathbf{x}_{\alpha\beta})]$  und  $U_{\alpha B}(\|\mathbf{x}_{\alpha B}\|)$ , das Anziehungspotential  $W_{\alpha i}$  ebenfalls von der Zeit abhängig. Dadurch wird dargestellt, dass oftmals das Interesse an interessanten Orten mit der Zeit abnimmt. Helbing stellt hierfür die Formel (2.9) auf.

$$\mathbf{F}_{\alpha i}(\|\mathbf{x}_{\alpha i}\|, t) := -\nabla_{\mathbf{x}_{\alpha i}} W_{\alpha i}(\|\mathbf{x}_{\alpha i}\|, t) \quad (2.9)$$

mit  $\bullet W_{\alpha i}(\|\mathbf{x}_{\alpha i}\|, t)$  Anziehungspotential (Skalar)

#### 2.5.5 Erweiterung um die richtungsabhängige Gewichtung

Bisher wurde angenommen, dass die Kräfte in vollen Maße auf den Fußgänger einwirken, unabhängig davon, wo sich die Quelle für diese im Raum befindet. Deswegen wird der Parameter  $c$  eingeführt, welcher den verminderten Einfluss von Kräften darstellt, die hinter dem Fußgänger liegen. Somit kann eine richtungsabhängige Gewichtung  $w(\mathbf{e}, \mathbf{f})$  abgeleitet wie in Formel (2.10) werden, welche zu allen Kräften, außer der Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_{\alpha}^0$ , hinzugefügt wird, vgl. Formeln (2.11). Wenn eine Kraft  $\mathbf{f}$  innerhalb des Sichtfeldes von dem Fußgänger liegt, so wird sie voll gewichtet. Wenn sie allerdings außerhalb des Sichtfeldes ist, nimmt die Gewichtung  $w(\mathbf{e}, \mathbf{f})$  den Wert des Parameters  $c$  ein.

$$w(\mathbf{e}, \mathbf{f}) := \begin{cases} 1 & \text{falls } \mathbf{e} \cdot \mathbf{f} \geq \|\mathbf{f}\| \cos \varphi \\ c & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.10)$$

mit	• $0 < c < 1$	Einfluss von hinter dem Fußgänger liegenden Kräfte (Skalar)
	• $2 \varphi$	Sichtfeld des Fußgängers (Skalar)
	• $\mathbf{f}$	Anziehende/ abstoßende Kraft, die auf den Fußgänger wirkt (Vektor)

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\alpha\beta}(\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{x}_{\alpha\beta}) &:= w(\mathbf{e}_\alpha, -\mathbf{f}_{\alpha\beta}) \mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{x}_{\alpha\beta}) \\ \mathbf{F}_{\alpha B}(\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{x}_{\alpha B}) &:= w(\mathbf{e}_\alpha, -\mathbf{f}_{\alpha B}) \mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{x}_{\alpha B}) \\ \mathbf{F}_{\alpha i}(\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{x}_{\alpha i}, t) &:= w(\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{f}_{\alpha i}) \mathbf{f}_{\alpha i}(\mathbf{x}_{\alpha i}, t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

### 2.5.6 Erweiterung um eine angepasste bevorzugte Geschwindigkeit

Eine Variable der Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_\alpha^0$  ist der skalare Wert der bevorzugten Geschwindigkeit  $v_\alpha^0$ . In [2] ist dieser Wert keine Konstante. Es wird angenommen, dass die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^0$  einer Normalverteilung mit dem Mittelwert 1,3 m/s und einer Standardabweichung von 0,3 m/s unterliegt.

Zusätzlich wird der Term (2.12) eingeführt. Dieser beschreibt das Verhalten von Fußgänger, bei Verspätungen schneller zu laufen um die Verzögerung zu kompensieren. Hierbei spiegelt der zeitabhängige Parameter  $n_\alpha(t)$  die Ungeduld und die Nervosität des Fußgängers wider. Somit wird die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^0(t)$  erhöht, falls der Fußgänger lange warten muss. Er hat das Verlangen schneller zu laufen, um seinen Rückstand aufzuholen.

$$v_\alpha^0(t) = [1 - n_\alpha(t)]v_\alpha^0(0) + n_\alpha(t)v_\alpha^{\max} \quad (2.12)$$

mit	• $v_\alpha^0(0)$	bevorzugte Ausgangsgeschwindigkeit (Skalar)
	• $v_\alpha^{\max}$	maximale bevorzugte Geschwindigkeit (Skalar)
	• $\bar{v}_\alpha(t)$	mittlere Geschwindigkeit (Skalar)
	• $n_\alpha(t) = n - \frac{\bar{v}_\alpha(t)}{v_\alpha^0(0)}$	Zeitabhängiger Parameter (Skalar)

### 2.5.7 Die Gesamtkraft

Mit den oben beschriebenen Komponenten kann nun die Gesamtkraft  $\mathbf{F}_\alpha(t)$ , die auf einen Fußgänger wirkt, ermittelt werden. Sie ist die Summe, der auf den Fußgänger einwirkenden Kräfte und wird mit der Formel (2.13) dargestellt werden.

$$\mathbf{F}_\alpha(t) := \mathbf{F}_\alpha^0 + \sum_{\beta} \mathbf{F}_{\alpha\beta} + \sum_B \mathbf{F}_{\alpha B} + \sum_i \mathbf{F}_{\alpha i} \quad (2.13)$$

Diese Kraft entspricht der richtungsabhängige Beschleunigung  $\ddot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}$ , die der Fußgänger erfährt. Zusätzlich wird ein Fluktuationsterm  $\xi_\alpha(t)$  eingeführt, um zufällige Abweichungen in dem Fußgängerverhalten einzubeziehen. Ebenfalls kann die neue Geschwindigkeit des Fußgängers  $\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}$  aus diesem Term gefolgert werden. So ergibt sich die Formel ( 2. 14 ).

$$\ddot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet} = \frac{d\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}}{dt} := \mathbf{F}_\alpha(t) + \xi_\alpha(t) \quad (2.14)$$

Um unrealistische Werte zu vermeiden, wird die Geschwindigkeit des Fußgängers auf ein Maximum eingeschränkt. Hierbei kann der Betrag der Geschwindigkeit des Fußgängers  $\dot{\mathbf{x}}_\alpha$  höchstens der maximalen Geschwindigkeit  $v_\alpha^{max}$  entsprechen. Wird dieser Wert nicht überschritten, so kann die aus der Gesamtkraft  $\mathbf{F}_\alpha(t)$  resultierende Geschwindigkeit  $\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}$  übernommen werden, ansonsten wird die maximale Geschwindigkeit  $v_\alpha^{max}$  mit dem Einheitsvektor der berechneten Geschwindigkeit  $\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}$  verrechnet (vgl. Formel ( 2. 15 )).

$$\dot{\mathbf{x}}_\alpha := \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet} & \text{falls } \|\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}\| \leq v_\alpha^{max} \\ \dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet} \frac{v_\alpha^{max}}{\|\dot{\mathbf{x}}_{\alpha\_berechnet}\|} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.15)$$

## 2.6 Integration des Social Force Models in einer Verhaltensarchitektur für Fußgänger

Das Social Force Model von Helbing kann in eine Verhaltensarchitektur für Fußgänger eingegliedert werden. Die Architektur besteht aus einem Rahmenwerk, das in drei, aufeinander aufbauende Ebenen eingeteilt werden kann (vgl. Abbildung 7). In jeder Ebene werden verhaltensspezifische Entscheidungen des Fußgängers modelliert. Entscheidungen aus tieferen Ebenen wirken sich hierbei auf die höheren Ebenen aus. Hierbei wird sich auf [7, 23] bezogen.

Die Basis des Modells ist der strategische Level. Dieser beschreibt die Zielauswahl des Fußgängers mit Hilfe des Origin-Destination-Matrix Ansatzes, bei welchem eine

Adjazenzmatrix ausgegeben wird. Die Herkunftsorte, Ziele und Zwischenziele, somit die Absicht des Fußgängers zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort zu gehen, werden in der Adjazenzmatrix abgespeichert. Sie dient als Eingabewert für die nächste Ebene und übergibt die Zielpolygone. Die Adjazenzmatrix ist normalerweise bereits vorher bekannt und muss nicht explizit ermittelt werden.

Der taktische Level der Simulation bestimmt die Route des Fußgängers. Oftmals wird hierzu der kürzeste Weg zwischen Herkunft und Ziel berechnet, indem zum Beispiel der Dijkstra-Algorithmus auf die Adjazenzmatrix angewandt wird. Somit kann der Weg, den der Fußgänger zu seinem Ziel einnimmt, erstellt werden. In der Fußgängersimulation, in der das Social Force Model angewandt wird, ergibt sich somit als Ausgabewert das nächste Navigationsziel. Durch dieses kann die bevorzugte Geschwindigkeit des Fußgängers  $v_{\alpha}^0(t)$  berechnet werden.

Der dritte Level ist der operationale Level. Durch dieses wird der Fußgänger funktionsfähig. Da durch Hindernisse oder andere Fußgänger der kürzeste Weg zum Ziel eventuell versperrt sein kann, müssen Ausweichmanöver implementiert werden. Somit stößt der Fußgänger nicht mehr mit Hindernissen zusammen, sondern navigiert um diese. In diesem dritten Level wird das Social Force Model angewendet. Sobald Hindernisse zu nah sind, lassen die abstoßenden Kräfte zu Fußgängern  $F_{\alpha\beta}$  und zu Hindernissen  $F_{\alpha B}$ , den Fußgänger ausweichen. Um den abgelenkten Fußgänger nach Ausweichmanövern wieder in die Richtung des Zwischenziels zu lenken, wirkt die Beschleunigungskraft  $F_{\alpha}^0$ .

	Verhalten	Modelliert als	
Strategie	Planen	Adjazenzmatrix	 Zielpolygon Navigationsziel
Taktik	Route wählen	Kürzester Weg	
Operational	Ausweichmanöver	Social Force Model	

Abbildung 7 – Rahmenwerk der Fußgängersimulation

Die Verhaltensarchitektur der Fußgängersimulation lässt sich aus den strategischen, dem taktischen und dem operationale Level aufbauen. Innerhalb des Strategischen Levels wählt der Fußgänger sein Ziel aus. Das Ziel ist der Eingabewert des taktischen Levels, in dem die Route der Fußgänger festgelegt wird, die durch den kürzesten Weg bestimmt wird. Hierbei wird die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_{\alpha}^0(t)$  dem operationalen Level übergeben. Dieses berechnet mithilfe des Social Force Models Ausweichmanöver für die Fußgänger [7].

### 3 Modelle mit wartenden Fußgängern

#### 3.1 Ansatz von Johansson et al.

Johansson stellt in [7] drei verschiedene Ansätze vor, wie man wartende Fußgänger in das Social Force Model von Helbing implementieren kann. Hierbei kann in das Modell der bevorzugten Geschwindigkeit (Preferred Velocity), der bevorzugten Position (Preferred Position) und der anpassbaren, bevorzugten Position (Adapting Preferred Position) unterschieden werden. Diese Ansätze sollen im Folgenden erläutert werden.

Johansson verändert an dem Social Force Model von Helbing lediglich Formel ( 2. 6 ), welche die Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_\alpha^0$  beschreibt. Der bevorzugte Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}_\alpha^0$  wird durch den bevorzugten Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}_\alpha^w$  für wartende Fußgänger ersetzt. Somit ergibt sich die Formel ( 3. 1 ) für die Beschleunigungskraft für wartenden Fußgänger  $\mathbf{F}_\alpha^w$ .

$$\mathbf{F}_\alpha^0(\dot{\mathbf{x}}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha^0(t)) := \frac{1}{\tau_\alpha} (\mathbf{v}_\alpha^0(t) - \dot{\mathbf{x}}_\alpha) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{F}_\alpha^w(\dot{\mathbf{x}}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha)) := \frac{1}{\tau_\alpha} (\mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha) - \dot{\mathbf{x}}_\alpha) \quad (3.1)$$

Des Weiteren wird die Wartezone  $\Omega$  eingeführt, welche als Zwischenziel für Fußgänger angesehen werden kann. Der Fußgänger wird über den kürzesten Weg zu dem nächsten Punkt von  $\Omega$  geführt. Hierbei werden alle Kräfte, die auf den Fußgänger wirken, nach dem Social Force Model von Helbing (siehe 2.5 *Social Force Model*) berechnet. Sobald er die Wartezone erreicht, wird ihm eine bestimmte Wartezeit zugewiesen und er geht in den Wartemodus über. Nun wird die Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_\alpha^0$  durch die Beschleunigungskraft für wartenden Fußgänger  $\mathbf{F}_\alpha^w$  ersetzt, solange bis die Wartezeit des Fußgängers vorbei ist und er zu seinem nächsten Ziel weiter läuft.

Zusätzlich wird der Fokuspunkt  $\mathbf{x}^f$  eingeführt. Zu diesem wird der Fußgänger seinen Kopf ausrichten. Es kann sich hierbei zum Beispiel um ein Informationsschild oder die Türen eines Zuges handeln. Daraus folgt die Formel ( 3. 2 ) für die bevorzugte Blickrichtung  $\mathbf{e}^w$ .

$$\mathbf{e}^w(t) := \frac{\mathbf{x}^f - \mathbf{x}_\alpha(t)}{\|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}_\alpha(t)\|} \quad (3.2)$$

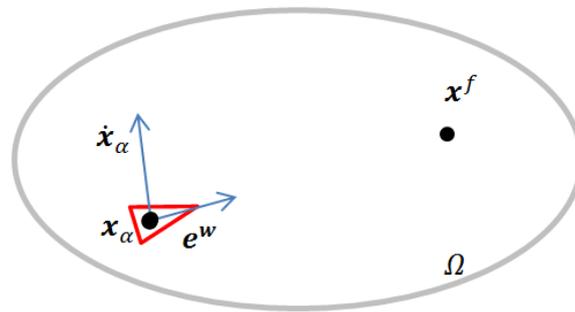


Abbildung 8 – Wartezone  $\Omega$  mit wartendem Fußgänger

Der Fußgänger befindet sich innerhalb der Wartezone  $\Omega$  an seiner Position  $x_\alpha$ . Seinen Blick, symbolisiert durch das rote Dreieck, richtete sich zum Fokuspunkt  $x^f$  und ergibt somit die Blickrichtung  $e^w$ . Obwohl er im Wartemodus ist, kann es möglich sein, dass der Fußgänger immer noch eine Geschwindigkeit  $\dot{x}_\alpha$  besitzt [7].

### 3.1.1 Modell der bevorzugten Geschwindigkeit

In dem Modell der bevorzugten Geschwindigkeit wird der bevorzugte Geschwindigkeitsvektor  $v_\alpha^w$  vereinfacht als Nullvektor angenommen. Die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^w$  fällt weg, da der Fußgänger sein Ziel – den Punkt an dem er warten soll – erreicht. Somit ergibt sich aus der Formel ( 3. 1 ) der Beschleunigungsterm ( 3. 3 ) für wartende Fußgänger  $F_\alpha^w$ .

$$F_\alpha^w(\dot{x}_\alpha, v_\alpha^w) := \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^w - \dot{x}_\alpha) \quad (3.1)$$

$$\text{mit } v_\alpha^w := \mathbf{0}$$

$$\Rightarrow F_\alpha^w(\dot{x}_\alpha) := -\frac{\dot{x}_\alpha}{\tau_\alpha} \quad (3.3)$$

- mit
- $v_\alpha^w$  bevorzugte Geschwindigkeit des wartenden Fußgängers (Vektor)
  - $x_\alpha$  aktuelle Position des Fußgängers (Vektor)
  - $\dot{x}_\alpha$  aktuelle Geschwindigkeit des Fußgängers (Vektor)

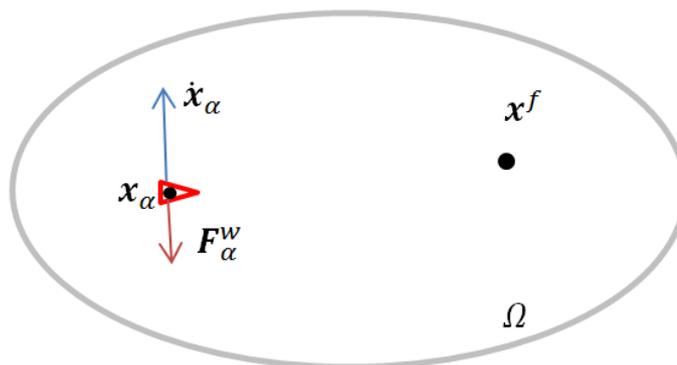


Abbildung 9 – Modell der bevorzugten Geschwindigkeit

Im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit ändert der Fußgänger, sobald er die Wartezone  $\Omega$  betreten hat, seine bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^w$  auf  $\mathbf{0}$ . Die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^w$  bremst den Fußgänger ab, bis er zum Stillstand kommt [7].

In diesem Modell wird dem Fußgänger, sobald er die Wartezone  $\Omega$  betreten hat, die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^w := \mathbf{0}$  und die Blickrichtung  $e^w(t)$  zugewiesen. Er wird sich exponentiell mit der Zeitskala  $\tau_\alpha$  verlangsamen.

Wird er von einem vorbeilaufenden Fußgänger gestört, verändert er seine Position durch die abstoßenden Kräfte  $F_{\alpha\beta}$  zwischen Fußgängern. So kann es passieren, dass die wartenden Fußgänger mehr und mehr zum Rand der begehbaren Zone gedrängt werden.

### 3.1.2 Modell der bevorzugten Positionen

Das Modell der bevorzugten Positionen soll das Verhalten der Fußgänger widerzuspiegeln, sich nicht zum Rand drängen zu lassen wie das Modell der bevorzugten Geschwindigkeit, sondern wieder zu der bevorzugten Warteposition  $x_\alpha^{wp}$  zurückzukehren. Somit kann eine unrealistische Verschiebung nach außen, wie in dem Modell der bevorzugten Geschwindigkeit vermieden werden.

Dem Fußgänger wird, sobald er die Wartezone  $\Omega$  erreicht, eine bevorzugte Warteposition  $x_\alpha^{wp}$  zugewiesen, an der er warten soll. Zusätzlich wird die bevorzugte Geschwindigkeit  $v_\alpha^w(x_\alpha)$  angepasst. Sie ist nicht mehr einem konstanten Wert zugewiesen, sondern ist von dem Abstand zu der bevorzugten Warteposition  $x_\alpha^{wp}$  abhängig. Es wird ein Einflussradius  $d$  um die Warteposition definiert, bei dem keine Oszillation entstehen kann. Außerhalb dieses Radius bleibt der Betrag der bevorzugten Geschwindigkeit  $v_\alpha^w$  unverändert. Innerhalb des Radius, nimmt der Betrag linear ab. Somit kann nachgestellt werden, dass der Fußgänger, je näher er seinem Ziel ist, sich verlangsamt. So ergibt sich für die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^w$  die Formel ( 3. 4 ).

$$F_{\alpha}^w(\mathbf{v}_{\alpha}^w(\mathbf{x}_{\alpha}), \dot{\mathbf{x}}_{\alpha}) := \frac{1}{\tau_{\alpha}} (\mathbf{v}_{\alpha}^w(\mathbf{x}_{\alpha}) - \dot{\mathbf{x}}_{\alpha})$$

$$\text{mit } \mathbf{v}_{\alpha}^w(\mathbf{x}_{\alpha}) := \begin{cases} \frac{v_{\alpha}^0(\mathbf{x}_{\alpha}^{wp} - \mathbf{x}_{\alpha})}{d}, & \text{falls } |\mathbf{x}_{\alpha}^{wp} - \mathbf{x}_{\alpha}| \leq d \\ \frac{v_{\alpha}^0(\mathbf{x}_{\alpha}^{wp} - \mathbf{x}_{\alpha})}{|\mathbf{x}_{\alpha}^{wp} - \mathbf{x}_{\alpha}|}, & \text{falls } |\mathbf{x}_{\alpha}^{wp} - \mathbf{x}_{\alpha}| > d \end{cases} \quad (3.4)$$

mit

- $\mathbf{x}_{\alpha}^{wp}$  bevorzugte Warteposition (Vektor)
- $d = 4 * v_{\alpha}^0 * \tau_{\alpha}$  Einflussradius um Warteposition (Skalar)

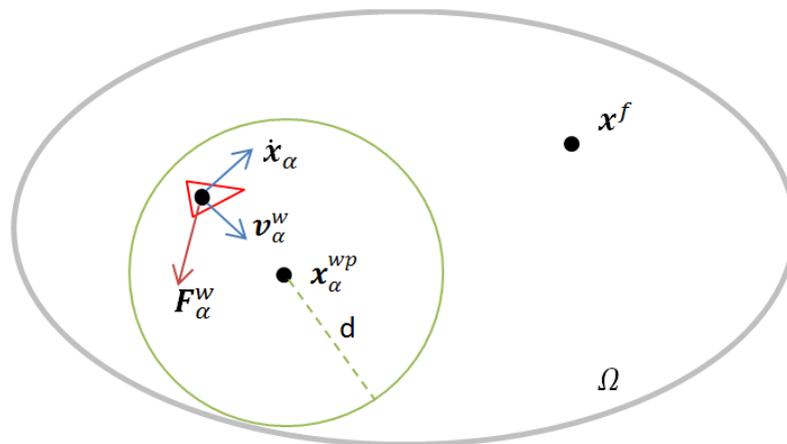


Abbildung 10 Modell der bevorzugten Position

Bei dem Modell der bevorzugten Position wird dem Fußgänger, sobald er die Wartezone  $\Omega$  betritt, eine bevorzugte Warteposition  $\mathbf{x}_{\alpha}^{wp}$  zugewiesen. Die bevorzugte Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_{\alpha}^w$  richtet sich immer zu dieser Warteposition und ist von der Distanz zu diesem abhängig. Falls der Fußgänger sich außerhalb des Kreises mit Radius  $d$  befindet, nimmt die bevorzugte Geschwindigkeit den vollen Wert an. Falls der Fußgänger sich innerhalb des Kreises befindet, nimmt die bevorzugte Geschwindigkeit linear zum Mittelpunkt – der bevorzugten Warteposition ab. Falls der Fußgänger sich auf der Warteposition befindet, so ist die bevorzugte Geschwindigkeit 0. Die Beschleunigungskraft  $F_{\alpha}^w$  lenkt den Fußgänger zu seiner Warteposition  $\mathbf{x}_{\alpha}^{wp}$  hin [7].

Dieses Modell kann gut auf Fußgänger in Warteschlangen angewendet werden. Wenn die wartenden Fußgänger durch vorbeilaufende gestört werden, gehen sie kurzzeitig beiseite und kehren danach wieder zu ihrer bevorzugten Warteposition zurück.

Jedoch wird er dieses Verhalten auch beibehalten, wenn sich nur kurzzeitig Lücken in einem größeren Strom an Fußgängern ergeben. Diese Lücke wird er nutzen um zu seiner bevorzugten Warteposition zurückzukehren, obwohl er dort wieder von dem Fußgängerstrom gestört wird und wieder beiseite getrieben wird.

Um dieses Verhalten zu verbessern, stellt Johansson das Modell der anpassbaren, bevorzugten Position vor.

### 3.1.3 Modell der anpassbaren, bevorzugten Position

Falls die bevorzugte Warteposition  $\mathbf{x}_\alpha^{wp}$  des Fußgängers an einer ungünstigen Stelle liegt, die immer wieder von anderen Fußgängern gestört wird, so kann sich die bevorzugte Warteposition  $\mathbf{x}_\alpha^{wp}$  im Modell der anpassbaren, bevorzugten Position verändern. Die Warteposition  $\mathbf{x}_\alpha^{wp}$  wird bei einer Störung durch andere Fußgänger eine Beschleunigung in Richtung des wartenden Fußgängers erfahren.

Dabei wird wie im Modell der bevorzugten Position die bevorzugte Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha)$  von dem Abstand zur Warteposition abhängig gemacht. Lediglich der Einflussradius  $d$  wird angepasst. Somit wird die Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_\alpha^w$  durch die Formel ( 3. 5 ) dargestellt.

$$\mathbf{F}_\alpha^w(\mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha), \dot{\mathbf{x}}_\alpha) := \frac{1}{\tau_\alpha} (\mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha) - \dot{\mathbf{x}}_\alpha)$$

$$\text{mit } \mathbf{v}_\alpha^w(\mathbf{x}_\alpha) := \begin{cases} \frac{v_\alpha^0(\mathbf{x}_\alpha^{wp} - \mathbf{x}_\alpha)}{d}, & \text{falls } |\mathbf{x}_\alpha^{wp} - \mathbf{x}_\alpha| \leq d \\ \frac{v_\alpha^0(\mathbf{x}_\alpha^{wp} - \mathbf{x}_\alpha)}{|\mathbf{x}_\alpha^{wp} - \mathbf{x}_\alpha|}, & \text{falls } |\mathbf{x}_\alpha^{wp} - \mathbf{x}_\alpha| > d \end{cases} \quad (3.5)$$

- mit
- $d = 4 * v_\alpha^0 * \tau_\alpha \frac{M+m}{M}$  Einflussradius um Warteposition (Skalar)
  - $m = 1$  typische Massenwert des Fußgängers (Skalar)
  - $M$  Massenwert der Warteposition (Skalar)

Zusätzlich zu der Beschleunigung  $\mathbf{F}_\alpha^w$ , die der Fußgänger erfährt, wird die Beschleunigungskraft der Warteposition  $\mathbf{F}_{wp}$  eingeführt, wie in Formel ( 3. 7 ) beschrieben. Die Warteposition  $\mathbf{x}_\alpha^{wp}$  verhält sich somit nicht starr, sondern wird in Richtung des Fußgängers verschoben, falls dieser von seiner ursprünglichen Position verdrängt wird. Hierbei wird dem Fußgänger die Massenwert  $m$  zugewiesen, und der Warteposition die Massenwert  $M$ . Die Beschleunigungskraft  $\mathbf{F}_{wp}$  entspricht der Summe der negativen Beschleunigungskraft des Fußgängers  $-\frac{1}{M}\mathbf{F}_\alpha^w$  und der Reibungskraft  $-\frac{k}{M}\dot{\mathbf{x}}_\alpha^{wp}$ , siehe Formel ( 3. 6 ). Durch die Reibungskraft  $-\frac{k}{M}\dot{\mathbf{x}}_\alpha^{wp}$  wird die Geschwindigkeit der Warteposition verlangsamt und die Stationarität der Warteposition und die Stabilität des Systems garantiert. Unter Stabilität ist hierbei gemeint, dass der wartende Fußgänger und die Warteposition nach eine Störung wieder schnell zur Ruhe kommen.

$$M\ddot{\mathbf{x}}^{wp} = -\mathbf{F}_\alpha^w - k\dot{\mathbf{x}}_\alpha^{wp} \text{ mit } \ddot{\mathbf{x}}^{wp} = \mathbf{F}_{wp} \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{F}_{wp} := \frac{1}{M}(-\mathbf{F}_\alpha^w - k\dot{\mathbf{x}}_\alpha^{wp}) \quad (3.7)$$

- mit
- $k = \frac{M+m}{\tau_\alpha}$  Dämpfungskoeffizient (Skalar)
  - $\dot{\mathbf{x}}_\alpha^{wp}$  Geschwindigkeit der Warteposition (Vektor)
  - $\ddot{\mathbf{x}}^{wp}$  Beschleunigung der Warteposition (Vektor)

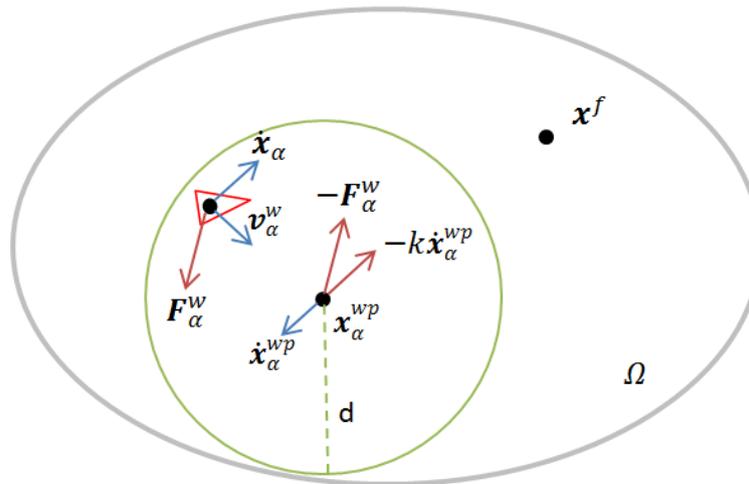


Abbildung 11 – Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition

In dem Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition wird der Wartepunkt  $x_\alpha^{wp}$  die Beschleunigungskraft  $F_\alpha^w$  erfahren und sich in die Richtung des wartenden Fußgängers bewegen. Hierbei wirkt ebenfalls die Reibungskraft  $-k \dot{x}_\alpha^{wp}$  auf die Warteposition. Fußgänger und Warteposition nähern sich somit an [7].

### 3.2 Vergleich zu dem Model von Davidich et al.

Ein anderes Modell für wartende Fußgänger stellt Davidich et al. vor [8]. Hierbei nutzt sie das Cellular Automata Modell von Köster [18]. Dieses Modell für wartende Fußgänger soll im Folgenden dargestellt werden.

Wie bereits in dem Kapitel 2.4 *Cellular Automata Modell* erläutert, ist das Cellular Automata Modell ein mikroskopisches Modell, das auf hexagonalen Rasterzellen basiert. Um wartende Fußgänger zu modellieren, werden einige zusammenhängende Rasterzellen als Wartezone definiert. Diese Wartezone, ist wie auch bei Johansson, ein Zwischenziel für einige Fußgänger.

Zuerst begibt sich der Fußgänger auf dem kürzesten Weg zur Wartezone. Sobald er diese erreicht hat, wird ihm eine zufällige Rasterzelle als seine Wartezelle zugewiesen. Nachdem er bei dieser angekommen ist, wird der Fußgänger für eine zugeteilte Wartezeit in der Zelle verbleiben. Während der Fußgänger wartet, besetzt er die Zelle, bewegt sich nicht und wird als Hindernis für andere Fußgänger wahrgenommen.

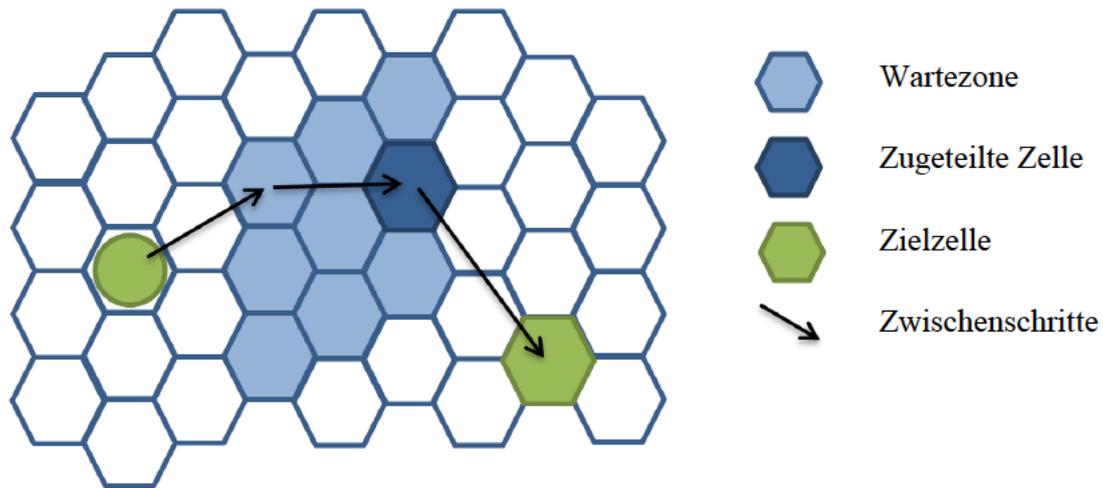


Abbildung 12 – Wartezonenmodell von Davidich et al.

Der Fußgänger sich auf kürzestem Wege zu der Wartezone begeben. Daraufhin wird ihm eine Zelle in der Wartezone als seine Wartezelle mit bestimmter Wartezeit zugeteilt. Nachdem er diese erreicht, wartet er bis seine Wartezeit abgelaufen ist und läuft danach zu seinem nächsten Ziel weiter [8].

Davidich argumentiert, dass dieses Szenario gut an Bahnhöfen genutzt werden kann. Dort befinden sich oft wartende Fußgänger mit Gepäckstücken, die eher ungerne ihre Warteposition verändern. Diese wartenden Fußgänger wirken als Hindernisse für andere Passanten. So kann gut simuliert werden, dass laufende Fußgänger den Wartenden ausweichen müssen und sich ihre Geschwindigkeit durch die erhöhte Fußgängerdichte verringert.

Jedoch beachtet sie nicht, dass die wartenden Fußgänger mit Gepäckstücken eventuell mehr Platz einnehmen, als Fußgänger ohne Gepäckstücke und somit sie nicht nur ihre eigene Rasterzelle belegen könnten.

Der Ansatz von Davidich ist stark vereinfacht im Vergleich zu dem Ansatz von Johansson. Während die Fußgänger von Davidich nur stehen bleiben können, können die wartenden Fußgänger von Johansson anderen Passanten ausweichen und ihre Warteposition anpassen. Dennoch weisen die beiden Ansätze auch Gemeinsamkeiten auf. In beiden Ansätzen wird der Fußgänger auf kürzestem Weg zur Wartezone gelenkt. Sobald er dort ankommt, wird im eine zufällige Warteposition bzw. Wartezelle zugewiesen.

## 4 Ergebnisse der Implementierung der wartenden Fußgänger

### 4.1 Erläuterung der Funktionsweise der Implementierung

Im Folgenden soll nun die Funktionsweise der Implementierung anhand zweier Beispiele dargestellt werden. Zuerst wird das Verhalten eines einzelnen wartenden Fußgängers, der in einer Kreuzung wartet und von anderen laufenden Fußgängern in seiner Position beeinflusst wird, aufgezeigt. Als Nächstes soll das Verhalten von mehreren wartenden Fußgängern, die ebenfalls von laufenden Fußgängern gestört werden, demonstriert werden. Es werden alle drei Modelle von Johansson betrachtet.

#### 4.1.1 Beispielsszenario

Das Beispielsszenario ist hierbei eine Kreuzung, in deren Mitte eine Wartezone für Fußgänger erstellt wurde, welche durch ihre graue Farbe erkenntlich ist (vgl. Abbildung 13). Die blauen Fußgänger sind die wartenden Personen, und die Grünen, die laufenden Fußgänger, die die wartenden Fußgänger von ihrer Warteposition ablenken. Die Trajektorien der wartenden Fußgänger werden durch die roten Linien dargestellt. Sie bilden den Pfad der Fußgänger ab. Die Kreuzung ist durch zwei 3m breite Gänge, die senkrecht zueinander sind, definiert. Wenn Fußgänger durch eine Wartezone laufen, die jedoch nicht ihr Zwischenziel ist, so verändert sich ihr Verhalten nicht.

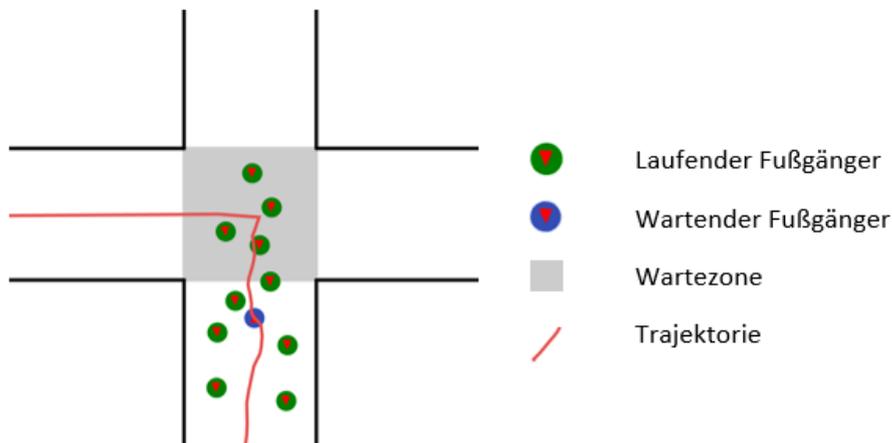


Abbildung 13 – Beispielsszenario

Das Beispielsszenario stellt eine 3mx3m Kreuzung, in der eine Wartezone (grau) liegt. Die blauen Fußgänger kommen von links und stellen sich in die Wartezone. Die grünen Fußgänger werden später generiert und laufen von oben nach unten. Da er im Weg der laufenden Fußgänger ist, weicht der wartende Fußgänger aus. Sein Weg wird durch die rote Trajektorie dargestellt.

#### 4.1.2 Verhalten eines einzelnen wartenden Fußgängers

Im ersten Beispiel läuft ein einzelner Fußgänger von dem linken Gang zur Mitte der Wartezone. Sobald er seine Warteposition erreicht hat, geht er in den Wartemodus über und die Modelle von Johansson setzen ein. Solange er nicht gestört wird, verändert der Fußgänger seine Position nicht. Als Nächstes werden 10 Fußgänger generiert, die von dem

---

oberen zu dem unteren Gang laufen. Da der wartende Fußgänger in ihrer direkten Laufbahn steht, verändert dieser seine Position entsprechend dem gewählten Modell.

Im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit wird der wartende Fußgänger von jeder Störung beeinflusst. Er verändert seine Position sehr einfach und ist am Ende der Simulation sehr weit von seiner ursprünglichen Warteposition entfernt (vgl. Abbildung 14).

Im Modell der bevorzugten Warteposition, kehrt der wartende Fußgänger immer zu seiner Warteposition zurück. Die Trajektorie des wartenden Fußgängers bildet eine Schleife. Seine ursprüngliche Warteposition, ist identisch mit seiner Warteposition am Ende der Simulation (vgl. Abbildung 15).

Das Modell der anpassbaren, bevorzugten Wartepositionen ähnelt dem Modell der bevorzugten Warteposition. Hierbei wurde der Massenwert  $M$  der Warteposition mit 4 angenommen. Der wartende Fußgänger geht wieder in die Richtung seiner ursprünglichen Position zurück, nachdem die laufenden Fußgänger passiert sind. Jedoch ist seine neue Warteposition weiter unten, da sich diese im Laufe der Simulation zu dem Fußgänger hin verschoben hat. Somit beschreibt die Trajektorie eine unvollständige Schleife (vgl. Abbildung 16).

Das von Johansson vorhergesagte Verhalten der wartenden Fußgänger konnte in der Implementierung erfolgreich reproduziert werden.

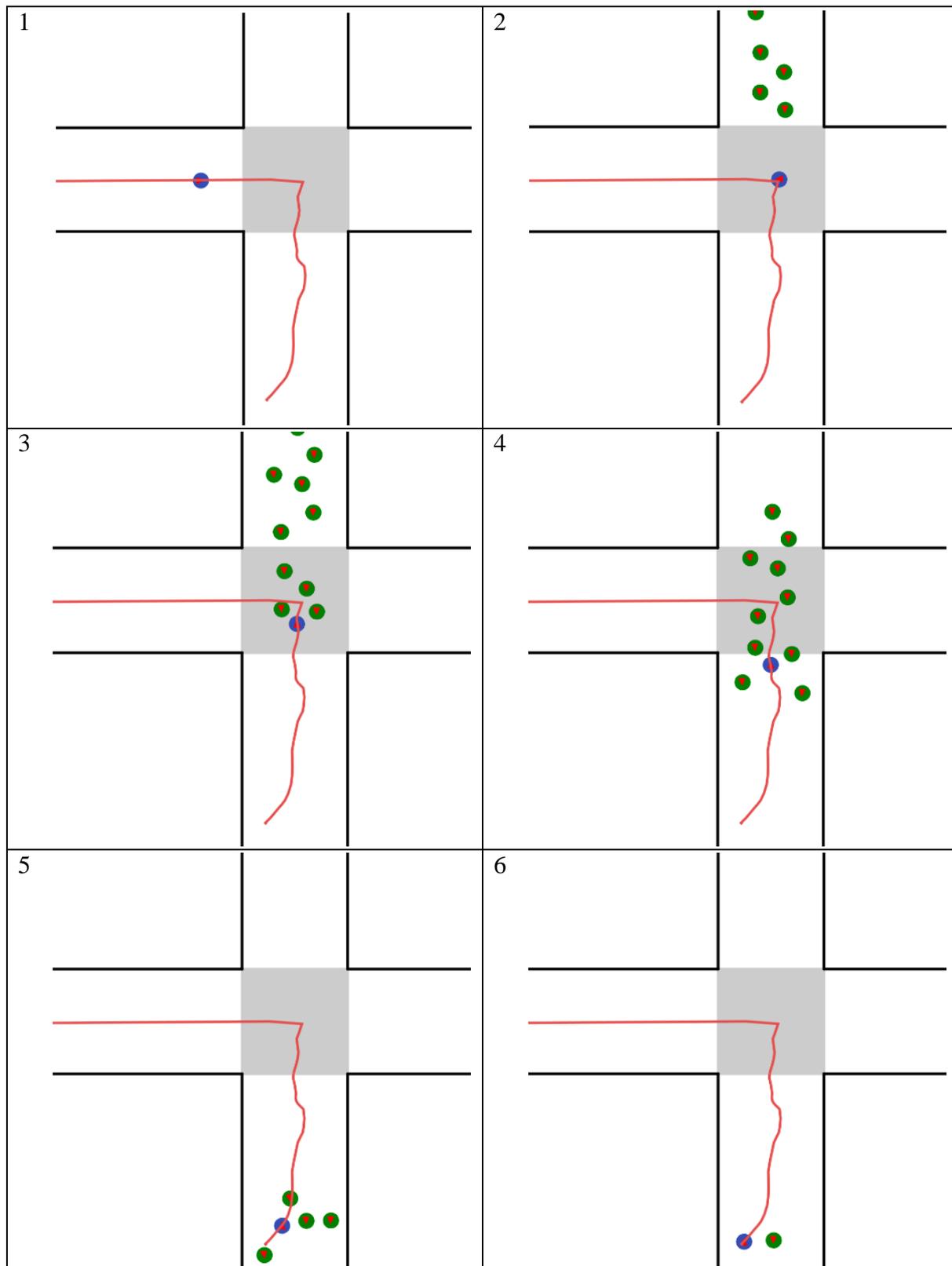


Abbildung 14 – Verhalten eines einzelnen Fußgängers im Modell der bevorzugten Geschwindigkeiten

1. Fußgänger läuft zur Wartezone.
2. Fußgänger erreicht seine Warteposition, welche sich in der Mitte der Wartezone befindet.
3. + 4. Der wartende Fußgänger wird von den laufenden Fußgängern von seiner Warteposition weggestoßen.
5. + 6. Der wartende Fußgänger bleibt an seiner verschobenen Position und kehrt nicht zu seiner Ausgangsposition zurück

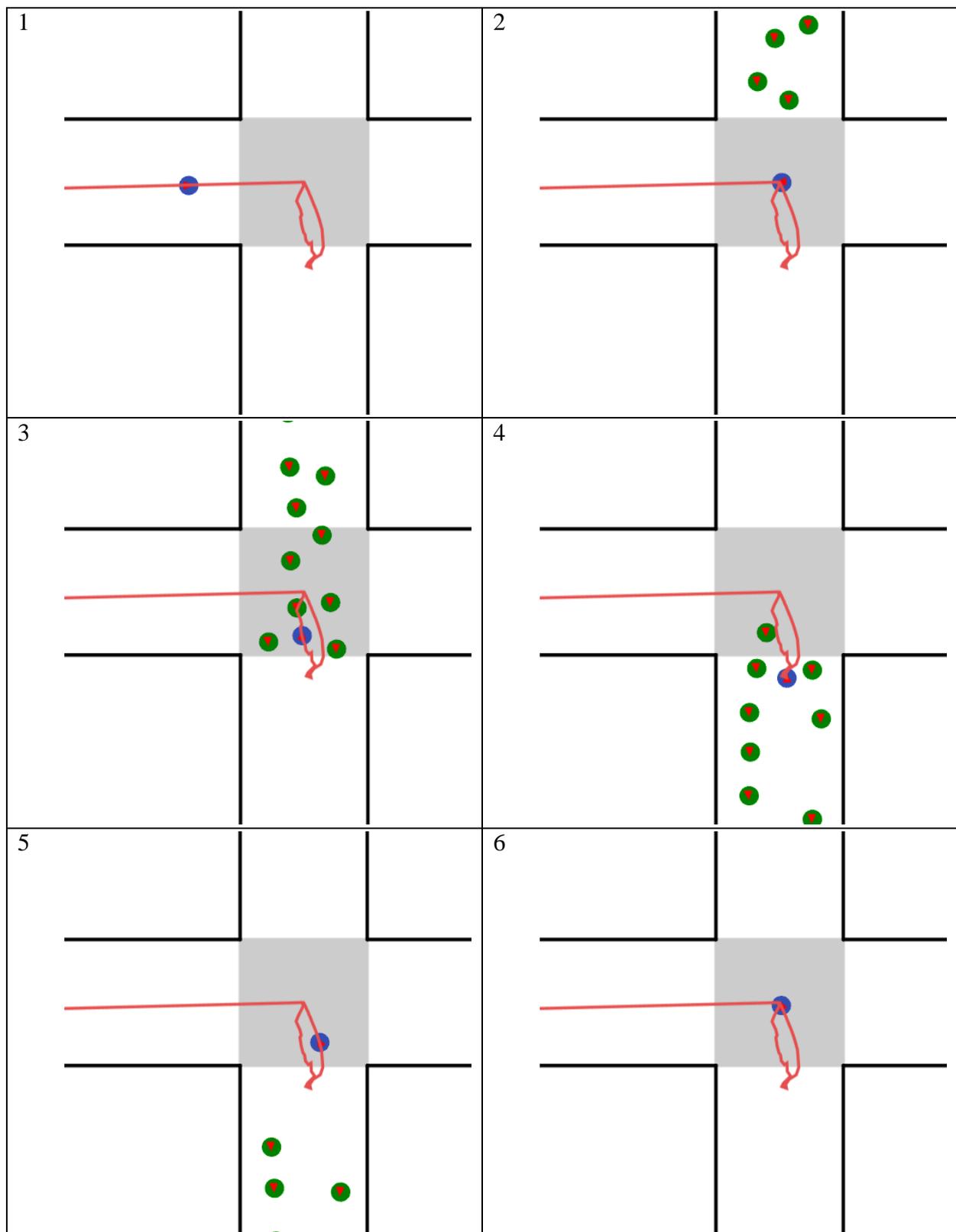


Abbildung 15 – Verhalten eines einzelnen Fußgängers im Modell der bevorzugten Wartezone

1. Fußgänger läuft zur Wartezone.
2. Fußgänger erreicht seine Warteposition, welche sich in der Mitte der Wartezone befindet.
3. + 4. Der wartende Fußgänger wird von den laufenden Fußgängern von seiner Warteposition weggestoßen.
5. + 6. Der wartende kehrt zu seiner Ausgangsposition zurück.

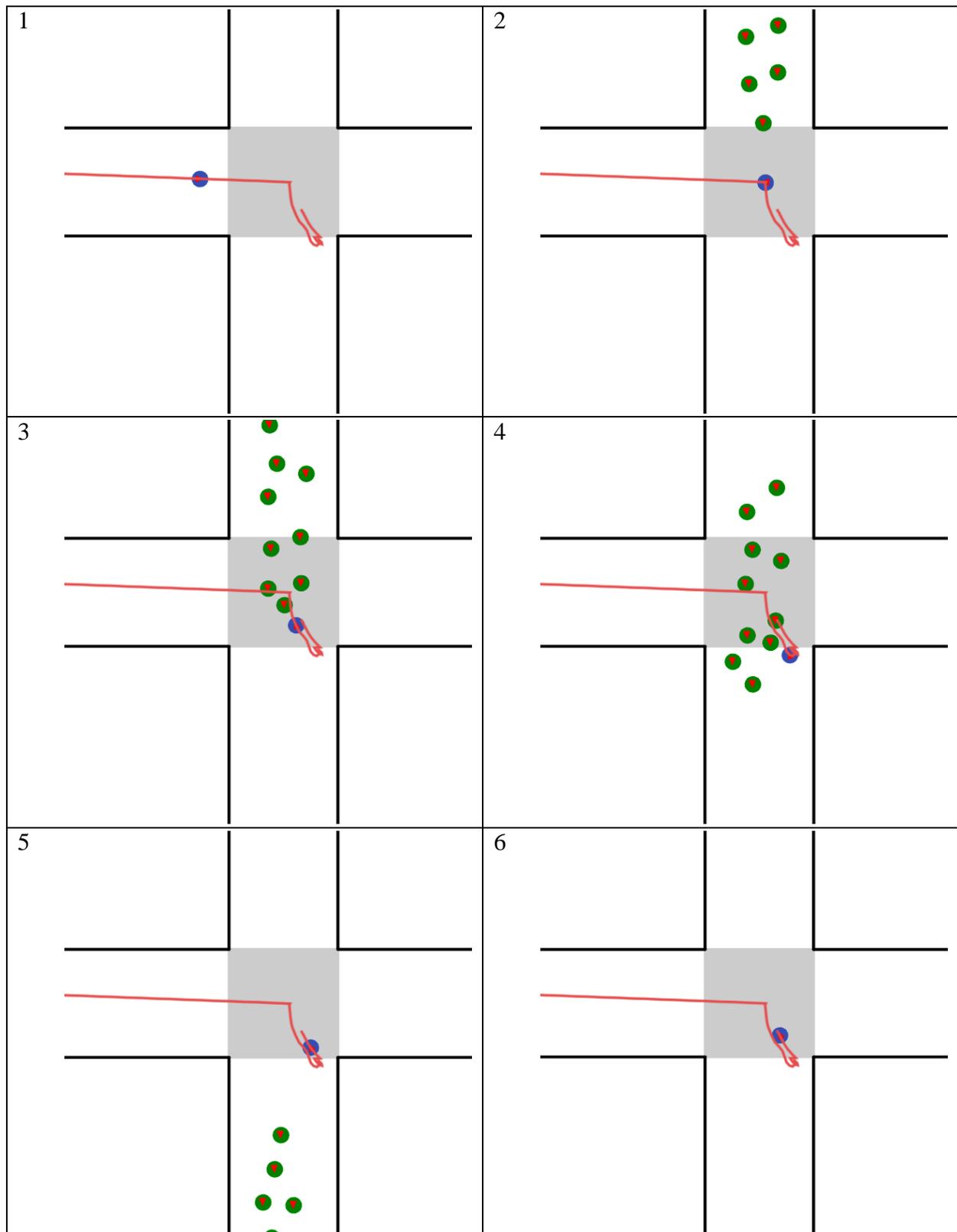


Abbildung 16 - Verhalten eines einzelnen Fußgängers im Modell der anpassbaren, bevorzugten Wartezone

1. Fußgänger läuft zur Wartezone.
2. Fußgänger erreicht seine Warteposition, welche sich in der Mitte der Wartezone befindet.
3. + 4. Der wartende Fußgänger wird von den laufenden Fußgängern von seiner Warteposition weggestoßen.
5. + 6. Die Warteposition, zu der der Fußgänger zurück läuft, ist nun nicht mehr in der Mitte der Wartezone. Sie hat sich angepasst. Die Bewegung des Fußgängers beschreibt nun eine unvollständige Schleife.

### 4.1.3 Verhalten mehrerer wartender Fußgänger

Im zweiten Beispiel laufen, statt nur einem einzelnen Fußgänger, 10 Personen von der linken Seite zu der Wartezone. Sobald sie die Wartezone betreten, wird ihnen eine zufällige Warteposition zugewiesen. Nachdem die wartenden Fußgänger ihre Plätze eingenommen haben, laufen Fußgänger von oben nach unten.

Im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit beeinflussen sich die Fußgänger bereits beim Betreten der Wartezone. Durch die zufällige Zuordnung der Wartepositionen werden bereits wartende Fußgänger durch Fußgänger, die noch auf dem Weg zu ihrer Warteposition sind, beiseitegeschoben. Dadurch verteilen sich die wartenden Fußgänger auch außerhalb der Wartezone, obwohl sie noch nicht durch die passierenden Fußgänger, die von oben nach unten laufen, beeinflusst wurden. Je nach Position werden die wartenden Fußgänger von den Laufenden entweder zur Seite oder nach Unten geschoben (vgl. Abbildung 17).

Im Modell der bevorzugten Warteposition beeinflussen sich die Fußgänger ebenfalls beim Betreten der Wartezone. Sobald bereits wartende Fußgänger durch Laufende gestört werden, gehen sie zur Seite und kehren wieder zu ihrer Warteposition zurück. Es wird eine Oszillation verursacht. Insbesondere wenn sich zu viele wartende Fußgänger in einer Wartezone befinden, hören diese nicht auf zu „Zittern“. Das Oszillationsverhalten wird in 4.2 weiter untersucht. In dem Beispiel wurde jedoch eine Anzahl an wartenden Fußgängern gewählt, bei denen keine anhaltende Oszillation zu vermerken ist. Nachdem die Personen von oben nach unten passiert sind, kehren die wartenden Fußgänger wieder zu ihren ursprünglichen Warteposition zurück (vgl. Abbildung 18).

Das Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition kann sowohl dem Modell der bevorzugten Geschwindigkeit als auch dem Modell der bevorzugten Warteposition ähneln. In dem Beispielsszenario werden einige Fußgänger von den laufenden Fußgängern nach unten geschoben. Somit liegt, wie auch im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit, ihre endgültige Position weiter unten. Jedoch ist die Verschiebung geringfügiger. Die Fußgänger, die zur Seite geschoben werden, kehren wiederrum relativ nah zu ihrer Ausgangsposition zurück, ähnlich dem Modell der bevorzugten Warteposition. Laut Johansson ähnelt das Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition dem Modell der bevorzugten Geschwindigkeit, je kleiner das Massenwert  $M$  gewählt wird. Bei hohen Werten für das Massenwert  $M$  ähnelt das Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition mehr dem Modell der bevorzugten Warteposition [7].

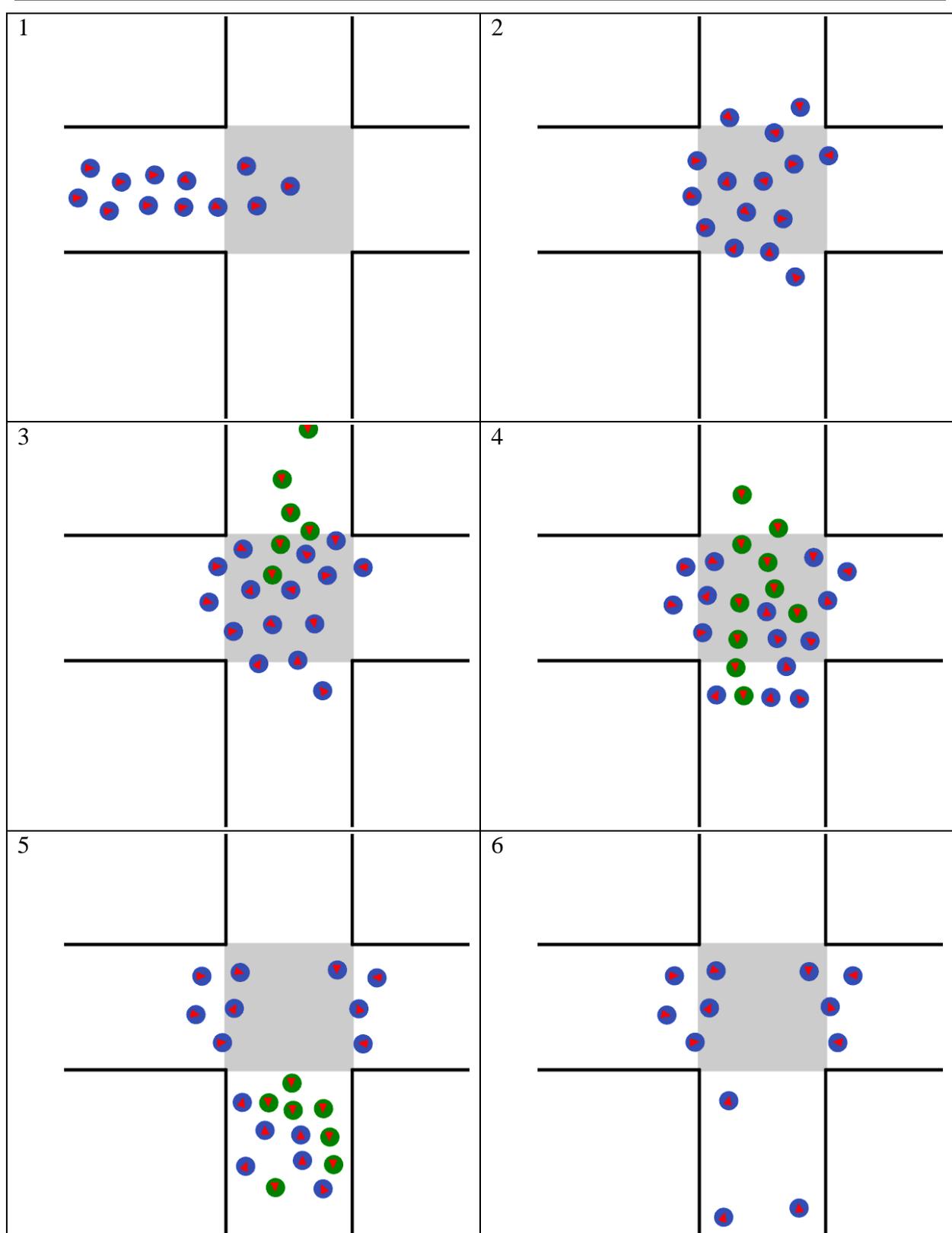


Abbildung 17 – Verhalten vieler wartender Fußgänger im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit

1. Die Fußgänger laufen zur Wartezone.
2. Die Fußgänger erreichen die Wartezone. Die Positionen werden zufällig zugeordnet. Bereits wartende Fußgänger werden durch Fußgänger, die noch auf dem Weg zu ihrer Warteposition sind, beiseitegeschoben. Somit sind auch wartende Fußgänger außerhalb der Wartezone zu erwarten.
3. + 4. Die wartenden Fußgänger werden von den laufenden Fußgängern weggestoßen.
5. + 6. Nachdem die laufenden Fußgänger passiert sind, sind die wartenden Fußgänger recht verstreut. Einige wurden zur Seite geschoben, während andere weiter nach unten geschoben wurden.

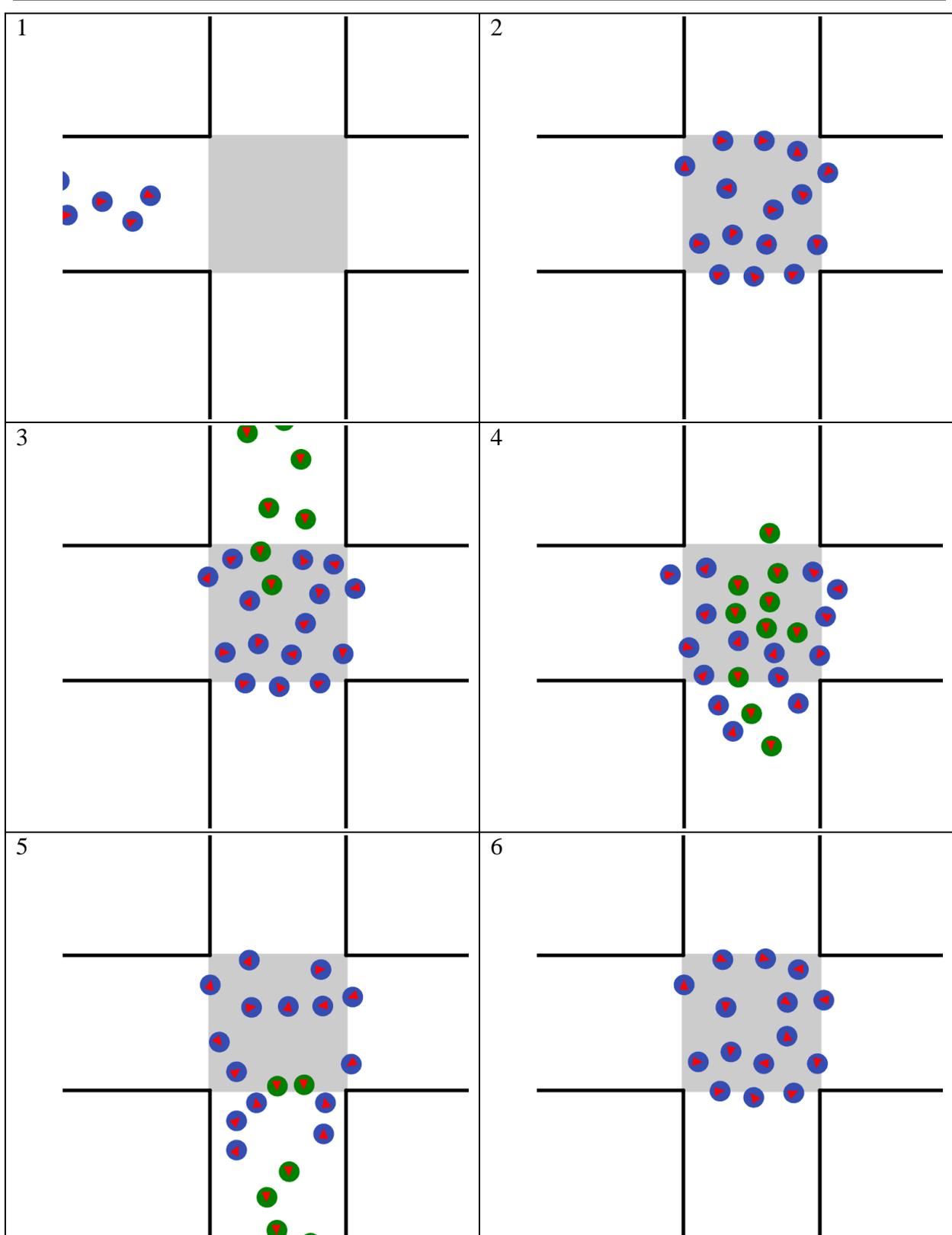


Abbildung 18 – Verhalten vieler wartender Fußgänger im Modell der bevorzugten Warteposition

1. Die Fußgänger laufen zur Wartezone.
2. Die Fußgänger erreichen die Wartezone. Die Wartepositionen werden zufällig zugeordnet. Bereits wartende Fußgänger werden durch Fußgänger, die noch auf dem Weg zu ihrer Warteposition sind, beiseitegeschoben. Jedoch kehren diese wieder zu ihrer ursprünglichen Warteposition zurück.
3. + 4. Die wartenden Fußgänger werden von den laufenden Fußgängern weggestoßen.
5. + 6. Nachdem die laufenden Fußgänger passiert sind, kehren die wartenden Fußgänger zu ihren Ausgangspositionen zurück.

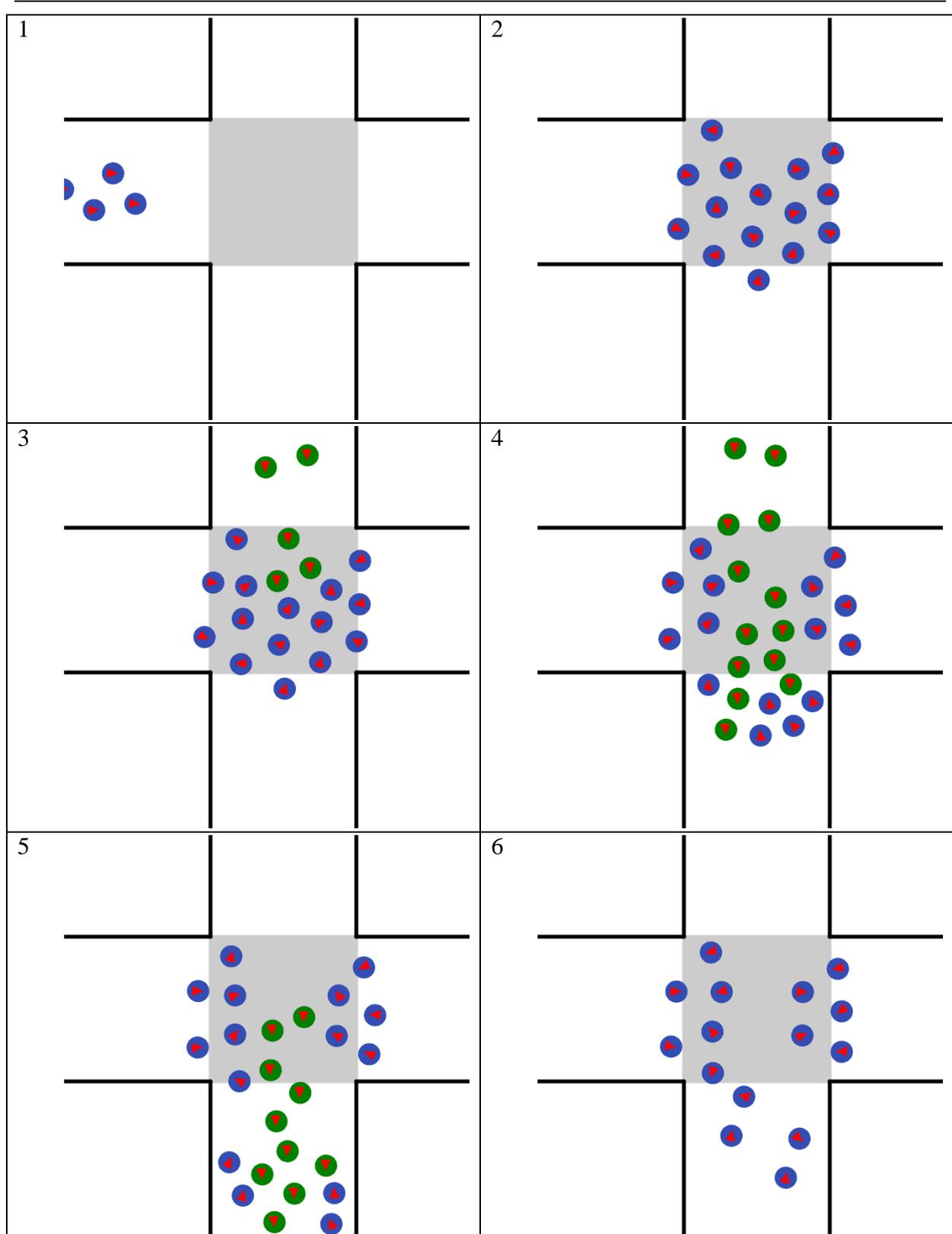


Abbildung 19 – Verhalten vieler wartender Fußgänger im Modell der anpassbaren, bevorzugten Wartezone

1. Die Fußgänger laufen zur Wartezone.
2. Die Fußgänger erreichen die Wartezone. Die Wartepositionen werden zufällig zugeordnet. Bereits wartende Fußgänger werden durch Fußgänger, die noch auf dem Weg zu ihrer Wartezone sind, beiseitegeschoben. Ihre Wartezone passt sich bereits nun an.
3. + 4. Die wartenden Fußgänger werden von den laufenden Fußgängern weggestoßen.
5. + 6. Nachdem die laufenden Fußgänger passiert sind, kehren die wartenden Fußgänger zu ihren neuen, angepassten Wartepositionen zurück.

## 4.2 Analyse des Oszillationsverhaltens

In der Implementierung des Social Force Models in MomentUMv2 werden die abstoßenden Kräfte durch die Körperkraft (BodyForce), die Gleitreibungskraft (slidingFrictionForce) und die abstoßende Interaktionskraft (repulsiveInteractionForce) berechnet. Diese verursachen die Verschiebung der wartenden Fußgänger, sobald sie durch andere Fußgänger gestört werden. Die Körperkraft und die Gleitreibungskraft setzen nur bei Berührung des Fußgängers mit einer anderen Person oder einem Hindernis ein. Da die Interaktionskraft auch auf die Fußgänger wirkt, wenn diese sich beim Laufen oder Stehen nicht berühren, soll im Folgenden nur die Auswirkung der Interaktionskraft auf das Oszillationsverhalten auf die Fußgänger betrachtet werden.

$$F_{\text{Interaktion}} = \mathbf{e} \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{d_{12} - \sum r_i}{mB}\right) \quad (4.1)$$

mit	• $\mathbf{e}$	normalisierte Richtung (Vektor)
	• $A$	Massenverhalten A (Skalar)
	• $d_{12}$	Abstand zwischen den Fußgängern (Skalar)
	• $\sum r_i$	Summe der Radien der Fußgänger (Skalar)
	• $m$	Massenfaktor (Skalar)
	• $B$	Massenverhalten B (Skalar)

Die Interaktionskraft, wie in Formel ( 4. 1 ) beschrieben, wird durch die Parameter Massenverhalten A und Massenverhalten B kalibriert. Um das Oszillationsverhalten zu analysieren, wurden 10 Werte für das Massenverhalten A und das Massenverhalten B kombiniert. Aus den resultierenden 100 Simulationen konnte nun der jeweilige maximale Abstand des wartenden Fußgängers zur Warteposition durch die Euklidische Norm bestimmt werden. Der maximale Abstand der Fußgänger zur ursprünglichen Warteposition soll als Maß für die Oszillation dienen.

Als Testszenario wurde hierfür ein 2m breiter Gang genutzt mit einer  $1m^2$  großen Wartezone (vgl. Abbildung 20). Ein erster Fußgänger wird generiert, der zur Mitte der Wartezone läuft und dort in den Wartemodus übergeht. Ein zweiter Fußgänger wird ihn später in seiner Ruheposition stören und verursacht somit die Oszillation.

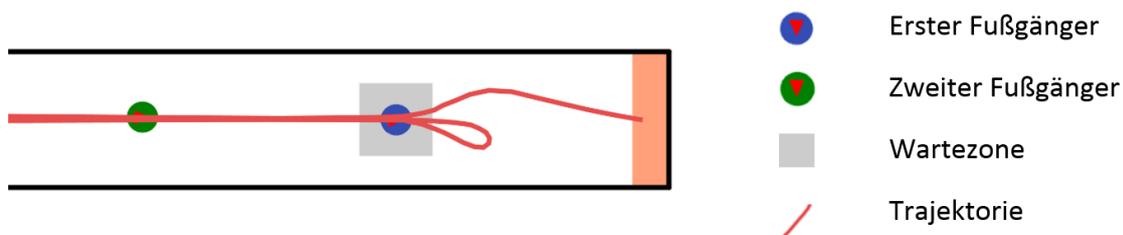


Abbildung 20 – Testszenario zur Bestimmung des Oszillationsverhaltens

Das Testszenario besteht aus einem 2m breiten Gang in dem eine 1mx1m breite Wartezone ist.

#### 4.2.1 Verhalten bei einem vorbeilaufenden Fußgänger

In dem ersten Testszenario wird das Verhalten des wartenden Fußgängers im Modell der bevorzugten Warteposition betrachtet. Hierbei läuft ein zweiter Fußgänger an dem Wartenden vorbei. Dadurch entsteht die Oszillation des wartenden Fußgängers um seine Warteposition.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 21 dargestellt. Vor allem bei dem Wert 0,02 für das Massenverhalten B ist eine hohe Oszillation zu erkennen, ebenso wie dem Wert 5 für das Massenverhalten A. Dahingegen ist bei 0,04 - 0,05 eine geringere Oszillation zu vermerken.

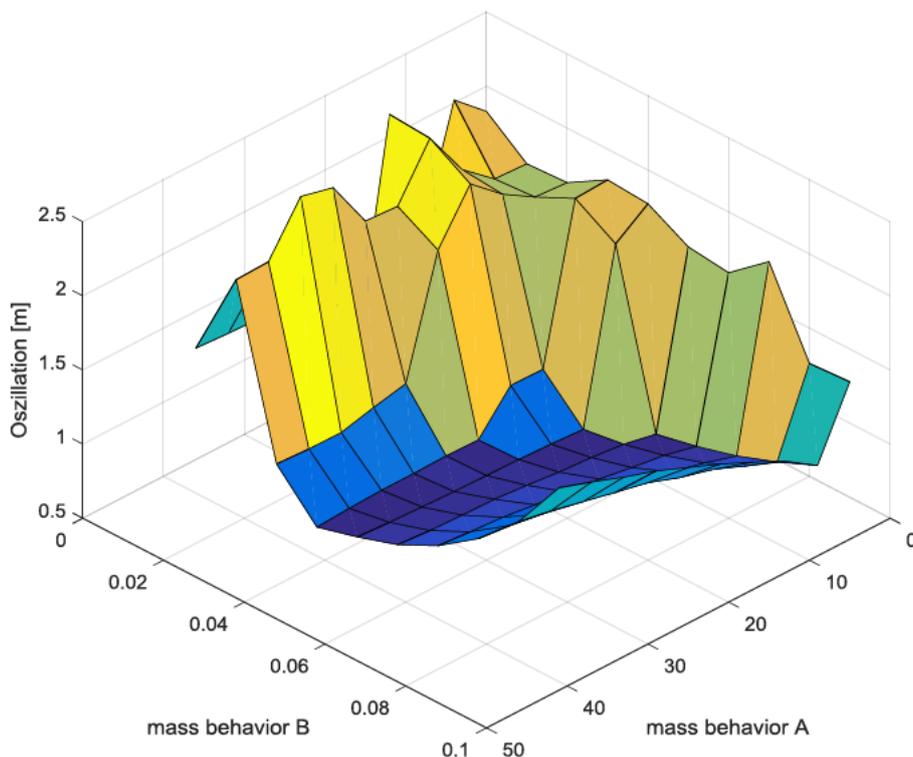


Abbildung 21 – Oszillationsverhalten bei vorbeilaufenden Fußgänger

Das resultierende Diagramm stellt das Oszillationsverhalten des wartenden Fußgängers dar. Hierbei wurden die Werte der maximalen Verschiebung zur Warteposition für die verschiedenen Werte vom Massenverhalten A und Massenverhalten B berechnet.

In Abbildung 22 sind die Trajektorien des wartenden sowie des laufenden Fußgängers für die maximale, minimale und mediale Oszillation zu erkennen. Insbesondere bei der maximalen Oszillation stoßen beide Fußgänger mehrmals aneinander, bevor der laufende Fußgänger an dem Wartenden vorbei gelaufen ist. Bei der minimalen und der medialen Oszillation beschreiben die Trajektorien der wartenden Fußgänger eine einfache Schleife. Bei der medialen Oszillation ist diese runder und größer. In allen drei Fällen überschreitet der wartende Fußgänger bei Ankunft kurz seine Warteposition um rund 20cm, bevor er diese einnimmt.

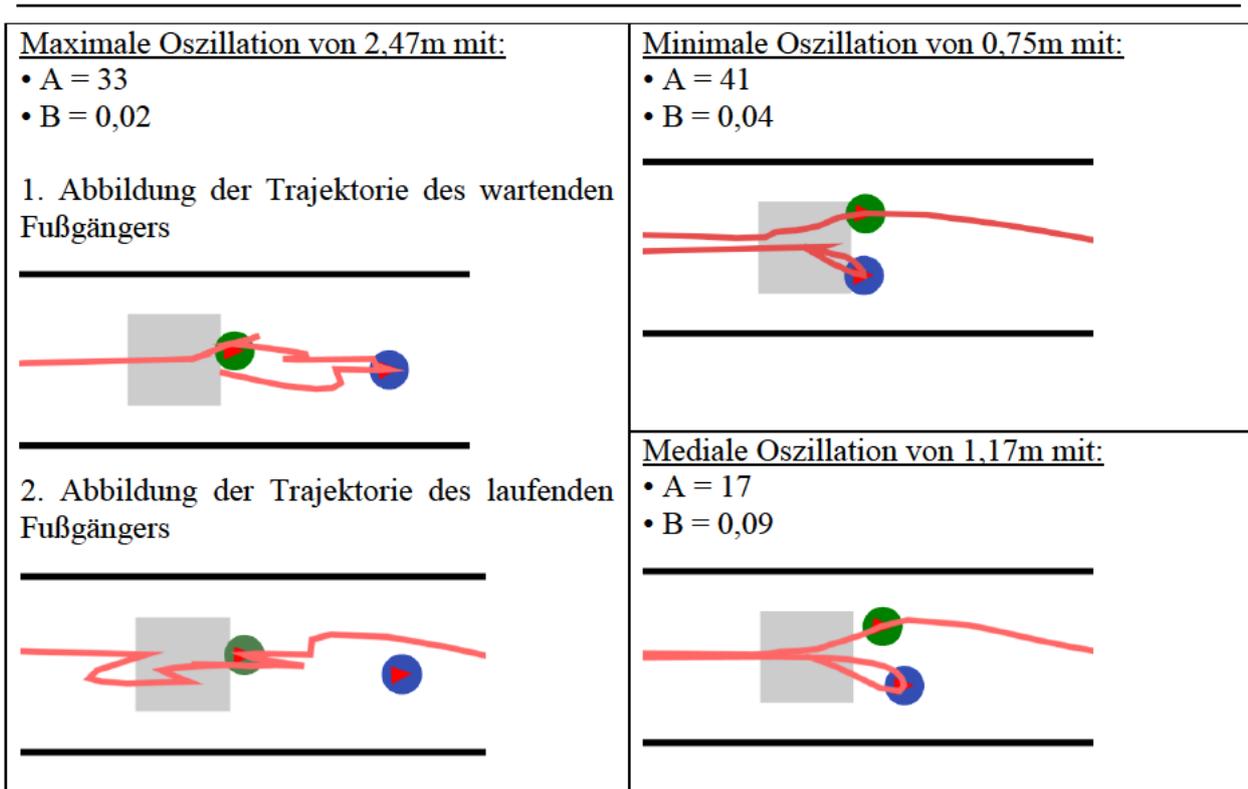


Abbildung 22 – Visualisierung der Fußgänger mit der maximalen, minimalen und medialen Oszillation

Der laufende Fußgänger (grün) stößt mit dem wartenden Fußgänger (blau) zusammen. Dadurch wird die Oszillation des wartenden Fußgängers verursacht. Es ist die maximale, minimale und mediale Oszillation visualisiert. Bei der maximalen stoßen die Fußgänger aufgrund der gewählten Parameter mehrmals zusammen. Bei der minimalen und der medialen Oszillation dahingegen ist ein einfache Ausweichmanöver in Form einer Schleife zu erkennen.

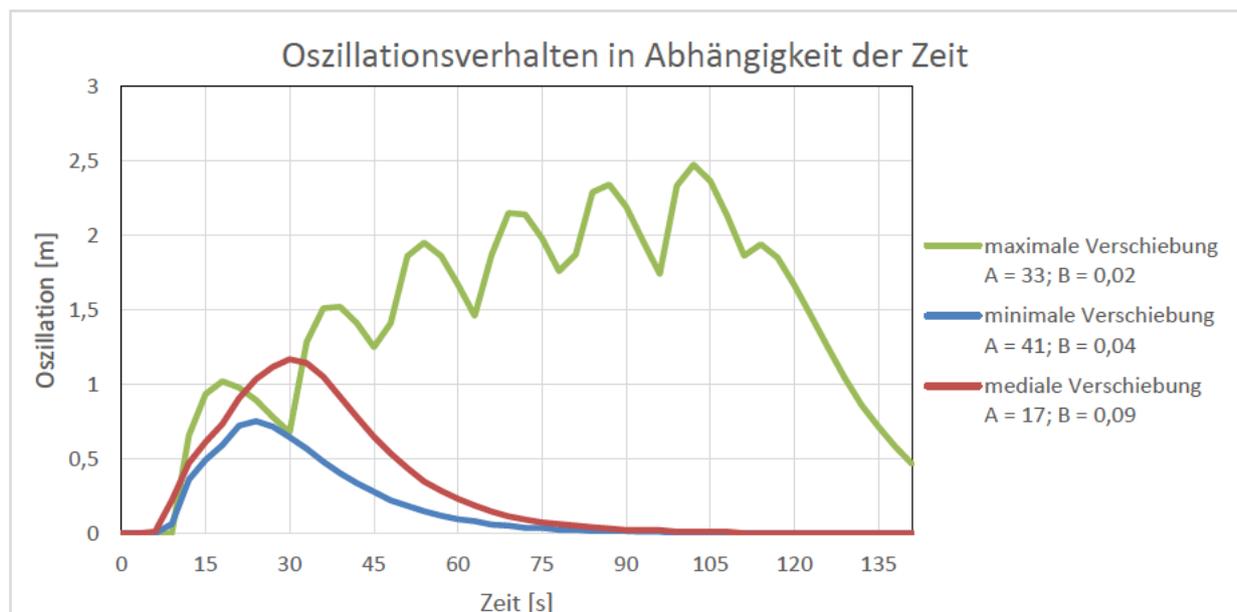


Abbildung 23 – Oszillationsverhalten in Abhängigkeit der Zeit.

In dem Diagramm ist das Oszillationsverhalten der wartenden Fußgänger in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Bei der minimalen und medialen Verschiebung kehrt der Fußgänger nach seinem Ausweichmanöver direkt zu seiner Warteposition zurück. Bei der maximalen Verschiebung ist dies jedoch nicht möglich, da der wartende Fußgänger erneut mit dem Laufenden zusammen stößt und hierbei erneut von seiner Warteposition sich entfernt. Somit wird er immer weiter weg von seiner Ausgangsposition gedrängt, bis der laufende Fußgänger ihn schließlich passiert hat.

#### 4.2.2 Verhalten bei einem zweiten wartenden Fußgänger

In dem zweiten Testszenario wird ebenfalls das Modell der bevorzugten Warteposition betrachtet. Diesmal läuft der zweite Fußgänger jedoch nicht vorbei, sondern wird ebenfalls in der Wartezone stehen bleiben. Er wählt hierbei die gleiche Warteposition wie der erste Fußgänger aus. Durch das Eintreffen des zweiten Fußgängers, wird der erste Fußgänger von seiner ursprünglichen Warteposition verdrängt.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 24 dargestellt. Bis zu dem Wert 0,03 für das Massenverhalten B ist eine hohe Oszillation unabhängig von dem Massenverhalten A zu erkennen. Ebenfalls ist für den Wert 5 für das Massenverhalten A eine große Verschiebung zu vermerken.

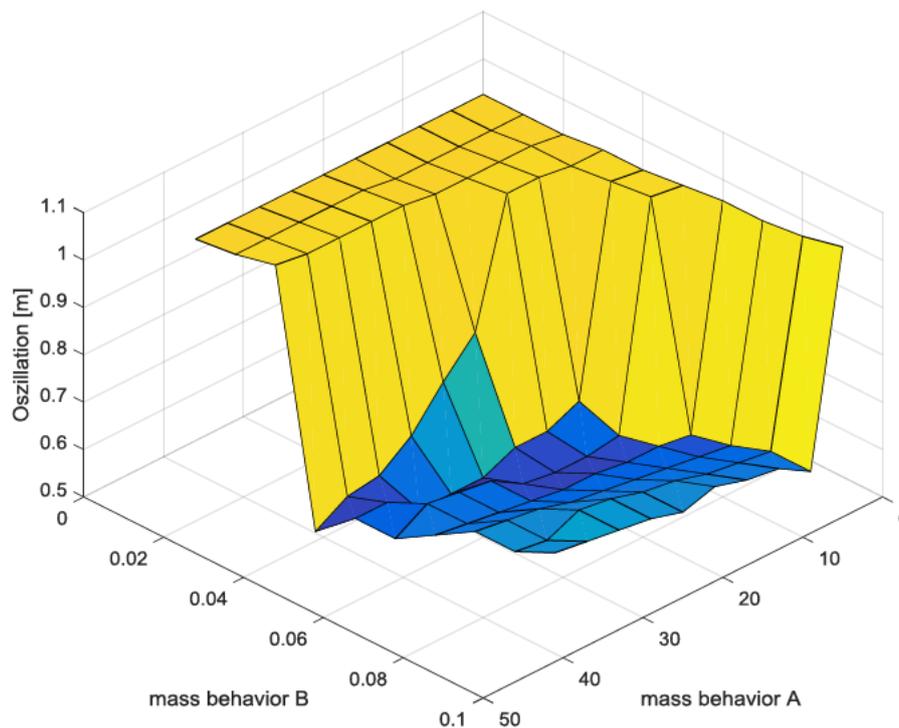


Abbildung 24 – Oszillationsverhalten bei zweiten wartenden Fußgänger

Das resultierende Diagramm stellt das Oszillationsverhalten des ersten wartenden Fußgängers dar. Hierbei wurden die Werte der maximalen Verschiebung zur Warteposition für die verschiedenen Werte vom Massenverhalten A und Massenverhalten B berechnet.

In Abbildung 25 sind Trajektorien des ersten Fußgängers für die maximale, minimale und mediale Oszillation zu erkennen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen den beiden Fußgängern, sobald sie zur Ruhe gekommen sind, unterschiedlich ist.

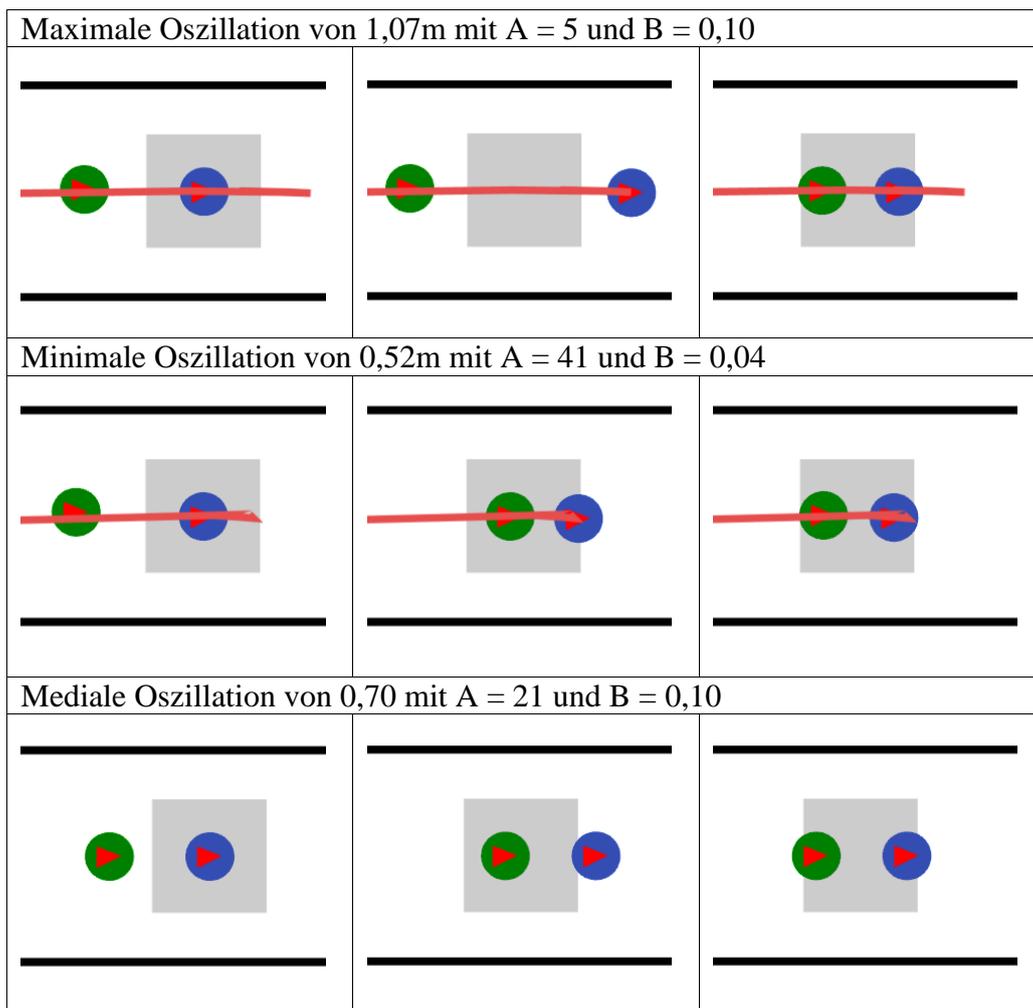


Abbildung 25 – Fußgänger mit der maximalen, minimalen und medialen Oszillation

Der zweite Fußgänger (grün) stößt mit dem wartenden Fußgänger (blau) zusammen, da sie um dieselbe Warteposition konkurrieren. Dadurch wird die Oszillation des ersten Fußgängers verursacht. Es ist die maximale, minimale und mediale Oszillation visualisiert.

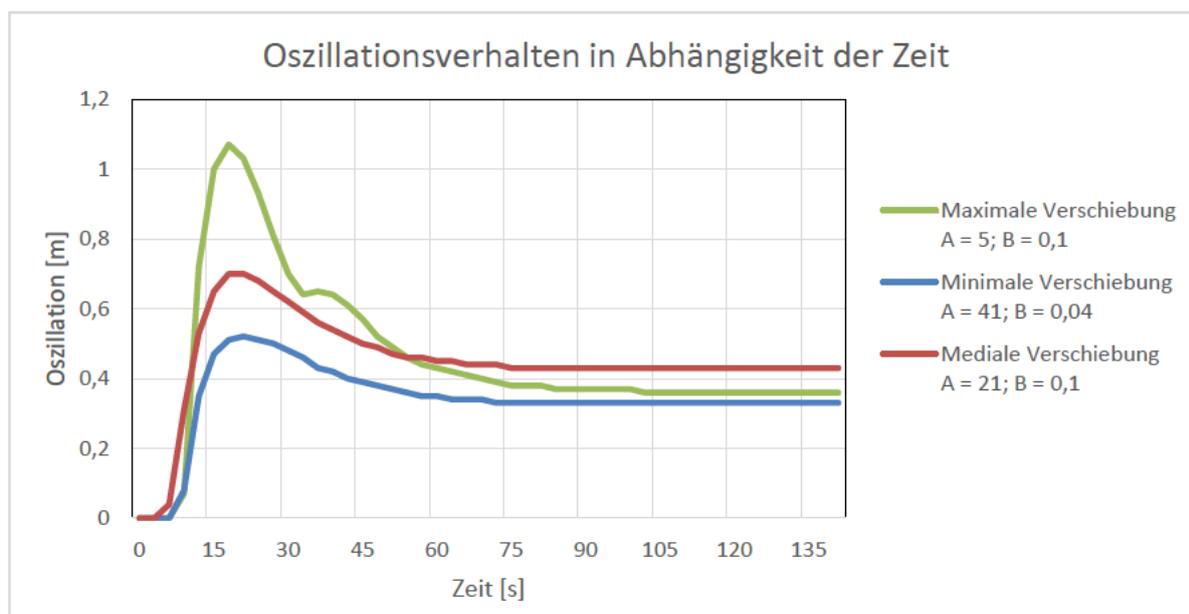
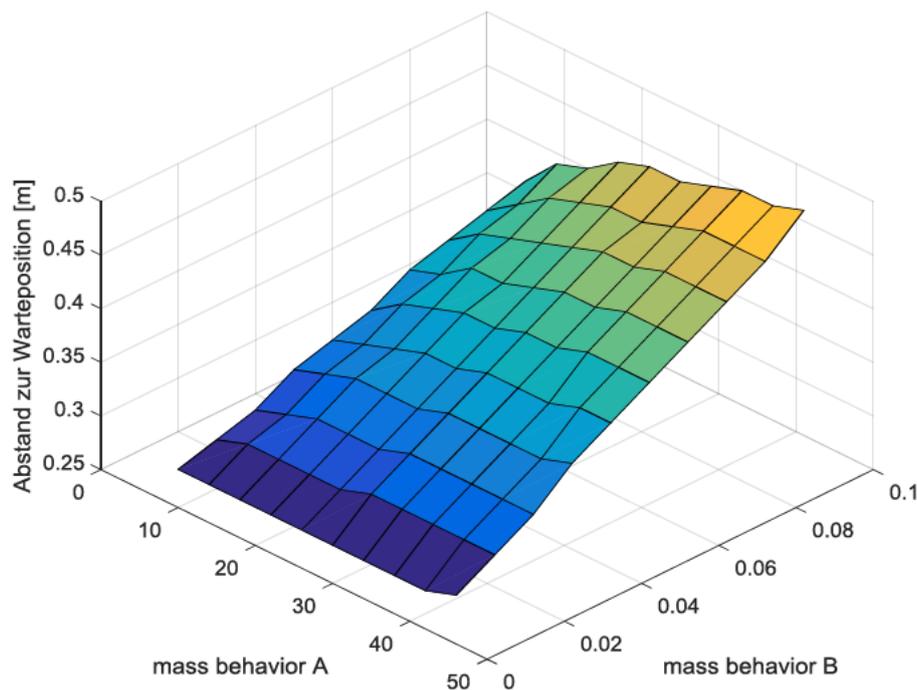


Abbildung 26 – Oszillationsverhalten des ersten Fußgängers in Abhängigkeit der Zeit

Das Diagramm zeigt das Oszillationsverhalten des ersten Fußgängers in Abhängigkeit der Zeit. Die Fußgänger können nicht zu ihrer ursprünglichen Warteposition zurückkehren, da die Abstoßenden Kräfte zwischen den Fußgängern die Beschleunigungskraft zur Warteposition aufhebt.

Die abstoßenden Kräfte der Fußgänger verhindern eine Überlagerung der beiden Fußgänger in der gemeinsamen Warteposition, da sie gleich oder größer als die Beschleunigungskraft zur Warteposition ist. Je nach Größe der abstoßenden Kräfte, wird der Abstand zwischen den beiden Fußgänger, sobald sie in Ruhe sind, beeinflusst. In Abbildung 27 ist der Abstand des ersten Fußgängers zu seiner ursprünglichen Warteposition abgebildet. Es ist eine Abhängigkeit zum Massenverhalten A und Massenverhalten B erkennbar. Je größer das Massenverhalten B und je größer das Massenverhalten A sind, desto höher wird der Abstand des Fußgängers zu seiner ursprünglichen Position.



M

**Abbildung 27 – Abstand des ersten Fußgängers zur Warteposition**

In der Tabelle und dem resultieren Diagramm ist Abstand des ersten Fußgängers zu seiner ursprünglichen Warteposition in Abhängigkeit zu dem Massenverhalten A und dem Massenverhalten B abgebildet. Eine Abhängigkeit der Parameter zu dem Abstand ist zuerkenne.

#### 4.2.3 Verhalten im Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition

Als Letztes soll nun das Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition untersucht werden. Dies ist, wie schon in 3.1.3 erläutert, eine Erweiterung des Modells der bevorzugten Warteposition. In dem Szenario wird, wie in 4.2.1, der wartenden Fußgänger durch einen vorbei laufenden Fußgänger gestört. Daher sollen die Parameter des Massenverhaltens genutzt werden, die in 4.2.1 zu der maximalen, minimalen und medialen Oszillation geführt haben. Für die drei Szenarien würden zehn Werte für den Massenwert M zwischen 1 und 28 genutzt. Die hieraus resultierende Oszillation und Verschiebung der Warteposition sind Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt.

Die Parameter für medialen und minimalen Werte rufen eine gleiche Entwicklung des Oszillationsverhaltens und der Verschiebung der Warteposition hervor. Die Oszillation und die Verschiebung der Warteposition nimmt mit steigendem Massenwert M monoton ab. Dahingegen führen die maximalen Parameter des Massenverhaltens zu unstetigen Ergebnissen, aus denen sich kein Trend folgern lassen kann.

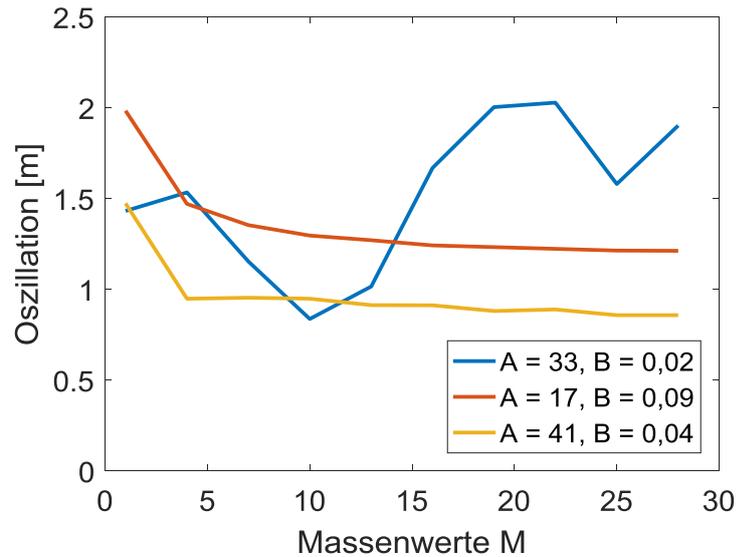


Abbildung 28 – Oszillationsverhalten des Modells der anpassbaren, bevorzugten Warteposition

In der Tabelle und dem resultieren Diagramm ist das Oszillationsverhalten des Modells der anpassbaren, bevorzugten Warteposition in Abhängigkeit vom Massenwert M dargestellt. Hierzu wurden für das Massenverhalten A und das Massenverhalten B, die Werte gewählt, die in 4.2.1 zur maximalen, minimalen und medialen Oszillation geführt haben. Die Werte der Massenverhalten der blauen Linie haben zur maximalen Oszillation geführt, die Gelben zur minimalen und die Roten zur medialen Oszillation.

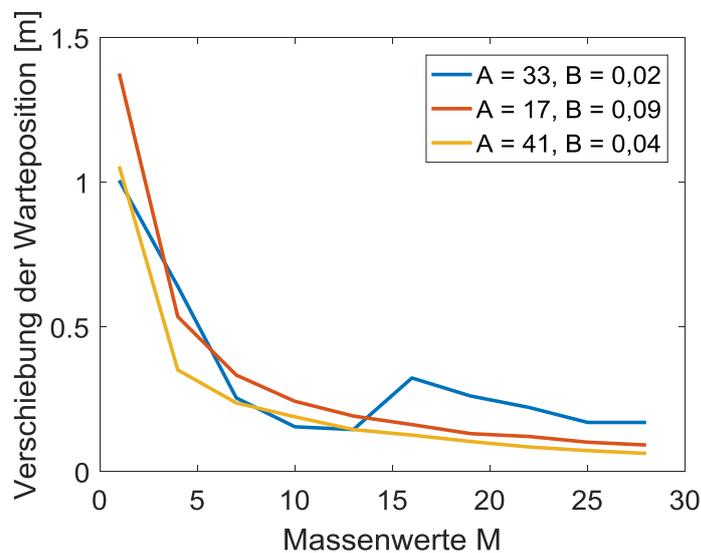


Abbildung 29 – Anpassung der Warteposition

In der Abbildung wird die Anpassung der Warteposition im Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition in Abhängigkeit des Massenwertes M dargestellt. Hierbei wurden die Parameter für das Massenverhalten A und das Massenverhalten B gewählt, die im Modell der bevorzugten Warteposition zur maximalen, minimalen und medialen Oszillation geführt haben.

---

## 5 Evaluierung des Modells und Verbesserungsvorschläge

Im Modell der bevorzugten Geschwindigkeit kann eine sehr starke Verschiebung der wartenden Fußgänger von ihrer ursprünglichen Warteposition beobachtet werden. Diese kann sowohl in Richtung als auch Größe unrealistisch sein. Wenn der wartende Fußgänger zentral steht, wird er weit in die Bewegungsrichtung der laufenden Fußgänger verschoben (vgl. 4.1.2). Ebenfalls konnte beobachtet werden, dass der wartende Fußgänger durch den laufenden Fußgänger permanent aus der Wartezone geschoben werden kann. Je nach Zweck der Simulation kann dies ein ungewünschtes Verhalten sein.

Im Modell der bevorzugten Warteposition läuft der wartende Fußgänger immer wieder zu seiner Warteposition zurück. Dies kann sehr gut im Falle von Warteschlangen verwendet werden, da hier Personen anderen kurz ausweichen. Jedoch geben sie nicht ihren Platz in der Schlange auf und kehren wieder zu diesem zurück. In diesem Modell ist das Phänomen der Oszillation sehr zu betonen. Sobald zu viele Fußgänger sich in der Wartezone befinden, entstehen Schwingungen, die nicht mehr zur Ruhe kommt.

Das Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition zeigt ähnliche Probleme wie das Modell der bevorzugten Geschwindigkeit. Die Fußgänger passen ihre Warteposition an, jedoch ist der neue Standort oftmals nicht sinnvoll. Statt auf die Seite auszuweichen, werden die Fußgänger und ihre Warteposition teilweise in die Laufrichtung der passierenden Fußgänger verschoben. Sofern in die neue Warteposition in eine sinnvolle Richtung gelenkt wird, kann dieses Modell gut für Fußgänger, die an ungünstigen Stellen mit hohen Verkehrsströmen stehen, angewandt werden. Jedoch kann auch hier die endgültige Warteposition der Fußgänger außerhalb der gewählten Wartezone liegen.

Allgemein kann gesagt werden, dass die Modelle von Johansson situationsbezogen sehr gut verwendet werden können. Insbesondere werden die wartenden Fußgänger nun nicht mehr als unbewegliches Hindernis für die laufenden Fußgänger wahrgenommen. Die laufenden Fußgänger können in allen Testszenarien an den wartenden Fußgänger vorbeilaufen. Hier ist insbesondere zu vermerken, dass mehrere laufende Fußgänger hintereinander durch die Wartenden hindurchlaufen und somit Spuren bilden. Die Streifenbildung in Kreuzungen ist auch in der Realität zu beobachten, wenn zwei Fußgängergruppen sich begegnen [2].

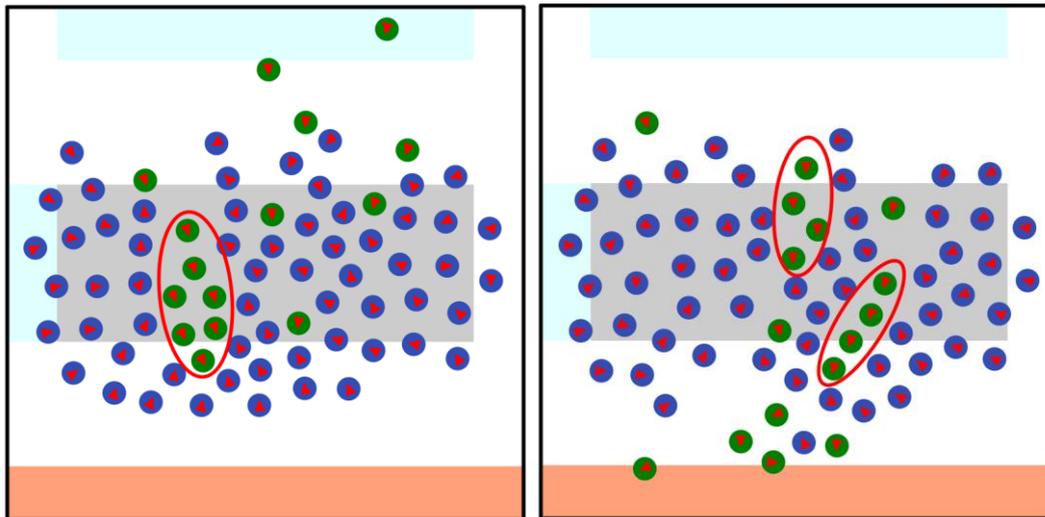


Abbildung 30 – Streifenbildung der laufenden Fußgänger

Die laufenden Fußgänger (grün) gehen hintereinander durch die wartenden Fußgänger (blau) hindurch. Hierbei bilden sich streifenähnliche Formationen (rot umrandet). Die wartenden Fußgänger folgen dem Modell der anpassbaren, bevorzugten Warteposition.

Wenn jedoch ein Fußgänger in der Laufbahn eines anderen Fußgängers ist, so wird der Laufende nicht um diesen herum navigieren oder ausweichen, sondern läuft direkt auf ihn zu. Sobald ein laufender Fußgänger genau durch die Wartezone eines Wartenden läuft, wirken die abstoßenden Kräfte und die Beschleunigungskräfte gegeneinander und beide Fußgänger bewegen sich nicht mehr. Ein weiteres Problem ist das mehrmalige Zusammenstoßen von den Fußgängern, bei schlechter Parameterwahl vom Massenverhalten A und Massenverhalten B, wie in 4.2.1 beschrieben.

Zur weiteren Verbesserung der Fußgängersimulation wird im Rahmen der Arbeit vorgeschlagen, das Oszillationsverhalten des Modells der bevorzugten Geschwindigkeit zu untersuchen. Hierbei könnte das Oszillationsverhalten der Fußgänger auf einer bestimmten Fläche in Abhängigkeit der Anzahl der Fußgänger betrachtet werden.

Ebenfalls könnte ein Füllalgorithmus für die Wartezone bei allen Modellen verwendet werden. So könnte verhindert werden, dass ein Fußgänger durch bereits wartende Fußgänger hindurchlaufen muss und somit eine Oszillation verursacht. Stattdessen könnte eine Befüllung der Wartezone von innen nach außen ablaufen, damit sich zusätzliche Fußgänger eher an den Rand der Zone stellen, statt einmal hindurch zu laufen. Es könnte auch die Positionswahl dichteabhängig gemacht werden. Je höher die Fußgängerdichte in der Wartezone ist, desto näher rücken die Wartepositionen zusammen.

Es könnte ein Bereich um die ursprüngliche Wartezone gezogen werden, in dem die Fußgänger wieder zur Wartezone in den Laufmodus wechseln und in die Wartezone zurückkehren. So könnte sichergestellt werden, dass die Fußgänger sich zu weit von ihrer Wartezone entfernen.

---

Damit die wartenden Fußgänger nicht mehr in die Laufrichtung der Anderen mitgezogen wird, könnte man die Berechnung der abstoßenden Kräfte im Wartemodell angepasst werden. So könnte ein zur Laufrichtung senkrechtes Ausweichmanöver erreicht und ein tangenciales verhindert werden. Somit könnte auch das Problem, dass sich die abstoßenden Kräfte und die Beschleunigungskräfte gegenseitig auslöschen, behoben werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Nutzung über das Wahl des Modells entscheidet. Johansson stellt ein verwendungsfähiges Modell vor, das ins Besondere gut für Warteschlangen ist. Jedoch muss bei Parameterwahl darauf geachtet werden, dass kein unrealistisches Oszillationsverhalten hervorgerufen wird. Um ein Ausweichen besser darzustellen, könnte die abstoßende Kraft des wartenden Fußgängers senkrecht zur Laufbahn des passierenden Fußgängers wirken. Ebenso könnten dichteabhängige Befüllung einer Wartezone von innen nach außen verwendet werden.

## 6 Anhang

### 6.1 Quellcode des Wartemodells und der Fußgängererweiterung

Wartemodell: siehe Appendix A - Codes\JohannsonPedestrianExtension.java

Fußgängererweiterung: siehe Appendix A - Codes\JohannsonStanding.java

### 6.2 Parameterwerte der Szenarien

Parameterwahl des Beispielszenarios von 4.1 *Erläuterung der Funktionsweise der Implementierung* und des Testszenarios von 4.2 *Analyse des Oszillationsverhaltens*

<i>timeStepDuration</i>	0.1
<i>relaxation_time</i>	0.5
<i>physical interaction kappa</i>	2.4e5
<i>physical interaction k</i>	1.2e5
<i>panic_degree</i>	0.4
<i>mass behaviour A</i> (nur Beispielszenario)	26.67
<i>mass behaviour B</i> (nur Beispielszenario)	0.06
<i>helbing Epsilon</i>	10e-6
<i>koester Epsilon</i>	10e-6
<i>massWaitingPoint</i> (nur Beispielszenario)	4.0
<i>desiredVelocity</i>	1.34
<i>maximalVelocity</i>	2.7
<i>radiusMeter</i>	0.23
<i>groupSize</i>	1

### 6.3 Tabellen zum Oszillationsverhalten

Tabelle zur *Abbildung 21 – Oszillationsverhalten bei vorbeilaufenden Fußgänger*

A \ B	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0,01	2,11	2,30	1,54	2,43	1,01	1,52	1,51	1,51	1,52	1,53
0,02	1,90	1,91	2,09	2,41	2,07	2,08	2,42	2,47	2,15	2,14
0,03	1,92	1,93	2,06	2,25	1,91	1,12	1,08	1,02	1,02	1,04
0,04	2,08	2,06	1,02	1,03	0,77	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75
0,05	2,06	1,90	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,83
0,06	1,91	0,76	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92
0,07	1,87	0,82	0,87	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02	1,03	1,05
0,08	2,09	0,89	0,96	1,01	1,05	1,10	1,15	1,18	1,22	1,24
0,09	1,54	0,99	1,08	1,17	1,23	1,31	1,35	1,40	1,46	1,50
0,10	1,56	1,11	1,25	1,36	1,46	1,55	1,64	1,71	1,79	1,87

Tabelle zur *Abbildung 24 – Oszillationsverhalten bei zweiten wartenden Fußgänger*

B \ A	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
0,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
0,03	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04
0,04	1,02	1,02	1,03	1,03	0,77	0,70	0,62	0,57	0,56	0,52
0,05	1,02	1,03	0,60	0,57	0,57	0,54	0,54	0,54	0,59	0,59
0,06	1,03	1,04	0,57	0,56	0,56	0,57	0,61	0,62	0,63	0,59
0,07	1,04	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64
0,08	1,04	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,67	0,68	0,69
0,09	1,05	0,63	0,64	0,65	0,67	0,68	0,70	0,71	0,68	0,69
0,10	1,07	0,63	0,67	0,68	0,70	0,68	0,70	0,71	0,72	0,73

Tabelle zur *Abbildung 27 – Abstand des ersten Fußgängers zur Warteposition*

B \ A	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0,01	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26
0,02	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
0,03	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
0,04	0,29	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33
0,05	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
0,06	0,31	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37
0,07	0,33	0,34	0,36	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39
0,08	0,34	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41
0,09	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,41	0,42	0,43	0,43	0,43
0,10	0,36	0,39	0,40	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45	0,46

Tabelle zur *Abbildung 28* – Oszillationsverhalten des Modells der anpassbaren, bevorzugten Warteposition

M	Maximum A = 33, B = 0,02	Median A = 17, B = 0,09	Minimum A = 41, B = 0,04
1	1,43	1,98	1,47
4	1,53	1,47	0,95
7	1,15	1,35	0,95
10	0,84	1,30	0,95
13	1,02	1,27	0,91
16	1,67	1,24	0,91
19	2,00	1,23	0,88
22	2,03	1,22	0,89
25	1,58	1,21	0,86
28	1,90	1,21	0,86

Tabelle zur *Abbildung 29* – Anpassung der Warteposition

M	Maximum A = 33, B = 0,02	Median A = 17, B = 0,09	Minimum A = 41, B = 0,04
1	1,01	1,38	1,06
4	0,64	0,54	0,35
7	0,25	0,33	0,24
10	0,16	0,24	0,19
13	0,15	0,19	0,15
16	0,32	0,16	0,13
19	0,26	0,13	0,10
22	0,22	0,12	0,09
25	0,17	0,10	0,07
28	0,17	0,09	0,06

## 7 Literaturverzeichnis

- 
- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), “Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen,” no. 2, 2015.
  - [2] D. Helbing, L. Buzna, A. Johansson, and T. Werner, “Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions,” *Transp. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–24, 2005.
  - [3] S. Rodriguez, A. Giese, N. M. Amato, S. Zarrinmehr, F. Al-Douri, and M. J. Clayton, “Environmental Effect on Egress Simulation,” in *Motion in Games: 5th International Conference, MIG 2012, Rennes, France, November 15-17, 2012. Proceedings*, M. Kallmann and K. Bekris, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 7–18.
  - [4] S. Seer, D. Bauer, N. Brandle, and M. Ray, “Estimating Pedestrian Movement Characteristics for Crowd Control at Public Transport Facilities,” *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. pp. 742–747, 2008.
  - [5] J. Y. S. Lee, W. H. K. Lam, and S. C. Wong, “Pedestrian simulation model for Hong Kong underground stations,” *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*. pp. 554–558, 2001.
  - [6] D. Helbing and P. Molnár, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286, 1995.
  - [7] F. Johansson, A. Peterson, and A. Tapani, “Waiting pedestrians in the social force model,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 419, pp. 95–107, 2015.
  - [8] M. Davidich, F. Geiss, H. G. Mayer, A. Pfaffinger, and C. Royer, “Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: A case study using two major German railway stations as examples,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 37, pp. 210–222, Dec. 2013.
  - [9] D. Hartmann and I. von Sivers, “Structured first order conservation models for pedestrian dynamics,” *Networks Heterog. Media*, vol. 8, no. 4, pp. 985–1007, 2013.
  - [10] D. H. Biedermann, P. Kielar, and O. Handel, “Betrachtung der Modellierung und Simulation von Fußgängern im Kontext verschiedener Skalen,” *Proc. 26th Forum Bauinformatik*, pp. 171–179, 2014.
  - [11] D. H. Biedermann *et al.*, “A Hybrid and Multiscale Approach to Model and Simulate Mobility in the Context of Public Events,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 19, pp. 350–363, 2016.
  - [12] D. H. Biedermann, P. M. Kielar, Q. Aumann, C. M. Osorio, and C. T. W. Lai, “CarPed -- A Hybrid and Macroscopic Traffic and Pedestrian Simulator,” *Proc. 27th Forum Bauinformatik, Aachen, Ger.*, Oct. 2015.
  - [13] L. F. Henderson, “The statistics of crowd fluids.,” *Nature*, vol. 229, no. 5284, pp. 381–383, 1971.

- 
- [14] U. Weidmann, "Transporttechnische Eigenschaften des fussgängerverkehrs Literatúrauswertung," *Schriftenreihe des IVT Nr. 90, ETH Zürich*. 1992.
- [15] L. F. Henderson, "On the fluid mechanics of human crowd motion," *Transp. Res.*, vol. 8, no. 6, pp. 509–515, 1974.
- [16] D. Helbing, "Physikalische Modellierung des dynamischen Verhaltens von Fußgängern," *ETH Zürich - Dep. Humanit. Soc. Polit. Sci.*, 1990.
- [17] H. W. Hamacher and S. A. Tjandra, "Mathematical modelling of evacuation problems: a state of the art," *Berichte des Fraunhofer Inst. für Techno-und Wirtschaftsmathematik*, vol. 24, 2001.
- [18] G. Köster, D. Hartmann, and W. Klein, "Microscopic Pedestrian Simulations: From Passenger Exchange Times to Regional Evacuation," in *Operations Research Proceedings 2010: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society*, B. Hu, K. Morasch, S. Pickl, and M. Siegle, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 571–576.
- [19] A. J. Marrow, *Kurt Lewin - Leben und Werk*. Stuttgart: Klett, 1977.
- [20] K. Lewin, *Feldtheorie in den Sozialwissenschaften*. Hans Huber Bern, 1963.
- [21] H. Heckhausen, Jutta, Heckhausen, *Motivation und Handeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [22] E. T. Hall, *The hidden dimension*. New York, NY, US: Doubleday & Co, 1966.
- [23] S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy, "Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 38, no. 2, pp. 169–190, 2004.

## Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 28.Februar 2017

---

Sonja Germscheid

Germscheid Sonja

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]