



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Torben Woggan

Entwurf und Evaluierung eines Konzepts zur
objektiven Validierung von Bewegungsmodellen in
Multi-Agenten-Simulationen

Torben Woggan

Entwurf und Evaluierung eines Konzepts zur objektiven Validierung von Bewegungsmodellen in Multi-Agenten-Simulationen

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Angewandte Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Thomas Thiel-Clemen
Zweitgutachter : Prof. Dr. Stefan Sarstedt

Abgegeben am 11. Juni 2015

Torben Woggan

Thema der Masterarbeit

Entwurf und Evaluierung eines Konzepts zur objektiven Validierung von Bewegungsmodellen in Multi-Agenten-Simulationen

Stichworte

Validierung, Bewegungsmodell, Multi-Agenten-Simulation, Fußgängerdynamik

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Entwurf und der Evaluierung eines Konzepts zur Validierung von Bewegungsmodellen in Multi-Agenten-Simulationen, welches eine objektive und automatisierbare Validierung ermöglicht. Hierfür müssen unter anderem Werte aus mit den Simulationssystemen durchgeführten Versuchen extrahiert und mit Realdaten verglichen werden. Auch die Betrachtung des Agentenverhaltens und der Vergleich dieses Verhaltens mit einem erwarteten Verhalten stellen einen Bestandteil der Validierung dar. Zusätzlich findet eine Anwendung dieses Konzepts auf mehrere Bewegungsmodelle, mit unterschiedlichen Modellansätzen, statt. Dies erlaubt sowohl die Bewertung der Aussagekraft des Validierungskonzepts, als auch Schlüsse über die Eigenschaften, die ein Bewegungsmodell haben sollte, um valide Ergebnisse produzieren zu können. Auf den Aufbau und die Funktionsweise eines Modells, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde, wird genauer eingegangen.

Torben Woggan

Title of the paper

Creation and evaluation of a concept for the objective validation of movement models in multi-agent simulations

Keywords

Validation, Movement Model, Multi-Agent Simulation, Pedestrian Dynamics

Abstract

This paper deals with the creation and evaluation of a concept for the validation of movement models in multi-agent simulations, which enables an objective and automatable validation. For this purpose values have to be extracted from experiments conducted with the simulation systems to be compared with real data. Another part of the validation is the examination of the agent behavior and the comparison of this behavior with the expected behavior. Additionally, the concept is used for several movement models with different model approaches. This allows the evaluation of the informative value of the validation concept as well as conclusions about characteristics a movement model should have to produce valid results. The design and functionality of a model, which was created as part of this paper, will be discussed in detail.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Problem- und Themenbeschreibung	7
1.2	Zielsetzung der Arbeit	8
1.3	Hypothesen der Arbeit	9
1.4	Themenabgrenzung	9
1.5	Struktur der Arbeit	10
2	Grundlagen	12
2.1	Fußgängersimulationen	12
2.1.1	Grundlegende Modellierungsansätze	12
2.1.2	Arten von Multi-Agenten-Simulationen.....	13
2.1.3	Funktionsweise von Multi-Agenten-Simulationen.....	14
2.2	Validierung	16
2.2.1	Arten von Validierung	16
2.2.2	Probleme bei der Validierung von Multi-Agenten-Simulationen	18
3	Bewegungsmodelle am Beispiel von „MARS“	19
3.1	Überblick über das „MARS“-Framework.....	19
3.2	Wichtige Komponenten für Bewegungsmodelle	21
3.2.1	Layer für Simulationsmodelle	21
3.2.2	Generische Agenten.....	22
3.2.3	Versuchsumgebung.....	23
3.3	Umsetzung eines Bewegungsmodells.....	25
3.3.1	Wegfindung.....	26
3.3.2	Bewegungs- und Ausweichverhalten	28
3.3.3	Kollisionsvermeidung	29
3.3.4	Visualisierung	31
3.3.5	Logging	32
3.4	Weitere betrachtete Bewegungsmodelle.....	33
3.4.1	WALK	33
3.4.2	PedSim.....	35

4	Konzept zur objektiven Validierung.....	37
4.1	Anforderungen und Konzept.....	37
4.2	Vergleich mit makroskopischen Werten.....	39
4.2.1	Fundamentaldiagramme.....	40
4.2.2	Engstellendiagramme.....	41
4.2.3	Makroskopischer Vergleich mit komplexeren Szenarien.....	45
4.3	Visuelle Auswertung des Modellverhaltens	48
4.3.1	Allgemeines Bewegungsverhalten	48
4.3.2	Verhalten bei entgegengesetzten Bewegungsrichtungen in Gängen.....	49
4.3.3	Verhalten bei entgegengesetzten Bewegungsrichtungen an Engstellen.....	51
4.3.4	Verhalten bei Sackgassen.....	52
4.3.5	Mikroskopischer Vergleich mit komplexeren Szenarien.....	53
5	Entwurf von Versuchen zur Validierung	56
5.1	Vorgehen.....	56
5.2	Messungen und Berechnungen	59
5.3	Szenarien und Versuche.....	62
5.3.1	Versuche mit unterschiedlich hohen Agentendichten	62
5.3.2	Versuche mit unterschiedlich breiten Engstellen	67
5.3.3	Versuche mit unterschiedlicher Anzahl an Agenten vor einer Engstelle.....	71
5.3.4	Versuche mit sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten in Gängen....	73
5.3.5	Versuche mit sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten an Engstellen	75
5.3.6	Versuche mit Sackgassen	77
5.3.7	Versuche mit einem komplexeren Szenario	79
6	Analyse der Versuche durch Validierungssoftware	83
6.1	Vorteile der automatisierten Versuchsauswertung.....	83
6.2	Funktionen der Validierungssoftware.....	84
6.3	Erstellung der Diagramme mit der Validierungssoftware	85
6.4	Konverter für die SMDPC-Versuchsaufzeichnungen	87
6.5	Szenario-Player für die visuelle Auswertung	87
7	Auswertung der Versuchsergebnisse.....	88

7.1	Auswertung der Diagrammtypen.....	88
7.1.1	Fundamentaldiagramm (Agentendichte – Geschwindigkeit)	89
7.1.2	Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss)	106
7.1.3	Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss)	121
7.1.4	Komplexeres Szenario (Verlauf von Dichte und Geschwindigkeiten)	127
7.2	Betrachtung des Verhaltens der Agenten.....	138
7.2.1	Entgegengesetzte Bewegungsrichtungen in Gängen.....	138
7.2.2	Entgegengesetzte Bewegungsrichtungen an Engstellen	143
7.2.3	Sackgassen	148
7.2.4	Komplexeres Szenario	151
8	Schlussbetrachtung	160
8.1	Fazit zum Validierungskonzept	160
8.2	Folgerungen zur Validität der Bewegungsmodelle.....	162
8.3	Ausblick	165
	Inhalte der DVD-Anlage	166
	Literaturverzeichnis	167
	Tabellenverzeichnis	173
	Abbildungsverzeichnis	174

1 Einleitung

Dieses Kapitel beschreibt, warum die Validierung von Bewegungsmodellen so wichtig ist. Es zeigt die Probleme die es dabei gibt und erläutert, wie in dieser Arbeit trotz dieser Probleme ein objektives und aussagekräftiges Validierungskonzept erstellt werden soll. Hierfür werden die Ziele und Hypothesen der Arbeit vorgestellt.

1.1 Problem- und Themenbeschreibung

In der heutigen Zeit spielen Fußgängersimulationen eine immer größere Rolle. In der Form von Evakuierungssimulationen werden sie unter anderem dafür genutzt, um die Sicherheit von öffentlichen Plätzen, Bauten, Passagierschiffen und anderen Bereichen, bei der Evakuierung bewerten zu können (Meyer-König et al. 2009). Eine realistische Simulation einer Evakuierung erlaubt es noch in der Planungsphase Probleme erkennen zu können, wie in etwa Engstellen, die bei der Evakuierung zu gefährlichen Stauungen führen können. Auch andere Gefahrstellen, wie in etwa Bereiche, in denen es zu sehr hohen Personendichten kommen kann, was unter anderem zum Ausbruch von Panik führen kann, müssen erkannt werden können (Schadschneider et al. 2008). Mit einer realistischen Simulation lassen sich auch die für Evakuierungen sehr wichtigen Evakuierungszeiten korrekt vorhersagen (Pelechano und Malkawi 2008). Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Evakuierungssimulationen ist die nachträgliche Analyse des Hergangs bei einem Unglück, wie bei der Loveparade 2010 (Stadt Duisburg 2010). Durch so eine nachträgliche Analyse wird es ermöglicht, Rückschlüsse zu ziehen, um zu verhindern, dass es erneut zu einer solchen Situation kommen kann.

Um möglichst realistische Ergebnisse bei der Simulation zu erhalten, ist es nötig, die Menschen in der Simulation 1-zu-1 abbilden zu können. Dies ist mit Multi-Agenten-Simulationen möglich. Bei ihnen wird jeder Mensch durch einen Agenten simuliert, der individuelle Eigenschaften besitzen kann und selbstständig Entscheidungen treffen kann. Durch sie lassen sich in der Realität auftretende emergente Phänomene, die durch den Einfluss der Agenten aufeinander oder den Einfluss der Umgebung auf die Agenten entstehen, auch in Simulationen abbilden. Die Emergenz sorgt dafür, dass es sehr schwer ist, die Korrektheit des Modells zu überprüfen, auch wenn das Verhalten eines einzelnen Agenten bekannt ist. Diese Korrektheit ist jedoch nötig, um realistische Vorhersagen über das Verhalten von Personen in bestimmten Situationen treffen zu können (Pelechano et al. 2008).

Da die Korrektheit der Vorhersagen von Evakuierungssimulationen über Leben und Tod entscheiden kann, ist es also von größter Wichtigkeit, dass das zugrunde liegende Modell realistische Ergebnisse liefert. Hierfür ist eine Validierung des Bewegungsmodells nötig. Jedoch gibt es hierbei das Problem, dass nur eine geringe Menge an detaillierten Daten zur Verfügung steht, mit denen die Ergebnisse der Simulationen verglichen werden können (Zhou et al. 2010). Mit den wenigen zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten muss daher eine möglichst genaue und objektive Validierung durchgeführt werden können.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Aus der Problembeschreibung ergeben sich zwei Fragestellungen. Zum einen dreht sich diese Arbeit um die Frage, wie Fußgängersimulationen mit den vorhandenen Vergleichsdaten effizient auf eine objektive Weise validiert werden können. Hierfür ist es nötig, für die Validierung von Multi-Agenten-Simulationen sinnvoll nutzbare Vergleichsdaten auszusuchen und vorzustellen. Mit diesen Vergleichsdaten wird ein konkretes Validierungskonzept entwickelt. Dieses Konzept soll so objektiv wie möglich sein, damit aussagekräftige Schlüsse über die Validität von Bewegungsmodellen getroffen werden können. Ein weiterer Fokus liegt auf der Automatisierbarkeit der Validierung. Das Validierungskonzept soll größtenteils automatisiert angewendet werden können, damit Auswertungen vieler verschiedener Simulationsläufe keine Schwierigkeiten bereiten. Je mehr Simulationsläufe und Simulationsszenarien analysiert werden, desto verlässlicher ist das Ergebnis der Validierung. Mit dem Validierungskonzept soll sowohl das Verhalten der individuellen Agenten bewertet werden können, als auch das Modellverhalten, das sich durch das Zusammenspiel der Agenten und der Umwelt ergibt. Das Ziel ist es somit, ein Validierungskonzept zu erstellen, das von Modellierern eingesetzt werden kann, um die Validität ihres Modells zu überprüfen. Ein solches Konzept mit konkreten Versuchen, Messungen, Berechnungen, Vergleichen, das sich auch noch größtenteils automatisieren lässt, würde Modellierern die Validierung stark vereinfachen.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf die Bewegungsmodelle. Sie dreht sich um die Frage, welche Eigenschaften das Bewegungsmodell einer Multi-Agenten-Simulation haben sollte, damit sich valide Vorhersagen mit ihr treffen lassen. Zu diesem Zweck wird das erstellte Validierungskonzept auf verschiedene Bewegungsmodelle angewendet. Dadurch sollen die Stärken und Schwächen der Modelle zum Vorschein kommen, damit die Eigenschaften eines Modells, das valide Ergebnisse liefert, beschrieben werden können. In der Forschung zu Fußgängermodellen gibt es bisher unterschiedliche Ansätze zur Modellierung. Mit dieser Arbeit sollen also genauere Folgerungen über die verschiedenen Modellansätze ermöglicht werden. Es soll auch geklärt werden, wie groß der Einfluss von unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der Agenten, sowie eine Einteilung der Agenten in soziale Gruppen, auf den Ablauf der Simulationen ist. Hierdurch können dann

Rückschlüsse darüber getroffen werden, ob es nötig ist, solche Unterschiede und Einteilungen zu beachten.

Neben der Erstellung und Ausführung des Validierungskonzepts wird zusätzlich ein einfaches Bewegungsmodell erstellt. Dieses wird ebenfalls mit dem Validierungskonzept auf Validität überprüft. Dies ermöglicht weitere Rückschlüsse darüber, wie komplex ein Bewegungsmodell sein muss, um valide Ergebnisse zu liefern.

1.3 Hypothesen der Arbeit

Vor der Durchführung der Arbeit wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Eine Kombination von makroskopischen Kennwerten erlaubt eine aussagekräftige makroskopische Validierung.
2. Eine zusätzliche mikroskopische Validierung kann nötig sein, um unrealistisches Agentenverhalten trotz korrekter makroskopischer Ergebnisse zu erkennen.
3. Die Agenten müssen eine gewisse Agentenintelligenz besitzen, ansonsten ist kein realistisches Verhalten möglich.
4. Unterschiedliche maximale Agentengeschwindigkeiten haben einen negativen Einfluss auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und die Flussrate der Agenten durch Engstellen, da langsame Agenten schnellere Agenten behindern und Überholversuche zu weiteren Behinderungen führen.
5. Eine Einteilung der Agenten in soziale Gruppen führt zu einer weiteren Reduzierung der durchschnittlichen Geschwindigkeiten und Flussraten der Agenten durch Engstellen, da Gruppenmitglieder aufeinander warten und als Einheit laufen, wodurch sie andere Agenten blockieren.

1.4 Themenabgrenzung

Es ist nicht Ziel der Arbeit, die betrachteten Bewegungsmodelle so abzuändern, zu erweitern oder zu kalibrieren, dass sie alle Anforderungen des Validierungskonzepts erfüllen. Stattdessen werden die Probleme aufgezeigt und Vorschläge zur Verbesserung gegeben.

1.5 Struktur der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit wichtigen Grundlagen zu Fußgängersimulationen und Validierung, die für das Verständnis der Arbeit relevant sind. Zuerst werden verschiedene Modellierungsansätze für Fußgängersimulationen vorgestellt. Danach werden die Arten von Multi-Agenten-Simulationen beschrieben und die Funktionsweise von Multi-Agenten-Simulationen erläutert. Danach werden die verschiedenen Arten von Validierung betrachtet sowie die Probleme bei der Validierung von Multi-Agenten-Simulationen beschrieben.

Danach wird am Beispiel der Erstellung eines Bewegungsmodells mit dem „MARS“-Framework gezeigt, welche für Bewegungsmodelle relevanten Komponenten es in einem Simulationssystem für Multi-Agenten-Simulationen gibt. Die Umsetzung wichtiger Funktionen des Bewegungsmodells wird beschrieben. Es wird außerdem ein Überblick über die anderen in dieser Arbeit betrachteten Bewegungsmodelle und Simulationssysteme gegeben.

Im nächsten Kapitel werden das Validierungskonzept und seine Bestandteile beschrieben. Begonnen wird mit der Erläuterung der vom Konzept zu erfüllenden Anforderungen. Danach wird die Validierung mit makroskopischen Werten genauer betrachtet. Hierzu werden Fundamentaldiagramme, Engstellendiagramme und komplexere Experimente vorgestellt. Für die visuelle Auswertung werden erwartete Verhaltensweisen und emergente Phänomene beschrieben.

Anschließend wird das Validierungskonzept durch die Beschreibung des Vorgehens, von Messungen und Berechnungen konkretisiert. Es folgt eine genaue Definition von durchzuführenden Szenarien, sowie dem Aufbau und Ablauf zur Bestimmung der makroskopischen Werte.

Als nächstes erfolgt ein Überblick über die Programme, die für die Auswertung der Versuchsdaten verwendet wurden. Die Funktionen der einzelnen Programme werden genauer betrachtet. Ein besonderer Fokus liegt auf der Erstellung der für die Validierung genutzten Diagramme. Der Aufbau dieser Diagramme wird genauer erläutert.

Das nächste Kapitel dient der Validierung der Bewegungsmodelle mit dem Validierungskonzept. Hierzu werden zuerst die verschiedenen Diagramme der makroskopischen Werte für jedes der betrachteten Bewegungsmodelle ausgewertet. Danach findet die Anwendung der visuellen Auswertung des Agentenverhaltens statt.

Als letztes werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Es werden Rückschlüsse über die Validität der Bewegungsmodelle und die Eignung des Validierungskonzepts

gezogen. Danach wird ein Ausblick auf mögliche Verbesserungen und Erweiterungen des Validierungskonzepts und der Bewegungsmodelle gegeben.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel soll die grundlegenden Kenntnisse über Validierung und Multi-Agenten-Simulationen vermitteln, die für das Verständnis der Arbeit und ihrer Bedeutsamkeit nötig sind. Die Arbeit baut auf einer zuvor verfassten Bachelorarbeit auf (Woggan 2011). In dieser wurden tiefe Einblicke in die in der Literatur vertretenen Arten von Validierung und Validität gegeben. Der Fokus lag bei den Problemen bei der Validierung von Multi-Agenten-Simulationen und möglichen Techniken zur Durchführung dieser. Hierfür wurde auch eine genaue Betrachtung der in der Literatur beschriebenen verschiedenen Arten und technischen Umsetzungen von Gruppensimulationen durchgeführt. Letztendlich wurde ein Konzept zur Validierung von Multi-Agenten-Simulationen erstellt, welches Validierungsschritte für jede der Entwicklungsphasen eines solchen Modells bzw. Simulationssystems beschrieb. Dieses war jedoch relativ allgemein gehalten und stellte Modellierern, die ihr Modell validieren wollten, keine konkreten Tests oder Vergleiche zur Verfügung und es fand auch keine Ausführung des Validierungskonzepts an einem Beispiel statt. Die aktuelle Arbeit konkretisiert die Phase der operationellen Validierung, in der bereits ein ausführbares Bewegungsmodell zur Verfügung steht, welches validiert werden soll. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Konkretisierung dieser Phase der Validierung liegt, und in der vorherigen Arbeit bereits tiefe Einblicke zu Gruppensimulationen und Validierung gegeben wurden, wiederholt diese Arbeit nur die Grundlagen, welche für den Rest der Arbeit relevant sind.

2.1 Fußgängersimulationen

Fußgängersimulationen dienen der Simulation von einzelnen Fußgängern oder Fußgängerströmen. Sie werden vor allem für die Simulation von Evakuierungen eingesetzt. In diesem Bereich dienen sie vor allem der Bestimmung der Evakuierungsdauer von baulichen Anlagen oder Freiflächen, auf denen der ungehinderte Personenstrom beeinflusst wird und der Überprüfung der Konzeption und Leistungsfähigkeit von Flucht- und Rettungswegen. Hierbei wird vor allem versucht Bereiche ausfindig zu machen, in denen es zu starken Stauungen kommt (Meyer-König et al. 2009).

2.1.1 Grundlegende Modellierungsansätze

Es gibt zwei grundlegende Modellierungsansätze für die Modellierung von Fußgängersimulationen. Wird das Verhalten des einzelnen Fußgängers als unwichtig betrachtet, so kann ein makroskopischer Ansatz verfolgt werden. Soll jeder einzelne Fußgänger modelliert werden, weil das Verhalten einzelner Fußgänger und die Interaktionen zwischen den Fußgängern als wichtig angesehen werden, so muss ein mikroskopischer Modellierungsansatz verfolgt werden.

Für die Umsetzung makroskopischer Modelle gibt es viele verschiedene Ansätze. Die bekanntesten Ansätze sind Regressionsmodelle, Routenwahlmodelle, Warteschlangenmodelle und kinetische Gas-Modelle. Die Gemeinsamkeit der makroskopischen Modelle liegt jeweils darin, dass nicht die einzelnen Fußgänger simuliert werden, sondern die gesamte Masse an Fußgängern. Statt die Bewegungen der Individuen zu simulieren, werden die Fußgängerströme simuliert. Der Fluss der Fußgänger ist dabei von der zugrunde liegenden Architektur abhängig. Hierfür wird die Masse an Fußgängern z.B. als Flüssigkeit oder Gas simuliert, das sich den Weg durch die Architektur bahnt (Pelechano und Malkawi 2008).

Mikroskopische Modelle betrachten hingegen jeden Fußgänger als Individuum. Dieser Ansatz folgt der Annahme, dass die Entscheidungen, Bewegungen und Interaktionen einzelner Fußgänger entscheidende Einflüsse auf den Ablauf der Simulation haben. Mikroskopische Modelle bilden jedes Individuum, welches simuliert werden soll, als einen Agenten ab. Ein Agent ist eine Einheit, welche selbständig Entscheidungen treffen kann und aufgrund dieser Entscheidungen Handlungen durchführen kann. Er kann auf diese Weise mit der Umwelt oder anderen Agenten interagieren. Für Modellierer ist der agentenbasierte Ansatz besonders gut geeignet, da sich durch die Analogie zwischen den Agenten und den aktiven Elementen des Referenzsystems eine intuitive Struktur des Modells ergibt. Der agentenbasierte Ansatz erlaubt es außerdem, Modelle in einem Detailgrad zu formulieren und zu behandeln, in dem dies ohne diesen Ansatz nicht möglich wäre (Klügl 2008).

2.1.2 Arten von Multi-Agenten-Simulationen

Multi-Agenten-Simulationen lassen sich auf verschiedene Weisen technisch umsetzen. Bekannte Möglichkeiten zur Umsetzung umfassen Modelle auf Basis von sozialen Kräften, regelbasierte Modelle und zelluläre Automaten. Am weitesten verbreitet sind Modelle auf Basis sozialer Kräfte und zelluläre Automaten (Pelechano und Malkawi 2008).

In Modellen, die auf sozialen Kräften beruhen, ist die Bewegung eines Agenten in einem Raum von einem Mix aus sozio-psychologischen und physischen Kräften abhängig. Die Agenten wollen sich mit einer gewünschten Geschwindigkeit in eine bestimmte Richtung bewegen und passen ihre momentane Geschwindigkeit in einem bestimmten Intervall an. Außerdem versuchen die Agenten eine gewisse Distanz von anderen Agenten und Wänden zu halten. In dieser Arbeit wird das Simulationssystem „PedSim“, welches auf Basis von sozialen Kräften arbeitet, mit dem Validierungskonzept überprüft.

In regelbasierten Modellen findet die Bewegung der Agenten nicht auf Basis von anziehenden oder abstoßenden Kräften statt, sondern der Agent trifft auf Basis von Regeln

Entscheidungen, die seine Bewegung beeinflussen. Ein solches Modell lässt sich gut erweitern, da dem Agenten neue Regeln beigebracht werden können, aufgrund derer er seine Bewegungen anpasst. In dieser Arbeit werden zwei Simulationssysteme bzw. drei Bewegungsmodelle mit dem Validierungskonzept überprüft, die diesem Ansatz folgen. Das „WALK“-Simulationssystem besitzt zwei solcher regelbasierter Bewegungsmodelle. Das Fußgängermodell von „MARS LIFE“ ist ebenfalls regelbasiert. Sie teilen die Gemeinsamkeit, dass die Agenten zuerst einen Bewegungsvektor wählen, der dann mit den unterschiedlichen ihnen bekannten Regeln abgeändert wird. Dies dient unter anderem der Kollisionsvermeidung.

Das bekannteste Modell regelbasierte Modell ist das Boids-Modell von Reynolds, bei dem es sich um ein Partikelsystem mit den Boids genannten Entitäten handelt, die die Partikel darstellen (Reynolds 1987). Jeder Agent ist unabhängig und navigiert abhängig von seiner lokalen Wahrnehmung der dynamischen Umgebung sowie der physikalischen Gesetze, die seine Bewegung einschränken und einer Menge an Verhaltensweisen, die der Modellierer bestimmen kann. Dabei hält er sich an drei Regeln. Die erste Regel besagt, dass ein Agent so zu steuern hat, dass er bei seinen lokalen Nachbarn kein Gedränge auslöst. Die zweite Regel besagt, dass der Agent in die durchschnittliche Richtung der lokalen Nachbarn steuern soll. Die letzte Regel besagt schließlich, dass der Agent zur durchschnittlichen Position der lokalen Nachbarn steuern soll.

Das Modell der zellulären Automaten, teilt den Raum in ein Gitter aus einheitlichen Zellen auf. Eine Zelle ist entweder frei oder besetzt und fasst nur einen Agenten. Jeder Agent befindet sich in einer bestimmten Zelle und bewegt sich von einer Zelle zur nächsten. Dies passiert in diskreten Zeitschritten. Der Wert einer Zelle ist von den Werten seiner Nachbarzellen abhängig. Die Werte der Zellen werden jeweils gleichzeitig aktualisiert und hängen von den Werten der Nachbarzellen im vorherigen Zeitschritt sowie von einer Menge lokaler Regeln ab.

2.1.3 Funktionsweise von Multi-Agenten-Simulationen

Ein Multi-Agenten-System ist ein System, in dem mehrere Agenten miteinander interagieren (Wooldridge 2002). Ein Agent wird dabei als eine Entität definiert, welche selbständig Aktionen in einer Umgebung ausführen kann, um ein vordefiniertes Ziel zu erreichen. Die Komplexität der Agenten bzw. der künstlichen Agentenintelligenz und ihrer Umgebung kann dabei beliebig hoch oder gering sein. Dieses Konzept findet im Bereich der Modellierung von Fußgängersimulationen immer größere Beachtung (Zhou et al. 2010). Es erlaubt eine sehr detaillierte Modellierung des Referenzsystems, stellt jedoch auch abhängig von der Anzahl und der Komplexität der Agenten sehr hohe Anforderungen an die Hardware, auf der die Simulation ausgeführt wird.

Multi-Agenten-Simulationen laufen in Simulationsschritten ab, sogenannten „Ticks“. Der Zustand der Simulation wird während eines „Ticks“ aktualisiert. Die Länge eines „Ticks“ kann abhängig vom Referenzsystem gewählt werden. Ist es nötig, eine sehr feinstufige Simulation durchzuführen, so muss die Zeitdauer eines „Ticks“ dementsprechend gering gewählt werden. Für eine Fußgängersimulation sollte z.B. die Dauer eines „Ticks“ im Bereich von mehreren Millisekunden gewählt werden, damit es nicht möglich ist, dass sich Fußgänger während eines Simulationsschritts durch anderen Fußgänger hindurchbewegen, ohne dass dies vom Modell wahrgenommen wird. In so einem Fall würde keine Kollision registriert werden und das Verhalten der Fußgänger wäre nicht ausreichend realistisch.

Für jeden „Tick“ bzw. Simulationsschritt führt jeder Agent drei Phasen aus:

1. **„Sense“**: Während dieser Phase nimmt der Agent seine Umwelt wahr. Was der Agent wahrnimmt und was vom Agenten nicht wahrgenommen wird, muss vom Modellierer festgelegt werden. Wird z.B. das Sehen des Agenten zur Wahrnehmung der Umwelt simuliert, so könnte die Wahrnehmung des Agenten auf seinen Sichtbereich beschränkt werden. Auch fehlerhafte Wahrnehmungen können modelliert werden. Bei einer Fußgängersimulation werden in der Wahrnehmungsphase vor allem die anderen Agenten und Hindernisse wahrgenommen. Die wahrgenommenen Informationen speichert der Agent in seinem Gedächtnis, in dem er auch Informationen aus früheren „Sense“-Phasen aufbewahren kann.
2. **„Reason“**: Während dieser Phase trifft der Agent auf Grundlage seines Wissens Entscheidungen. Er bestimmt Ziele und Handlungspläne, mit deren Hilfe er diese Ziele erreichen möchte. Ein Agent in einer Fußgängersimulation könnte z.B. Wegpunkte auf dem Weg zu seinem Ziel berechnen und die Position bestimmen, an der er sich zum nächsten Simulationsschritt befinden möchte. Eine Möglichkeit zur Entscheidungsfindung ist das „Goal-Oriented Action Planning“ (GOAP), welches eine Planungsarchitektur darstellt und unter anderem in Computerspielen Anwendung gefunden hat (Orkin 2006).
3. **„Act“**: Während der Ausführungsphase wählt der Agent die nächste auszuführende Aktion aus seinem Handlungsplan und führt sie in der Umgebung aus. Bei einer Fußgängersimulation würde dies z.B. der Bewegung zu seiner neuen Position entsprechen. Was der Agent machen kann, kann jedoch von der Umwelt beschränkt werden. Wählt er eine Position, die bereits von einem anderen Agenten belegt ist, so kann die Umwelt verhindern, dass der Agent seine Aktion ausführt.

2.2 Validierung

Das Validieren von Modellen dient dazu, zu zeigen, dass sich das Modell in seinem Anwendungsbereich in Bezug auf die festgelegten Ziele des Modells und der Simulation mit zufriedenstellender Genauigkeit verhält. Daraus folgt, dass sich die Validierung von Modellen damit beschäftigt, das richtige Modell zu bauen. Ein ähnlicher Begriff, der nicht mit der Validierung verwechselt werden darf, ist die Verifizierung. Bei dieser geht es darum, dass das Modell richtig gebaut wird, also keine Fehler bei der Implementierung des Modells begangen wurden (Balci 1997).

Ein Modell muss nicht sein Referenzsystem möglichst genau abbilden, damit es valide Ergebnisse liefert. Es muss nur so weit dem Referenzsystem entsprechen, das es dazu in der Lage ist die für die Simulationsstudie geforderten Ziele zu erreichen, also z.B. Vorhersagen zu treffen (Zeigler et al. 2000).

2.2.1 Arten von Validierung

In der Literatur lassen sich viele verschiedene Arten der Validierung und Validität finden. Die Art der Validierung ist hierbei davon abhängig, auf welche Weise die Validierung ausgeführt wird oder in welcher Phase sie durchgeführt wird (Klügl 2008). Bei einer Einteilung der Entwicklung von Simulationsmodellen in Validierungsphasen wird zwischen der konzeptuellen Modellvalidierung und der operationellen Validierung unterschieden (Sargent 2008).

Bei der konzeptuellen Modellvalidierung wird ermittelt, ob die Theorien und Annahmen, die dem konzeptuellen Modell zugrunde liegen, korrekt sind und ob die Darstellung der Problementität für den geplanten Zweck des Modells geeignet ist. Zur Überprüfung, ob diese Theorien und Annahmen korrekt sind, werden mathematische Analysen und statistische Methoden auf Daten der Problementität angewendet. Des Weiteren muss überprüft werden, ob die Theorien korrekt angewandt wurden. Auch jedes Teilmodell und das Gesamtmodell muss evaluiert werden, um zu bestimmen, ob es für den geplanten Einsatzzweck des Modells sinnvoll und korrekt ist. Hierzu gehört, ob mit angemessenem Detail gearbeitet wurde und ob geeignete Strukturen, Logik und mathematische und kausale Zusammenhänge benutzt wurden.

Die operationelle Validierung wird als das Ermitteln, dass das Ausgabeverhalten des Modells ausreichende Genauigkeit für den geplanten Zweck des Modells besitzt, definiert. Bei dieser Art der Validierung wird das ausführbare Modell benutzt. Alle gefundenen Mängel können aus jeder Phase der Modellentwicklung stammen, zum Beispiel aus der Entwicklung der Systemtheorien und aus nicht validen Daten. Wie die Validierung im Betrieb durchgeführt wird, hängt davon ab, ob die Problementität oder das Referenzsystem

beobachtbar sind. Ein System ist beobachtbar, wenn es möglich ist, Daten über das Verhalten der Problementität zu sammeln. Ist das Referenzsystem beobachtbar, so kann das Ausgabeverhalten des Modells mit dem Ausgabeverhalten des Referenzsystems verglichen werden, ansonsten ist nur ein Vergleich mit anderen validen Modellen möglich. Der Vergleich mit dem Referenzsystem kann über grafische Darstellungen erfolgen wie Histogramme, Boxplots oder Streudiagramme. Bei beobachtbaren und unbeobachtbaren Referenzsystemen sind jeweils auch Vergleiche mit dem Referenzsystem beziehungsweise anderen validen Modellen unter Zuhilfenahme von statistischen Tests möglich. Außerdem ist es bei beiden Varianten möglich, das Ausgabeverhalten des Modells mit geeigneten Validierungstechniken zu untersuchen.

Wird die Validierung in Art und Weise eingeteilt, auf die validiert wird, so kann zwischen Face Validation, empirischer Validierung und Verhaltensvalidierung unterschieden werden (Klügl 2008). Face Validation umfasst alle Methoden der Validierung, die sich auf die natürliche Intelligenz des Menschen stützen. Die Simulation wird von Menschen auf unterschiedliche Art und Weise betrachtet, so dass diese mit Hilfe ihres theoretischen und impliziten Wissens die Prozesse und Ergebnisse auf Sinnhaftigkeit und Plausibilität überprüfen können. Sie wird auch Plausibilitätsprüfung genannt.

In der empirischen Validierung werden mit statistischen Messungen und Tests die Kennzahlen, die vom Modell produziert wurden, mit denen des Referenzsystems verglichen. Verhaltensvalidierung überprüft, ob das Eingabe- und Ausgabe-Verhalten des Modells mit dem des Referenzsystems übereinstimmt, während die strukturelle Validierung die Validität der internen Struktur des Modells, wie kausale Beziehungen zwischen Variablen oder das logische Denken der Agenten, mit der des Referenzsystems vergleicht.

Da das in dieser Arbeit erstellte Validierungskonzept auf bereits lauffähige Simulationssysteme und Bewegungsmodelle angewandt wird, handelt es sich bei der durchgeführten Validierung um operationelle Validierung. Der erste Teil des Konzepts vergleicht mit den Modellen erlangte Kennzahlen mit Kennzahlen aus dem Referenzsystem. Es handelt sich also um empirische Validierung. Die weiteren Validierungsschritte des Konzepts stellen sowohl Face Validation als auch Verhaltensvalidierung dar. Die Vergleiche finden zwar durch das Betrachten von Simulationsläufen statt, es finden aber auch konkrete Vergleiche mit dem in der Realität in identischen Situationen zu beobachtenden Verhalten statt.

2.2.2 Probleme bei der Validierung von Multi-Agenten-Simulationen

Das Hauptproblem bei der Validierung von Multi-Agenten-Simulationen liegt in der Validierung des Verhaltens einzelner Agenten. Um eine empirische Validierung durchzuführen, müssen charakteristische Kennzahlen gefunden werden, die das System beschreiben. Für das Gesamtsystem lassen sich diese Kennzahlen oft finden. Das Verhalten einzelner Agenten lässt sich jedoch nur schwer auf allgemeine und aussagekräftige Weise mit Kennzahlen beschreiben. Vor allem die Validierung der Bewegungen der Agenten ist schwer. Dies liegt vor allem daran, dass Daten zu Zeitabläufen kaum vorhanden sind. Somit muss oft der resultierende Zustand der Simulation mit dem Zustand im Referenzsystem verglichen werden (Klügl 2008).

Diese Arbeit versucht dieses Problem für Fußgängersimulationen zu lösen. Zum einen wurden Kennzahlen und Vergleiche für die empirische Validierung ausgewählt, die auch Aussagen über das Verhalten der Agenten erlauben. Somit werden sehr viel genauere Einblicke in das Modellverhalten ermöglicht, als z.B. bei einer einfachen Betrachtung der Evakuierungszeit. Außerdem werden konkrete Versuche simuliert, für die Zeitabläufe, d.h. Bewegungsdaten, zur Verfügung stehen. Dies erlaubt genaue Vergleiche des Verhaltens der Agenten mit dem Verhalten der realen Fußgänger.

3 Bewegungsmodelle am Beispiel von „MARS“

Dieses Kapitel zeigt am Beispiel der Erstellung eines Bewegungsmodells mit dem „MARS“-Framework, welche für Bewegungsmodelle relevanten Komponenten es in einem Simulationssystem für Multi-Agenten-Simulationen gibt. Die Umsetzung wichtiger Funktionen des Bewegungsmodells wird beschrieben. Es wird außerdem ein Überblick über die anderen in dieser Arbeit betrachteten Bewegungsmodelle und Simulationssysteme gegeben.

3.1 Überblick über das „MARS“-Framework

„MARS“ (Multi Agent Research and Simulation) ist ein Framework für die Erstellung und Durchführung von Multi-Agenten-Simulationen, das von der „MARS Group“ an der HAW Hamburg unter der Leitung von Prof. Dr. Thomas Thiel-Clemen entwickelt wird (Hüning et al. 2014). Es handelt sich dabei nicht um ein einzelnes Programm, sondern um eine Sammlung von Programmen und Komponenten, die den Anwendern die Schritte vom Hinzufügen von simulationsrelevanten Daten bis zur Durchführung der Simulation ermöglicht.

Zu Beginn der Entwicklung des „MARS“-Frameworks wurden die Probleme von anderen Simulationssystemen untersucht und daraufhin die Anforderungen für eine Multi-Agenten-Simulation der nächsten Generation definiert. Ein solches System sollte ein skalierbares, generisches und performantes Framework für Multi-Agenten-Simulationen darstellen. Ein derartiges Framework fehlt bisher in der Forschung. Das Ziel der „MARS-Group“ ist es somit, diese Lücke zu füllen.

Die folgenden Anforderungen haben sich als die wichtigsten Anforderungen herausgestellt:

- **Skalierbarkeit des Simulationssystems:** Ein generisches Simulationssystem sollte in der Lage sein, auch in großen Szenarien jede zu simulierende Entität durch einen Agenten im System darstellen zu können. In manchen Fällen könnte es dadurch notwendig sein, Millionen Agenten simulieren zu können. Auch können die einzelnen Agenten sehr aufwendige Berechnungen durchführen, wie etwa Wegfindung und Kollisionsvermeidung, wodurch schon die Simulation einer geringen Anzahl an Agenten sehr rechenintensiv sein kann. In solchen Fällen ist die Simulation des Modells auf einem einzigen Computer nicht mehr in annehmbarer Zeit durchführbar, sondern eine Verteilung der Simulation auf mehrere Computer

wird notwendig. Hierbei ist es wichtig, dass das System eine gute Skalierbarkeit besitzt und die Zunahme der Simulationsgeschwindigkeit möglichst gleichmäßig mit der Anzahl an Computern zunimmt.

- **Integration von Daten:** Das Simulationssystem muss beliebige Daten und Modelle miteinander verknüpfen können. Hierbei gibt es das Problem, dass es große Unterschiede in der Darstellung der Daten, in vielen Fällen Messdaten, geben kann. Diese können sich in den temporalen und spatialen Auflösungen unterscheiden, unterschiedliche Einheiten und Formate benutzen oder Messungenauigkeiten und das Fehlen von Daten unterschiedlich behandeln. In allen diesen Fällen muss dafür gesorgt werden, dass die Daten so in eine generische Form transformiert werden und anschließend gespeichert werden, dass sie für verschiedene Modelle genutzt werden können. Zusätzlich muss der Import von Geodaten in ein Geoinformationssystem (GIS) ermöglicht werden, da diese für räumlich verknüpfte Simulationen von hoher Relevanz sind.
- **Modularität und Wiederverwendbarkeit der Modelle:** Die Modelle des Simulationssystems sollten so umgesetzt werden, dass eine Verknüpfung dieser Modelle zu einem umfassenderen Modell möglich ist. Die Simulation des Lebensraums von Tieren könnte unter anderem dadurch verbessert werden, dass das Verhaltensmodell der Tiere mit einem Vegetationsmodell für die Pflanzenwelt und einem Wettermodell verknüpft wird. Hierdurch könnten sich genauere Simulationsergebnisse erlangen lassen oder neue Erkenntnisse aus dem Zusammenspiel zwischen den Modellen feststellen lassen.
- **Benutzerfreundlichkeit der Werkzeuge:** Da ein Simulationssystem zumeist von Fachexperten aus dem jeweiligen zu simulierenden Forschungsbereich benutzt werden soll, müssen alle Werkzeuge so einfach zu benutzen sein, wie es nur möglich ist. Hierfür muss stark von der technischen Repräsentation des Modells und der Daten abstrahiert werden, so dass es dem Fachexperten möglich ist, die Fragestellung des Modells umzusetzen, ohne tief in den Aufbau oder die Funktionsweise des Systems eindringen zu müssen.
- **Geeignete und performante Visualisierung:** Zusätzlich zur Berechnung der Simulationsschritte sollte das Simulationssystem eine für das jeweilige Simulationsmodell geeignete Visualisierung anbieten. Diese sollte sowohl 2D- als auch 3D-Darstellungen und Räume unterstützen. Es ist von besonders großer Wichtigkeit, dass die Visualisierung genauso wie das Simulationssystem dazu in der Lage ist, mit einer großen Anzahl an Agenten zurechtzukommen. Um dies zu erreichen, muss es möglich sein, die Visualisierung nur auf spezifische Bereiche

festlegen zu können. Gibt es verschiedene Informationsebenen, so sollten sich diese auf verschiedenen Simulations- und Visualisierungsebenen befinden, so dass bei der Visualisierung bestimmte Informationen ausgeblendet werden können, die zum Zeitpunkt der Betrachtung der Visualisierung nicht von Relevanz sind oder zu große Nachteile bei der Visualisierungsgeschwindigkeit bedeuten.

Entsprechend der verschiedenen Anwendungsschritte des „MARS“-Frameworks existiert eine Aufteilung der Werkzeuge. Die Datenintegration ist Aufgabe von „MARS GROUND“, „MARS ROCK“ und „MARS SHUTTLE“. „MARS GROUND“ ist für das Speichern und Vereinheitlichen von Geodaten zuständig, „MARS ROCK“ kümmert sich um Daten, die keine spatialen Abhängigkeiten haben oder kein kompatibles GIS-Format besitzen. „MARS SHUTTLE“ wiederum ist für den Zugriff auf die Daten und das Zwischenspeichern dieser Daten zuständig. Die Multi-Agenten-Simulation selber besitzt den Namen „MARS LIFE“, welche durch „MARS VIEW“ und „MARS SURVEYOR“ visualisiert und analysiert werden kann.

3.2 Wichtige Komponenten für Bewegungsmodelle

Im Folgenden liegt der Fokus auf „MARS LIFE“ und den Komponenten dieses Programms, welche bei der Modellierung eines Bewegungsmodells von Relevanz sind. Das Bewegungsmodell nutzt keine GIS-Daten, da der Ort der modellierten Räume keine Bedeutung besitzt. Es benötigt auch keinen Zugriff auf andere Daten, wodurch „MARS GROUND“, „MARS ROCK“ und „MARS SHUTTLE“ in diesem Fall nicht benötigt werden. Für die Visualisierung ist die Nutzung von „MARS VIEW“ möglich.

3.2.1 Layer für Simulationsmodelle

„MARS LIFE“ nutzt ein Konzept, bei dem die Agenten auf verschiedenen Ebenen verteilt werden. Eine solche Ebene wird als Layer bezeichnet. Dieses Konzept stammt von der Zusammensetzung von GIS-Dateien, bei denen ein Layer jeweils einen spezifischen Aspekt der abgebildeten Welt darstellt. Entsprechend hierzu beschreibt ein Layer in „MARS LIFE“ jeweils einen Aspekt des Modells. Die Aufteilung ist dabei dem Modellierer überlassen. Eine Kommunikation der Agenten der verschiedenen Layer ist über die Definition von weiteren Methoden möglich. Hierbei sollte der Modellierer aber darauf achten, dass es sinnvoll sein kann, verschiedenen Agenten auf dem gleichen Layer laufen zu lassen, wenn ansonsten ein zu großer Kommunikationsaufwand zwischen den Layern nötig wäre.

Dem Modellierer werden verschiedene Layer-Interfaces angeboten, die dieser für sein Modell umsetzen kann. Jeder Layer muss jeweils eine „Tick“-Methode haben. Wann diese aufgerufen wird, ist dabei vom jeweiligen Layer-Interface abhängig. Die „Tick“-Methode eines „ISteppedLayer“ wird für jeden Simulationsschritt aufgerufen, bei einem

„IEventDrivenLayer“ wird die „Tick“-Methode nur beim Auftreten von festgelegten Ereignissen ausgeführt. Als Erweiterung des „ISteppedLayer“-Interfaces gibt es zusätzlich das „ISteppedActiveLayer“-Interface, welches eine „PreTick“- und „PostTick“-Methode definiert, die vor bzw. nach der „Tick“-Methode aufgerufen werden.

Was genau in den „Tick“-Methoden der Layer passieren soll, ist dem Modellierer überlassen. Normalerweise aber sollte der Layer in diesen Methoden unter anderem die jeweilige „Tick“-Methode seiner Agenten aufrufen. Mögliche Nutzungsszenarien für die „PreTick“- und „PostTick“-Methoden stellen unter anderem die Visualisierung der Simulation und das Aufzeichnen der Ergebnisse dar.

3.2.2 Generische Agenten

Ein Agent in „MARS LIFE“ ist dadurch definiert, dass er eine eindeutige Kennung und eine „Tick“-Methode besitzt. Hierfür muss das „IAgent“-Interface implementiert werden. Der Modellierer kann sich mithilfe dieses Interfaces seine Agenten komplett selbst schreiben, es gibt in „MARS LIFE“ allerdings auch eine einfachere Möglichkeit für die Erstellung von Agenten, die in den meisten Fällen ausreichend sein sollte.

Die generischen Agenten, in „MARS LIFE“ auch als „Dalski Agents“ bekannt, stellen abstrakte Klassen zur Verfügung, die das „IAgent“-Interface implementieren. Der Modellierer kann diese Klassen erweitern und muss nur noch konkrete Implementierungen einiger Methoden schreiben. Die abstrakte „Agent“-Klasse stellt den allgemeinsten generischen Agenten dar. Ein solcher Agent kann Informationen wahrnehmen, daraufhin Entscheidungen treffen und diese anschließend ausführen.

Dementsprechend muss der Modellierer die „Sense“- und „Reason“-Methode nach seinen eigenen Wünschen implementieren, welche später bei der Simulationsausführung vom System nacheinander aufgerufen werden. Die „Reason“-Methode liefert ein Objekt der „Interaction“-Klasse als Rückgabe, welches nur dadurch definiert ist, dass es eine „Execute“-Methode besitzt. Nachdem das „Reasoning“ des Agenten abgeschlossen ist, wird vom System automatisch diese „Execute“-Methode ausgeführt.

Um das Hinzufügen der Agenten zur Simulation muss sich der Modellierer nicht kümmern, dies passiert automatisch, nachdem der Modellierer den Konstruktor der Agenten aufgerufen hat und in diesem einen bestimmten Layer spezifiziert hat. Das Entfernen der Agenten passiert über einen einfachen Aufruf der Remove-Methode. In beiden Fällen muss der Modellierer also keine konkreten Vorstellungen über den Aufbau von „MARS LIFE“ besitzen, da die eigentlichen Vorgänge vor ihm versteckt bleiben.

Zusätzlich zum einfachen generischen Agenten gibt es eine speziellere Variante der Agenten, den „SpatialAgent“. Dieser erweitert die „Agent“-Klasse um ein „ISpatialEntity“-

Objekt, das den Körper des Agenten beschreibt. Der Agent hat dadurch eine Form, Ausmaße, eine Position und eine Ausrichtung. Zusätzlich dazu besitzt er einen „AgentMover“, dieser ist für das Ausführen von Bewegungen („MovementAction“) des Agenten in der Umwelt zuständig. Unterschiedliche „AgentMover“-Erweiterungen erlauben es dem Modellierer, zu entscheiden, ob er die Position und die Ausrichtung des Agenten für den nächsten Schritt selbst setzen möchte („DirectMover“, der „DirectMovementActions“ ausführt) oder ob er das System diese neue Position und Ausrichtung aus einer Bewegungs- und Rotationsgeschwindigkeit berechnen lassen möchte.

Die Nutzung der generischen Agenten bietet dem Modellierer also eine große Abstraktion von den technischen Abläufen und dem Aufbau von „MARS LIFE“, da er nur noch eine Agentenhülle mit seinem eigenen Code füllen muss. Ein minimaler Agent auf Basis der generischen Agenten muss nur zwei Methoden umsetzen, „Sense“ und „Reason“, und ist danach schon in „MARS LIFE“ ausführbar. In der „Sense“-Methode würde der Agent Informationen aus der Umwelt beziehen und in der „Reason“-Methode auf Basis dieser Informationen Entscheidungen treffen.

3.2.3 Versuchsumgebung

Die „EnvironmentServiceComponent“-Klasse (ESC) stellt eine Implementierung der „IEnvironment“-Schnittstelle dar. Es handelt sich bei ihr um die dreidimensionale Umwelt, in der der physische Teil der Agenten, „ISpatialEntity“, eine Position und Ausrichtung besitzt, während sich der Agent selbst auf einem Layer befindet. Die Besonderheit der ESC ist hierbei, dass sie verhindert, dass es zu Überschneidungen zwischen den Körpern der Agenten kommen kann. Wird ein neuer Agent zur ESC hinzugefügt oder ein vorhandener Agent in der ESC bewegt, so findet vor der Durchführung dieser Aktion eine Kollisionserkennung statt und die Aktion wird nur durchgeführt, wenn diese nicht zu Kollisionen führt. Bei der Kollisionserkennung werden verschiedene Kollisionstypen berücksichtigt. Es kann unter anderem Objekte der „ISpatialEntity“-Klasse geben, die mit keinen anderen Objekten kollidieren können und sich somit überall in der Umwelt aufhalten dürfen, oder Objekte, die nur mit Objekten eines speziellen anderen Kollisionstyps kollidieren können.

Die „Add“-Methode erlaubt dem Modellierer das Hinzufügen des physischen Teils der Agenten mit einer bestimmten Ausrichtung an einer bestimmten Position oder an einer zufälligen Position aus einem spezifizierten Zielbereich. Das Entfernen der Agenten aus der Umwelt erfolgt über die „Remove“-Methode. Mit Hilfe der „Move“-Methode kann eine „ISpatialEntity“ mit einem Bewegungsvektor und einer Ausrichtung in der Umwelt bewegt werden. Eine weitere Möglichkeit der ESC ist die Änderung der „ISpatialEntity“ über die „Resize“-Methode. Mit ihr können die Form des Agenten und seine Ausmaße angepasst werden. Diese Methoden werden jedoch alle bereits vom generischen Agenten gekapselt,

wodurch der Modellierer sie nur benutzen muss, wenn er eine eigene Agentenimplementierung erstellt, die nicht die generischen Agenten als Grundlage benutzt.

Für jeden Modellierer von großer Relevanz sind die „Explore“- und „ExploreAll“-Methoden. Beide Methoden erlauben die Abfrage der sich in der Umwelt befindenden Objekte der „ISpatialEntity“-Klasse. Diese Abfragen sind vor allem für die „Sensing“-Phase der Agenten wichtig, da sie es dem Agenten erlauben, andere sich in seiner Umgebung befindliche physische Objekte bzw. Agenten wahrzunehmen. „ExploreAll“ gibt alle sich in der Umwelt befindenden Objekte der „ISpatialEntity“-Klasse unabhängig von ihrem Kollisionstyp zurück. „Explore“ erlaubt es hingegen, alle Kollisionen mit einem Objekt der „ISpatialEntity“-Klasse zu bekommen. Hierdurch lässt sich die Abfrage in ihrem Bereich einschränken und durch die Wahl von „ISpatialEntity“-Objekten mit bestimmten Kollisionstypen lässt sich zusätzlich bestimmen, welche Objekte man in diesem Bereich berücksichtigen möchte. Sollen alle „ISpatialEntity“-Objekte, die sich in einem bestimmten Bereich befinden, zurückgegeben werden, so kann ein Objekt der Klasse „ExploreEntity“ benutzt werden, dessen Kollisionstyp mit allen Kollisionstypen der „ISpatialEntity“-Klassen kollidiert.

Eine eigene Implementierung von Methoden ist bei der Nutzung der ESC nicht von Nöten. Dem Modellierer werden alle Methoden, die eine Umwelt in „MARS LIFE“ unterstützen muss, zur Verfügung gestellt.

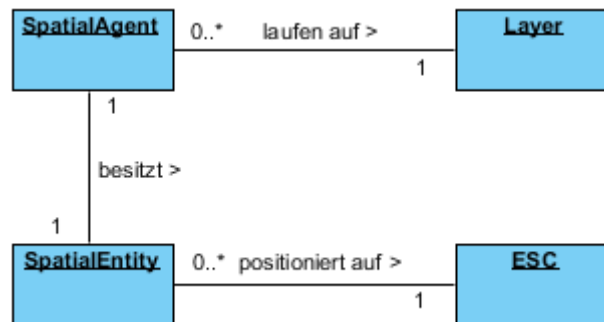


Abbildung 1 - Die Beziehungen zwischen den für Modellierer von Bewegungsmodellen wichtigen Klassen

3.3 Umsetzung eines Bewegungsmodells

Im Zuge dieser Arbeit wurden Versuche mit Bewegungsmodellen verschiedener Simulationen durchgeführt. Da es sich bei „MARS LIFE“ um das aktuelle Simulationssystem der MAS-Forschungsgruppe an der HAW Hamburg handelt, sollte dieses ebenfalls genutzt und validiert werden. Hierfür musste jedoch zuerst ein Bewegungsmodell für Fußgänger implementiert werden, welches noch nicht vorhanden war. Als Ausgangsbasis hierfür wurden die Erkenntnisse aus der Umsetzung des Fußgängermodells, bzw. der Fußgängeragenten, in der „WALK“-Simulation, die zuvor an der HAW Hamburg entwickelt wurde, genutzt. Die „WALK“-Simulation ist das Vorgängerprojekt von „MARS LIFE“, beschränkt sich jedoch nur auf Fußgängersimulationen und bietet keine generische Simulationsumgebung.

Die „WALK“-Simulation bietet zwei sich leicht unterscheidende Implementierungen der Agentenintelligenz an. Die einfachste Implementierung sind die „EGOAPAgents“ (Thiel 2011a, Thiel 2013), welche zuerst einen Weg zu ihrem Ziel bestimmen, und sich dann zu diesem hinbewegen. Dabei zeigen sie ein Ausweichverhalten, indem sie von Hindernissen und anderen Agenten abgestoßen werden. Die „ModularAgents“ (Münchow 2013) basieren auf dem gleichen Prinzip, besitzen jedoch noch weitere Regeln in der Entscheidungsfindung der Agenten, die unter anderem dafür sorgen, dass Agenten ihre Geschwindigkeiten reduzieren, wenn sie von anderen Agenten umgeben sind, oder dass sich Agenten als Gruppen fortbewegen und Anführern folgen.

Die Agentenimplementierungen der „WALK“-Simulation konnten nicht ohne große Änderungen für „MARS LIFE“ verwendet werden. Zum einen wurde die „WALK“-Simulation in Java geschrieben, wohingegen „MARS LIFE“ mit C# umgesetzt wurde. Zum anderen besitzen die Programme eine unterschiedliche Architektur und gehen auch anders mit den Agenten in der Simulation um. In „MARS LIFE“ sind die Agenten komplett selbstständig, ihre „Tick“-Methode wird ein Mal pro Simulationsschritt aufgerufen, ansonsten greift die Simulation jedoch nicht in die Handlungen der Agenten ein. In der „WALK“-Simulation hingegen werden alle Aktionen der Agenten überprüft und wenn nötig auch verändert. So gibt es in der „WALK“-Simulation unter anderem einen „Collision Manager“, der Kollisionen zwischen den Agenten erkennt und auflöst. In „MARS LIFE“ muss jeder einzelne Agent selbst Kollisionen verhindern. Sollte ein Agent jedoch auch nach der Kollisionsvermeidung noch versuchen, sich zu einer Position zu begeben, an der er kollidieren würde, so wird dies von der ESC verhindert.

Die wichtigsten Klassen des Bewegungsmodells in „MARS LIFE“ sind die „Pedestrian“-Klasse und die „Obstacle“-Klasse. Es handelt sich bei beiden Klassen um Agenten, genauer gesagt „SpatialAgents“ der generischen Agentenarchitektur von „MARS LIFE“. „Pedestrians“ und „Obstacles“ besitzen somit eine Position, Form, Ausmaße und eine Ausrichtung in der ESC.

„Pedestrians“ sind die Fußgängeragenten und „Obstacles“ sind Hindernisse, wie etwa Wände. Um das Modell und die Berechnungen nicht zu komplex werden zu lassen, müssen die „Pedestrians“ und die „Obstacles“ immer die Form eines Rechtecks besitzen und werden nicht gedreht. Der Hauptunterschied zwischen „Pedestrians“ und „Obstacles“ liegt darin, dass „Pedestrians“ aktiv sind und eine Intelligenz besitzen, die in der „Reason“-Methode des Agenten Entscheidungen trifft. „Obstacles“ dagegen sind passiv, treffen keine Entscheidungen und können sich auch nicht bewegen.

Die „Reason“-Methode ist das Herzstück der Fußgängeragenten. Sie stellt die komplette Intelligenz des Agenten dar. In dieser berechnet ein Agent den Weg zu seinem Ziel, weicht Hindernissen und anderen Fußgängern aus und bestimmt jeweils seine nächste Position so, dass er mit nichts kollidiert.

3.3.1 Wegfindung

Für die Wegfindung ist die Wegfindungskomponente des Fußgängermodells zuständig (Abbildung 2). Der erste Schritt bei der Durchführung einer Simulation mit dem Fußgängermodell in „MARS LIFE“ ist die Erstellung eines Wegpunkte-Graphen („ISearchGraph“). Hierfür werden zu Simulationsbeginn einmalig alle statischen Hindernisse, also „Obstacles“, von der ESC abgefragt. Der Graph wird dann mit Hilfe eines Raytracing-Algorithmus erstellt. Der Aufwand für die Erstellung des Wegpunkte-Graphen ist dabei von der Komplexität der Architektur, d.h. von der Anzahl an „Obstacles“, abhängig. Knoten („IPathNode“) des Graphen sind Positionen in einem vordefinierten Abstand von den Eckpunkten der Hindernisse. Kanten stellen also den Weg von einer solchen Position zur nächsten Position dar.

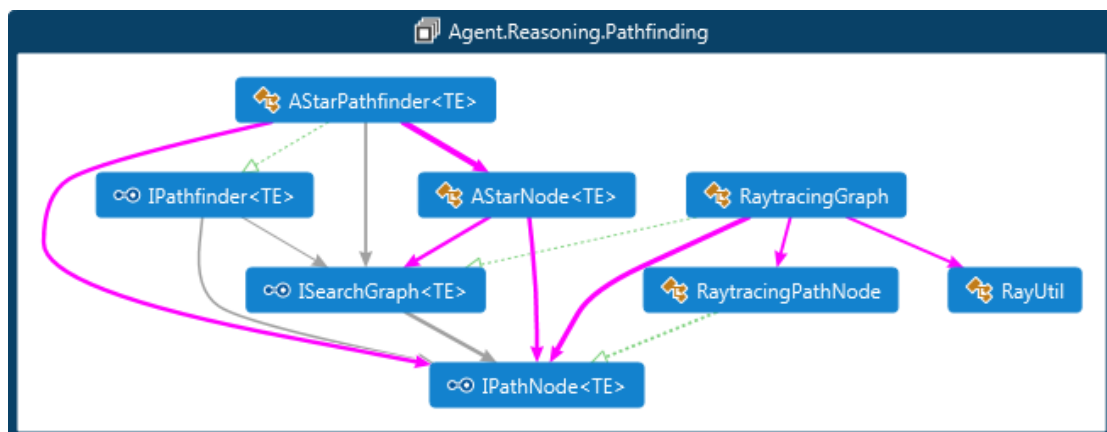


Abbildung 2 - Die Architektur der Wegfindungskomponente des "MARS LIFE"-Fußgängermodells
(Magenta: Aufruf, Grün: Implementiert, Grau: Referenziert)

Jeder Agent berechnet im ersten Simulationsschritt den kürzesten Pfad von seiner aktuellen Position zu seiner Zielposition (Abbildung 3). Hierfür benutzt er einen A*-Wegfindungsalgorithmus („AStarPathfinder“) auf dem Wegpunkte-Graphen und erstellt sich somit eine Liste an Wegpunkten zu seiner Zielposition. Diese Wegpunkte steuert er in den nächsten Simulationsschritten nacheinander an, bis er am Zielort angekommen ist. Der genaue Weg zwischen den Wegpunkten ist dem Agenten nicht vorgeschrieben, da er auf dynamische Hindernisse, d.h. in diesem Fall andere Fußgängeragenten, reagieren soll. Der Agent muss also nicht immer auf direktem Weg von Wegpunkt zu Wegpunkt gehen, sondern kann auf dem Weg zu seinem Wegpunkt Hindernissen ausweichen. In manchen Fällen kann dies jedoch dazu führen, dass der Agent so von seiner eigentlichen Route abkommt, dass er an einem Hindernis hängenbleibt, welches nicht bei der Berechnung seines Wegs beachtet wurde. In diesem Fall merkt der Agent, dass er nicht mehr vorankommt und führt daraufhin eine erneute Wegfindung über den Wegpunkte-Graphen durch.

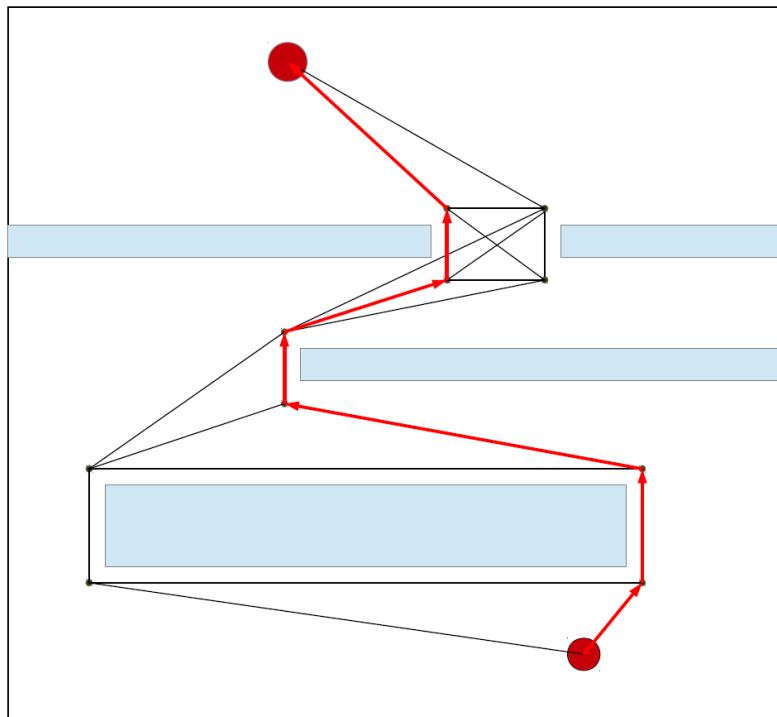


Abbildung 3 - Wegfindung der Agenten über den Wegpunkte-Graphen (Thiel 2013)

Für eine Betrachtung der dynamischen Hindernisse, die eine Neuberechnung des Wegpunkte-Graphen für jeden Simulationsschritt erfordern würde, ist diese Methode bei weitem nicht performant genug, so dass die dynamischen Hindernisse auf eine andere

Weise beachtet werden müssen. Hierfür ist die Komponente für das Bewegungs- und Ausweichverhalten zuständig.

3.3.2 Bewegungs- und Ausweichverhalten

Das Bewegungs- und Ausweichverhalten wird von einer weiteren Komponente des Fußgängermodells umgesetzt (Abbildung 4). Im Gegensatz zum Wegpunkte-Graphen für die Wegfindung werden beim Ausweichverhalten („ObstacleAvoidanceBehavior“) nicht nur die statischen Hindernisse betrachtet, sondern auch die dynamischen Hindernisse, also andere Fußgängeragenten. Das Bewegungs- und Ausweichverhalten kann Anpassungen am Bewegungsvektor des Fußgängeragenten durchführen, wodurch dieser vom direkten Weg zum nächsten Wegpunkt abweichen kann.

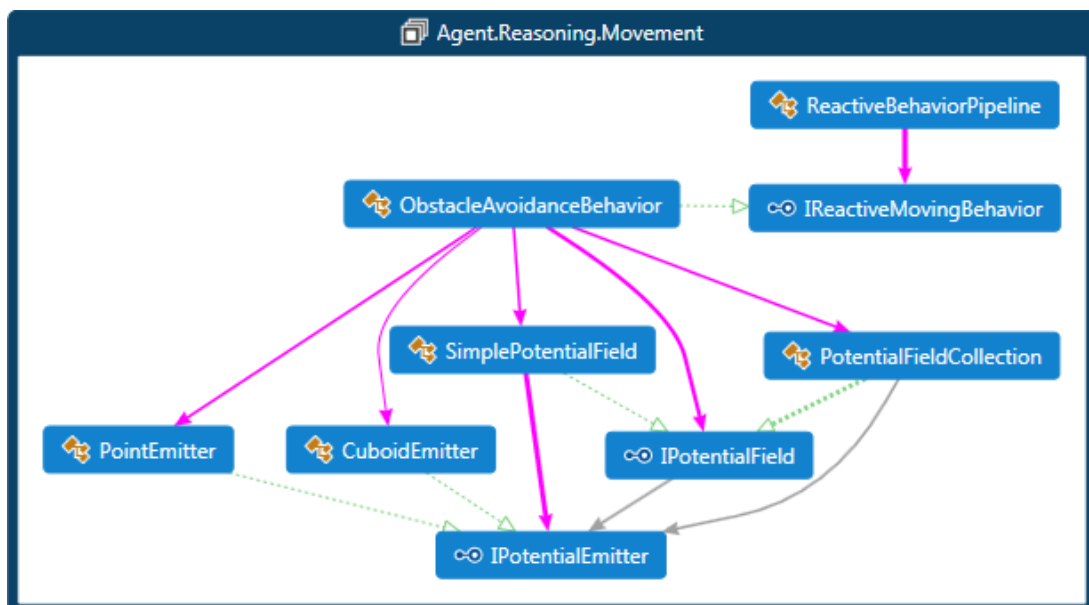


Abbildung 4 - Die Architektur der Komponente für das Bewegungs- und Ausweichverhalten des "MARS LIFE"-Fußgängermodells (Magenta: Aufruf, Grün: Implementiert, Grau: Referenziert)

Die Anpassungen des Bewegungsvektors geschehen mit Hilfe von Potentialfeldern („IPotentialField“). Nach Wahrnehmung aller „Pedestrians“ und „Obstacles“ aus der ESC werden an den entsprechenden Positionen Potentialfelder erstellt. Statische Hindernisse („Obstacle“) und andere Fußgängeragenten („Pedestrian“) werden jeweils durch ein negatives Potential repräsentiert. Der nächste Wegpunkt besitzt dagegen ein positives Potential. Der Agent betrachtet nun die Potentialwerte um seine aktuelle Position in acht gleichmäßig verteilte Richtungen, welche also Vielfache von 45° sind. Er sucht die Bewegungsrichtung mit dem höchsten Potential und setzt seinen Bewegungsvektor

dementsprechend in diese Bewegungsrichtung, wobei die Länge des Bewegungsvektors von der Bewegungsgeschwindigkeit des Agenten abhängig ist. Der Agent kann sich also in genau acht Richtungen bewegen. Dieser Wert ließe sich erhöhen, jedoch würden schon 16 Bewegungsrichtungen eine Verdopplung des Rechenaufwands für die Suche des besten Potentials bedeuten. Da die Bewegungsschritte eines Agenten nicht besonders groß sind, spielt die geringe Anzahl an möglichen Bewegungsrichtungen jedoch keine große Rolle beim Agentenverhalten.

3.3.3 Kollisionsvermeidung

Trotz des beschriebenen Bewegungs- und Ausweichverhaltens könnte es bei höheren Agentendichten oder engen Wegen noch zu Kollisionen kommen. Die ESC verhindert in solchen Situationen jedoch, dass sich der Agent auf eine Position begibt, an der er mit etwas kollidieren würde. Der Agent bleibt stattdessen auf seiner alten Position stehen. Allerdings kann es sein, dass der Agent auch in allen folgenden Simulationsschritten wieder dieselbe ungünstige Position auswählt. Dies würde dazu führen, dass sich der Agent gar nicht mehr bewegt, wodurch er wiederum andere Agenten blockieren könnte. Die Kollisionsvermeidung kann also nicht alleine der ESC überlassen werden. Stattdessen muss der Bewegungsvektor des Agenten so angepasst werden, dass der Agent sich bewegt, ohne mit etwas zu kollidieren.

In der „WALK“-Simulation gibt es für die Kollisionsauflösung einen „Collision Manager“. Dieser behebt nach einem Simulationsschritt alle Kollisionen, indem einer der zwei miteinander kollidierenden Agenten auf die dichteste Position gesetzt wird, an der er nicht mit dem anderen Agenten kollidiert. Hierdurch ist es allerdings auch möglich, dass sich ein Agent schneller bewegt als es seine maximale Geschwindigkeit eigentlich zulassen würde. Die Umwelt in der „WALK“-Simulation selbst verhindert nicht wie die ESC Kollisionen, sondern lässt es zu, dass die Agenten sich an kollidierenden Positionen platzieren.

Im Fußgängermodell von „MARS LIFE“ gibt es keine Instanz, die über den Agenten steht. Jeder Agent muss also selbst verhindern, dass er eine ungünstige Position auswählt und sich somit nicht bewegen kann. Hierfür fragt der Agent die ESC zuerst, welche Kollisionen sich ergeben würden, wenn er sich auf seine vom Bewegungsverhalten bestimmte Wunschposition setzen würde. Gibt es keine Kollisionen, so ist keine Anpassung des Bewegungsvektors nötig. Ansonsten verringert der Agent die Länge einer Komponente seines Bewegungsvektors so, dass es zu keiner Kollision mehr kommt. In einer zweidimensionalen Umwelt gibt es nur Kollisionen von nicht rotierten Rechtecken, wenn der Mindestabstand zwischen den Mittelpunkten von zwei Objekten sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse unterschritten wird.

$$\text{Mindestabstand}_x = \frac{\text{Länge } x \text{ von Objekt A}}{2} + \frac{\text{Länge } x \text{ von Objekt B}}{2}$$

$$\text{Mindestabstand}_y = \frac{\text{Länge } y \text{ von Objekt A}}{2} + \frac{\text{Länge } y \text{ von Objekt B}}{2}$$

Beim Ändern des Bewegungsvektors ist es wünschenswert, dass sich der Agent trotz der Änderung soweit wie möglich fortbewegt. Aus diesem Grund sollte wenn möglich die Länge der bereits kleineren Komponente des Bewegungsvektors verringert werden (Abbildung 5).

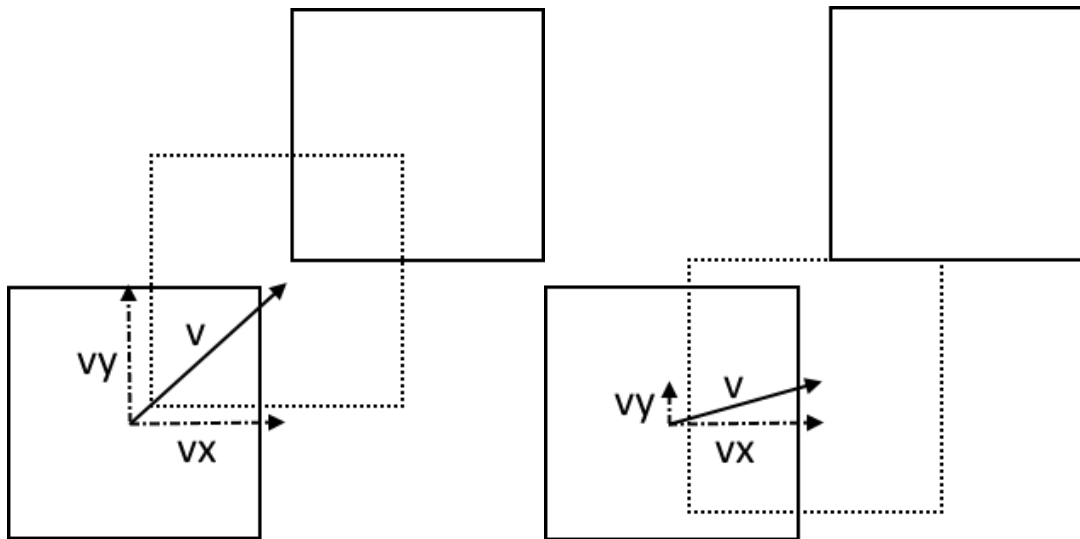


Abbildung 5 - Anpassung des Bewegungsvektors für den Fall, dass vor der Bewegung der Abstand auf beiden Achsen größer als der Mindestabstand war

Abbildung 5 zeigt den eigentlich gewünschten Bewegungsvektor v (links) und den angepassten Bewegungsvektor v (rechts). Der Bewegungsvektor v lässt sich in die Bewegung in x -Richtung v_x und die Bewegung in y -Richtung v_y aufteilen. In diesem Beispiel ist der Vektor v_x länger als der Vektor v_y . Es wird daher v_y so gekürzt, dass die neue Position des Agenten keine Kollision mit dem Hindernis mehr verursachen würde. Der Agent läuft also so weit wie er kann. Allerdings ist diese Anpassung nur möglich, wenn der Abstand des Agenten zum Hindernis vor der Durchführung der Bewegung auf keiner der Achsen kleiner als der Mindestabstand war.

Ist der Abstand zwischen dem Agenten und dem Hindernis vor Durchführung der Bewegung auf einer der Achsen kleiner als der jeweilige Mindestabstand, so wird der Bewegungsvektor auf eine andere Weise angepasst (Abbildung 6). In diesem Fall wird die

Länge der Komponente des Bewegungsvektors angepasst, auf deren Achse der Mindestabstand nicht bereits vor Durchführung der Bewegung unterschritten war.

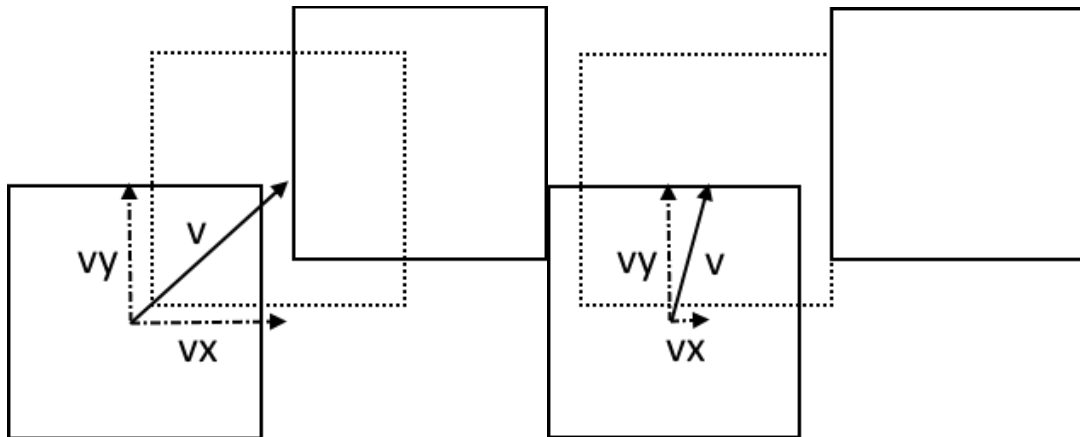


Abbildung 6 - Anpassung des Bewegungsvektors für den Fall, dass vor der Bewegung der Abstand auf einer der Achsen kleiner als der Mindestabstand war

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel, welches diesen Fall darstellt. Der unangepasste Bewegungsvektor ist mit dem Bewegungsvektor aus dem vorherigen Beispiel identisch. Allerdings ist der linke Agent in diesem Beispiel auf der y-Achse dichter an dem rechten Agenten. Würde man jetzt die kürzere Komponente des Bewegungsvektors weiter verkürzen, wie es im vorherigen Beispiel gemacht wurde, so würde es jedoch trotzdem zu einer Kollision kommen. Wird hingegen die Länge der x-Komponente des Bewegungsvektors gekürzt, so kommt es zu keiner Kollision mehr. Da der Mindestabstand auf der x-Achse vor der Bewegung nicht unterschritten wurde, ist dies auch die vom Algorithmus durchgeführte Anpassung.

In beiden Fälle stellt das Vorgehen sicher, dass sich der Agent niemals durch die Kollisionsvermeidung schneller bewegt, als es mit dem unveränderten Bewegungsvektor vorgesehen war.

3.3.4 Visualisierung

Zusätzlich zur Agentenintelligenz bietet das Fußgängermodell in „MARS LIFE“ eine zweidimensionale Visualisierung an. Diese ist von der bereits in „MARS LIFE“ vorhandenen Visualisierung „MARS VIEW“ unabhängig, da diese sich noch in der Entwicklung befindet. Die Visualisierung zeichnet sowohl die Fußgängeragenten als auch die Hindernisse. Die Informationen über diese bekommt die Visualisierung durch einen direkten Zugriff auf die Umwelt, also in diesem Fall die ESC. Die Visualisierung wird für jeden Zeitschritt der Simulation genau einmal aktualisiert. Hierfür wird die „PreTick“-Methode des Layers des

Fußgängermodells genutzt. Diese Methode wird immer vor den Aufrufen der „Tick“-Methoden der Agenten ausgeführt. Dadurch ist sichergestellt, dass sich alle Agenten, die visualisiert werden, im gleichen Zeitschritt befinden.

Zusätzlich zu dieser direkten Visualisierung wurde ein „Szenario-Player“ umgesetzt. Dieser kann Simulationen nach der Durchführung visualisieren. Hierfür ist es nötig, dass die Agentenbewegungen in den Simulationen aufgezeichnet wurden. Dies passiert durch das Logging. Die statische Architektur der Umwelt muss nicht aufgezeichnet werden, sondern wird separat in einer Datei definiert.

Die Nutzung des „Simulations-Players“ bietet einige Vorteile gegenüber der direkten Visualisierung. Zum einen erlaubt die Wiedergabe eines aufgezeichneten Versuchs, dass ein bestimmter Simulationslauf immer wieder betrachtet werden kann, was für die visuelle Auswertung, z.B. bei der Face Validation, nötig sein kann. Außerdem ist bei komplexen Szenarien oft keine Visualisierung in Echtzeit möglich. Mit einer nachträglichen Visualisierung kann aber sichergestellt werden, dass die Simulation mit der gewünschten Geschwindigkeit abgespielt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass Simulationen verschiedener Simulationssysteme auf die gleiche Weise dargestellt werden können, wenn jeweils die Agentenpositionen geloggt werden. Hierdurch sind visuelle Vergleiche zwischen den Systemen sehr viel leichter durchführbar. Auch können reale Bewegungsdaten genauso visualisiert werden wie die Aufzeichnungen der Simulationen. Hierfür müssen die Bewegungsdaten nur in das von der Visualisierung genutzte Format übertragen werden.

3.3.5 Logging

Für jeden Zeitschritt des Simulationslaufs werden alle Fußgängeragenten geloggt. Hierfür wird für jeden Simulationslauf eine SQLite¹-Datenbank erstellt. SQLite erlaubt es, das Modell portabel zu halten, da keine Installation der Datenbank als Service erforderlich ist.

Wie auch die Visualisierung wird das Logging in der „PreTick“-Methode des Layers des Fußgängermodells aufgerufen. Der Logging-Komponente wird dabei eine Liste aller Fußgängeragenten übermittelt, welche dann in der Datenbank in der Tabelle „agent“ abgespeichert werden. Die Datenbank-Tabelle wurde sehr einfach gehalten.

agent(id INTEGER, name TEXT, x REAL, y REAL, t INTEGER)

„id“ ist eine eindeutige Kennung des jeweiligen Agenten. Im Fußgängermodell wird einfach bei der Erstellung eines Agenten eine Variable hochgezählt. „name“ ist der Name des Agenten. Er muss nicht eindeutig sein und kann unter anderem dafür genutzt werden, die

¹ www.sqlite.org

Zugehörigkeit zu einer bestimmten Agentengruppe zu speichern. „x“ und „y“ stellen die jeweilige x- und y-Position des Agenten zum Simulationszeitpunkt „t“ dar. „t“ steht für die sogenannten Ticks. Diese beginnen bei 0 und werden pro Simulationsschritt um 1 erhöht.

3.4 Weitere betrachtete Bewegungsmodelle

Zusätzlich zum Fußgängermodell von „MARS LIFE“ werden in dieser Arbeit weitere Simulationssysteme und Modelle betrachtet. Hierdurch ist es möglich, das Validierungskonzept an den unterschiedlichen Modellen zu erproben und die Aussagekraft und Anwendbarkeit des Konzepts zu bewerten. Außerdem können durch die Nutzung des Validierungskonzepts Rückschlüsse auf die Validität der unterschiedlichen Systeme und Modelle getroffen werden. Vor allem für „MARS LIFE“, welches sich noch in der Entwicklung befindet, können hierdurch Probleme früh erkannt werden und mit Hilfe der durch die Validierung gewonnenen Daten behoben werden.

Neben dem bereits vorgestellten Fußgängermodell in „MARS LIFE“, werden die „WALK“-Simulation und „PedSim“ betrachtet. Die Wahl fiel auf diese beiden weiteren Systeme, da für beide der Quellcode zur Verfügung stand und sie jeweils unterschiedliche Ansätze für die Modellierung der Agenten verfolgen, wobei die „WALK“-Agenten denen in „MARS LIFE“ stark ähneln. Durch den zur Verfügung stehenden Quellcode lassen sich Anpassungen und Erweiterungen des Systems und Modells durchführen. Wichtig war es für die Durchführung des Konzepts vor allem, dass die gewünschten Versuche umgesetzt werden und die Bewegungen der Agenten aufgezeichnet werden konnten. Durch die Nutzung und Validierung von Modellen mit verschiedenen Modellansätze, regelbasiert für die „WALK“-Simulation und „MARS LIFE“ und auf Basis des „Social Force Models“ bei „PedSim“, lassen sich außerdem generelle Rückschlüsse auf die Vor- und Nachteile sowie Probleme dieser Ansätze erlangen.

3.4.1 WALK

„WALK“ war ein Projekt an der HAW Hamburg, bei dem unter anderem an der Entwicklung einer agentenbasierten Fußgängersimulation gearbeitet wurde. Die entwickelte Simulation besitzt einige Besonderheiten, die das Nachbilden von realistischen Szenarien erlauben. Zum einen lassen sich mit der Simulation sehr große Szenarien simulieren. Dies wird durch eine verteilte Architektur erreicht, die es erlaubt, die Szenarien über mehrere Rechner, „Compute Nodes“ genannt, zu verteilen (Thiel 2011b). Durch das dynamische (Re-)Partitionieren und Verteilen von Agenten auf diese „Compute Nodes“, ist das System besonders skalierbar. Zum anderen wurde an emotionalen Agenten gearbeitet (Roiss 2011). Durch emotionale Agenten würde es möglich, den Einfluss von Emotionen, wie zum Beispiel Angst, auf das Verhalten von Personen zu berücksichtigen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Emotionen einen großen Einfluss auf Simulationsergebnisse haben können

(Thiel-Clemen und Klingenberg 2010). Das entwickelte Simulationssystem besaß jedoch einen sehr starken Fokus auf Evakuierungsszenarien und war nicht für andere Simulationen nutzbar, weshalb es durch das allgemeinere und umfangreichere „MARS LIFE“ des Nachfolgeprojekts „MARS“ ersetzt wurde, das viele der Forschungsergebnisse weiterverwendet.

Wie bereits im Kapitel zur Umsetzung eines Bewegungsmodells in „MARS LIFE“ erwähnt, dienten die Agenten der „WALK“-Simulation als Vorlage für die Umsetzung der Fußgängeragenten von „MARS LIFE“. Daher findet in der „WALK“-Simulation ebenfalls zuerst die Berechnung eines Umgebungsgraphen aus der Umwelt statt, auf dem dann die Agenten mit Hilfe des A*-Wegfindungsalgorithmus den kürzesten Weg zu ihrem Zielort suchen. Die Bewegung und das Ausweichen der Agenten werden durch anziehende und abstoßende Potentiale erreicht. Im Gegensatz zur den Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ sorgt eine übergeordnete Komponente, der „Collision Manager“, dafür, dass Kollisionen, die beim Bewegen der Agenten auftreten, aufgelöst werden. Agenten haben in der „WALK“-Simulation immer einen festen Körper in Form eines Würfels mit den Seitenlängen von 0,4 Metern.

Die „WALK“-Simulation bietet zwei Agentenimplementierungen an: Die „EGOAPAgents“ (Thiel 2011a, Thiel 2013) und die „ModularAgents“ (Münchow 2013). Der Name der „EGOAPAgents“ stammt vom „GOAP“-Prinzip. „GOAP“ steht hierbei für „Goal-Oriented Action Planning“² und beschreibt eine bestimmte KI-Architektur zur Entscheidungsfindung. Bis auf die Wegfindung treffen die Agenten jedoch in der Agentenimplementierung keine Entscheidungen. Bei dieser Agentenimplementierung handelt es sich um die Basis-Agenten, die die einfachsten Agenten in der „WALK“-Simulation darstellen. Die „ModularAgents“ stellen eine Erweiterung dieser Basis-Agenten dar. Im Gegensatz zu den „EGOAPAgents“ besitzen sie eine Regel, die dafür sorgt, dass der Agent abhängig von der Dichte an Agenten in seiner direkten Umgebung, aktiv seine Geschwindigkeit anpasst. Je höher die Agentendichte ist, desto langsamer bewegt sich der Agent. „EGOAPAgents“ hingegen versuchen immer mit ihrer Maximalgeschwindigkeit zu laufen, Geschwindigkeitsverminderungen ergeben sich allerdings ebenfalls bei höheren Agentendichten, da in einem solchen Fall der Platz in der Bewegungsrichtung des Agenten vorgibt, wie weit sich der Agent vorwärtsbewegen kann, ohne zu kollidieren. Eine weitere Erweiterung der „ModularAgents“ ist die Ergänzung des Modells um soziales Verhalten und „Leadership“-Modelle. Agenten lassen sich sozialen Gruppen zuordnen, die einen Gruppenzusammenhalt haben und versuchen sich gemeinsam fortzubewegen. Außerdem können globale „Leader“ definiert werden, denen andere Agenten folgen. Bei einer

² web.media.mit.edu/~jorkin/goap.html

Evakuierung könnten so z.B. Feuerwehrmänner simuliert werden, die die anderen Personen zu den Ausgängen führen.

In dieser Arbeit werden beide Agentenimplementierungen betrachtet. Hierdurch soll gezeigt werden, wie komplex eine Agentenimplementierung sein muss, um valides Verhalten zeigen zu können. Außerdem sollen die Einflüsse von sozialen Gruppen auf das Agentenverhalten in den betrachteten Versuchsszenarien untersucht werden. Die Ergebnisse sollten zeigen, ob die Beachtung von sozialen Gruppen bei Evakuierungssimulationen einen relevanten Einfluss auf die Validität der Ergebnisse hat und somit modelliert werden sollte, oder ob der Einfluss kaum erkennbar ist und somit bei der Modellierung vernachlässigt werden kann.

3.4.2 PedSim

Bei „PedSim“ handelt es sich um eine Open-Source-Bibliothek³ für Fußgängersimulationen (Gloor 2013). Im Gegensatz zu den Fußgängermodellen der „WALK“-Simulation und dem betrachteten Fußgängermodell in „MARS LIFE“ ist das Verhalten der Agenten nicht regelbasiert, sondern basiert auf dem „Social Force Model“ (Helbing et al. 2002). Die Bewegung im Allgemeinen funktioniert zunächst ähnlich wie bei den beiden anderen betrachteten Bewegungsmodellen. Agenten bewegen sich aufgrund von anziehenden und abstoßenden Kräften. Zielorte besitzen hierbei anziehende Kräfte. Wände, Agenten und andere Hindernisse besitzen dagegen abstoßende Kräfte. Dieses einfache Modell zeigt bereits viele in der Realität beobachtbare emergente, also durch das Zusammenspiel der einzelnen Agenten entstehende, Bewegungsmuster wie das Bilden von Spuren bei gegenläufigen Personenflüssen. Das „Social Force Model“ wird in „PedSim“ zusätzlich durch einen „Look Ahead“-Algorithmus unterstützt. Bei diesem Algorithmus prüfen die Agenten wie viele andere Agenten sich links und rechts von ihrer Bewegungsrichtung befinden. Der Agent entscheidet sich dann für die Richtung, in der sich weniger andere Agenten befinden. Diese Entscheidung geht als weitere Kraft in die Berechnung der Bewegung des Agenten ein.

Agenten in „PedSim“ können sich wie bei den anderen betrachteten Bewegungsmodellen anhand ihrer Maximalgeschwindigkeit unterscheiden. Auch wie stark die verschiedenen Kräfte in die Berechnung der Bewegung des Agenten eingehen, lässt sich für jeden Agenten festlegen. Hierfür sind jedoch direkte Änderungen im Code der Agenten nötig, da sich die Geschwindigkeiten und Kräftefaktoren nicht in der Szenariodefinition festlegen lassen. Im Gegensatz zu den Agenten in der „WALK“-Simulation und den „SpatialAgents“ aus „MARS LIFE“ handelt es sich bei den „PedSim“-Agenten um „Moving Point Objects“. Das heißt, dass die Agenten keinen Körper besitzen. Durch hohe auf sie wirkende Kräfte kann somit unter

³ pedsim.silmaril.org

anderem der Abstand zwischen den Agenten unrealistisch kleine Werte erreichen oder es können eigentlich feste Objekte wie Wände, Hindernisse oder andere Agenten durchquert werden. Dies ist in der „WALK“-Simulation nicht möglich, da die Agenten feste Körper besitzen und eine Kollisionserkennung stattfindet. In „MARS LIFE“ ist dies ebenfalls nicht möglich, wenn die ESC benutzt wird und die Agenten als miteinander kollidierend definiert sind. Die Wegfindung und das Agentenverhalten in „PedSim“ sind nur von den wirkenden Kräften abhängig. Komplexere Verhaltensregeln, welche in der „WALK“-Simulation und „MARS LIFE“ möglich sind, lassen sich nicht definieren.

In vorherigen Arbeiten wurde mit der zu der Zeit aktuellen Version 2.2 gearbeitet (Woggan 2014a, Woggan 2014b). Für diese Arbeit wurde die mittlerweile erschienene Version 2.3 verwendet. Diese behebt Fehler im Verhalten der Agenten. In den vorherigen Versionen wurde das „Social Force Model“ nicht an allen Stellen korrekt umgesetzt, dies soll jetzt korrigiert sein. Im direkten visuellen Vergleich des Agentenverhaltens der Version 2.2 und 2.3 lassen sich auch bereits unterschiedliche Verhaltensweisen erkennen.

4 Konzept zur objektiven Validierung

Dieses Kapitel beschreibt das Validierungskonzept und seine Bestandteile. Begonnen wird mit der Erläuterung der vom Konzept zu erfüllenden Anforderungen. Danach wird die Validierung mit makroskopischen Werten genauer betrachtet. Hierzu werden Fundamentaldiagramme, Engstellendiagramme und komplexere Experimente vorgestellt. Für die visuelle Auswertung werden erwartete Verhaltensweisen und emergente Phänomene beschrieben.

4.1 Anforderungen und Konzept

Im Bereich der Validierung von mikroskopischen Bewegungsmodellen gibt es bisher einen Mangel an objektiven Konzepten zur Validierung des Agentenverhaltens. Dies liegt unter anderem an den Schwierigkeiten, an Vergleichsdaten für solche Modelle zu gelangen (Zhou et al. 2010). Mit dieser Arbeit soll deshalb ein Konzept erstellt werden, das eine objektive Bewertung der Validität von Bewegungsmodellen ermöglicht. Hierfür muss das individuelle Verhalten der Agenten und das Zusammenspiel der Agenten miteinander und mit der Umgebung betrachtet werden. Durch die Definition fester Versuchsszenarien, Versuchsabläufe und Messungen wird eine Vergleichbarkeit, Reproduzierbarkeit und Automatisierbarkeit der Validierungsergebnisse erreicht.

Um eine objektive Bewertung der Modelle zu ermöglichen, findet zuerst ein Vergleich des Modellverhaltens mit makroskopischen Werten aus der Forschung statt, die für die Validität des Bewegungsmodells von großer Wichtigkeit sind. Diese sind meistens von konkreten und komplexen Szenarien unabhängig und deshalb gut durch Versuche zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Werte lässt sich das emergente und grundlegende Verhalten der Agenten analysieren. Je größer die Übereinstimmungen mit den Vergleichswerten sind, desto besser entspricht das Modell der Realität und desto valider ist es. Da es sich um konkrete Werte handelt, sind objektive Vergleiche möglich. So ist es unter anderem möglich, Verbesserungen oder Verschlechterungen des Modellverhaltens bei Änderungen und Kalibrierung des Modells festzustellen. Die Bestimmung und Auswertung der makroskopischen Daten lässt sich komplett automatisieren, so dass es problemlos möglich ist, eine große Menge an Versuchsläufen auszuwerten. Dadurch lassen sich verlässliche Ergebnisse erzielen.

Zusätzlich zu makroskopischen Werten, die grundlegendes Modellverhalten beschreiben, ist ein Vergleich mit komplexeren Szenarien sinnvoll, da dies einen noch tieferen Einblick in das Modellverhalten gewährt. Mit diesem ist es möglich, Eigenheiten und Probleme aufzudecken, die in einfacheren Szenarien nicht sichtbar werden. Um auch hierbei objektive Bewertungen der Validität zu ermöglichen, wird ein konkreter, in der Realität ausgeführter, Versuch nachgebaut und es werden sowohl in den Realdaten als auch in den Simulationen makroskopische Werte bestimmt, welche zu Vergleichen genutzt werden.

Da es sehr schwer ist, das individuelle Agentenverhalten und komplexes emergentes Verhalten durch konkrete Werte zu beschreiben, besteht der zweite Teil des Konzepts aus visuellen Vergleichen (Klügl 2008). Hierzu werden in der Forschung beschriebene und für die Validität des Modells relevante Verhaltensweisen mit Simulationen der Modelle verglichen.

Ein Bewegungsmodell ist valide, wenn sowohl der Vergleich mit den makroskopischen Werten als auch der visuelle Vergleich ein positives Ergebnis liefert.

4.2 Vergleich mit makroskopischen Werten

Für die Validierung mit makroskopischen Werten wurden Vergleichsdaten gesucht, die eine Überprüfung des grundlegenden Verhaltens der Simulation ermöglichen. Die Daten sollten die Überprüfung des Zusammenspiels der Agenten untereinander und mit der Umgebung auf makroskopischer Ebene erlauben. Die Vergleichswerte mussten aussagekräftig sein und gute Vergleiche ermöglichen.

Die Wahl fiel dabei auf Fundamentaldiagramme und Engstellendiagramme. Diese Diagramme erfüllen die genannten Punkte und sind in der Literatur vielfach vertreten. Hierdurch erhalten die Vergleichsdaten einen wissenschaftlichen Rückhalt, der ihre Korrektheit belegt. Neben den eigentlichen Werten existieren in der Literatur auch verschiedene Theorien und Interpretationen zum Verlauf der Diagramme, die mit den Verläufen, die in den hier betrachteten Simulationen produziert werden, verglichen werden können. Das von den Diagrammen beschriebene Verhalten hat einen großen Einfluss auf den Ablauf der Simulationen, da es beschreibt, wie schnell die Agenten in bestimmten Situationen vorankommen. Nur wenn es korrekt im Bewegungsmodell abgebildet wird, lassen sich aus der Simulation Folgerungen über mögliche Gefahrstellen, wie Staus, oder die Evakuierungszeit ziehen.

4.2.1 Fundamentaldiagramme

Fundamentaldiagramme zeigen die Abhängigkeit der Gehgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde von der Personendichte in Personen pro Quadratmeter beim freien Fluss ohne Engstellen. In der Literatur lassen sich viele dieser Diagramme finden. In diesem Fall wird das Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) betrachtet, da dieser viele verschiedene Ergebnisse aus der Literatur in einem Diagramm zusammengeführt hat. Hierdurch ergibt sich ein möglichst allgemeines Diagramm (Abbildung 7), da in der Literatur ansonsten teilweise große Abweichungen der einzelnen Ergebnisse sichtbar sind. Das Diagramm von Weidmann basiert auf 25 unterschiedlichen Angaben, aus denen ein mittlerer Kurvenverlauf errechnet wurde.

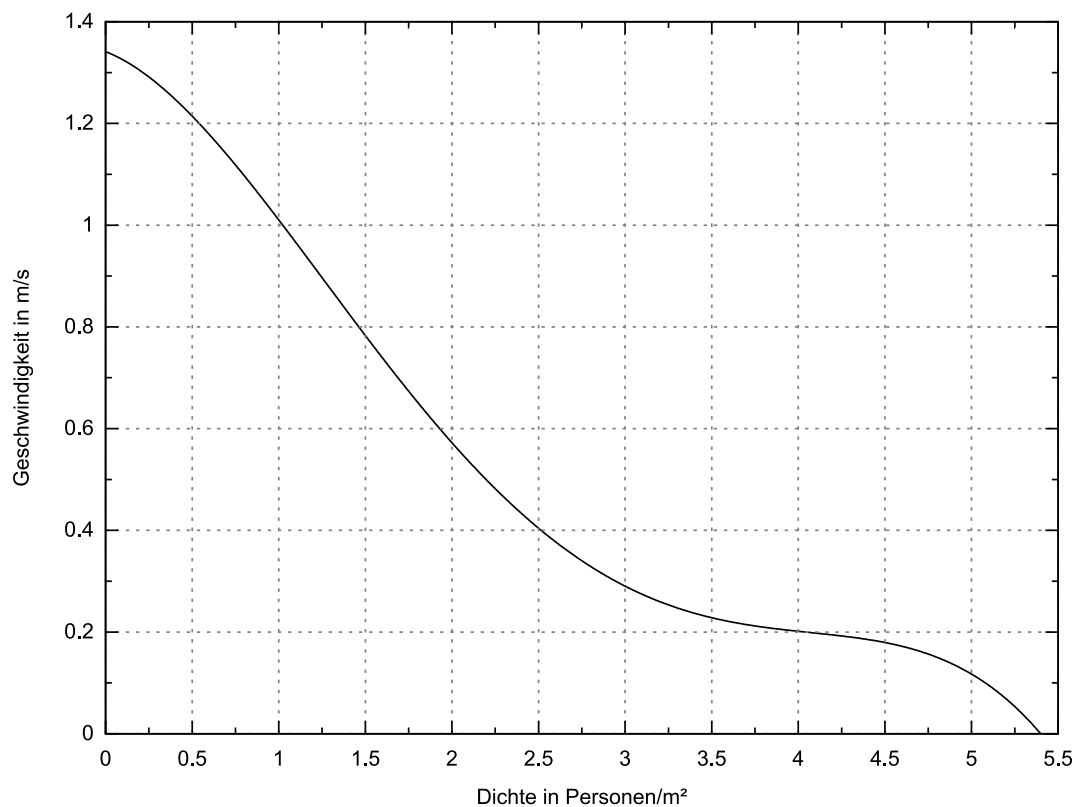


Abbildung 7 - Das Fundamentaldiagramm nach Weidmann 1993

Die von Weidmann berechnete Kurve ist doppel-S-förmig. Sie besitzt ihren ersten Wendepunkt bei einer Dichte von ungefähr 1,5 Personen pro Quadratmeter und den zweiten Wendepunkt bei ungefähr 4 Personen pro Quadratmeter. Ihr Maximum befindet sich am y-Achsen-Schnittpunkt bei einer Geschwindigkeit von 1,34 Meter pro Sekunde. Dies

ist die durchschnittliche Geschwindigkeit von Fußgängern, die in ihrer Bewegung nicht durch Hindernisse beeinträchtigt werden. Der größte Geschwindigkeitsabfall findet zwischen einer Dichte von ungefähr 0,5 Personen pro Quadratmeter und 2 Personen pro Quadratmeter statt. In diesem Bereich ist eine fast lineare Regression der Kurve sichtbar. Ein spürbarer Rückgang der Geschwindigkeit um fast 10% ist schon bei einer Dichte von ungefähr 0,5 Personen pro Quadratmeter erkennbar. Bereits eine Dichte von etwas mehr als 1,5 Personen pro Quadratmeter führt zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit um die Hälfte. Im Bereich zwischen 3 und 5 Personen pro Quadratmeter führt die Erhöhung der Dichte nur zu einer geringeren Reduzierung der Geschwindigkeit. Eine Dichte von ungefähr 5,4 Personen pro Quadratmeter führt zu einem Stillstand.

Vergleiche mit dieser Kurve können auf verschiedene Weisen durchgeführt werden. Zuerst kann die allgemeine Form der Kurve betrachtet werden. Stimmt die Form der Kurve der Simulation mit der Vergleichskurve überein, so scheint die Simulation das korrekte Verhalten zu zeigen. Als nächstes kann ein genauere Vergleich der zusammenhängenden Dichte- und Geschwindigkeitswerte stattfinden. Dies erfordert allerdings bereits eine gewisse Feineinstellung der Werte der Simulation. Zuerst ist das generelle Verhalten daher von größerer Bedeutung.

4.2.2 Engstellendiagramme

Im Gegensatz zu Fundamentaldiagrammen wird in Engstellendiagrammen nicht der freie Fluss betrachtet, sondern der Fluss durch eine Engstelle. Hierbei wird die Abhängigkeit des Flusses in Personen pro Sekunde von dem Engstellendurchmesser in Metern beschrieben.

Auch hier lässt sich zuerst die Form des Graphen aus der Literatur (Abbildung 8) wie aus den Versuchen von Kretz et al. (2006), mit der Form des Graphen der Simulation vergleichen. Erwartet wird eine lineare Abhängigkeit der betrachteten Werte. Manche Versuche lassen auch auf eine Stufenfunktion (Abbildung 9) schließen (Hoogendoorn und Daamen 2005). Der nächste Schritt wäre erneut der Vergleich konkreter Werte, was, wie bereits erwähnt, bereits eine gewisse Feineinstellung der Simulation erfordert. Der Fokus liegt daher zuerst wieder auf dem generellen Verhalten.

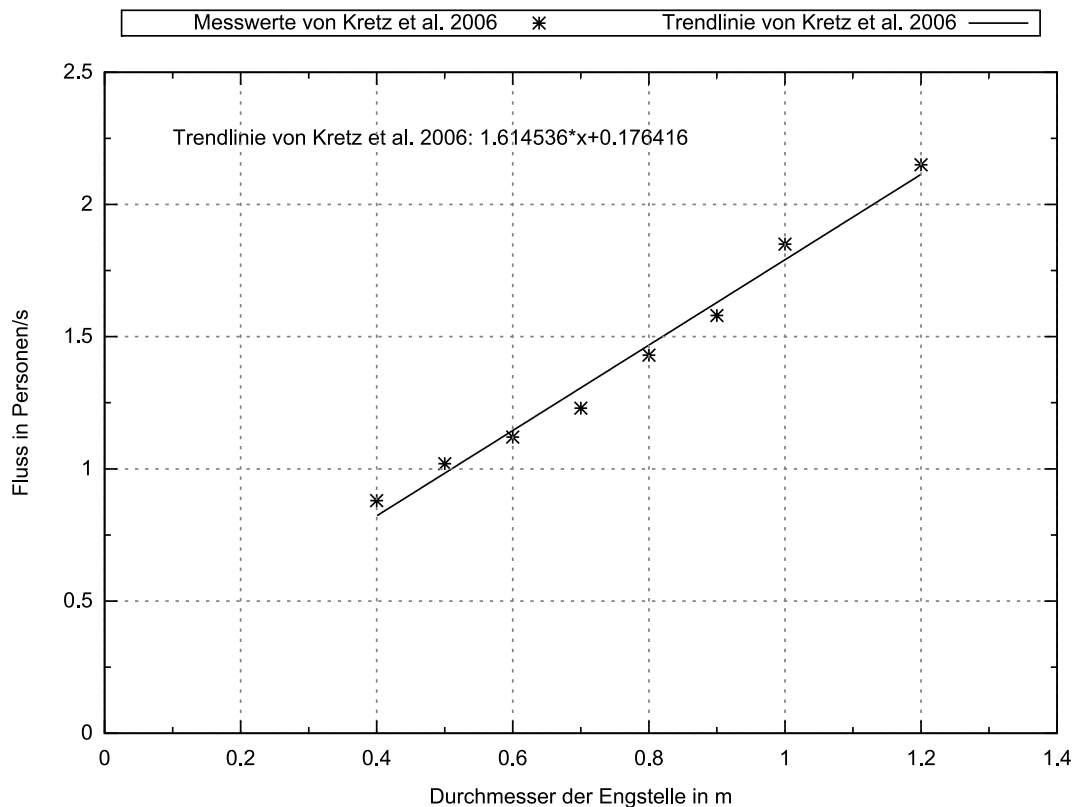


Abbildung 8 - Das Engstellendiagramm nach Kretz et al. 2006

Das Engstellendiagramm (Abbildung 8) von Kretz et al. (2006) beruht auf den Daten, die in einem Experiment (Tabelle 1) mit Studenten gewonnen wurden. Diese bekamen die Anweisung bei den Versuchen nicht zu trödeln, es sollte jedoch auch keine Gefahrensituation nachgestellt werden. Zu Beginn des Versuchs befanden sich die Teilnehmer in einem Bereich mit 4 Meter Breite und 9 Meter Länge, der im hinteren Bereich noch etwas breiter wurde. Die vordersten Teilnehmer standen direkt vor der Engstelle. Die Engstellenlänge betrug bei jedem Versuch 0,4 Meter. Die Engstellenbreite wurde bei den verschiedenen Versuchen angepasst, so dass der Fluss bei verschiedenen Breiten überprüft wurde. Für jeden Versuch wurden mehrere Durchläufe durchgeführt. Der erste Versuch wurde öfter ausgeführt, damit sich die Teilnehmer an die Situation gewöhnen konnten, für einen anderen Versuch wurde versehentlich ein zusätzlicher Durchlauf durchgeführt. Jeder Durchlauf wurde mit Videokameras aufgezeichnet und es wurde bestimmt, wann ein Teilnehmer die Engstelle durchquert hatte. Anhand der benötigten Zeit ab der Durchquerung der Engstelle durch den ersten Teilnehmer bis zur Durchquerung der Engstelle durch den letzten Teilnehmer wurde der Personenfluss in Personen pro Sekunde bestimmt.

Tabelle 1 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien von Kretz et al. 2006

Teilnehmer	
Anzahl der Teilnehmer	94 Teilnehmer (62 männlich, 32 weiblich)
Körpergröße der Teilnehmer	Durchschnittlich 1,80 m (männlich) bzw. 1,70 m (weiblich)
Art der Gruppe	Nur Studenten, altersmäßig und körperlich homogen
Versuchsaufbau	
Versuchsbereich	Rechteckig, 9 m lang und 4 m breit, Teilnehmer vor Engstelle
Engstellenbreiten	Verschiedene Versuche mit Engstellenbreiten von 0,4 m bis 1,6 m (genaue Versuchsdaten von 0,4 m bis 1,2 m verfügbar)
Durchführung	
Anzahl der Durchläufe	3 Durchläufe für die meisten Versuche, 6 Durchläufe für die Engstellenbreite von 1 m, 4 Durchläufe für die Engstellenbreite von 1,2 m

Aus den Mittelwerten der Versuchsläufe wurde eine Gerade erstellt. Bei einer Engstellenbreite von 0,5 Meter beträgt der Fluss ungefähr 1 Person pro Sekunde. Die Steigung der Gerade beträgt ungefähr 1,61. Würde man die Gerade in Richtung der y-Achse verlängern, so wäre ihr y-Achsen Schnittpunkt bei ungefähr 0,18 Personen/s. Dieser Wert würde allerdings aussagen, dass auch ohne Durchgang noch ein Fluss vorhanden sein würde. Für Werte unterhalb der im Versuch betrachteten Engstellenbreiten sollten also aus diesem Diagramm keine Aussagen getroffen werden. Für größere Werte kann von einer Weiterführung der Gerade ausgegangen werden.

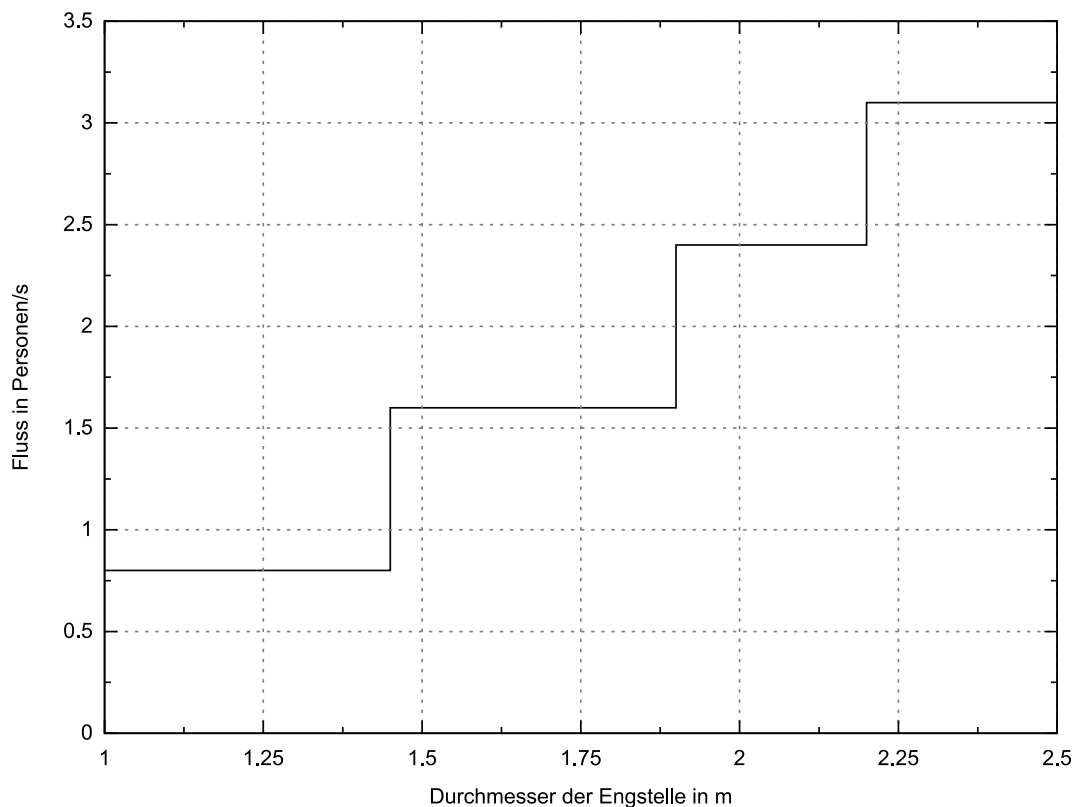


Abbildung 9 - Das Engstellendiagramm nach Hoogendoorn und Daamen 2005

Das von Hoogendoorn und Daamen (2005) erstellte Engstellendiagramm (Abbildung 9) basiert ebenfalls auf einem mit Studenten durchgeführten Experiment. Bei diesem Experiment wurden Engstellenbreiten von 1 bis 2,5 Meter betrachtet. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Kretz et al. (2006) wurde aber eine Stufenfunktion als Verlauf der Kurve bestimmt. Dies wird mit der Beobachtung, dass sich im Experiment Fußgängerspuren gebildet haben, welche leicht ineinander verschränkt sind, begründet und wurde als „Reißverschluss-Effekt“ bezeichnet. Der Abstand zwischen zwei solcher Spuren betrug 0,45 Meter, während die Breite eines durchschnittlichen Fußgängers als 0,55 Meter angegeben wurde. Bei den Versuchen mit unterschiedlich hohen Engstellenbreiten nahm die Anzahl der Spuren stufenweise zu. Bei einer Breite von 1 Meter waren 2 Spuren sichtbar, eine Breite von 2 Meter erzeugte 4 bis 5 solcher Spuren.

Die bestimmte Kurve verläuft von 1 Meter Breite bis 1,45 Meter Breite konstant mit einem Fluss von ungefähr 0,8 Personen pro Sekunde. Danach springt sie auf einen Wert von ungefähr 1,6 Personen pro Sekunde, der bis zu einer weiteren Stufe bei 1,9 Meter Breite beibehalten wird. Diese Stufe beschreibt einen Fluss von ungefähr 2,4 Personen pro

Sekunde. Ab einer Engstellenbreite von 2,2 Meter wird ein Fluss von 3,1 Personen pro Sekunde erreicht, der bis zu der letzten im Versuch beachteten Engstellenbreite von 2,5 Meter konstant bleibt.

4.2.3 Makroskopischer Vergleich mit komplexeren Szenarien

Der Vergleich von in komplexeren Situationen erstellten makroskopischen Werten erlaubt weitere objektive Vergleiche, die nicht nur einzelne Bereiche des Modellverhaltens betrachten, sondern einen Blick auf das gesamte Modellverhalten erlauben. In komplexeren Situationen haben die Wegfindung der Agenten, das Ausweichverhalten, die Geschwindigkeiten und emergente Phänomene einen gemeinsamen Einfluss auf das Ergebnis der Simulation.

Als makroskopischer Vergleichswert könnte zum Beispiel die Entfluchtungszeit von Räumen und Gebäuden betrachtet werden (Meyer-König et al. 2009). Allerdings gibt diese Zeit nur wenig Auskunft über das Verhalten der Agenten. Stattdessen wird ein Messbereich definiert, in dem die durchschnittliche Geschwindigkeit der Agenten (in Meter pro Sekunde) und die Agentendichte (in Agenten pro Quadratmeter) bestimmt werden. Mit diesen Werten kann ein Diagramm erstellt werden, welches den Verlauf der Geschwindigkeits- und Dichtewerte darstellt. Aus einem solchen Diagramm lassen sich viele Rückschlüsse ziehen. Zum einen zeigt es wie viele Agenten durch den Messbereich laufen. Es zeigt auch wie viel Platz die Agenten im Messbereich hatten. Zusätzlich wird ersichtlich wie schnell die Agenten im Messbereich waren und wie der Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit im Messbereich aussieht. Auch die Dauer, in der Agenten durch den Messbereich liefen, lässt sich aus dem Diagramm ablesen. Damit anhand dieser Informationen Rückschlüsse über das Modellverhalten gezogen werden können, muss sowohl der Messbereich als auch die betrachtete Situation sinnvoll gewählt werden.

Bei den für das Konzept ausgewählten Vergleichssituationen handelt es sich um Versuche zur „Simulation of Multi Destination Pedestrian Crowds“ (SMDPC), die von Plaue et al. (2011) durchgeführt wurden. Diese beschäftigten sich mit der Extrahierung von Bewegungslinien aus Videoaufzeichnungen unter Nutzung von Headtracking und der Dichteanalyse bei sich schneidenden Fußgängerströmen. Hierzu führten sie vier Versuche mit vier Versuchsgruppen durch. Bei diesen Versuchen trafen farblich unterschiedliche angezogene Personen in einem mit einer Kamera überwachten Versuchsbereich aufeinander (Abbildung 10).



Abbildung 10 - Videobilder von aufeinandertreffenden Fußgängerströmen in den SMDPC-Versuchen (Plaue et al. 2011)

Bei zwei Versuchen trafen zwei Versuchsgruppen frontal aufeinander, bei einem Versuch trafen sie seitlich aufeinander und beim letzten Versuch trafen alle Gruppen mittig im Versuchsbereich aufeinander.

Die Versuche wurden aus verschiedenen Gründen für das Validierungskonzept ausgewählt. Einerseits ist das Verhalten von Personen und dementsprechend auch Agenten beim Aufeinandertreffen von Fußgängerströmen ein relevantes Thema für die Validität der Ergebnisse, da es große Einflüsse auf den Ablauf der Simulation haben kann. Ein solches Aufeinandertreffen wird in den anderen durchgeführten Vergleichen nicht beachtet. Außerdem stehen für die Vergleiche mit den Versuchen sowohl die extrahierten Bewegungslinien für die makroskopischen Vergleiche, als auch die Videoaufzeichnungen für visuelle Vergleiche zur Verfügung. Auch genaue Informationen zum Grundriss der Versuchsumgebung, wie die genauen Positionen von Eckpunkten, stehen zur Verfügung (Abbildung 11). Durch die komplexere Architektur und die komplexeren Situationen lässt sich auch das jeweilige Modellverhalten genauer analysieren.

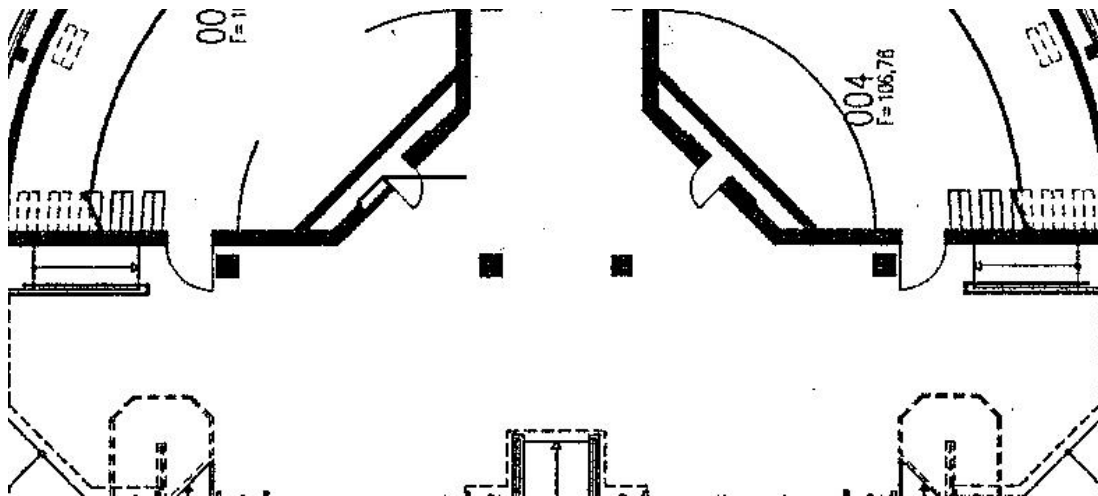


Abbildung 11 - Grundriss der Versuchsumgebung der SMDPC-Versuche (Plaue et al. 2011)

Jeder der Versuche wurde für die zu validierenden Bewegungsmodelle nachgebaut und simuliert. Nach der Simulation wurden die erwähnten Diagramme mit dem Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und Dichte im Messbereich erstellt und mit den aus den Bewegungslinien erstellten Diagrammen verglichen. Eine genaue Beschreibung der Versuche, des Messbereichs und des Versuchsablaufs erfolgt in Kapitel 5 im Rahmen der Beschreibung der Versuchsszenarien. Die aus den Bewegungslinien erstellten Vergleichsdiagramme sowie die in den Simulationen erstellten Diagramme werden in Kapitel 6 vorgestellt und verglichen.

4.3 Visuelle Auswertung des Modellverhaltens

Die visuelle Auswertung des Modellverhaltens erlaubt es, Vergleiche des Modellverhaltens mit erwartetem, in der Forschung beschriebenem Verhalten durchzuführen. Dieses Verhalten lässt sich nur schwer in Form von Berechnungen und Werten ausdrücken. Daher ist die einzige Möglichkeit die Durchführung einer Face Validation (Sargent 2008, Klügl 2008). Face Validation umfasst alle Methoden der Validierung, die sich auf die natürliche Intelligenz des Menschen stützen. Die Simulation wird von Menschen auf unterschiedliche Art und Weise betrachtet, so dass diese mit Hilfe ihres theoretischen und impliziten Wissens die Prozesse und Ergebnisse auf Sinnhaftigkeit und Glaubwürdigkeit überprüfen können. Allerdings sind die Beurteilungen oft stark vom individuellem Wissen und Erfahrungen mit ähnlichen Situationen aus der Realität abhängig (Zhou et al. 2010). Face Validation erzeugt somit oft subjektive Ergebnisse (Banerjee und Kraemer 2010).

Im Fall dieses Validierungskonzepts werden allerdings konkrete Verhaltensweisen und emergente Phänomene aus der Forschung definiert, deren Vorhandensein oder Abwesenheit objektiv beurteilt werden kann. Auch die zusätzlichen Vergleiche mit Videoaufzeichnungen erlauben es, konkrete Bewertungen des Modellverhaltens durchzuführen, so dass weiterhin eine objektive Bewertung der Validität der Bewegungsmodelle gegeben ist. Die Erweiterung des Validierungskonzepts um Face Validation ist erforderlich, um das Verhalten einzelner Agenten bewerten zu können. Dies ist durch alleinige Vergleiche von makroskopischen Werten nicht möglich.

4.3.1 Allgemeines Bewegungsverhalten

Bei der visuellen Auswertung des Bewegungsverhaltens wird erwartet, dass die Agenten das Verhalten zeigen, welches auch Fußgänger zeigen. Fußgänger besitzen eine starke Abneigung gegen das Abweichen von ihrer gewünschten Fortbewegungsrichtung, selbst wenn der direkte Weg überfüllt ist (Helbing et al. 2002). Die Anpassung der Bewegungsgeschwindigkeit ist daher die bevorzugte Methode zur Verhinderung von Kollisionen (Usher und Strawderman 2010). Allgemein gilt jedoch, dass Fußgänger den schnellsten statt den kürzesten Weg bevorzugen. Um den Aufwand zur Erreichung des Ziels zu minimieren, werden auch Umwege und der Gehkomfort des Wegs berücksichtigt (Helbing et al. 2002).

Fußgänger halten außerdem bestimmte Abstände zwischen sich und anderen Fußgängern oder Grenzen wie Straßen, Wände und Hindernisse. Die Größe dieser Abstände nimmt mit zunehmender Eile des Fußgängers ab. Auch eine höhere Fußgängerdichte führt zu einer Reduzierung der Abstände (Helbing et al. 2002). Die bevorzugten Abstände sind für Fußgänger unterschiedlich und sind ebenfalls von der Situation abhängig (Usher und Strawderman 2010).

Fußgänger ziehen es vor, sich mit einer individuellen gewünschten Geschwindigkeit fortzubewegen, die ihrer angenehmsten Gehgeschwindigkeit entspricht. Hierbei handelt es sich um die Geschwindigkeit, die die geringste Energie benötigt. Diese wird beibehalten, so lange es keinen Grund für eine veränderte Geschwindigkeit gibt, wie das rechtzeitige Erreichen eines Zielorts. Die bevorzugte Geschwindigkeit ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem Alter, dem Geschlecht, der Tageszeit und der Umgebung (Helbing et al. 2002).

In Paniksituationen, wie z.B. Evakuierungen, wurde beobachtet, dass die Interaktionen zwischen Personen physische Form annehmen. Sie fangen an zu drängeln und zu schieben, wodurch zusätzliche Reibung verursacht wird, die die ganze Gruppe verlangsamt (Helbing et al. 2002).

4.3.2 Verhalten bei entgegengesetzten Bewegungsrichtungen in Gängen

Gesondert betrachtet werden soll das Verhalten der Agenten beim bidirektionalen Aufeinandertreffen von zwei Fußgängerströmen. Der Fokus liegt dabei darauf, ob es die Agenten schaffen effizient den ihnen entgegenkommenden Agenten auszuweichen oder ob es in einem solchen Fall zu einem unrealistischen Stau kommt.

In der Realität ist in einem solchen Fall die Bildung von entgegengesetzt verlaufenden Fußgängerspuren zu beobachten, wenn eine ausreichend hohe Personendichte vorhanden ist (Abbildung 12). Diese Spuren bestehen aus Fußgängern, die sich in die gleiche Richtung fortbewegen wollen und ähnliche Geschwindigkeiten besitzen. Die Anzahl der sich bildenden Spuren ist von der Breite der begehbaren Fläche, der Dichte und dem Verhalten der Personen abhängig. Die Bildung von Spuren entsteht durch die Seitwärtsbewegungen der Fußgänger beim Aufeinandertreffen und Ausweichen. Diese führen dazu, dass die in entgegengesetzte Richtungen gehenden Fußgänger voneinander getrennt werden. Dadurch werden weniger Ausweichmanöver benötigt und die globale Geschwindigkeit nimmt zu (Helbing et al. 2002). Fußgänger ziehen es vor, hinter anderen Fußgänger zu gehen, anstatt sich selbst einen Weg durch die Menge zu bahnen. Durch das Fortbewegen in einer Spur ist es ihnen möglich, die Anzahl an Interaktionen, die Ausweichverhalten erfordern, zu reduzieren (Usher und Strawderman 2010). Eine bevorzugte Seite ist nicht erforderlich, da auch Spurenbildung in Situationen ohne eine solche Bevorzugung auftritt. Trotzdem kann die Bevorzugung einer bestimmten Seite einen Einfluss auf die Art und Anordnung der Spuren haben. Hierbei sind kulturelle Unterschiede erkennbar (Schadschneider et al. 2008).



Abbildung 12 - Fußgängerspuren im bidirektionalen Fußgängerstrom (Schadschneider et al. 2008)

Verhalten sich die Personen unruhig und scheren deshalb viel zu den Seiten aus, so kann dies die Bildung von Spuren verhindern und sogar zum kompletten Stillstand führen. Dieser Effekt wird als „Freezing-by-Heating“-Effekt bezeichnet und wurde in Paniksituationen beobachtet (Abbildung 13).

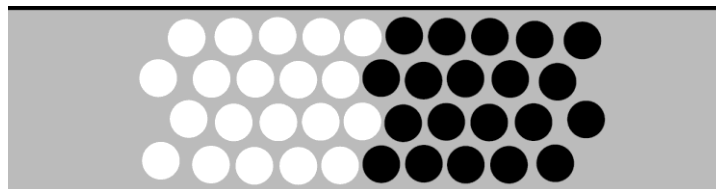


Abbildung 13 - Stillstand im bidirektionalen Fluss durch den "Freezing-by-Heating"-Effekt (Helbing et al. 2002)

Der Begriff bezieht sich auf das erhöhte Bewegungsvorkommen, dass mit dem Erhitzen von einer Flüssigkeit verglichen wird. Diese Flüssigkeit geht aber nicht wie erwartet in einen ungeordneten gasartigen Zustand über, sondern paradoxerweise in einen festen geordneten Zustand. Dieser blockierte Zustand entspricht einer regelmäßigen Struktur, die als „gefroren“ bezeichnet werden kann (Helbing et al. 2002).

4.3.3 Verhalten bei entgegengesetzten Bewegungsrichtungen an Engstellen

Ein weiterer Fall, auf den im Validierungskonzept ein Fokus gelegt wird, ist das Verhalten der Agenten, wenn zwei Fußgängerströme, die in unterschiedlichen Richtungen unterwegs sind, an einer Engstelle aufeinandertreffen.

In der Realität ist in einem solchen Fall, wenn keine Panik vorliegt, ein Wechseln der Flussrichtung erkennbar. Schafft es ein Fußgänger, die Engstelle zu durchqueren, so können andere Fußgänger mit der gleichen Bewegungsrichtung ihm ohne große Probleme folgen (Abbildung 14). Dies führt allerdings dazu, dass die Anzahl der Personen aus dieser Richtung abnimmt und dementsprechend auch der Druck aus der Richtung abnimmt. Dadurch nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass Fußgänger aus der Gegenrichtung die Engstelle durchqueren können. Die Flussrichtung ändert sich also abwechselnd (Helbing et al. 2002, Schadschneider et al. 2008).

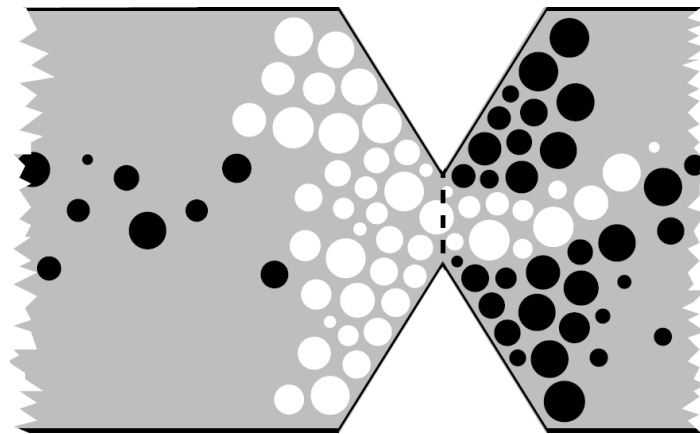


Abbildung 14 - Gegenläufige Personenströme an einer Engstelle (Helbing et al. 2002)

Generell wird beim Durchqueren von Engstellen eine Staubildung beobachtet, wenn eine ausreichend große Anzahl an Personen es eilig hat, durch die Engstelle zu gelangen. In einer solchen Situation wird das Durchqueren von Engstellen unkoordiniert. Die Schlange vor der Engstelle hat in Simulationen oft eine Halbkreis- bzw. Bogenform („Arching“). In der Realität wurden jedoch Tropfen- und Keilformen beobachtet („Wedging“) (Abbildung 15) (Helbing et al. 2002, Schadschneider et al. 2008).

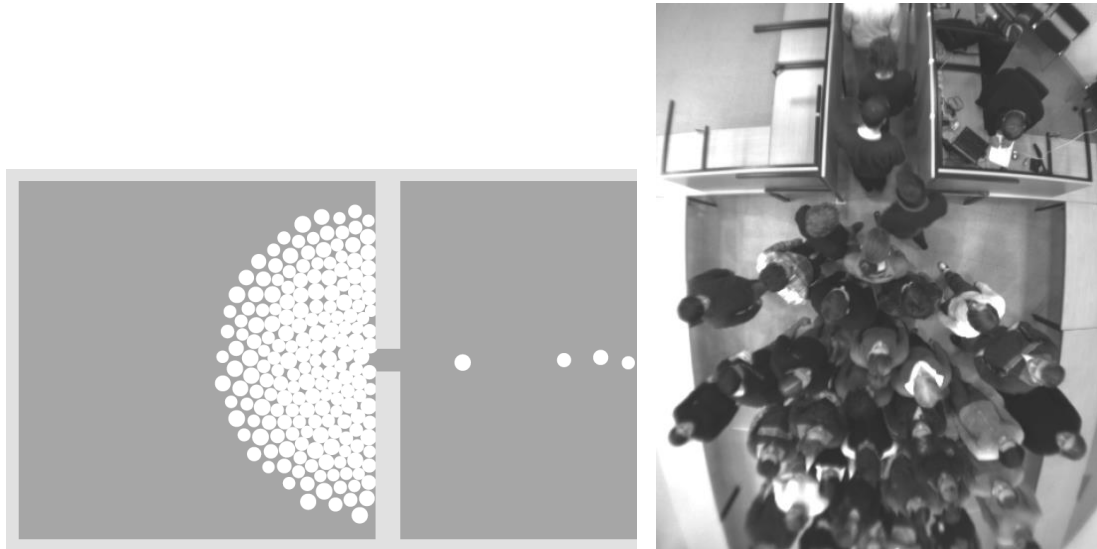


Abbildung 15 - Links: "Arching" in einer Simulation (Helbing et al. 2002)
Rechts: "Wedging" in der Realität (Schadschneider et al. 2008)

4.3.4 Verhalten bei Sackgassen

Die Betrachtung des Verhaltens der Agenten bei Sackgassen dient der Bewertung der Agentenintelligenz. Ein intelligenter Agent sollte dazu in der Lage sein, Sackgassen zu erkennen und zu umgehen. Wenn er in eine Situation kommt, in der er nicht mehr vorankommt, sollte er dies eigenständig wahrnehmen und einen alternativen Weg berechnen. Sollten Agenten an Hindernissen hängenbleiben oder in Sackgassen laufen, so sorgt dies für Simulationsergebnisse, die nicht valide sind. Es wird also erwartet, dass der Agent die Sackgassen entweder sofort umgeht oder zumindest feststellt, dass es sich um eine Sackgasse handelt, wenn er an ihrem Ende angekommen ist.

4.3.5 Mikroskopischer Vergleich mit komplexeren Szenarien

Beim mikroskopischen Vergleich mit komplexeren Szenarien sollen erneut die SMDPC-Versuche von Plaue et al. (2011) betrachtet werden. Statt Vergleiche über makroskopische Werte durchzuführen, soll aber ein direkter Vergleich des Verhaltens der Versuchsteilnehmer in den Versuchen mit dem Verhalten der Agenten in den Simulationen durchgeführt werden. Zusätzlich sollen die Simulationen auf die zuvor beschriebenen Verhaltensweisen überprüft werden. Da es sich um Kreuzungen handelt, ist außerdem auf in der Realität an Kreuzungen beobachtetes emergentes Verhalten zu überprüfen.

An Kreuzungen können verschiedene Bewegungsmuster beobachtet werden. Diese sind kurzlebig und instabil. Bei Kreuzungen mit vier sich kreuzenden Fußgängerströmen kann sich ein zeitweiser Kreisverkehr bilden (Abbildung 16). Solch ein Kreisverkehr ist zwar mit kleinen Umwegen für die Fußgänger verbunden, jedoch wird die Häufigkeit von Verlangsamungen, Stoppen und Ausweichmanövern deutlich reduziert, so dass die Fußgängerbewegung effizienter und reibungsloser wird (Helbing et al. 2002, Schadschneider et al. 2008).

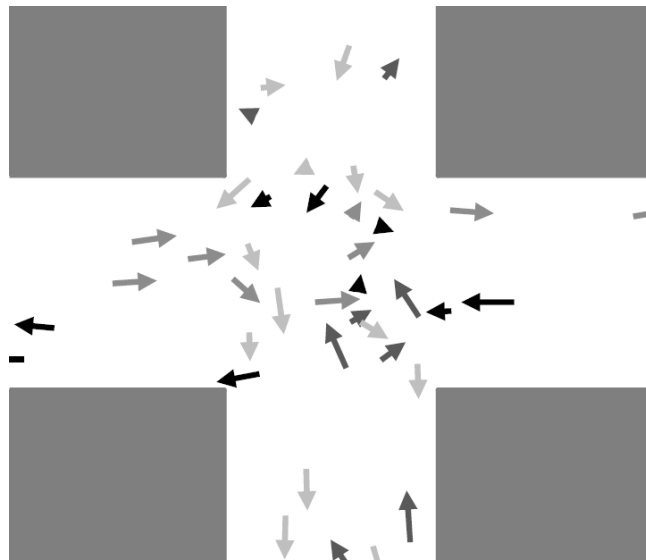
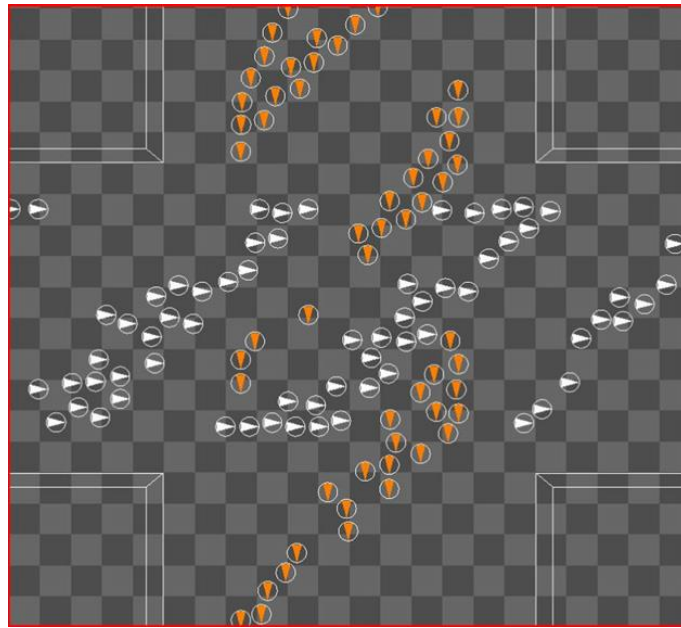


Abbildung 16 - Kurzlebiger Kreisverkehr an einer Kreuzung mit Personenströmen aus allen vier Richtungen (Helbing et al. 2002)

Gibt es an einer Kreuzung nur zwei Bewegungsrichtungen, so bilden sich Streifen, in denen sich die Fußgänger bewegen. Kommen sich die Fußgänger aus exakt entgegengesetzten Richtungen entgegen, dann entspricht dies der Spurenbildung. Ist dies allerdings nicht der Fall, so bilden die Fußgänger Streifen, um die Kreuzung zu überqueren (Abbildung 17). Mit diesen Streifen bewegen sich die Fußgänger vorwärts. Um weiterhin den Personen vor ihnen zu folgen, müssen sich die nachfolgenden Fußgänger im Streifen jedoch seitwärts bewegen, damit sie nicht mit den von der Seite auf sie treffenden Fußgängern aus der anderen Bewegungsrichtung kollidieren. Die Streifen sind dadurch Spuren, die schräg über die Kreuzung verlaufen (Usher und Strawderman 2010).



**Abbildung 17 - Fußgängerstreifen bei zwei sich kreuzenden Fußgängerströmen
(Usher und Strawderman 2010)**

Um Vergleiche des Modellverhaltens in den SMDPC-Versuchen mit dem realen Verhalten der Teilnehmer dieser Versuche zu ermöglichen, müssen zuerst die Videoaufnahmen oder Bewegungslinien der Versuche analysiert werden. Mit einem selbstentwickelten Programm, dem „Scenario-Player“, ist es möglich, die Bewegungslinien nach einer vorherigen Konvertierung in ein kompatibles Format wiederzugeben. Da auch die Aufzeichnungen der Simulationssysteme mit diesem Programm wiedergegeben werden, hätte dies den Vorteil, dass die Darstellungen identisch wären und somit die Vergleiche erleichtert werden würden. Allerdings zeigt sich bei der Wiedergabe der Bewegungen aus den Bewegungslinien, dass nicht der gesamte in den Videoaufzeichnungen sichtbare Bereich abgedeckt wird. Aus diesem Grund findet stattdessen eine direkte Auswertung der

Videoaufnahmen statt. Auf den „Scenario-Player“ wird in einem späteren Kapitel genauer eingegangen. Die Analyse der realen SMDPC-Videoaufzeichnungen findet zusammen mit der Analyse der Simulationsaufzeichnungen im Kapitel zur Auswertung der Versuchsergebnisse statt.

5 Entwurf von Versuchen zur Validierung

Dieses Kapitel konkretisiert das Validierungskonzept durch die Beschreibung des Vorgehens, von Messungen und Berechnungen. Es folgt eine genaue Definition von durchzuführenden Szenarien, sowie dem Aufbau und Ablauf zur Bestimmung der makroskopischen Werte.

5.1 Vorgehen

Zuerst wurden einige Erweiterungen an den Simulationssystemen durchgeführt. Alle Simulationssysteme sollten dazu in der Lage sein, den Agenten unter Angabe einer Normalverteilung unterschiedliche maximale Bewegungsgeschwindigkeiten zuzuordnen, damit eine realistische Verteilung der Geschwindigkeiten nach Weidmann (1993) erreicht werden kann. Diese Funktion besaß jedoch noch keines der Systeme, so dass sie erst in jedes der Systeme eingebaut werden musste. Eine weitere Voraussetzung war die Möglichkeit, die Bewegungsdaten der Agenten während einer Simulation aufzuzeichnen. Auch dies unterstützte noch keines der Systeme. Um die Bewegungsdaten nun aufzeichnen zu können, wurde für jedes System Programmcode geschrieben, der dafür sorgt, dass zu jedem Simulationsschritt t und für jeden Agenten jeweils die eindeutige Agentenkennung id , seine x -Position zum Simulationsschritt $x(t)$ und y -Position zum Simulationsschritt $y(t)$ aufgezeichnet wird. Zusätzlich wird der Name des Agenten gespeichert, welcher unter anderem zur Zuordnung der Agenten zu Gruppen genutzt werden kann. Es ergibt sich also folgendes Datenbankschema:

agent(id INTEGER, name STRING, x DOUBLE, y DOUBLE, t LONG)

Um eine möglichst einfache und portable Lösung zum Aufzeichnen dieser Informationen zu haben, wurde diese Funktionalität mit Hilfe von SQLite umgesetzt. Jeder Simulationslauf erstellt eine eigene Datenbankdatei. Eine Installation eines Datenbankmanagementsystems ist nicht erforderlich. Die Datenbankdateien lassen sich später problemlos sichern, betrachten und auswerten.

Nachdem die Systeme um die fehlenden Funktionen erweitert wurden, wurde eine Vielzahl von Versuchsszenarien in „MARS LIFE“, „WALK“ und „PedSim“ umgesetzt, mit deren Hilfe Daten aus den Simulationssystemen gewonnen werden können, mit denen eine Validierung mit dem im vorherigen Kapitel vorgestellten Konzept durchgeführt werden kann. Die Szenarien sind dabei für jedes Simulationssystem und Bewegungsmodell identisch, so dass

sich die gewonnenen Daten gut miteinander vergleichen lassen. Jedoch mussten bei den Umsetzungen gewisse Dinge bedacht werden.

Bei der Umsetzung der Szenarien für „PedSim“ musste bedacht werden, dass „PedSim“ im Gegensatz zu „WALK“ und dem Fußgängermodell in „MARS LIFE“ nicht mit SI-Einheiten arbeitet. Werden die Meterangaben der Versuchsaufbauten 1-zu-1 in eine Szenariodefinition von „PedSim“ übertragen, so zeigt sich kein realistisches Verhalten. Die Räume sind zu klein und es passen nur sehr viel weniger Agenten in den Raum, als eigentlich möglich sein sollte. Die Abstoßungskraft der Agenten ist so hoch, dass Wände einfach durchquert werden. Allerdings können einzelne Agenten Engstellen nicht durchqueren, die eigentlich breit genug für sie sein sollten. Durch eine reine Kalibrierung der Kräfte ließ sich kein realistisches Verhalten erreichen. Durch Versuche zeigte sich, dass ein realistisches Verhalten auftritt, wenn für die „PedSim“-Größeneinheiten 5-mal höhere Werte angegeben werden, als die Meterangaben für das Szenario betragen. Ein Meter entspricht somit 5 PedSim-Größeneinheiten. Dementsprechend wurden auch die Maximalgeschwindigkeiten der Agenten angepasst. Nach diesen Anpassungen wurden die Simulationsparameter weiter kalibriert, bis das Verhalten den Erwartungen entsprach. Bei der Aufzeichnung der Simulationsläufe werden die Größeneinheiten jeweils in SI-Einheiten umgerechnet, so dass die Aufzeichnungen der „PedSim“-Versuche nicht anders als die Aufzeichnungen der anderen Simulationssysteme behandelt werden müssen.

Bei der Umsetzung in „WALK“ und in dem „MARS LIFE“-Fußgängermodell musste beachtet werden, dass bei beiden nur Hindernisse in der Form von Quadern vorhanden sein können. Diese Quader können keine Rotation haben, so dass Schrägen durch viele kleinere Hindernisse approximiert werden müssen. Dies war jedoch nur für die Umsetzung des komplexen Szenarios relevant. Bei diesem wurden jedoch die Schrägen durch eine so hohe Anzahl an kleineren Hindernissen ersetzt, dass die Einschränkung für die Betrachtung des Agentenverhaltens keine Auswirkungen hat (Abbildung 18).

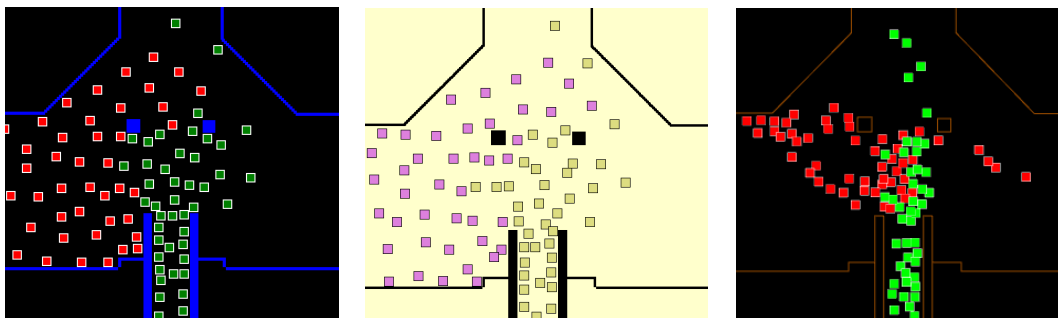


Abbildung 18 - Ausschnitte aus dem komplexen Szenario, das mit dem Fußgängermodell von „MARS LIFE“ (links), „WALK“ (Mitte) und „PedSim“ (rechts) umgesetzt wurde.

Für die „ModularAgents“ in „WALK“ wurden noch weitere Versuchsszenarien umgesetzt, bei denen die Agenten sozialen Gruppen angehören. Hierdurch lässt sich der Einfluss des Vorhandenseins solcher Gruppen auf die Validität der Versuchsergebnisse betrachten. Die anderen Bewegungsmodelle bzw. Agenten unterstützen keine Zuordnungen der Agenten zu sozialen Gruppen.

Weitere Anpassungen der Simulationsparameter vor der Ausführung der Szenarien betrafen die Agentenausmaße. Die Agenten sollten für jedes der Simulationsmodelle möglichst gleich sein. Ein Agent in „WALK“ ist ein Würfel mit einer Seitenlänge von 0,4 Meter. Um eine vergleichbare Ausgangssituation herzustellen, wurden die Agenten des „MARS LIFE“-Fußgängermodells auf die gleiche Größe festgelegt. „PedSim“ besitzt einen Agentenparameter für den Radius des Agenten, welcher in die Berechnung der Kräfte eingeht, dieser wurde auf 0,2 Meter festgelegt. Einen festen Körper wie die Agenten in „WALK“ und dem „MARS LIFE“-Fußgängermodell können die „PedSim“-Agenten jedoch nicht haben.

Als nächster Schritt folgte die mehrfache Ausführung und Aufzeichnung der Versuche. Die Größe eines Simulationsschritts wurde dabei auf 1/15 Sekunde festgelegt. Hierdurch wird eine gute Vergleichbarkeit der Simulationen mit Videoaufzeichnungen, die mit 15 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet wurden, gewährleistet. Ein Beispiel hierfür sind die SMDPC-Bewegungsdaten und Videoaufzeichnungen (Plaue et al. 2011), welche als ein Teil des Validierungskonzepts eingesetzt werden.

Nach den Versuchsdurchführungen mussten die Datenbanken ausgewertet werden. Hierfür wurde eine Validierungssoftware entwickelt, welche alle für die Validierung mit dem Validierungskonzept relevanten Werte berechnet, diese in CSV-Dateien ausgibt und grafische Darstellungen der Versuchsergebnisse erstellt, die es erlauben, die verschiedenen Bewegungsmodelle miteinander und mit den Daten aus der Realität zu vergleichen.

5.2 Messungen und Berechnungen

Um Vergleiche der durchgeführten Versuche mit dem Fundamentaldiagramm und den Engstellendiagrammen zu ermöglichen, müssen verschiedene Werte aus den aufgezeichneten Bewegungsdaten der Agenten berechnet werden. Bei diesen Werten handelt es sich um die Geschwindigkeiten der Agenten, die Agentendichte in einem Messbereich und den Agentenfluss aus einem Messbereich. Zusätzlich zu der allgemeinen Geschwindigkeit der Agenten ist auch die Geschwindigkeit der Agenten in Flussrichtung für die Auswertung von Interesse, weil diese angibt, wie schnell die Agenten vorankommen. Neben der Geschwindigkeitsberechnung für die einzelnen Agenten findet auch die Berechnung von durchschnittlichen Geschwindigkeiten in Messbereichen statt. Die Auswahl der zu berechnenden Werte und die Art und Weise, wie diese bestimmt werden, hat sich bereits bei früheren Arbeiten zu dem Thema bewährt (Woggan 2014a, Woggan 2014b).

Die allgemeine Geschwindigkeit setzt sich aus einer Bewegung in x-Richtung und einer Bewegung in y-Richtung zusammen (Abbildung 19). Die grafische Darstellung dieses Zusammenhangs zeigt, dass die Vektoren ein rechtwinkliges Dreieck bilden. Durch Anwendung des Satz des Pythagoras lässt sich somit die allgemeine Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeit in x-Richtung und der Geschwindigkeit in y-Richtung bestimmen (1).

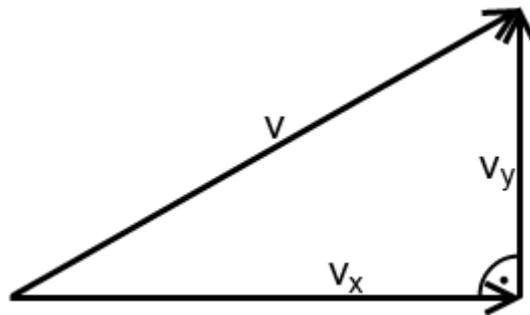


Abbildung 19 - Bestimmung der allgemeinen Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeit in x-Richtung und der Geschwindigkeit in y-Richtung nach dem Satz des Pythagoras

Im Folgenden sei $v(k)$ die allgemeine Geschwindigkeit des Agenten k , $v_x(k)$ die Geschwindigkeit des Agenten k in x-Richtung und $v_y(k)$ die Geschwindigkeit des Agenten k in y-Richtung.

$$v(k) = \sqrt{v_x(k)^2 + v_y(k)^2} \quad (1)$$

Da der optimale Weg zum Ziel bei den betrachteten Szenarien für den freien Fluss immer auf der x-Achse verläuft, kann der Anteil der Geschwindigkeit, der einer Bewegung in x-Richtung entspricht, als Geschwindigkeit in Flussrichtung angesehen werden. Diese gibt an,

wie schnell sich ein Agent seinem Zielpunkt annähert. Sie zeigt also wie gut sich der Agent in der aktuellen Situation vorwärtsbewegen kann und wie stark der Agent durch andere Agenten im Vorankommen gehindert wird (2).

Im Folgenden sei $v_{x,t}(k)$ die Geschwindigkeit eines Agenten k in x-Richtung zum Zeitschritt t , $x_t(k)$ die x-Position des Agenten k zum Zeitschritt t , $x_{t-1}(k)$ die x-Position des Agenten k zum vorherigen Zeitschritt und T die Länge eines Zeitschritts.

$$v_{x,t}(k) = \frac{x_t(k) - x_{t-1}(k)}{T} \quad (2)$$

Die Geschwindigkeit in y-Richtung bzw. Ausweichgeschwindigkeit gibt an, wie stark ein Agent sich seitwärts bewegen muss. Diese Bewegungen bringen ihn nicht seinem Ziel näher, sondern dienen dem Ausweichen oder Überholen anderer Agenten (3).

Im Folgenden sei $v_{y,t}(k)$ die Geschwindigkeit eines Agenten k in y-Richtung zum Zeitschritt t , $y_t(k)$ die y-Position des Agenten k zum Zeitpunkt t , $y_{t-1}(k)$ die y-Position des Agenten k zum vorherigen Zeitschritt und T die Länge eines Zeitschritts.

$$v_{y,t}(k) = \frac{y_t(k) - y_{t-1}(k)}{T} \quad (3)$$

Für die Vergleiche mit dem Fundamentaldiagramm werden nicht die einzelnen Geschwindigkeiten der Agenten betrachtet, sondern der Durchschnitt der Geschwindigkeiten aller Agenten, die sich in einem definierten Messbereich befinden (4).

Im Folgenden sei $v_{avg, \text{Messbereich}}$ die durchschnittliche Geschwindigkeit der Agenten im Messbereich, $M_{\text{Messbereich}}$ die Menge aller Agenten im Messbereich und $v(k)$ die allgemeine Geschwindigkeit eines Agenten k .

$$v_{avg, \text{Messbereich}} = \frac{\sum_{k \in M_{\text{Messbereich}}} v(k)}{|M_{\text{Messbereich}}|} \quad (4)$$

Für die Vergleiche mit dem Fundamentaldiagramm wurden auch durchschnittliche Flussgeschwindigkeiten berechnet (5). Können sich die Agenten ohne großes Ausweichen bewegen, so weicht dieser Wert nicht stark von der durchschnittlichen allgemeinen Agentengeschwindigkeit ab. Kommt es zu vielen Ausweichmanövern, so kann es jedoch große Unterschiede zwischen den beiden Werten geben. Beide Werte sind aussagekräftig. Die allgemeine Geschwindigkeit sagt aus, wie frei sich der Agent noch bewegen kann. Die Flussgeschwindigkeit hingegen sagt aus, wie schnell sich der Agent seinem eigentlichen Ziel

annähert bzw. wie schnell sich die Gruppe auf das Ziel zubewegt. Vor allem für Evakuierungssimulationen ist die Flussgeschwindigkeit von Interesse, da sie einen großen Einfluss auf die Entfluchtungszeit hat.

Im Folgenden sei $v_{x, avg, Messbereich}$ die durchschnittliche Geschwindigkeit der Agenten im Messbereich in Flussrichtung, $M_{Messbereich}$ die Menge aller Agenten im Messbereich und $v_x(k)$ die Geschwindigkeit eines Agenten k in Flussrichtung.

$$v_{x, avg, Messbereich} = \frac{\sum_{k \in M_{Messbereich}} v_x(k)}{|M_{Messbereich}|} \quad (5)$$

Zusätzlich zu der durchschnittlichen Geschwindigkeit in einem Messbereich muss für den Vergleich mit dem Fundamentaldiagramm zum gleichen Zeitpunkt auch die Agentendichte (bzw. Personendichte) in diesem Messbereich bestimmt werden, die in Agenten (bzw. Personen) pro Quadratmeter angegeben wird. Die einfachste Bestimmung der Agentendichte würde die Agenten nur als „Moving Point Objects“, d.h. Punkte ohne Dimensionen, betrachten und zählen, wie viele Agenten ihren Mittelpunkt im Messbereich besitzen. Der ermittelte Wert würde durch die Fläche des Messbereichs dividiert werden. Allerdings würde dies keine Agenten berücksichtigen, die sich nur zu einem Teil im Messbereich befinden, aber dadurch trotzdem auch dafür sorgen, dass die Agenten im Messbereich weniger Platz haben. Berücksichtigt würde auch nicht der gegenteilige Fall, wenn ein Agent zwar seinen Mittelpunkt im Messbereich besitzt, sich aber nicht die gesamte Agentenfläche im Messbereich befindet. In einem solchen Fall hätten die anderen Agenten mehr Platz, was aber nicht durch die einfach bestimmte Agentendichte widerspiegelt würde. Je kleiner der Messbereich ist, desto relevanter wird eine genauere Berechnung der Agentendichte. Damit aus der Agentendichte auch wirklich erkannt werden kann, wie viel Bewegungsraum die Agenten noch im Messbereich haben, werden daher in der verbesserten Berechnungsweise nicht nur die Mittelpunkte der Agenten betrachtet, sondern betrachtet, wie groß der Teil der Agentenfläche jedes Agenten im Messbereich ist (6).

Im Folgenden sei $\rho_{Messbereich}$ die berechnete Dichte, M die Menge aller Agenten, $A_{Messbereich}(k)$ die Fläche des Agenten k , die sich im Messbereich befindet, A_{Agent} die vollständige Fläche eines Agenten und $A_{Messbereich}$ die Fläche des Messbereichs.

$$\rho_{Messbereich} = \frac{\sum_{k \in M} A_{Messbereich}(k)}{A_{Agent}} / A_{Messbereich} \quad (6)$$

Für die Vergleiche mit den Engstellendiagrammen muss der Agentenfluss (bzw. der Personenfluss) durch die Engstelle berechnet werden, der in Agenten (bzw. Personen) pro

Sekunde gemessen wird. Der Personenfluss kann über einen frei festgelegten Zeitraum bestimmt werden (7). In den durchgeführten Versuchen begann die Messung, wenn der erste Agent die Engstelle durchquert hatte.

Im Folgenden sei f der Personenfluss in Personen pro Sekunde, $N_{\text{Messbereich}, t}$ die Anzahl an Agenten im Messbereich zum Zeitschritt t , d die Anzahl an Zeitschritten, über die der Fluss bestimmt wird und T die Länge eines Zeitschritts in Sekunden.

$$f = \frac{N_{\text{Messbereich}, t} - N_{\text{Messbereich}, t+d}}{d} / T \quad (7)$$

5.3 Szenarien und Versuche

Um die für die Validierung benötigten Werte zu erlangen, wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Versuchsreihen und Versuchsszenarien definiert. Der Schwerpunkt lag jeweils darauf, dass die für das Validierungskonzept relevanten Werte auf eine verlässliche Weise bestimmt werden können.

5.3.1 Versuche mit unterschiedlich hohen Agentendichten

Um Vergleiche der Simulationen mit dem Fundamentaldiagramm durchführen zu können, wird ein Versuchsaufbau und eine Versuchsauswertung genutzt, die sich bereits in früheren Arbeiten bewährt hat (Woggan 2014a, Woggan 2014b). Allerdings wurden für diese Arbeit einige Verbesserungen an dem hierfür genutzten Versuch vorgenommen.

Der Versuch wird mit unterschiedlicher Anzahl an Agenten durchgeführt. Bei früheren Versuchsdurchführungen wurde für manche Simulationsmodelle eine geringere Menge an unterschiedlichen Agentenanzahlen simuliert. Dies ist jetzt nicht mehr der Fall und für jedes Simulationsmodell wird die gleiche feine Abstufung der Agentenanzahl genutzt. Hierdurch werden die Versuchsergebnisse der unterschiedlichen Modelle besser vergleichbar.

Ein weiterer Unterschied liegt bei der Geschwindigkeit der Agenten des Versuchs. Zuvor war es nicht bei allen Simulationsmodellen möglich, normalverteilte maximale Bewegungsgeschwindigkeiten zu nutzen. Während für die Versuche mit dem „WALK“-Simulationssystem sowohl Versuchsdurchführungen mit Agenten mit identischen maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten als auch mit unterschiedlichen maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten durchgeführt wurden, wurden für die Versuchsdurchführungen mit „PedSim“ nur Agenten mit identischen maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten simuliert. Durch Anpassungen an „PedSim“ und den dazugehörigen Szenariodefinitionen werden nun auch für dieses Modell unterschiedliche

Agenten simuliert. Das Bewegungsmodell in „MARS LIFE“ unterstützt ebenfalls eine Normalverteilung der maximalen Bewegungsgeschwindigkeiten der Agenten. Hierdurch wird es nun ermöglicht, den Effekt von unterschiedlich schnellen Agenten in allen Bewegungsmodellen zu betrachten.

Eine zusätzliche Erweiterung gegenüber vorherigen Versuchen stellt die Simulation von sozialen Gruppen dar. Die Mitglieder dieser sozialen Gruppen haben einen gewissen Zusammenhalt und versuchen sich als Gruppe fortzubewegen. Um die Auswirkungen der Existenz solcher Gruppen auf die Flussgeschwindigkeit in den Simulationen betrachten zu können, werden ansonsten identische Versuche mit und ohne soziale Gruppen simuliert.

Ebenfalls wurde die Anzahl an Versuchsdurchläufen erhöht, wodurch sich genauere und verlässlichere Ergebnisse erlangen lassen, da der Einfluss von Ausreißern reduziert wird. Ein Problem, welches dafür sorgte, dass jeder Versuchsdurchlauf in „PedSim“ identische Ergebnisse produzierte, da die Startverteilung jedes Mal identisch war und ansonsten keine stochastischen Einflüsse in der Simulation vorhanden sind, wodurch trotz mehrmaliger Durchführung des Versuchs zum Schluss nur ein einziges Ergebnis zur Verfügung stand, wurde behoben.

Das Szenario für die Versuchsreihe, die den Vergleichen mit dem Fundamentaldiagramm dient, hat einen einzigen Raum mit den Ausmaßen von 40 Meter Länge und 10 Meter Breite als architektonischen Grundriss. Dieser Raum ist komplett leer und enthält keine Hindernisse oder Engstellen (Abbildung 20).

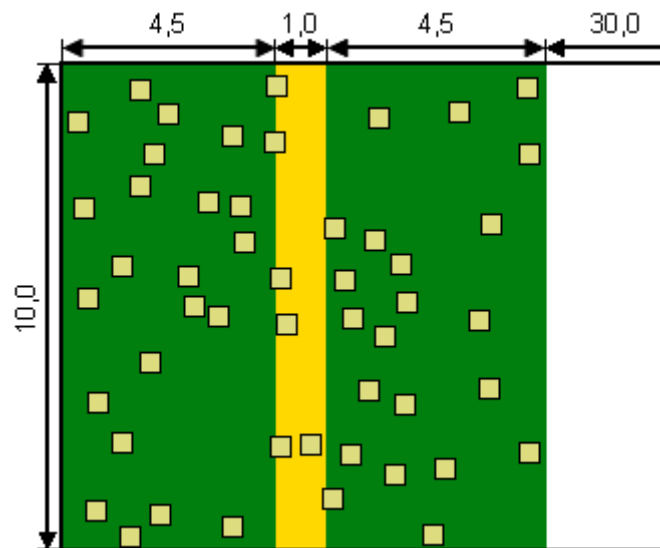


Abbildung 20 - Aufbau der Versuche zum Fundamentaldiagramm. Der grüne Bereich ist der Startbereich der Agenten (Quadrate), der gelbe Bereich ist der Messbereich und der weiße Bereich rechts ist ein Teil des Auslaufbereichs der Agenten. (Größenangaben in Meter)

Die Agenten werden zu Beginn des Versuchs zufällig in einem Quadrat mit 10 Meter Seitenlänge platziert, das sich am linken Ende des Raums befindet. Von dort bewegen sie sich zur rechten Seite des Raums, wo sie in der „WALK“- und „MARS LIFE“-Simulation verschwinden und bei der „PedSim“-Simulation im Kreis laufen. Ihre maximale Bewegungsgeschwindigkeit ist hierbei von der Versuchsreihe abhängig (Tabelle 2).

Tabelle 2 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Fundamentaldiagramm

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1,34 m/s bei Versuchen mit identischen Agenten • normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Soziale Gruppen	<ul style="list-style-type: none"> • Versuche mit einzelnen Agenten • Versuche mit sozialen Gruppen aus 3 „ModularAgents“ in „WALK“
Messungen	
Art der Messung	Messung der Geschwindigkeiten und Agentendichte im Messbereich
Zeitpunkt der Messung	Start der Messung 1 s nach Versuchsstart
Dauer der Messungen	Mittelung der Geschwindigkeiten über 1 s
Versuch	
Anzahl der Agenten	1, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 oder 500 Agenten
Dauer der Versuche	20 s pro Durchlauf
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Neben einer Versuchsreihe, bei der alle Agenten die gleiche maximale Geschwindigkeit besitzen, wurde eine Versuchsreihe erstellt, bei der die maximalen Geschwindigkeiten der Agenten einer Normalverteilung nach Weidmann (1993) unterliegen. Hiermit lässt sich der Einfluss von unterschiedlichen maximalen Geschwindigkeiten der Agenten auf das Fundamentaldiagramm betrachten. Diese Versuchsreihe hat dadurch eine sehr viel größere Übereinstimmung mit den in der Realität vorhandenen Bedingungen, da Personen sich in der Realität immer unterschiedlich schnell bewegen werden. Langsamere Personen bremsen schnellere Personen aus und zwingen diese zu Ausweichbewegungen.

Für das „WALK“-Simulationssystem und die dazugehörigen „ModularAgents“ gibt es weitere Versuchsreihen, bei denen die Agenten sozialen Gruppen zugeordnet sind. Dies macht die in der Simulation vorhandene Situation noch realistischer. Gruppengrößen in der Realität sind unter anderem vom Ort, der Zeit und anderen Parametern abhängig, wodurch es schwer ist, eine durchschnittliche Gruppengröße zu bestimmen (Moussaïd et al. 2010). Für die Versuche wurde eine konstante Gruppengröße von 3 Agenten gewählt. Mit den

Versuchen mit sozialen Gruppen soll überprüft werden, ob das Vorhandensein von sozialen Gruppen vernachlässigbar ist, oder ob es große Auswirkungen auf den Ablauf der Simulationen haben kann.

Der Bereich, in dem die Messungen der Dichten und Geschwindigkeiten durchgeführt werden, ist ein Rechteck mit 1 Meter mal 10 Metern Seitenlängen. Der Mittelpunkt dieses Rechtecks befindet sich genau am Mittelpunkt des Startbereichs der Agenten. Durch diesen Messbereich können über die gesamte Breite des Raums genau in der Mitte der Agentengruppe die Dichte- und Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden. Dadurch, dass diese Messungen in der Mitte der Gruppe passieren, soll verhindert werden, dass die Agenten sich ungehindert bewegen können, wie es zwar am rechten Rand des Startbereichs der Agenten möglich ist, was allerdings nicht die Situation in einer hohen Personendichte oder einem Stau wäre.

Für die Auswertung der einzelnen Versuche soll pro Versuch ein Dichte- und Geschwindigkeitspaar entstehen. Hierfür werden pro Zeitschritt die Geschwindigkeiten aller Agenten im Messbereich gemittelt und die Dichte in diesem Bereich berechnet. Da diese Werte jedoch noch starke Schwankungen besitzen, werden sie nochmals über 1 Sekunde gemittelt. Die Berechnung dieser Werte findet jedoch erst 1 Sekunde nach Versuchsstart statt. Da die Startverteilung der Agenten komplett zufällig ist, kann es zum Start der Simulation in „WALK“ und „PedSim“ noch zu vielen Überlappungen kommen. Diese werden von den Simulationssystemen automatisch korrigiert, was jedoch mehrere Zeitschritte in Anspruch nehmen kann. Durch diese Korrekturen, die das Ändern der Agentenpositionen zur Folge haben, können unrealistisch hohe Geschwindigkeiten und Dichten gemessen werden. Durch einen verzögerten Beginn der Berechnungen werden diese unrealistischen Werte nicht betrachtet. Eine noch spätere Berechnung der Werte oder Mittelung der Werte über eine noch längere Zeit wird nicht durchgeführt, da sich der im Versuch provozierte Stau mit der Zeit wieder auflöst und möglichst hohe Dichtewerte gemessen werden sollten. Das Bewegungsmodell in „MARS LIFE“ besitzt dieses Problem nicht, da die ESC verhindert, dass Agenten sich überschneiden können. Es wird so lange versucht den Agenten zu platzieren, bis eine Position gefunden wurde, an dem keine Kollision existiert. Da allerdings die Bestimmung der Werte für alle Simulationssysteme auf die gleiche Art und Weise stattfinden soll, damit die Ergebnisse vergleichbar sind, findet diese für das „MARS LIFE“-Modell zum gleichen Zeitpunkt wie in „WALK“ und „PedSim“ statt.

Die kompletten Aufzeichnungen der Versuche betragen jeweils 20 Sekunden. Für das beschriebene Berechnungsverfahren sind auch noch kürzere Versuchsdurchläufe nutzbar, jedoch erlauben längere Versuchsdurchläufe auch noch, den Verlauf der Dichte und der Geschwindigkeit über eine längere Zeit zu betrachten. Noch längere Versuchsdurchläufe

waren mit der PedSim-Simulation nicht durchführbar, da diese dann mit den definierten Szenarien abstürzte.

Die einzelnen Versuchsreihen zum Fundamentaldiagramm unterscheiden sich durch die Anzahl der Agenten, die im Startbereich platziert werden. Hierdurch können unterschiedlich hohe Personendichten erzeugt werden. Bei den Versuchen werden bis zu 500 Agenten im Startbereich platziert. Jeder Versuch wurde 10-mal durchgeführt, so dass sich Ausreißer leichter erkennen lassen. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch keine großen Schwankungen, so dass für die Interpretation des Verhaltens der Simulation keine weiteren Durchführungen nötig sind.

Ein etwas anderer Versuchsaufbau und eine veränderte Berechnung der Dichte und Geschwindigkeit finden für die Versuchsdurchläufe mit einem einzigen Agenten statt. Bei diesen Versuchsdurchläufen kann es sein, dass der Agent, wenn dieser frei im Startbereich platziert wird, niemals den Messbereich betritt, weil er sich schon zu Beginn des Versuchs durch die zufällige Positionierung hinter dem Messbereich befindet bzw. sich zum Zeitpunkt der Messung nicht in dem Messbereich befindet. Aus diesem Grund wird der Messbereich für die Versuchsdurchläufe mit einem einzigen Agenten als unendlich groß angesehen. Der Agent befindet sich zum Zeitpunkt der Messung also definitiv im Messbereich und die Dichte im Messbereich wird als 0 Agenten pro Quadratmeter angesehen, da es keine Behinderung des Agenten durch andere Agenten gibt. Ein weiterer Unterschied besteht bei den Versuchsdurchläufen mit einem einzigen Agenten, die mit normalverteilten Maximalgeschwindigkeiten arbeiten. Bei diesen würden bei 10 Durchläufen mit einem einzigen Agenten sehr stark schwankende Geschwindigkeitswerte bestimmt werden, da die Geschwindigkeit nicht über eine große Anzahl an Agenten gemittelt werden kann. Da die durchschnittliche Geschwindigkeit bei den Versuchen mit den normalverteilten Maximalgeschwindigkeiten jedoch gegen 1,34 Meter pro Sekunde gehen sollte, wird für die Versuche mit nur einem Agenten die Maximalgeschwindigkeit dieses Agenten auf diesen Wert festgelegt. Dies ist problemlos möglich, weil bei einem einzigen Agenten keine Beeinflussung von anderen Agenten durch langsamere oder schnellere Agenten vorhanden sein kann.

5.3.2 Versuche mit unterschiedlich breiten Engstellen

Das Szenario der Versuchsreihe für den Vergleich mit den Engstellendiagramme, das dem Aufzeigen des Zusammenhangs von Engstellenbreite und Personenfluss dient, stellt ebenfalls eine Verbesserung früherer Versuche dar (Woggan 2014a, Woggan 2014b). Zum einen fanden auch hier die zuvor beschriebenen Angleichungen der Versuchsdurchführungen für die verschiedenen Modelle statt: Es gibt jeweils eine Versuchsreihe mit Agenten, die die gleiche maximale Bewegungsgeschwindigkeit besitzen und eine weitere Versuchsreihe, bei der die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten normalverteilt ist. Auch wurden Versuche mit sozialen Gruppen hinzugefügt.

Außerdem wurde die Anzahl der Durchläufe pro Versuch angepasst und erhöht, so dass jeder Versuch 10-mal durchgeführt wird. Zum anderen wurden aber auch Anpassungen am Aufbau des Versuchs vorgenommen.

Bei früheren Versuchen zur Bestimmung des Flusses durch eine Engstelle war der Startbereich der Agenten so gewählt, dass die Agenten nicht direkt vor der Engstelle starteten, sondern erst einen bestimmten Weg zurücklegen mussten, bis sie die Engstelle erreichten. Die Messung der Flussrate durch die Engstelle startete mit der ersten Durchquerung und lief dann für eine bestimmte Zeit. Bei unterschiedlich schnellen Agenten war es nun möglich, dass ein Agent die Engstelle früher als die anderen Agenten erreicht und somit auch früher durchquert. Die Zeitmessung würde jedoch trotzdem bereits mit seiner Durchquerung starten, wodurch eine zu geringe Flussrate für den Versuchslauf bestimmt werden würde, da keine weiteren Agenten die Engstelle passieren, bis sie diese ebenfalls erreicht haben. Beim neuen Versuchsaufbau starten alle Agenten in einem Bereich vor der Engstelle, sie erreichen also zur gleichen Zeit die Engstelle und die Flussrate kann genauer bestimmt werden.

Eine weitere Angleichung des Versuchs für die verschiedenen Bewegungsmodelle bzw. Simulationssysteme konnte bei der Engstellenbreite vorgenommen werden. Diese war bei früheren Versuchen für „PedSim“ höher als für die anderen Systeme, da die „PedSim“-Agenten Probleme hatten, die in den Versuchen vorhandenen Engstellen zu durchqueren. Eine Anpassung der Abstoßungskraft der Wände führte zwar dazu, dass die Agenten die Engstellen besser durchqueren konnten, allerdings durchquerten auch einige Agenten die Wände selbst. Eine Reduzierung der Abstoßungskraft der Agenten führte zu keinen Verbesserungen. Aus diesem Grund wurde damals von der Anpassung dieser Kräfte abgesehen. Dieses Problem tritt jedoch bei der aktuellen Version 2.3 von „PedSim“ nicht mehr auf. Durch Kalibrierung der Kräfte können die „PedSim“-Agenten nun mit den gleichen Engstellenbreiten überprüft werden wie die Agenten der anderen Modelle bzw. Systeme.

Der architektonische Grundriss des Szenarios besteht aus 2 Räumen, die durch eine Engstelle verbunden sind (Abbildung 21). Die Gesamtfläche beträgt wieder 40 Meter mal 10 Meter. Der linke Raum ist ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 10 Meter. Dieser wird an der rechten Seite mittig über eine Engstelle mit einer Länge von 0,4 Meter und einer in den verschiedenen Versuchen variierenden Breite mit einem Raum, der den Rest der Gesamtfläche einnimmt, verbunden.

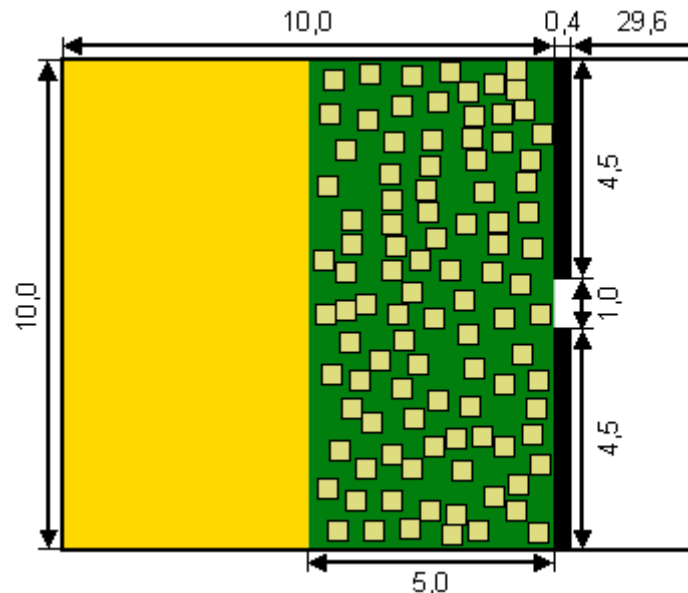


Abbildung 21 - Aufbau des Versuchs mit einer 1 Meter breiten Engstelle. Die Agenten (Quadrate) befinden sich zu Beginn der Simulation im Startbereich (grün). Der gesamte linke Raum (grün und gelb) ist der Messbereich. Der weiße Bereich rechts ist ein Teil des Auslaufbereichs der Agenten. (Größenangaben in Meter)

Die Engstellenbreite beträgt dabei jeweils 0,4 bis 1,6 Meter. Die Länge der Engstelle wurde wie bei den Versuchen von Kretz et al. (2006) gewählt. Bei einer längeren Engstelle wäre der Einfluss von langsamen Agenten auf schnellere Agenten höher, da diese die schnelleren Agenten in der Engstelle bzw. dem Gang abbremsen und blockieren würden.

In jedem Versuch dieser Versuchsreihe werden 100 Agenten zu Beginn des Versuchs zufällig in der rechten Hälfte des linken Raums platziert und versuchen zu einem Zielpunkt im rechten Raum zu gelangen. Die Agenten besitzen in den Versuchen erneut entweder alle die gleiche maximale Geschwindigkeit oder die maximale Geschwindigkeit wird erneut normalverteilt, um möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten (Tabelle 3). Die Geschwindigkeitsunterschiede haben jedoch keinen großen Einfluss, da sich vor den Engstellen ein Stau bildet und keiner der Agenten seine maximale Geschwindigkeit in diesem Stau erreichen kann. Der Einfluss langsamerer Agenten in der Engstelle ist aufgrund

der Länge der Engstelle ebenfalls gering. Für „WALK“ gibt es außerdem Versuche mit sozialen Gruppen, bei denen überprüft werden kann, ob das Vorhandensein von Gruppen einen Einfluss auf die Flussrate hat.

Tabelle 3 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zu den Engstellendiagrammen

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1,34 m/s bei Versuchen mit identischen Agenten • normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Soziale Gruppen	<ul style="list-style-type: none"> • Versuche mit einzelnen Agenten • Versuche mit sozialen Gruppen aus 3 „ModularAgents“ in „WALK“
Messungen	
Art der Messung	Messung der Flussrate, mit der die Agenten den Messbereich verlassen
Zeitpunkt der Messung	Start der Messung ab 1. Durchquerung der Engstelle
Dauer der Messungen	Bestimmung des Flusses über 15 s
Versuch	
Breite der Engstelle	Versuche mit Engstellenbreiten von 0,4 m bis 1,6 m
Anzahl der Agenten	100 Agenten
Dauer der Versuche	20 s pro Durchlauf
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Die Versuchsdauer beträgt erneut 20 Sekunden. Da bei allen Versuchen die erste Durchquerung der Engstelle weniger als 5 Sekunden benötigt, wurde die Zeit, über die der Personenfluss bestimmt wird, auf 15 Sekunden festgelegt, so dass ein möglichst langer Zeitraum betrachtet wird. Zu Beginn und Ende dieses Zeitraums wird die Anzahl der Agenten im linken Raum bestimmt und daraus, wie zuvor beschrieben, der Personenfluss bestimmt. Jeder Versuch wird 10-mal ausgeführt, so dass die Flusswerte gemittelt werden können und mögliche Ausreißer erkannt werden können. Bei der Versuchsausführung zeigten sich keine großen Schwankungen der Flusswerte.

5.3.3 Versuche mit unterschiedlicher Anzahl an Agenten vor einer Engstelle

Diese Versuchsreihe ist die letzte Versuchsreihe, die schon in vorherigen Arbeiten durchgeführt wurde (Woggan 2014a, Woggan 2014b). Sie dient der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen der Anzahl an Agenten vor einer Engstelle und der Flussrate durch diese Engstelle. Es fanden die gleichen Verbesserungen und Erweiterungen wie bei den bereits beschriebenen Versuchsreihen statt, so dass für alle Bewegungsmodelle und Simulationsmodelle die gleichen Versuche durchgeführt werden. Es gibt jeweils eine Versuchsreihe mit Agenten, die die gleiche maximale Bewegungsgeschwindigkeit besitzen und eine weitere Versuchsreihe, bei der die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten normalverteilt ist. Auch hier wurde die Anzahl der Durchläufe pro Versuch angepasst und erhöht, so dass jeder Versuch 10-mal durchgeführt wird. Allerdings gibt es große Änderungen an dem architektonischen Grundplan der Versuchsreihe.

In der alten Version dieser Versuche wurde ein Versuchsaufbau verwendet, bei dem die Engstelle nicht nur ein Durchgang war, sondern ein langer Gang. Dies weicht von der Art der Engstelle bei den anderen Engstellenversuchen ab. Dieser Gang kann einen weiteren Einfluss auf die Flussrate haben, weil langsamere Agenten in ihm schnellere Agenten blockieren könnten, wodurch es zu einem Stau im Gang kommen kann, der die Flussrate durch die Engstelle weiter verringert. Dieser Effekt soll hier allerdings nicht betrachtet werden. Aus diesem Grund wird nun auch für diese Versuchsreihe der Aufbau der anderen Engstellenversuche verwendet (Abbildung 21).

Der Grund für die Durchführung dieser Versuchsreihe liegt in einem unerwarteten Verhalten, welches die alte Version der „PedSim“-Simulation bei früheren Engstellenversuchen gezeigt hat. Es zeigte sich eine große Abhängigkeit des Personenflusses durch die Engstelle von der Anzahl der Personen, die sich vor der Engstelle befinden. Die von den Agenten ausgehende Abstoßungskraft „drückte“ diese durch die Engstelle. Die Versuchsreihe dient dazu, zu überprüfen, ob auch die aktuelle Version 2.3 von „PedSim“ und die anderen betrachteten Bewegungsmodelle bzw. Simulationssysteme dieses Verhalten aufzeigen und wie groß der beschriebene Einfluss bei den Simulationen jeweils ist.

Der Aufbau und der Ablauf dieser Versuchsreihe sind fast identisch mit den anderen Engstellenversuchen. Allerdings werden nicht unterschiedlich breite Engstellen betrachtet sondern immer eine Engstelle mit einer Breite von 1 Meter. Dagegen variiert die Anzahl der Agenten im Gegensatz zu der Anzahl an Agenten bei den anderen Engstellenversuchen, bei denen immer 100 Agenten vor der Engstelle stehen. Bei diesen Versuchen werden 50 bis 150 Agenten vor der Engstelle platziert, um den Einfluss der Anzahl auf die Flussrate durch die Engstelle zu betrachten. Die Agenten besitzen ebenfalls entweder die gleiche maximale

Geschwindigkeit oder die maximale Geschwindigkeit wird zur Erzeugung möglichst realistischer Ergebnisse normalverteilt (Tabelle 4).

Tabelle 4 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Einfluss der Anzahl der Agenten auf die Flussrate

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1,34 m/s bei Versuchen mit identischen Agenten • normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Messungen	
Art der Messung	Messung der Flussrate, mit der die Agenten den Messbereich verlassen
Zeitpunkt der Messung	Start der Messung ab 1. Durchquerung der Engstelle
Dauer der Messungen	Bestimmung des Flusses über 15 s
Versuch	
Breite der Engstelle	1 m Breite
Anzahl der Agenten	Versuche mit 50 bis 150 Agenten
Dauer der Versuche	20 s pro Durchlauf
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Die Berechnung des Personenflusses wird genauso wie bei den anderen Engstellenversuchen durchgeführt. Es wurden erneut 10 Durchläufe pro Versuch simuliert um Ausreißer bei den Simulationsergebnissen erkennen zu können und Schwankungen durch das Mitteln der Werte glätten zu können.

5.3.4 Versuche mit sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten in Gängen

Das Szenario für die Versuchsreihe zur Betrachtung des Ausweichverhaltens der Agenten besteht aus einem Raum mit 20 Meter Länge und 2,5 oder 5 Meter Breite (Abbildung 22). Zwei Gruppen bestehend aus jeweils 25 Agenten starten in unterschiedlichen Startbereichen, die sich nahe dem linken bzw. rechten Ende des Raums befinden. Diese Startbereiche sind so breit wie der Raum, also entweder 2,5 Meter oder 5 Meter, und haben jeweils eine Länge von 5 Meter.

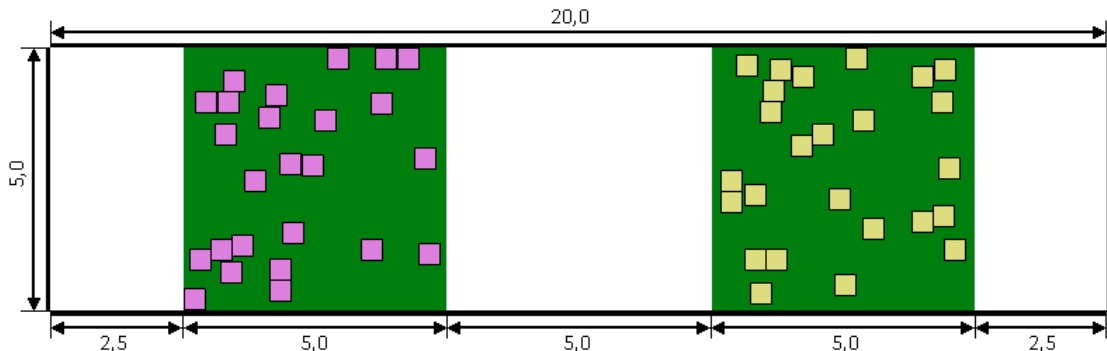


Abbildung 22 - Aufbau des Versuchs mit einem 5 Meter breiten Gang und 50 Agenten (Quadrate), die in zwei Gruppen aufgeteilt sind. Die grünen Bereiche sind jeweils der Startbereich der einen Gruppe und der Zielbereich der anderen Gruppe. (Größenangaben in Meter)

Der Zielpunkt, den ein Agent erreichen möchte, liegt jeweils im Startbereich der anderen Agentengruppe. Dies bedeutet, dass die Agenten aus der Gruppe, welche im linken Startbereich starten nach rechts läuft und die Agenten aus der Gruppe, welche im rechten Startbereich starten nach links läuft. Die Agenten der unterschiedlichen Gruppen treffen somit in der Mitte des Raums frontal aufeinander. Hierbei kann das Ausweichverhalten der Agenten analysiert werden und unter anderem mit dem erwarteten Verhalten verglichen werden. Die Simulation wird ausgeführt bis alle Agenten ihr Ziel erreicht haben. In „WALK“ und „MARS LIFE“ werden die Agenten aus der Simulation entfernt, sobald sie ihr Ziel erreicht haben, in „PedSim“ laufen sie zum Ende des Gangs und verbleiben dort. Für den Fall, dass es die Agenten nicht schaffen, sich gegenseitig auszuweichen und es zu einem Deadlock kommt, wird der Versuch vorzeitig abgebrochen. Die Agentenbewegungen in den Versuchen werden jeweils aufgezeichnet, so dass sie nachträglich genau analysiert werden können. Hierfür wird ein selbstgeschriebenes Programm verwendet, welches das Szenario laden kann und dann die Agentenbewegungen wiedergeben kann. Dadurch ist es unter anderem möglich, die gleiche visuelle Darstellung für alle Simulationssysteme und auch Realdaten zu verwenden, was das Vergleichen des Verhaltens vereinfacht.

Die maximale Geschwindigkeit der Agenten ist entweder identisch oder normalverteilt (Tabelle 5). Bei unterschiedlich schnellen Agenten sollte es möglich sein auch Überholmanöver als Ausweichverhalten erkennen zu können. Durch die Betrachtung von Agenten mit identischer und unterschiedlicher Geschwindigkeit kann der Effekt dieses Unterschieds auf das emergente Verhalten der Agenten bzw. ihr Verhalten im Vergleich mit dem erwarteten Verhalten verglichen werden.

Tabelle 5 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Ausweichverhalten der Agenten bei sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten in Gängen

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1,34 m/s bei Versuchen mit identischen Agenten • normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Versuch	
Breite des Raums	2,5 m Breite oder 5,0 m Breite
Anzahl der Agenten	2 Gruppen mit jeweils 25 Agenten
Dauer der Versuche	Ausführung bis alle Agenten ihr Ziel erreicht haben oder Abbruch bei Deadlock
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Um einen genaueren Einblick in das Ausweichverhalten der Agenten zu bekommen, wird auch dieser Versuch für jedes Bewegungsmodell mehrfach ausgeführt, aufgezeichnet und ausgewertet.

5.3.5 Versuche mit sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten an Engstellen

Das Szenario für die Versuchsreihe zur Betrachtung des Agentenverhaltens an Engstellen mit entgegengesetzt fließenden Agentenströmen besteht aus einem großen Raum mit 20 Meter Länge und 10 Meter Breite (Abbildung 23). Dieser Raum wird durch eine in der Raummitte von der einen langen Wand zur anderen langen Wand verlaufende Wand in zwei kleinere Räume unterteilt. Diese Wand wiederum besitzt einen mittigen Durchgang mit einer Breite von 0,5 Meter, 1 Meter oder 2 Meter. Wie auch bei der Versuchsreihe vom Ausweichverhalten der Agenten, gibt es 2 Agentengruppen mit jeweils 25 Agenten, die sich zu Anfang in unterschiedlichen Startbereichen befinden und zum Startbereich der jeweils anderen Gruppe bewegen. Die Startbereiche liegen im linken bzw. rechten Raum und haben eine Größe von 5 Meter mal 5 Meter. Der Mittelpunkt des Startbereichs ist auch der Mittelpunkt des Raums, so dass die Agenten um die Raummitte des linken bzw. rechten Raums herum positioniert werden.

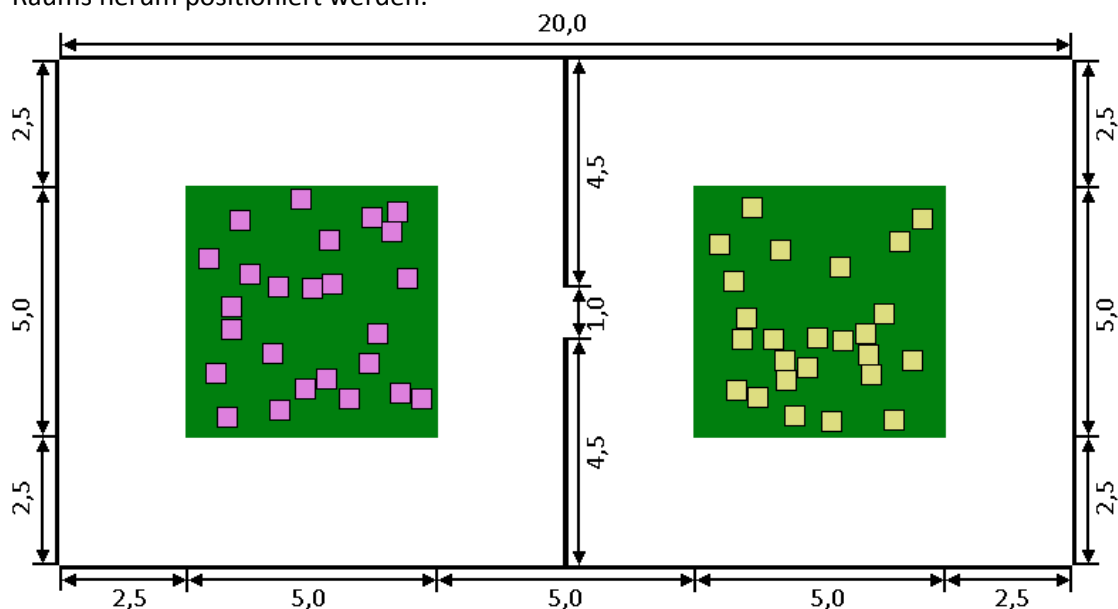


Abbildung 23 - Aufbau des Versuchs zu entgegengesetzt laufenden Flüssen an einer Engstelle mit Breite von 1 Meter und 50 Agenten (Quadrate), die in zwei Gruppen aufgeteilt sind. Die grünen Bereiche sind jeweils der Startbereich der einen Gruppe und der Zielbereich der anderen Gruppe. (Größenangaben in Meter)

Da der Zielbereich jedes Agenten der Startbereich im anderen Raum ist, treffen die Agenten der unterschiedlichen Gruppen an der Engstelle aufeinander. Nun kann betrachtet werden, ob bzw. wie die Agenten die Engstelle durchqueren können und ob dieses Verhalten den Erwartungen entspricht. Hierzu werden erneut die Bewegungsdaten der Agenten aufgezeichnet, so dass sie später wiedergegeben und genau analysiert werden können.

Die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten ist erneut entweder identisch oder normalverteilt (Tabelle 6). Hierdurch kann betrachtet werden, ob sich bei den Bewegungsmodellen unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten auf das emergente Verhalten an der Engstelle auswirken.

Tabelle 6 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Agentenverhalten an Engstellen mit entgegengesetzten Flüssen

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1,34 m/s bei Versuchen mit identischen Agenten • normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Versuch	
Breite der Engstelle	0,5 m Breite, 1 m Breite oder 2,0 m Breite
Anzahl der Agenten	2 Gruppen mit jeweils 25 Agenten
Dauer der Versuche	Ausführung bis alle Agenten ihr Ziel erreicht haben oder Abbruch bei Deadlock
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Auch diese Versuchsreihe wird mehrfach ausgeführt, um einen genaueren Einblick in das Verhalten erlangen zu können, welches durch die zufällige Positionierung der Agenten und die teilweise unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten der Agenten beeinflusst wird.

5.3.6 Versuche mit Sackgassen

Die Versuche mit einer Sackgasse besitzen einen sehr einfachen Aufbau (Abbildung 24). Es existieren nur 3 Wände, welche eine U-förmige Sackgasse bilden. Diese Wände sind bei dem Versuch mit einer kleinen Sackgasse jeweils 5 Meter lang. Bei dem Versuch mit einer sehr großen Sackgasse sind sie 100 Meter lang. Ein einziger Agent startet in einem 1 Meter mal 1 Meter großen Startbereich vor der Sackgasse und besitzt einen Zielbereich hinter der Sackgasse.

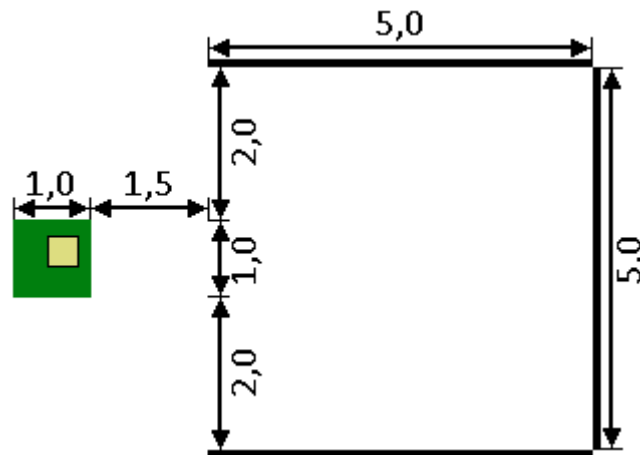


Abbildung 24 - Aufbau des Versuchs zum Verhalten der Agenten bei Sackgassen mit einem 5 Meter mal 5 Meter großen Raum. Das grüne Quadrat ist der 1 Quadratmeter große Startbereich für den Agenten.

Der Versuch dient der Analyse des Agentenverhaltens bei Vorhandensein von Sackgassen. Zu überprüfen ist, ob und wann der Agent die Sackgasse wahrnimmt und sie umgeht oder ob der Agent in der Sackgasse gefangen wird. Durch die unterschiedlich großen Sackgassen kann unter anderem bestimmt werden, ob der Agent die Sackgasse erst wahrnimmt, wenn er einen bestimmten Abstand zu den Wänden hat. Die Bewegungen des Agenten werden erneut aufgezeichnet, um eine spätere Wiedergabe und sorgfältige und genaue Analyse des Verhaltens zu ermöglichen. Abgebrochen wird der Versuch, wenn der Agent die Sackgasse umgangen hat oder wenn er in die Sackgasse gelaufen ist und diese nicht mehr verlassen kann.

Da es bei diesem Versuch kein Zusammenspiel mit anderen Agenten gibt und auch die Wahrnehmung von Sackgassen und das damit verbundene Verhalten nicht mit der maximalen Geschwindigkeit des Agenten verbunden sind, hat der Agent bei jeder Versuchsdurchführung die gleiche maximale Geschwindigkeit.

Tabelle 7 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Agentenverhalten bei Sackgassen

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	1,34 m/s bei allen Versuchen
Versuch	
Breite/Höhe der Sackgasse	Jeweils 5 Meter oder 100 Meter
Anzahl der Agenten	1 Agent
Dauer der Versuche	Ausführung bis der Agent die Sackgasse umgangen hat oder nicht mehr vorwärts kommt
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Die Versuchsreihe wird mehrfach ausgeführt, um erkennen zu können, ob das Verhalten konstant ist. Die zufällige Positionierung im Startbereich vor der Sackgasse und die zufällige Auswahl einer Zielposition hinter der Sackgasse sorgen für leicht unterschiedliche Situationen bei jeder Versuchsdurchführung.

5.3.7 Versuche mit einem komplexeren Szenario

Das Szenario für die Betrachtung des Agentenverhaltens in komplexeren Situationen und den makroskopischen und mikroskopischen Vergleich mit realen Bewegungsdaten basiert auf der Umgebung, in der die vier SMDPC-Versuche durchgeführt wurden. Diese wurde in allen Simulationssystemen auf Basis der der Arbeit von Plaue et al. (2011) beiliegenden millimetergenauen Angabe von Kontrollpunkten der Versuchsumgebung nachgebaut (Abbildung 25). Diese Kontrollpunkte beschreiben die Eckpunkte des für die Versuche relevanten Bereichs. Für die Simulation der Versuche war es allerdings nötig, auch die Umgebung außerhalb dieses Ausschnitts zu modellieren. Hierfür wurden einfach die sichtbaren Gänge verlängert und am Ende des Gangs durch eine Wand abgeschlossen. In diesen Bereichen können die Agenten sich zu Beginn der Simulation befinden oder sich während der Simulation hinbewegen.

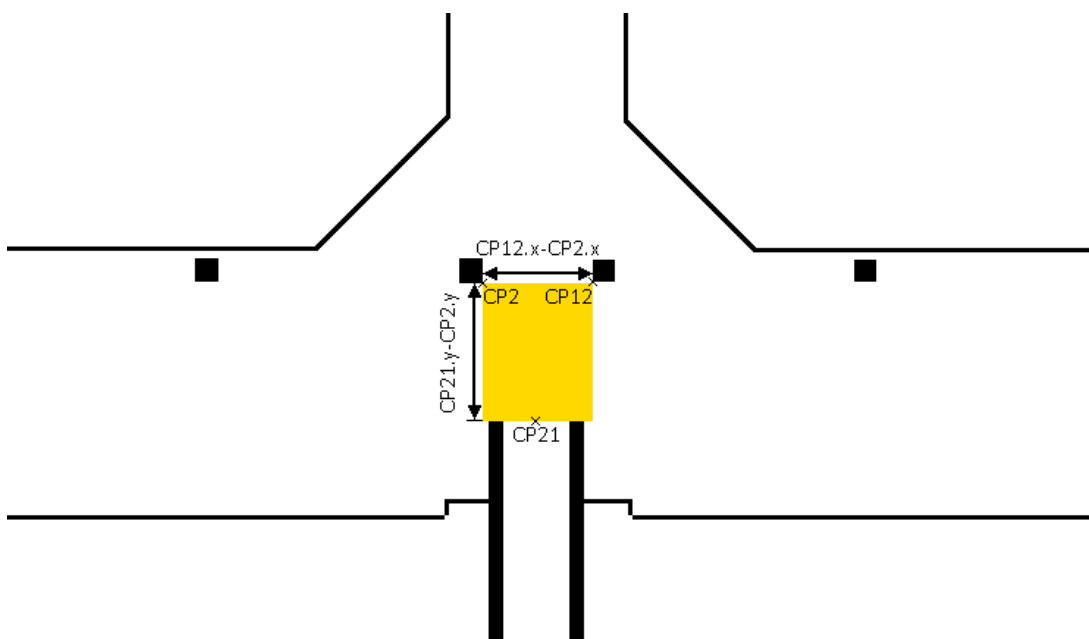


Abbildung 25 - Aufbau des für die Auswertung relevanten Bereichs der SMDPC-Versuche. Der Messbereich (gelb) wird mit Hilfe von vorgegebenen Kontrollpunkten (CP) festgelegt. Der Großteil der Fußgänger läuft durch diesen Bereich.

Der Messbereich für die makroskopische Auswertung der Versuche wurde ebenfalls mit Hilfe der Kontrollpunkte definiert. Dieser wurde so gewählt, dass fast alle Fußgänger ihn während der Versuche betreten. In ihm treffen die Fußgängergruppen aufeinander. Außerdem umfassen die aufgezeichneten Positionsdaten der Teilnehmer der SMDPC-Versuche nur einen unwesentlich größeren Bereich und decken nicht die gesamte Versuchsfläche ab. In diesem Messbereich werden die Agentendichte und die

durchschnittliche Geschwindigkeit der Agenten bestimmt. Die Messungen starten, sobald ein Agent den Messbereich betritt und enden, wenn sich keine Agenten mehr im Messbereich befinden. Mit den Messwerten können Dichte- und Geschwindigkeitsverläufe erstellt werden, welche mit aus den Realdaten der SMDPC-Versuche berechneten Werten verglichen werden können. Die Daten zeigen unter anderem wie gut es den Agenten gelingt, den anderen Agenten auszuweichen und wie viele Agenten sich durch den Messbereich bewegen. Zusätzlich zu dieser makroskopischen Auswertung des Versuchs findet eine mikroskopische Betrachtung des Agentenverhaltens statt. Hierfür wird das Verhalten der Agenten unter anderem mit dem Verhalten der Versuchsteilnehmer verglichen. Für diese Vergleiche ist es von Vorteil, nicht die Videoaufnahmen direkt zu betrachten, sondern sowohl die Bewegungsdaten der SMDPC-Versuche als auch die Bewegungsdaten der Simulation mit dem „Szenario-Player“ wiederzugeben, damit die gleiche visuelle Darstellung gegeben ist. Zusätzlich wird das Verhalten der Agenten auf Besonderheiten und Probleme untersucht.

Die Architektur der SMDPC-Versuche ist für jeden der Versuche identisch. Jedoch betrachten die einzelnen Versuche unterschiedliche Gruppen von Versuchsteilnehmern, die an unterschiedlichen Orten starten und unterschiedliche Zielorte haben. Es gibt vier SMDPC-Versuche, welche die Bezeichnung „BR180“, „BRGW“, „GR90“ und „GW180“ haben. „BR180“ betrachtet das frontale Aufeinandertreffen von zwei Fußgängergruppen. Eine Gruppe von 47 Fußgängern (blaue T-Shirts) begibt sich von links nach rechts durch den Versuchsbereich, während sich eine andere Gruppe von 54 Fußgängern (rote T-Shirts) von rechts nach links durch den Versuchsbereich bewegt. „GW180“ betrachtet ebenfalls das frontale Aufeinandertreffen von zwei Fußgängergruppen, jedoch begibt sich eine Gruppe von 50 Fußgängern (grüne T-Shirts) von oben nach unten durch den Versuchsbereich, während die andere Gruppe von 46 Fußgängern (weiße T-Shirts) sich von unten nach oben durch den Versuchsbereich begibt. Dieser Versuch unterscheidet sich aufgrund der Architektur vom anderen Versuch zum frontalen Aufeinanderstoßen. Der „GR90“-Versuch beschreibt das seitliche Aufeinandertreffen von zwei Fußgängergruppen. Eine Gruppe von 54 Fußgängern (rote T-Shirts) bewegt sich von links nach rechts durch den Versuchsbereich, während sich die andere Gruppe von 46 Fußgängern (grüne T-Shirts) von unten nach oben durch den Versuchsbereich bewegt. Somit schneiden sich die beiden Fußgängerströme seitlich. Der größte Versuch ist „BRGW“, bei diesem kommen aus allen vier Gängen Fußgängergruppen, welche im Versuchsbereich sowohl frontal als auch seitlich aufeinandertreffen. Jede Gruppe besteht jeweils aus 25 Fußgängern. Die „blaue Gruppe“ bewegt sich von links nach rechts durch den Versuchsbereich, die „grüne Gruppe“ bewegt sich von unten nach oben durch den Versuchsbereich, die „rote Gruppe“ bewegt sich von rechts nach links durch den Versuchsbereich und die „weiße Gruppe“ bewegt sich von oben nach unten durch den Versuchsbereich. Für die Versuche „BR180“, „GR90“ und „GW180“ sind jeweils Videoaufzeichnungen und CSV-Dateien mit den Positionsdaten der

Versuchsteilnehmer vorhanden. Für „BRGW“ stehen nur Videoaufzeichnungen zur Verfügung, so dass für diesen Versuch nur visuelle Vergleiche mit den Simulationen möglich sind.

Die Startpositionen der Versuchsteilnehmer in den SMDPC-Versuchen sind nicht bekannt, da die Positionen der einzelnen Versuchsteilnehmer erst bei Betreten des von Kameras überwachten Versuchsbereichs durch diese Kameras aufgezeichnet wurden. Für die Simulation der Versuche wurden die Startbereiche für jeden Versuch jeweils so bestimmt, dass die Agenten auf die gleiche Weise aufeinandertreffen, wie es in den Videoaufzeichnungen zu erkennen ist. Hierzu wurde betrachtet, welche Gruppe wann die Mitte des Versuchsbereichs erreicht und aus wie vielen Fußgängern der Fußgängerstrom besteht. Diese Eigenschaften lassen sich durch die Position des Startbereichs der Agenten (Dauer bis zum Erreichen der Mitte des Versuchsbereichs), seine Breite (Anzahl an Agenten, die nebeneinander laufen) und seine Länge (Abstand zwischen den Agenten) beeinflussen.

Die Zielbereiche der Agenten wurden jeweils als ein Bereich am ihrem Startbereich gegenüberliegenden Ende des Gangs definiert. Wie auch bei den anderen Versuchen verlassen die Agenten in „MARS LIFE“ und „WALK“ an dieser Stelle die Simulation, während sich die Agenten in „PedSim“ einfach vor der Wand am Ende des Gangs hin- und herbewegen.

Tabelle 8 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Vergleich mit den SMDPC-Versuchen

Agenten	
Maximale Geschwindigkeit	normalverteilte Geschwindigkeit um den Mittelwert 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s bei Versuchen mit individuellen Agenten
Messungen	
Art der Messung	Messung der Geschwindigkeiten und Agentendichte im Messbereich
Zeitpunkt der Messung	Start der Messung ab Betreten des Messbereichs durch einen Agenten
Dauer der Messung	Messung bis sich kein Agent mehr im Messbereich befindet
Versuch	
Ablauf von BR180	<ul style="list-style-type: none"> • 47 blaue Agenten von links nach rechts • 54 rote Agenten von rechts nach links
Ablauf von BRGW	<ul style="list-style-type: none"> • 25 blaue Agenten von links nach rechts • 25 grüne Agenten von unten nach oben • 25 rote Agenten von rechts nach links • 25 weiße Agenten von oben nach unten
Ablauf von GR90	<ul style="list-style-type: none"> • 54 rote Agenten von links nach rechts • 46 grüne Agenten von unten nach unten
Ablauf von GW180	<ul style="list-style-type: none"> • 50 grüne Agenten von oben nach unten • 46 weiße Agenten von unten nach oben
Dauer der Versuche	Ausführung bis alle Agenten ihr Ziel erreicht haben oder Abbruch bei Deadlock
Anzahl der Durchläufe	10 Durchläufe pro Versuch

Die maximalen Geschwindigkeiten der Agenten sind für alle Versuche normalverteilt (Tabelle 8). In den Videoaufzeichnungen der SMDPC-Versuche lässt sich deutlich erkennen, dass die Versuchsteilnehmer sich unterschiedlich schnell fortbewegen. Um das gleiche Verhalten in den Simulationen zu erzeugen, muss diese Eigenschaft daher auch in den Simulationen gegeben sein.

Die Versuche werden jeweils mehrfach simuliert, um einen genauen Einblick in mögliche Verhaltensweisen zu bekommen. Die zufällige Positionierung im Startbereich vor der Sackgasse und die zufällige Auswahl einer Zielposition hinter der Sackgasse sorgen für leicht unterschiedliche Situationen bei jeder Versuchsdurchführung. Die Ausführung der Versuche läuft jeweils bis alle Agenten ihr Ziel erreicht haben oder bis sich Agenten nicht mehr ihrem Ziel annähern, da sie es nicht schaffen ein Hindernis, also eine Wand oder auch einen anderen Agenten, zu umgehen.

6 Analyse der Versuche durch Validierungssoftware

Um aussagekräftige Ergebnisse aus der Durchführung der zuvor definierten Versuche zu erlangen, ist eine große Anzahl an Versuchsläufen nötig. Für diese Arbeit wurden 2930 Versuchsläufe aufgezeichnet. Eine solche Menge an Daten lässt sich nicht mehr manuell auswerten, so dass es erforderlich ist, die Auswertung zu automatisieren. Für diesen Zweck wurden verschiedene Programme entwickelt, die die unterschiedlichen Aufgaben übernehmen. Dabei handelt es sich um ein Programm zur makroskopischen Auswertung der Versuche, sowie Programmen, die die visuelle Auswertung erleichtern.

6.1 Vorteile der automatisierten Versuchsauswertung

Eine automatisierte Versuchsauswertung bietet gegenüber einer manuellen Auswertung der Versuche viele Vorteile. Der größte Vorteil ist die Möglichkeit sehr große Datenmengen zu verarbeiten. Dadurch ist es möglich, die Abstufungen in den Versuchen, z.B. die Anzahl an Agenten oder die Breite der Engstellen, sehr fein zu wählen, wodurch das Verhalten genauer analysiert werden kann. Auch ist es möglich eine sehr viel größere Anzahl an Versuchsdurchläufen durchzuführen, wodurch Ausreißer einen sehr viel geringeren Effekt auf die Ergebnisse haben.

Die Automatisierung der Versuchsauswertung erlaubt auch eine schnellere Auswertung der Ergebnisse. Dies kann vor allem bei Modellanpassungen und Modellkalibrierungen von großer Wichtigkeit sein, da der Modellierer schnellere Rückmeldungen erhält. Durch die automatisierte Versuchsauswertung wird es sogar ermöglicht, die Auswertung bereits während der Simulationsausführung vorzunehmen.

Durch die automatisierte Versuchsauswertung wird außerdem der Mensch als Fehlerquelle ausgeschlossen. Bei manuellen Berechnungen könnte es leicht zu Fehlern kommen. Außerdem erfordert eine automatisierte Versuchsauswertung kein Wissen des Anwenders über den analysierten Fachbereich. Die Auswertung kann also auch durchgeführt werden, wenn kein Experte des Fachbereichs zur Verfügung steht.

Eine automatisierte Versuchsauswertung erfordert außerdem eine konkrete Definition von Schritten und Berechnungen, die für jede Simulation, jedes Bewegungsmodell und jedes Simulationssystem identisch sein sollten. Dadurch werden die Ergebnisse objektiv, vergleichbar und verlässlich.

6.2 Funktionen der Validierungssoftware

Die in dieser Arbeit genutzte Validierungssoftware wurde im Rahmen einer vorherigen Arbeit entwickelt. Für diese Arbeit wurden Erweiterungen und Verbesserungen an den Berechnungen und resultierenden Diagrammen vorgenommen. Eine genaue Beschreibung des Aufbaus des Programms, der Funktionsweise und der Funktionen ist in Woggan (2014b) nachzulesen.

Die wichtigste Funktion der Validierungssoftware ist die Möglichkeit, zuvor aufgezeichnete Simulationsläufe einzulesen und mit den eingelesenen Daten eine Validierung der Simulation durchzuführen. Als Quelle dienen SQLite-Datenbanken oder JSON-Nachrichten aus einer RabbitMQ⁴-Queue. Die eingelesenen Daten beschreiben die Agenten und ihre Positionen in der Umwelt zu jedem Zeitschritt der Simulationsausführung. Aus diesen Daten berechnet das Programm Geschwindigkeitswerte für die Agenten, bestimmt die Messwerte in den definierten Messbereichen und führt die Berechnungen der makroskopischen Werte durch. Auf Basis der berechneten makroskopischen Werte und der Vergleichsdaten werden Diagramme erstellt, wobei die Darstellung dieser Diagramme mit GnuPlot⁵ erfolgt. Die Erstellung der Diagramme erfolgt parallel zur Berechnung der makroskopischen Werte, wodurch sehr früh Ergebnisse sichtbar werden. Nach Abschluss der Berechnungen können alle durch das Programm berechneten Werte als CSV-Datei exportiert werden. Außerdem können die Skripte zur Erzeugung der GnuPlot-Diagramme gespeichert werden, so dass nachträgliche Anpassungen der Diagramme möglich sind. Das Programm kann die Diagramme auch als PNG-Rastergrafik oder SVG-Vektorgrafik exportieren, wodurch eine weitere Verwendung der Grafiken ohne GnuPlot ermöglicht wird. Die Auswertung unterschiedlicher Versuchsreihen erfolgt parallel, wodurch ein performantes Auswerten gewährleistet wird.

Eine weitere Funktion des Programms, welche für diese Arbeit jedoch nicht genutzt wurde, ist die Möglichkeit, das Validierungsprogramm direkt in ein Simulationssystem einzubinden. Wird dies getan, dann ist es möglich schon während der Simulationsausführung eine Auswertung mit makroskopischen Werten und Diagrammen durchzuführen. Da allerdings eine sehr große Anzahl an Simulationsläufen analysiert werden musste, wurde stattdessen mit SQLite-Datenbanken gearbeitet, so dass die Auswertung aller Simulationsläufe gleichzeitig ausgeführt werden konnte.

⁴ www.rabbitmq.com

⁵ www.gnuplot.info

6.3 Erstellung der Diagramme mit der Validierungssoftware

Die Validierungssoftware wurde für die Durchführung aller Berechnungen und für die Erstellung aller Diagramme in dieser Arbeit eingesetzt. Für die Validierung der Bewegungsmodelle waren die erstellten Diagramme von größter Wichtigkeit. Aus diesem Grund wird auf die Erstellung der verschiedenen Diagrammtypen genauer eingegangen.

Für die Vergleiche mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) werden Diagramme erstellt, die den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Dichte und der durchschnittlichen Geschwindigkeit während des Messzeitraums im Messbereich darstellen. Jedes durch das Programm im Simulationslauf bestimmte Dichte-Geschwindigkeit-Paar wird als ein Messwert im Diagramm dargestellt. Für jede Versuchsreihe, d.h. Versuchsausführungen mit unterschiedlich hohen Agentenanzahlen, wird jeweils ein Mittelwert aus allen Messwerten bestimmt. Dieser Mittelwert gleicht dadurch die Schwankungen zwischen den verschiedenen Versuchsausführungen aus. Über alle Mittelwerte wird schließlich eine Trendlinie in Form eines Polynoms 4. Grades erzeugt. Diese Art von Trendlinie wurde gewählt, weil die Vergleichskurve von Weidmann (1993) ebenfalls einem Polynom 4. Grades entspricht. Lässt sich also ein Trendlinie 4. Grades über die Mittelwerte legen, so spricht dies schon einmal für das Modellverhalten und erlaubt genauere Vergleiche mit dem Fundamentaldiagramm. Für diese Vergleiche wird das Fundamentaldiagramm ebenfalls in den Grafiken angezeigt, wodurch Form der Kurve und die errechneten Mittelwerte einfach mit der Kurve des Fundamentaldiagramms verglichen werden können. Zusätzlich zur Kurve über die allgemeinen Geschwindigkeiten werden die gleichen Berechnungen für die Kurve der Flussgeschwindigkeiten durchgeführt. Diese erlaubt eine genauere Betrachtung des Vorankommens der Agenten und weicht abhängig vom betrachteten Modell teilweise sehr stark von der Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit ab.

Die Diagramme für die Vergleiche der Bewegungsmodelle mit den Engstellendiagrammen von Kretz et al. (2006) und Hoogendoorn und Daamen (2005) stellen die Flussrate durch die Engstellen in Personen pro Sekunde bzw. Agenten pro Sekunde in Abhängigkeit von dem Durchmesser der Engstelle dar. Die Messwerte pro Engstellenbreite werden jeweils als Punkte im Diagramm dargestellt. Für jede Engstellenbreite wird ein Mittelwert berechnet. Über diese Mittelwerte wird eine Trendlinie in Form einer Gerade berechnet. Dies erlaubt zum einen das Vergleichen dieser Trendlinie mit der Trendlinie von Kretz et al. (2006), die ebenfalls eine Gerade ist. Zum anderen lassen sich so gut Mittelwerte erkennen, die vom Verlauf der Gerade abweichen und zeigen, dass das Modellverhalten in diesen Bereichen nicht den linearen Erwartungen aus den Versuchen von Kretz et al. (2006) entspricht. Die

der Trendlinie zugrunde liegende Formel wird jeweils angezeigt, um die Steigung der Gerade bestimmen zu können und weitere Vergleiche mit der erwarteten Gerade durchzuführen. Zusätzlich zu der berechneten Trendlinie werden die Trendlinie sowie die Messwerte von Kretz et al. (2006) und die Stufenfunktion von Hoogendoorn und Daamen (2005) in der Grafik angezeigt.

Für die Engstellenversuche mit unterschiedlichen Agentenanzahlen vor der Engstelle werden Diagramme erstellt, die die Flussrate durch die Engstelle in Abhängigkeit von der Startanzahl der Agenten vor der Engstelle stellen. Die Messwerte der Durchläufe werden erneut als Punkte im Diagramm dargestellt und es werden Mittelwerte über alle Messwerte zu einer Versuchsreihe erstellt, wodurch sich pro Startanzahl der Agenten vor der Engstelle ein Mittelwert im Diagramm ergibt. Über diese Mittelwerte wird eine Trendlinie in Form einer Gerade erstellt. Zusätzlich wird der Mittelwert der Mittelpunkte berechnet und eine Gerade für diesen Mittelwert angezeigt. Diese Gerade entspricht der Erwartung, dass die Anzahl der Agenten vor der Engstelle keinen Einfluss auf die Flussrate hat. Zusätzlich zu dieser Gerade wird die Standardabweichung der Werte grafisch dargestellt, um zu zeigen wie stark die Messwerte schwanken. Die Werte des Mittelwerts und der Standardabweichung werden ebenfalls in der Grafik angezeigt, genauso wie die Formel der Trendlinie angezeigt wird. Anhand des Diagramms lässt sich erkennen, ob und wie sich die Anzahl der Agenten vor der Engstelle auf den Fluss durch die Engstelle auswirkt. In der früheren Arbeit Woggan (2014a) hatte sich für „PedSim“ eine lineare unerwartete Abhängigkeit zwischen diesen Werten gezeigt.

Der vierte von der Validierungssoftware erstellte Diagrammtyp dient der Darstellung des Verlaufs der durchschnittlichen Dichte im Messbereich in Personen pro Quadratmeter bzw. Agenten pro Quadratmeter und des Verlaufs der durchschnittlichen Geschwindigkeit in diesem Bereich für die SMDPC-Versuche. Aus diesen Verläufen lässt sich bestimmen, wie viele Agenten zu welchem Zeitschritt im Messbereich waren und wie schnell sich die Agenten dabei durchschnittlich bewegt haben. Auch die Zeit, in der sich Agenten im Messbereich befanden, lässt sich ablesen. Da dieser Diagrammtyp auch für die in Versuchen mit echten Personen bestimmten Aufzeichnungen erstellt wird, lassen sich Vergleiche der Kurven durchführen und weiterführende Schlüsse ziehen.

6.4 Konverter für die SMDPC-Versuchsaufzeichnungen

Der Konverter für die SMDPC-Versuchsaufzeichnungen hat nur eine Funktion: Er liest die in verschiedenen CSV-Dateien vorliegenden Bewegungslinien, welche aus den Videoaufnahmen bestimmt wurden, ein und schreibt sie in SQLite-Datenbanken, welche das gleiche Format besitzen wie die in den Simulationssystemen erstellten Datenbanken. Dies erlaubt die weitere Verwendung der realen Bewegungsdaten der SMDPC-Versuche für Berechnungen in der Validierungssoftware, die Erstellung von Diagrammen aus ihnen sowie die Visualisierung der Daten in der gleichen Darstellung, die auch für die visuelle Auswertung der Simulationsaufzeichnungen genutzt wird. Für diese Visualisierung wurde der „Szenario-Player“ entwickelt.

6.5 Szenario-Player für die visuelle Auswertung

Um visuelle Vergleiche durchzuführen, wäre es möglich, die Simulationen und Videos nebeneinander laufen zu lassen, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten feststellen zu können. Dabei gäbe es allerdings einige Probleme: Mehrere Simulationen gleichzeitig laufen zu lassen, wäre sehr rechen- und zeitaufwändig. Um gute Vergleiche durchführen zu können, müssen die Simulationen und Videoaufnahmen mit der gleichen Geschwindigkeit laufen, jedoch ist bei komplexeren Versuchen keine Simulation in Echtzeit möglich. Auch wäre eine genauere Betrachtung der Simulationen nicht möglich, weil sie durch das stochastische Positionieren der Agenten und Verteilen der Maximalgeschwindigkeit immer wieder unterschiedliche Simulationsläufe zeigen würden. Ein weiteres Problem wären die unterschiedlichen Darstellungen, die die Simulationssysteme und die Videoaufnahmen der SMDPC-Versuche verwenden, welche Vergleiche erschweren würden.

Um diese Probleme zu beheben und die visuellen Vergleiche zu erleichtern, wurde daher der „Szenario-Player“ entwickelt. Dieser liest die SQLite-Datenbanken der Simulationsaufzeichnungen bzw. der vorher konvertierten SMDPC-Aufzeichnungen ein und kann die in ihnen gespeicherten Agentenbewegungen flüssig wiedergeben. Zu jedem der simulierten Szenarien steht eine Beschreibung des Szenarios zur Verfügung, die der „Szenario-Player“ laden kann und dementsprechend die korrekte Umwelt anzeigt. Die Wiedergabe der Datenbanken erzeugt kaum Rechenlast, so dass problemlos verschiedenen Simulationsläufe und SMDPC-Aufzeichnungen gleichzeitig betrachtet werden können. Dadurch, dass die Aufzeichnungen aller Simulationssysteme und der realen SMDPC-Versuche mit dem „Szenario-Player“ wiedergegeben werden können, wird der Vergleich stark vereinfacht, da jedes Mal die gleiche Darstellung verwendet wird. Neben der einfachen Wiedergabe der Aufzeichnungen ist eine Erweiterung der Funktionalität um das Starten, Stoppen, Pausieren und Vor- und Zurückspulen der Aufzeichnungen möglich.

7 Auswertung der Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel dient der Validierung der Bewegungsmodelle mit dem Validierungskonzept. Hierzu werden zuerst die verschiedenen Diagramme der makroskopischen Werte für jedes der betrachteten Bewegungsmodelle ausgewertet. Danach findet die Anwendung der visuellen Auswertung des Agentenverhaltens statt.

7.1 Auswertung der Diagrammtypen

Begonnen wird mit der Auswertung der zuvor erstellten Diagramme. Hierfür werden die einzelnen Diagrammtypen für jedes der Bewegungsmodelle vorgestellt und beschrieben. Vergleiche mit den Erwartungen, wie etwa den Werten und dem Verlauf der Vergleichskurven, werden durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf Übereinstimmungen, Unterschieden und Besonderheiten der berechneten makroskopischen Werte. Diese werden mit den Eigenschaften des jeweiligen Bewegungsmodells begründet.

7.1.1 Fundamentaldiagramm (Agentendichte – Geschwindigkeit)

Die Fundamentaldiagramme dienen der Betrachtung der Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten in Meter pro Sekunde von der Dichte in Agenten pro Quadratmeter, die in dem Bereich, in dem sich die Agenten befinden, vorhanden ist. Abbildung 26 zeigt beispielhaft eine der durchgeführten Versuchsreihen mit dem Fußgängermodell von „MARS LIFE“ und 250 Agenten. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt. Es zeigt die Anordnung der Agenten kurz nach dem Simulationsstart, während sie sich vom linken Teil der Umwelt in den rechten Teil der Umwelt bewegen.

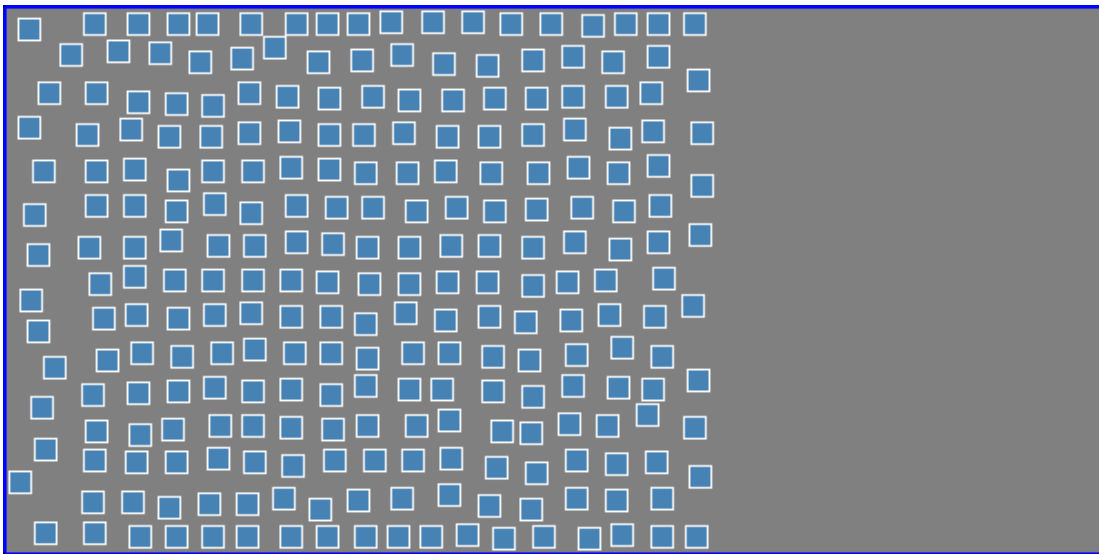


Abbildung 26 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Fundamentaldiagramm mit 250 Agenten unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Im Folgenden werden die erstellten Fundamentaldiagramme für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Hierbei werden jeweils zuerst die Versuchsreihen mit den Agenten betrachtet, die identische maximale Geschwindigkeiten besitzen. Danach werden die Versuchsreihen mit den Agenten betrachtet, die unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten besitzen.

7.1.1.1 WALK EGOAPAgent

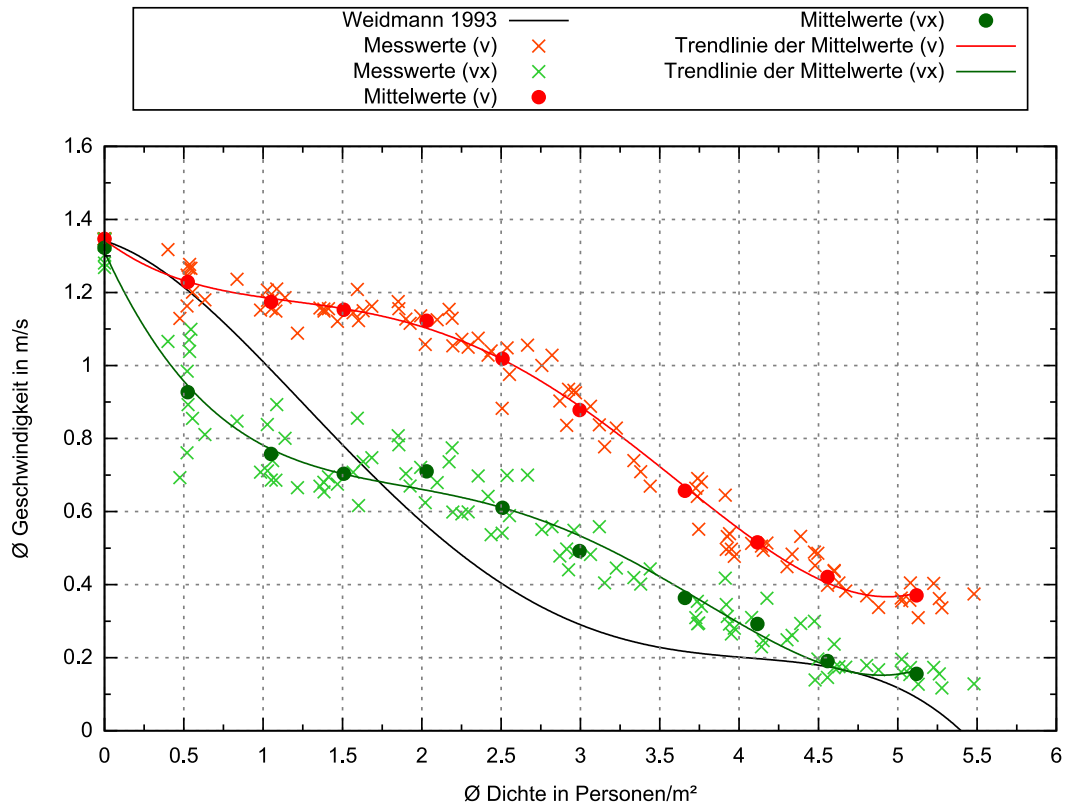
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 27 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die allgemeine Geschwindigkeit (rote Kurve) der identischen „EGOAPAgents“ in „WALK“ zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Dichte, in der sich die Agenten bewegen (Abbildung 27). Je höher die Dichte ist, desto niedriger ist die Geschwindigkeit der Agenten. Die Form der Kurve ist jedoch nicht mit der Form der Kurve des Fundamentaldiagramms von Weidmann (1993) identisch. Im Bereich zwischen 0 und 0,5 Personen pro Quadratmeter liegen die Mittelwerte der Geschwindigkeit ungefähr auf der Kurve des Fundamentaldiagramms. Danach zeigt sich allerdings eine starke Abschwächung des Geschwindigkeitsabfalls. Bei einer Dichte zwischen ungefähr 0,5 und 2,0 Personen pro Quadratmeter gibt es kaum einen Geschwindigkeitsabfalls. Bei einer Dichte von ungefähr 1,75 Personen pro Quadratmeter wird bereits ein Geschwindigkeitsabfall um 50% erwartet. Der Geschwindigkeitsabfall liegt jedoch nur bei ungefähr 16%. Erst ab 2,0 Personen pro Quadratmeter ist wieder ein starker Abfall vorhanden. Ab diesem Wert entspricht auch die

Form der Kurve der Kurve von Weidmann (1993). Wie auch das Fundamentaldiagramm zeigt die Kurve bei höheren Dichten zuerst wieder einen geringeren Abfall der Geschwindigkeit. Bei Weidmann (1993) ist zwischen ungefähr 3,5 und 4,5 Personen pro Quadratmeter kaum ein Abfall der Geschwindigkeit vorhanden. Die berechnete Kurve zeigt eine Abschwächung des Abfalls zwischen den letzten beiden Mittelpunkten bei ungefähr 4,6 und 5,1 Personen pro Quadratmeter. Allerdings wurden keine Dichtewerte in den Versuchen erreicht, bei denen es zu einem Stillstand der Agenten kam, so dass der genaue Verlauf nach diesen Werten nicht bekannt ist. Generell lässt sich also sagen, dass der Einfluss geringer Dichten auf die allgemeine Geschwindigkeit bei diesem Bewegungsmodell nicht groß genug ist.

Betrachtet man die Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve), so erkennt man, dass diese eine sehr ähnliche Kurve wie die allgemeine Geschwindigkeit besitzt. Es lassen sich jedoch deutliche Unterschiede in den Geschwindigkeitswerten erkennen. Diese sind bei der Flussgeschwindigkeit sehr viel niedriger, da Bewegungen, die nicht in Flussrichtung erfolgen, nicht in dieser Geschwindigkeit enthalten sind. Ausweichmanöver gehen somit in diese Kurve nicht ein. Die berechneten Werte liegen sehr viel näher an den Werten der Kurve von Weidmann (1993). Allerdings stimmen auch hier die Bereiche mit dem niedrigsten und höchsten Geschwindigkeitsabfall nicht mit den Erwartungen überein. Bei hohen Dichtewerten liegen die Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit und die Kurve der Flussgeschwindigkeit wieder dichter beieinander. Dies lässt auf weniger Ausweichmanöver schließen. Interessant ist der Mittelwert bei einer Dichte von ungefähr 2,0 Personen pro Quadratmeter. Dieser zeigt eine Zunahme der Flussgeschwindigkeit gegenüber des Mittelpunkts bei ungefähr 1,5 Personen pro Quadratmeter. Dieses Verhalten ist unerwartet, die Abweichung ist allerdings nur gering. Die Flussgeschwindigkeit ist die wichtigere der Geschwindigkeiten, da sie aussagt, wie schnell die Agenten vorankommen. Die relativ guten Übereinstimmungen der Werte der Flussgeschwindigkeit mit den Werten des Fundamentaldiagramms von Weidmann (1993) sind also positiv zu bewerten.

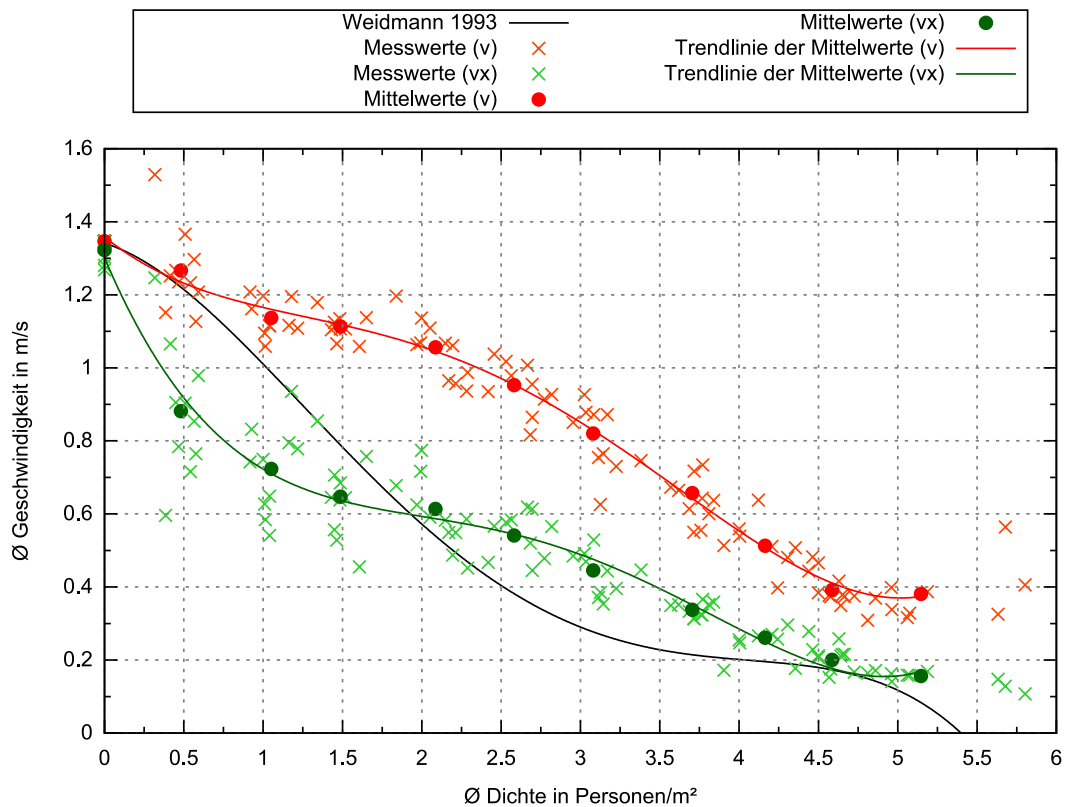
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 28 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die allgemeine Geschwindigkeit (rote Kurve) der unterschiedlichen „EGOAPAgents“ in „WALK“ zeigt ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der Dichte, in der sich die Agenten bewegen (Abbildung 28). Sie unterscheidet sich nur gering von der Kurve der Versuchsreihen mit identischen Agenten. Der größte Unterschied liegt im Bereich zwischen ungefähr 1 und 3,5 Agenten pro Quadratmeter. In diesem Bereich sind die Geschwindigkeiten der Agenten etwas niedriger. Der Einfluss von unterschiedlich schnellen Agenten auf den Verlauf der Geschwindigkeitskurve ist also nur sehr gering. Langsamere Agenten scheinen also kaum andere Agenten zu blockieren und auch die Überholmanöver von schnellen Agenten scheinen bei diesem Bewegungsmodell kaum Einflüsse auf den Ablauf der Versuche zu haben. Für hohe Dichten sind die Mittelwerte fast identisch. Die einzelnen Messwerte sind im Bereich niedriger Dichten stärker gestreut. Da dies die Versuche mit nur 50 Agenten sind, ist dies bei einer Normalverteilung der maximalen Geschwindigkeiten jedoch zu erwarten. Interessant sind die einzelnen Messwerte, die bei Dichten zwischen 5,5 und 6,0 Personen pro Quadratmeter liegen. Diese zeigen höhere

Geschwindigkeiten, als zu erwarten waren. In Kombination mit den dazugehörigen Werten der Flussgeschwindigkeit lässt sich erkennen, dass die Agenten plötzlich stärkere Seitwärtsbewegungen durchführen.

Die Kurve der Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve) weicht auch nur minimal von der Kurve der Flussgeschwindigkeit bei Versuchen mit identischen Agenten ab. Auch diese zeigt etwas geringere Mittelwerte der Flussgeschwindigkeit. Unterschiedlich schnelle Agenten führen also bei diesem Bewegungsmodell auch zu einer generellen Verringerung der Flussgeschwindigkeit

Begründungen und Schlussfolgerungen

Die „EGOAPAgents“ in „WALK“ zeigen die erwarteten Auswirkungen von unterschiedlichen Personendichten auf die Geschwindigkeit der Agenten. Die Form der berechneten Kurven stimmt allerdings nur teilweise mit der Kurve von Weidmann (1993) überein. Dies ist damit zu begründen, dass die „EGOAPAgents“ sich immer mit ihrer maximalen Geschwindigkeit fortbewegen. Eine Verringerung der Geschwindigkeit passiert nur indirekt, indem der Kollisionsmanager die durch die Bewegungen entstehenden Kollisionen auflöst. Dies scheint jedoch nicht auszureichen, um das gewünschte Modellverhalten zu erreichen. Da es sich um ein regelbasiertes Modell handelt, wäre es aber möglich, den Agenten Regeln zu geben, die ihnen aufgrund von Beobachtungen erlauben, ihre Geschwindigkeit selbstständig zu reduzieren.

Positiv zu bewerten ist, dass die Werte der Flussgeschwindigkeiten größtenteils dicht an den erwarteten Werten liegen. Da diese bestimmen, wie schnell die Agenten vorankommen, heißt dies, dass sich die Agenten mit relativ realistischen Geschwindigkeiten in der Umgebung fortbewegen. Dies ist besonders wichtig, da es unter anderem einen Einfluss auf die Evakuierungszeit haben kann. Die großen Unterschiede zwischen allgemeiner Geschwindigkeit und Flussgeschwindigkeit sind neben Ausweichbewegungen auch mit einem „Zittern“ der Agenten zu begründen. Dieses ist bei „EGOAPAgents“ stark ausgeprägt und sorgt für viele Bewegungen, die den Agenten nicht voranbringen. Ohne dieses „Zittern“ würden die Werte der allgemeinen Geschwindigkeit somit dichter an den Erwartungswerten liegen. Unterschiede durch unterschiedlich schnelle Agenten lassen sich bei diesem Bewegungsmodell zwar beobachten, sind aber aufgrund der geringen Änderungen vernachlässigbar.

7.1.1.2 WALK ModularAgent

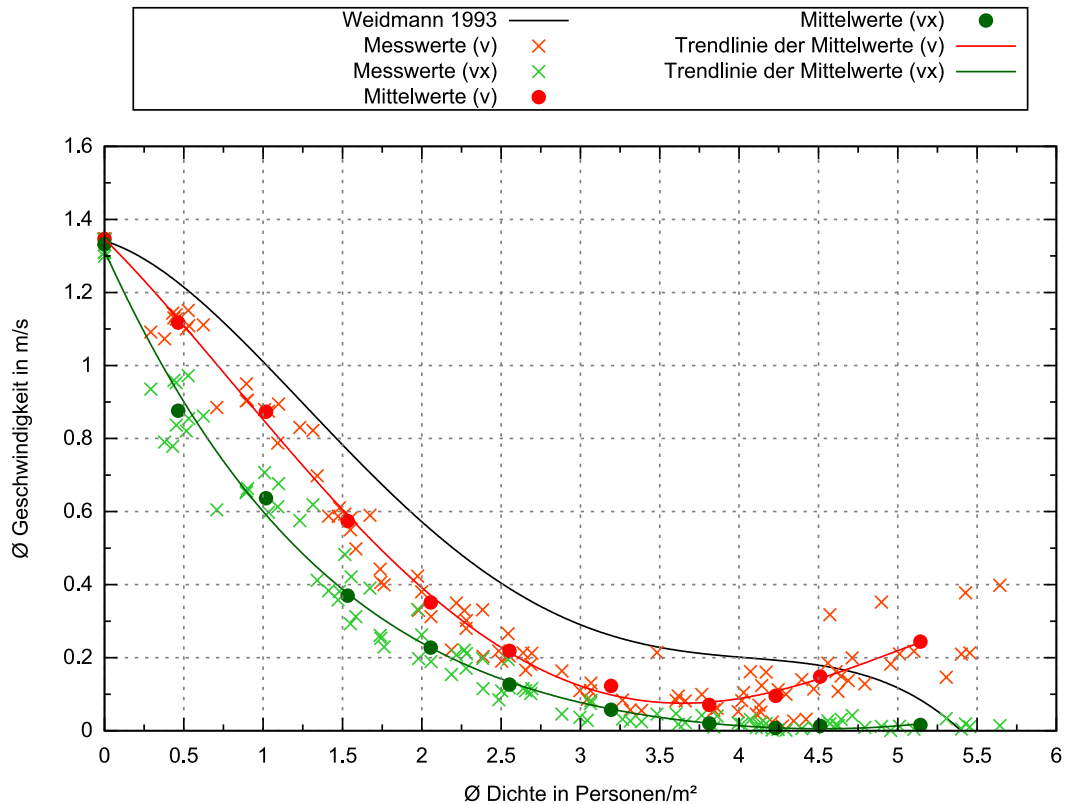
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 29 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Die allgemeine Geschwindigkeit (rote Kurve) der identischen „ModularAgents“ in „WALK“ zeigt ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der Dichte, in der sich die Agenten bewegen (Abbildung 29). Der Verlauf der Kurve ähnelt der Kurve von Weidmann (1993) anfangs stark, jedoch sind die Geschwindigkeitswerte immer etwas unterhalb der erwarteten Werte. Im Bereich zwischen 0 und 0,5 Personen pro Quadratmeter ist die Kurve zu steil, jedoch gibt es dort auch keinen weiteren Mittelwert, da keine weiteren Versuchsreihen mit Agentenanzahlen zwischen 1 und 50 Agenten durchgeführt wurden. Dieser Bereich kann also nur durch die Kurve geschätzt werden. Die interessanteste Eigenschaft der Kurve ist jedoch die Zunahme der allgemeinen Geschwindigkeiten ab einer Dichte von ungefähr 4,25 Personen pro Quadratmeter. Diese widerspricht den Erwartungen einer stets abnehmenden Geschwindigkeit bei zunehmender Dichte. Betrachtet man dazu die Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve), so zeigt sich, dass ab der erwähnten Dichte von

ungefähr 4,5 Personen pro Quadratmeter bereits fast kein Vorankommen der Agenten mehr beobachtbar ist. Die Zunahme der allgemeinen Geschwindigkeit ist also auf eine Zunahme von Seitwärtsbewegungen der Agenten zurückzuführen. Generell ist die Flussgeschwindigkeit immer niedriger als die allgemeine Geschwindigkeit. Der Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeiten ist aber weitaus geringer, als bei den Versuchsreihen mit den „EGOAPagents“.

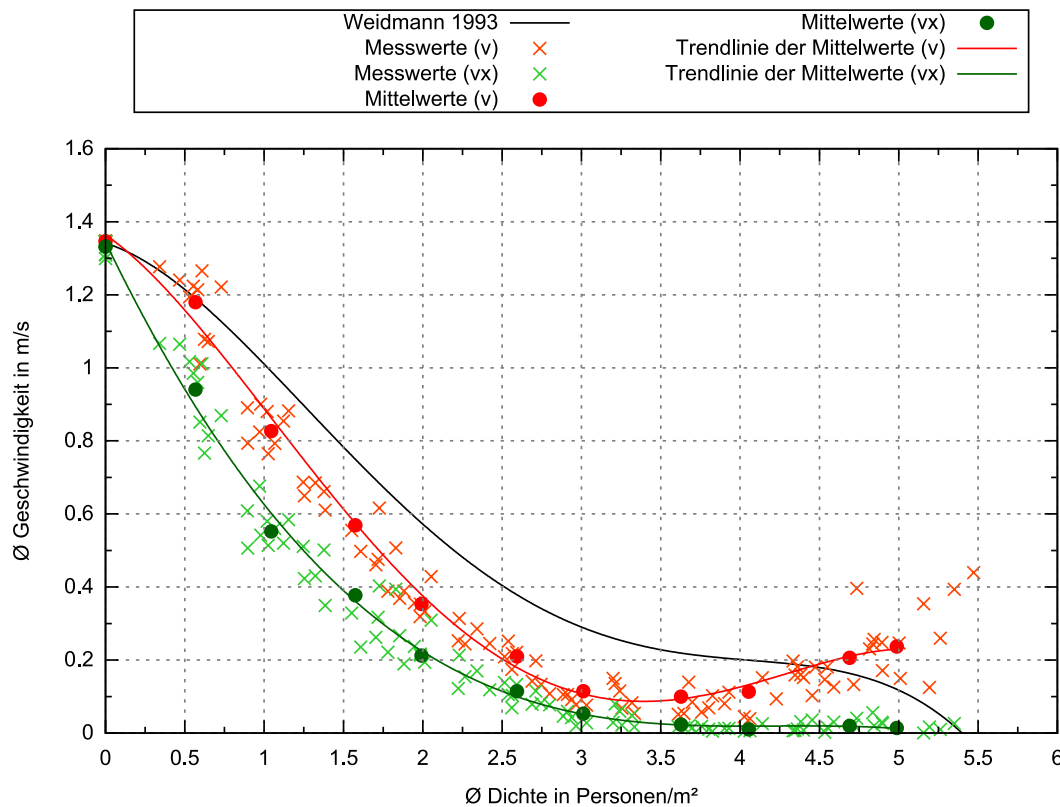
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 30 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Die Form und der Verlauf der Kurven, die mit unterschiedlichen „ModularAgents“ erstellt wurden, unterscheiden sich kaum von den Kurven, die mit identischen „ModularAgents“ bestimmt wurden. Es zeigen sich jedoch einige unerwartete Auffälligkeiten. Zum einen sind die allgemeine Geschwindigkeit und die Flussgeschwindigkeit für Dichten von ungefähr 0,5 Personen pro Quadratmeter höher als bei identischen Agenten. Dies widerspricht der Vorstellung, dass langsamere Agenten schnellere Agenten ausbremsen und sich somit alle Agenten langsamer fortbewegen müssen. Bei einer so geringen Dichte sollte dieser Effekt jedoch auch nur sehr gering sein. Ein gegenteiliger Effekt ist aber logisch nicht zu erklären. Für mittlere Dichten entspricht das Modellverhalten allerdings wieder den Erwartungen, indem die gemessenen Geschwindigkeiten geringer als bei den Versuchsreihen mit den identischen Agenten sind. Für sehr hohe Dichten ab ungefähr 4 Agenten pro Quadratmeter sind die Flussgeschwindigkeiten teilweise wieder etwas höher als bei der Versuchsreihe mit identischen Agenten, die Abweichungen sind aber nur sehr gering, da sie alle fast einen Stillstand beschreiben.

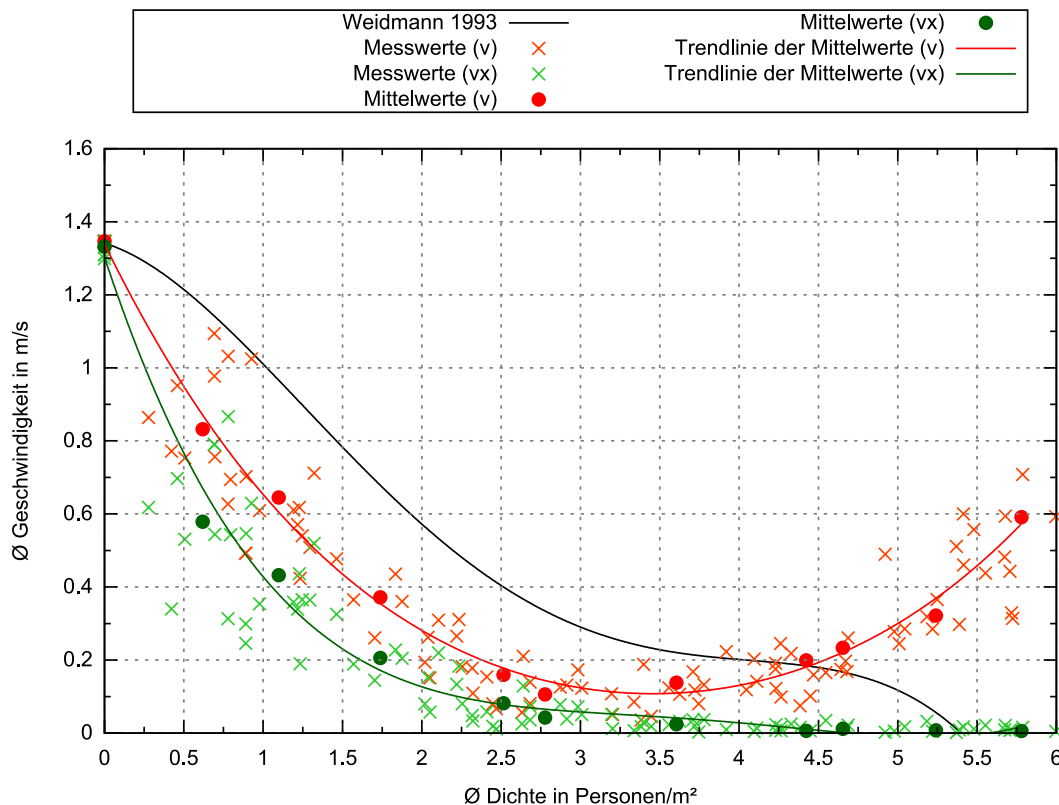
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und sozialen Gruppen

Abbildung 31 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und Einteilung in soziale Gruppen in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Werden alle Agenten in soziale Gruppen mit einer Gruppengröße von 3 Agenten eingeteilt, so hat dies einen deutlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Agenten. Neben langsameren Geschwindigkeiten zeigt das Diagramm auch höhere Dichtewerte. Bei diesen Werten wird das Problem der „ModularAgents“ noch deutlicher, das für eine Erhöhung der allgemeinen Geschwindigkeiten bei sehr hohen Dichten sorgt. Die Flussgeschwindigkeiten sind bei diesen Dichten wieder fast 0 Meter pro Sekunde.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Die „ModularAgents“ in „WALK“ zeigen zu großen Teilen ein Verhalten, das den Erwartungen nahe kommt. Die Geschwindigkeiten der Agenten sind jedoch durchgehend zu niedrig. Die Anpassung der Geschwindigkeiten der Agenten geschieht bei den „ModularAgents“ nicht nur durch den Kollisionsmanager, sondern auch durch Regeln, die den Agenten abhängig von der Dichte in ihrer Umgebung eine Bewegungsgeschwindigkeit zuordnen. Diese Zuordnung soll explizit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993)

entsprechen. Durch das Zusammenspiel von Kollisionsmanager und Regeln zur Reduzierung der Geschwindigkeiten werden die Geschwindigkeiten jedoch letztendlich noch geringer als gewünscht. Durch Anpassungen und Kalibrierung der Regeln sollte sich die Übereinstimmung mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) aber verbessern lassen.

Problematisch ist das Verhalten bei hohen Dichten. Eine Zunahme der Geschwindigkeiten bei hohen Dichten widerspricht den Erwartungen. Da nur die allgemeine Geschwindigkeit zunimmt und nicht die Flussgeschwindigkeit, zeigt dies, dass die Agenten sehr stark „Zittern“. Hierbei handelt es sich vermutlich um ein Problem mit der Kollisionsauflösung. Dieses Problem sollte behoben werden, damit es nicht unerwartete Effekte auf das Agentenverhalten hat. Die Auswirkungen von unterschiedlich schnellen Agenten auf die Kurven sind auch bei den „ModularAgents“ geringer als erwartet und kann auch hier vernachlässigt werden.

Die Auswirkungen von sozialen Gruppen auf die Geschwindigkeiten der Agenten entsprechen den Erwartungen. Die sozialen Gruppen bewegen sich jeweils so langsam, wie ihr langsamstes Mitglied, wodurch die durchschnittlichen Geschwindigkeiten stark sinken. Außerdem versuchen sie zusammenzubleiben, wodurch sie andere Agenten und Gruppen stärker blockieren und für höhere Dichten sorgen. Zu beachten ist auch, dass die Agenten der sozialen Gruppen bei den „ModularAgents“ zum Simulationsstart beieinander platziert werden. Dies sorgt von Anfang an für höhere Dichten. Im Gegensatz zu unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der Agenten haben also soziale Gruppen einen großen Einfluss auf die Simulation. Ist also bekannt, dass es in einer Situation viele solcher Gruppen gibt, sollten diese auch in der Simulation berücksichtigt werden. Im Rahmen des Vergleichs zur Validierung mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) sollten sie aber nicht berücksichtigt werden.

7.1.1.3 MARS LIFE Fußgängermodell

Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

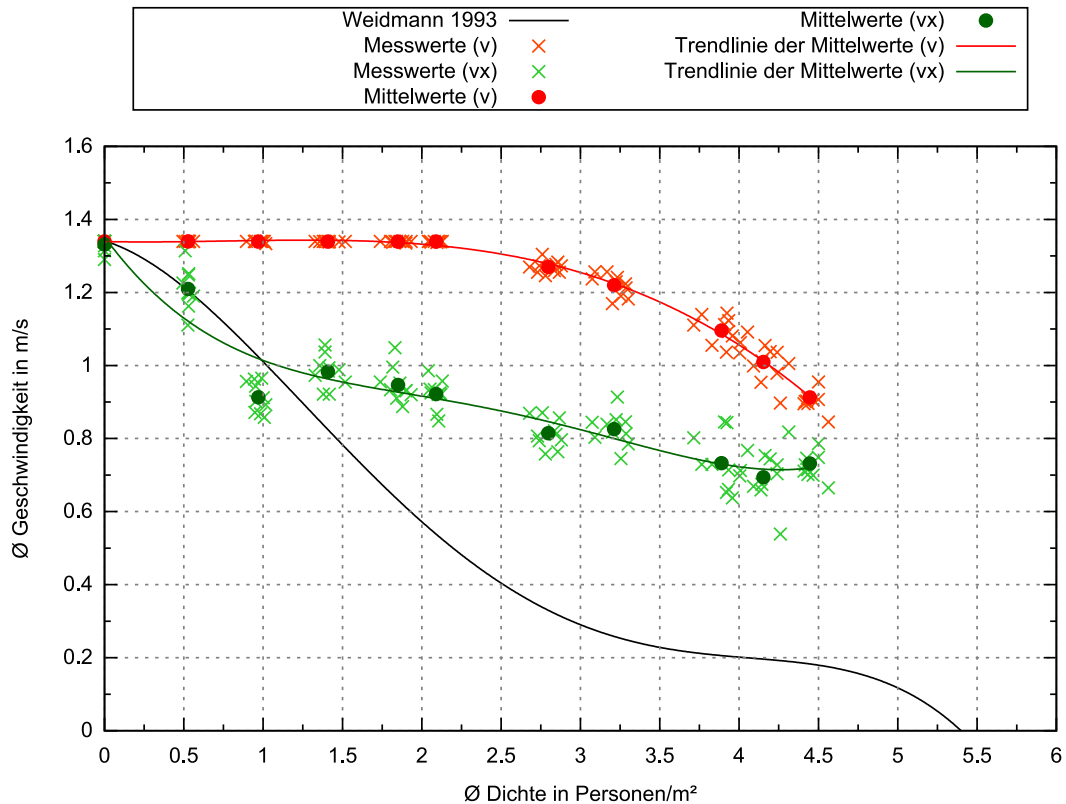


Abbildung 32 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Auch die Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ zeigen eine Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit von der Personendichte (Abbildung 32). Allerdings zeigen sich erst Auswirkungen auf die Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit (rote Kurve) ab einer Dichte von über 2 Personen pro Quadratmeter. Von dort an wird die Kurve zunehmend steiler. Der niedrigste Mittelwert der allgemeinen Dichte liegt bei ungefähr 4,5 Personen pro Quadratmeter und ungefähr 0,9 Meter pro Sekunde. Alle Werte liegen jedoch weit über den erwarteten Werten aus dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993).

Die ersten 3 Mittelwerte der Kurve zur Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve) liegen ungefähr bei den erwarteten Werten. Allerdings zeigt sich, dass die Mittelwerte unerwartet schwanken, wodurch nicht alle Werte auf der Kurve liegen. Besonders die Flussgeschwindigkeiten bei einer Dichte von ungefähr 1 Person pro Quadratmeter weichen

stark ab. Der Mittelwert der Flussgeschwindigkeiten liegt mit ungefähr 0,91 Meter pro Sekunde noch unterhalb des Mittelwerts bei ungefähr 2,1 Personen pro Quadratmeter, der bei ungefähr 0,92 Meter pro Sekunde liegt. Die Form der Kurve entspricht grob der Kurve der „EGOAPagents“, allerdings ist die Steigung deutlich niedriger.

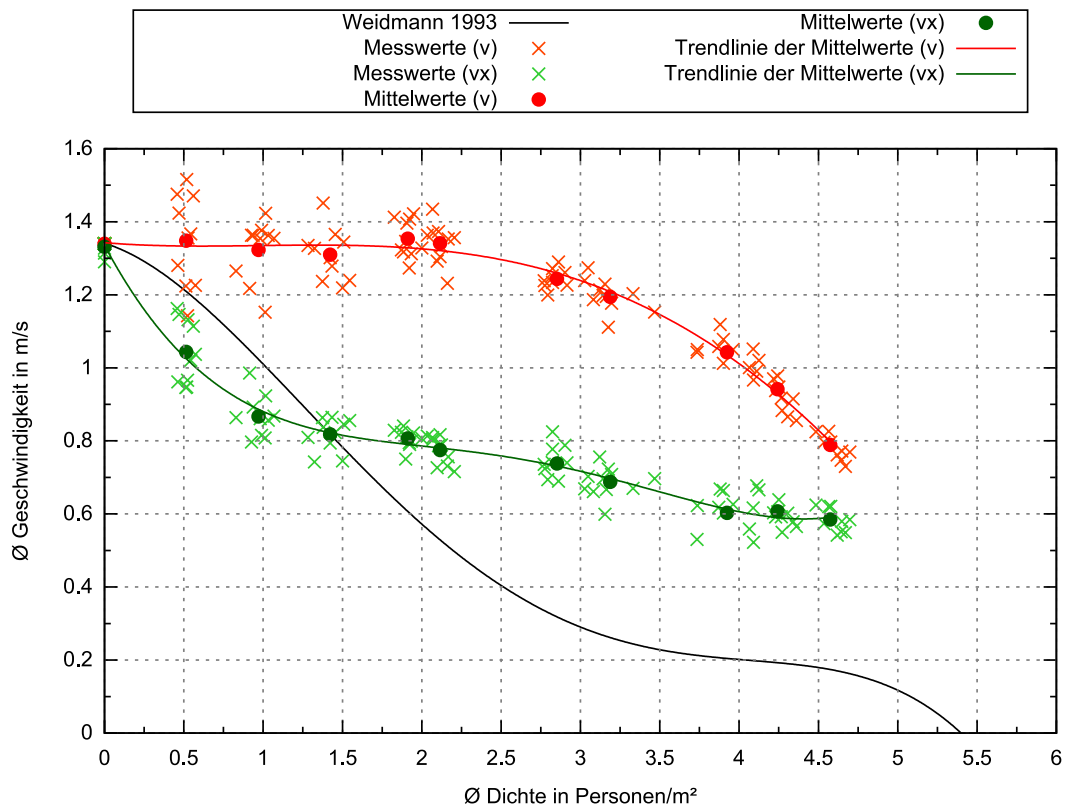
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 33 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Die Form und der Verlauf der Kurven, die mit unterschiedlichen Agenten erstellt wurden, unterscheiden sich kaum von den Kurven, die mit identischen Agenten bestimmt wurden. Die Mittelwerte der Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit (rote Kurve) sind auch nur geringfügig niedriger. Die Mittelwerte der Kurve der Flussgeschwindigkeit sind dagegen deutlich niedriger und liegen größtenteils ungefähr 0,15 Meter pro Sekunde unter den Mittelwerten, die zuvor für die Geschwindigkeiten bei der Versuchsreihe mit identischen Agenten bestimmt wurden. Der sehr niedrige Mittelwert bei ungefähr 1 Person pro Quadratmeter ist bei dieser Versuchsreihe nicht vorhanden. Es sind dagegen Schwankungen der Mittelwerte der allgemeinen Geschwindigkeit zu erkennen, die allerdings durchaus zu erwarten sind, da sich die Agenten mit maximaler Geschwindigkeit fortbewegen und diese durch eine Normalverteilung den Agenten zugewiesen wurde. Die gemessene durchschnittliche Geschwindigkeit ist also auch immer davon abhängig, welche Agenten sich gerade im Messbereich befinden.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ zeigen zwar eine Abnahme der Geschwindigkeiten bei einer Zunahme der Dichte, aber die Auswirkungen der Dichtezunahme sind zu gering. Dies ist auf den ersten Blick unerwartet, da das Modell größtenteils dem Modell der „EGOAPAgents“ entspricht. Der einzige Unterschied zwischen den Modellen ist, dass die „EGOAPAgents“ keine Kollisionsvermeidung durchführen, sondern nach der Bewegung aller Agenten eine Kollisionsauflösung vom System durchgeführt wird. Die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ sorgen dagegen dafür, dass es erst gar nicht zu einer Kollision kommt (siehe 3.3.3 Kollisionsvermeidung). Eine nachträgliche Auflösung wäre nicht möglich, da die Umwelt es nicht erlaubt, Agenten so zu platzieren, dass sie kollidieren. Diese Kollisionsvermeidung scheint jedoch „zu gut“ zu funktionieren, da sich die Agenten selbst bei hohen Dichten noch mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten bewegen können. Da die Agenten mit Regeln arbeiten, wäre es möglich ihnen Regeln beizubringen, die die Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Dichte anpassen.

Wieso bei der Versuchsreihe mit identischen Agenten ein ungewöhnlich niedriger Wert der Flussgeschwindigkeit bei ungefähr 1 Person pro Quadratmeter vorhanden ist, ist schwer zu erklären. Dieses Problem sollte genauer analysiert und anschließend behoben werden.

Im Vergleich zu den anderen Bewegungsmodellen zeigt dieses Bewegungsmodell einen größeren Einfluss unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeiten der Agenten auf die durchschnittliche Flussrate. Dies ist positiv zu betrachten, da ein Ausbremsen und Blockieren schnellerer Agenten durch langsamere Agenten durchaus zu erwarten ist.

7.1.1.3 PedSim

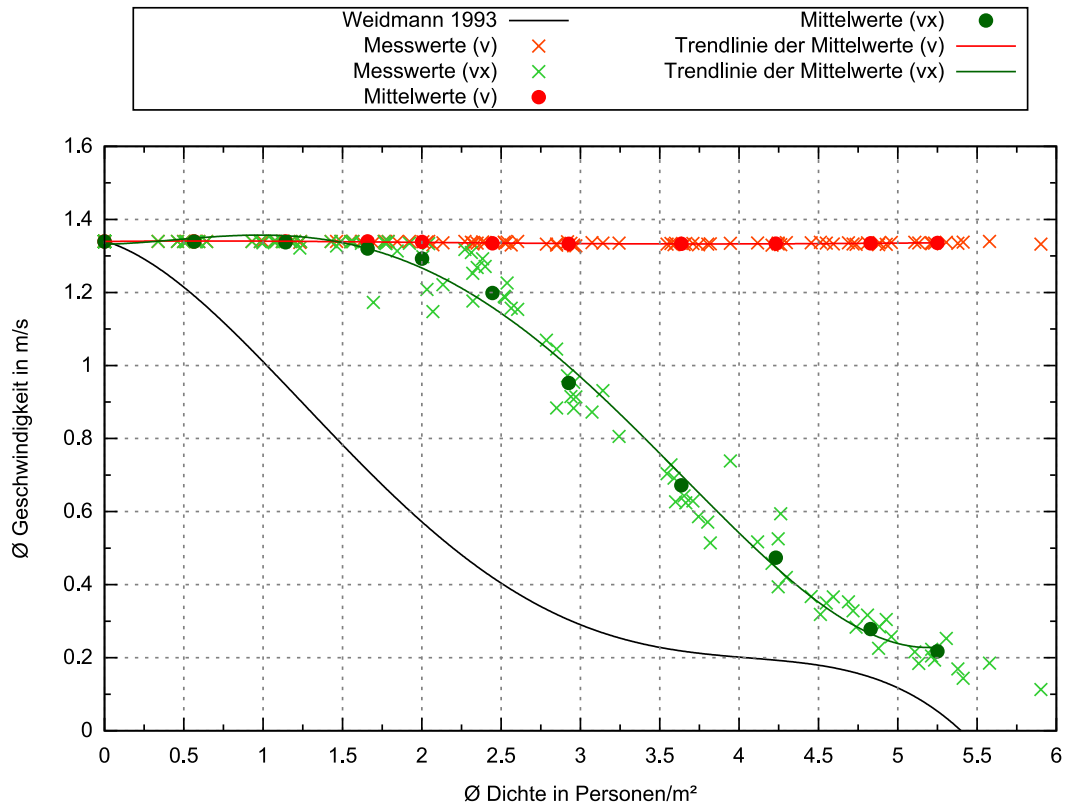
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 34 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“

Die allgemeine Geschwindigkeit (rote Kurve) in „PedSim“ zeigt keinerlei Abhängigkeit von der Dichte (Abbildung 34). Die Geschwindigkeit der Agenten bleibt unabhängig von der Dichte immer identisch. Die Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve) hingegen zeigt eine Abhängigkeit, die stark an die von Weidmann (1993) beschriebene Abhängigkeit erinnert. Der größte Unterschied zwischen der Kurve der Flussgeschwindigkeit und der Kurve von Weidmann (1993) ist, dass niedrige Dichten in „PedSim“ noch keinen Einfluss auf die Flussgeschwindigkeit der Agenten haben. Erst bei Dichten über 1,5 Personen pro Quadratmeter nimmt die Flussgeschwindigkeit der Agenten ab. Der maximale Geschwindigkeitsabfall entspricht dem maximalen Geschwindigkeitsabfall der Kurve von Weidmann (1993). Auch die nur noch geringe Steigung bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 0,2 Meter pro Sekunde entspricht den Erwartungen. Würde die Kurve der Flussgeschwindigkeit um ungefähr 1,5 Personen pro Quadratmeter nach links verschoben sein, würde sie fast perfekt der Kurve von Weidmann (1993) entsprechen.

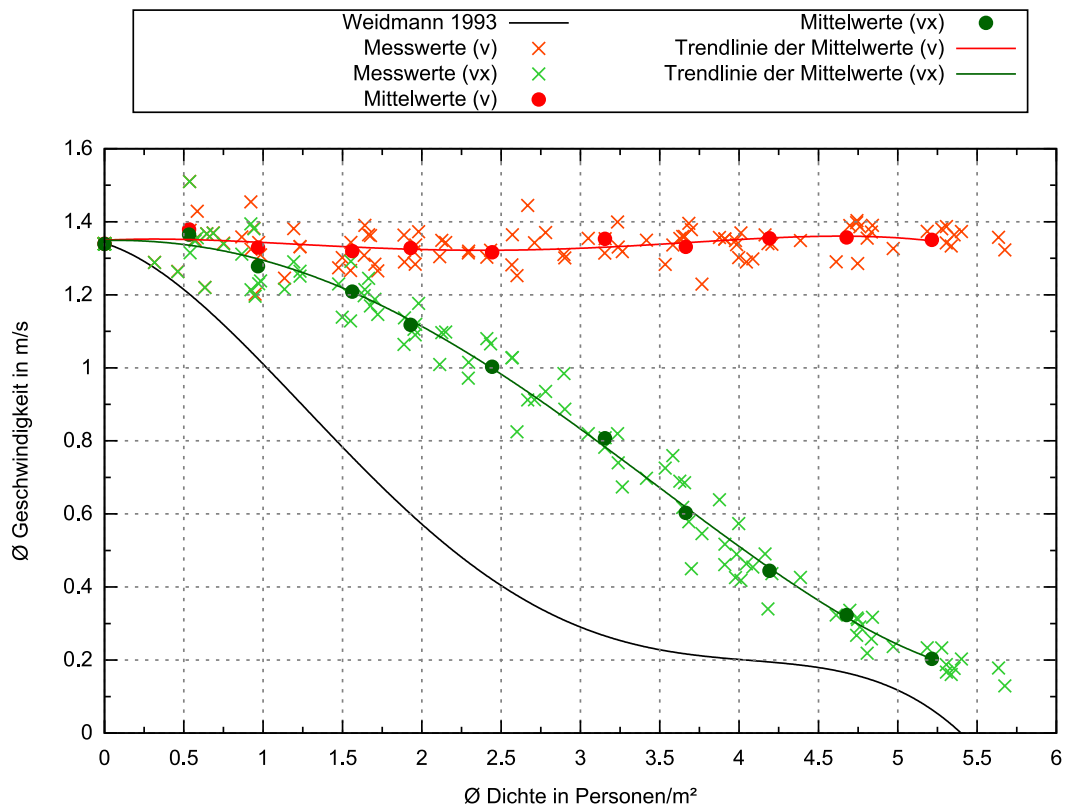
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 35 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“

Die Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit (rote Kurve) für „PedSim“ mit unterschiedlichen Agenten ist weitestgehend identisch mit der Kurve der allgemeinen Geschwindigkeit bei identischen Agenten. Durch die Normalverteilung der maximalen Geschwindigkeiten gibt es leichte Schwankungen der Messwerte und Mittelwerte, dies ist aber zu erwarten. Die Kurve der Flussgeschwindigkeit (grüne Kurve) hat immer noch Ähnlichkeit mit der erwarteten Kurve von Weidmann (1993). Jedoch ist diese Ähnlichkeit geringer als vorher, da die Kurve deutlich flacher verläuft und geringere Wendungen besitzt. Die Werte der Flussgeschwindigkeit sind für niedrigere Dichten deutlich kleiner als zuvor. Während Agenten sich bei einer Dichte von ungefähr 1,6 Personen pro Quadratmeter zuvor noch mit 1,32 Meter pro Sekunde bewegten und somit fast mit der maximalen Geschwindigkeit von 1,34 Meter pro Sekunde, beträgt die Flussgeschwindigkeit jetzt ungefähr 1,2 Meter pro Sekunde. Ab einer Dichte von ungefähr 4 Personen pro Quadratmeter gibt es aber kaum noch Unterschiede in den Werten der Flussgeschwindigkeit. Die Flussgeschwindigkeit nimmt bei unterschiedlichen Agenten bereits bei ungefähr 1 Person pro Quadratmeter ab

und somit deutlich früher als bei identischen Agenten. Die Werte liegen dadurch deutlich dichter an den erwarteten Werten.

Begründungen und Schlussfolgerungen

„PedSim“, das auf dem „Social Force Model“ basiert, zeigt einerseits bei Betrachtung der Flussgeschwindigkeit eine gute Übereinstimmung mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993). Wird allerdings die allgemeine Geschwindigkeit betrachtet, so gibt es keine Übereinstimmungen, da diese immer identisch ist. Dies ist dadurch begründet, dass die Agenten in „PedSim“ niemals still stehen. Selbst im Stau, z.B. vor einer Engstelle, sind sie immer in Bewegung und kreisen in der Menge umher. Soll also das individuelle Bewegungsverhalten der Agenten betrachtet werden, ist „PedSim“ ungeeignet, da so ein Verhalten nicht realistisch ist. Das Bewegungsverhalten der Menge, im Sinne einer Vorwärtsbewegung zum Ziel, ist realistisch. Durch eine Kalibrierung des Modells, also z.B. einer Anpassung der Kräfte, sollte sich eine noch größere Übereinstimmung der Flussgeschwindigkeit mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) erreichen lassen. Im Moment ist der Einfluss kleiner Dichten auf die Flussgeschwindigkeit noch deutlich zu gering.

Agenten mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten haben den erwarteten Einfluss auf die Flussgeschwindigkeit und sorgen dafür, dass die Werte der Kurve dichter an den Werten des Fundamentaldiagramms von Weidmann (1993) liegen. Die Werte der Flussgeschwindigkeit sind deutlich niedriger und schon bei geringeren Dichten ist ein Einfluss auf die Flussgeschwindigkeit erkennbar.

7.1.2 Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss)

Engstellendiagramme dienen der Betrachtung der Abhängigkeit der Flussrate durch eine Engstelle in Personen pro Sekunde von der Breite der Engstelle in Meter. Abbildung 36 zeigt beispielhaft eine der durchgeführten Versuchsreihen mit dem Fußgängermodell von „MARS LIFE“ und einer Engstellenbreite von 1,6 Meter. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt. Die Anordnung der Agenten vor der Engstelle in Halbkreis- bzw. Bogenform („Arching“) ist deutlich erkennbar.

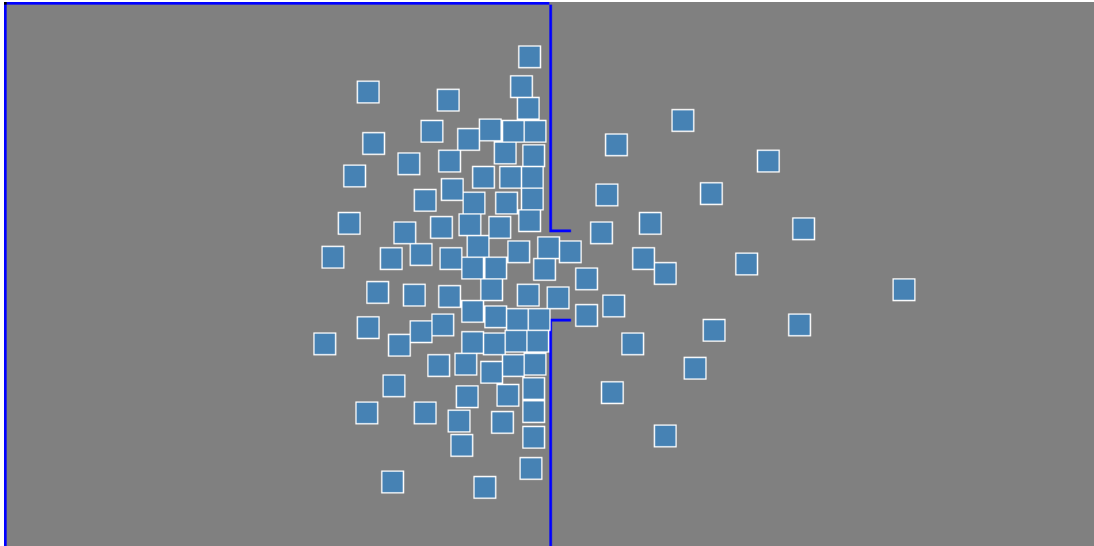


Abbildung 36 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) mit einer Engstellenbreite von 160 cm unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Im Folgenden werden die erstellten Engstellendiagramme für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Hierbei werden jeweils zuerst die Versuchsreihen mit den Agenten betrachtet, die identische maximale Geschwindigkeiten besitzen. Danach werden die Versuchsreihen mit den Agenten betrachtet, die unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten besitzen.

7.1.2.1 WALK EGOAPAgent

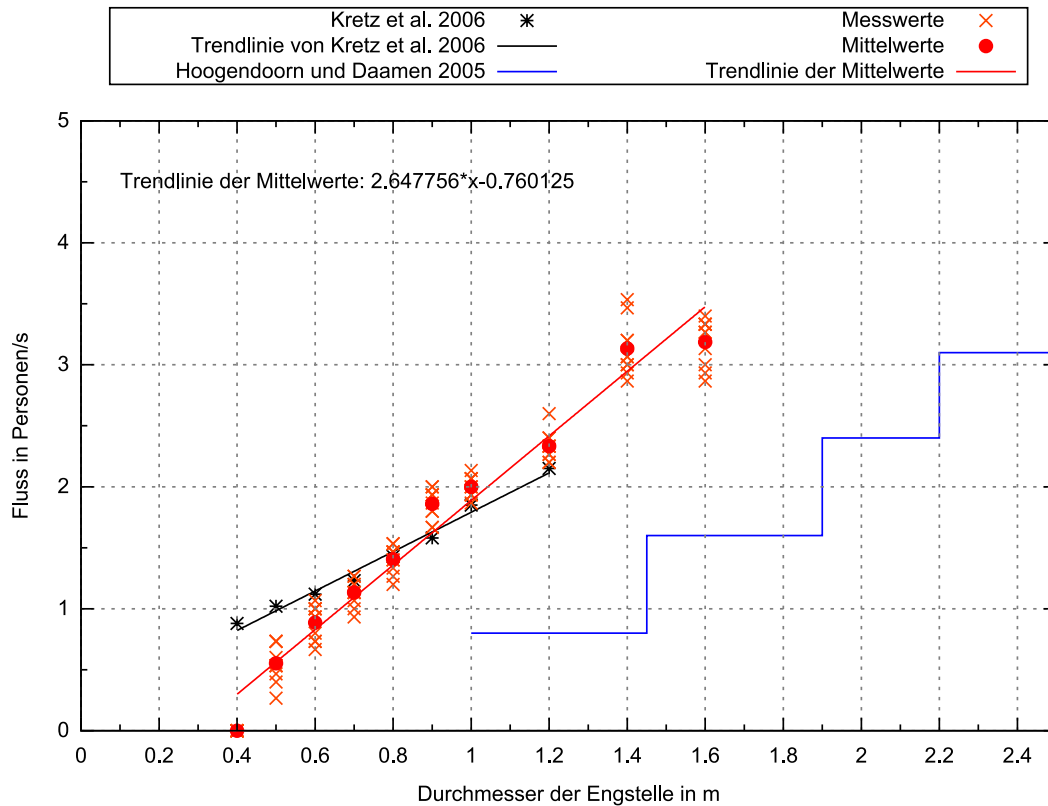
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 37 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die Mittelwerte der Flussrate in den Versuchen mit identischen „EGOAPAgents“ in „WALK“ lassen sich deutlich in Form einer Gerade annähern (Abbildung 37). Es ist somit wie erwartet eine lineare Abhängigkeit zwischen der Engstellenbreite und der Flussrate erkennbar. Die berechneten Mittelwerte der Flussrate liegen jedoch teilweise unterhalb oder oberhalb der von Kretz et al. (2006) bestimmten Werte. Für Engstellenbreiten von 0,4 bis 0,8 Meter ergibt sich eine zu niedrige Flussrate. Danach liegen die in den Simulationen bestimmten Werte jedoch höher. Bei einer Engstellenbreite von 0,4 Meter ist in den Simulationen bereits kein Fluss durch die Engstelle mehr möglich. Die Messwerte von Kretz et al. (2006) zeigen jedoch noch eine Flussrate von knapp unter 1 Person pro Sekunde. Eine Übereinstimmung mit den Werten oder dem Verlauf von Hoogendoorn und Daamen (2005) ist nicht erkennbar. Auffällig sind die Mittelwerte der Flussrate bei 1,2 und 1,6 Meter, die von der bestimmten Gerade abweichen und unterhalb dieser liegen. Bei einer Breite von

0,9 Meter wurde dagegen ein Fluss bestimmt, der oberhalb der Gerade über die Mittelwerte liegt.

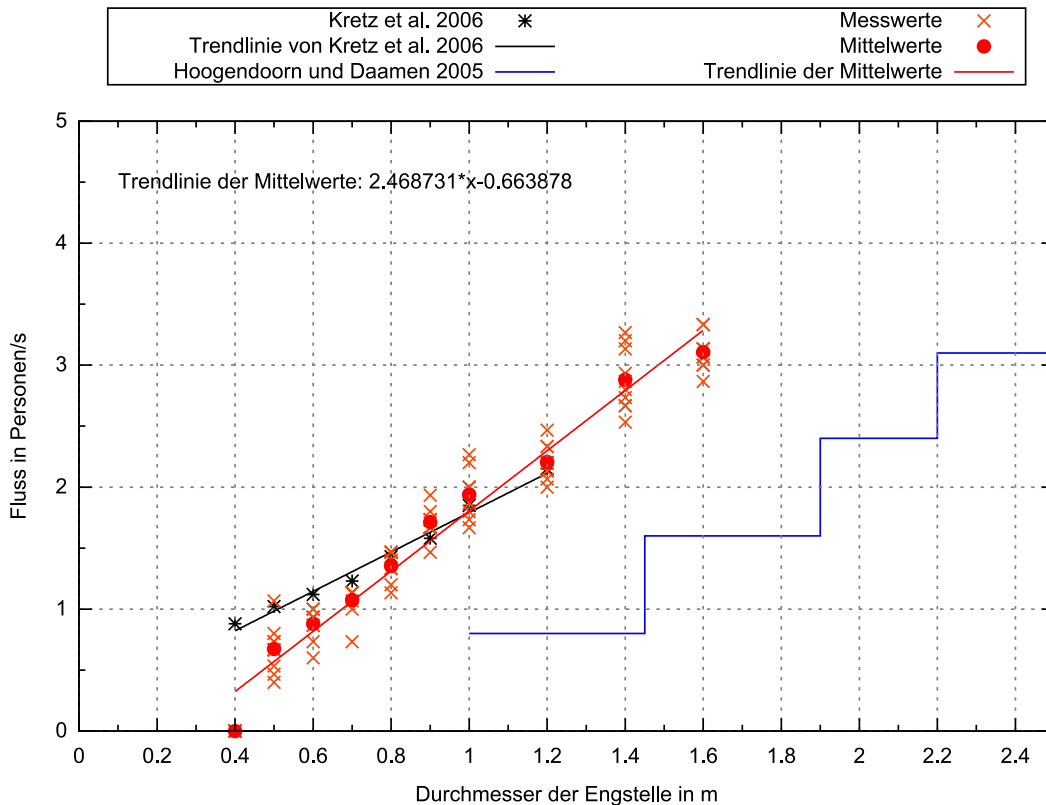
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 38 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die in den Versuchen mit unterschiedlichen „EGOAPAgents“ in „WALK“ bestimmte Gerade weicht kaum von der mit identischen Agenten bestimmten Gerade ab (Abbildung 38). Es zeigen sich die gleichen Auffälligkeiten wie zuvor. Die Flusswerte liegen jedoch alle leicht unterhalb der zuvor berechneten Werte. Die Steigung der Gerade beträgt dadurch nur noch ungefähr 2,47 statt wie zuvor ungefähr 2,65.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Die „EGOAPAgents“ in „WALK“ zeigen prinzipiell die erwartete lineare Abhängigkeit zwischen der Engstellenbreite und der Flussrate durch die Engstelle. Allerdings ist die Flussrate bei niedrigen Engstellenbreiten zu gering. Dies ist damit zu begründen, dass die Agenten eine quadratische Form mit einer Seitenlänge von 0,4 Meter besitzen. Ein Durchqueren von Engstellen mit einer geringeren Breite als 0,4 Meter ist damit ausgeschlossen. Bei genau 0,4 Meter Engstellenbreite scheitern die Agenten am Durchqueren der Engstelle, da sie die Länge ihres Bewegungsvektors nicht anpassen

können und somit den Durchgang nicht präzise genug ansteuern können. Bei etwas breiteren Engstellen fällt es den Agenten noch zu schwer, die Engstelle zu passieren. Dies kann gut durch die Form der Agenten und die fehlende Möglichkeit der Agenten sich zu drehen begründet sein. Durch eine genauere Fortbewegung der Agenten, eine realistischere Form der Agenten und die Möglichkeit, dass sich Agenten drehen und somit z.B. auch seitwärts durch die Engstelle gehen können, sollten sich somit bessere Flussraten für niedrige Engstellenbreiten erreichen lassen.

Die etwas unterhalb der bestimmten Gerade liegenden Mittelwerte bei 1,2 Meter und 1,6 Meter Engstellenbreite sind dadurch zu erklären, dass es sich dabei um Vielfache von der Agentenbreite handelt. Somit ist es möglich, dass genau 3 bzw. genau 4 Agenten gleichzeitig die Engstelle durchqueren können. Dies führt jedoch in der Simulation zu vielen Kollisionen zwischen diesen Agenten, was sie deutlich verlangsamt. Erwartet würde eher das gegenteilige Verhalten, da sich die Anzahl der Agenten, die die Engstellen passieren können, bei diesen Breiten im Vergleich zu den jeweils zuvor simulierten Breiten um 1 Agenten erhöht. Dieses Verhalten wird von Hoogendoorn und Daamen (2005) beschrieben. Das Problem, dass sich die Agenten bei Vielfachen ihrer Breite leichter in der Engstelle verklemmen, sollte also behoben werden. Hierfür wären erneut eine genauere Fortbewegung und ein Reduzieren des „Zitterns“, also der unnötigen Seitwärtsbewegungen der Agenten, nötig.

Durch Kalibrierungen sollte es möglich sein, eine noch höhere Übereinstimmung mit den Werten von Kretz et al. (2006) zu erreichen. Es muss aber auch beachtet werden, dass das Vorhandensein einer linearen Abhängigkeit zwischen Flussrate und Engstellenbreite als wichtiger zu betrachten ist. Die genauen Werte von Kretz et al. (2006) wurden in einem Experiment bestimmt und müssen daher nicht als Vorlage für die Werte des Bewegungsmodell dienen.

Der Einfluss von unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der Agenten ist in diesem Modell gering, aber sichtbar. Eine längere Engstelle würde diesen Einfluss vergrößern, da langsame Agenten länger brauchen würden, um die Engstelle zu durchqueren. Dabei würden sie schnellere Agenten blockieren und abbremsen.

7.1.2.2 WALK ModularAgent

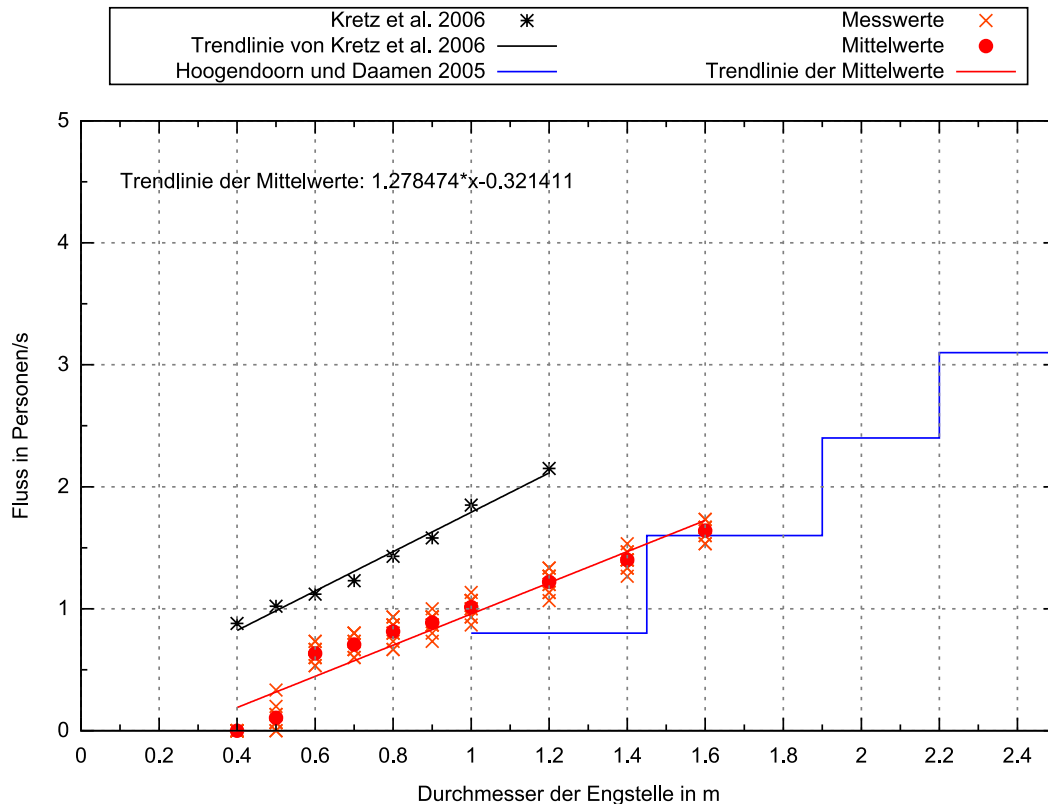
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 39 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Die Mittelwerte der Flussrate in den Versuchen mit identischen „ModularAgents“ in „WALK“ lassen sich ebenfalls deutlich durch eine Gerade annähern (Abbildung 39). Die Steigung dieser Gerade ist dabei nur etwas geringer als die Steigung der Gerade von Kretz et al. (2006). Allerdings sind alle Flusswerte zu niedrig. Abweichungen von der Gerade gibt es bei 0,4 Meter und 0,5 Meter Engstellenbreite. Bei 0,4 Meter Engstellenbreite kommt kein Fluss durch die Engstelle zustande. Bei 0,5 Meter Engstellenbreite kommt kaum Fluss durch die Engstelle zustande. Würde man diese beiden Punkte nicht bei der Berechnung der Gerade berücksichtigen, wäre die Steigung der Gerade etwas geringer. Es würde sich aber auch zeigen, dass die Mittelwerte bei den identischen „ModularAgents“ fast perfekt auf dieser Gerade liegen und es im Gegensatz zu der Gerade der „EGOAPAgents“ kaum Abweichungen gibt.

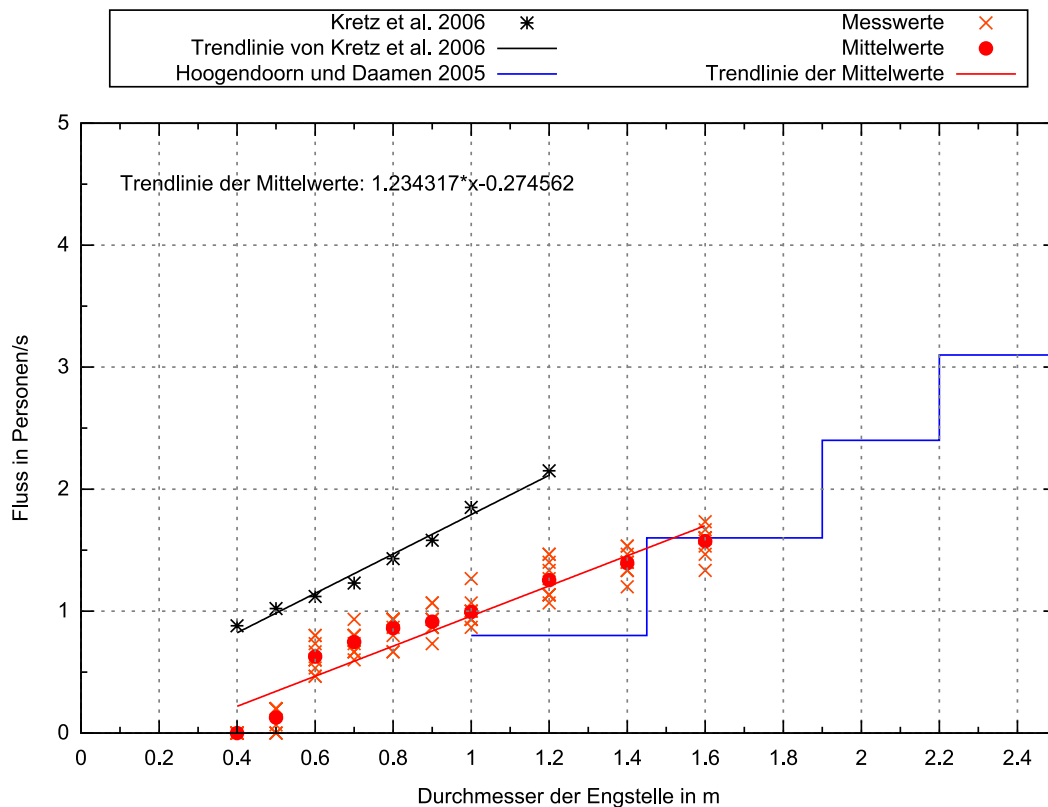
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 40 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Auch die in den Versuchen mit unterschiedlichen „ModularAgents“ in „WALK“ bestimmte Gerade weicht kaum von der mit identischen Agenten bestimmten Gerade ab (Abbildung 40). Die Mittelwerte und die Gerade stimmen mit den Ergebnissen der Simulationen mit identischen Agenten fast überein. Die Mittelwerte von 0,6 Meter bis 1,6 Meter liegen nicht mehr auf einer fast perfekten Gerade, dies ist jedoch bei normalverteilten Maximalgeschwindigkeiten der Agenten nicht verwunderlich.

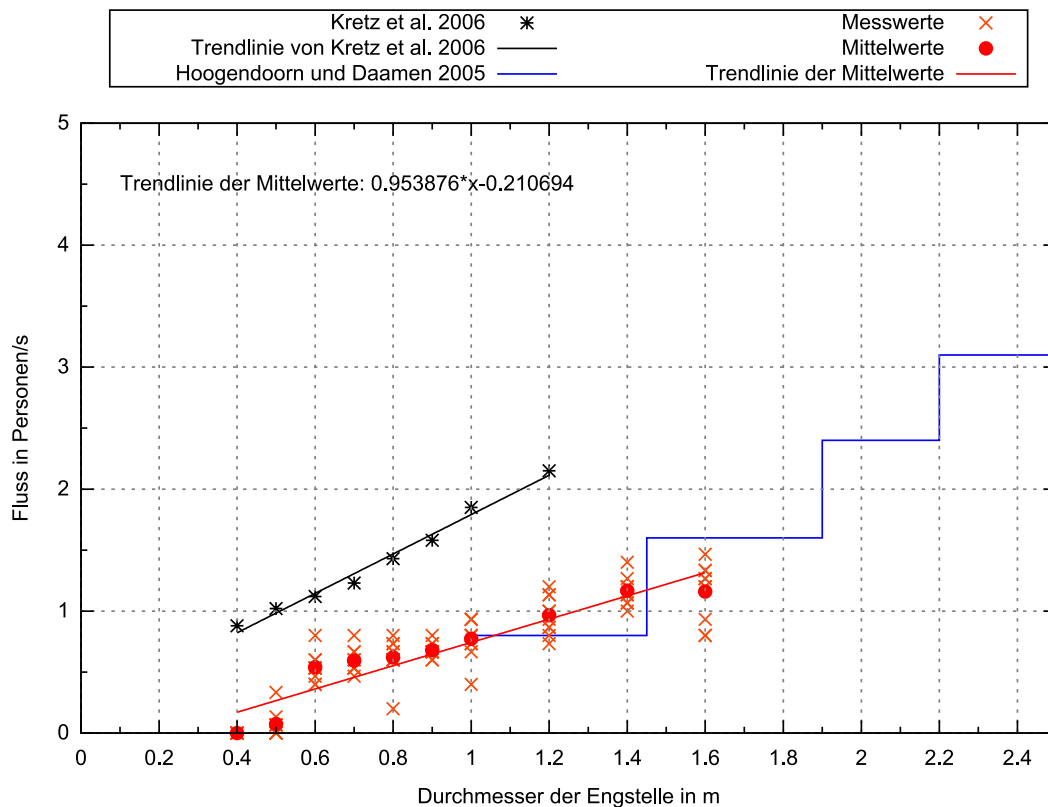
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und sozialen Gruppen

Abbildung 41 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und Einteilung in soziale Gruppen in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Soziale Gruppen haben einen deutlich größeren Einfluss auf die Flussrate durch Engstellen (Abbildung 41). Sie verringern die Flussrate stark. So liegt unter anderem die Flussrate bei einer Engstellenbreite von 1 Meter nur noch bei ungefähr 0,8 Personen pro Sekunde statt 1 Person pro Sekunde.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Die „ModularAgents“ in „WALK“ zeigen eine gute Übereinstimmung des Verhaltens mit den Vergleichsdaten von Kretz et al. (2006). Die Werte sind jedoch alle zu niedrig. Dies ist durch das Verhalten der Agenten bei hohen Dichten zu erklären. Wie bereits beim Fundamentaldiagramm beschrieben, reduzieren die „ModularAgents“ ihre Bewegungsgeschwindigkeit abhängig von der Dichte, die sie um sich herum wahrnehmen. Da sich vor der Engstelle ein Stau bildet, bewegen sich die Agenten also auch langsamer und durchqueren die Engstelle langsamer. Bei den Versuchen zum Fundamentaldiagramm wurde gezeigt, dass sich die „ModularAgents“ immer zu langsam bewegen. Würde also

durch Kalibrierung der Regel, die für eine Reduzierung der Geschwindigkeit sorgt, eine bessere Übereinstimmung mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) erreicht werden, so würde dies auch zu höheren Flussraten bei den Engstellenversuchen führen. Somit würde auch die Gerade des Engstellendiagramms dichter an den von Kretz et al. (2006) bestimmten Werten liegen.

Für Engstellenbreiten unterhalb von 0,5 Meter ist das Verhalten jedoch nicht realistisch. Wie auch bei den „EGOAPAgents“ müssten die Agenten, um realistischere Ergebnisse zu liefern, sich genauer fortbewegen können sowie eine andere Form besitzen und die Fähigkeit sich zu drehen, um seitwärts durch Engstellen gehen zu können.

Unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten der Agenten haben bei den Versuchen mit den „ModularAgents“ so gut wie keinen Einfluss auf die Flussrate durch die Engstelle, was jedoch erneut auch durch die kurze Länge der Engstelle zu begründen ist. Die Einteilung der Agenten in soziale Gruppen hat dagegen einen deutlichen Einfluss auf die Flussrate durch die Engstelle. Die Mitglieder einer solchen sozialen Gruppe versuchen die Engstelle miteinander zu durchqueren, wodurch sie andere Agenten stärker blockieren. Sie bewegen sich dabei mit der Geschwindigkeit des langsamsten Mitglieds der Gruppe.

7.1.2.3 MARS LIFE Fußgängermodell

Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

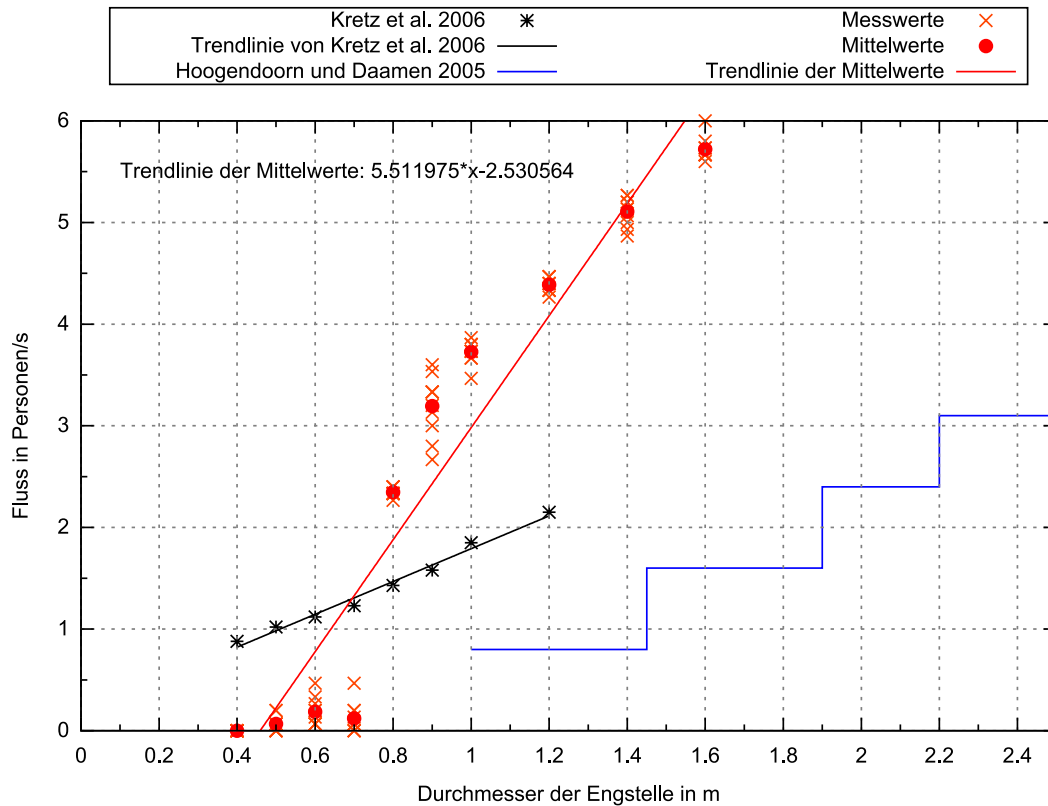


Abbildung 42 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Die Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ mit identischer Maximalgeschwindigkeit zeigen für Engstellenbreiten von 0,8 Meter und mehr ein Verhalten, das als lineare Abhängigkeit der Flussrate durch die Engstelle von der Engstellenbreite angesehen werden könnte (Abbildung 42). Allerdings ist die Steigung der Gerade im Vergleich mit der Gerade von Kretz et al. (2006) deutlich zu hoch. Die Flusswerte bei Engstellenbreiten von 0,8 Meter und mehr liegen weit über den Erwartungen. Andererseits ist bei Engstellenbreiten von 0,7 Meter und weniger kaum Fluss durch die Engstelle vorhanden. Bei einer Engstellenbreite von 0,9 Meter sind starke Schwankungen der Messwerte erkennbar.

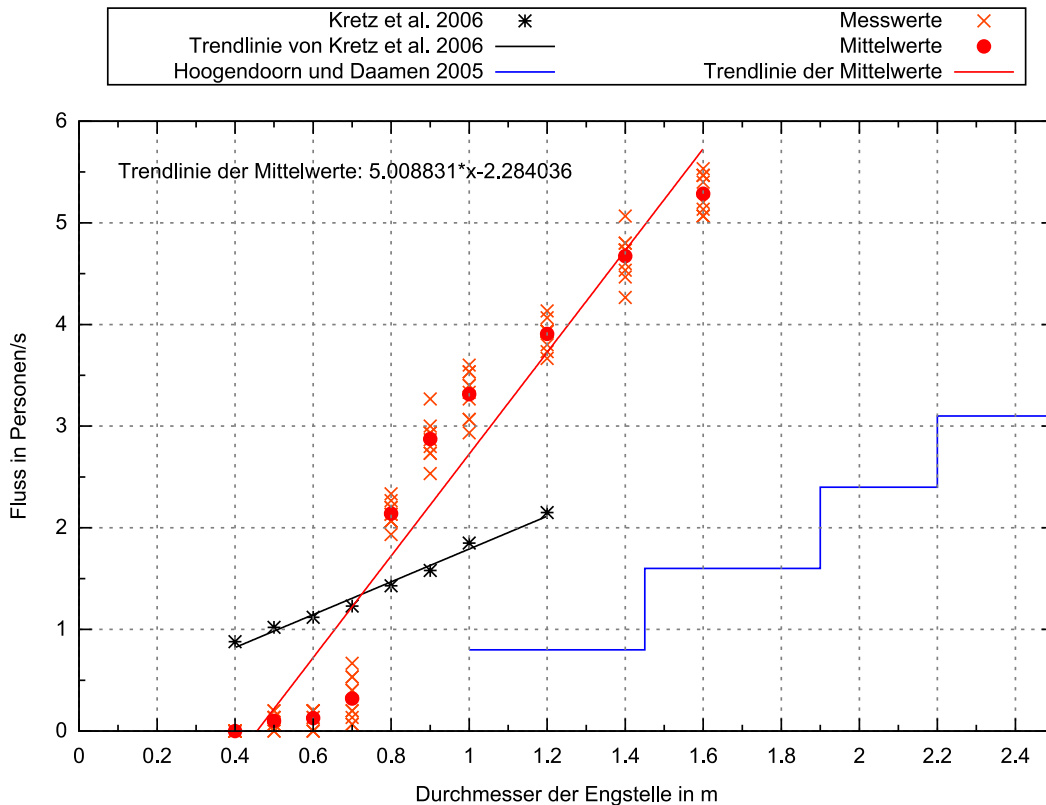
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 43 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Im Gegensatz zu den Bewegungsmodellen in „WALK“ zeigt sich bei den Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeit der Agenten auf die Flussrate durch die Engstelle (Abbildung 43). Das grundlegende Verhalten verändert sich im Vergleich mit dem Diagramm der identischen Agenten nicht. Die Messwerte sind jedoch alle deutlich niedriger als zuvor. Beispielsweise beträgt die Flussrate bei 1 Meter Engstellenbreite nur noch ungefähr 3,3 Personen pro Sekunde statt wie vorher ungefähr 3,7 Personen pro Sekunde.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Das grundlegende Verhalten der Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ kann nur für Engstellenbreiten von 0,8 Meter und mehr als korrekt angesehen werden. Bei Engstellenbreiten von 0,7 Meter und weniger fällt es den Agenten viel zu schwer, die Engstelle zu durchqueren. Dies ist dadurch begründet, dass die Agenten keinerlei Möglichkeit haben, andere Agenten aus dem Weg zu schieben. Versuchen z.B. zwei

Agenten von jeweils 0,4 Meter Breite gleichzeitig eine Engstelle von 0,7 Meter Breite zu durchqueren, so ist kein Fluss mehr möglich, wenn sie mittig vor der Engstelle aufeinandertreffen. Um die Engstelle in dieser Situation durchqueren zu können, müsste die Engstelle eine Breite von zwei Agenten, also 0,8 Meter haben. Da keiner der Agenten den anderen Agenten so weit wegschieben kann, dass er für sich selbst mindestens 0,4 Meter der Engstelle hat, kommt es zum Stillstand. Dieses Problem muss behoben werden. Die „EGOAPAgents“ von „WALK“ können andere Agenten wegschieben. Dies ergibt sich implizit durch die Kollisionsauflösung. Da die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ keine Kollisionsauflösung, sondern eine Kollisionsvermeidung durchführen, fehlt ihnen die Fähigkeit, andere Agenten wegzuschieben, obwohl sie auf den „EGOAPAgents“ basieren. Um das Problem zu lösen, müsste den Agenten also explizit eine Möglichkeit gegeben werden, mit anderen Agenten zu interagieren und sie wegschieben zu können.

Die zu hohen Flusswerte bei Engstellenbreiten von über 0,8 Meter sind unter anderem von den zu hohen Geschwindigkeiten der Agenten, die sich im Fundamentaldiagramm gezeigt haben, abhängig. Würden sich die Agenten in der hohen Dichte vor der Engstelle langsamer bewegen, so würden dementsprechend auch die Flussraten niedriger sein. Durch eine Lösung des Problems der zu hohen Geschwindigkeiten würden also auch realistischere Flussraten erreicht werden.

Unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten der Agenten haben bei den Versuchen mit den Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ einen deutlichen Einfluss auf die Flussrate gehabt. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen.

7.1.2.4 PedSim

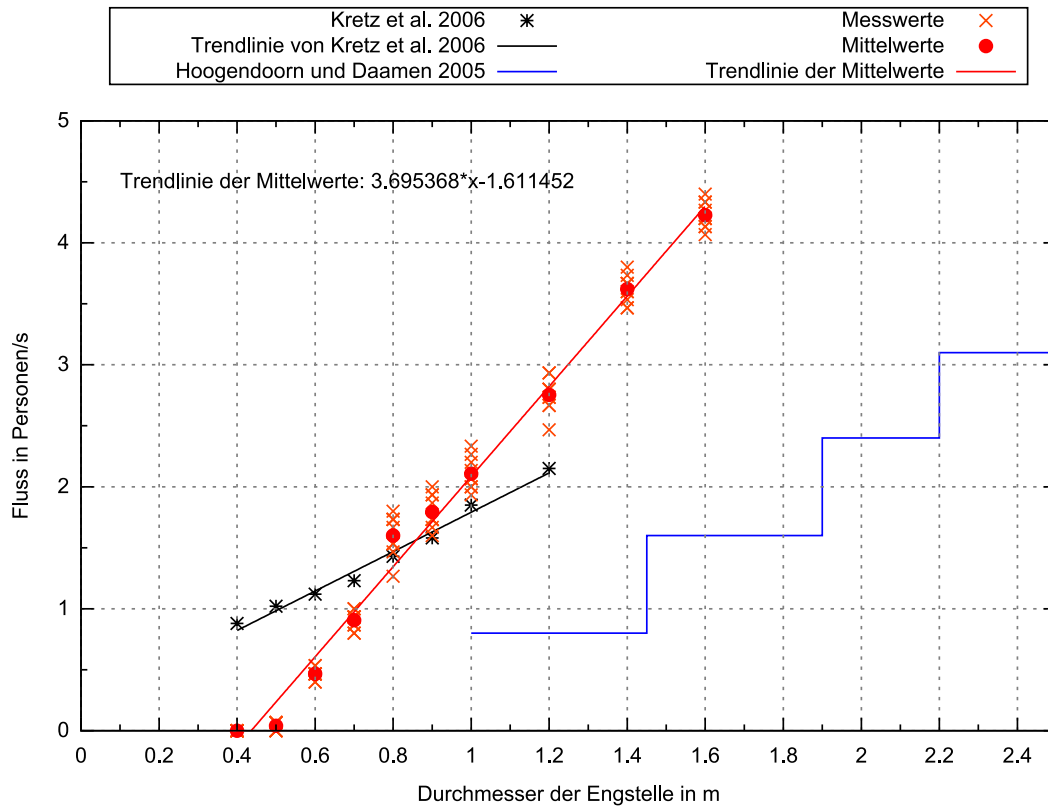
Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 44 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“

Die Agenten von „PedSim“ zeigen eine klare lineare Abhängigkeit der Flussrate von der Engstellenbreite (Abbildung 44). Allerdings sind die Flussraten unterhalb von 0,8 Meter Engstellenbreite zu niedrig und die Flussraten oberhalb von 0,8 Meter zu hoch. Bei einer Engstellenbreite von 0,4 Meter ist kein Fluss durch die Engstelle möglich. Auch bei einer Engstellenbreite von 0,5 Meter ist kaum Fluss durch die Engstelle vorhanden.

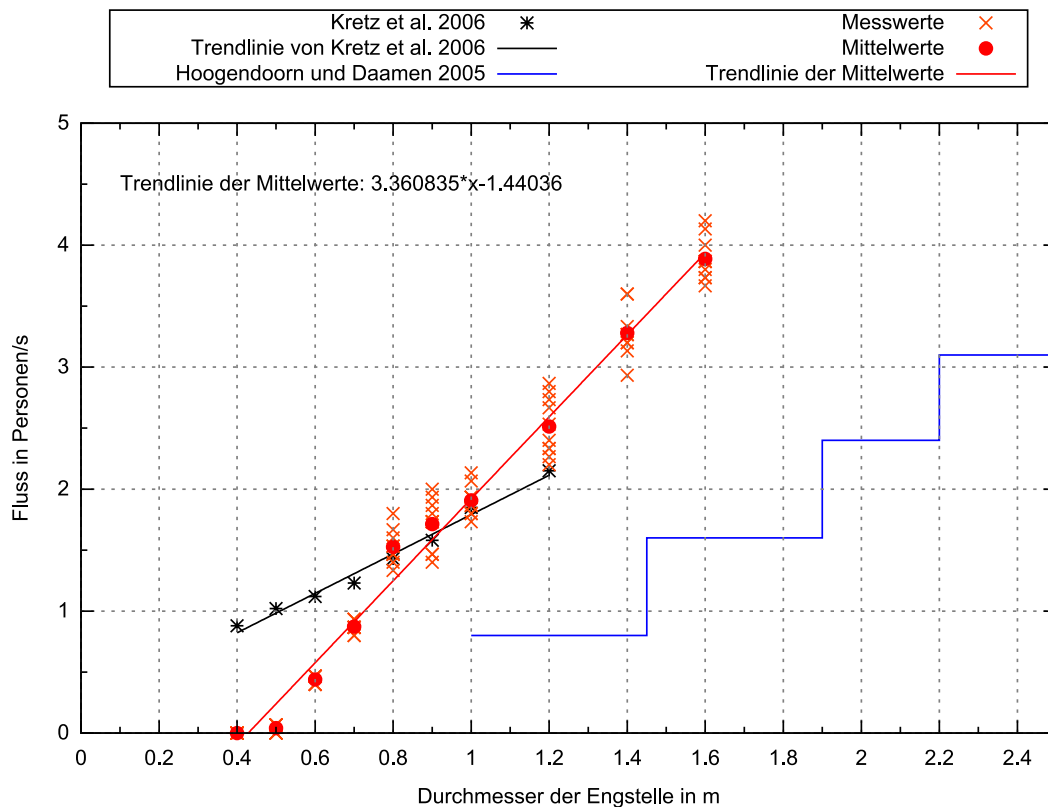
Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit

Abbildung 45 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“

Die Messwerte der Versuche mit Agenten mit unterschiedlichen maximalen Geschwindigkeiten in „PedSim“ sind vor allem bei hohen Engstellenbreiten deutlich niedriger als zuvor (Abbildung 45). Bei einer Engstellenbreite von 1,6 Meter beträgt die Flussrate nur noch 3,9 Personen pro Sekunde statt 4,2 Personen pro Sekunde. Ansonsten gibt es keine nennenswerten Unterschiede.

Begründungen und Schlussfolgerungen

Das grundlegende Verhalten der Agenten von „PedSim“ kann als korrekt angesehen werden, da es der Erwartung einer linearen Abhängigkeit zwischen Engstellenbreite und Flussrate entspricht. Allerdings ist die Flussrate für Engstellenbreiten unterhalb von 0,8 Meter zu niedrig und oberhalb von 0,8 Meter zu hoch. Um dies zu beheben, muss eine Kalibrierung der abstoßenden Kräfte des „Social Force Model“ von „PedSim“ erfolgen. Durch niedrigere Abstoßungskräfte der Wände sollten höhere Flussraten durch die Engstelle erreichbar sein, da die Agenten dann geringere Abstände von den Wänden halten

können. Andererseits sind die zu hohen Flussraten dadurch zu begründen, dass die Flussgeschwindigkeiten der Agenten, wie im Fundamentaldiagramm gezeigt, zu hoch sind. Wenn die Übereinstimmungen mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) verbessert werden, sollte daher auch der Fluss durch die Engstelle geringer werden. Auch ist zu beachten, dass die Agenten bei „PedSim“ keinen festen Körper haben und somit nicht kollidieren können. Dies führt ebenfalls zu höheren Flüssen. Eine Kalibrierung der Abstoßungskräfte der Agenten sollte somit für eine bessere Übereinstimmung mit der Gerade von Kretz et al. (2006) ermöglichen.

Unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten der Agenten haben bei den Versuchen mit den Agenten von „PedSim“ einen deutlichen Einfluss auf die Flussrate gehabt. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen.

7.1.3 Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss)

Die hier analysierten Engstellendiagramme stellen einen anderen Zusammenhang dar, als die zuvor betrachteten. Mit diesen Engstellendiagrammen lässt sich herausfinden, ob es einen Einfluss der Anzahl an Agenten vor der Engstelle auf den Fluss durch die Engstelle in Personen pro Sekunde gibt. Diese Diagramme werden erstellt, da „PedSim“ in der alten Version 2.2 eine sehr starke lineare Abhängigkeit zwischen beiden Werte gezeigt hat, die nicht erwartet wurde (Woggan 2014a). Abbildung 46 zeigt beispielhaft eine der durchgeführten Versuchsreihen mit dem Fußgängermodell von „MARS LIFE“ und 150 Agenten im Startbereich vor der Engstelle. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

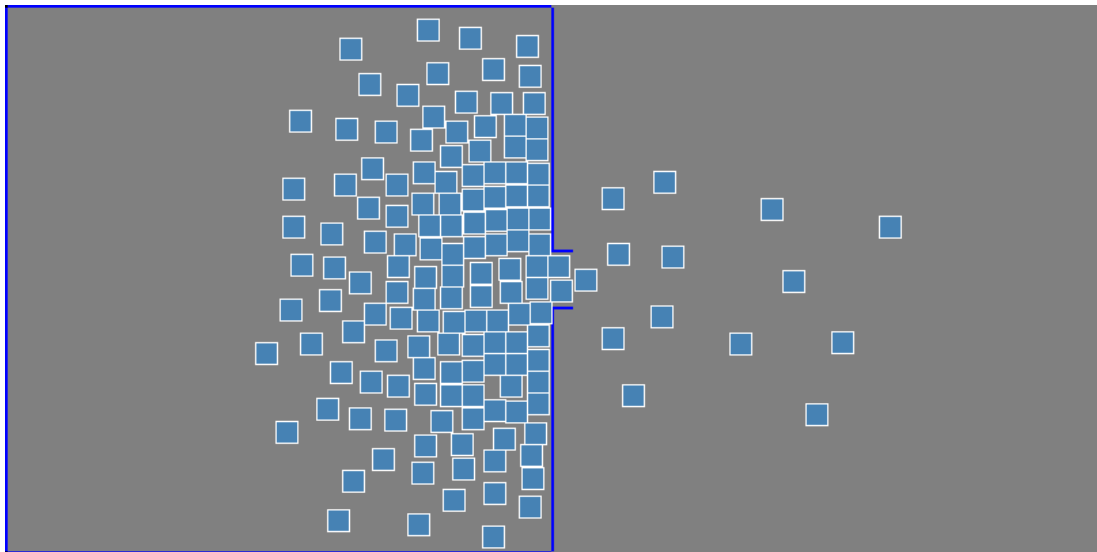


Abbildung 46 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) mit 150 Agenten vor der Engstelle unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Im Folgenden werden die erstellten Engstellendiagramme für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Es wurden zwar Versuchsreihen mit Agenten mit identischen Maximalgeschwindigkeiten und Agenten mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten durchgeführt, jedoch zeigen beide Versuchsreihen jeweils das gleiche Modellverhalten. Der einzige Unterschied liegt in den höheren Flussraten, die bei den Agenten mit identischen Maximalgeschwindigkeiten gemessen werden. Diese sind jedoch für die Betrachtung des Verhaltens nicht relevant. Es werden deshalb nur Versuchsreihen mit Agenten, die unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten besitzen, gezeigt und ausgewertet.

7.1.3.1 WALK EGOAPAgent

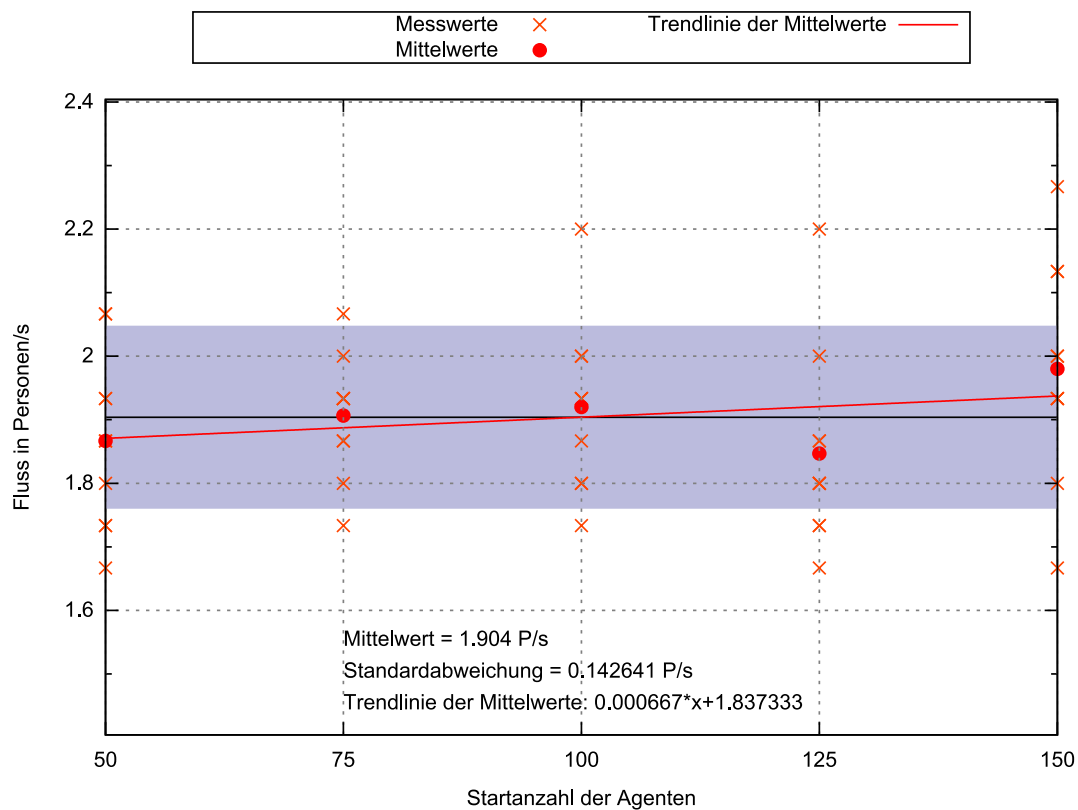


Abbildung 47 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die Messwerte der Versuche zum Einfluss der Agentenanzahl vor der Engstelle auf die Flussrate durch die Engstelle in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“ zeigen keine Abhängigkeit zwischen den beiden Werten (Abbildung 47). Die Mittelwerte der unterschiedlichen Agentenanzahlen schwanken leicht, wodurch sich eine Gerade mit einer sehr geringen Steigung über sie legen lässt. Anhand der Mittelwerte lässt sich aber kein Trend erkennen. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung, dass es keine lineare Abhängigkeit der Flussrate durch die Engstelle von der Anzahl an Agenten vor der Engstelle gibt.

7.1.3.2 WALK ModularAgent

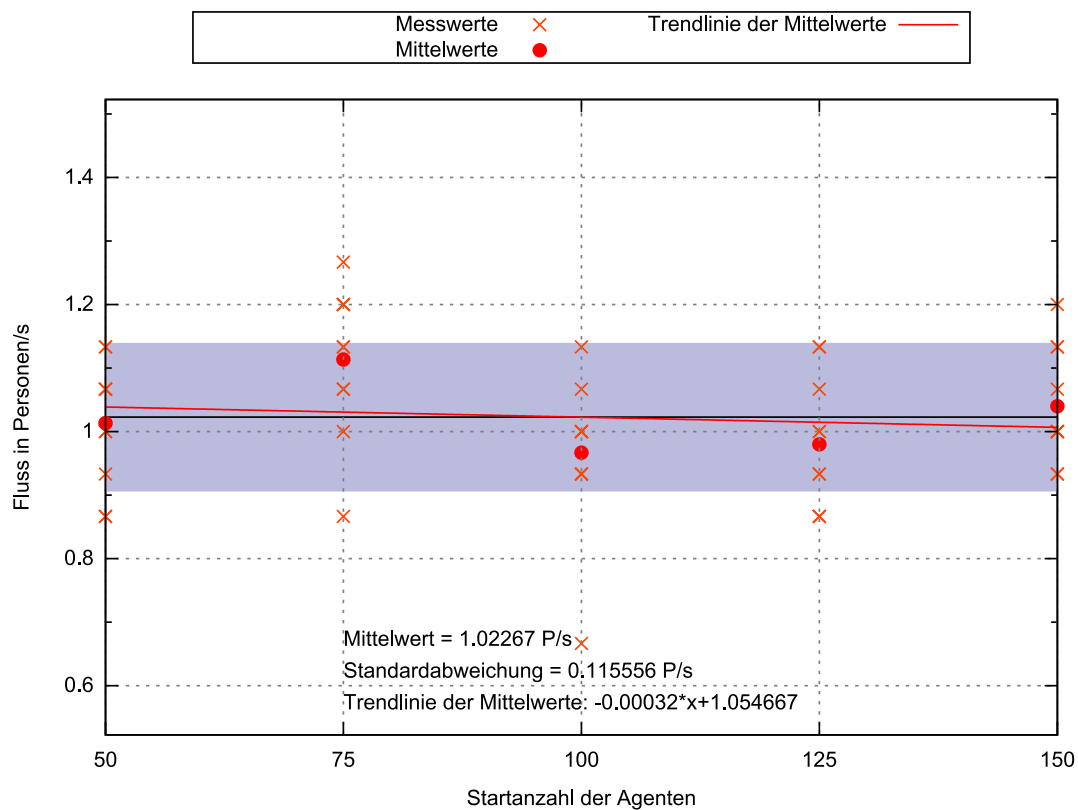


Abbildung 48 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Die Messwerte der Versuche zum Einfluss der Agentenanzahl vor der Engstelle auf die Flussrate durch die Engstelle in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“ zeigen ebenfalls keine Abhängigkeit zwischen den beiden Werten (Abbildung 48). Die Mittelwerte der unterschiedlichen Agentenanzahlen schwanken leicht, wodurch sich eine Gerade mit einer sehr geringen negativen Steigung über sie legen lässt. Anhand der Mittelwerte lässt sich aber kein Trend erkennen. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung, dass es keine lineare Abhängigkeit der Flussrate durch die Engstelle von der Anzahl an Agenten vor der Engstelle gibt.

7.1.3.3 MARS LIFE Fußgängermodell

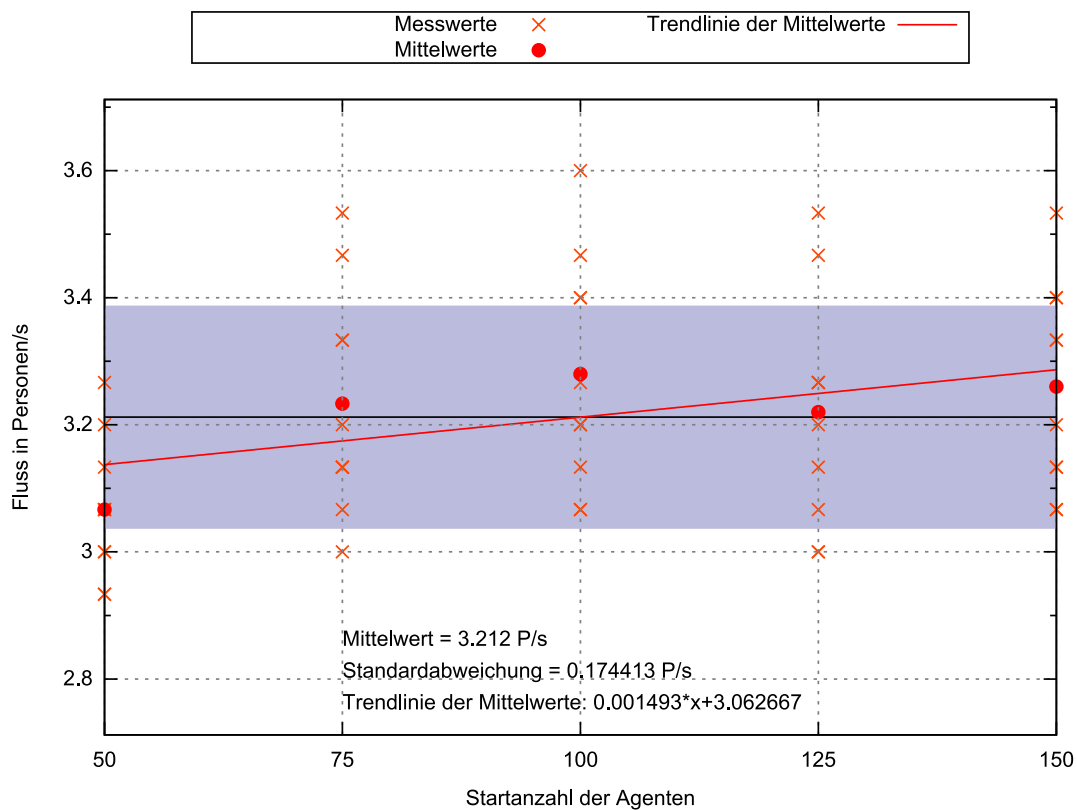


Abbildung 49 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Die Messwerte der Versuche zum Einfluss der Agentenanzahl vor der Engstelle auf die Flussrate durch die Engstelle in „MARS LIFE“ unter Nutzung der Fußgängeragenten zeigen keine Abhängigkeit zwischen den beiden Werten (Abbildung 49). Es fällt jedoch auf, dass die Flussrate bei einer Agentenanzahl von 50 Agenten deutlich von den anderen Mittelwerten abweicht. Dies ist aber durch die sehr viel höhere Flussrate bei diesem Bewegungsmodell im Vergleich zu den anderen Bewegungsmodellen zu begründen. Durch die sehr hohe Flussrate von durchschnittlich über 3,2 Personen pro Sekunde befinden sich gegen Ende der 15-sekündigen Messung bei dem Versuch mit 50 Agenten nur noch sehr wenige Agenten vor der Engstelle. Dies sorgt dafür, dass nicht mehr zwei Agenten gleichzeitig die Engstelle durchqueren, sondern die wenigen übrig gebliebenen stattdessen nacheinander die Engstelle durchqueren. Durch die geringe Anzahl an Agenten vor der Engstelle ergibt sich auch eine sehr viel geringere Dichte, so dass die Agenten größere Abstände halten können. Dies sorgt ebenfalls für eine geringere Flussrate. Bei einer

kürzeren Messung wäre dieser Effekt nicht sichtbar. Aus diesem Grund sollte der Mittelwert für 50 Agenten nicht betrachtet werden. Anhand der anderen Mittelwerte lässt sich kein Trend erkennen. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung, dass es keine lineare Abhängigkeit der Flussrate durch die Engstelle von der Anzahl an Agenten vor der Engstelle gibt.

7.1.3.4 PedSim

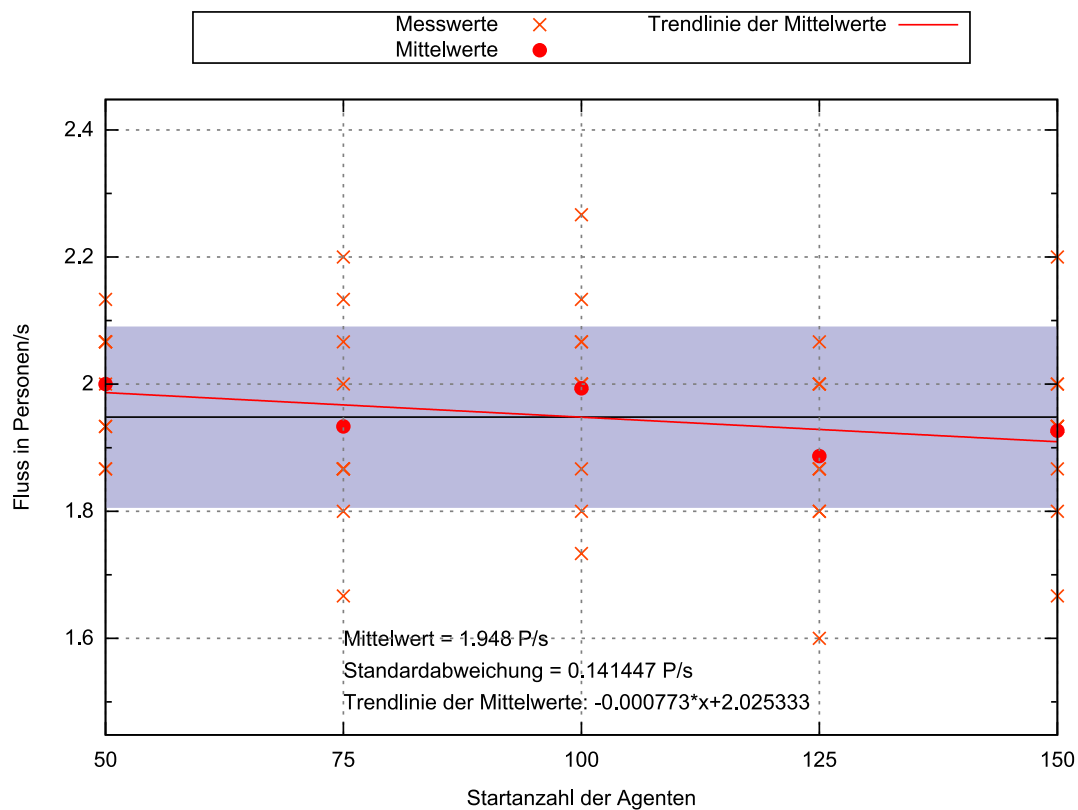


Abbildung 50 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“

Die Messwerte der Versuche zum Einfluss der Agentenanzahl vor der Engstelle auf die Flussrate durch die Engstelle in „PedSim“ zeigen ebenfalls keine Abhängigkeit zwischen den beiden Werten (Abbildung 50). Die Mittelwerte der unterschiedlichen Agentenanzahlen schwanken erneut leicht, wodurch sich eine Gerade mit einer sehr geringen negativen Steigung über sie legen lässt. Anhand der Mittelwerte lässt sich aber kein Trend erkennen. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung, dass es keine lineare Abhängigkeit der Flussrate durch die Engstelle von der Anzahl an Agenten vor der Engstelle gibt. Das Verhalten von „PedSim“ in der Version 2.2 wurde also in Version 2.3 korrigiert. Die Abstoßungskräfte der Agenten vor der Engstelle summieren sich also nicht mehr, so dass der Druck auf die Agenten vor der Engstelle nicht mehr größer wird, je mehr Agenten sich hinter ihnen befinden. Dies sorgte bei „PedSim“ in der Version 2.2 für eine wesentlich höhere Flussrate durch die Engstelle, da die Agenten durch sie hindurch gedrückt wurden (Woggan 2014a).

7.1.4 Komplexeres Szenario (Verlauf von Dichte und Geschwindigkeiten)

Für die makroskopische Auswertung eines komplexeren Szenarios wird sowohl für die in Experimenten gewonnenen Bewegungsdaten von Plaue et al. (2011) als auch für Simulationen der untersuchten Bewegungsmodelle der Verlauf der durchschnittlichen Dichte und durchschnittlichen Geschwindigkeit im zuvor definierten Messbereich bestimmt und in Diagrammen dargestellt. Abbildung 51 zeigt beispielhaft die Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ mit dem Fußgängermodell von „MARS LIFE“. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

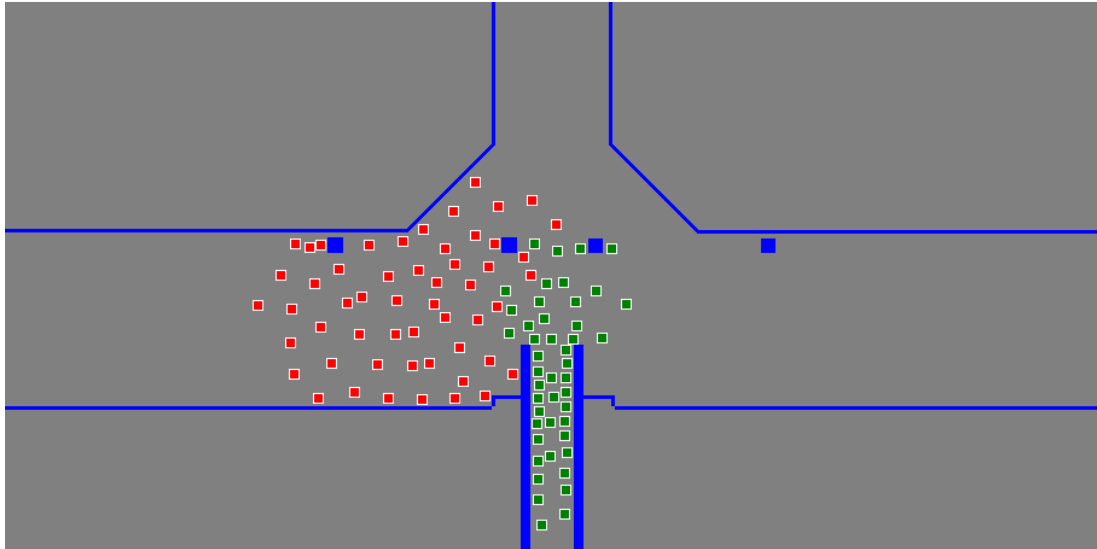


Abbildung 51 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Es wurden alle 4 SMDPC-Versuche für alle 4 Bewegungsmodelle 10-mal simuliert und ausgewertet. Dies ergibt eine Anzahl von 160 Diagrammen. Allerdings zeigen die Diagramme der unterschiedlichen SMDPC-Versuche und Durchläufe ein ähnliches Verhalten und die gleichen Besonderheiten. Aus diesem Grund wird nur jeweils 1 Durchlauf des SMDPC-Versuchs „GR90“ genauer untersucht. Die Wahl fiel auf diesen Versuch, da er eine Situation beschreibt, die in keinem der anderen Versuche des Validierungskonzepts betrachtet wird. „GR90“ betrachtet das seitliche Aufeinandertreffen zweier Fußgängerströme. Die SMDPC-Versuche „GW180“ und „BR180“ betrachten ein frontales Aufeinandertreffen zweier Fußgängerströme, welches bereits in anderen Versuchen des Validierungskonzepts berücksichtigt wird. Der SMDPC-Versuch „BRGW“ betrachtet ein Aufeinandertreffen von 4 Fußgängerströmen. Für diesen Versuch gibt es jedoch keine Bewegungsdaten, sondern nur Videoaufzeichnungen. Er wird also nur bei der visuellen Auswertung der SMDPC-Versuche berücksichtigt.

7.1.4.1 SMDPC-Vergleichsdaten



Abbildung 52 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Aufzeichnung des SMDPC-Versuchs „GR90“ von Plaue et al. (2011)

Die makroskopische Auswertung des von Plaue et al. (2011) durchgeführten SMDPC-Versuchs „GR90“ zeigt, dass der erste Versuchsteilnehmer in den Versuchsaufzeichnungen den Messbereich nach 36 Zeitschritten betreten hat (Abbildung 52). Nach 484 Zeitschritten verlässt der letzte Versuchsteilnehmer den Messbereich. Somit befanden sich 448 Zeitschritte lang Personen im Messbereich. Dies entspricht einer Dauer von ungefähr 30 Sekunden. Die maximale über alle Teilnehmer im Messbereich gemittelte Geschwindigkeit beträgt ungefähr 1,24 Meter pro Sekunde. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 0,91 Meter pro Sekunde. Die maximale über alle Teilnehmer im Messbereich gemittelte Dichte beträgt ungefähr 1,98 Personen pro Quadratmeter. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Dichte von ungefähr 1,12 Personen pro Quadratmeter.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Geschwindigkeit zeigt, dass die berechneten Werte im Messbereich immer zwischen ungefähr 0,6 und 1,2 Meter pro Sekunde liegen. Bei einer Zunahme der Dichtewerte lassen sich abnehmende Geschwindigkeitswerte erkennen. Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Dichte zeigt eine relativ konstante Zunahme der Dichtewerte während des Versuchs, gefolgt von einem kleinen Abfall der Dichtewerte und einer erneuten Zunahme der Dichtewerte. Gegen Ende des Versuchs fallen die Dichtewerte ab, da sich immer weniger Personen durch den Messbereich bewegen. Diese Personen können sich aufgrund der niedrigeren Dichte schneller fortbewegen.

7.1.4.2 WALK EGOAPAgent

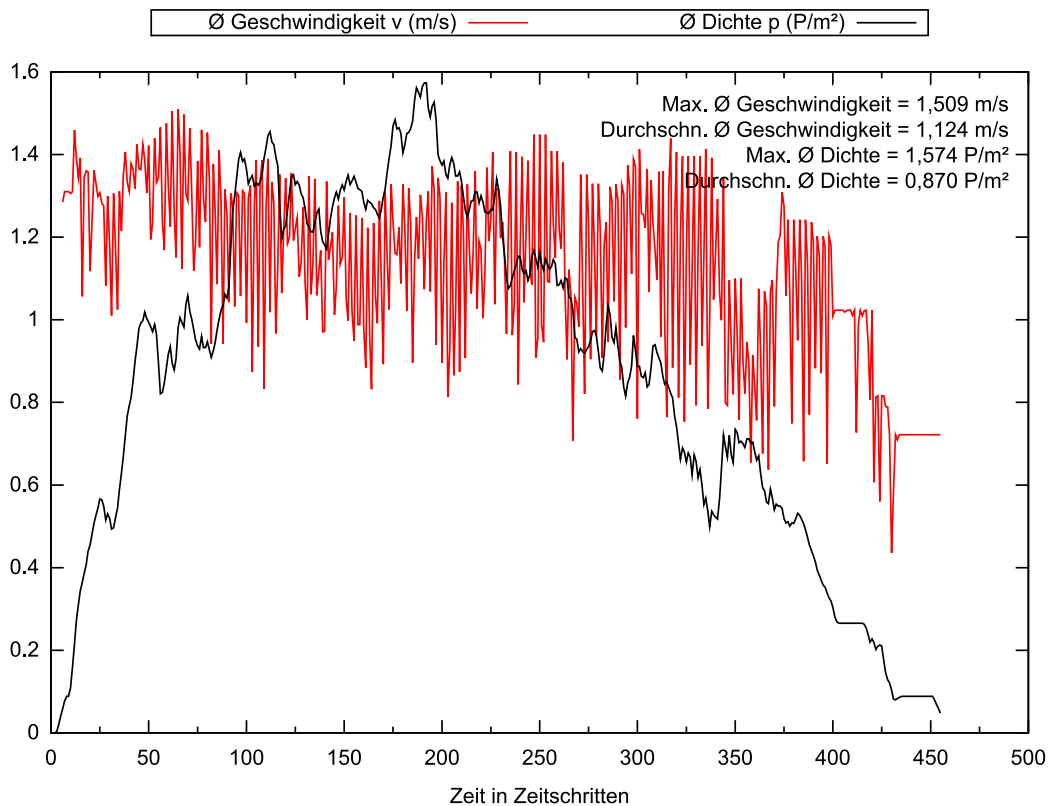


Abbildung 53 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“

Die makroskopische Auswertung des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“ zeigt, dass der erste Agent in der Simulation den Messbereich nach 6 Zeitschritten betreten hat (Abbildung 53). Nach 455 Zeitschritten verlässt der letzte Agent den Messbereich. Somit befanden sich 449 Zeitschritte lang Agenten im Messbereich. Dies entspricht einer Dauer von ungefähr 30 Sekunden. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Geschwindigkeit beträgt ungefähr 1,51 Meter pro Sekunde. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 1,12 Meter pro Sekunde. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Dichte beträgt ungefähr 1,57 Personen pro Quadratmeter. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Dichte von ungefähr 0,87 Personen pro Quadratmeter.

Betrachtet man die Dauer, in der Agenten im Messbereich waren, die durchschnittliche Geschwindigkeit im Messbereich und die durchschnittliche Dichte im Messbereich, lässt sich erkennen, dass sehr viel weniger Agenten durch den Messbereich laufen als im Vergleichsdiagramm. Die Agenten laufen also am Messbereich vorbei bzw. durchqueren ihn nicht komplett. Dies widerspricht den Vergleichsdaten.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Geschwindigkeit zeigt, dass die berechneten Werte im Messbereich sehr stark schwanken. Sie nehmen abwechselnd zu und wieder ab. Dieses Verhalten entspricht ebenfalls nicht den Beobachtungen aus dem Vergleichsdiagramm.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Dichte zeigt eine relativ konstante Zunahme der Dichtewerte während des Versuchs. Gegen Ende des Versuchs fallen die Dichtewerte ab, da sich immer weniger Agenten durch den Messbereich bewegen. Die Agenten im Messbereich werden aber nicht schneller. Dies spricht dafür, dass die Agenten mit einer geringeren Maximalgeschwindigkeit zuletzt den Messbereich verlassen.

Die im Diagramm erkennbaren Beobachtungen, dass ein großer Teil der Agenten am Messbereich vorbeiläuft oder ihn nicht komplett durchquert und die Geschwindigkeiten der Agenten sehr stark schwanken, zeigen, dass das Bewegungsmodell das Verhalten der Teilnehmer in den Vergleichsdaten nicht ausreichend widerspiegeln kann. Die mittleren Geschwindigkeitswerte entsprechen allerdings trotzdem den Vergleichsdaten.

7.1.4.3 WALK ModularAgent



Abbildung 54 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“

Die makroskopische Auswertung des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“ zeigt, dass der erste Agent in der Simulation den Messbereich nach 4 Zeitschritten betreten hat (Abbildung 54). Nach 629 Zeitschritten verlässt der letzte Agent den Messbereich. Somit befanden sich 625 Zeitschritte lang Agenten im Messbereich. Dies entspricht einer Dauer von ungefähr 42 Sekunden. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Geschwindigkeit beträgt ungefähr 1,58 Meter pro Sekunde. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 0,75 Meter pro Sekunde. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Dichte beträgt ungefähr 2,1 Personen pro Quadratmeter. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Dichte von ungefähr 1,14 Personen pro Quadratmeter.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Geschwindigkeit zeigt, dass die berechneten Werte im Messbereich etwas schwanken. Dieses Schwanken ist aber weitaus geringer als bei den „EGOAPAgents“. Wie im Vergleichsdiagramm nimmt die Geschwindigkeit der Agenten im Messbereich ab, wenn die Dichte im Messbereich zunimmt. Die Geschwindigkeitswerte sind jedoch verglichen mit dem Vergleichsdiagramm deutlich zu niedrig.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Dichte zeigt eine relativ konstante Zunahme der Dichtewerte während des Versuchs. Gegen Ende des Versuchs fallen die Dichtewerte ab, da sich immer weniger Agenten durch den Messbereich bewegen. Die Agenten im Messbereich werden auch dementsprechend schneller. Gegen Ende nehmen aber die Geschwindigkeiten im Messbereich wieder ab. Dies spricht dafür, dass die Agenten mit einer geringeren Maximalgeschwindigkeit zuletzt den Messbereich verlassen.

Die Dichten im Messbereich entsprechen den Erwartungen aus dem Vergleichsdiagramm. Da allerdings die Geschwindigkeitswerte deutlich zu niedrig sind und die Agenten dadurch sehr viel länger brauchen, um den Messbereich zu durchqueren, spiegelt auch dieses Bewegungsmodell das Vergleichsdiagramm nur unzureichend wider.

7.1.4.4 MARS LIFE Fußgängermodell

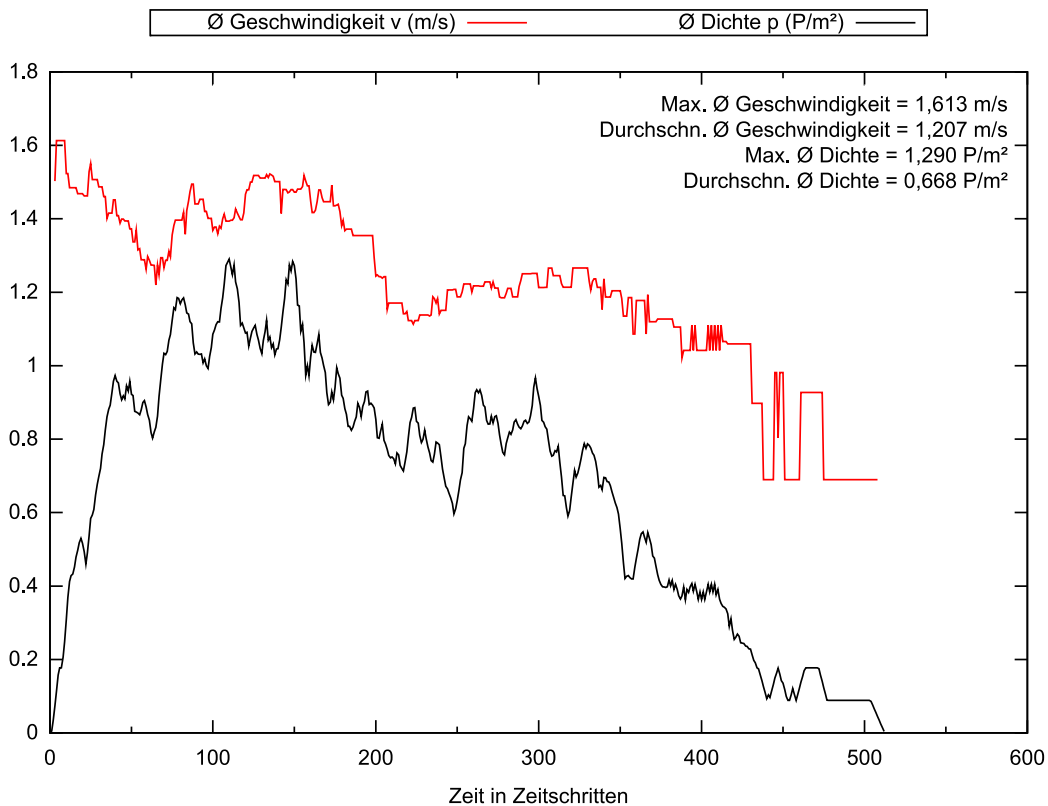


Abbildung 55 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells

Die makroskopische Auswertung des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „MARS LIFE“ unter Nutzung der Fußgängeragenten zeigt, dass der erste Agent in der Simulation den Messbereich nach 3 Zeitschritten betreten hat (Abbildung 55). Nach 512 Zeitschritten verlässt der letzte Agent den Messbereich. Somit befanden sich 509 Zeitschritte lang Agenten im Messbereich. Dies entspricht einer Dauer von ungefähr 34 Sekunden. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Geschwindigkeit beträgt ungefähr 1,61 Meter pro Sekunde. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 1,21 Meter pro Sekunde. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Dichte beträgt ungefähr 1,29 Personen pro Quadratmeter. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Dichte von ungefähr 0,67 Personen pro Quadratmeter.

Betrachtet man die Dauer, in der Agenten im Messbereich waren, die durchschnittliche Geschwindigkeit im Messbereich und die durchschnittliche Dichte im Messbereich, lässt sich auch hier erkennen, dass sehr viel weniger Agenten durch den Messbereich laufen, als im Vergleichsdiagramm. Die Agenten laufen also am Messbereich vorbei bzw. durchqueren ihn nicht komplett. Dies widerspricht den Vergleichsdaten und entspricht dem Verhalten, das bei den „EGOAPAgents“ in „WALK“ zu beobachten ist. Da die Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ auf diesen basieren, ist dies zu erwarten.

Der Verlauf der Kurve der durchschnittlichen Geschwindigkeit zeigt, dass die berechneten Werte im Messbereich etwas schwanken. Dieses Schwanken ist aber weitaus geringer als bei den „EGOAPAgents“. Dies beweist, dass das Schwanken der Geschwindigkeiten der „EGOAPAgents“ durch die Kollisionsauflösung verursacht wird, da dieses Verhalten sonst auch bei den Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ erkennbar sein müsste.

Zwischen der Dichtekurve und der Geschwindigkeitskurve lassen sich keine Abhängigkeiten erkennen. Dies widerspricht den Erwartungen aus dem Vergleichsdiagramm. Betrachtet man allerdings erneut das Fundamentaldiagramm der Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ lässt sich der geringe fehlenden Einfluss bei den niedrigen im Messbereich gemessenen Dichten nachvollziehen. Diese Dichten liegen weit unter den Erwartungen aus dem Vergleichsdiagramm.

Aufgrund der fehlenden Abhängigkeit zwischen der Dichtekurve und der Geschwindigkeitskurve und den generell viel zu niedrigen Dichtewerten, spiegelt das Bewegungsmodell das Vergleichsdiagramm nur unzureichend wider.

7.1.4.5 PedSim

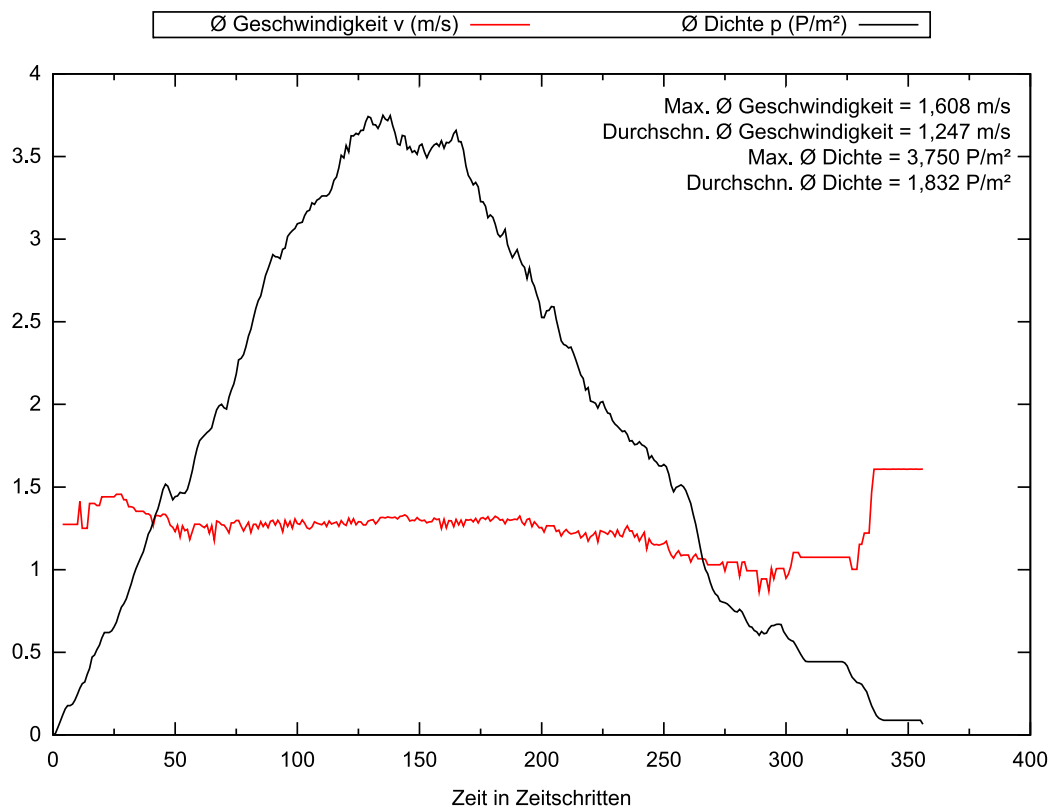


Abbildung 56 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „PedSim“

Die makroskopische Auswertung des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „PedSim“ zeigt, dass der erste Agent in der Simulation den Messbereich nach 4 Zeitschritten betreten hat (Abbildung 56). Nach 356 Zeitschritten verlässt der letzte Agent den Messbereich. Somit befanden sich 352 Zeitschritte lang Agenten im Messbereich. Dies entspricht einer Dauer von ungefähr 23 Sekunden. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Geschwindigkeit beträgt ungefähr 1,61 Meter pro Sekunde. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 1,25 Meter pro Sekunde. Die maximale über alle Agenten im Messbereich gemittelte Dichte beträgt ungefähr 3,75 Personen pro Quadratmeter. Über den gesamten Versuch gemittelt ergibt sich im Messbereich eine durchschnittliche Dichte von ungefähr 1,83 Personen pro Quadratmeter.

Zwischen der Dichtekurve und der Geschwindigkeitskurve lassen sich keine Abhängigkeiten erkennen. Dies widerspricht den Erwartungen aus dem Vergleichsdiagramm. Betrachtet man allerdings erneut das Fundamentaldiagramm der Fußgängeragenten von „PedSim“ lässt erkennen, dass die Agenten in „PedSim“ immer mit maximaler Geschwindigkeit laufen. Nur die Flussgeschwindigkeit nahm mit zunehmender Dichte ab.

Auch die in der Simulation erzeugte maximale Dichte im Messbereich entspricht nicht dem Wert aus dem Vergleichsdiagramm. Die Dichte ist viel zu hoch, was bedeutet, dass die Agenten in der Simulation sehr viel weniger Abstand voneinander halten als die Versuchsteilnehmer.

Aufgrund der fehlenden Abhängigkeit zwischen der Dichtekurve und der Geschwindigkeitskurve und der viel zu hohen Geschwindigkeitswerte und Dichtewerte, kann nicht davon gesprochen werden, dass das Bewegungsmodell das erwartete Verhalten ausreichend widerspiegelt.

7.2 Betrachtung des Verhaltens der Agenten

Um einen genaueren Einblick in das Verhalten der Agenten zu erlangen, werden die zuvor für die visuelle Auswertung durchgeführten Versuchsreihen betrachtet. Dabei wird das Verhalten der Agenten analysiert und mit dem erwarteten Verhalten verglichen. Ein weiterer Fokus liegt auf der Aufdeckung von Besonderheiten und Problemen der Bewegungsmodelle.

7.2.1 Entgegengesetzte Bewegungsrichtungen in Gängen

Die Versuchsreihen zum frontalen Aufeinandertreffen von zwei sich entgegengesetzt fortbewegenden Fußgängerströmen dienen der Überprüfung der Spurenbildung in bidirektionalen Flüssen (Helbing et al. 2002, Usher und Strawderman 2010). Außerdem sollten Probleme des Ausweichverhaltens der Agenten durch diese Versuche erkennbar sein. Es wurden Versuche mit 2,5 Meter breiten und 5 Meter breiten Gängen durchgeführt, um die Unterschiede des Verhaltens bei unterschiedlich breiten Gängen analysieren zu können. Abbildung 57 zeigt beispielhaft einen Durchlauf der Versuche mit einem 5 Meter breiten Gang in „MARS LIFE“ unter Verwendung des Fußgängermodells. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

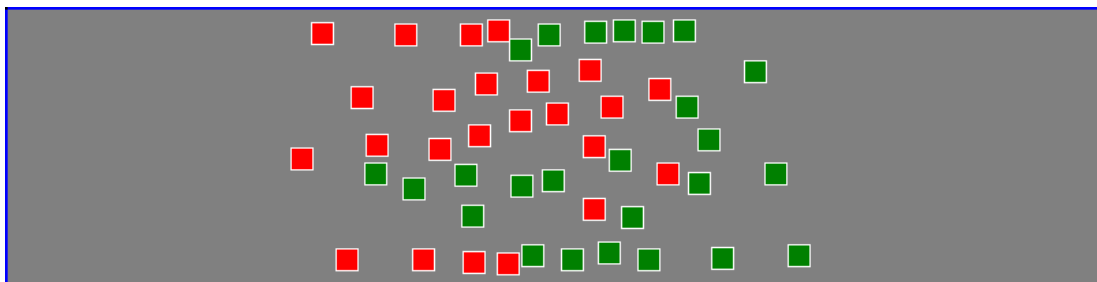


Abbildung 57 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum bidirektionalen Fluss in einem 5 Meter breiten Gang unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“. Die roten Agenten bewegen sich von links nach rechts durch den Gang. Die grünen Agenten bewegen sich von rechts nach links durch den Gang.

Im Folgenden werden die Versuchsreihen zum bidirektionalen Fluss für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Es wurden dabei Versuche mit Agenten mit identischer Maximalgeschwindigkeit und Versuche mit Agenten mit unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeit ausgeführt.

7.2.1.1 WALK EGOAPAgent

Bei den Versuchen in „WALK“ mit den „EGOAPAgents“ konnten keine Unterschiede im Verhalten bei der Durchführung der Versuche mit identischen oder unterschiedlichen Agenten festgestellt werden. Bei einer Gangbreite von 2,5 Meter lässt sich eine leichte Spurenbildung erkennen (Abbildung 58). Pro Bewegungsrichtung bilden sich ungefähr 2 Spuren. Diese sind jedoch nicht stabil, sondern zerfallen und bilden sich neu. Die Spuren bilden sich, da die Agenten anderen Agenten folgen, die die gleiche Bewegungsrichtung haben. Es kommt jedoch zu vielen frontalen Kollisionen der Agenten. Bei einer solchen Kollision bahnen sich die Agenten jedoch den Weg durch die Menge an entgegenkommenden Agenten, indem sie diese Agenten leicht wegschieben können. Die dadurch entstehenden Lücken werden von nachfolgenden Agenten genutzt, um ebenfalls voranzukommen. Dadurch entstehen kurze Agentenspuren. Es entstehen aber keine 2 klar getrennten Fußgängerspuren, die man sonst in einem bidirektionalen Fluss erwarten würde. Außerdem zeigt sich, dass die Agenten sehr stark seitwärts zur Bewegungsrichtung vibrieren, was kein realistisches Verhalten ist.

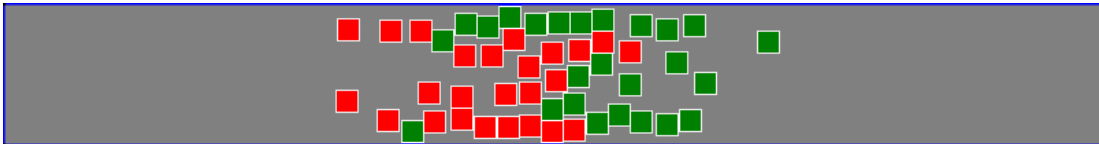


Abbildung 58 - Leichte Spurenbildung in "WALK" mit den "EGOAPAgents" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die grünen Agenten bilden oben eine Fußgängerspuren. Die roten Agenten bilden mittig und unten eine Fußgängerspuren.

Bei einer Gangbreite von 5 Meter kommt es zu deutlich weniger Kollisionen, so dass die Agenten wesentlich schneller vorankommen. Die Agenten haben genügend Platz, um ihnen entgegenkommenden Agenten auszuweichen. Da es kaum zu Kollisionen kommt, ist auch kein Schiebehaviorhalten der Agenten erkennbar. Eine Bildung vieler schmaler und kurzer Fußgängerspuren lässt sich auch hier erkennen. Eine klare Aufteilung in 2 entgegengesetzt laufende Fußgängerspuren ist aber erneut nicht vorhanden.

Die Versuche zeigen also, dass die Erwartung der Bildung von 2 klar getrennten entgegengesetzt laufenden Fußgängerspuren nicht erfüllt wird. Auch zeigen sich deutliche Probleme bei der Kollisionsvermeidung bei entgegenkommenden Agenten. Ein realistisches Verhalten wird somit nicht gezeigt.

7.2.1.2 WALK ModularAgent

Bei den Versuchen in „WALK“ mit den „ModularAgents“ konnten ebenfalls keine Unterschiede im Verhalten bei der Durchführung der Versuche mit identischen oder unterschiedlichen Agenten festgestellt werden. Bei einer Gangbreite von 2,5 Meter lässt sich wie bei den „EGOAPAgents“ eine leichte Spurenbildung erkennen, allerdings werden die Agenten beim frontalen Aufeinandertreffen so langsam, dass es kein Vorankommen mehr gibt (Abbildung 59). Es kommt zu fast keinen Kollisionen, da die Agenten vor den entgegenkommenden Agenten stehenbleiben, wenn eine bestimmte Agentendichte um sie herum erreicht wurde. Ein Schiebeverhalten, das es den Agenten ermöglichen würde, sich einen Weg durch die Menge der entgegenkommenden Agenten zu bahnen, ist nicht vorhanden.

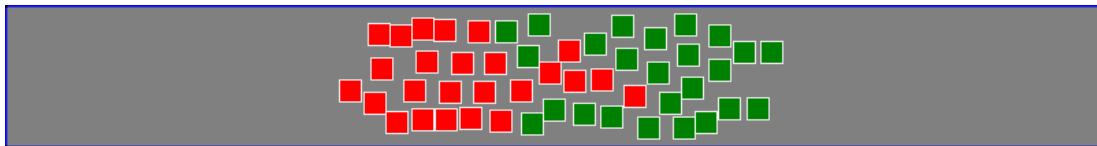


Abbildung 59 - Stillstand in "WALK" mit den "ModularAgents" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die Agenten halten Abstand voneinander.

Bei einer Gangbreite von 5 Meter sind erneut viele kurze und instabile Spuren zu erkennen, die sich dadurch bilden, dass einige Agenten anderen Agenten folgen und den gleichen Weg nutzen, der sich durch das Ausweichen der entgegenkommenden Agenten ergeben hat. Auch bei dieser Gangbreite werden die Agenten sehr langsam, wenn sie auf die entgegenkommenden Agenten treffen. Da aber mehr Platz vorhanden ist und somit auch die Dichte geringer ist, bleiben die Agenten dieses Mal nicht stehen. Stattdessen nutzen sie den zusätzlichen Platz, um den entgegenkommenden Agenten auszuweichen. Da sich alle Agenten dabei sehr langsam fortbewegen, kommt es zu keinen Kollisionen.

Auch die Versuche mit den „ModularAgents“ zeigen keine gute Übereinstimmung des Verhaltens mit den Erwartungen, da sich nicht 2 klar getrennte entgegengesetzt fortbewegende Fußgängerströme bilden. Das Verhalten der Agenten ist in diesem Fall ungeeignet, da es zu einem kompletten Stillstand kommt, der nicht durch Kollisionen begründet ist. Es handelt sich auch nicht um „Freezing-by-Heating“, da es nicht aufgrund des Ausweichverhaltens der Agenten zum Stillstand kommt (Helbing et al. 2002). Der Stillstand ist durch die Regel der Agenten begründet, die die Agentengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Dichte bestimmt. Die „ModularAgents“ schaffen es bei diesem Versuch somit nicht, ein realistisches Verhalten zu simulieren.

7.2.1.3 MARS LIFE Fußgängermodell

Auch bei den Versuchen in „MARS LIFE“ mit den Fußgängeragenten konnten keine Unterschiede im Verhalten bei der Durchführung der Versuche mit identischen oder unterschiedlichen Agenten festgestellt werden. Bei einer Gangbreite von 2,5 Meter bilden sich wie bei den „EGOAPagents“ in „WALK“ pro Bewegungsrichtung ungefähr 2 kurze und instabile Fußgängerspuren. Das Ausweichen der Agenten funktioniert jedoch wesentlich besser. Allerdings kommt es trotzdem zu einem Stillstand, sobald sich über die gesamte Breite des Gangs Agenten gegenüberstehen (Abbildung 60). Dies ist damit begründet, dass die Agenten keine Möglichkeiten besitzen, andere Agenten wegzuschieben, sie können nur ihren eigenen Bewegungsvektor anpassen, um Kollisionen zu verhindern. Bei den „EGOAPagents“ ergibt sich das Schiebeverhalten als Folge der Kollisionsauflösung des Systems. Diese Kollisionsauflösung wird für die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ nicht ausgeführt, da diese stattdessen eine Kollisionsvermeidung durchführen. Aus diesem Grund fehlt den Fußgängeragenten die Möglichkeit, sich einen Weg durch die Menge der entgegenkommenden Agenten bahnen zu können.

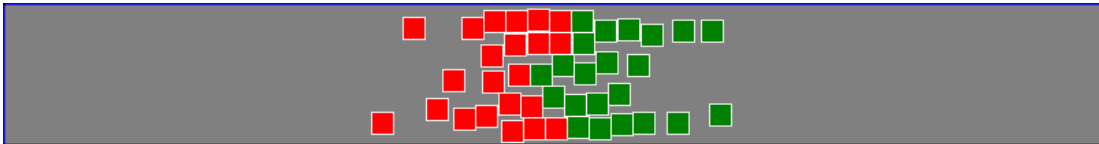


Abbildung 60 - Stillstand in "MARS LIFE" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die Agenten halten keinen Abstand voneinander.

Bei einer Gangbreite von 5 Meter lässt sich erneut eine leichte Spurenbildung erkennen. Da die Agenten mehr Platz zum Ausweichen haben, funktioniert das Ausweichen bei dieser Gangbreite problemlos und die Agenten kommen sehr gut voran. Es kommt zu keinem Stillstand mehr.

Auch für die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ ist somit keine gute Übereinstimmung des Verhaltens mit der Erwartung einer Bildung von 2 klar getrennten sich entgegengesetzt fortbewegenden Fußgängerströmen vorhanden. Das Ausweichverhalten der Agenten funktioniert so lange gut, wie es noch Platz zum Ausweichen gibt. Sobald dieser fehlt, besitzen die Agenten keine Möglichkeiten mehr, sich einen Weg durch die Menge der entgegenkommenden Agenten zu bahnen. Hierfür müssten sie in der Lage sein, andere Agenten wegschieben zu können. Eine andere Möglichkeit wäre, dass Agenten versuchen Platz für die entgegenkommenden Agenten zu machen. Dies würde jedoch deutlich intelligenteres Verhalten erfordern. Ein realistisches, den Erwartungen entsprechendes Verhalten, konnten also auch die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ nicht erzeugen.

7.2.1.4 PedSim

Bei den Versuchen in „PedSim“ lassen sich Unterschiede im Verhalten bei der Durchführung der Versuche mit identischen oder unterschiedlichen Agenten feststellen. Bei einer Gangbreite von 2,5 Meter bilden sich 2 deutliche Spuren, die die entgegenkommenden Fußgängerströme in eine links und eine rechts laufende Spur aufteilen (Abbildung 61). Die Bewegungsrichtungen dieser Spuren variieren bei den verschiedenen Versuchsdurchläufen. Die Agenten besitzen bei der Seitenwahl also keine Präferenz. Aufgrund der klaren Aufteilung in 2 Spuren, haben die Agenten keine Probleme beim Vorankommen und es kommt zu keinen Kollisionen. Allerdings sind die Spuren unrealistisch schmal. Bei den Versuchen mit Agenten mit identischer Maximalgeschwindigkeit beträgt die Breite einer Spur 1 bis 2 Agenten. Bei den Versuchen mit Agenten mit unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeit beträgt die Breite einer Spur 1 bis 3 Agenten, da die Agenten teilweise aus der Spur ausscheren, um langsamere Agenten zu überholen. Bei einer Gangbreite von 2,5 Meter und einer Agentenbreite von 0,4 Meter wären 2 bis 3 Agenten breite Spuren eher zu erwarten.

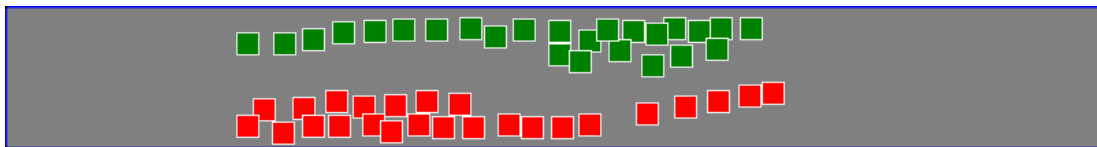


Abbildung 61 - Deutliche Spurenbildung in "PedSim" bei 2,5 Meter Gangbreite

Auch bei einer Gangbreite von 5 Meter ergeben sich 2 entgegengesetzt verlaufende Fußgängerspuren. Diese sind jedoch deutlich breiter und haben eine Breite von bis zu 4 Agenten. Die Agenten haben wie erwartet keine Probleme, den ihnen entgegenkommenden Agenten auszuweichen.

„PedSim“ zeigt also eine gute Übereinstimmung mit der Erwartung, dass sich bei bidirektionalen Flüssen 2 klar getrennte Fußgängerspuren ergeben sollten. Die Spuren in der Simulation sind jedoch unrealistisch schmal. Durch eine Kalibrierung der Abstoßungskräfte der Agenten sollte sich dies jedoch beheben lassen. Das Ausweichverhalten der Agenten zeigt bei diesen Versuchen keine Probleme. „PedSim“ besitzt somit das einzige überprüfte Bewegungsmodell, das die Erwartungen dieser Versuche erfüllen kann.

7.2.2 Entgegengesetzte Bewegungsrichtungen an Engstellen

Die Versuchsreihen zum Aufeinandertreffen von zwei sich entgegengesetzt fortbewegenden Fußgängerströmen an einer Engstelle werden ausgewertet, um zu überprüfen, ob sich die Flussrichtung durch die Engstelle wie erwartet abwechselnd ändert. Auch das Vorhandensein von Halbkreis- bzw. Bogenformen („Arching“) oder Tropfen- und Keilformen („Wedging“) vor der Engstelle kann betrachtet werden (Helbing et al. 2002, Schadschneider et al. 2008). Abbildung 62 zeigt beispielhaft einen Durchlauf der Versuche mit einer 1 Meter breiten Engstelle in „MARS LIFE“ unter Verwendung des Fußgängermodells. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

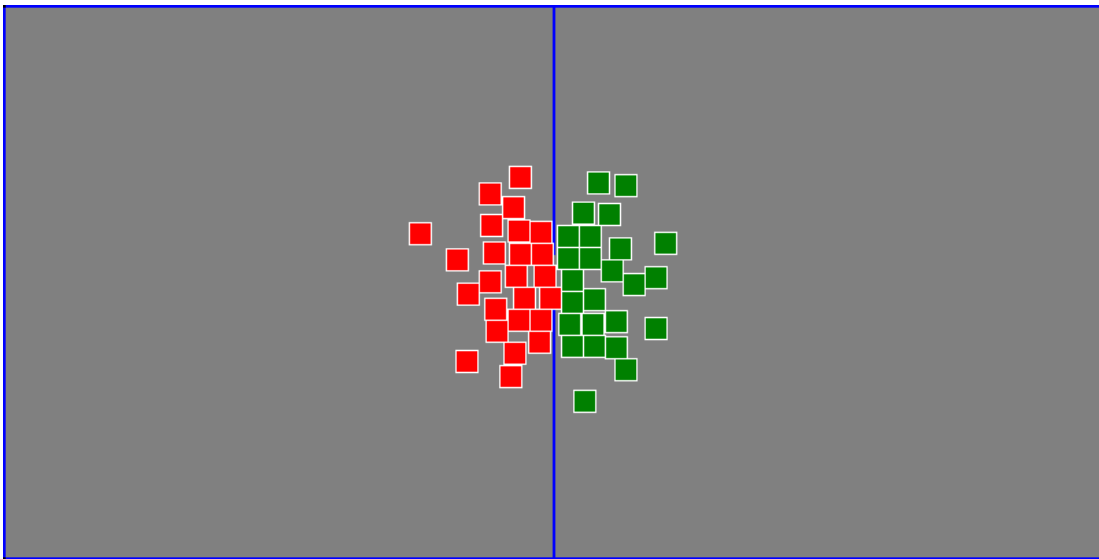


Abbildung 62 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Aufeinandertreffen von entgegengesetzten Fußgängerströmen an einer Engstelle mit 1 Meter Breite unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“. Die roten Agenten wollen in den rechten Raum. Die grünen Agenten wollen in den linken Raum.

Im Folgenden werden die Versuchsreihen zum Aufeinandertreffen von zwei sich entgegengesetzt fortbewegenden Fußgängerströmen an einer Engstelle für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Es wurden dabei Versuche mit Agenten mit identischer Maximalgeschwindigkeit und Versuche mit Agenten mit unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeit ausgeführt. Es ließen sich jedoch keine Unterschiede im Verhalten bei identischen und unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten erkennen.

7.2.2.1 WALK EGOAPAgent

Bei den Versuchen in „WALK“ mit den „EGOAPAgents“ und einer Engstellenbreite von 0,5 Meter kommt kein Fluss durch die Engstelle zustande. Es wird nur der 1. Agent, der die Engstelle betritt, jeweils durch sie hindurchgeschoben. Ansonsten schafft es keiner der Agenten, die Engstelle zu durchqueren.

Bei einer Engstellenbreite von 1 Meter werden sehr langsam Agenten durch die Engstelle geschoben (Abbildung 63). Dies passiert aus beiden Richtungen der Engstelle, wobei die Richtung, in die Agenten geschoben werden, wechselt. Es werden jeweils Agenten durch die Engstelle geschoben, hinter denen sich eine große Anzahl weiterer Agenten befindet. Das Schieben erfolgt durch die Kollisionsauflösung, die die Agenten dahin verschiebt, wo mehr Platz ist.

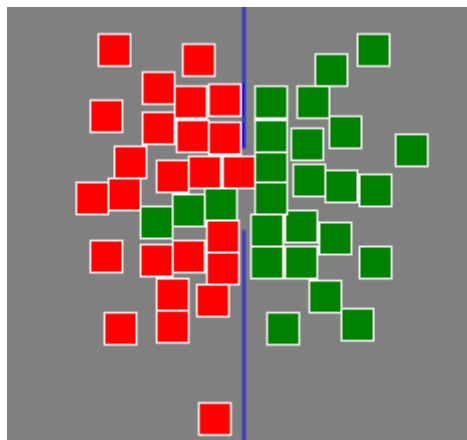


Abbildung 63 - Agenten werden durch die Engstelle geschoben in "WALK" mit den "EGOAPAgents" bei 1 Meter Engstellenbreite

Bei einer Engstellenbreite von 2 Meter ist dieses Verhalten ebenfalls zu beobachten. Da die Engstelle breiter ist, ist jedoch auch die Flussrate höher und es ist möglich, dass aus beiden Richtung Agenten die Engstelle zur gleichen Zeit durchqueren. Bei allen Versuchen zeigt sich ein „Arching“ vor der Engstelle, wobei dieses bei einer Engstellenbreite von 2 Meter geringer ausgeprägt ist, da die Flussrate höher ist und dadurch mehr Bewegung vor der Engstelle vorhanden ist.

Das Verhalten entspricht somit den Erwartungen, da es zu sich abwechselnden Flussrichtungen kommt und auch ein „Arching“ beobachtet werden kann.

7.2.2.2 WALK ModularAgent

Bei den Versuchen in „WALK“ mit den „ModularAgents“ und einer Engstellenbreite von 0,5 Meter kommt ebenfalls kein Fluss durch die Engstelle zustande. Die Agenten werden wie auch schon bei den Versuchen zur Spurenbildung sehr langsam und bleiben vor der Engstelle stehen. Sie halten dabei einen Abstand voneinander, kollidieren nicht und zeigen kein Schiebeverhalten. Bei einer Engstellenbreite von 1 Meter ist das gleiche Verhalten zu beobachten (Abbildung 64).

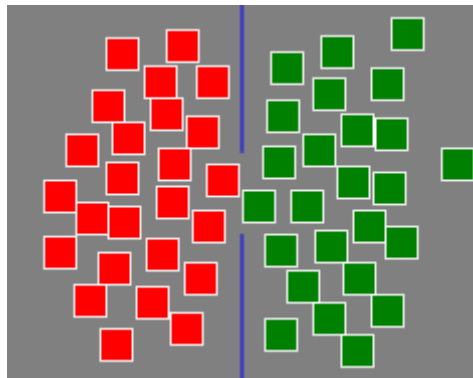


Abbildung 64 - Agenten stehen vor der Engstelle und halten Abstand voneinander in "WALK" mit den "ModularAgents" bei 1 Meter Engstellenbreite

Erst bei einer Engstellenbreite von 2 Meter wird die Engstelle teilweise durchquert. Allerdings handelt es sich dabei nicht immer um eine sich abwechselnde Flussrichtung, sondern auch ein gleichzeitiger Fluss aus beiden Richtungen der Engstelle ist möglich. Die Agenten bewegen sich dabei nur sehr langsam. Es kommt jedoch auch bei einer Engstellenbreite von 2 Meter in einigen Durchläufe noch zu einem Stillstand, weil sich die Agenten gegenüber stehen und den Durchgang blockieren, aber keine Möglichkeit haben, die anderen Agenten wegzuschieben. Ein „Arching“ ist bei allen Versuchen deutlich erkennbar.

Die Übereinstimmung des gezeigten Verhaltens mit den Erwartungen ist nicht ausreichend. Erst bei einer großen Engstelle von 2 Meter Breite ist überhaupt ein Fluss durch die Engstelle möglich. Bei dieser Engstellenbreite ist jedoch auch eine Spurenbildung möglich. „Arching“ ist vorhanden und entspricht den Erwartungen. Jedoch kann das ansonsten gezeigte Verhalten nicht als realistisch angesehen werden.

7.2.2.3 MARS LIFE Fußgängermodell

Bei den Versuchen in „MARS LIFE“ mit den Fußgängeragenten und einer Engstellenbreite von 0,5 Meter kommt ebenfalls kein Fluss zustande. Die Agenten stoßen am Durchgang der Engstelle zusammen und bewegen sich nicht mehr, da sie keinen Platz mehr für Bewegungen haben. Auch bei einer Engstellenbreite von 1 Meter ist dies zu beobachten (Abbildung 65).

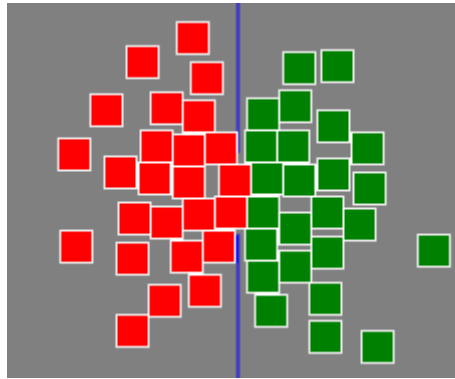


Abbildung 65 - Agenten stehen vor der Engstelle und halten keinen Abstand voneinander in "MARS LIFE" mit den Fußgängeragenten bei 1 Meter Engstellenbreite

Bei einer Engstellenbreite von 2 Meter bewegen sich die Agenten aus beiden Richtungen gleichzeitig sehr langsam durch die Engstelle. Wie auch bei den „ModularAgents“ kommt es aber bei manchen Durchläufen weiterhin zu Stillständen, weil sich die Agenten gegenüberstehen, den Durchgang blockieren und es keine Möglichkeit für die Agenten gibt, die anderen Agenten wegzuschieben. Dieses Problem zeigte sich bereits bei den Versuchen zur Spurenbildung im bidirektionalen Fluss, bei denen es ebenfalls zu Situationen kommen konnte, in denen es zu einem Stillstand kam, weil sich die Agenten gegenseitig blockierten und nichts unternehmen konnten, um diesen Zustand zu ändern. Ein deutliches „Arching“ ist bei allen Versuchen erkennbar.

Auch bei diesem Bewegungsmodell entspricht das gezeigte Verhalten nicht den Erwartungen. Ein „Arching“ ist zwar erkennbar, aber ein abwechselnder Fluss durch die Engstelle ist nicht vorhanden. Es zeigt sich deutlich, dass ein realistisches Verhalten nur möglich ist, wenn die Agenten andere Agenten wegschieben können. Dies ist den Fußgängeragenten aber nicht möglich.

7.2.2.4 PedSim

Auch bei den Versuchen in „PedSim“ mit einer Engstellenbreite von 0,5 Meter kommt kein Fluss zustande. Stattdessen rotieren die Agenten vor der Engstelle. Dabei zeigt sich deutlich, dass die Agenten keinen festen Körper haben, da sie durch die anderen Agenten durch laufen. Bei einer Engstellenbreite von 1 Meter schaffen es anfangs wenige Agenten die Engstelle zu durchqueren, wenn die Fußgängerströme jedoch vor der Engstelle zusammentreffen ist kein Fluss mehr möglich.

Bei einer Engstellenbreite von 2 Meter zeigt sich wie im Versuch zur Spurenbildung im bidirektionalen Fluss eine klare Aufteilung in 2 Fußgängerspuren (Abbildung 66). Bei allen Engstellenbreiten ist ein „Arching“ der Agenten vor der Engstelle erkennbar.

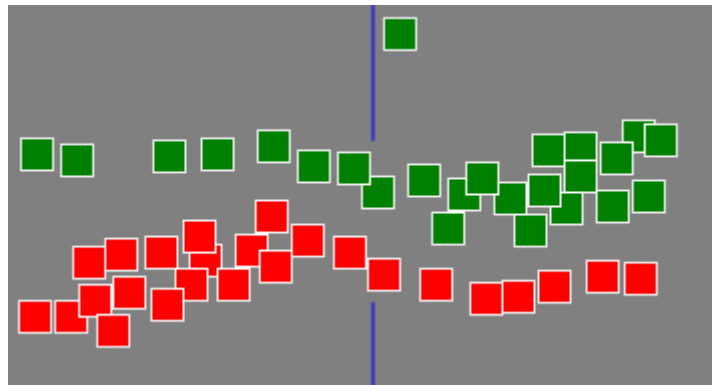


Abbildung 66 - Deutliche Spurenbildung in "PedSim" bei 2 Meter Engstellenbreite

Es werden also auch mit „PedSim“ bei diesem Versuch nicht die Erwartungen erfüllt. Nur das „Arching“ ist vorhanden. Die sich abwechselnden Flussrichtungen durch die Engstelle sind nicht zu beobachten. Somit sind die „EGOAPAgenten“ die einzigen Agenten, die beide Anforderungen erfüllen.

7.2.3 Sackgassen

Die Versuchsreihen mit Sackgassen dienen einer Überprüfung des Agentenverhaltens bei der Wegfindung. Es soll gezeigt werden, ob die Agenten dazu in der Lage sind, selbstständig einen Weg um Hindernisse herum zu finden. Ist dies nicht möglich, so müssen vom Modellierer vor der Simulation alle Wegpunkte der Agenten festgelegt werden. Sollten die Agenten dann jedoch ihren Weg verlassen, z.B. um einem Hindernis wie einem anderen Agenten auszuweichen, kann es sein, dass der Wegpunkt hinter einem anderen Hindernis wie einer Sackgasse liegt, die der Agent dann nicht umgehen kann. Ohne Wegfindung der Agenten lassen sich auch keine Szenarien simulieren, bei denen die Umgebung einen komplexen Grundriss besitzt. Abbildung 67 zeigt beispielhaft einen Durchlauf der Versuche mit einer 5 Meter langen und breiten Sackgasse in „MARS LIFE“ unter Verwendung des Fußgängermodells. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

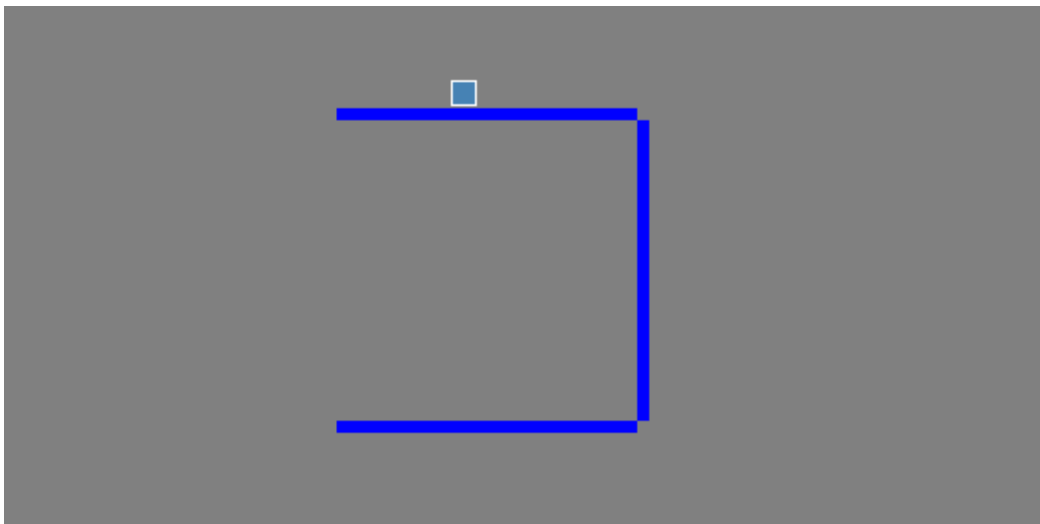


Abbildung 67 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs mit einer 5 Meter langen und breiten Sackgasse unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Im Folgenden werden die Versuchsreihen zum Wegfindungsverhalten der Agenten ausgewertet. Dieses Verhalten ist jedoch für die „EGOAPAgents“ und „ModularAgents“ in „WALK“ und die Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ identisch. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf „PedSim“, das ein anderes Verhalten zeigt.

7.2.3.1 PedSim

Sowohl im Versuch mit einer 5 Meter langen und breiten Sackgasse als auch beim Versuch mit einer 100 Meter langen und breiten Sackgasse, läuft der Agent in „PedSim“ in die Sackgasse hinein und findet den Weg aus ihr nicht wieder heraus. Stattdessen läuft er immer wieder gegen die Wand und prallt von ihr ab (Abbildung 68). Er stellt nicht fest, dass er in eine Sackgasse gelaufen ist und führt keine Wegfindung aus. Er versucht den definierten Wegpunkt auf direktem Weg zu erreichen.

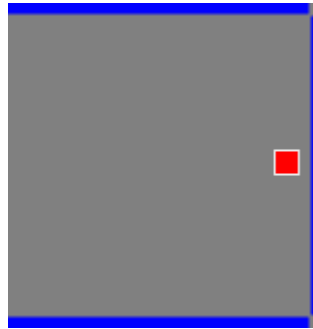


Abbildung 68 - Agent findet keinen Weg aus der Sackgasse in "PedSim"

Dieses Verhalten kann wie bereits erwähnt große Probleme in Szenarien mit etwas komplexeren Grundrissen verursachen, bei denen es möglich ist, in Sackgassen zu laufen. Ohne eine Erweiterung der Agenten um eine selbstständige Wegfindung sind die Agenten also nicht für solche Szenarien zu gebrauchen. Das Verhalten ist nicht realistisch, da ein echter Mensch spätestens in der Sackgasse merken würde, dass es kein Weiterkommen gibt. Somit würde er umdrehen und sich einen neuen Weg suchen, er würde also eine neue Wegfindung ausführen.

7.2.3.2 Andere Bewegungsmodelle

Die anderen Agenten laufen erst gar nicht in die Engstelle hinein, sondern steuern sofort das Ende der oberen oder unteren Wand an. Um diese laufen sie herum, so dass sie die Sackgasse umgehen. Die Größe der Sackgasse spielt bei diesem Verhalten keine Rolle. Bei anderen Versuchen konnte beobachtet werden, dass die Agenten, wenn sie von ihrem geplanten Weg abkommen und doch in einer Sackgasse landen, automatisch nach einiger Zeit feststellen, dass sie feststecken. Daraufhin führen sie eine Neuberechnung ihres Wegs durch und umgehen auf diese Weise die Sackgasse.

Dieses Verhalten ist weitaus realistischer als das Verhalten der Agenten in „PedSim“. Es erlaubt den Agenten beliebig komplexe Umwelten zu durchqueren, solange es einen Weg zu ihrem Ziel gibt. Es ist allerdings zu beachten, dass die Agenten die komplette Umwelt von Beginn an kennen. Ein realistischeres Verhalten würde in manchen Situationen erreicht

werden, wenn die Agenten nur den Teil der Umwelt kennen würden, den sie bereits gesehen haben.

7.2.4 Komplexeres Szenario

Die Versuchsreihen mit einem komplexeren Szenario dienen der Betrachtung des Verhaltens der Agenten, wenn der Grundriss der Umwelt komplexer gestaltet ist, als in den anderen untersuchten Szenarien. Hierzu werden die SMDPC-Versuche simuliert (Plaue et al. 2011). Bei diesen ist auch das Aufeinandertreffen der Agenten komplexer als zuvor, da neben einem frontalen Aufeinandertreffen zweier Fußgängerströme auch das seitliche Aufeinandertreffen simuliert wird. Außerdem wird das Aufeinandertreffen von 4 Fußgängerströmen simuliert, wodurch das Verhalten der Agenten an Kreuzungen analysiert werden kann. Ein weiterer Unterschied zu den anderen Versuchsszenarien ist, dass die Agenten sehr viel mehr Freiraum besitzen, so dass das Verhalten ohne große Einschränkungen der Bewegungsfreiheit durch enge Gänge betrachtet werden kann. Überprüft wird einerseits die Übereinstimmung des in den Simulationen gezeigten Verhaltens mit dem Verhalten der Versuchsteilnehmer in den Vergleichsaufnahmen. Außerdem wird auf zuvor beschriebene Verhaltensweisen von Fußgängern überprüft. Bei diesen handelt es sich unter anderem um die Bevorzugung von Geschwindigkeitsreduzierungen statt dem Abweichen von der gewünschten Fortbewegungsrichtung zur Kollisionsvermeidung (Helbing 2002, Usher und Strawderman 2010). Auch auf Bildung eines Kreisverkehrs an einer Kreuzung und Streifenbildung bei 2 sich kreuzenden Fußgängerströmen wird überprüft (Usher und Strawderman 2010).

Abbildung 69 zeigt beispielhaft einen Durchlauf des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „MARS LIFE“ unter Verwendung des Fußgängermodells. Das Bild wurde bei der Wiedergabe der Versuchsaufzeichnungen im „Szenario-Player“ erstellt.

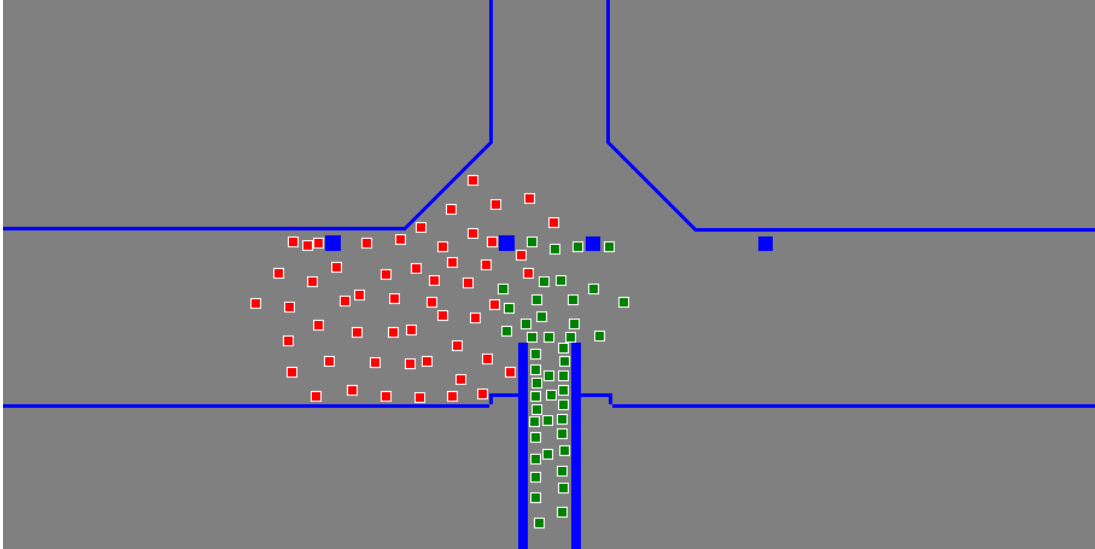


Abbildung 69 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ mit zwei Fußgängerströmen, die seitlich aufeinandertreffen, unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“

Im Folgenden werden die Versuchsreihen mit den SMDPC-Versuchen für jedes der Bewegungsmodelle ausgewertet. Zuerst wird jedoch das in den Aufnahmen von Plaue et al. (2011) sichtbare Verhalten der Versuchsteilnehmer beschrieben.

7.2.4.1 SMDPC-Vergleichsdaten

In den Aufzeichnungen des SMDPC-Versuchs „BR180“ gibt es 2 Gruppen mit Versuchsteilnehmern. Die Mitglieder der einen Gruppe bewegen sich von links nach rechts durch den überwachten Versuchsbereich. Die Mitglieder der anderen Gruppe laufen von rechts nach links durch diesen Bereich. Sie treffen somit frontal aufeinander. Es lässt sich dabei eine deutliche Spurenbildung beobachten. Die durchschnittliche Breite einer solchen Spur beträgt 2 Personen. Fast alle Versuchsteilnehmer laufen durch den für die makroskopische Bewertung bestimmten Messbereich, der von 2 Säulen eingegrenzt wird (5.3.7 Versuche mit einem komplexeren Szenario). Nur ein Teilnehmer weicht in den Bereich oberhalb der Säulen aus, um dem Stau aus dem Weg zu gehen.

Bei dem anderen SMDPC-Versuch zum frontalen Aufeinandertreffen von 2 Fußgängerströmen, „GW180“, bewegen sich die Mitglieder einer Gruppe von oben nach unten und die Mitglieder der anderen Gruppe entgegengesetzt. Auch hier ist eine deutliche Spurenbildung zu erkennen. Anfangs sind beide Spuren gleich breit, später ist dann die von oben kommende Spur deutlich breiter. Sie hat eine Breite von 3 Personen, während die andere Spur eine Breite von nur 1 Person hat. Am unteren Durchgang bildet sich schließlich ein Stau. Bis auf wenige Ausnahmen laufen erneut alle Versuchsteilnehmer durch den Messbereich.

Bei dem SMDPC-Versuch „GR90“, der das seitliche Aufeinandertreffen zweier Fußgängerströme untersucht, gehen die Mitglieder einer Gruppe von links nach rechts und die Mitglieder der anderen Gruppe von unten nach oben. Die Versuchsteilnehmer beschleunigen und verlangsamen ihre Geschwindigkeit, um Kollisionen aus dem Weg zu gehen und Lücken abzapfen. Hierdurch ergibt sich die zuvor beschriebene Streifenbildung. Erneut laufen alle bis auf 1 Teilnehmer durch den Messbereich.

Bei dem SMDPC-Versuch „BRGW“ treffen 4 Fußgängerströme mittig im Messbereich aufeinander. Hierdurch ergibt sich in diesem Bereich eine hohe Personendichte und es kommt zum Stau (Abbildung 70). Die meisten Teilnehmer versuchen durch die Mitte der Kreuzung zu gehen. Andere Teilnehmer, die erst später auf den Stau treffen, umgehen diesen, indem sie um die Mitte herum laufen. Es kommt allerdings nicht zur Bildung von zeitlich begrenzten Kreisverkehren.



Abbildung 70 - Stau im Messbereich in SMDPC-Versuch "BRGW" (Plaue et al. 2011)

7.2.4.2 WALK EGOAPAgent

Bei den Versuchen in „WALK“ mit den „EGOAPAgents“ lässt sich bei Versuch „BR180“ dagegen keine Spurenbildung erkennen. Sofort beim Start bewegen sich die Agenten auseinander, um die Abstände zu ihren Nachbarn zu erhöhen. Die Fußgängerströme sind dadurch sehr viel breiter. Statt den kürzesten Weg zu gehen, gehen die Agenten Umwege, um den entgegenkommenden Agenten auszuweichen. Dadurch laufen sehr viele der Agenten nicht durch den Messbereich. Teilweise kommen sogar Agenten so weit von ihrem Weg ab, dass sie zeitweise in dem unteren Gang landen, obwohl sie eigentlich nach links oder rechts gehen wollen.

Bei Versuch „GW180“ lässt sich das gleiche Verhalten wie bei Versuch „BR180“ erkennen. Allerdings verfehlen manche Agenten, die von oben nach unten laufen und in den unteren Gang laufen wollen diesen Gang. Sind sie am Eingang vorbeigelaufen, müssen sie umdrehen, da sie ansonsten in einer Sackgasse stecken. Die Agenten bemerken jedoch, dass sie nicht mehr vorwärtskommen, drehen um und schaffen es schließlich in den Gang zu gelangen. Wie bei den echten Aufzeichnungen der Versuche bildet sich ein Stau am unteren Durchgang. Dieser sorgt jedoch dafür, dass die Agenten, die aus diesem Gang kommen, immer weiter in den Gang zurückgedrängt werden und nicht mehr aus ihm heraus kommen (Abbildung 71).

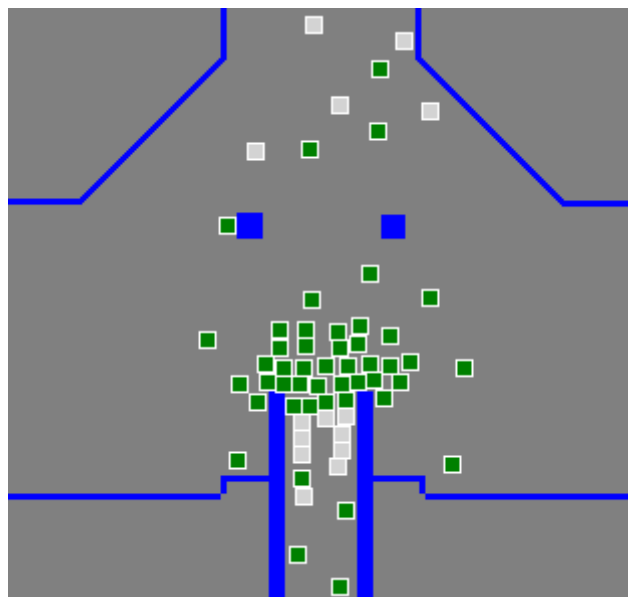


Abbildung 71 - Die grünen Agenten drängen die grauen Agenten zurück in ihren Gang in SMDPC-Versuch "BRGW" in "WALK" mit den "EGOAPAgents"

In Versuch „GR90“ zeigt sich ein ähnliches Problem. Bei den Versuchen, den seitlich auf sie treffenden Agenten auszuweichen, laufen manche Agenten immer weiter in den Gang seitlich zu ihrer eigentlichen Zielrichtung. Die Agenten reduzieren nicht ihre Geschwindigkeit um Kollisionen aus dem Weg zu gehen, es gibt also keine Streifenbildung.

In Versuch „BRGW“ bildet sich entgegen der Erwartungen kein Stau in der Mitte des Messbereichs, da die Agenten erneut sehr große Abstände voneinander halten. Wie zuvor werden einige Agenten durch andere Agenten von ihrem Weg abgebracht und bewegen sich in Gänge, in denen sie eigentlich nicht sein sollten. Ein Kreisverkehr bildet sich auch in der Simulation nicht.

Das Verhalten der „EGOAPAgents“ in diesem Szenario kann nicht als realistisch angesehen werden. Die Agenten kommen zu stark von ihrem eigentlichen Weg ab und halten sehr große Abstände voneinander. Würden die Agenten geringere Abstände halten und die Möglichkeit besitzen, ihre Geschwindigkeit anzupassen, um Kollisionen zu vermeiden, wäre das Verhalten deutlich realistischer.

7.2.4.3 WALK ModularAgent

Das Verhalten der „ModularAgents“ von „WALK“ in den SMDPC-Versuchen ist größtenteils mit dem Verhalten der „EGOAPAgents“ identisch. Allerdings sind die Agenten, wie sich auch in den anderen Versuchen gezeigt hat, deutlich langsamer. Durch die langsame Geschwindigkeit schaffen es die meisten Agenten in Versuch „GW180“ nicht den unteren Gang zu verlassen, da die Agenten ihn von oben versperren. Im Gegensatz zu den „EGOAPAgents“ können die Agenten keine anderen Agenten wegschieben, so dass es zu einem Stillstand kommt. Auch die „ModularAgents“ laufen teilweise am Eingang zum unteren Gang vorbei. Genau wie die „EGOAPAgents“ merken sie dies allerdings und drehen daraufhin um.

Ein weiterer Unterschied gegenüber der „EGOAPAgents“ ist im Versuch „BRGW“ erkennbar. Dort schaffen es die 4 Fußgängerströme nicht aneinander vorbei zu laufen, so dass es zu einem Stau und Stillstand kommt (Abbildung 72).

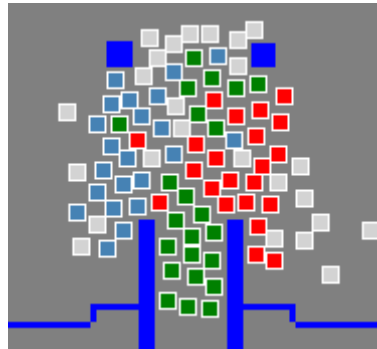


Abbildung 72 - Stau und Stillstand in SMDPC-Versuch "BRGW" in "WALK" mit den "ModularAgents"

Es gilt somit das gleiche Fazit wie für die „EGOAPAgents“. Das gezeigte Verhalten ist nicht realistisch. Das Ausweichverhalten der Agenten ist für die Versuche nicht gut genug. Außerdem fehlt die Möglichkeit andere Agenten wegzuschieben, um sich einen Weg durch die Menge bahnen zu können.

7.2.4.4 MARS LIFE Fußgängermodell

Das Verhalten der Fußgängeragenten in „MARS LIFE“ ist bei den SMDPC-Versuchen fast mit dem der „EGOAPAgents“ identisch. Die Kollisionsauflösung von „WALK“ bei Nutzung der „EGOAPAgents“ spielt bei diesen Versuchen keine Rolle, da die Agenten sehr große Abstände voneinander halten und somit nicht kollidieren. Da die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ auf den „EGOAPAgents“ basieren und nur die Kollisionsvermeidung anders funktioniert, ist dieses Verhalten zu erwarten. Somit ist auch die Simulation der SMDPC-Versuche mit den Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ nicht realistisch genug.

7.2.4.5 PedSim

„PedSim“ zeigt ein deutlich anderes Verhalten als die anderen Bewegungsmodelle. Bei SMDPC-Versuch „BR180“ zeigt sich erneut eine deutliche Spurenbildung. Kurz nach Simulationsstart laufen die Agenten bereits zu den Seiten, um den entgegenkommenden Agenten auszuweichen. Da die Agenten aber keine Wegfindung durchführen, geraten sie hierdurch hinter Hindernisse wie Wände und Säulen und schaffen es aus eigener Kraft nicht mehr zurück auf ihren Weg zu gelangen. Nur wenn sie von anderen Agenten abgestoßen werden, können sie es schaffen zurück auf den Weg zu ihrem Ziel zu kommen. Wie auch bei den anderen Bewegungsmodellen laufen die meisten Agenten um den Messbereich herum.

Auch in Versuch „GW180“ lässt sich deutliche Spurenbildung erkennen. Die von unten kommende Spur wird von der von oben kommenden Spur mittig in 2 geteilt, so dass diese von einer Breite von 2 Agenten in 2 Spuren mit einer Breite von 1 Agent aufgeteilt wird. Die von oben kommenden Agenten laufen durch den Messbereich, während die beiden von unten kommenden Spuren den von oben kommenden Agenten ausweichen und aus dem Messbereich heraus laufen. Agenten, die am unteren Eingang vorbeilaufen, schaffen es nicht mehr zurück zum Eingang.

In Versuch „GR90“ zeigt sich weder Spuren- noch Streifenbildung. Die Agenten kollidieren im Messbereich und prallen dabei voneinander ab. Dadurch ergeben sich viele unerwartete Bewegungen entgegen der Fortbewegungsrichtung.

In Versuch „BRGW“ bildet sich entgegen der Erwartungen kein Stau. Es findet auch keine Anpassung der Geschwindigkeit der Agenten zur Kollisionsvermeidung statt. Stattdessen zeigt sich wieder starke Spurenbildung. Durch die Spurenbildung und das Ausweichverhalten der Agenten laufen die meisten Agenten um den Messbereich herum, in dem eigentlich der Stau erwartet wurde. Durch das Ausweichen bleiben die Agenten allerdings wieder an Hindernissen und Wänden hängen (Abbildung 73).

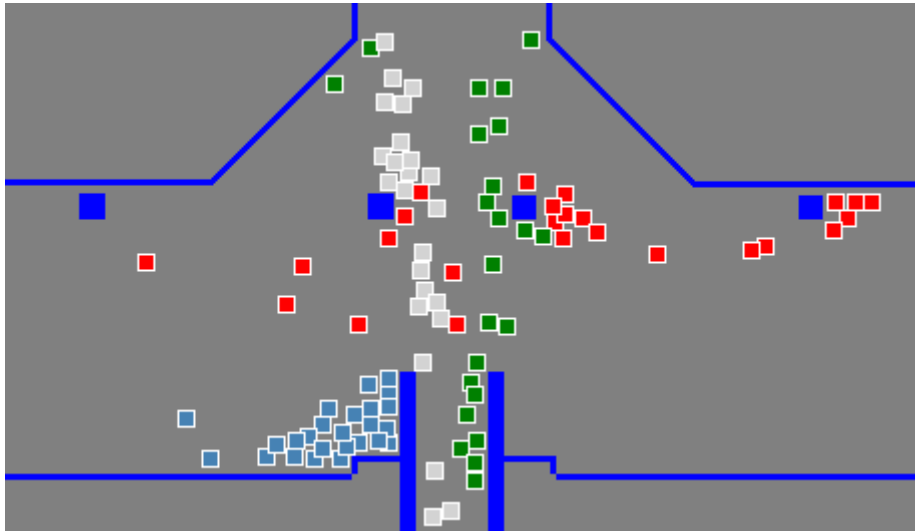


Abbildung 73 - Deutliche Spurenbildung und an Hindernissen festhängende Agenten in SMDPC-Versuch "BRGW" in "PedSim"

„PedSim“ kann also wie auch die anderen Bewegungsmodelle kein realistisches Verhalten in den SMDPC-Versuchen erzeugen. Die Agenten halten zu große Abstände zueinander, laufen zu große Umwege und bleiben an Hindernissen hängen. Realistischeres Verhalten ließe sich durch intelligentere Agenten erzeugen, die ihre Geschwindigkeit zur Kollisionsvermeidung verringern können und eine Wegfindung durchführen, falls sie von ihrem ursprünglichen Weg abgekommen sind.

8 Schlussbetrachtung

Das letzte Kapitel dient der Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit. Zuerst wird analysiert, ob das Validierungskonzept wie erwartet funktioniert hat und wie aussagekräftig die Ergebnisse waren. Danach werden die Ergebnisse der Validierung der Bewegungsmodelle beschrieben und Folgerungen über die Validität der Modelle gezogen. Als letztes wird ein Ausblick auf mögliche Verbesserungen und Erweiterungen des Validierungskonzepts gegeben, sowie beschrieben, wie man das Validierungskonzept mit weiteren Modellen nutzen könnte.

8.1 Fazit zum Validierungskonzept

Das in dieser Arbeit erstellte Validierungskonzept wurde für 4 verschiedene Bewegungsmodelle angewandt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl Vergleiche mit makroskopischen Werten und Diagrammen, als auch eine visuelle Betrachtung des Agentenverhaltens dabei hilft, eine Vielzahl an Abweichungen des Modellverhaltens von der Realität und andere Probleme des Modells zu identifizieren.

Die Vergleiche mit makroskopischen Werten und Diagrammen erlaubten eine objektive Bewertung des Modellverhaltens. Vergleiche zwischen Vergleichswerten und Vergleichsdiagrammen aus der Realität waren dadurch kein Problem. Auch Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Bewegungsmodellen konnten problemlos durchgeführt werden. Die in der Arbeit definierten Versuchsaufbauten, Versuchsabläufe und Messungen haben sich dabei als geeignet gezeigt, die nötigen makroskopischen Werten aus den Simulationen erlangen zu können. Die betrachteten makroskopischen Werte erlaubten einen guten Einblick in das grundlegende Verhalten der Bewegungsmodelle.

Durch die Betrachtung der Abhängigkeit zwischen der Personendichte und der Geschwindigkeit der Agenten war es möglich festzustellen, dass die meisten der betrachteten Bewegungsmodelle zu hohe Bewegungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Personendichte produzieren. Auch konnten deutlich Fehler aufgezeigt werden, die für ein unrealistisches Verhalten bei hohen Dichten sorgen konnten.

Mit den Engstellendiagrammen konnte gezeigt werden, dass die meisten Bewegungsmodelle zu hohe Flussraten für hohe Engstellenbreiten erzeugen und zu niedrige Flussraten für geringe Engstellenbreiten. Außerdem konnte das Problem gezeigt werden, dass alle Bewegungsmodelle keinen Fluss durch Engstellen zulassen, durch die die Agenten eigentlich noch passen sollten.

Die Verlaufsdiagramme konnten schon vor der visuellen Auswertung der SMDPC-Versuche auf eine objektive Weise zeigen, dass es große Unterschiede im Verhalten der Agenten der Bewegungsmodelle und dem Verhalten der Versuchsteilnehmer gibt. Somit stellen diese Diagramme eine gute Ergänzung zur visuellen Auswertung dar.

Es konnte aber auch gezeigt werden, dass eine zusätzliche direktere Betrachtung des Agentenverhaltens weitere Übereinstimmungen und Abweichungen mit den Erwartungen sowie Probleme der Bewegungsmodelle aufzeigen konnte.

Durch die Definition fester Versuchsaufbauten und Versuchsabläufe und einer festen Definition der zu erwartenden Verhaltensweisen, konnten auch mit Face Validation objektive Aussagen über die Korrektheit des Agentenverhaltens getroffen werden. Somit konnte gezeigt werden, dass auch bei Bewegungsmodellen, die gute Übereinstimmungen im grundlegenden Modellverhalten gezeigt haben, noch weitere Probleme bestehen können, die einer realistischen Simulation im Wege stehen. Es konnten Mängel beim Ausweichverhalten der Agenten aufgedeckt werden, die unter anderem durch fehlende Spurenbildung in bidirektionalen Fußgängerströmen verursacht wurden. Es konnte auch gezeigt werden, wie wichtig es ist, dass die Agenten selbstständig eine Wegfindung durchführen können.

Durch das Validierungsprogramm konnte die makroskopische Auswertung sehr effektiv ausgeführt werden. Die Versuche konnten aufgezeichnet werden und anschließend ohne weitere Schritte mit dem Programm ausgewertet werden, wobei Diagramme und Dateien mit den Berechnungen erstellt wurden.

Für die visuelle Auswertung war der „Szenario-Player“ von großer Hilfe. Er erlaubte es alle Bewegungsmodelle auf eine einheitliche Weise betrachten zu können, was die Vergleiche deutlich erleichterte. Auch die Möglichkeit die gleichen Aufzeichnungen immer wieder betrachten zu können, um sie zu analysieren war von Vorteil. Dabei konnte auch die Geschwindigkeit der Wiedergabe reduziert werden, um eine genauere Analyse zu ermöglichen.

Das Validierungskonzept entspricht somit den Erwartungen und erlaubt eine objektive Validierung des makroskopischen und mikroskopischen Modellverhaltens.

8.2 Folgerungen zur Validität der Bewegungsmodelle

Keines der Bewegungsmodelle kann nach der Anwendung des Validierungskonzepts als valide betrachtet werden. Alle Modelle zeigen sehr große Abweichungen von den Erwartungen und Vergleichsdaten. Die Übereinstimmungen und Abweichungen sind für die verschiedenen Validierungsschritte und Bewegungsmodelle unterschiedlich. Zu beachten ist, dass bei vielen der Versuche eine bessere Übereinstimmung durch eine Kalibrierung der Modelle zu erreichen wäre. Dies sollte aufgrund des Aufwands für jedes der Modelle jedoch nicht Teil der Arbeit sein.

Bei den Vergleichen mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann (1993) zeigen die „EGOAPAgents“ von „WALK“ eine relativ gute Übereinstimmung der Werte der Flussgeschwindigkeiten, die Form der Kurve des Diagramms und somit auch die genaue Abhängigkeit zwischen der Personendichte und der Agentengeschwindigkeiten sind jedoch nicht korrekt. Die Agenten „zittern“, d.h. bewegen sich seitlich zur Bewegungsrichtung sehr stark, wodurch sich deutlich höhere Werte für die allgemeine Geschwindigkeit ergeben.

Die „ModularAgents“ von „WALK“ zeigen die besten Übereinstimmungen der Werte und der Kurve des Fundamentaldiagramms. Jedoch sind alle Werte zu niedrig. Bei sehr hohen Dichten zeigt sich ein unrealistisches Verhalten, das für eine Zunahme der Geschwindigkeiten sorgt. Dabei handelt es sich um ein „Zittern“ wie bei den „EGOAPAgents“. Dieses wird immer stärker, je höher die Dichtewerte werden.

Die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ zeigen nur einen geringen Einfluss der Dichte auf die Geschwindigkeit der Agenten. Dadurch ergeben sich viel zu hohe Geschwindigkeitswerte für hohe Dichten. Auch die Form der Kurve entspricht nicht der Form der Kurve von Weidmann (1993).

„PedSim“ zeigt eine gute Übereinstimmung der Form der Kurve der Flussgeschwindigkeiten, diese ist aber deutlich nach rechts verschoben, wodurch sich viel zu hohe Geschwindigkeitswerte ergeben.

Bei den Vergleichen mit den Engstellendiagrammen von Kretz et al. (2006) und Hoogendoorn und Daamen (2005) haben die „EGOAPAgents“ von „WALK“ wie erwartet eine deutliche lineare Abhängigkeit zwischen Engstellenbreite und Flussrate gezeigt, die Gerade ähnelt der Vergleichsgerade. Auch die berechneten Werte liegen dicht an den Vergleichswerten. Jedoch sind die Werte für geringe Breiten etwas zu niedrig und für hohe Breiten etwas zu hoch. Bei einer Engstellenbreite von 0,4 Meter ist kein Fluss möglich, obwohl es möglich sein sollte.

Auch die Form der Gerade der „ModularAgents“ in „WALK“ zeigt prinzipiell das richtige Verhalten. Jedoch sind alle berechneten Werte geringer als die Vergleichswerte. Bei Engstellenbreiten von 0,4 Meter ist kein Fluss möglich. Auch bei einer Engstellenbreite von 0,5 Meter gibt es kaum Fluss durch die Engstelle.

Die Fußgängeragenten von „MARS LIFE“ zeigen keine gute Übereinstimmung der Gerade. Die Gerade hat eine viel zu hohe Steigung, da die Engstelle die Agenten nicht stark genug abbremst. Bei einer Engstellenbreite von 0,4 Meter ist kein Fluss möglich. Auch bei Engstellenbreite von 0,7 Meter und weniger gibt es kaum Fluss durch die Engstelle.

„PedSim“ besitzt das gleiche Problem. Auch hier hat die berechnete Gerade eine zu hohe Steigung. Für niedrige Engstellenbreiten sind die Flusswerte zu niedrig und für hohe Engstellenbreiten sind die Flusswerte zu hoch. Bei einer Engstellenbreite von 0,4 Meter ist kein Fluss möglich, bei einer Engstellenbreite von 0,5 Meter ist kaum Fluss durch die Engstelle vorhanden.

Bei der Betrachtung des bidirektionalen Flusses in einem Gang zeigt nur „PedSim“ eine Übereinstimmung mit der Erwartung, dass sich deutliche Fußgängerspuren bilden sollten (Helbing et al. 2002). Die anderen Bewegungsmodelle haben große Probleme mit dem Ausweichverhalten der Agenten, wodurch es zu vielen Kollisionen und Stillstand kommt.

Beim bidirektionalen Fluss an einer Engstelle zeigen nur die „EGOAPAgents“ das erwartete Abwechseln der Flussrichtung (Helbing et al. 2002). Bei den anderen Bewegungsmodellen gibt es entweder keinen Fluss durch die Engstelle oder es gibt gleichzeitig Flüsse in beide Richtungen.

Die Versuche zum Verhalten der Bewegungsmodelle bei Sackgassen belegen deutlich, dass die Agenten eine gewisse Intelligenz brauchen. Ohne eine Wegfindung ist es möglich, dass Agenten in Bereiche der Umwelt gelangen können, aus der sie nicht mehr herauskommen. Bis auf „PedSim“-Agenten haben es alle Agenten geschafft, die Sackgasse zu umgehen.

Die Vergleiche mit den SMDPC-Versuchen von Plaue et al. (2006) haben gezeigt, dass keines der Modelle die Aufzeichnungen realistisch reproduzieren kann. Die Agenten aller Bewegungsmodelle halten zu hohe Abstände zueinander. Bei keinem der Modelle war Streifenbildung beim seitlichen Aufeinandertreffen zweier Fußgängerströme erkennbar (Usher und Strawderman 2010). Spurenbildung zeigte sich nur bei „PedSim“, allerdings liefen die „PedSim“-Agenten durch ihr Ausweichverhalten gegen Hindernisse und blieben an ihnen hängen.

Bei der Anwendung des Konzepts konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten der Agenten abhängig vom jeweiligen Modell größere oder

kleinere Auswirkungen auf die durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit aller Agenten hatten. In allen Modellen wurden die durchschnittlichen Geschwindigkeiten durch unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten langsamer. Wie stark der Einfluss war, war auch vom Szenario abhängig. Um ein realistisches Verhalten zu erreichen, spricht allerdings nichts dagegen, die Maximalgeschwindigkeiten der Agenten auf Basis einer Normalverteilung zuzuordnen.

Der Einfluss sozialer Gruppen auf die durchschnittlichen Bewegungsgeschwindigkeiten war noch sehr viel stärker. Die Versuche mit sozialen Gruppen produzierten deutlich geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten und Flussraten. Soll eine Situation simuliert werden, in der die Beschaffenheit der sozialen Gruppen bekannt ist, macht es daher Sinn, soziale Gruppen zu simulieren, um ein möglichst realistisches Ergebnis zu erlangen.

8.3 Ausblick

Es konnte bereits gezeigt werden, dass das Validierungskonzept die gewünschten Resultate liefert. Jedoch wäre es möglich, weitere Verbesserungen vorzunehmen. Die Auswertung der makroskopischen Diagramme könnte weiter automatisiert werden. Es wäre möglich, für die Diagramme Validitätswerte zu berechnen. Dies könnte z.B. der durchschnittliche Abstand der in der Simulation bestimmten Werte zu den Vergleichswerten sein. Dies würde die Vergleiche weiter vereinfachen und auch für noch objektivere Ergebnisse sorgen.

Die visuelle Auswertung bzw. Face Validation könnte komplett durch eine maschinelle Auswertung ersetzt werden. Hierfür könnten Mustererkennung und Bewegungsmuster genutzt werden (Dodge et al. 2008, Gudmundsson et al. 2004). Die zu erwartenden Verhaltensweisen müssten dann als Bewegungsmuster beschrieben werden. Wenn diese dann in der Simulation auftreten, sollte die Mustererkennung sie wahrnehmen. Dies würde auch bei der mikroskopischen Auswertung des Agentenverhaltens für weitere Objektivität sorgen.

Generell kann das Validierungskonzept mit neuen makroskopischen oder mikroskopischen Vergleichsdaten erweitert werden, wenn diese ein relevantes Modellverhalten beschreiben.

In Bezug auf die betrachteten Bewegungsmodelle stellt sich die Frage, wie gut die Ergebnisse von anderen Bewegungsmodellen bei Anwendung des Validierungskonzepts sind. Es wäre also möglich, das Konzept auf weitere Modelle anzuwenden. Es gäbe aber auch die Möglichkeit, die bestehenden Modelle zu verbessern, d.h. zu erweitern, zu kalibrieren und die vorhandenen Probleme zu beheben, bis das Validierungskonzept sie als valide ansieht.

Inhalte der DVD-Anlage

Der Arbeit liegt ein DVD-Datenträger mit folgender Verzeichnisstruktur bei:

- **Ausarbeitung/** Enthält die Masterarbeit im PDF-Format.
- **Versuchsdaten/Datenbanken/** Enthält SQLite-Datenbanken mit den Bewegungsdaten der Agenten in den durchgeführten Versuchen.
- **Versuchsdaten/Berechnungen/** Enthält CSV-Dateien mit den für die Validierung berechneten Werten.
- **Versuchsdaten/Diagramme/PNG/** Enthält die mit den berechneten Werten erstellten Diagramme im PNG-Format.
- **Versuchsdaten/Diagramme/SVG/** Enthält die mit den berechneten Werten erstellten Diagramme im skalierbaren Vektorgrafik-Format SVG.
- **Versuchsdaten/Diagramme/GnuPlot/** Enthält die GnuPlot-Skripte zur Erstellung der Diagramme.
- **Programme/Simulationssysteme/MARS-LIFE-PedestrianModel/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte Version von „MARS LIFE“ mit dem umgesetzten Fußgängermodell und den betrachteten Versuchsszenarien.
- **Programme/Simulationssysteme/WALK/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte angepasste Version von „WALK“, die um SQLite-Logging der Agentenpositionen und eine direkte Verbindung zur Validierungssoftware erweitert wurde. Auch enthalten sind die Versuchsszenarien als XML-Dateien im „WALK“-kompatiblen Format.
- **Programme/Simulationssysteme/PedSim/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte angepasste Version von „PedSim“, die um SQLite-Logging der Agentenpositionen erweitert wurde. Außerdem wurden die Versuchsszenarien im „PedSim“-kompatiblen XML-Format hinzugefügt und die Simulationsparameter wurden für die Versuchsszenarien kalibriert und optimiert.
- **Programme/Auswertung/ValidationTool/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte Version der Validierungssoftware zur Auswertung der SQLite-Datenbanken mit den Bewegungsdaten der Agenten oder zur direkten Anbindung an Simulationssysteme zur Validierung.
- **Programme/Auswertung/ScenarioPlayer/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte Version des „Szenario-Players“ zur Wiedergabe von SQLite-Datenbanken, die Bewegungsdaten von Agenten für die Versuchsszenarien beinhalten.
- **Programme/Auswertung/SmdpcSqliteConverter/** Enthält den Quellcode und eine kompilierte Version des Werkzeugs, welches für die Umwandlung der CSV-Daten der SMDPC-Versuche in das für die Versuchsauswertung genutzte SQLite-Format zuständig war.
- **Readme.txt** Beschreibt die Inhalte der DVD.

Literaturverzeichnis

Balci 1997

BALCI, O.: Verification, validation and accreditation of simulation models. In: ANDRADÓTTIR, S. (Hrsg.) ; HEALY, K. J. (Hrsg.) ; WITHERS, D. H. (Hrsg.): *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. Washington, DC : IEEE Computer Society, 1997. ISBN 0-7803-4278-X, S. 135-141.

– Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1145/268437.268462>

Banerjee und Kraemer 2010

BANERJEE, B. ; KRAEMER, L.: Validation of Agent Based Crowd Egress Simulation (Extended Abstract). In: LUCK, M. (Hrsg.) ; SEN, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Bd. 1. Richland, SC : International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010. ISBN 978-0-9826571-1-9, S. 1551-1552.

– Online verfügbar unter: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1838476>

Dodge et al. 2008

DODGE, S. ; WEIBEL, R. ; LAUTENSCHÜTZ, A.-K.: *Towards a Taxonomy of Movement Patterns*. In: *Information Visualization*, 7 (2008), Nr. 3, S. 240-252.

– Online verfügbar unter: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1594716>

Gloor 2013

GLOOR, C.: *PedSim Documentation*. PedSim – A Pedestrian Simulation System, 2013.

– Online verfügbar unter: <http://pedsim.silmaril.org/documentation>

Gudmundsson et al. 2004

GUDMUNDSSON, J. ; VAN KREVELD, M. ; SPECKMANN, B.: *Efficient Detection of Motion Patterns in Spatio-Temporal Data Sets*. In: GIS '04 Proceedings of the 12th annual ACM international workshop on Geographic information systems. New York, NY, USA : ACM, 2004. S. 250-257.

– Online verfügbar unter: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1032222.1032259>

Helbing et al. 2002

HELBING, D.; FARKAS, I. J.; MOLNÁR, P.; VICSEK, T.: Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. In: SCHRECKENBERG, M. (Hrsg.); SHARMA, S. D. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Berlin : Springer, 2012. S. 21-58.

– Online verfügbar unter:

http://www.researchgate.net/profile/Dirk_Helbing/publication/224010870_Simulation_of_pedestrian_crowds_in_normal_and_evacuation_situations/links/0912f50eb0d9bb622400000.pdf

Hoogendoorn und Daamen 2005

HOOGENDOORN, S. P.; DAAMEN, W.: Pedestrian Behaviour at Bottlenecks. In: *Transportation Science* 39 (2005), Nr. 2, S. 147-159.

– Online verfügbar unter: <http://transci.journal.informs.org/content/39/2/147.abstract>

Hüning et al. 2014

HÜNING, C.; WILMANS, J.; FEYERABEND, N.; THIEL-CLEMEN, T.: MARS - A next-gen multi-agent simulation framework. In: WITTMANN, J. (Hrsg.); MARETIS, D. K. (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Osnabrück 2014*. Aachen : Shaker Verlag, 2014. ISBN 978-3-8440-3032-7.

– Online verfügbar unter:

<http://mars-group.org/wp-content/uploads/2014/10/MARS-A-next-gen-simulation-framework.pdf>

Kretz et al. 2006

KRETZ, T.; GRÜNEBOHM, A.; SCHRECKENBERG, M.: Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* (2006), Nr. 10.

– Online verfügbar unter: <http://iopscience.iop.org/1742-5468/2006/10/P10014/>

Klügl 2008

KLÜGL, F.: A Validation Methodology for Agent-Based Simulations. In: WAINWRIGHT, R. L. (Hrsg.) ; HADDAD, H. M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*. New York, NY : Association for Computing Machinery, 2008. ISBN 978-1-59593-753-7, S. 39-43.

– Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1145/1363686.1363696>

Meyer-König et al. 2009

MEYER-KÖNIG, T.; MOROGE, C.; SCHRECKENBERG, M.; SCHWENDIMANN, M.; WALDAU, N.: *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen : Version: 2.2.1 08. Juni 2009*. RiMEA-Projekt, 2009.

– Online verfügbar unter: <http://www.rimea.de/fileadmin/files/dok/richtlinien/r2.2.1.pdf>

Moussaïd et al. 2010

MOUSSAÏD, M. ; PEROZO, N. ; GARNIER, S. : The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics. In: *PLoS ONE* 5 (2010), Nr. 4.

– Online verfügbar unter: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0010047>

Münchow 2013

MÜNCHOW, S.: *Einfluss von Leadership und sozialen Gruppen in agentenbasierten Entfluchtungssimulationen*. HAW Hamburg, Masterarbeit, 2013.

– Online verfügbar unter:

http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2013/2173/pdf/MA_MuenchowStefan.pdf

Orkin 2006

ORKIN, J.: Three States and a Plan: The AI of F.E.A.R. In: *Proceedings of the Game Developers Conference (GDC)*, 2006.

– Online verfügbar unter:

http://alumni.media.mit.edu/~jorkin/gdc2006_orkin_jeff_fear.pdf

Pelechano et al. 2008

PELECHANO, N. ; STOCKER, C. ; ALLBECK, J. ; BADLER, N.: Being a Part of the Crowd: Towards Validating VR Crowds Using Presence. In: PADGHAM, L. (Hrsg.) ; PARKES, D. C. (Hrsg.) ; MÜLLER, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Bd. 1. Richland, SC : International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008. ISBN 978-0-9817381-0-9, S. 136-142.

– Online verfügbar unter: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1402383.1402407>

Pelechano und Malkawi 2008

PELECHANO, N. ; MALKAWI, A.: Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. In: *Automation in Construction* 17 (2008), Nr. 4, S. 337-385.

– Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2007.06.005>

Plaue et al. 2011

PLAUE, M.; CHEN, M.; BÄRWOLFF, G.; SCHWANDT, H.: Trajectory extraction and density analysis of intersecting pedestrian flows from video recordings. In: *Photogrammetric Image Analysis*. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. S. 285-296.

– Online verfügbar unter: <ftp://ftp.math.tu-berlin.de/pub/numerik/SMDPC/supp.zip>

Reynolds 1987

REYNOLDS, C. W.: Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model. In: *SIGGRAPH Computer Graphics* 21 (1987), Nr. 4, S. 25-34.

– Online verfügbar unter: <http://www.red3d.com/cwr/papers/1987/SIGGRAPH87.pdf>

Roiss 2011

ROISS, P.: Modellierung von Agenten mit Hilfe emotionaler Verhaltensmodelle. In: WITTMANN, J. (Hrsg.), WOHLGEMUTH, V. (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Berlin 2011*. Aachen : Shaker Verlag, 2011. ISBN 978-3-8440-0284-3, S. 123-128.

– Online verfügbar unter:

<http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-0284-3>

Sargent 2008

SARGENT, R. G.: Verification and validation of simulation models. In: MASON, S. J. (Hrsg.) ; HILL, R. R. (Hrsg.) ; MÖNCH, L. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ : IEEE, 2008. ISBN 978-1-4244-2708-6, S. 157-169.

– Online verfügbar unter: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1516744.1516780>

Schadschneider et al. 2009

SCHADSCHNEIDER, A.; KLINGSCH, W.; KLÜPFEL, H.; KRETZ, T.; ROGSCH, C.; SEYFRIED, A.: Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In: MEYERS, R. A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York, NY : Springer New York, 2009. ISBN 978-0-387-75888-6, S. 3142-3176.

– Online verfügbar unter:

http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-30440-3_187

Stadt Duisburg 2010

WIRTSCHAFTSKANZLEI HEUKING KÜHN LÜER WOJTEK: *Endbericht der Stadt Duisburg zu den tragischen Ereignissen rund um die Loveparade am 24.07.2010 in Duisburg*. Duisburg, Forschungsbericht, 2010.

– Online verfügbar unter:

https://www.duisburg.de/ratsinformationssystem/bi/vo0050.php?_kvonr=20056110&voelect=20049862

Thiel-Clemen und Klingenberg 2010

THIEL-CLEMEN, T. ; KLINGENBERG, A.: Kombination von zielorientiertem Verhalten und Emotionen in Individuen-orientierten Simulationen. In: WITTMANN, J. (Hrsg.) ; MARETIS, D. K. (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Osnabrück 2010*. Aachen : Shaker Verlag, 2010. ISBN 978-3-8322-9367-3, S. 71-80.

– Online verfügbar unter:

<http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8322-9367-3>

Thiel 2011a

THIEL, C.: *Eine Plattform für Fußgängersimulationen*. HAW Hamburg, Projektbericht, 2011.

Thiel 2011b

THIEL, C.: Realisierung eines Multiagentensystems zur Simulation von Fußgängerströmen. In: WITTMANN, J. (Hrsg.), WOHLGEMUTH, V. (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Berlin 2011*. Aachen : Shaker Verlag, 2011. ISBN 978-3-8440-0284-3, S. 129-138.

– Online verfügbar unter:

<http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-0284-3>

Thiel 2013

THIEL, C.: *Analyse von Partitionierungen und partieller Synchronisation in stark verteilten multiagentenbasierten Fußgängersimulationen*. HAW Hamburg, Masterarbeit, 2013.

– Online verfügbar unter:

http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2013/2059/pdf/MA_christian_thiel.pdf

Usher und Strawderman 2010

USHER, J. M.; STRAWDERMAN, L.: Simulating operational behaviors of pedestrian navigation. In: *Computers & Industrial Engineering* 59 (2010), Nr. 4, S. 736-747.

– Online verfügbar unter:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835210002214>

Weidmann 1993

WEIDMANN, U.: Transporttechnik der Fussgänger – Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung). In: *Schriftenreihe des IVT* (1993), Nr. 90, zweite, ergänzte Auflage.

– Online verfügbar unter: <http://www.ped-net.org/uploads/media/weidmann-1993.pdf>

Woggan 2011

WOGGAN, T.: *Validierung von Gruppensimulationen*. HAW Hamburg, Bachelorarbeit, 2011.

– Online verfügbar unter:

http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2011/1399/pdf/Bachelorarbeit_Torben_Woggan.pdf

Woggan 2014a

WOGGAN, T.: *Makroskopische Validierung von Fußgängersimulationen mit Hilfe von Geschwindigkeits-, Fluss- und Dichteinformationen*. HAW Hamburg, Projektbericht, 2014.

Woggan 2014b

WOGGAN, T.: *Entwicklung einer Software zur Validierung von Fußgängersimulationen*. HAW Hamburg, Projektbericht, 2014.

Wooldridge 2009

WOOLDRIDGE, M.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. 2. Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-51946-2.

Zeigler et al. 2000

ZEIGLER, B. P. ; PRAEHOFER, H. ; KIM, T. G.: *Theory of Modeling and Simulation : Integrating Discrete Event and Continous Complex Dynamic Systems*. 2. Aufl. San Diego, CA : Elsevier Science, 2000. – ISBN 0-12-778455-1

Zhou et al. 2010

ZHOU, S. ; CHEN, D.; CAI, W. ; LUO, L. ; LOW, M. Y. H. ; TIAN, F. ; TAY, V. S.-H. ; ONG, D. W. S. ; HAMILTON, B. D.: *Crowd Modeling and Simulation Technologies*. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 20 (2010), Nr. 4, S. 20:1-20:35.

– Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1145/1842722.1842725>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien von Kretz et al. 2006	43
Tabelle 2 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Fundamentaldiagramm	65
Tabelle 3 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zu den Engstellendiagrammen.....	70
Tabelle 4 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Einfluss der Anzahl der Agenten auf die Flussrate	72
Tabelle 5 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Ausweichverhalten der Agenten bei sich entgegengesetzt fortbewegenden Agenten in Gängen	74
Tabelle 6 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Agentenverhalten an Engstellen mit entgegengesetzten Flüssen	76
Tabelle 7 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Agentenverhalten bei Sackgassen	78
Tabelle 8 - Zusammenfassung der Versuchsszenarien zum Vergleich mit den SMDPC- Versuchen	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Die Beziehungen zwischen den für Modellierer von Bewegungsmodellen wichtigen Klassen.....	24
Abbildung 2 - Die Architektur der Wegfindungskomponente des "MARS LIFE"-Fußgängermodells.....	26
Abbildung 3 - Wegfindung der Agenten über den Wegpunkte-Graphen (Thiel 2013).....	27
Abbildung 4 - Die Architektur der Komponente für das Bewegungs- und Ausweichverhalten des "MARS LIFE"-Fußgängermodells (Magenta: Aufruf, Grün: Implementiert, Grau: Referenziert)	28
Abbildung 5 - Anpassung des Bewegungsvektors für den Fall, dass vor der Bewegung der Abstand auf beiden Achsen größer als der Mindestabstand war.....	30
Abbildung 6 - Anpassung des Bewegungsvektors für den Fall, dass vor der Bewegung der Abstand auf einer der Achsen kleiner als der Mindestabstand war	31
Abbildung 7 - Das Fundamentaldiagramm nach Weidmann 1993	40
Abbildung 8 - Das Engstellendiagramm nach Kretz et al. 2006	42
Abbildung 9 - Das Engstellendiagramm nach Hoogendoorn und Daamen 2005.....	44
Abbildung 10 - Videobilder von aufeinandertreffenden Fußgängerströmen in den SMDPC-Versuchen	46
Abbildung 11 - Grundriss der Versuchsumgebung der SMDPC-Versuche (Plaue et al. 2011).....	47
Abbildung 12 - Fußgängerspuren im bidirektionalen Fußgängerstrom (Schadschneider et al. 2008)	50
Abbildung 13 - Stillstand im bidirektionalen Fluss durch den "Freezing-by-Heating"-Effekt (Helbing et al. 2002).....	50
Abbildung 14 - Gegenläufige Personenströme an einer Engstelle (Helbing et al. 2002).....	51
Abbildung 15 - Links: "Arching" in einer Simulation (Helbing et al. 2002).....	52
Abbildung 16 - Kurzlebiger Kreisverkehr an einer Kreuzung mit Personenströmen aus allen vier Richtungen	53
Abbildung 17 - Fußgängerstreifen bei zwei sich kreuzenden Fußgängerströmen.....	54
Abbildung 18 - Ausschnitte aus dem komplexen Szenario, das mit dem Fußgängermodell	57
Abbildung 19 - Bestimmung der allgemeinen Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeit in x-Richtung und der Geschwindigkeit in y-Richtung nach dem Satz des Pythagoras	59
Abbildung 20 - Aufbau der Versuche zum Fundamentaldiagramm. Der grüne Bereich ist der Startbereich der Agenten (Quadrate), der gelbe Bereich ist der Messbereich und der weiße Bereich rechts ist ein Teil des Auslaufbereichs der Agenten. (Größenangaben in Meter)	64
Abbildung 21 - Aufbau des Versuchs mit einer 1 Meter breiten Engstelle. Die Agenten (Quadrate) befinden sich zu Beginn der Simulation im Startbereich (grün). Der gesamte	

linke Raum (grün und gelb) ist der Messbereich. Der weiße Bereich rechts ist ein Teil des Auslaufbereichs der Agenten. (Größenangaben in Meter)	69
Abbildung 22 - Aufbau des Versuchs mit einem 5 Meter breiten Gang und 50 Agenten (Quadrate), die in zwei Gruppen aufgeteilt sind. Die grünen Bereiche sind jeweils der Startbereich der einen Gruppe und der Zielbereich der anderen Gruppe. (Größenangaben in Meter)	73
Abbildung 23 - Aufbau des Versuchs zu entgegengesetzt laufenden Flüssen an einer Engstelle mit Breite von 1 Meter und 50 Agenten (Quadrate), die in zwei Gruppen aufgeteilt sind. Die grünen Bereiche sind jeweils der Startbereich der einen Gruppe und der Zielbereich der anderen Gruppe. (Größenangaben in Meter)	75
Abbildung 24 - Aufbau des Versuchs zum Verhalten der Agenten bei Sackgassen mit einem 5 Meter mal 5 Meter großen Raum. Das grüne Quadrat ist der 1 Quadratmeter große Startbereich für den Agenten.	77
Abbildung 25 - Aufbau des für die Auswertung relevanten Bereichs der SMDPC-Versuche. Der Messbereich (gelb) wird mit Hilfe von vorgegebenen Kontrollpunkten (CP) festgelegt. Der Großteil der Fußgänger läuft durch diesen Bereich.	79
Abbildung 26 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Fundamentaldiagramm mit 250 Agenten unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“	89
Abbildung 27 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“	90
Abbildung 28 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“	92
Abbildung 29 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“	94
Abbildung 30 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“	96
Abbildung 31 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und Einteilung in soziale Gruppen in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“	97
Abbildung 32 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells	99
Abbildung 33 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells	101
Abbildung 34 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“	103
Abbildung 35 - Fundamentaldiagramm für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“	104

Abbildung 36 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) mit einer Engstellenbreite von 160 cm unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“.....	106
Abbildung 37 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“.....	107
Abbildung 38 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“.....	109
Abbildung 39 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“.....	111
Abbildung 40 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“.....	112
Abbildung 41 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit und Einteilung in soziale Gruppen in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“.....	113
Abbildung 42 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells..	115
Abbildung 43 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells.....	116
Abbildung 44 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit identischer maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“.....	118
Abbildung 45 - Engstellendiagramm (Engstellenbreite – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“.....	119
Abbildung 46 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) mit 150 Agenten vor der Engstelle unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“.....	121
Abbildung 47 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“.....	122
Abbildung 48 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“.....	123
Abbildung 49 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells.....	124
Abbildung 50 - Engstellendiagramm (Agentenanzahl – Fluss) für Agenten mit unterschiedlicher maximaler Geschwindigkeit in „PedSim“.....	126

Abbildung 51 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“	127
Abbildung 52 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Aufzeichnung des SMDPC-Versuchs „GR90“ von Plaue et al. (2011)	128
Abbildung 53 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „EGOAPAgents“	130
Abbildung 54 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „WALK“ unter Nutzung der „ModularAgents“	132
Abbildung 55 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „MARS LIFE“ unter Nutzung des Fußgängermodells	134
Abbildung 56 - Verlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit und durchschnittlichen Dichte im Messbereich ab Start der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ in „PedSim“	136
Abbildung 57 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum bidirektionalen Fluss in einem 5 Meter breiten Gang unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“. Die roten Agenten bewegen sich von links nach rechts durch den Gang. Die grünen Agenten bewegen sich von rechts nach links durch den Gang.	138
Abbildung 58 - Leichte Spurenbildung in "WALK" mit den "EGOAPAgents" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die grünen Agenten bilden oben eine Fußgängerspür. Die roten Agenten bilden mittig und unten eine Fußgängerspür.	139
Abbildung 59 - Stillstand in "WALK" mit den "ModularAgents" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die Agenten halten Abstand voneinander.	140
Abbildung 60 - Stillstand in "MARS LIFE" bei 2,5 Meter Gangbreite. Die Agenten halten keinen Abstand voneinander.	141
Abbildung 61 - Deutliche Spurenbildung in "PedSim" bei 2,5 Meter Gangbreite	142
Abbildung 62 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs zum Aufeinandertreffen von entgegengesetzten Fußgängerströmen an einer Engstelle mit 1 Meter Breite unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“. Die roten Agenten wollen in den rechten Raum. Die grünen Agenten wollen in den linken Raum.	143
Abbildung 63 - Agenten werden durch die Engstelle geschoben in "WALK" mit den "EGOAPAgents"	144
Abbildung 64 - Agenten stehen vor der Engstelle und halten Abstand voneinander in "WALK" mit den "ModularAgents" bei 1 Meter Engstellenbreite	145

Abbildung 65 - Agenten stehen vor der Engstelle und halten keinen Abstand voneinander in "MARS LIFE" mit den Fußgängeragenten bei 1 Meter Engstellenbreite.....	146
Abbildung 66 - Deutliche Spurenbildung in "PedSim" bei 2 Meter Engstellenbreite	147
Abbildung 67 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des Versuchs mit einer 5 Meter langen und breiten Sackgasse unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“	148
Abbildung 68 - Agent findet keinen Weg aus der Sackgasse in "PedSim"	149
Abbildung 69 - Screenshot während der Ausführung der Simulation des SMDPC-Versuchs „GR90“ mit zwei Fußgängerströmen, die seitlich aufeinandertreffen, unter Verwendung des Fußgängermodells von „MARS LIFE“	152
Abbildung 70 - Stau im Messbereich in SMDPC-Versuch "BRGW" (Plaue et al. 2011).....	154
Abbildung 71 - Die grünen Agenten drängen die grauen Agenten zurück in ihren Gang....	155
Abbildung 72 - Stau und Stillstand in SMDPC-Versuch "BRGW" in "WALK" mit den "ModularAgents"	157
Abbildung 73 - Deutliche Spurenbildung und an Hindernissen festhängende Agenten	159

Versicherung über Selbstständigkeit

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

Hamburg, den _____