

Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D - Abt. Sicherheitstechnik



Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für
Brandschutz und Fußgängerverkehr

Master Thesis

Kalibrierung eines mikroskopischen Modells für
Personenströme zur Anwendung im Projekt Hermes

Name: Andreas Meunders, B.Sc.
Matrikelnummer:
Anschrift:
Studienrichtung: Brandschutz, Master of Science
Hochschullehrer: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Armin Seyfried
Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Holl
Ausgabe: 01.03.2011
Abgabe: 28.07.2011

*Essentially,
all models are wrong,
but some are useful.*

George E. P. Box

Erklärung gemäß § 12 Abs. 6 der Prüfungsordnung¹

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht.

Andreas Meunders

Wuppertal, den 28.07.2011

¹Prüfungsordnung für den Master Studiengang Brandschutz an der Bergischen Universität Wuppertal vom 1. September 2005.

Danksagung

Mein Dank gilt Professor Dr. Armin Seyfried, der mit einer interessanten Vorlesung mein Interesse für das Thema der Fußgängerdynamik erst geweckt hat. Gemeinsam mit meinem Betreuer Stefan Holl hat er außerdem mit bereichernden Diskussionen, konstruktiver Kritik und guten Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich mich bei Andrea Portz und Mohcine Chraibi bedanken, die als Entwickler des Modells immer eine Antwort auf meine zahlreichen Fragen gefunden haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Projekt Hermes	3
2.1	Fachliche Einordnung	3
2.2	Konzeption und Projektpartner	5
2.3	ESPRIT arena Düsseldorf	7
3	Grundlagen der Fußgängerdynamik	8
3.1	Begriffsdefinitionen	8
3.1.1	Dichte	8
3.1.2	Fluss	9
3.1.3	Spezifischer Fluss	10
3.1.4	Geschwindigkeit	10
3.1.5	Fundamentaldiagramm	12
3.2	Unterschiedliche Modellierungsansätze	13
3.2.1	Makroskopisch oder mikroskopisch	15
3.2.2	Diskret oder kontinuierlich	15
3.2.3	Deterministisch oder stochastisch	16
3.2.4	Regel- oder kraftbasiert	16
4	Generalized Centrifugal Force Model	17
4.1	Grundlegende Ideen	17
4.1.1	Social Force Model	17
4.1.2	Centrifugal Force Model	18
4.1.3	Generalized Centrifugal Force Model	19
4.2	Technische Umsetzung	20
4.2.1	Wirkende Kräfte	20

4.2.2	Geschwindigkeitsabhängiger Flächenbedarf	24
4.2.3	Entfernungsberechnung	25
4.2.4	Routingansatz	28
4.2.5	Laufzeitoptimierung	29
4.2.6	Parameter des Modells	31
5	Empirische und simulierte Daten im Vergleich	32
5.1	Versuchsaufbau und Methodik	32
5.1.1	Empirische Versuche	32
5.1.2	Durchführung der Simulationen	33
5.1.3	Programm zur Trajektorienanalyse	35
5.1.4	Ergebnisdarstellung im Fundamentaldiagramm	37
5.2	Erste Gegenüberstellung der Ergebnisse	39
5.2.1	Makroskopische Ebene	39
5.2.2	Mikroskopische Ebene	39
5.3	Kalibrierung durch Parameteranpassung	41
5.3.1	Geometrie der Ellipsen	42
5.3.2	Treibende Kraft	44
5.3.3	Abstoßende Kraft zwischen Fußgängern	45
5.3.4	Abstoßende Kraft von Wänden	49
5.4	Bewertung des Parametersatzes	51
6	Anordnung von Zwischenzielen	57
6.1	Qualitative Untersuchung als Ausgangspunkt	57
6.2	Versuchsaufbau und Methodik	58
6.3	Darstellung und Bewertung der Ergebnisse	60
7	Fazit	62

1 Einleitung

Großveranstaltungen mit einer Vielzahl an Besuchern bringen besondere Anforderungen an die Sicherheitskonzeption mit sich. Da diese Herausforderungen bereits lange bekannt sind und umfangreiches Erfahrungswissen vorliegt, konnte ein hohes Sicherheitsniveau erreicht werden, das die verbleibenden Risiken marginal erscheinen lässt. Dass in dieser Hinsicht allerdings auch in einem fortschrittlichen Land wie Deutschland nach wie vor Entwicklungsbedarf besteht, wurde durch das Unglück im Rahmen der Loveparade 2010 auf tragische Weise bestätigt.

Bei der Planung solcher Massenveranstaltungen muss der Fokus darauf gerichtet werden, den Besuchern jederzeit ausreichend Fluchtwege zur Verfügung zu stellen, die eine Evakuierung des Bauwerks innerhalb einer unkritischen Zeitspanne erlauben. Wie kann man jedoch mit einer Situation umgehen, in der sich die angenommenen Rahmenbedingungen während der Veranstaltung ändern? Wie lässt sich beispielsweise die Sicherheit der Besucher garantieren, wenn Fluchtwege aufgrund eines Schadenereignisses ausfallen?

Eine Antwort auf diese Frage wird im Projekt Hermes gesucht, in dem ein Evakuierungsassistent für Großveranstaltungen entwickelt wird. Dieses System soll auf Grundlage der aktuellen (Gefahren-)Situation die optimale Nutzung der verbleibenden Wege berechnen und zusätzliche Gefahren aufgrund von Stauungen erkennen. Eine zentrale Bedeutung kommt dabei den implementierten Personenstrommodellen zu, die die reale Bewegung der Veranstaltungsbesucher möglichst genau vorhersagen müssen. In der folgenden Arbeit geht es deswegen um die Kalibrierung eines Modells, das durch Veränderungen seiner Parameter passend zu experimentellen Daten einzustellen ist.

Die Arbeit beginnt mit einer kurzen Beschreibung des Projekts Hermes, um die Anforderungen an das Modell zu verdeutlichen. Im nächsten Kapitel werden einige Grundlagen der Fußgängerdynamik erläutert und Begriffe definiert, die für die spätere Untersuchung benötigt werden. In Kapitel 4 wird das untersuchte Modell erklärt, was für das Verständnis der Parametervariation in Kapitel 5 erforderlich ist. Das letzte Kapitel widmet

1. Einleitung

sich einer quantitativen Analyse bezüglich der Anordnung von Zwischenzielen, die für komplexere Geometrien erforderlich sind.

2 Das Projekt Hermes

Das Projekt Hermes hat die Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen zum Ziel. Es wird seit November 2008 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der deutschen Hightech-Strategie gefördert und im Verbund mit zahlreichen Projektpartnern durchgeführt [14]. Die Erprobung in der Praxis soll im Oktober 2011 abgeschlossen werden.

Im Folgenden wird zunächst eine kurze Einordnung des Projekts in Bezug auf den bisherigen Forschungsstand des Fachgebietes vorgenommen.

2.1 Fachliche Einordnung

Bereits seit Langem stellt sich die Frage, wie man Gebäude konstruieren sollte, damit sie sich im Notfall gefahrlos evakuieren lassen. Eine mögliche Antwort darauf ist die Vorgabe maximal zulässiger Rettungsweglängen oder erforderlicher Mindestbreiten in Abhängigkeit von der Personenzahl, wie sie beispielsweise in baurechtlichen Bestimmungen festgelegt sind [23, 24]. Diese präskriptive Herangehensweise ist zwar einfach nachzuvollziehen, kann aber möglicherweise bei komplexen Bauvorhaben oder Gebäuden mit multifunktionaler Nutzung nicht umgesetzt werden [15]. Der Nachweis der geforderten Sicherheit kann in diesen Fällen nur durch ingenieurmäßige Verfahren erbracht werden.

Zu diesem Zweck wurden diverse Modelle entwickelt, mit denen die auf komplexen Wechselwirkungen beruhende Dynamik eines Personenstroms reproduziert werden soll. Während die ersten Modelle von Hand gelöst wurden wie beispielsweise im Verfahren von Predtechenskii und Milinskii aus dem Jahr 1971 [32], finden mit fortschreitender Entwicklung der Informationstechnik zunehmend computerbasierte Modelle Anwendung. Die Vielzahl der Modelle lässt sich anhand unterschiedlicher Charakteristika systematisieren, in Abschnitt 3.2 werden einige grundsätzliche Merkmale erläutert.

Die fortschreitende Modellentwicklung macht jedoch tatsächliche Evakuierungsversuche

nicht überflüssig, da diese zur Validierung erforderlich sind. Ebenso wenig ließen sich Personenstrommodelle durch tatsächliche Evakuierungsübungen ersetzen:

- Der logistische und finanzielle Aufwand bei großen Gebäuden wäre enorm.
- In der Planungsphase eines Gebäudes kann kein Räumungsversuch durchgeführt werden.
- Die Gefährdung von Probanden bei hohen Dichten lässt sich nicht ausschließen.

Zudem hilft die Modellentwicklung, die zu Grunde liegenden Prinzipien der Fußgängerdynamik besser zu verstehen und ist auch in dieser Hinsicht unverzichtbar. Denn trotz der Vielzahl der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Thema besteht selbst über einige grundlegende Zusammenhänge nach wie vor Unklarheit, so beispielsweise über den funktionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit/Fluss eines Personenstroms, das so genannte Fundamentaldiagramm.

Eine weitere kontrovers diskutierte Frage ist, unter welchen Bedingungen sich die Verbreiterung einer Engstelle positiv auf ihre Kapazität² auswirkt. Während einerseits argumentiert wird, dass sich nur bei einer Verbreiterung um Schulterbreite eine weitere Gehspur ausbilden kann [19, 18], zeigen aktuelle Untersuchungen, dass jeder zusätzliche Zentimeter zu einer Erhöhung des Flusses führt [40]. Dennoch wird das Konzept der schrittweisen Erhöhung noch heute in der deutschen Versammlungsstättenverordnung angewandt [24].

Diese Beispiele verdeutlichen bereits die Schwierigkeit, ein zuverlässiges, in unterschiedlichen Szenarien funktionierendes Modell zu entwickeln. So überrascht es auch nicht, dass bei einer vergleichenden Untersuchung mehrerer Modelle Abweichungen der Evakuierungszeiten von 100 Prozent³ und mehr festgestellt wurden [33]. Zusätzlich zur Entwicklung eines zuverlässigen Modells besteht die Herausforderung im Projekt Hermes darin, einige 10.000 Personen in so kurzer Rechenzeit zu simulieren, dass die Ergebnisse schneller als in Echtzeit zur Verfügung stehen [13]. Um stets die aktuelle Besucherverteilung im Gebäude ermitteln zu können, ist weiterhin die Technik zur automatischen

²Unter Kapazität versteht man den maximal möglichen Personenfluss durch eine Engstelle pro Zeiteinheit.

³Es wurde die Evakuierungszeit eines Raumes mit den Programmen Pedgo, Aseri, Exodus, Simulex sowie dem Handrechenverfahren nach Predtechenskii und Milinskii ermittelt.

Personenerkennung und -zählung so zu verbessern, dass eine ausreichende Genauigkeit in Bezug auf das Projektziel erreicht wird. Wie die Zielstellung des Forschungsprojekts genau definiert ist, soll im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.2 Konzeption und Projektpartner

Die Zielsetzung des Projekts Hermes wird durch das Jülich Supercomputing Center wie folgt beschrieben:

„Dieser Assistent unterstützt die Entscheidungsträger (Betreiber, Sicherheitsdienst, Polizei und Feuerwehr) durch frühzeitige Stauprognosen, die Lage richtig einzuschätzen und somit das Sicherheitspersonal und die Rettungskräfte optimal einzusetzen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, schon im Vorfeld der Veranstaltungen mögliche Gefahrensituationen zu analysieren. Durch das Aufstellen angepasster Notfallpläne oder die gezielte Schulung der Sicherheitskräfte kann diesen Situationen begegnet werden.“ [9]

Dieses Ziel soll durch das in Abbildung 2.1 dargestellte Konzept erreicht werden.

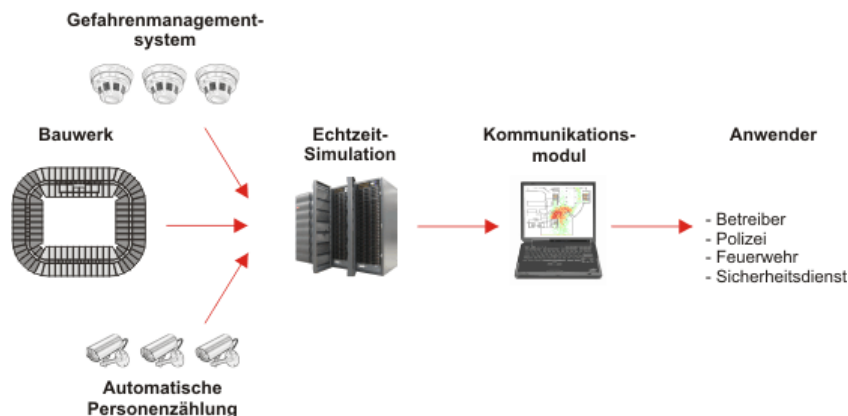


Abbildung 2.1: Prinzipskizze Hermes [9]

Prinzipiell geht es darum, den Grundriss des Gebäudes mit Echtzeitdaten über die Personenverteilung und Meldungen des Gefahren- und Gebäudemanagements zu verknüpfen. Die Zusammenführung dieser Daten erfolgt in einem Personenstrommodell⁴, das mithilfe

⁴Im Projekt Hermes werden neben dem in dieser Arbeit untersuchten mikroskopischen Modell (GCFM) weitere Modelle entwickelt und getestet.

eines Parallelcomputers eine Prognose für die nächsten 15 Minuten erstellt. Es ist also erstmals möglich, Simulationsergebnisse zu erhalten, die auf der aktuellen Gefahrenlage beruhen [15].

Die Visualisierung der im Minutentakt aktualisierten Ergebnisse erfolgt über ein Kommunikationsmodul, sodass Feuerwehr, Polizei und Sicherheitsdienste stets über die voraussichtliche Entwicklung informiert sind. Der für die Steuerung des Systems zuständige Operator hat die Möglichkeit, über Handheld-PCs direkt mit den Einsatzkräften vor Ort zu kommunizieren, sodass die Umsetzung erforderlicher Maßnahmen ohne Zeitverlust möglich ist.

Die Bandbreite der technischen Herausforderungen zur Umsetzung des Projekts sowie die anwendungsorientierte Erprobung des Evakuierungsassistenten erfordern die Zusammenarbeit zahlreicher Projektpartner. Beteiligt sind Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, Forschungseinrichtungen sowie privatwirtschaftliche Unternehmen [14]:

- Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich Supercomputing Centre (JSC)
- Universität Wuppertal, Abteilung Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz
- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Geographisches Institut
- Universität zu Köln, Institut für Theoretische Physik
- Imtech Deutschland GmbH & Co. KG
- Multifunktionsarena Immobiliengesellschaft mbH & Co. KG (ESPRIT arena)
- PTV Planung Transport Verkehr AG
- TraffGO HT GmbH
- Vitracom AG
- Feuerwehr Düsseldorf
- Polizeipräsidium Düsseldorf
- Landesamt für Zentrale Polizeiliche Dienste NRW
- Special Security Service SSSD GmbH

2.3 ESPRIT arena Düsseldorf

Die ESPRIT arena ist eine Multifunktionsarena im Norden Düsseldorfs. Sie kann zur Austragung von Fußballspielen ebenso genutzt werden wie für Konzerte, Tagungen oder Ausstellungen. Bei einer Nutzung als Fußballstadion stehen 54.500 Steh- und Sitzplätze zur Verfügung; wird der Innenraum bei Konzerten ebenfalls genutzt, erhöht sich die Gesamtkapazität auf 66.500 Personen [8].

Die Zuschauerränge der Arena teilen sich in einen Unterrang mit einer Steigung von 27° und einen Oberrang mit einer Steigung von 33° [43]. Bei der Eröffnung im Jahr 2004 waren diese ausschließlich mit Sitzplätzen ausgestattet. Mittlerweile wurde auf Initiative der Fangruppen jedoch ein Teil der Sitzplätze so umgerüstet, dass sich diese in Stehplätze verwandeln lassen.

Je nach Wetter und Veranstaltung lässt sich das Dach in etwa 30 Minuten öffnen oder schließen. In Verbindung mit der leistungsfähigen Heizungsanlage kann so auch im Winter eine Temperatur von 15°C im Innenraum gewährleistet werden [7]. Die Durchführung von Großveranstaltungen ist also ganzjährig möglich.

3 Grundlagen der Fußgängerdynamik

Zum Verständnis des Modells ist es erforderlich, sich mit den Grundlagen der Fußgängerdynamik vertraut zu machen. Zu diesem Zweck sollen zunächst Grundbegriffe definiert und anschließend die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale unterschiedlicher Modelle erläutert werden.

3.1 Begriffsdefinitionen

In Abhängigkeit von der Messmethodik können sich die Definitionen der Grundbegriffe in der Fußgängerdynamik teilweise unterscheiden. Die folgenden Definitionen entsprechen denen, die später im Zuge der Kalibrierung angewendet werden.

3.1.1 Dichte

Die Personendichte setzt die Anzahl der Personen ins Verhältnis zur Grundfläche; in der Regel bezieht man sich dabei auf einen Quadratmeter.

$$\rho = \frac{N}{A} \left[\frac{1}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

N = Anzahl der Personen

A = Grundfläche

In der vorliegenden Arbeit werden zur Berechnung der Dichte eine Grundfläche definiert und die Zahl der dort befindlichen Personen ermittelt. Eine Person kann dabei nur als innerhalb oder außerhalb betrachtet werden und nicht teilweise in die Messung eingehen. Bei einer Dichtemessung über einen Zeitraum t kann dies bei kleinen Messflächen zu Sprüngen des Graphen führen. Diese Sprünge sind umso größer, je kleiner die Messfläche

ist. Andererseits kann eine zu große Messfläche dazu führen, dass tatsächlich vorhandene Schwankungen schlechter zu erkennen sind.

Eine personenspezifische Messung der Dichte ist mithilfe von Voronoi-Zellen möglich. Bei diesem Verfahren wird jedem Fußgänger der Teil der Messfläche zugewiesen, der ihm näher ist als jedem anderen. Bei dieser Methode kann eine Person (genauer: ein Teil ihrer Grundfläche) auch partiell in die Messung eingehen. Wie an obiger Beschreibung zu erkennen ist, lässt sich letztere Methode nur mit deutlich erhöhtem Programmieraufwand realisieren. In Anbetracht der verfügbaren Zeit für diese Arbeit wurde somit auf das klassische Verfahren zur Berechnung der Dichte zurückgegriffen.

Der Kehrwert der Dichte gibt den individuellen Platzbedarf einer einzelnen Person an. Wie oben beschrieben, handelt es sich hierbei jedoch um einen Durchschnittswert für mehrere Personen.

3.1.2 Fluss

Der Personenfluss J gibt Auskunft über die Anzahl der Personen, die eine definierte Messstelle je Zeiteinheit überschreiten.

$$J = \frac{N}{\Delta t} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (3.2)$$

In Anlehnung an die Strömungsdynamik lässt sich der Fluss auch als Produkt aus der durchschnittlichen Dichte ρ , der durchschnittlichen Geschwindigkeit v und der Durchgangsbreite b berechnen [35]:

$$J = \rho \cdot v \cdot b \left[\frac{1}{s} \right] \quad (3.3)$$

Da es sich bei den Überschreitungen der definierten Messlinie lediglich um momentane Ereignisse handelt, ist es notwendig, ein Bezugsintervall zu wählen, um jedem Zeitpunkt einen Fluss zuordnen zu können. In dieser Arbeit wurde ein Bezugsintervall von 10 Sekunden gewählt, um einerseits große Sprünge im Graphen zu vermeiden und andererseits tatsächlich vorhandene Schwankungen erkennen zu können.

Grafisch lässt sich der Fluss als Ableitung der $N(t)$ -Kurve interpretieren, die die Zahl der Personendurchgänge über die Zeit aufsummiert. Je steiler diese ansteigt, desto größer ist der Fluss.

3.1.3 Spezifischer Fluss

Um unterschiedlich breite Engstellen oder Korridore miteinander vergleichen zu können, ist es erforderlich, den in Gleichung 3.2 definierten Fluss auf die Durchgangsbreite zu beziehen. Dieser spezifische Fluss J_s wird somit wie folgt definiert:

$$J_s = \frac{J}{b} \left[\frac{1}{m \cdot s} \right] \quad (3.4)$$

Ebenso lässt sich der spezifische Fluss auch als Produkt von Dichte und Geschwindigkeit darstellen:

$$J_s = \rho \cdot v \left[\frac{1}{m \cdot s} \right] \quad (3.5)$$

Nimmt man an, dass der spezifische Fluss für unterschiedliche Durchgangsbreiten identisch ist, so ergibt sich in Verbindung mit Gleichung 3.4 die Erkenntnis, dass mit jeder Verbreiterung des Ausgangs der Gesamtfluss steigt.

3.1.4 Geschwindigkeit

Ebenso wie der Fluss ist auch die Geschwindigkeit von der Dichte abhängig. Die Geschwindigkeit wird als die zurückgelegte Wegstrecke pro Zeiteinheit definiert.

$$v = \frac{s}{t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.6)$$

In der vorliegenden Arbeit werden zur Ermittlung der Gehgeschwindigkeit eines Fußgängers gewisse Vereinfachungen vorgenommen:

3. Grundlagen der Fußgängerdynamik

- Es wird nicht die tatsächlich zurückgelegte Strecke eines Fußgängers gemessen, sondern von der Wegstrecke nur die Komponente in Hauptbewegungsrichtung berücksichtigt.
- Die Geschwindigkeit wird nicht individuell für jeden Fußgänger ermittelt, stattdessen findet eine gemittelte Betrachtung der benötigten Zeit statt. Hierfür wird kontinuierlich die Zeitdifferenz gemessen, bis dieselbe Anzahl an Personen zwei Messstellen mit dem Abstand s passiert hat.

Die Geschwindigkeit wird aufgrund der erstgenannten Vereinfachung etwas zu niedrig gemessen, da sich die in die Berechnung einfließende Streckenlänge verringert. Aber auch der zweite Punkt führt dazu, dass die gemessene Geschwindigkeit niedriger als die tatsächliche ist. Der Grund besteht darin, dass sich Fußgänger mit niedriger Geschwindigkeit länger im Messbereich aufhalten und den Durchschnittswert somit stärker beeinflussen. Es wird das harmonische Mittel anstelle des arithmetischen Mittels der Geschwindigkeiten gebildet. An einem kurzen Beispiel lässt sich dies gut veranschaulichen:

Nimmt man an, dass drei Fußgänger gleichzeitig starten, um eine Strecke von 1 m zurückzulegen, lässt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit auf zwei Wegen ermitteln. In dem Beispiel bewegen sich zwei Fußgänger mit $1\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und ein Fußgänger mit $0,5\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Fußgänger	Geschwindigkeit	Benötigte Zeit
A	$0,5\frac{\text{m}}{\text{s}}$	2 s
B	$1\frac{\text{m}}{\text{s}}$	1 s
C	$1\frac{\text{m}}{\text{s}}$	1 s
Durchschnittsgeschwindigkeit	$\bar{v} = \left(\frac{1+1+0,5}{3}\right)\frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,8\bar{3}\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\bar{v} = \frac{1\text{ m}}{\left(\frac{2+1+1}{3}\right)\text{s}} = 0,75\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 3.1: Beispielhafte Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit.

In Bezug auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist die zweite Methode zielführend, da sowohl die empirischen Versuche als auch die Simulationsergebnisse mit diesem Verfahren ausgewertet werden. Für die Kalibrierung des Modells ist diese Methode ausreichend genau.

3.1.5 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm ist eine wesentliche Relation der Fußgängerdynamik. Es stellt den Verlauf des spezifischen Flusses beziehungsweise der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Personendichte dar. Der spezifische Fluss steigt mit zunehmender Dichte zunächst an, da die Geschwindigkeit durch die zusätzlichen Personen nur leicht reduziert wird. Dieser Teil des Fundamentaldiagramms – Freiflussast genannt – erreicht dann einen maximalen Wert $J_{s,max}$ und geht in den gestauten Ast über. In diesem Bereich hoher Dichte sind die Wechselwirkungen zwischen den Fußgängern so stark, dass der Fluss mit steigender Dichte abnimmt.

Der genaue Verlauf des Fundamentaldiagramms ist trotz der grundlegenden Bedeutung umstritten und die bisher erhobenen Daten weichen teilweise stark voneinander ab. In Abbildung 3.1 werden die unterschiedlichen Funktionsverläufe auf Grundlage anerkannter Planungsrichtlinien und Erhebungen dargestellt.

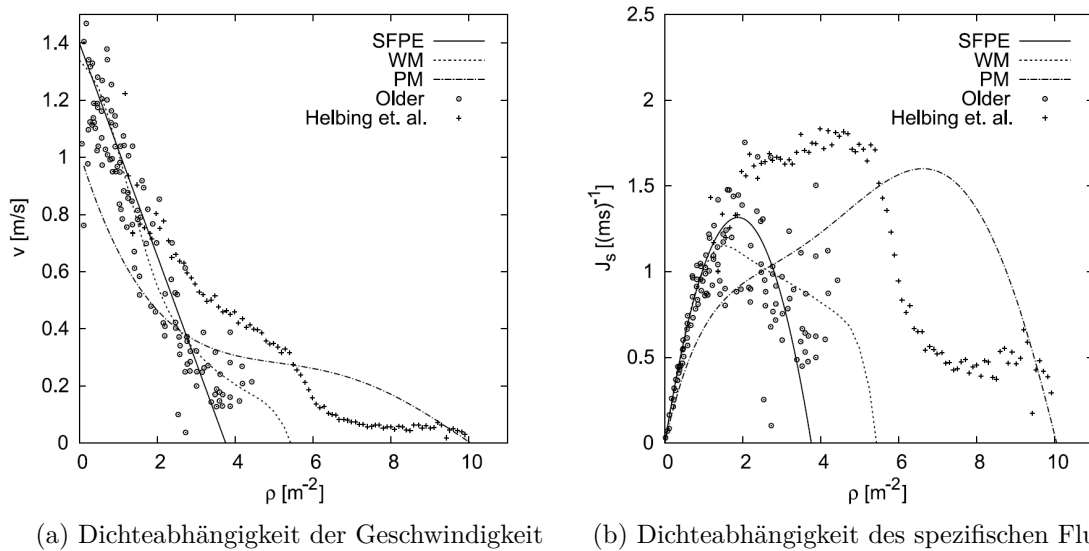


Abbildung 3.1: Fundamentaldiagramme für die Fußgängerbewegung in der Ebene [35] Nach SFPE Handbook (SFPE) [28], Weidmann (WM) [44], Predtechenskii und Milinskii (PM) [31], Older [30] und Helbing [11]

Die teilweise beträchtlichen Abweichungen betreffen den maximalen Fluss und die zugehörige Dichte genauso wie die Stoppdichte, bei der der Fluss vollständig zum Erliegen

kommt. Die möglichen Gründe werden in der Fachliteratur teilweise kontrovers diskutiert [1, 2, 29, 38, 44] und sollen hier nur kurz vorgestellt werden.

Der Versuchsaufbau kann großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Handelt es sich um ein offenes oder geschlossenes System mit uni- oder bidirektionalem Fluss? Welche Geometrie liegt den Versuchen zu Grunde und mit welchen Hilfsmitteln wurde diese Geometrie nachgebildet?

Die kulturelle Herkunft der Probanden bestimmt die Größe der individuellen Distanzen und damit die Sensibilität des Personenstroms auf Erhöhung der Dichte [3]. Darüber hinaus können sich Probandengruppen in ihren Körpermaßen, ihrer Fitness und Motivation unterscheiden. Weitere Abweichungen können sich aus der gewählten Messmethodik ergeben, wie in Tabelle 3.1 beispielhaft erläutert wurde und in der Fachliteratur nachzulesen ist [36].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Differenzen der Fundamentaldiagramme vielfältige Ursachen haben können. Unbefriedigend ist jedoch, wie eklatant diese Unterschiede sind. Es besteht somit weiterhin der Bedarf empirischer Untersuchungen, jedoch stets unter sorgfältiger Berücksichtigung und Dokumentation der experimentellen Rahmenbedingungen.

3.2 Unterschiedliche Modellierungsansätze

Um unterschiedliche Modellierungsansätze einordnen zu können, ist es sinnvoll, sich zunächst eine von Hoogendoorn [16] eingeführte Definition vor Augen zu halten, die im Folgenden kurz zusammengefasst wird. Demnach findet die Routenwahl eines Fußgängers auf drei Ebenen statt.

Auf der *strategischen Ebene* wählt der Fußgänger aus mehreren Alternativen eine Route aus, die ihn aus seiner Sicht optimal zum Ziel bringt. Der Routenverlauf wird dabei anhand grober Eckpunkte geplant, indem beispielsweise festgelegt wird, welcher Ausgang oder welcher Treppenraum genutzt werden soll. Da dies gleich zu Anfang passiert, können aktuelle Begebenheiten auf dem Weg nicht berücksichtigt werden und die Entscheidung beruht auf der Erfahrung des Fußgängers.

Entscheidungen auf der *taktischen Ebene* berücksichtigen einen deutlich kürzeren Zeithorizont und werden auf Grundlage der aktuellen Wahrnehmung getroffen. Hierzu gehört beispielsweise, an welcher Seite ein Hindernis passiert wird oder an welchem Ausgang sich die kürzere Warteschlange gebildet hat. Zur Entscheidungsfindung werden neben subjektiven Faktoren in erster Linie makroskopische Größen wie Geschwindigkeit, Dichte oder Fluss herangezogen.

Die *operative Ebene* umfasst vor allem intuitive Bewegungen, die aufgrund der Interaktion zwischen Fußgängern erforderlich werden. Dies kann beispielsweise die Reaktion auf entgegenkommende Fußgänger sein oder die Entscheidung, ob und wie langsamere Fußgänger überholt werden. Operative Entscheidungen werden also kurzfristig getroffen und vor allem durch mikroskopische Aspekte beeinflusst.

Die meisten Personenstrommodelle sind primär auf die operative Routenwahl ausgerichtet. Dennoch werden teilweise auch Elemente der taktischen und strategischen Ebene mit einbezogen; diese sind in Abschnitt 4.2.4 näher erläutert.

Außer den Entscheidungsebenen lassen sich Modelle auch nach weiteren Merkmalen klassifizieren. Die folgende Aufstellung erfolgt in Anlehnung an [35] und soll dazu dienen, das untersuchte Modell⁵ in den Kontext anderer Modellierungsansätze einordnen zu können.

Als ein übergeordnetes Kriterium kann man die Realitätstreue des Modells (*high or low fidelity*) bezeichnen, mit der die offensichtlich erkennbare Nähe zur Realität beschrieben wird. Hierzu gehört unter anderem der Aspekt, inwieweit sich die Agenten intelligent verhalten, indem sie sich auf veränderte Rahmenbedingungen einstellen oder in identischen Situationen unterschiedliche Entscheidungen treffen. Diese etwas vage Klassifikation basiert also auf mehreren der folgenden Merkmale. Es ist allerdings zu beachten, dass sehr realistisch anmutende Ergebnisse nicht zwangsläufig die größte Übereinstimmung mit der Realität aufweisen.

⁵Dieses wird *generalized centrifugal force model (GCFM)* genannt.

3.2.1 Makroskopisch oder mikroskopisch

In makroskopischen Modellen wird der Personenstrom als Gesamtheit betrachtet und der Systemzustand anhand der Durchschnittswerte von Dichte und Geschwindigkeit charakterisiert. Eine Betrachtung auf der Ebene des einzelnen Fußgängers erfolgt nicht. Hierzu zählen Modelle mit Anlehnung an die Strömungsdynamik [20] oder auch Handrechenverfahren, wie sie beispielsweise von Predtechenskii und Milinskii [32] entwickelt wurden. Aufgrund der makroskopischen Betrachtungsweise bleibt die Zahl der erforderlichen Rechnungen vergleichsweise überschaubar, sodass meist eine Lösung von Hand möglich ist.

Dies ist bei mikroskopischen Modellen nicht der Fall, da zwischen einzelnen Personen unterschieden wird und die Zahl der Wechselwirkungen quadratisch zur Personenzahl wächst. Die Gehgeschwindigkeit und die Wahl der Richtung ergeben sich für die einzelne Person individuell aus den jeweiligen Rahmenbedingungen einerseits und den individuellen „Charaktereigenschaften“ andererseits. Rahmenbedingungen können beispielsweise die aktuelle Dichte oder die relative Position zu anderen Fußgängern oder Hindernissen sein. Die Charaktereigenschaften können sich zwischen den Fußgängern einer Gruppe unterscheiden und umfassen beispielsweise die freie Gehgeschwindigkeit oder die Ortskenntnis. Die Berechnung dieser Modelle kann nur numerisch erfolgen. Obwohl der mikroskopische Ansatz aufgrund der höheren Auflösung genauere und bessere Ergebnisse zu liefern scheint, wird die Realität nicht automatisch besser reproduziert.

3.2.2 Diskret oder kontinuierlich

Die wesentlichen Variablen zur Beschreibung eines System sind Raum, Zeit und die Zustandsvariablen. Diese können jeweils sowohl diskret als auch kontinuierlich abgebildet werden, also entweder nur einzelne definierte oder unendlich viele verschiedene Werte annehmen. Als Beispiel sind hier zelluläre Automaten zu nennen, bei denen sämtliche Zustandsvariablen diskret sind, wohingegen bei hydrodynamischen Modellen alle Variablen mit kontinuierlichen Werten in das Modell einfließen. Prinzipiell sind jedoch sämtliche Kombinationen zwischen diskreten und kontinuierlichen Variablen möglich. Die Vortei-

le von diskreten Variablen bestehen in der Schnelligkeit der Berechnung, wohingegen raumkontinuierliche Modelle den Vorteil einer hohen räumlichen Auflösung bieten.

3.2.3 Deterministisch oder stochastisch

Ein weiteres Kriterium zur Klassifikation von Modellen ist der Bestimmtheitsgrad. Während die Agenten in deterministischen Modellen in derselben Situation immer identisch reagieren, gibt es in stochastischen Modellen nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Bewegung. Auf diese Weise lässt sich auch in recht einfachen Modellen komplexes Verhalten abbilden.

3.2.4 Regel- oder kraftbasiert

Die Agenten in regelbasierten Modellen nehmen ihre Umgebung wahr und wählen Weg und Geschwindigkeit auf Grundlage von vorgegebenen Regeln. Sie handeln also gewissermaßen aufgrund von intrinsischer Motivation [35]. In kraftbasierten Modellen hingegen wirken äußere Kräfte auf die Agenten, beispielsweise abstoßende Kräfte von anderen Fußgängern und treibende Kräfte in Richtung des Ausgangs. Diese überlagern sich zu einer resultierenden Kraft, die gleichsam die extrinsische Motivation darstellt.

4 Generalized Centrifugal Force Model

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Modell handelt es sich gemäß den in Abschnitt 3.2 eingeführten Kriterien um ein mikroskopisches, kraftbasiertes, deterministisches Modell, das unter Verwendung kontinuierlicher Größen Ergebnisse mit großer Realitätstreue erzeugt [5].

4.1 Grundlegende Ideen

Das *generalized centrifugal force model* (GCFM) wurde nicht von Grund auf neu entwickelt, sondern konnte auf bereits entwickelten Modellen aufbauen. In den folgenden Abschnitten wird zunächst das *social force model* (SFM) und anschließend das *centrifugal force model* (CFM) erläutert.

4.1.1 Social Force Model

Lewin hat bereits 1951 ein Modell entwickelt, demzufolge das menschliche Verhalten auf sozialen Kräften bzw. einem sozialen Feld beruht [25]. Auf dieser Grundlage wurde von Helbing und Molnár das *social force model* (SFM) entwickelt, dessen zentrale Idee darin besteht, unterschiedliche Handlungsmotivationen der Agenten als soziale Kräfte zu interpretieren [12]. Diese gliedern sich auf in eine treibende Kraft in Richtung des nächsten (Zwischen-)Ziels, in abstoßende Kräfte von anderen Fußgängern oder Hindernissen sowie in anziehende Kräfte, die ein besonderes Interesse an bestimmten Personen oder Dingen (z. B. Schaufenstern) abbilden. Diese sozialen Kräfte, die später noch eingehender erläutert werden, basieren also immer auf der individuellen Wahrnehmung der Situation durch den Fußgänger [41]. Sie stellen keine mechanischen Kräfte dar, wie sie bei hohen Personendichten auftreten können.

Dennoch erleichtert ein Vergleich mit mechanischen Kräften das Verständnis. Denn analog zum zweiten Newton'schen Gesetz wird unterstellt, dass die Bewegungsänderung ei-

ner Masse proportional zur Einwirkung einer bewegenden Kraft ist und in eine Richtung erfolgt, die der Wirkrichtung dieser Kraft entspricht. Wirken auf einen Körper mehrere Kräfte gleichzeitig, so überlagern sich diese zu einer resultierenden Kraft.

Die abstoßenden Kräfte zwischen den Agenten sind entfernungsabhängig, wobei die Linien mit gleichem Kraftpotenzial die Form einer Ellipse haben, da der Platzbedarf für die Schrittbewegung berücksichtigt wird [12].

4.1.2 Centrifugal Force Model

Das *centrifugal force model* (CFM) wurde von Yu im Jahr 2005 auf Grundlage des SFM veröffentlicht [45]. Von diesem unterscheidet es sich beispielsweise in der exakten Formulierung der abstoßenden Kraft, welche die Relativgeschwindigkeit der beiden Agenten berücksichtigt. Yu nimmt an, dass ein vorausgehender schnellerer Agent keine abstoßende Wirkung auf den nachfolgenden langsameren Agenten hat. Die Agenten werden kreisförmig mit dem festen Radius $0,2m$ dargestellt, die Entfernung zwischen zwei Kreismittelpunkten bestimmt die Stärke der abstoßenden Kraft.

Im Rahmen der Modellentwicklung wurde der Schwerpunkt auf qualitative Aspekte bei hohen Dichten gelegt, sogar panikartiges Verhalten soll reproduziert werden können [45]. Zur Vermeidung von Überlappungen, die insbesondere bei hohen Dichten vorkommen können, wird eine *collision detection technique* (CDT) eingesetzt. Diese Technik überprüft kontinuierlich, ob sich Zusammenstöße ereignen und verhindert diese, indem der Agent in definierten Winkeln ausweicht oder stehen bleibt, wenn eine Ausweichbewegung unmöglich ist oder ihn von seinem Ziel entfernen würde.

Ein interessantes Ergebnis der Modellierungen ist, dass die Gefahr der Bogenbildung an Ausgängen ab einer Ausgangsbreite von etwa dem fünffachen Personendurchmesser (hier $2m$) stark abnimmt [45]. Es ist allerdings zu beachten, dass dieser Schluss auf Grundlage der Simulationen gezogen wurde. In experimentellen Untersuchungen konnte bereits ab einer Ausgangsbreite von $1,6m$ keine Bogenbildung mehr beobachtet werden [27].

4.1.3 Generalized Centrifugal Force Model

Das GCFM bezieht Ideen aus beiden oben genannten Modellen mit ein. Da sich die vorliegende Arbeit mit diesem Modell beschäftigt, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit auch nur für dieses Modell detaillierte Angaben zu den physikalisch-technischen Hintergründen gegeben. Ein wichtiger Unterschied zwischen GCFM und SFM besteht darin, dass hier auf eine so genannte *collision detection technique* verzichtet werden kann, ohne dass das Modell an Leistungsfähigkeit verliert [4].

Die treibende Kraft $\overrightarrow{F_i^{drv}}$ spiegelt das Bestreben des Agenten wider, den Ausgang oder das nächste Zwischenziel zu erreichen. Die Abstoßungskraft $\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$ zwischen den Fußgängern untereinander kommt dadurch zu Stande, dass die Fußgänger versuchen, sich ausreichend Raum für ihre Schrittbewegungen zu erhalten und den Kontakt mit anderen Fußgängern zu vermeiden. Neben den praktischen Aspekten spielt hier also auch die Psychologie eine Rolle, da die Fußgänger versuchen, die individuellen Distanzzonen zu wahren.

Durch Einführung eines Faktors wird der Blickwinkel der Fußgänger berücksichtigt, so dass diese nur auf Fußgänger innerhalb eines Winkels von 180° reagieren. Hier wird deutlich, dass es sich bei der eingangs geschilderten Analogie zu mechanischen Kräften tatsächlich nur um eine begrenzt gültige Analogie handelt, denn das dritte Newton'sche Gesetz (Actio = Reactio) gilt nicht. So entfaltet ein vorausgehender Agent zwar eine abstoßende Kraftwirkung auf den nachfolgenden Agenten, dieser jedoch wird von dem ersten Agenten aufgrund des nach vorne gerichteten Blickwinkels nicht wahrgenommen. Eine direkte Implementierung der Newton'schen Gesetze könnte außerdem zu unerwünschten Ergebnissen führen, wie beispielsweise zu negativen Geschwindigkeiten in Hauptbewegungsrichtung [35]. Diese lassen sich unterbinden, indem die Überlagerung von Kräften verhindert wird [39].

Die abstoßende Kraft $\overrightarrow{F_{iw}^{rep}}$ geht von Wänden oder Hindernissen aus und steht für das Verlangen, während des Laufens einen gewissen Abstand zu diesen einzuhalten.⁶

Die resultierende Kraft $\overrightarrow{F_i}$ ergibt sich damit als Summe der einzelnen Kräfte:

⁶Dies gilt jedoch nicht für Treppen, da hier tendenziell in der Nähe der Handläufe gegangen wird.

$$\vec{F}_i = \sum_{i \neq j}^{\vec{N}} \vec{F}_{ij}^{rep} + \sum_w \vec{F}_{iw}^{rep} + \vec{F}_i^{drv} \quad (4.1)$$

Jedem Fußgänger wird eine elliptische Fläche zugewiesen, deren Abmessungen von der Geschwindigkeit abhängen. Die Form einer Ellipse wurde gewählt, da sie die senkrechte Projektion des Fußgängers auf die Ebene des Fußbodens gut repräsentiert, bezieht man den Platzbedarf für die Schrittbewegungen mit ein.

4.2 Technische Umsetzung

Für das Verständnis der Parameteranpassungen in Kapitel 5 ist es unabdingbar, sich zunächst mit der Funktionsweise des Modells vertraut zu machen. Die folgenden Erläuterungen basieren insbesondere auf den Veröffentlichungen [4, 5, 6, 37], in denen sich weitergehende Erklärungen finden.

4.2.1 Wirkende Kräfte

Wie bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, ergibt sich die resultierende Kraft, die auf einen Fußgänger wirkt, aus einer Vielzahl von einzelnen Kräften. Im Folgenden soll erläutert werden, wie sich diese Kräfte berechnen.

Treibende Kraft \vec{F}_i^{drv}

$$\vec{F}_i^{drv} = m_i \cdot \frac{\vec{v}_i^0 - \vec{v}_i}{\tau_i} \quad (4.2)$$

m_i = Masse des Fußgängers i , in der Modellierung immer gleich 1 gesetzt

v_i^0 = Wunschgeschwindigkeit des Fußgängers i

v_i = Aktuelle Geschwindigkeit des Fußgängers i

τ_i = Reaktionszeit des Fußgängers i

Die treibende Kraft ist umso größer, je stärker die Momentangeschwindigkeit von der Wunschgeschwindigkeit abweicht. Sie ist umgekehrt proportional zur Reaktionszeit des Fußgängers, die man sich somit als Maß für die Trägheit des Fußgängers vorstellen kann. Je größer die Reaktionszeit ist, desto länger wird es dauern, bis der Fußgänger die Wunschgeschwindigkeit erreicht oder bis er nach einer Kurve die neue Richtung eingeschlagen hat.

Abstoßende Kraft zwischen Fußgängern $\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$

$$\overrightarrow{F_{ij}^{rep}} = -m_i \cdot k_{ij} \cdot \frac{(\nu_{ped} \cdot v_i^0 + v_{ij})^2}{d_{ij}} \cdot \overrightarrow{e_{ij}} \quad (4.3)$$

mit

$$k_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{e_{ij}} + |\overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{e_{ij}}|}{v_i} = \begin{cases} (\overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{e_{ij}}) / v_i & \text{wenn } \overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{e_{ij}} > 0 \text{ und } v_i \neq 0 \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.4)$$

k_{ij} = Faktor zur Berücksichtigung des Blickwinkels

ν_{ped} = Faktor zur Veränderung des Einflusses der Wunschgeschwindigkeit

v_{ij} = Relativgeschwindigkeit der Fußgänger i und j

d_{ij} = Effektiver Abstand der Fußgänger i und j

$\overrightarrow{e_{ij}}$ = Einheitsvektor von i in Richtung des Fußgängers j

Die abstoßende Kraft steigt, je größer die Wunschgeschwindigkeit ist. Dies ist erforderlich, da eine größere Wunschgeschwindigkeit auch eine stärkere treibende Kraft mit sich bringt (siehe Gleichung 4.2). Dies erfordert wiederum größere Abstoßungskräfte, um Überlappungen oder Zusammenstöße zu vermeiden.

$\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$ verhält sich proportional zum Quadrat der Relativgeschwindigkeit beider Fußgänger. Je schneller sich zwei Fußgänger einander annähern, umso größer muss die abstoßende Kraft sein, die einen Zusammenstoß verhindert. Ebenso ist es erforderlich, dass

sich die Kraft antiproportional zur Entfernung der Fußgänger i und j verhält.

Um die Blickrichtung der Fußgänger einzubeziehen, wurde der Faktor k_{ij} eingeführt. Er hat zur Folge, dass andere Personen nur wahrgenommen werden, solange sie sich innerhalb eines Blickwinkels von 180° befinden. Eine Person j im Rücken der Person i entfaltet somit keine abstoßende Kraftwirkung. Darüber hinaus sorgt k_{ij} dafür, dass Personen genau in Wegrichtung des Fußgängers stärker wahrgenommen werden als solche, die sich ein Stück versetzt dazu aufhalten.

Gemäß Gleichung 4.3 geht $\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$ für sehr kleine d_{ij} gegen unendlich, wird aber auch für sehr große d_{ij} nicht null. Auch sehr weit entfernte Fußgänger würden noch eine abstoßende Kraftwirkung entfalten. Da diese Wechselwirkung für Fußgänger unrealistisch ist, wird eine Interpolation der Kraft für $d_{ij} < r_{eps}$ und $d_{ij} > \tilde{r}_c$ eingeführt, die in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Kraft in Abhängigkeit der Entfernung mit $v_{ij} = \textit{konstant}$.

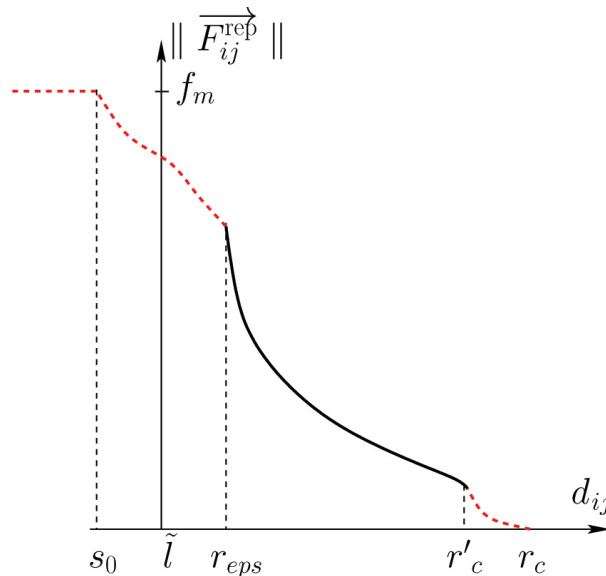


Abbildung 4.1: Interpolation der Kraft $\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$ [in Anlehnung an [4]]

Die Parameter r_c , also der maximale Wirkradius, und f_m , die maximal wirkende Kraft, sind variabel; ebenso wie der Wert $\textit{intpwidthped}$, der in die Berechnung von s_0 , r_{eps} und

\tilde{r}_c einfließt:

$$s_0 = \tilde{l} - \text{intpwidthped} \quad (4.5)$$

$$r_{eps} = \tilde{l} + \text{intpwidthped} \quad (4.6)$$

$$\tilde{r}_c = r_c - \text{intpwidthped} \quad (4.7)$$

Wie sich die Entfernung \tilde{l} zwischen den Ellipsen i und j berechnen lässt, wird in Abschnitt 4.2.3 dieser Arbeit erläutert. Auf weitergehende Informationen zur Interpolation soll an dieser Stelle verzichtet werden; detaillierte Erläuterungen finden sich in [4].

Abstoßende Kraft von Wänden $\overrightarrow{F_{iw}^{rep}}$

Die Berechnung der abstoßenden Kraft der Wände erfolgt analog zu Gleichung 4.3:

$$\overrightarrow{F_{iw}^{rep}} = -m_i \cdot k_{iw} \cdot \frac{(\nu \cdot v_i^0 + v_i^n)^2}{d_{iw}} \cdot \overrightarrow{e_{iw}} \quad (4.8)$$

$\overrightarrow{e_{iw}}$ = Einheitsvektor von der Position des Fußgängers i in Richtung der Wand

v_i^n = Komponente der Geschwindigkeit senkrecht zur Wand

Für sehr kleine oder sehr große Abstände wird ebenfalls eine Interpolation der Kraft vorgenommen, um unrealistische Werte der Kraft zu vermeiden (vgl. Abbildung 4.1).

Aufgrund des Faktors k_{iw} , der analog zu Gleichung 4.4 definiert ist, wirken keine Kräfte auf den Fußgänger, wenn sich dieser parallel zur Wand bewegt und nur sehr kleine Kräfte bei annähernd paralleler Bewegung [4]. Dies erfordert eine Modifikation der Wandmodellierung, die in Abbildung 4.2 dargestellt wird.

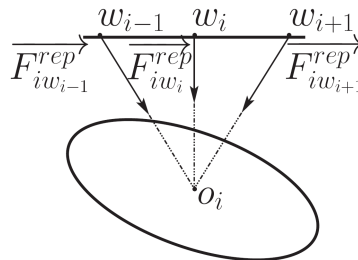


Abbildung 4.2: Punktförmige Modellierung der Wand [4]

Die Wand wirkt also nicht als Ganzes auf die Ellipse, sondern wird durch drei punktförmige Massen dargestellt. Der Punkt w_i ist der Fußpunkt des Lotes vom Zentrum der Ellipse zur Wand; w_{i-1} und w_{i+1} liegen jeweils so weit entfernt, wie die kleine Halbachse b der Ellipse lang ist [4]. Die gesamte Kraft $\overrightarrow{F_{iw}^{rep}}$ ergibt sich also als Summe der drei einzelnen Kräfte:

$$\overrightarrow{F_{iw}^{rep}} = \sum_{j=i-1}^{i+1} \overrightarrow{F_{iw_j}^{rep}} \quad (4.9)$$

mit

$$\overrightarrow{F_{iw_j}^{rep}} = -m_i \cdot k_{iw_i} \cdot \frac{(\nu \cdot v_i^0 + v_i^n)^2}{d_{iw_j}} \cdot \overrightarrow{e_{iw_j}}, \quad j \in \{i-1, i, i+1\} \quad (4.10)$$

4.2.2 Geschwindigkeitsabhängiger Flächenbedarf

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, wird der Flächenbedarf eines Fußgängers in Form einer Ellipse dargestellt. Die Maße der Ellipse verändern sich dabei in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Mit a wird die Halbachse in Gehrichtung bezeichnet, b ist entsprechend die Halbachse senkrecht zur Gehrichtung. In der Regel gilt $a > b$, bei geringen Geschwindigkeiten kann sich dieses Verhältnis jedoch auch umkehren.

Die jeweilige Länge der Halbachse berechnet sich nach folgenden Abhängigkeiten:

$$a = a_{min} + v_i \cdot a_\tau \quad (4.11)$$

a_{min} = Minimale Ausdehnung der Halbachse a

a_τ = Faktor für den Geschwindigkeitseinfluss

$$b = b_{max} - (b_{max} - b_{min}) \cdot \frac{v_i}{v_i^0} \quad (4.12)$$

b_{max} = Maximale Ausdehnung der Halbachse b

b_{min} = Minimale Ausdehnung der Halbachse b

4.2.3 Entfernungsberechnung

Die Wahl einer elliptischen Grundfläche zur Darstellung der Fußgänger sorgt einerseits für eine recht realitätsnahe Darstellung, bringt andererseits aber auch Schwierigkeiten mit sich, wenn es um die Berechnung der Entfernungen geht. So liegt bei zwei versetzt angeordneten Ellipsen der minimale Abstand der Ränder der Ellipsen nicht auf der Verbindungslinie der beiden Ellipsenmittelpunkte. Die Abstandsberechnung, wie beispielsweise in [47] erläutert, sollte daher eingehender betrachtet werden. Folgende Darstellung erfolgt in Anlehnung an [4].

Abstandsberechnung zwischen zwei Ellipsen

Zunächst soll der Abstand d_{ij} berechnet werden, der in Abbildung 4.2.3 dargestellt ist. Dafür müssen von der Entfernung der beiden Mittelpunkte die jeweiligen Radien der Ellipsen subtrahiert werden [4].

$$d_{ij} = \|\overrightarrow{o_i o_j}\| - r_i - r_j \quad (4.13)$$

$\overrightarrow{o_i o_j}$ = Verbindungsvektor der Ellipsenmittelpunkte

r_i, r_j = Radien der Ellipsen

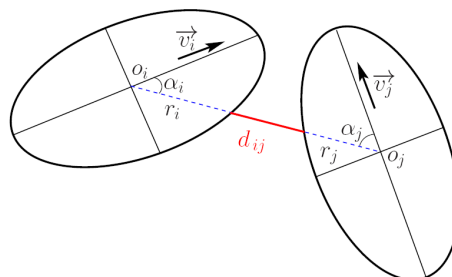


Abbildung 4.3: Entfernung d_{ij} zwischen zwei Ellipsen [4]

4. Generalized Centrifugal Force Model

Der Radius einer Ellipse mit Mittelpunkt im Koordinatenursprung lässt sich aus der Ellipsengleichung 4.14 in kartesischen Koordinaten und der Angabe von x und y in Polarkoordinaten 4.15 herleiten [4].

$$\frac{x^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} = 1 \quad (4.14)$$

$$x = r_i \cdot \cos \alpha_i, \quad y = r_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4.15)$$

α_i = Winkel zwischen Hauptachse i und Verbindungsvektor der Mittelpunkte

Die resultierende Gleichung lässt sich nach r_i umstellen:

$$r_i = \left(\frac{\cos^2 \alpha_i}{a_i^2} + \frac{\sin^2 \alpha_i}{b_i^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

Nach demselben Verfahren lässt sich der Radius r_j ermitteln und mithilfe von Gleichung 4.13 kann der Abstand d_{ij} berechnet werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass dieser Abstand möglicherweise größer als null ist, auch wenn sich die Ellipsen schon berühren oder überschneiden. Um Überlappungen zu vermeiden, ist es notwendig, den “Abstand der größten Annäherung” zu ermitteln, an dem beide Ellipsen genau einen gemeinsamen Punkt haben (siehe Abbildung 4.4). Diese Berechnung erfolgt analog zur Abstandsrechnung zwischen einer Geraden und einer Ellipse, die im folgenden Abschnitt erläutert wird.

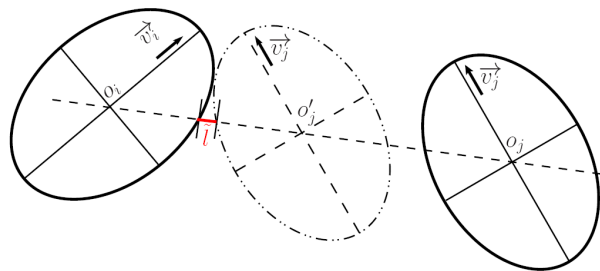


Abbildung 4.4: Maximale Annäherung zweier Ellipsen ohne Überschneidung [4]

Abstandsberechnung zwischen Wand und Ellipse

Im Folgenden soll erläutert werden, wie sich der Abstand der größten Annäherung zwischen einer Geraden Δ und einer Ellipse berechnet (siehe Abbildung 4.5). Zu diesem Zweck wird die Gerade Δ' eingeführt, die parallel zu Δ verläuft und die Ellipse tangential berührt. Der minimale Abstand \tilde{k} ist die Entfernung zwischen Ellipse und der Geraden Δ' , der sich auf der Verbindungslinie zwischen dem Ellipsenmittelpunkt und dem nächstgelegenen Punkt p der Gerade Δ befindet.

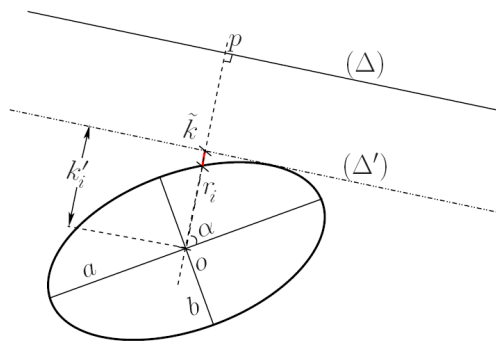


Abbildung 4.5: Maximale Annäherung zwischen Ellipse und einer Geraden [4]

Die Geraden sind durch folgende Gleichungen definiert, wobei c und d bekannt sind:

$$\Delta : y = c \cdot x + d, \quad \Delta' : y = c \cdot x + d' \quad (4.17)$$

Setzt man die Geradengleichung Δ' in die Ellipsengleichung 4.14 ein und formt um, ergibt sich die quadratische Gleichung

$$\left(\frac{1}{a^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) \cdot x^2 + \frac{2 \cdot c \cdot d'}{b^2} \cdot x + \frac{d'^2}{b^2} - 1 = 0. \quad (4.18)$$

Da die Ellipse und Gerade Δ' definitionsgemäß nur einen gemeinsamen Punkt haben, muss die Diskriminante obiger Gleichung null sein:

$$\left(\frac{2 \cdot c \cdot d'}{b^2} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{b^2 + a^2 \cdot c^2} \cdot \frac{1}{2} \right)^2 - \frac{d'^2 - b^2}{b^2} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{b^2 + a^2 \cdot c^2} = 0 \quad (4.19)$$

Dies lässt sich nach d' umstellen:

$$d' = \pm \sqrt{b^2 + a^2 \cdot c^2} \quad (4.20)$$

Der minimale Abstand zwischen Ellipse und der Geraden Δ ergibt sich gemäß Abbildung 4.5:

$$\tilde{k} = k'_i - r_i \quad (4.21)$$

k'_i = Entfernung zwischen Ellipsenmittelpunkt und der Geraden Δ'

r_i = Radius der Ellipse

4.2.4 Routingansatz

Der Prozess der Entscheidungsfindung der Agenten in Bezug auf die Auswahl des Weges wird Routing genannt. Hier wird nach Hoogendoorn [16] die strategische/taktische Ebene des Fußgängerverhaltens abgebildet. Gemäß der Theorie versucht ein Fußgänger, durch die Auswahl der Route den subjektiven Nutzen zu maximieren. Dabei können neben der zu erwartenden Reisezeit auch Faktoren wie Streuung der Reisezeit, Sicherheit, Komfort und Länge des Weges mit einbezogen werden [17]. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Modellierung der operativen Ebene liegt, sollen im Folgenden nur einige grundlegende Prinzipien umrissen werden. Weiter gehende Erläuterungen finden sich unter anderem in der Veröffentlichung [22], an die auch die folgenden Ausführungen angelehnt sind.

Für das GCFM wird ein graphenbasiertes Routing in einem Netzwerk verwendet, in das (Zwischen-)Zielpunkte als Knoten eingehen. Die treibende Kraft wirkt jeweils in Richtung des nächsten Knotens und richtet sich – sobald dieser erreicht ist – auf den nächsten Knoten aus. Als Kantengewicht wird der euklidische Abstand zwischen den Knoten eingesetzt.

In der Simulation werden Agenten mit unterschiedlichen Routing-Strategien eingesetzt.

Dies soll die Beobachtung nachbilden, wonach sich bei unterschiedlichen Besuchergruppen in der ESPRIT arena an verschiedenen Stellen Staus bilden. Mithilfe der variierten Verteilung der Agenten auf die Routing-Strategien soll dieser Effekt im Modell abgebildet werden.

Agenten mit der Strategie *local shortest path* (LSP) oder *global shortest path* (GSP) suchen immer nach dem kürzesten Weg zum Ziel, sie unterscheiden sich allerdings in ihrer Ortskenntnis. Bei LSP ist lediglich die Geometrie des Raumes bekannt, während beim GSP die gesamte Gebäudegeometrie berücksichtigt wird. Die Weglänge des LSP ist die Entfernung zum Raumausgang, für die Ermittlung des GSP wird der Dijkstra-Algorithmus verwendet.

Des Weiteren gibt es Agenten, die nach dem schnellsten Weg suchen, wobei sich auch diese Gruppe in Personen mit lokalem Wissen (LSQ) und andere mit globalem Wissen (GSQ) aufteilt. Der schnellste Weg kann sich im zeitlichen Verlauf einer Situation ändern und ist somit aufwändiger zu ermitteln. Der vorgesehene Ablauf im Modell sieht vor, dass auch bei den Strategien LSQ und GSQ zunächst der lokal oder global kürzeste Weg eingeschlagen wird. Registriert der Agent einen Stau auf seinem Weg, muss abgewogen werden, inwiefern sich aus einer anderen Route Zeitvorteile ergeben können. Zu diesem Zweck wird in jedem Stau ein Referenz-Agent ausgewählt, dessen Fortschritt für eine gewisse Zeit beobachtet wird. Aus der Geschwindigkeit des Referenz-Agenten, dessen Entfernung zum Ausgang sowie der eigenen Geschwindigkeit und der Entfernung zum Referenz-Agenten errechnet sich dann die voraussichtlich benötigte Zeit. Darüber hinaus fließt über einen Reduktionsfaktor die erforderliche Richtungsänderung mit ein, sodass anschließend in einer Kosten-Nutzen-Analyse die beste aus einer Vielzahl von Varianten ausgewählt werden kann.

4.2.5 Laufzeitoptimierung

Die Zielstellung des Projekts Hermes, eine Räumungszeit- und Stauprognose zu ermöglichen, erfordert die Durchführung der Simulation schneller als in Echtzeit. Für derart schnelle Berechnungen ist ein raum- und zeitkontinuierliches Modell wie das GCFM nicht optimal geeignet. Um dennoch ausreichend schnelle Berechnungen zu ermöglichen,

werden verschiedene Maßnahmen umgesetzt.

Neben der Parallelisierung durch OpenMP und MPI zur gleichzeitigen Berechnung auf mehreren Prozessoren kommen auch so genannte Nachbarschaftslisten zum Einsatz [37]. In diesen Listen werden nur die Agenten innerhalb einer bestimmten Entfernung vom betrachteten Agenten gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass für die Berechnung der abstoßenden Kraft nicht alle Agenten im Raum, sondern nur die Agenten der Nachbarschaftsliste betrachtet werden müssen. Dies führt insbesondere bei einer homogenen Verteilung vieler Personen zu einem großen Zeitgewinn. In einem definierten Testszenario mit 10.000 Agenten konnte die Berechnungsdauer auf diese Weise um den Faktor 80 reduziert werden [37].

Die Entscheidung darüber, welche Agenten für die Nachbarschaftslisten zu berücksichtigen sind, wird mithilfe des Linked-Cell-Verfahrens bestimmt. Dieses in Abbildung 4.6 dargestellte und in [26, 42] beschriebene Verfahren hat den Vorteil, dass die Komplexität von $O(N^2)$ zu $O(N)$ reduziert wird [37].

Der Raum wird in Quadrate mit der Seitenlänge r_c eingeteilt, wobei jeder Agent immer eindeutig der Zelle zugewiesen wird, in der sich sein Schwerpunkt befindet. Für die Nachbarschaftslisten werden alle Agenten berücksichtigt, die sich in der eigenen oder einer direkt angrenzenden Zelle befinden. In der Abbildung sind das die Agenten in den weiß hinterlegten Feldern, von denen allerdings nur solche einen Einfluss ausüben, die sich innerhalb des Wirkradius r_c befinden (blau gekennzeichnet).

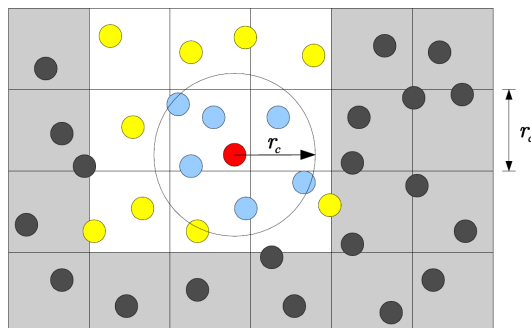


Abbildung 4.6: Schema des Linked-Cell-Verfahrens zur Erstellung der Nachbarschaftslisten [in Anlehnung an [37]]

4.2.6 Parameter des Modells

Um die obige Beschreibung nicht zu verkomplizieren, wurde jeweils auf den Hinweis verzichtet, dass viele Parameter in Form einer stetigen Gleichverteilung in die Simulation einfließen. μ gibt dabei den Mittelwert an und σ die Standardabweichung. Diese Verteilung bildet die natürlich vorkommenden Unterschiede zwischen Fußgängern ab, ohne jedoch – wie es beispielsweise bei einer Normalverteilung der Fall wäre – einzelne besonders extreme Abweichungen vom Mittelwert zu erzeugen.

In Tabelle 4.1 ist eine Übersicht der Modellparameter dargestellt.

Parameter	Erläuterung
$SG(\mu_{v_0} - \sigma_{v_0}, \mu_{v_0} + \sigma_{v_0})$	Gleichverteilung der freien Gehgeschwindigkeit v_0
$SG(\mu_{\tau} - \sigma_{\tau}, \mu_{\tau} + \sigma_{\tau})$	Gleichverteilung der Reaktionszeit τ
$SG(\mu_{b_{max}} - \sigma_{b_{max}}, \mu_{b_{max}} + \sigma_{b_{max}})$	Gleichverteilung der maximalen Länge der Ellipsenhalbachse b
$SG(\mu_{b_{min}} - \sigma_{b_{min}}, \mu_{b_{min}} + \sigma_{b_{min}})$	Gleichverteilung der minimalen Länge der Ellipsenhalbachse b
$SG(\mu_{a_{min}} - \sigma_{a_{min}}, \mu_{a_{min}} + \sigma_{a_{min}})$	Gleichverteilung der minimalen Länge der Ellipsenhalbachse a
$SG(\mu_{a_{\tau}} - \sigma_{a_{\tau}}, \mu_{a_{\tau}} + \sigma_{a_{\tau}})$	Gleichverteilung des Faktors a_{τ}
ν_{ped}	Faktor ν zur Berechnung der Kraft \vec{F}_{ij}^{rep}
ν_{wall}	Faktor ν zur Berechnung der Kraft \vec{F}_{iw}^{rep}
$intpwidthped$	Interpolationsweite der Kraft \vec{F}_{ij}^{rep}
$intpwidthwall$	Interpolationsweite der Kraft \vec{F}_{iw}^{rep}
$f_{m,ped}$	Maximaler Wert der Kraft \vec{F}_{ij}^{rep}
$f_{m,wall}$	Maximaler Wert der Kraft \vec{F}_{iw}^{rep}
$r_{c,ped}$	Maximaler Wirkradius der Kraft \vec{F}_{ij}^{rep}
$r_{c,wall}$	Maximaler Wirkradius der Kraft \vec{F}_{iw}^{rep}

Tabelle 4.1: Parameterübersicht.

5 Empirische und simulierte Daten im Vergleich

Im Folgenden sollen die empirisch erhobenen Versuchsdaten mit den Ergebnissen der Modellierungen verglichen werden. Anschließend werden Veränderungen der Parameter vorgenommen und die Ergebnisse präsentiert.

5.1 Versuchsaufbau und Methodik

Um die Daten richtig interpretieren zu können, sollen zunächst die Durchführung der Modellierungen und der Versuche erklärt sowie die Vorgehensweise der Analyse erläutert werden.

5.1.1 Empirische Versuche

Im Rahmen des Hermes Projekts wurden empirische Versuche unter Beteiligung mehrerer hundert Probanden durchgeführt. Ein Teil der Versuche fand in den Räumlichkeiten der ESPRIT arena selbst statt und deckte vor allem die Personenflüsse auf Treppen sowie beim Einströmen in die Mundlöcher der Tribünen ab. Des Weiteren wurden Versuche in der Messe Düsseldorf durchgeführt, bei denen einfache, charakteristische Geometrien künstlich erstellt wurden. Dazu gehörten unter anderem ein Korridor mit Engstelle, eine rechtwinklige Ecke oder eine T-Kreuzung mit beidseitigem Zustrom von Personen. Letztere eignen sich insbesondere zur Kalibrierung des Modells, da hier einzelne Phänomene isoliert betrachtet werden können.

Sämtliche Versuche wurden mithilfe von Kameras erfasst, die oberhalb der Versuchsaufbauten angeordnet waren. Um die spätere Auswertung der Videodaten zu erleichtern, waren die Probanden mit einfarbigen Shirts sowie einer weißen Kopfbedeckung mit schwarzem Punkt bekleidet.



Abbildung 5.1: Bekleidung der Probanden [21]

5.1.2 Durchführung der Simulationen

Die Implementierung des GCFM in ein schnell und stabil funktionierendes Simulationsprogramm ist ein Prozess, der parallel zur Erstellung dieser Arbeit vorstättenging. Um trotz der kontinuierlichen Veränderungen des Codes die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse sicherzustellen, wird in der gesamten Arbeit mit der Programmversion 856 gearbeitet.

Wie oben beschrieben, liegen für verschiedene Geometrien empirische Daten vor, die für die Kalibrierung des Modells genutzt werden können. Dazu gehören ein gerader Korridor, eine Ecke mit 90° -Winkel, eine T-Kreuzung mit zweiseitigem Zustrom und ein Mundloch, also ein mittig in einem Tribünenrang angeordneter Ausgang, der von verschiedenen Seiten aus zugänglich ist.

Es bietet sich an, die Kalibrierung des Modells mit der Geometrie des geraden Korridors zu beginnen, der unidirektional durchströmt wird. Dies hat den Vorteil, dass Aspekte bezüglich der Anordnung von Zwischenzielen, des Laufverhaltens an Kurven oder bei entgegenkommenden Fußgängern zunächst nicht betrachtet werden müssen.

Die gewählte Geometrie besteht aus einem Raum, in dem sich die Personen mit einer Dichte von 3 Personen/m^2 aufhalten. An den Ausgang des Raumes (b_{Zu}) schließt

5. Empirische und simulierte Daten im Vergleich

sich zunächst eine 4 m lange Verbreiterung an, die dann in den eigentlichen Korridor (b_{Korr}) mündet. Dieser hat eine Länge von 8 m und schließt mit dem Ausgang (b_{Ab}) ab. Die Durchgangsbreiten b_{Zu} , b_{Korr} und b_{Ab} sind dabei veränderlich, b_{Korr} wurde jedoch für alle Simulationen gleich 2,4 m gesetzt. Im Rahmen der empirischen Versuche wurden Korridorbreiten von 1,8 m, 2,4 m und 3,0 m eingestellt. Mithilfe von b_{Zu} und b_{Ab} lässt sich die Dichte vor dem Ausgang beeinflussen. Für den Simulationsdurchlauf eines Parametersatzes werden also Geometrien mit unterschiedlichen Zu- und Abflussbreiten erzeugt, die nach Möglichkeit den gesamten Dichtebereich abdecken.

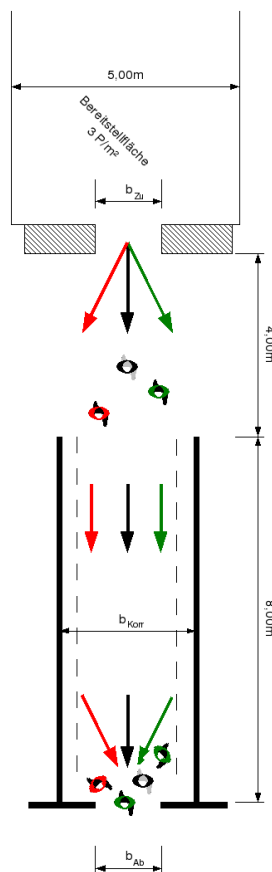


Abbildung 5.2: Experimentalgeometrie *unidirektional-offen* [21]

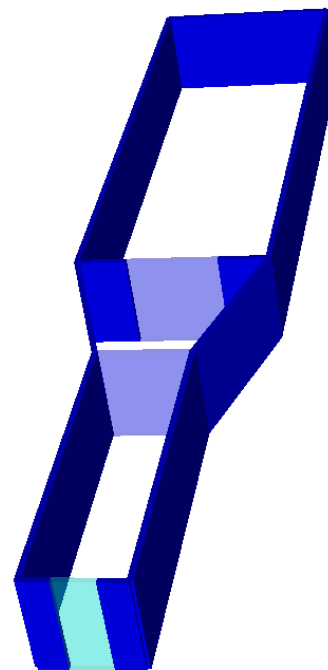


Abbildung 5.3: Modellgeometrie *unidirektional-offen*

5.1.3 Programm zur Trajektorienanalyse

Mithilfe der Programmiersprache Python wurde ein Programm geschrieben, mit dem sich der Fluss und die Dichte ermitteln lassen, wobei letztere als Mittelwert über mehrere Fußgänger gemessen wird (siehe auch Abschnitt 3.1.1). Im Folgenden soll die grundsätzliche Arbeitsweise des Programms erläutert werden.

Die Datengrundlage besteht sowohl für die realen Versuche als auch für die Simulationsergebnisse aus Tabellen im txt-Format. In diesen Tabellen wird in der ersten Spalte die ID des Agenten abgelegt, in der zweiten Spalte der jeweilige Frame und in Spalten drei bis fünf die zugehörigen x-, y- und z-Koordinaten. Die Videoaufnahmen in der Messe Düsseldorf wurden mit einer Framerate von 16 s^{-1} aufgenommen, sodass auch die Ausgabe des Modells entsprechend angepasst wurde. Anhand der Abbildung 5.4 soll die Vorgehensweise bei einer Messung beispielhaft erläutert werden. Auf der linken Seite sind die Trajektorien des Versuchs zu sehen. Die horizontale blaue Linie im unteren Bereich markiert die Messstelle für die Flussmessung, die grünen Linien eineinhalb Meter vor und hinter dieser begrenzen den Messbereich für die Dichtemessung. Die vertikalen Linien, die sich an beide Seiten anschließen, markieren den Bereich, der für die jeweilige Messstelle berücksichtigt wird. Die Grafik auf der rechten Seite von Abbildung 5.4 stellt die verschiedenen Summenkurven, den Fluss, die Dichte und die Geschwindigkeit jeweils in Abhängigkeit von der Zeit dar. Des Weiteren lassen sich die Mittelwerte und die zugehörige Standardabweichung von Fluss, Dichte und Geschwindigkeit im stationären Zustand ablesen. Die Methodik, nach der diese ermittelt werden, soll später noch erläutert werden. Zunächst geht es um die grundsätzliche Arbeitsweise des Programms. Zur Messung des Flusses wird die Tabelle mit den Eingangsdaten zeilenweise in Bezug auf folgende Kriterien überprüft:

- Liegen die Koordinaten innerhalb des definierten Messbereichs?
- Liegt der y-Wert des aktuellen Frames i in Laufrichtung hinter der festgelegten Messlinie (hier: $y_i \leq y_{mess}$)?
- Liegt der y-Wert der vorangegangenen j Frames $i - k$, $k \in \{1, 2, 3, \dots, j\}$ in Laufrichtung vor der Messlinie (hier: $y_j > y_{mess}$)?

Wenn diese Bedingungen sämtlich erfüllt sind, wird die aktuelle Frame-ID gespeichert, sodass nach dem Überprüfen der Trajektorien alle Frames bekannt sind, in denen die Messstelle von einem Fußgänger passiert wird. Auf Grundlage dieser Daten lässt sich in einem nächsten Schritt eine Summenkurve erstellen, die in der rechten Grafik blau dargestellt ist.

Die rote Kurve stellt den Personenfluss dar, also die Zahl der Personendurchgänge pro Sekunde. Für das zu Grunde liegende Zeitintervall wurden hier 10 Sekunden gewählt. Für jeden Frame wird also ermittelt, wie viele Personen während der letzten fünf und während der nächsten fünf Sekunden die Messstelle überschreiten. Diese Zahl, dividiert durch 10 Sekunden, ergibt den aktuellen Fluss. Bei der Wahl des Zeitintervalls gilt es, einerseits übertriebene Fluktuationen durch die Wahl eines ausreichend großen Zeitintervalls zu verhindern, andererseits aber auch tatsächlich vorhandene Änderungen des Flusses nicht durch die Wahl eines zu großen Intervalls unkenntlich zu machen.

Zur Ermittlung der Dichte sind zwei Angaben erforderlich: die Grundfläche des Messbereichs und die Anzahl der dort befindlichen Personen. Ersteres lässt sich leicht aus der Breite des Korridors (hier: 2.4 m) und der Länge des Messbereichs (hier: 3 m) errechnen. Zur Ermittlung der Personenanzahl werden analog zum oben beschriebenen Vorgehen Summenkurven für die beiden grün dargestellten Messstellen ermittelt. Aus der Differenz beider Kurven ergibt sich für jeden Frame die Personenzahl, die anschließend noch durch die Grundfläche (hier: $7,2\text{ m}^2$) zu dividieren ist.

Während für die Berechnung der Dichte die vertikale Differenz der beiden Summenkurven relevant war, muss zur Ermittlung der Geschwindigkeit die horizontale Differenz gebildet werden. Hieraus ergibt sich die Zeit, die vergeht, bis beide Messstellen von derselben Personenzahl passiert wurden. Dividiert man die Entfernung zwischen den Messstellen (hier: 3 m^2) durch diese Zeit, erhält man die Durchschnittsgeschwindigkeit für einen Frame.

Um die Ergebnisse eines kompletten Versuchsdurchlaufs in einer Grafik darstellen und die Ergebnisse mehrerer Durchläufe vergleichen zu können, wird aus den Ergebnissen einer Geometrie jeweils nur der Mittelwert im stationären Zustand berücksichtigt. Die Grenzen des stationären Zustands werden dabei visuell ermittelt, da zum Zeitpunkt der

Arbeit ein automatisierter Test nicht zu Verfügung stand. Um ein Maß für die Streuung der Daten angeben zu können, wird zusätzlich die Standardabweichung ermittelt und ebenfalls im Fundamentaldiagramm abgebildet.

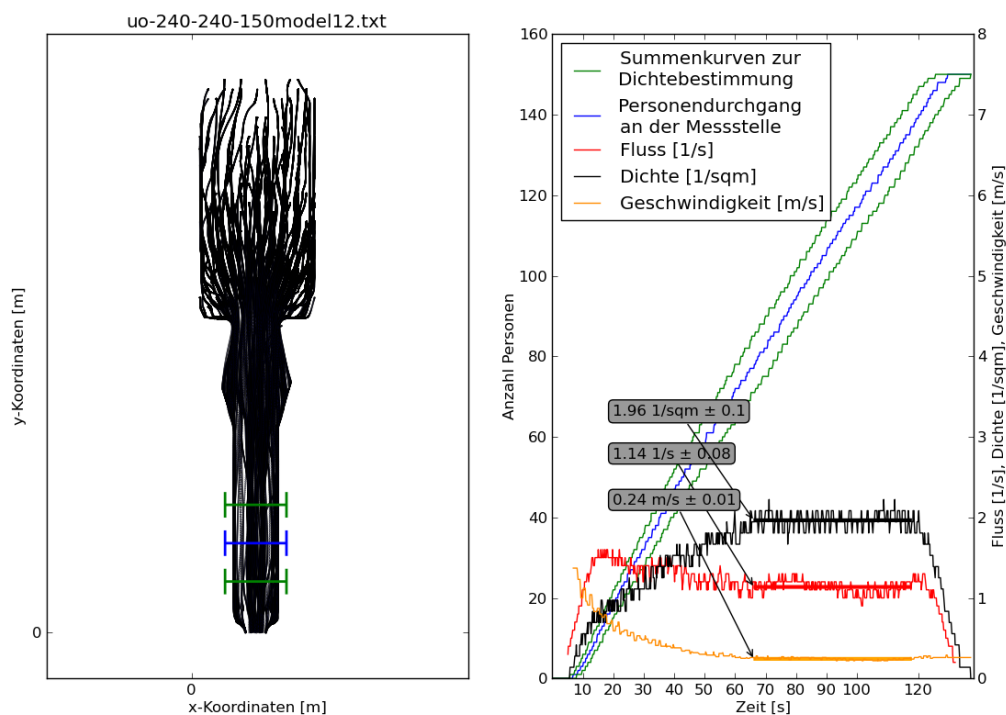


Abbildung 5.4: Beispiel für die Auswertung der Trajektorien

5.1.4 Ergebnisdarstellung im Fundamentaldiagramm

Als primäres Ziel der Parameteroptimierung wurde die möglichst exakte Reproduktion der Abhängigkeit zwischen Dichte und spezifischem Fluss beziehungsweise Dichte und Geschwindigkeit im stationären Zustand definiert. Diese makroskopischen Verhältnisse bestimmen wesentlich die Eignung des Modells für eine zuverlässige Prognose der Personenströme und lassen sich anschaulich im Fundamentaldiagramm darstellen, dessen grundlegende Bedeutung bereits im Abschnitt 3.1.5 dargelegt wurde. Um dieses zu erzeugen, müssen die stationären Mittelwerte mehrerer Versuche in unterschiedlichen Geometrien ermittelt und der Fluss J in den Wert für den spezifischen Fluss J_s umgerechnet werden. In Abbildung 5.5 auf der nächsten Seite sind beispielhaft die Daten

5. Empirische und simulierte Daten im Vergleich

der empirischen Versuche *unidirektional-offen*, kurz *UO*, sowie ein Simulationsdurchlauf dargestellt.

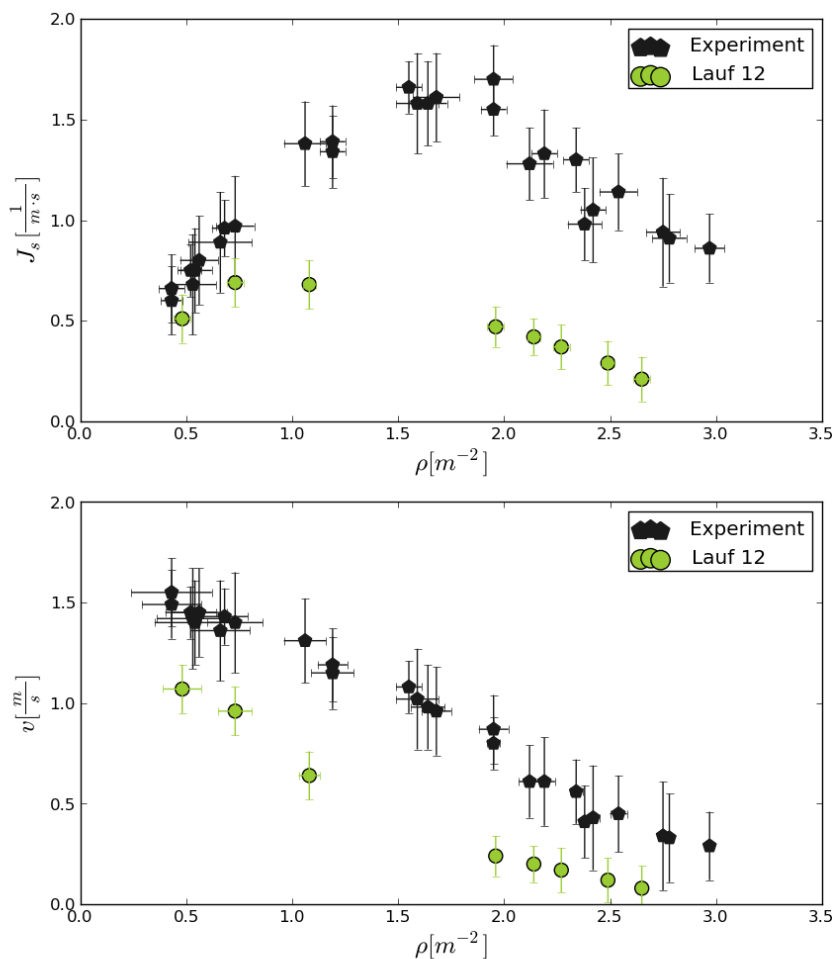


Abbildung 5.5: Fundamentaldiagramme *unidirektional-offen* - Lauf 12

Neben der Angleichung des Kurvenverlaufs soll auch eine gute Korrelation, bezogen auf die jeweils identische Geometrie, erzielt werden, denn auch bei guter Übereinstimmung der Kurven im Fundamentaldiagramm könnten die Ergebnisse für dieselbe Durchgangsbreite deutlich voneinander abweichen und zu falschen Prognosen führen. Hierbei geht es also um die Dynamik an Engstellen, die im Idealfall bei identischen Durchgangsbreiten auch denselben Fluss erzeugt. Dieses Kriterium ist jedoch sehr schwierig zu erfüllen, da es eine sehr realitätsnahe Wiedergabe der Vorgänge an einer Engstelle erfordert. Um die

folgende Kalibrierung nicht zu verkomplizieren, soll der Fokus jedoch darauf liegen, den generellen Verlauf des Fundamentaldiagramms zu reproduzieren. Im Abschnitt 5.4 wird dann noch eine Bewertung des Parametersatzes erfolgen, in der dieser Aspekt berücksichtigt wird.

5.2 Erste Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Abbildung 5.5 sind die Fundamentaldiagramme der empirischen Versuche sowie des Simulationslaufs mit dem Standard-Parametersatz zu sehen.⁷ Es ist zu erkennen, dass hier noch deutliche Abweichungen auftreten. Der Grund besteht darin, dass während der Entwicklung des Modells zahlreiche Standardparameter festgelegt werden mussten, was nur teilweise auf Basis einer gründlichen Untersuchung geschehen konnte. Die große Abweichung während der ersten Simulationsdurchläufe ist also nicht überraschend.

5.2.1 Makroskopische Ebene

Betrachtet man die ersten Ergebnisse auf makroskopischer Ebene, gibt es einige wesentliche Merkmale, die verglichen werden sollten:

- Steigung des Freiflussastes [34]
- Gefälle des gestauten Astes [34]
- Höhe des maximalen spezifischen Flusses und zugehörige Dichte

Des Weiteren zählt hierzu auch die Dichteentwicklung in Abhängigkeit einzelner Durchgangsbreiten, die aber nachrangig betrachtet werden soll. Auf die oben genannten Punkte soll hier nicht näher eingegangen werden, da diese in Abschnitt 5.3 spezifisch für einzelne Parametervariationen betrachtet werden.

5.2.2 Mikroskopische Ebene

Die Trajektorien von Modell und Versuch weisen einige Unterschiede auf.

⁷An der Benennung als Lauf 12 ist zu erkennen, dass bereits weitere Läufe zuvor durchgeführt wurden. Diese konnten jedoch aufgrund eines erst später entdeckten Fehlers im Modell nicht berücksichtigt werden.

- So ist im Modell deutlich weniger Pendeln zu beobachten und die Trajektorien sind insbesondere bei geringen Dichten geradliniger. Dies erklärt sich dadurch, dass das natürliche Pendeln eines Fußgängers im Modell nicht berücksichtigt wird und ein Fußgänger die Richtungswahl zusätzlich von subjektiven Kriterien abhängig macht, die ebenfalls nicht berücksichtigt werden können. Der Einfluss auf das Gesamtergebnis kann vermutlich vernachlässigt werden.
- Die Einfädungsvorgänge vor Engstellen unterscheiden sich. So scheinen z. B. Agenten, die die Engstelle im Geradeauslauf passieren können, Vorrang vor solchen zu haben, die rechts und links der Engstelle stehen und somit noch eine Kurve laufen müssen. In der Realität würde ein solches Verhalten vermutlich deshalb nicht auftreten, da diese Fußgänger mit dem Gefühl, „an der Reihe zu sein“, in die Engstelle drängen würden.
- Bei Verbreiterungen nach einer Engstelle fächert sich der Strom der Agenten auf, sodass einige an der folgenden Engstelle „hängen bleiben“. Dies ist durch die gegenseitige Abstoßungskraft zu erklären. In der Realität tritt der Effekt deswegen nicht auf, da Fußgänger vorausschauend agieren und bereits die Verengung antizipieren. An diesem Beispiel wird deutlich, dass das Modell primär auf der operativen und weniger auf der strategischen oder taktischen Ebene arbeitet.

Die möglichst weit gehende Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Modelldaten ist auch auf mikroskopischer Ebene das Ziel. Aufgrund der bisherigen Modellentwicklung ist dies jedoch nur begrenzt möglich und für das Ziel des Projekts Hermes auch von untergeordneter Bedeutung, weil die exakte Voraussage von Stauungen hängt weniger von der korrekten Wiedergabe einzelner Laufwege abhängt als von der guten Reproduktion der Gesamtzusammenhänge.

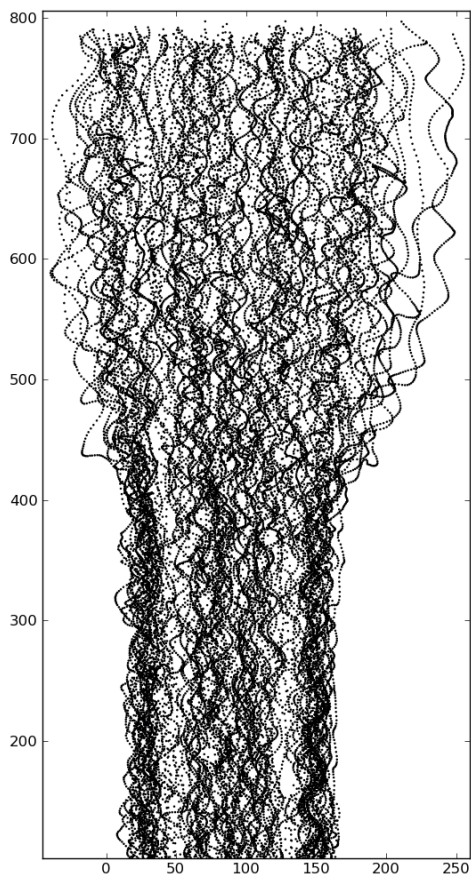


Abbildung 5.6: Im Experiment ermittelte Trajektorien

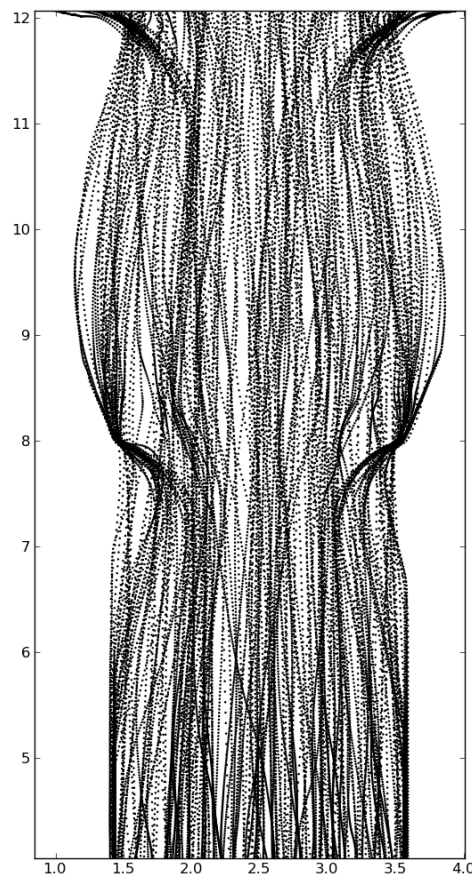


Abbildung 5.7: Im Modell ermittelte Trajektorien

5.3 Kalibrierung durch Parameteranpassung

Aufgrund der in Abschnitt 5.2 erläuterten Abweichungen zwischen empirischen und modellierten Ergebnissen waren deutliche Änderungen der voreingestellten Parameter notwendig. Im Folgenden soll erläutert werden, welche Auswirkungen die Änderung einzelner Parameter hat. Es werden dabei nicht alle Parameter berücksichtigt, eine Aufstellung aller getesteten Parametersätze und der Ergebnisse findet sich jedoch im Anhang.

Um den Einfluss der ausgewählten Parameter veranschaulichen zu können, werden die Fundamentaldiagramme verschiedener Simulationsdurchläufe gegenübergestellt, in de-

nen (meist) nur der ausgewählte Parameter verändert wurde. Messergebnisse, die direkt miteinander vergleichbar sind, werden im Fundamentaldiagramm durch dasselbe Symbol gekennzeichnet. Die zwischen den Läufen veränderten Parameter werden außerdem in einer Tabelle gegenübergestellt.

5.3.1 Geometrie der Ellipsen

Parameter b_{max} , b_{min} , a_τ und a_{min}

Wie in den Gleichungen 4.11 und 4.12 ersichtlich ist, wird die Form der Ellipse durch die Faktoren b_{max} , b_{min} , a_τ und a_{min} bestimmt. Diese sind als gleichverteilte Parameter im Modell implementiert, jedoch wurde das Verteilungsintervall 2σ in allen Durchläufen gleich 0,002 gesetzt. Es wurde also de facto keine Verteilung vorgenommen.

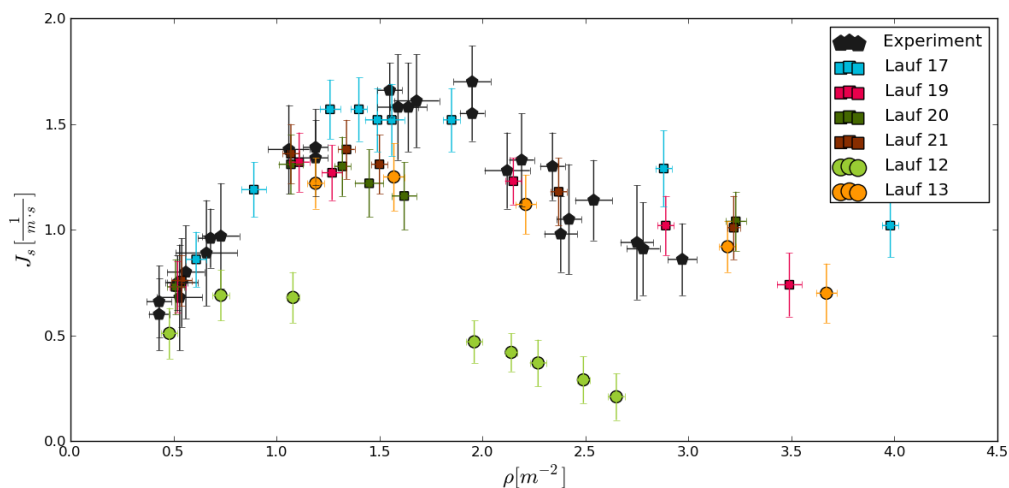


Abbildung 5.8: Fundamentaldiagramme b_{max} , b_{min} , a_τ und a_{min}

	Durchlauf 12	Durchlauf 13
μ_{v_0}	1,240	1,600
$\mu_{b_{max}}$	0,250	0,125
$\mu_{b_{min}}$	0,200	0,100
μ_{a_τ}	0,500	0,250
$\mu_{a_{min}}$	0,200	0,100

	Durchlauf 17	Durchlauf 19	Durchlauf 20	Durchlauf 21
$\mu_{b_{max}}$	0,125	0,250	0,125	0,125
$\mu_{b_{min}}$	0,100	0,200	0,100	0,100
μ_{a_τ}	0,250	0,250	0,500	0,250
$\mu_{a_{min}}$	0,100	0,100	0,100	0,200

Tabelle 5.1: Parametersätze bezüglich der Ellipsenmaße.

Da der Standardparametersatz in Lauf 12 zu sehr großen Abweichungen von den empirischen Ergebnissen geführt hat, wurden in einem ersten Schritt mehrere Parameter gleichzeitig verändert. Neben den Maßen der Ellipse, die jeweils halbiert wurden, wurde die freie Gehgeschwindigkeit in Lauf 13 auf $1,6 \frac{m}{s}$ erhöht. Letzteres diente dazu, die Steigung des Freiflussastes anzupassen, was in Abschnitt 5.3.2 noch genauer erläutert wird.

Um die Relevanz der einzelnen Ellipsenparameter besser einschätzen zu können, wurden weitere Simulationsläufe durchgeführt. Wie in Tabelle 5.1 unten dargestellt, diente der Lauf 17 als Referenz für die Läufe 19, 20 und 21. Der Verlauf des Fundamentaldiagramms konnte allerdings auch durch die einzelne Änderung von Parametern nicht besser an die empirischen Ergebnisse angepasst werden. Im Vergleich zu Lauf 17 wird zwar der spezifische Fluss bei hohen Dichten besser reproduziert, andererseits verschlechtert sich jedoch die Übereinstimmung bei mittleren Dichten.

5.3.2 Treibende Kraft

Freie Gehgeschwindigkeit v_0

Die freie Gehgeschwindigkeit ist der maßgebliche Faktor für die Steigung des Freiflussastes im $J_s(\rho)$ -Diagramm. Der Grund besteht darin, dass bei niedrigen Dichten nur geringe Wechselwirkungen zwischen den Fußgängern auftreten und eine erhöhte Gehgeschwindigkeit somit gemäß Gleichung 3.5 direkt zur Erhöhung des spezifischen Flusses beiträgt.

In Abbildung 5.8 ist zu erkennen, dass die Erhöhung der freien Gehgeschwindigkeit auf $1,6 \frac{m}{s}$ in Lauf 13 zu einer sehr guten Übereinstimmung des Fundamentaldiagramms im Bereich niedriger Dichten führt. Daher wurden an der Geschwindigkeit selbst keine weiteren Änderungen durchgeführt, sondern lediglich überprüft, welchen Einfluss die Streuung der Geschwindigkeiten hat. Die Verringerung des Wertes auf $\sigma_{v_0} = 0$ führte allerdings nicht zu signifikanten Änderungen im Fundamentaldiagramm.

Reaktionszeit τ

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert wurde, gibt der Parameter τ ein Maß für die Trägheit der Agenten an. Er wirkt sich auf die Zeit aus, die bis zum Erreichen der Wunschgeschwindigkeit benötigt wird, ebenso aber auch auf die Bewegung bei Richtungsänderungen. In der Programmversion 856 ist $\mu_\tau = 0,5$ implementiert, obwohl dieser Parameter variabel sein soll. Um dennoch den Einfluss von τ untersuchen zu können, wurde nur für diesen Vergleich die aktualisierte Programmversion 912 genutzt.

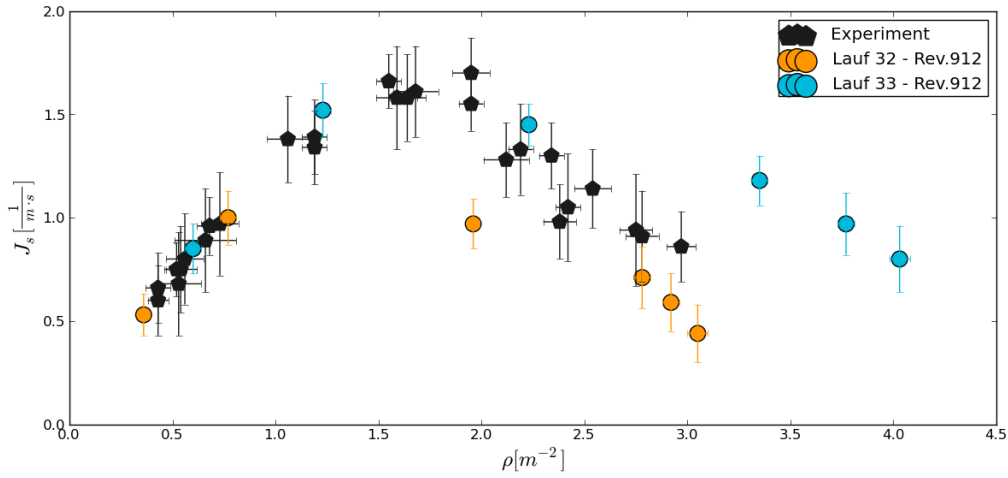


Abbildung 5.9: Fundamentaldiagramme τ

	Durchlauf 32 - Rev.912	Durchlauf 33 - Rev.912
μ_τ	1,0	0,6

Tabelle 5.2: Parametersätze bezüglich τ .

In Abbildung 5.9 sind die Fundamentaldiagramme von zwei Simulationsläufen dargestellt. Die Parametersätze unterscheiden sich lediglich im Wert für die Reaktionszeit, die übrigen Parameter sind konstant. Es ist zu erkennen, dass eine größere Reaktionszeit zu einer deutlichen Verringerung des spezifischen Flusses insgesamt führt. Verglichen mit den experimentellen Daten ist $J_{s,max}$ bei $\mu_\tau = 1,0$ allerdings deutlich zu gering.

5.3.3 Abstoßende Kraft zwischen Fußgängern

Faktor ν_{ped}

Großen Einfluss auf die Modellergebnisse hat der Parameter ν_{ped} , der in Gleichung 4.3 eingeht. Dieser beeinflusst die abstoßende Kraft zwischen Fußgängern und ist so zu wählen, dass Oszillationen einerseits und Überlappungen andererseits vermieden werden. Während ein zu niedriger Wert aufgrund von Überlappungen hohe Dichten nach sich zieht, kann ein zu großer Wert zu regelrechten “Explosionen” führen, bei denen einzelne Agenten aufgrund der abstoßenden Wirkung entgegen der Laufrichtung beschleunigt

5. Empirische und simulierte Daten im Vergleich

werden. Bei der Entwicklung des Modells wurde somit besonderes Augenmerk auf die richtige Wahl des Parameters gelegt. In [4] werden zwei Kenngrößen $o^{(s)}$ und $o^{(v)}$ definiert, die als Maß für Überlappungen oder Oszillationen dienen. Wie in Abbildung 5.10 zu erkennen ist, resultierte aus der Untersuchung ein optimaler Wert von $\nu_{ped} \approx 0,3$.

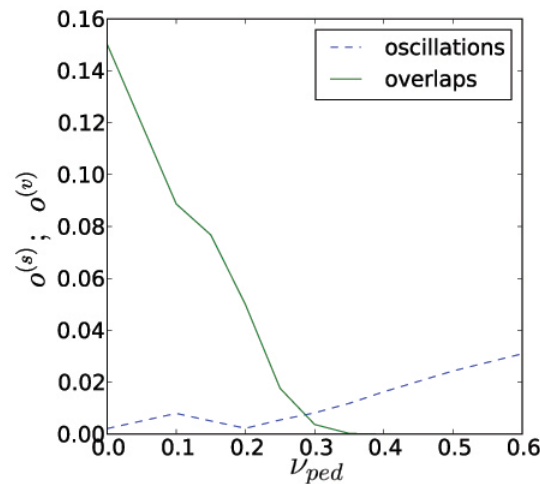


Abbildung 5.10: Oszillationen und Überlappungen in Abhängigkeit von ν_{ped} [4]

Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Wert nach Veränderungen am Modell möglicherweise leicht abweichen kann. Ohnehin erscheint ein gewisses Maß an Überlappungen akzeptabel, da die im Modell verwendete elliptische Form eine idealisierte Darstellung für die Projektionsfläche des menschlichen Körpers ist. Vor diesem Hintergrund erscheint es akzeptabel, dass der Parameter ν_{ped} aufgrund seines großen Einflusses auf einen etwas geringeren Wert eingestellt werden musste.

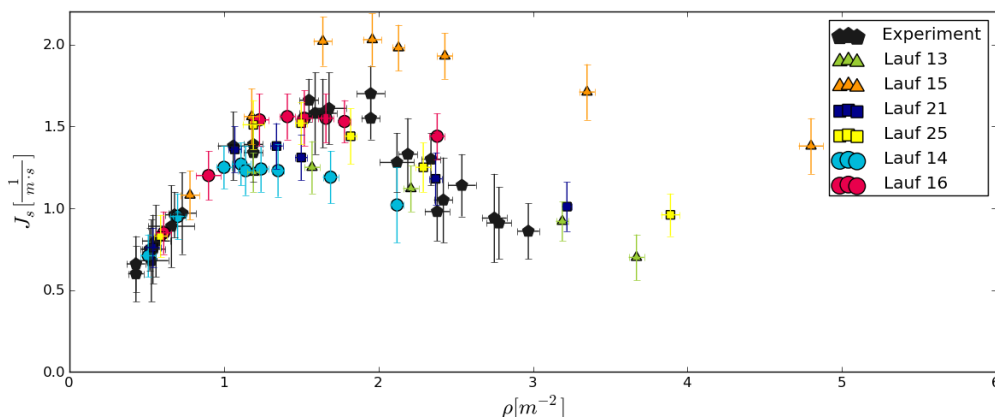


Abbildung 5.11: Fundamentaldiagramme ν_{ped}

	Durchlauf 13	Durchlauf 15
ν_{ped}	0,30	0,20

	Durchlauf 14	Durchlauf 16
ν_{ped}	0,30	0,25

	Durchlauf 21	Durchlauf 25
ν_{ped}	0,25	0,23

Tabelle 5.3: Parametersätze bezüglich ν_{ped} .

Aufgrund der oben beschriebenen Untersuchung wurde ν_{ped} zunächst standardmäßig auf 0,3 eingestellt. Wie bei Lauf 13 zu erkennen ist, bleibt der maximale spezifische Fluss mit $1,25(m \cdot s)^{-1}$ jedoch deutlich unter dem experimentell ermittelten Wert von $1,7(m \cdot s)^{-1}$. Verringert man den Parameterwert auf 0,2 im Lauf 15, wird der große Einfluss auf die Modellergebnisse deutlich: Es stellen sich ein spezifischer Fluss von $2,0(m \cdot s)^{-1}$ und Dichten von bis zu $5 m^{-2}$ ein.

Veränderungen an ν_{ped} sind also kleinschrittig vorzunehmen und sollten sich etwa im Bereich von 0,23 bis 0,25 bewegen, wie die Parametervariationen in den Läufen 16 und 25 zeigen.

Parameter $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$

Die Bedeutung der Parameter $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$ ist in Abbildung 4.1 zu erkennen. Während $f_{m,ped}$ für das Maximum der Kraft zwischen Fußgängern steht, gibt $r_{c,ped}$ den maximalen Radius an, in dem diese Kraft wirkt.

Die Variation der beiden Parameter zielte darauf ab, durch eine stärkere Kraft mit kürzerer Reichweite insbesondere die Steigung des gestauten Asts im Fundamentaldiagramm zu beeinflussen. Wie in Abbildung 5.12 zu erkennen ist, war dies allerdings nur teilweise möglich.

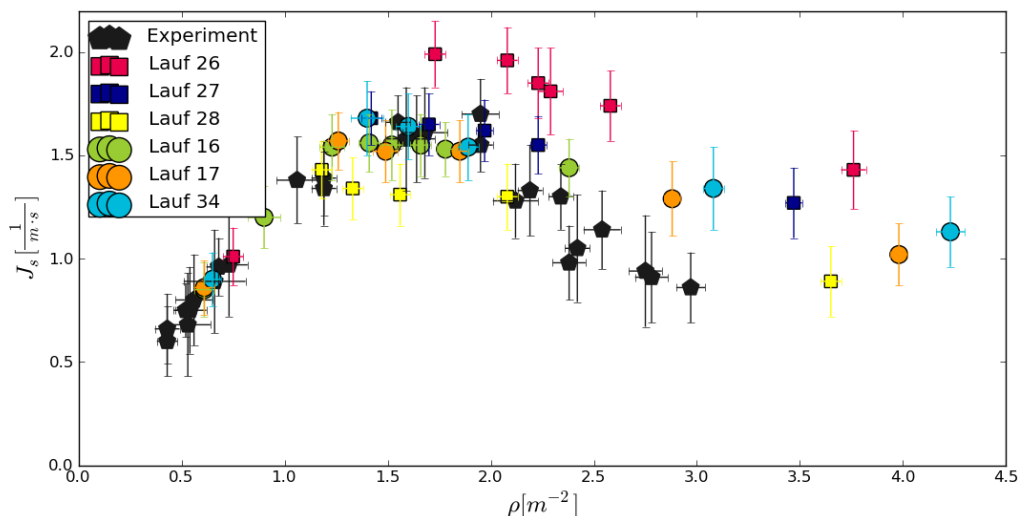


Abbildung 5.12: Fundamentaldiagramme $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$

	Durchlauf 16	Durchlauf 17	Durchlauf 34
$f_{m,ped}$	3,0	4,0	4,0
$r_{c,ped}$	2,0	2,0	1,2

	Durchlauf 26	Durchlauf 27	Durchlauf 28
$f_{m,ped}$	4,0	6,0	10,0

Tabelle 5.4: Parametersätze bezüglich $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$.

Die Veränderung eines Parameters beeinflusst den Verlauf des Fundamentaldiagramms, sobald Wechselwirkungen zwischen den Fußgängern auftreten. Es ist also nicht möglich, selektiv nur den Bereich hoher Dichte zu beeinflussen.

Parameter $intpwidthped$

Variationen des Parameters $intpwidthped$ verändern den Verlauf der Kraft nicht grundlegend, da der Kraftverlauf maßgeblich von $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$ sowie dem Faktor ν_{ped} bestimmt wird. Der Vollständigkeit halber und um diese These zu überprüfen, wurden dennoch drei Simulationsläufe mit veränderten Parametersätzen durchgeführt.

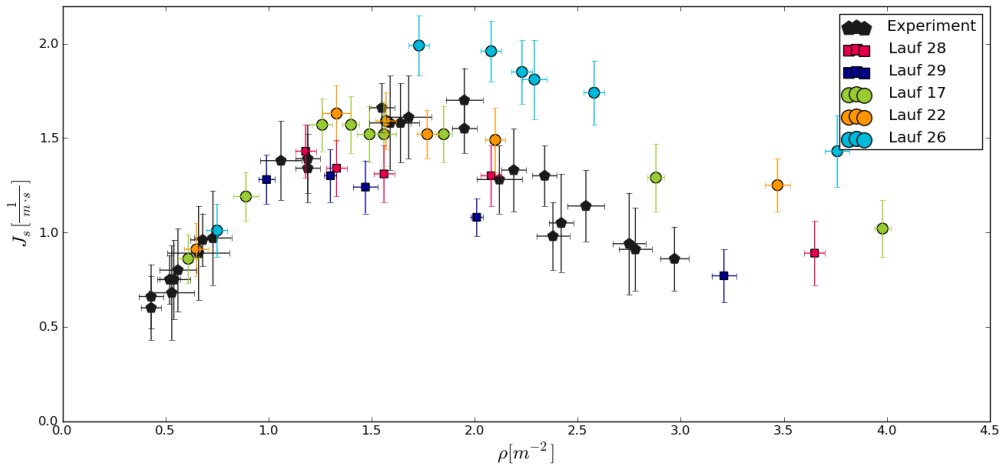


Abbildung 5.13: Fundamentaldiagramme *intpwidthped*

	Durchlauf 17	Durchlauf 22	Durchlauf 26
<i>intpwidthped</i>	0,10	0,30	0,90

	Durchlauf 28	Durchlauf 29
<i>intpwidthped</i>	0,90	0,45

Tabelle 5.5: Parametersätze bezüglich *intpwidthped*.

Der Simulationslauf 22 unterscheidet sich kaum von dem Vergleichslauf 17. Erst wenn man die Interpolationsweite auf 90 Zentimeter einstellt, ergeben sich Änderungen im Fundamentaldiagramm. Aufgrund der Modellkonfiguration mit $r_{c,ped} = 2 \text{ m}$ wird allerdings fast der gesamte Kraftverlauf interpoliert. Da dies der Konzeption des Modells widerspricht, ist der Parameter *intpwidthped* bei der Wahl sinnvoller Werte nicht für die Kalibrierung des Modells geeignet.

5.3.4 Abstoßende Kraft von Wänden

Faktor ν_{wall}

Die abstoßende Kraft von Wänden oder Hindernissen wird unter anderem durch den Faktor ν_{wall} bestimmt. Eine Vergrößerung dieses Faktors verringert die Kapazität einer

Engstelle, da die Agenten mehr Abstand zu den Wänden halten. Daher ist zu erwarten, dass die Personendichten vor der Engstelle steigen.

Auf der anderen Seite sorgen die stärkeren Abstoßungskräfte der Wände auch dafür, dass sich die Agenten weiter zur Mitte des Korridors hin orientieren. Da die Dichte über die gesamte Breite des Korridors gemessen wird, führt dieser Effekt also zu geringeren Dichten im Korridor.

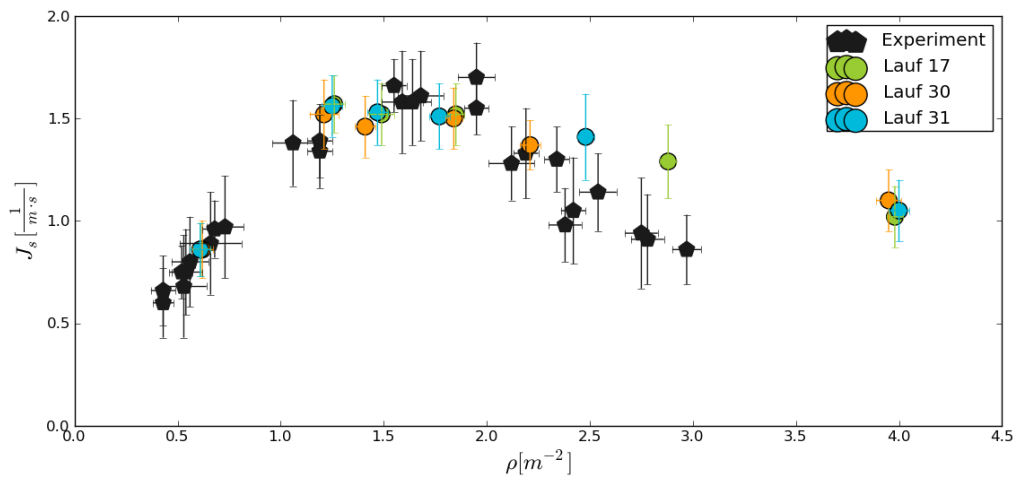


Abbildung 5.14: Fundamentaldiagramme ν_{wall}

	Durchlauf 17	Durchlauf 30	Durchlauf 31
ν_{wall}	0,20	0,15	0,25

Tabelle 5.6: Parametersätze bezüglich ν_{wall} .

Wie in Abbildung 5.14 zu erkennen ist, ergeben sich aus der Veränderung des Parameters ν_{wall} kaum Abweichungen im Fundamentaldiagramm. Verglichen mit dem Faktor ν_{ped} hat dieser Parameter also kaum Einfluss auf die modellierten Ergebnisse und eignet sich nur begrenzt für die Kalibrierung.

Parameter $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$

Maximalwert und Wirkradius der abstoßenden Kraft werden durch die Parameter $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$ bestimmt. In Abbildung 5.15 sind die Auswirkungen auf das Fundamentaldiagramm dargestellt, die sich aus einer Variation dieser Parameter ergeben.

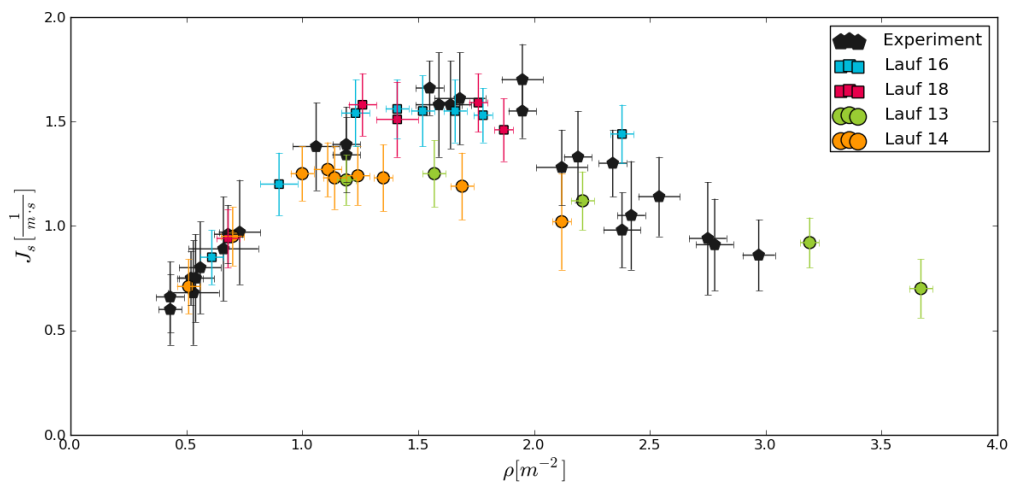


Abbildung 5.15: Fundamentaldiagramme $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$

	Durchlauf 13	Durchlauf 14
$f_{m,wall}$	3,00	1,50
$r_{c,wall}$	2,00	1,00
	Durchlauf 16	Durchlauf 18
$f_{m,wall}$	1,50	0,75
$r_{c,wall}$	1,00	0,75

Tabelle 5.7: Parametersätze bezüglich $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$.

Es ist gut zu erkennen, dass die maximalen Dichten deutlich abnehmen, je kleiner $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$ gewählt werden. Dies ist vermutlich damit zu begründen, dass sich in einer Engstelle bei geringerer Abstoßungskraft ein höhere Fluss einstellt und sich somit keine hohe Personendichte vor dieser Engstelle aufbaut.

5.4 Bewertung des Parametersatzes

Um die Qualität des Parametersatzes abschätzen zu können, sollte man sich nochmals die Rahmenbedingungen der Kalibrierung vor Augen führen. Bei theoretisch 20 variablen Parametern ergibt sich eine unüberschaubar große Menge möglicher Kombinationen. Da

jeder einzelne Simulationsdurchlauf außerdem recht zeitaufwändig ist, konnten nur gewisse Tendenzen aufgezeigt werden, die sich aus der Veränderung einzelner oder mehrerer Parameter ergeben. Vergleicht man die unterschiedlichen Fundamentaldiagramme, zeigt der Parametersatz 17 die beste Übereinstimmung mit dem empirisch ermittelten Fundamentaldiagramm. Daher wird dieser im folgenden Abschnitt eingehender untersucht.

Dabei hat sich gezeigt, dass der Freiflussast und der maximale spezifische Fluss gut zu reproduzieren sind. Schwierigkeiten bereitete es allerdings, eine gute Übereinstimmung des gestauten Astes zu erzielen. Der Grund wird erkennbar, wenn man für den Parametersatz 17 das Fundamentaldiagramm der Form $v(\rho)$ erstellt. In den vorangehenden Abschnitten wurde auf diese Form der Darstellung verzichtet, da das $J_s(\rho)$ -Diagramm die Unterschiede verschiedener Simulationen besser erkennen lässt.

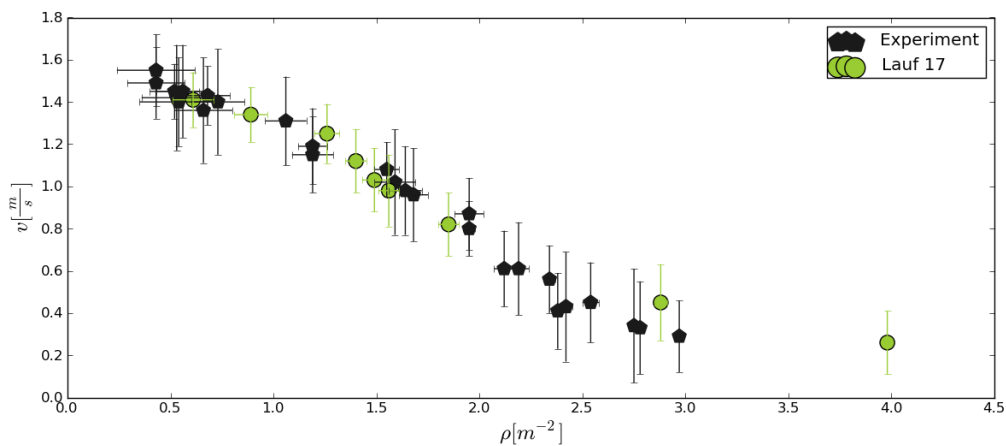


Abbildung 5.16: $v(\rho)$ -Diagramme Lauf 17

Es fällt auf, dass die Abweichungen der Geschwindigkeit deutlich geringer sind, als man es beim Blick auf das $J_s(\rho)$ -Diagramm vermuten würde. Die Geschwindigkeitsabnahme aufgrund steigender Dichte wird also insgesamt gut reproduziert. Warum ist es dann nicht möglich, den gestauten Ast im $J_s(\rho)$ -Diagramm exakt zu treffen? Der Grund besteht darin, dass bei hohen Dichten bereits kleine Änderungen der Geschwindigkeit ausreichen, um den spezifischen Fluss stark zu verändern (siehe Gleichung 3.5). Um selektiv die Geschwindigkeitsabnahme bei hohen Dichten zu beeinflussen, könnte man als weitere Parameter eine dichteabhängige, abstoßende Kraft [4] oder Wunschgeschwindigkeit eines Agenten einführen.

Andererseits ist es nicht wünschenswert und möglicherweise auch nicht erforderlich, die Vielzahl der Parameter weiter zu erhöhen, wie der Vergleich mit folgenden Daten zeigt.

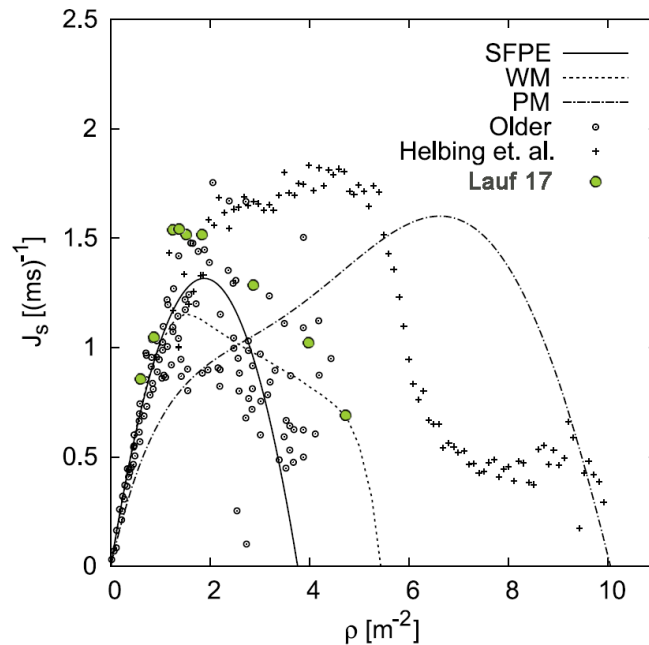


Abbildung 5.17: Parametersatz 17 im Vergleich [in Anlehnung an [35]]

Dargestellt sind die Fundamentaldiagramme des SFPE-Handbooks [28], einer Literaturstudie von Weidmann (WM) [44], dem Handrechenverfahren nach Predtechenskii und Milinskii (PM) [31] sowie experimentelle Daten von Older [30] und Helbing et al. [11].

Der modellierte Zusammenhang zwischen J_s und der Personendichte liegt in einem seriösen Rahmen. Verglichen mit dem Kurvenverlauf nach Weidmann (WM), dessen Fundamentaldiagramm auf einer sehr breiten Datengrundlage beruht, verläuft der gestaute Ast sogar steiler. Andererseits weist der modellierte Kurvenverlauf einen höheren Wert für $J_{s,max}$ auf, der sich aber leicht über eine Veränderung der Parameter einstellen ließe.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.5 diskutiert wurde, gibt es aufgrund der enormen Streuungen der erhobenen Daten derzeit kein anerkanntes Fundamentaldiagramm, das als absolute Referenz herangezogen werden könnte. Weitere Laborexperimente mit gut definierten und dokumentierten Rahmenbedingungen sind somit zur besseren Kalibrierung unerlässlich. Ebenso wird es jedoch auch sehr interessant sein, im weiteren Projektverlauf Vergleiche mit der Realität vorzunehmen, wie sie bislang nicht möglich waren. Wie

anhand der Abbildungen 5.16 und 5.17 zu erkennen ist, kann der Parametersatz 17 dabei als fundierter Ausgangspunkt dienen.

In Abbildung 5.14 wurde bereits die Problematik einer geometriespezifischen Kalibrierung angedeutet. In Abbildung 5.18 sind jeweils für identische Durchgangsbreiten die Messwerte aus Experiment und Simulation mit demselben Symbol gekennzeichnet.

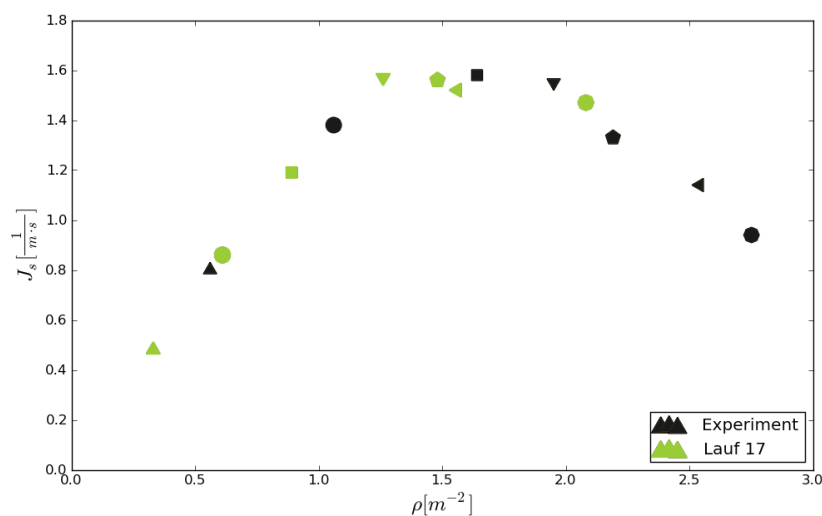


Abbildung 5.18: Ergebnisvergleich in Bezug auf einzelne Geometrien

Es ist gut zu erkennen, dass das Modell zwar einen ähnlichen Kurvenverlauf ergibt, einzelne Messwerte aber auf dieser Kurve verschoben sind. Die Unterschiede kommen dadurch zustande, weil sich die komplexen Vorgänge beim Durchlaufen einer Engstelle noch nicht optimal durch das Modell wiedergeben lassen. Um diesen Effekt genauer analysieren zu können, ist in den Abbildungen 5.19 und 5.20 der spezifische Fluss im Korridor in Abhängigkeit des Verhältnisses b_{Zu}/b_{Korr} ⁸ beziehungsweise b_{Ab}/b_{Korr} ⁹ dargestellt.

⁸Für die dargestellten Geometrien gilt $b_{Ab} = b_{Korr}$.

⁹Für die dargestellten Geometrien gilt $b_{Zu} = b_{Korr}$.

5. Empirische und simulierte Daten im Vergleich

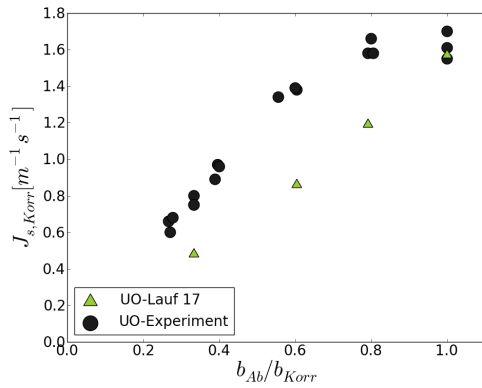


Abbildung 5.19: J_s in Abhängigkeit von b_{Zu}/b_{Korr}

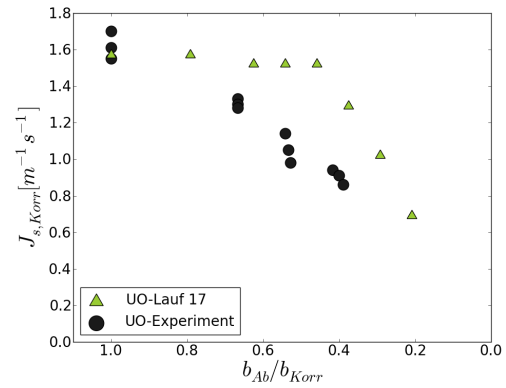


Abbildung 5.20: J_s in Abhängigkeit von b_{Ab}/b_{Korr}

Die Abbildungen zeigen, dass die experimentellen Ergebnisse nur im Bereich des optimalen Flusses genau reproduziert werden. In den Geometrien, in denen der spezifische Fluss durch die Zugangsbreite reguliert wird, ergeben sich aus der Modellierung zu geringe Personenströme. In diesem Bereich herrsch – analog zum Freiflussast im $J_s(\rho)$ -Diagramm – *free-flow-regime*, bei dem sich Störungen in Fließrichtung ausbreiten und die Strömung somit durch die Ereignisse stromaufwärts gesteuert wird. Im gestauten Bereich hingegen wird der Fluss durch die Breite des Korridorausgangs stromabwärts reguliert, da sich Störungen entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten [20]. Hier liegen die Messwerte des Modells oberhalb der experimentell ermittelten Daten.

Beide Abbildungen zeigen die Notwendigkeit einer Verbesserung des Modells insbesondere in Bezug auf die Dynamik an Engstellen. Dabei ist zu beachten, dass sich aufgrund psychologischer Effekte die Abhängigkeit zwischen Dichte und Geschwindigkeit unterscheiden kann, je nachdem, ob die Dichte in einem Personenstrom zu- oder abnimmt. Weitere Erläuterungen finden sich in der Fachliteratur [46].

An dieser Stelle ist der Hinweis angebracht, dass es bezüglich der Zielstellung des Projekts Hermes keine konservative¹⁰ Wahl der Parameter gibt. Sowohl ein zu geringer als auch ein zu großer prognostizierter Fluss können zu einer Unterschätzung der Gefahr führen. Wird an einer Engstelle der Fluss zu niedrig unterstellt, findet an dieser Stelle zwar eine

¹⁰Im Sinne von “auf der sicheren Seite liegend”.

konservative Einschätzung der Staugefahr statt, im weiteren Verlauf des Weges wird die Personenzahl aber niedriger eingeschätzt, als sie tatsächlich ist. Umgekehrt gilt dasselbe. Zu Beginn dieses Kapitels wurde darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Vergleichbarkeit sämtliche Untersuchungen mit derselben Programmversion durchgeführt werden.¹¹ Da parallel zur Kalibrierung jedoch Verbesserungen am Modell vorgenommen und Fehler behoben wurden, lohnt sich auch ein Vergleich mit der aktuellen Programmversion 952, der in Abbildung 5.21 dargestellt ist.

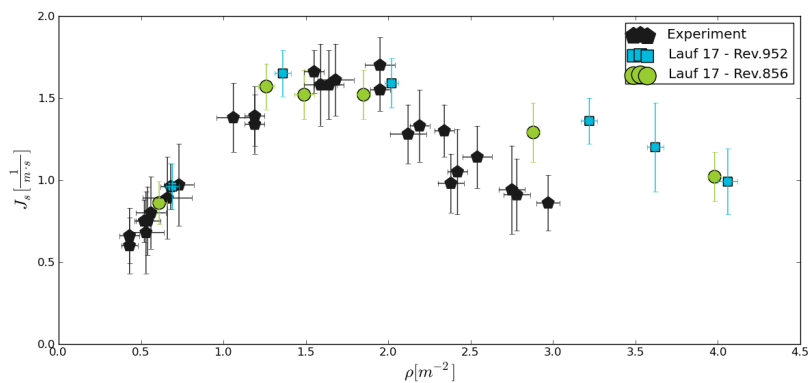


Abbildung 5.21: Fundamentaldiagramme unterschiedlicher Programmversionen

Betrachtet man die Verläufe der Fundamentaldiagramme insgesamt, unterscheiden sich die Versionen nur geringfügig voneinander. Da für beide Simulationen jedoch dieselben 6 Geometrien verwendet wurden, fällt die Verschiebung einzelner Messwerte im Dichtebereich ab $1,5 m^{-2}$ auf. Bei einer Ausgangsbreite von $b_{Ab} = 1,1 m$ stellt sich in Version 856 eine Dichte von $\rho = 1,85 m^{-2}$ vor der Engstelle ein, wohingegen bei Version 952 eine Dichte von $\rho = 3,22 m^{-2}$ auftritt. Da auch der spezifische Fluss reduziert wird, verringert sich bei Version 952 die in Abbildung 5.20 dargestellte Abweichung zu den empirischen Daten.

Zur Bewertung des Parametersatzes wäre es weiterhin interessant, die Ergebnisqualität in anderen Geometrien zu überprüfen. Zu diesem Zweck ist jedoch die Verwendung von so genannten Zwischenzielen notwendig, deren Wirkungsweise im folgenden Kapitel erläutert wird.

¹¹Lediglich für die Variation des Parameters τ wurde eine aktualisierte Version eingesetzt.

6 Anordnung von Zwischenzielen

Wendet man sich komplexeren Geometrien als dem bisher betrachteten offenen Korridor zu, so ist dies nur bei Verwendung von Zwischenzielen möglich. Nur so werden die Agenten nicht auf direktem Weg den Ausgang ansteuern, sondern auf realistische Weise beispielsweise eine Ecke in der Geometrie umrunden.

6.1 Qualitative Untersuchung als Ausgangspunkt

Einen sehr guten Ausgangspunkt für diese Untersuchung stellt die Masterarbeit von Freialdenhoven dar, in der speziell für das GCFM unterschiedliche Strategien analysiert werden, um die Fußgänger zum Ausgang zu leiten [10]. Zu den untersuchten Strategien gehören die Substitution des Ausgangs durch einen Zielpunkt, die Erstellung eines Vektorfeldes im Raum, an dem sich die Laufrichtung der Agenten ausrichtet sowie die Anordnung von linienförmigen Zwischenzielen, die von den Agenten angesteuert werden.

Zur Bewertung werden insbesondere qualitative Aspekte wie die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Querschnitt einer Ecke oder die effektiv durch den Personenstrom genutzte Breite berücksichtigt. Im Vergleich mit experimentellen Daten hat insbesondere die Verwendung von Hilfslinien zu guten Ergebnissen geführt und soll somit im GCFM angewendet werden. Gegenüber der Verwendung von Punkten bietet diese Methode den Vorteil, dass sich die Agenten besser verteilen, während es bei punktförmigen Zwischenzielen zu keilförmigen Stauungen kommt.

In Abbildung 6.1 ist die Vorgehensweise der Hilfslinienpositionierung dargestellt. Linie 1 bestimmt die grundsätzliche Laufrichtung der Agenten in Richtung der Ecke. Linie 2 ist in einem Winkel von 45° in der Ecke angeordnet, um die Agenten in einem gewissen Bogen um die Ecke herumzuführen. Durch die dritte Linie wird die anschließende Laufrichtung vorgegeben; diese könnte auch durch einen Raumausgang ersetzt werden. Es ist zu beachten, dass sich die Hilfslinien nicht direkt bis zur Wand erstrecken, sondern einen

Abstand einhalten, der dem halben Durchmesser der Agenten entspricht. Andernfalls würden diese aufgrund ihrer Ausdehnung gegen die Wand laufen [10].

Um eine gute Übereinstimmung mit empirischen Daten zu erzielen, wurde die exakte Anordnung der Hilfslinien variiert. Einerseits wurde Linie 1 um Winkel von 5, 10, 15 und 20 Grad gedreht, um die Fußgänger zum Innenpunkt der Ecke zu lenken. Andererseits wurde die Linienlänge auf 25, 50 und 75 Prozent der Korridorbreite verkürzt. Die Drehung um fünf Grad ohne Verkürzung der Linien, wie in Abbildung 6.2 gezeigt, hat zu den besten Ergebnissen geführt [10].

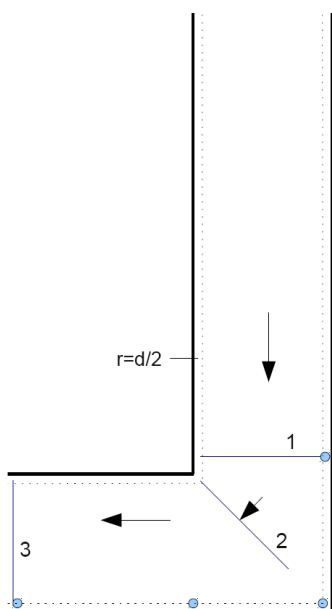


Abbildung 6.1: Prinzipielle Anordnung der Hilfslinien [in Anlehnung an [10]]

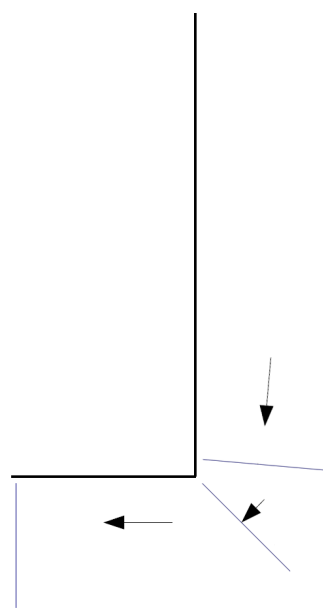


Abbildung 6.2: Anordnung mit bester Übereinstimmung [in Anlehnung an [10]]

6.2 Versuchsaufbau und Methodik

Die in der qualitativen Analyse als optimal ermittelte Anordnung der Hilfslinien soll auch zur Erprobung des Parametersatz 17 genutzt werden. In den folgenden Simulationen kommt ebenfalls die Programmversion 856 zum Einsatz. Wie in Abbildung 6.4 zu erkennen ist, wird die erste Hilfslinie um 5 Grad gedreht, sodass die Agenten bei geringen Personendichten selbstständig den kürzesten Weg um die Kurve wählen.

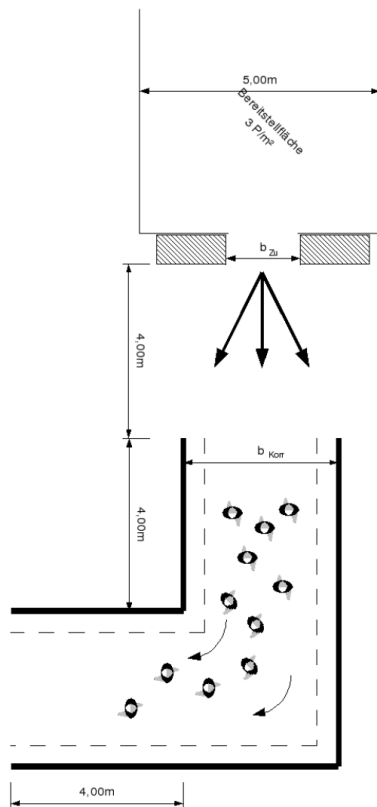


Abbildung 6.3: Experimentalgeometrie *Ecke-offen* [21]

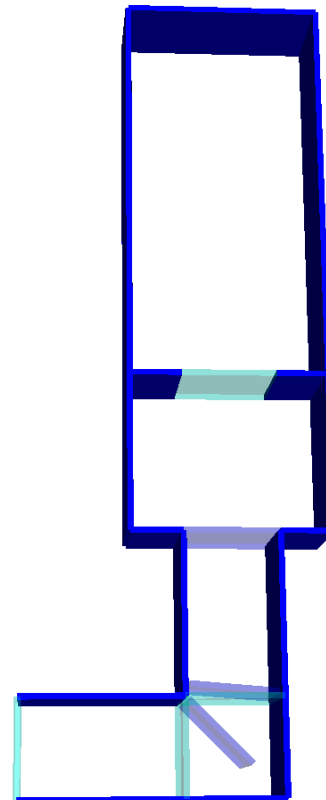


Abbildung 6.4: Modellgeometrie *Ecke-offen*

Die Ecke selbst ist als eigener, quadratischer Raum in die Geometrie integriert. Dies ist erforderlich, damit die Richtungswahl der Agenten ausschließlich durch die nächste Hilfslinie beeinflusst wird. Dieses Verfahren wurde auch von Freialdenhoven angewandt und ist somit erprobt.

Die modellierten Ergebnisse in der Ecke sollen daran gemessen werden, wie sich die Personendichte durch die Ecke verändert. In Abbildung 6.5 sind die Trajektorien eines Modelldurchlaufs sowie die beiden Messfelder dargestellt, die zur Fluss- und Dichtermittlung vor (1) und hinter (2) der Kurve dienen. In der inneren Ecke sind „Verwirbelungen“ zu erkennen, die bei realen Personenströmen nicht zu beobachten sind. Hierbei handelt es sich um einen Fehler im Modell, dessen Auswirkungen auf die Ergebnisse jedoch gering sind.

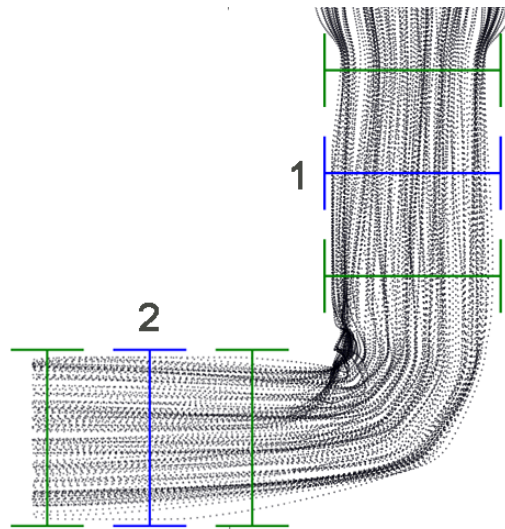


Abbildung 6.5: Messung in der Geometrie *Ecke-offen*

6.3 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

In Abbildung 6.6 ist das Verhältnis zwischen ρ_2 und ρ_1 dargestellt, also der Dichte nach und vor Durchlaufen der Ecke.

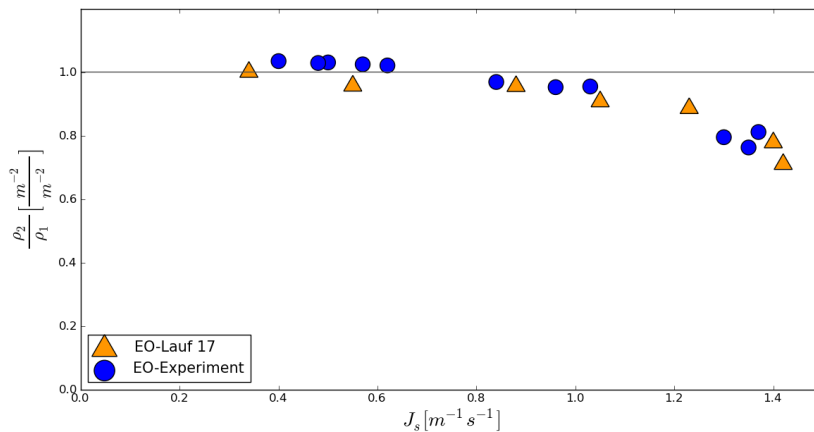


Abbildung 6.6: Einfluss einer 90°-Ecke auf die Personendichte

Dabei zeigt sich, dass die gewählte Anordnung der Zwischenziele und der Parametersatz 17 für die Geometrie der 90°-Ecke zu hervorragender Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten führt. Im Bereich niedriger spezifischer Flüsse durchläuft der Personenstrom die Ecke, ohne dass die Dichte signifikant reduziert wird. Ab einem spezi-

fischen Fluss $J_s \approx 1,0 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ verringert sich die Dichte nach der Kurve und beträgt bei $J_s \approx 1,4 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ schließlich nur noch etwa 70 bis 80 Prozent der Dichte vor der Kurve.

Der spezifische Fluss von $J_s \approx 1,4 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ scheint tatsächlich so etwas wie eine obere Grenze für die Geometrie *Ecke-offen* zu sein, wie an Abbildung 6.7 zu erkennen ist. In der Grafik wird die Abhängigkeit des spezifischen Flusses vom Verhältnis b_{Zu}/b_{Korr} zu dargestellt.¹²

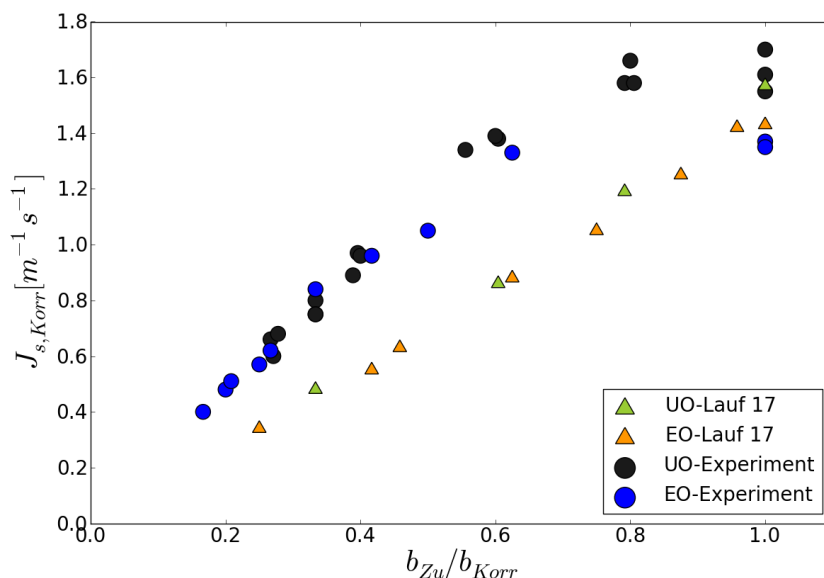


Abbildung 6.7: J_s in Abhängigkeit des Öffnungsanteils b_{Zu}/b_{Korr} (*Ecke-offen*)

Es ist auffällig, dass sich die Messwerte der Experimente UO und EO bis zu einem Wert $b_{Zu}/b_{Korr} \approx 0,6$ kaum voneinander unterscheiden. Mit dem spezifischen Fluss von $J_s \approx 1,4 \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ist dann aber ein Maximum erreicht, das auch nicht überschritten wird, wenn mit $b_{Zu}/b_{Korr} = 1,0$ ungehinderter Zugang zum Korridor möglich ist. Für die modellierten Daten ist ein vergleichbarer Maximalwert nicht eindeutig zu erkennen, da der spezifische Fluss ohnehin insgesamt niedriger verläuft.

¹²Für die dargestellten Geometrien gilt $b_{Ab} = b_{Korr}$.

7 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte ein Parametersatz entwickelt werden, der die grundsätzliche Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des spezifischen Flusses von der Personendichte gut reproduziert. Abweichungen betreffen den Bereich hoher Personendichten, der nicht selektiv durch Parametervariationen angepasst werden konnte. Dieser Fehler relativiert sich allerdings, wenn man weitere Erhebungen aus der Fachliteratur zum Vergleich heranzieht, deren Messwerte große Streuungen aufweisen. Hier zeigt sich die Notwendigkeit weiterer experimenteller Untersuchungen, um die empirische Datenbasis zu verbessern.

Betrachtet man nicht den Gesamtverlauf der Fundamentaldiagramme, sondern vergleicht die Ergebnisse einzelner Geometrien miteinander, zeigen sich größere Abweichungen zwischen Experimenten und Modell. Der Personenfluss beim Durchströmen einer Engstelle wird nicht zuverlässig reproduziert, wobei sowohl zu geringe als auch zu hohe Werte modelliert werden. Die Modellkalibrierung war in Bezug auf diesen Aspekt nicht möglich, so dass Änderungen an den Modellgrundlagen erforderlich sind, um hier bessere Ergebnisse zu erzielen.

Untersuchungen in der Geometrie *Ecke-offen* konnten für die gewählte Anordnung der Hilfslinien die guten qualitativen Ergebnisse einer vorangegangenen Untersuchung auch auf quantitativer Ebene bestätigen. Die Dichteänderungen bei Durchlaufen der Ecke stimmen über den gesamten Verlauf des spezifischen Flusses sehr gut mit experimentellen Daten überein. Der ermittelte Parametersatz funktioniert somit gleichermaßen im geraden Korridor wie in einer 90°-Ecke.

Für weitere Geometrien konnte die Leistungsfähigkeit des Modells und des ermittelten Parametersatzes im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft werden. Dies bietet sich daher als Fragestellung für weitere Untersuchungen an. Interessant wäre dabei insbesondere eine Simulation der Personenströme auf Tribünen, da für dieses Szenario bereits Analysen mit anderen Modellen durchgeführt wurden. Zu berücksichtigen ist dabei die komplexe

Implementierung des theoretischen Modells in ein Computerprogramm, bei der sich auch kleine Abweichungen auf die Ergebnisse der Simulationen auswirken können.

Gemäß dem Eröffnungszitat dieser Arbeit kann ein Modell niemals “wahr”, sondern allenfalls nützlich sein. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen diese Aussage auch für das untersuchte Modell. Dass es nicht “wahr” ist, ist einerseits damit zu begründen, dass ein Modell per Definition immer Vereinfachungen beinhaltet. Darüber hinaus konnten für einige Aspekte aber auch ganz konkrete Abweichungen ermittelt werden.

Ebenso konnte aber auch gezeigt werden, dass bereits jetzt in wichtigen Punkten gute Übereinstimmung mit empirischen Daten erzielt wird und dass weitere Verbesserungen möglich sind. Im Sinne von George Box verdient das Modell folglich auch das Prädikat “nützlich”, da es (nicht nur) für den Einsatz im Projekt Hermes sehr gut geeignet ist.

Tabellenverzeichnis

3.1	Beispielhafte Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit.	11
4.1	Parameterübersicht.	31
5.1	Parametersätze bezüglich der Ellipsenmaße.	43
5.2	Parametersätze bezüglich τ	45
5.3	Parametersätze bezüglich ν_{ped}	47
5.4	Parametersätze bezüglich $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$	48
5.5	Parametersätze bezüglich $intpwidthped$	49
5.6	Parametersätze bezüglich ν_{wall}	50
5.7	Parametersätze bezüglich $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$	51

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipiskizze Hermes [9]	5
3.1	Fundamentaldiagramme für die Fußgängerbewegung in der Ebene [35] . .	12
4.1	Interpolation der Kraft $\overrightarrow{F_{ij}^{rep}}$ [in Anlehnung an [4]]	22
4.2	Punktförmige Modellierung der Wand [4]	23
4.3	Entfernung d_{ij} zwischen zwei Ellipsen [4]	25
4.4	Maximale Annäherung zweier Ellipsen ohne Überschneidung [4]	26
4.5	Maximale Annäherung zwischen Ellipse und einer Geraden [4]	27
4.6	Schema des Linked-Cell-Verfahrens zur Erstellung der Nachbarschaftslisten [in Anlehnung an [37]]	30
5.1	Bekleidung der Probanden [21]	33
5.2	Experimentalgeometrie <i>unidirektional-offen</i> [21]	34
5.3	Modellgeometrie <i>unidirektional-offen</i>	34
5.4	Beispiel für die Auswertung der Trajektorien	37
5.5	Fundamentaldiagramme <i>unidirektional-offen</i> - Lauf 12	38
5.6	Im Experiment ermittelte Trajektorien	41
5.7	Im Modell ermittelte Trajektorien	41
5.8	Fundamentaldiagramme b_{max} , b_{min} , a_{τ} und a_{min}	42
5.9	Fundamentaldiagramme τ	45
5.10	Oszillationen und Überlappungen in Abhängigkeit von ν_{ped} [4]	46
5.11	Fundamentaldiagramme ν_{ped}	46
5.12	Fundamentaldiagramme $f_{m,ped}$ und $r_{c,ped}$	48
5.13	Fundamentaldiagramme <i>intpwidthped</i>	49
5.14	Fundamentaldiagramme ν_{wall}	50
5.15	Fundamentaldiagramme $f_{m,wall}$ und $r_{c,wall}$	51
5.16	$v(\rho)$ -Diagramme Lauf 17	52
5.17	Parametersatz 17 im Vergleich [in Anlehnung an [35]]	53
5.18	Ergebnisvergleich in Bezug auf einzelne Geometrien	54

5.19	J_s in Abhängigkeit von b_{Zu}/b_{Korr}	55
5.20	J_s in Abhängigkeit von b_{Ab}/b_{Korr}	55
5.21	Fundamentaldiagramme unterschiedlicher Programmversionen	56
6.1	Prinzipielle Anordnung der Hilfslinien [in Anlehnung an [10]]	58
6.2	Anordnung mit bester Übereinstimmung [in Anlehnung an [10]]	58
6.3	Experimentalgeometrie <i>Ecke-offen</i> [21]	59
6.4	Modellgeometrie <i>Ecke-offen</i>	59
6.5	Messung in der Geometrie <i>Ecke-offen</i>	60
6.6	Einfluss einer 90°-Ecke auf die Personendichte	60
6.7	J_s in Abhängigkeit des Öffnungsanteils b_{Zu}/b_{Korr} (<i>Ecke-offen</i>)	61

Literatur

- [1] BÖHLEFELDT, C.: *Empirische Erfassung des Fundamentaldiagramms für geringe Wegbreiten*. Bachelorthesis, Bergische Universität Wuppertal, 2008.
- [2] BUCHMUELLER, S. und U. WEIDMANN: *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*. Techn. Ber. Schriftenreihe 132, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2007.
- [3] CHATTARAJ, U., A. SEYFRIED und P. CHAKROBORTY: *Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram Across Cultures*. *Advances in Complex Systems (ACS)*, 12(3):393–405, 2009.
- [4] CHRAIBI, M., A. SEYFRIED und A. SACHDSCHNEIDER: *Generalized centrifugal force model for pedestrian dynamics*. *Physical Review E*, 82:046111, 2010.
- [5] CHRAIBI, M., A. SEYFRIED, A. SACHDSCHNEIDER und W. MACKENS: *Quantitative Description of Pedestrian Dynamics with a Force-based Model*. In: *2009 IE-EE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, Bd. 3, S. 583–586, Los Alamitos, CA, USA, 2009.
- [6] CHRAIBI, M., A. SEYFRIED, A. SACHDSCHNEIDER und W. MACKENS: *Quantitative Verification of a Force-based Model for Pedestrian Dynamics*. In: *Traffic and Granular Flow 2009*, 2009.
- [7] ESPRIT ARENA: *Fakten und Zahlen - Heizungsanlage*. http://www.espritarena.de/de/contentid/9/3_2_0/content [Stand: 01.07.11].
- [8] ESPRIT ARENA: *Fakten und Zahlen - Zuschaueranzahl*. www.espritarena.de/de/contentid/24/3_2_0/content [Stand: 01.07.11].
- [9] FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH: *Hermes - Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen*. <http://www2.fz-juelich.de/jsc/index.php?index=4424&print=1> [Stand: 09.02.11].

- [10] FREIALDENHOVEN, M.: *Modellierung der Wunschrichtung selbstgetriebener Teilchen am Beispiel der Fußgängerdynamik*. Diplomarbeit, Fachhochschule Aachen, 2010.
- [11] HELBING, D., A. JOHANSSON und H. Z. AL-ABIDEEN: *Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study*. Physical Review E, 75:046109, 2007.
- [12] HELBING, D. und P. MOLNÁR: *Social force model for pedestrian dynamics*. Phys. Rev. E, 51:4282–4286, 1995.
- [13] HOFFKNECHT, A. und S. KIES: *Forschung für die zivile Sicherheit - Schutz und Rettung von Menschen*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2010.
- [14] HOLL, S. und A. SEYFRIED: *Hermes - an Evacuation Assistant for Mass Events*. inSiDe, 7(1):60–61, 2009.
- [15] HOLL, S. und A. SEYFRIED: *Computersimulationen zur Analyse und Optimierung des Evakuierungsprozesses*. sicher ist sicher. Arbeitsschutz aktuell, 61:368–371, 2010.
- [16] HOOGENDOORN, S. P., P. BOVY und W. DAAMEN: *Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modelling*. In: SCHRECKENBERG, M. und S. SHARMA (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, S. 123–155, 2002.
- [17] HOOGENDOORN, S. P. und P. H. L. BOVY: *Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models*. Transp. Res. Part B: Methodological, 38(2):169–190, 2004.
- [18] HOOGENDOORN, S. P. und W. DAAMEN: *Pedestrian Behavior at Bottlenecks*. Transportation Science, 39(2):147–159, 2005.
- [19] HOOGENDOORN, S. P., W. DAAMEN und P. H. L. BOVY: *Microscopic Pedestrian Traffic Data Collection and Analysis by Walking Experiments: Behaviour at Bottlenecks*. In: GALEA, E. R. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, S. 89–100. CMS Press, London, 2003.
- [20] HUGHES, R. L.: *A continuum theory for the flow of pedestrians*. Transportation Research Part B, 36:507–535, 2002.

- [21] KEIP, C. und K. RIES: *Dokumentation von Versuchen zur Personenstromdynamik - Projekt Hermes*. 2010.
- [22] KEMLOH WAGOUM, A. U. und A. SEYFRIED: *Optimizing the evacuation time of pedestrians in a graph-based navigation*. In: PANDA, M. und U. CHATTARARAJ (Hrsg.): *In Developments in Road Transportation*, S. 188–196. Macmillian Publishers India Ltd, 2010.
- [23] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): *Musterbauordnung (MBO)*. <http://is-ergebau.de/> [Stand: 01.07.11], 2002.
- [24] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV)*. <http://is-ergebau.de/> [Stand: 01.07.11], 2005.
- [25] LEWIN, K. (Hrsg.): *Field Theory in Social Science*. Greenwood Press Publishers, 1951.
- [26] MEHLICH, J.: *Laufzeitoptimierung von Simulationen raumkontinuierlicher Modelle der Fußgängerdynamik mithilfe von Nachbarschaftslisten*. Masterthesis, Fachhochschule Aachen, 2009.
- [27] MÜLLER, K.: *Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen*. Dissertation, Technische Hochschule Magdeburg, 1981.
- [28] NELSON, H. E. und F. W. MOWRER: *Emergency Movement*. In: DiNENNO, P. J. (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Kap. 14, S. 367–380. National Fire Protection Association, Quincy MA, 3. Aufl., 2002.
- [29] NGUYEN, T.: *Analyse der Grundlagen des Fundamentaldiagramms für die Fußgängerbewegung*. Diplomathesis, Bergische Universität Wuppertal, 2006.
- [30] OLDER, S.: *Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets*. *Traffic Engineering and Control*, 10:160–163, 1968.

- [31] PREDTECHENSKII, V. M. und A. I. MILINSKII: *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. Amerind Publishing, New Dehli, 1978.
- [32] PREDTECHENSKII, W. M. und A. I. MILINSKII: *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1971.
- [33] ROGSCH, C., A. SEYFRIED und W. KLINGSCH: *Comparative Investigations of the Dynamical Simulation of Foot Traffic Flow*. In: WALDAU, N., P. GATTERMANN, H. KNOFLACHER und M. SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, S. 357–362. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [34] SCHADSCHNEIDER, A.: *Physik des Straßenverkehrs*. Vorlesungsskript, 2004.
- [35] SCHADSCHNEIDER, A., W. KLINGSCH, H. KLUEPFEL, T. KRETZ, C. ROGSCH und A. SEYFRIED: *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Bd. 5, Kap. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, S. 3142–3176. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [36] SEYFRIED, A., M. BOLTES, J. KÄHLER, W. KLINGSCH, A. PORTZ, T. RUPPRECHT, A. SCHADSCHNEIDER, B. STEFFEN und A. WINKENS: *Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks*. In: KLINGSCH, W. W. F., C. ROGSCH, A. SCHADSCHNEIDER und M. SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, S. 145–156. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [37] SEYFRIED, A., M. CHRAIBI, J. MEHLICH und A. SCHADSCHNEIDER: *Runtime Optimization of Force Based Models within the Hermes Project*. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*.
- [38] SEYFRIED, A. und A. SCHADSCHNEIDER: *Fundamental Diagram and Validation of Crowd Models*. In: UMEO, H., S. MORISHITA, K. NISHINARI, T. KOMATSUZAKI und S. BANDINI (Hrsg.): *Cellular Automata*, Bd. 5191/2008 d. Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, S. 563–566. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [39] SEYFRIED, A., B. STEFFEN und T. LIPPERT: *Basics of modelling the pedestrian flow*. *Physica A*, 368:232–238, 2006.

- [40] SEYFRIED, A., B. STEFFEN, T. WINKENS, A. RUPPRECHT, M. BOLTES und W. KLINGSCH: *Empirical data for pedestrian flow through bottlenecks*. In: APPERT-ROLLAND, C., F. CHEVOIR, P. GONDRET, S. LASSARRE, J.-P. LEBACQUE und M. SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '07*, S. 189–199. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [41] STEFFEN, B. und A. SEYFRIED: *The repulsive force in continous space models of pedestrian movement*. 2008. arXiv:0803.1319v1.
- [42] SUTMANN, G. und V. STEGAILOV: *Optimization of neighbor list techniques in liquid matter simulations*. Journal of Molecular Liquids, 125(2-3):197–203, 125 2006.
- [43] THOMAS, M.: *Personenströme auf Tribünen - Vergleichende Untersuchung mit makroskopischen und mikroskopischen Modellen*. Masterthesis, Bergische Universität Wuppertal, 2011.
- [44] WEIDMANN, U.: *Transporttechnik der Fussgänger*. Techn. Ber. Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Institut für Verkehrsplanung,Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, 1993.
- [45] YU, W. J., L. CHEN, R. DONG und S. DAI: *Centrifugal force model for pedestrian dynamics*. Phys. Rev. E, 72(2):026112, 2005.
- [46] YUE, H., H. GUAN, J. ZHANG und C. SHAO: *Study on bi-direction pedestrian flow using cellular automata simulation*. Physica A, 389(3):527–539, 2010.
- [47] ZHENG, X. und P. PALFFY-MUHORAY: *Distance of closest approach of two arbitrary hard ellipses in two dimensions*. Phys E, 75(6):061709, 2007.

Übersicht der Experimente *unidirektional-offen*

Experiment	Name	b_{zu} [m]	b_{Korr} [m]	b_{Ab} [m]	N
1	C-050-180-180	0.50	1.80	1.80	61
2	C-060-180-180	0.60	1.80	1.80	66
3	C-070-180-180	0.70	1.80	1.80	111
4	C-100-180-180	1.00	1.80	1.80	121
5	C-145-180-180	1.45	1.80	1.80	175
6	C-180-180-180	1.80	1.80	1.80	220
7	C-180-180-120	1.80	1.80	1.20	170
8	C-180-180-095	1.80	1.80	0.95	159
9	C-180-180-070	1.80	1.80	0.70	148
10	C-065-240-240	0.65	2.40	2.40	70
11	C-080-240-240	0.80	2.40	2.40	118
12	C-095-240-240	0.95	2.40	2.40	108
13	C-145-240-240	1.45	2.40	2.40	155
14	C-190-240-240	1.90	2.40	2.40	218
15	C-240-240-240	2.40	2.40	2.40	246
16	C-240-240-160	2.40	2.40	1.60	276
17	C-240-240-130	2.40	2.40	1.30	247
18	C-240-240-100	2.40	2.40	1.00	254
19	C-080-300-300	0.80	3.00	3.00	119
20	C-100-300-300	1.00	3.00	3.00	100
21	C-120-300-300	1.20	3.00	3.00	163
22	C-180-300-300	1.80	3.00	3.00	208
23	C-240-300-300	2.40	3.00	3.00	296
24	C-300-300-300	3.00	3.00	3.00	349
25	C-300-300-200	3.00	3.00	2.00	351
26	C-300-300-160	3.00	3.00	1.60	349
27	C-300-300-120	3.00	3.00	1.20	348
28	C-300-300-080	3.00	3.00	0.80	270

Parametersätze *unidirektional-offen*

	$\mu(v_0)$	$\sigma(v_0)$	$\mu(b_{max})$	$\mu(b_{min})$	$\mu(a_T)$	$\mu(a_{min})$	$\mu(T)$	V_{ped}	V_{wall}	intpwidth _{ped}	intpwidth _{wall}	$f_{m,ped}$	$f_{m,wall}$	$r_{c,ped}$	$r_{c,wall}$
12	1,24	0,26	0,25	0,20	0,50	0,20	0,50	0,30	0,20	0,10	0,10	3,00	3,00	2,00	2,00
13	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,30	0,20	0,10	0,10	3,00	3,00	2,00	2,00
14	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,30	0,20	0,10	0,10	3,00	1,50	2,00	1,00
15	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,20	0,20	0,10	0,10	3,00	3,00	2,00	2,00
16	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	3,00	1,50	2,00	1,00
17	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
18	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	3,00	0,75	2,00	0,75
19	1,60	0,26	0,25	0,20	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
20	1,60	0,26	0,13	0,10	0,50	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
21	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,20	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
22	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,30	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
23	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,00	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
24	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	2,00	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
25	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,20	0,50	0,23	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
26	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,90	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
27	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,90	0,10	6,00	1,50	2,00	1,00
28	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,90	0,10	10,00	1,50	2,00	1,00
29	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,90	0,10	10,00	1,50	2,00	1,00
30	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,15	0,45	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
31	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,25	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
32	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	1,00	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
33	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,60	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
34	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,10	4,00	1,50	2,00	1,00
35	1,60	0,26	0,13	0,10	0,25	0,10	0,50	0,25	0,20	0,10	0,30	4,00	1,50	1,40	1,00

Ergebnisse *unidirektional-offen*

		ρ	J_s	v	$\sigma(\rho)$	$\sigma(J_s)$	$\sigma(v)$
uo-300-300-300	Exp.	1.95	1.70	0.87	0.17	0.09	0.07
uo-240-300-300	Exp.	1.55	1.66	1.08	0.13	0.06	0.06
uo-180-300-300	Exp.	1.19	1.39	1.19	0.18	0.06	0.07
uo-120-300-300	Exp.	0.68	0.96	1.43	0.14	0.06	0.11
uo-100-300-300	Exp.	0.52	0.75	1.45	0.13	0.05	0.12
uo-080-300-300	Exp.	0.43	0.66	1.55	0.17	0.06	0.19
uo-300-300-200	Exp.	2.34	1.30	0.56	0.16	0.06	0.03
uo-300-300-160	Exp.	2.42	1.05	0.43	0.26	0.06	0.03
uo-300-300-120	Exp.	2.78	0.91	0.33	0.22	0.08	0.02
uo-240-240-240	Exp.	1.95	1.55	0.80	0.13	0.06	0.03
uo-190-240-240	Exp.	1.64	1.58	0.98	0.21	0.09	0.08
uo-145-240-240	Exp.	1.06	1.38	1.31	0.21	0.10	0.10
uo-095-240-240	Exp.	0.73	0.97	1.4	0.25	0.09	0.13
uo-080-240-240	Exp.	0.56	0.80	1.45	0.22	0.09	0.13
uo-065-240-240	Exp.	0.43	0.60	1.49	0.17	0.05	0.14
uo-240-240-160	Exp.	2.19	1.33	0.61	0.22	0.06	0.05
uo-240-240-130	Exp.	2.54	1.14	0.45	0.19	0.09	0.04
uo-240-240-100	Exp.	2.75	0.94	0.34	0.27	0.08	0.02
uo-180-180-180	Exp.	1.68	1.61	0.96	0.22	0.11	0.07
uo-145-180-180	Exp.	1.59	1.58	1.02	0.25	0.10	0.10
uo-100-180-180	Exp.	1.19	1.34	1.15	0.18	0.06	0.10
uo-070-180-180	Exp.	0.66	0.89	1.36	0.25	0.15	0.14
uo-060-180-180	Exp.	0.54	0.75	1.40	0.21	0.08	0.19
uo-050-180-180	Exp.	0.53	0.68	1.42	0.25	0.11	0.17
uo-180-180-120	Exp.	2.12	1.28	0.61	0.18	0.11	0.05
uo-180-180-095	Exp.	2.38	0.98	0.41	0.18	0.08	0.02
uo-180-180-070	Exp.	2.97	0.86	0.29	0.17	0.07	0.01
uo-190-240-240	12	0.48	0.51	1.07	0.12	0.04	0.09
uo-240-240-240	12	0.73	0.69	0.96	0.12	0.04	0.08
uo-240-240-150	12	1.96	0.47	0.24	0.10	0.04	0.01
uo-240-240-130	12	2.27	0.37	0.17	0.11	0.04	0.01
uo-240-240-110	12	2.49	0.29	0.12	0.11	0.03	0.01
uo-240-240-090	12	2.65	0.21	0.08	0.11	0.04	0.01
uo-240-240-140	12	2.14	0.42	0.20	0.09	0.03	0.01
uo-240-240-190	12	1.08	0.68	0.64	0.12	0.03	0.05
uo-240-240-150	13	1.19	1.22	1.02	0.12	0.04	0.05
uo-240-240-130	13	1.57	1.25	0.79	0.16	0.05	0.05
uo-240-240-110	13	3.19	0.92	0.29	0.12	0.04	0.01
uo-240-240-090	13	3.67	0.70	0.19	0.14	0.05	0.01
uo-240-240-120	13	2.21	1.12	0.50	0.14	0.05	0.04
uo-145-240-240	14	0.51	0.71	1.41	0.13	0.05	0.09
uo-190-240-240	14	0.70	0.95	1.35	0.14	0.05	0.09
uo-240-240-240	14	1.00	1.25	1.26	0.13	0.05	0.07
uo-240-240-190	14	1.11	1.27	1.14	0.13	0.06	0.05
uo-240-240-150	14	1.14	1.23	1.08	0.15	0.05	0.06
uo-240-240-130	14	1.24	1.24	1.00	0.14	0.05	0.06
uo-240-240-110	14	1.35	1.23	0.92	0.16	0.04	0.06
uo-240-240-090	14	1.69	1.19	0.71	0.16	0.05	0.05
uo-240-240-070	14	2.12	1.02	0.48	0.23	0.04	0.04

Ergebnisse *unidirektional-offen*

		ρ	J_s	v	$\sigma(\rho)$	$\sigma(J_s)$	$\sigma(v)$
uo-145-240-240	15	0.78	1.08	1.38	0.15	0.06	0.07
uo-190-240-240	15	1.18	1.56	1.33	0.17	0.05	0.06
uo-240-240-240	15	1.64	2.02	1.23	0.15	0.06	0.06
uo-240-240-190	15	1.96	2.03	1.04	0.16	0.06	0.04
uo-240-240-150	15	2.13	1.98	0.93	0.14	0.04	0.04
uo-240-240-130	15	2.43	1.93	0.79	0.14	0.05	0.06
uo-240-240-110	15	3.35	1.71	0.51	0.17	0.05	0.03
uo-240-240-090	15	4.80	1.38	0.27	0.17	0.08	0.03
uo-240-240-070	15	6.88	0.95	0.14	0.18	0.05	0.01
uo-145-240-240	16	0.61	0.85	1.40	0.13	0.05	0.09
uo-190-240-240	16	0.90	1.20	1.34	0.15	0.08	0.07
uo-240-240-240	16	1.23	1.54	1.26	0.16	0.06	0.06
uo-240-240-190	16	1.41	1.56	1.11	0.14	0.05	0.05
uo-240-240-150	16	1.52	1.55	1.02	0.17	0.05	0.06
uo-240-240-130	16	1.66	1.55	0.93	0.15	0.05	0.04
uo-240-240-110	16	1.78	1.53	0.86	0.13	0.04	0.04
uo-240-240-090	16	2.38	1.44	0.61	0.14	0.05	0.03
uo-080-240-240	17	0.33	0.48	1.47	0.11	0.04	0.11
uo-145-240-240	17	0.61	0.86	1.41	0.13	0.05	0.10
uo-190-240-240	17	0.89	1.19	1.34	0.13	0.06	0.08
uo-240-240-240	17	1.26	1.57	1.25	0.14	0.05	0.06
uo-240-240-190	17	1.40	1.57	1.12	0.15	0.04	0.05
uo-240-240-160	17	1.48	1.56	1.06	0.13	0.05	0.05
uo-240-240-150	17	1.49	1.52	1.03	0.15	0.06	0.06
uo-240-240-130	17	1.56	1.52	0.98	0.17	0.06	0.05
uo-240-240-110	17	1.85	1.52	0.82	0.15	0.04	0.05
uo-240-240-100	17	2.08	1.47	0.71	0.15	0.04	0.04
uo-240-240-090	17	2.88	1.29	0.45	0.18	0.04	0.03
uo-240-240-070	17	3.98	1.02	0.26	0.15	0.04	0.01
uo-240-240-050	17	4.75	0.69	0.15	0.13	0.07	0.01
uo-145-240-240	17 V.952	0.69	0.96	1.40	0.14	0.04	0.09
uo-240-240-240	17 V.952	1.36	1.65	1.21	0.14	0.05	0.05
uo-240-240-150	17 V.952	2.02	1.59	0.79	0.15	0.04	0.04
uo-240-240-110	17 V.952	3.22	1.36	0.42	0.14	0.05	0.02
uo-240-240-090	17 V.952	3.62	1.20	0.33	0.27	0.05	0.03
uo-240-240-070	17 V.952	4.06	0.99	0.25	0.20	0.06	0.02
uo-145-240-240	18	0.68	0.94	1.38	0.14	0.05	0.09
uo-240-240-240	18	1.26	1.58	1.25	0.15	0.06	0.05
uo-240-240-150	18	1.41	1.51	1.08	0.18	0.09	0.05
uo-240-240-110	18	1.76	1.59	0.91	0.14	0.04	0.05
uo-240-240-070	18	1.87	1.46	0.78	0.15	0.04	0.04
uo-145-240-240	19	0.52	0.73	1.40	0.12	0.04	0.08
uo-240-240-240	19	1.11	1.32	1.21	0.14	0.05	0.06
uo-240-240-150	19	1.27	1.27	1.01	0.13	0.05	0.05
uo-240-240-110	19	2.15	1.23	0.58	0.11	0.04	0.02
uo-240-240-090	19	2.89	1.02	0.35	0.14	0.04	0.02
uo-240-240-070	19	3.49	0.74	0.21	0.15	0.06	0.02

Ergebnisse *unidirektional-offen*

		ρ	J_s	v	$\sigma(\rho)$	$\sigma(J_s)$	$\sigma(v)$
uo-145-240-240	20	0.51	0.73	1.43	0.13	0.04	0.11
uo-240-240-240	20	1.07	1.31	1.23	0.14	0.06	0.08
uo-240-240-150	20	1.32	1.3	0.99	0.14	0.04	0.05
uo-240-240-110	20	1.45	1.22	0.84	0.16	0.07	0.06
uo-240-240-090	20	1.62	1.16	0.72	0.16	0.06	0.06
uo-240-240-070	20	3.23	1.04	0.33	0.14	0.05	0.01
uo-145-240-240	21	0.54	0.76	1.41	0.12	0.05	0.09
uo-240-240-240	21	1.07	1.36	1.27	0.14	0.04	0.07
uo-240-240-150	21	1.34	1.38	1.03	0.14	0.04	0.05
uo-240-240-110	21	1.50	1.31	0.88	0.14	0.04	0.06
uo-240-240-090	21	2.37	1.18	0.50	0.16	0.04	0.03
uo-240-240-070	21	3.22	1.01	0.31	0.15	0.03	0.01
uo-145-240-240	22	0.65	0.91	1.41	0.14	0.06	0.09
uo-240-240-240	22	1.33	1.63	1.23	0.15	0.07	0.05
uo-240-240-150	22	1.57	1.59	1.01	0.15	0.05	0.04
uo-240-240-110	22	1.77	1.52	0.86	0.13	0.05	0.04
uo-240-240-090	22	2.10	1.49	0.71	0.17	0.05	0.05
uo-240-240-070	22	3.47	1.25	0.36	0.14	0.06	0.02
uo-145-240-240	23	0.61	0.85	1.41	0.13	0.04	0.10
uo-240-240-240	23	1.26	1.57	1.25	0.14	0.05	0.06
uo-240-240-150	23	1.53	1.55	1.03	0.14	0.04	0.05
uo-240-240-110	23	1.85	1.52	0.82	0.15	0.04	0.05
uo-240-240-090	23	2.80	1.28	0.46	0.13	0.04	0.03
uo-240-240-070	23	4.00	1.02	0.26	0.13	0.04	0.01
uo-145-240-240	24	0.61	0.85	1.41	0.13	0.04	0.10
uo-240-240-240	24	1.26	1.56	1.25	0.14	0.04	0.06
uo-240-240-150	24	1.53	1.55	1.03	0.14	0.04	0.05
uo-240-240-110	24	1.85	1.52	0.82	0.15	0.04	0.05
uo-240-240-090	24	2.80	1.28	0.46	0.13	0.04	0.03
uo-240-240-070	24	4.00	1.02	0.26	0.13	0.04	0.01
uo-145-240-240	25	0.59	0.83	1.40	0.13	0.04	0.09
uo-240-240-240	25	1.19	1.51	1.27	0.15	0.07	0.06
uo-240-240-150	25	1.50	1.52	1.01	0.13	0.04	0.05
uo-240-240-110	25	1.82	1.44	0.79	0.17	0.04	0.06
uo-240-240-090	25	2.29	1.25	0.54	0.15	0.05	0.04
uo-145-240-240	26	0.75	1.01	1.36	0.14	0.05	0.08
uo-240-240-240	26	1.73	1.99	1.15	0.16	0.05	0.05
uo-240-240-150	26	2.08	1.96	0.94	0.16	0.05	0.03
uo-240-240-110	26	2.23	1.85	0.83	0.17	0.05	0.04
uo-240-240-100	26	2.29	1.81	0.79	0.21	0.06	0.05
uo-240-240-085	26	2.58	1.74	0.68	0.17	0.05	0.04
uo-240-240-070	26	3.76	1.43	0.39	0.19	0.06	0.03
uo-145-240-240	27						
uo-240-240-240	27	1.42	1.68	1.17	0.13	0.05	0.06
uo-240-240-150	27	1.70	1.65	0.97	0.15	0.05	0.04
uo-240-240-110	27	1.97	1.62	0.82	0.15	0.04	0.04
uo-240-240-090	27	2.23	1.55	0.70	0.14	0.04	0.04
uo-240-240-070	27	3.47	1.27	0.37	0.17	0.04	0.02

Ergebnisse *unidirektional-offen*

		ρ	J_s	v	$\sigma(\rho)$	$\sigma(J_s)$	$\sigma(v)$
uo-240-240-240	28	1.18	1.43	1.21	0.14	0.05	0.07
uo-240-240-150	28	1.33	1.34	1.00	0.15	0.05	0.06
uo-240-240-110	28	1.56	1.31	0.83	0.15	0.05	0.05
uo-240-240-090	28	2.08	1.30	0.62	0.16	0.05	0.04
uo-240-240-070	28	3.65	0.89	0.25	0.17	0.05	0.01
uo-240-240-240	29	0.99	1.28	1.29	0.13	0.04	0.07
uo-240-240-150	29	1.30	1.30	1.01	0.14	0.03	0.06
uo-240-240-110	29	1.47	1.24	0.84	0.14	0.06	0.06
uo-240-240-090	29	2.01	1.08	0.55	0.10	0.03	0.03
uo-240-240-070	29	3.21	0.77	0.25	0.14	0.06	0.01
uo-145-240-240	30	0.62	0.86	1.40	0.14	0.05	0.09
uo-240-240-240	30	1.21	1.52	1.25	0.17	0.07	0.08
uo-240-240-150	30	1.41	1.46	1.03	0.15	0.05	0.04
uo-240-240-110	30	1.84	1.50	0.81	0.15	0.04	0.05
uo-240-240-090	30	2.21	1.37	0.62	0.12	0.05	0.05
uo-240-240-070	30	3.95	1.10	0.29	0.15	0.06	0.01
uo-145-240-240	31	0.61	0.86	1.41	0.13	0.05	0.08
uo-240-240-240	31	1.25	1.56	1.26	0.15	0.05	0.05
uo-240-240-150	31	1.47	1.53	1.04	0.16	0.05	0.04
uo-240-240-110	31	1.77	1.51	0.86	0.16	0.05	0.06
uo-240-240-090	31	2.48	1.41	0.56	0.21	0.04	0.06
uo-240-240-070	31	4.00	1.05	0.27	0.15	0.05	0.01
uo-145-240-240	34	0.65	0.90	1.40	0.13	0.04	0.09
uo-240-240-240	34	1.40	1.68	1.23	0.18	0.08	0.08
uo-240-240-150	34	1.60	1.64	1.03	0.16	0.06	0.05
uo-240-240-110	34	1.89	1.54	0.81	0.16	0.05	0.06
uo-240-240-090	34	3.08	1.34	0.44	0.20	0.05	0.02
uo-240-240-070	34	4.23	1.13	0.28	0.17	0.07	0.01