



Multiskalare Simulation: Kombination von mikro- und makroskopischen Personenstrommodellen

Multiscaled simulation:
Combining micro- and macroscopic crowd simulation models

Masterarbeit

Autor: Veronika Zwickenpflug
Matrikel Nummer: 75394814
Fakultät: Informatik und Mathematik
Studiengang: Informatik (Master)
Schwerpunkt: Software Engineering

Betreuer: Dr. Angelika Kneidl, accu:rate GmbH

Prüfer: Prof. Dr. Gerta Köster
Zweitprüfer: Prof. Dr. Bastian Katz

Datum: 03.03.2021

Erklärung

Erklärung Gemäß § 40 Abs. 1 i. V. m. § 31 Abs. 7 RaPO

Hiermit erkläre ich, dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Frau Prof. Köster, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Außerdem möchte ich der Geschäftsführung der accu:rate GmbH, Frau Dr. Angelika Kneidl danken, sie hatte mich erst auf das Thema der Masterarbeit aufmerksam gemacht und mich während der gesamten Masterarbeit tatkräftig betreute.

Zusätzlich bedanke ich mich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes ESCAPE, in dessen Kontext diese Arbeit erstellt wurde. ESCAPE ist Teil des Programms Forschung für zivile Sicherheit - Bekanntmachung: „Anwender – Innovativ: Forschung für die zivile Sicherheit II“ und soll die Sicherheit auf parallel stattfindenden Großveranstaltungen zu erhöhen.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Freunden Florian Hageneder und Sarah Nesner bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen und die Masterarbeit Korrektur gelesen haben.

Meinem Freund Stephan Plöderl danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums.

Zusammenfassung

Durch einen Planungsfehler starben 2010 auf der Loveparade in Düsseldorf 19 Menschen, zusätzlich wurden 342 Besucher verletzt. Um solche Fehler im Vorfeld auszuschließen, müssen die Ablauf- und Räumungskonzepte überprüft werden. Heutzutage kommen dazu computergestützte Personenstromsimulationen zum Einsatz.

Die Simulationen nutzen meist einen mikro- bzw. makroskopischen Ansatz. Erstere simulieren Personen als Individuen, während zweitens lediglich das aggregierte Verhalten betrachtet wird. Dadurch kann die Wahl des Ansatzes als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Skalierbarkeit betrachtet werden. Die mikroskopischen Modelle kommen besonderes bei Großveranstaltungen an ihre Grenzen, da sie sehr rechenintensiv sind.

Deshalb wurde in dieser Arbeit ein hybrider Ansatz zur Simulation von Räumungsszenarien im urbanen Bereich entwickelt. Dieser erlaubt die Unterteilung des Szenarios in Zonen. Diese werden anschließend mikro- bzw. makroskopisch simuliert. Dadurch soll es ermöglicht werden die kritischen Bereiche, wie Engstellen, mikroskopisch zu simulieren, während weniger relevante Bereiche, wie gerade Strecken, makroskopisch simuliert werden. Für den Übergang zwischen den Zonen werden die Übergangskanten entsprechend der Diskretisierung der makroskopischen Zone in Abschnitt unterteilt. Diese werden für das Übergangsverhalten zwischen den Zonen getrennt voneinander betrachtet. Die Zone darf dabei nur betreten werden, wenn für den Fußgänger ausreichend Platz zur Verfügung steht. Für die Navigation wird ein zonenübergreifendes Navigationsfeld eingesetzt.

Anhand von Beispilszenarien konnte gezeigt werden, dass das Hybridmodell die Rechenzeit um durchschnittlich 37% reduziert und gleichzeitig ähnliche Räumungsverläufe wie das rein mikroskopische Modell erzeugt.

Abstract

Due to a planning error, 19 people died at the Love Parade in Düsseldorf in 2010, and an additional 342 visitors were injured. To rule out such errors in advance, the flow and evacuation concepts must be checked. Nowadays, computer-aided people flow simulations are used for this purpose.

The simulations usually use a microscopic or macroscopic approach. The former simulate people as individuals, while the latter only consider aggregate behavior. Thus, the choice of approach can be seen as a trade-off between accuracy and scalability. The microscopic models reach their limits especially for large-scale events, as they are very computationally intensive.

Therefore, a hybrid approach for the simulation of evacuation scenarios in urban areas was developed in this thesis. It allows the subdivision of the scenario into zones. These zones are then simulated micro- or macroscopically. This makes it possible to simulate the critical areas, such as bottlenecks, microscopically, while less relevant areas, such as straight passageways, are simulated macroscopically. For the transition between zones, the transition edges are divided into sections according to the discretization of the macroscopic zone. These are considered separately from each other for the transition behavior between the zones. The zone may only be entered, if there is sufficient space available for the pedestrian. For navigation, a cross-zone navigation field is used.

On the basis of three example scenarios, it was shown that the hybrid model reduces computational time by an average of 37%, while producing similar clearing histories as the purely microscopic model.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Problemlösung | 3 |
| 1.3 | Ziel der Arbeit | 4 |
| 1.4 | Struktur der Arbeit | 5 |
| 2 | Personenstromsimulation | 6 |
| 2.1 | Allgemein | 7 |
| 2.1.1 | Fußgänger | 7 |
| 2.1.2 | Simulationsumgebung | 8 |
| 2.1.3 | Navigation | 9 |
| 2.2 | Mikroskopische Modelle | 10 |
| 2.2.1 | Optimal Step Model | 11 |
| 2.3 | Makroskopische Modelle | 12 |
| 2.3.1 | Modell von Hughes | 13 |
| 2.4 | Hybridmodelle - Stand der Forschung | 16 |
| 2.4.1 | Schichten-basierte und sequenzielle Modelle | 16 |
| 2.4.2 | Zonen-basierte Modelle | 17 |
| 2.5 | Bestehender Simulator - crowd:it | 22 |
| 2.5.1 | Simulationsumgebung | 22 |
| 2.5.2 | Fußgänger | 23 |
| 2.5.3 | Navigation | 23 |
| 2.5.4 | Zeitliche Diskretisierung | 24 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Makroskopisches Modell - Modell von Hughes | 25 |
| 3.1 | Auswahl | 25 |
| 3.1.1 | Methodik | 25 |
| 3.1.2 | Modellarten | 26 |
| 3.1.3 | Bewertungsaspekte | 28 |
| 3.1.4 | Ergebnis | 29 |
| 3.2 | Simulationsumgebung | 30 |
| 3.3 | Personentypen | 30 |
| 3.4 | Diskretisierung | 32 |
| 3.4.1 | Anwendung des Finite Volumen Verfahrens | 33 |
| 3.4.2 | Stabilität des Finite Volumen Verfahrens | 35 |
| 3.4.3 | Instabilität für geringen Dichten | 36 |
| 4 | Multiskalares Hybridmodell (MuSka-Modell) | 38 |
| 4.1 | Zonendefinition | 38 |
| 4.2 | Personenerhaltung | 40 |
| 4.3 | Zonenübergangsverhalten | 42 |
| 4.3.1 | Aggregation | 43 |
| 4.3.2 | Disaggregation | 43 |
| 4.4 | Navigation | 46 |
| 4.5 | Zeitliche Diskretisierung | 48 |
| 5 | Implementierung | 50 |
| 5.1 | Manuelle Zonendefinition | 50 |
| 5.2 | Berechnung des Hybridmodells | 51 |
| 5.2.1 | Übergreifende Navigation | 52 |
| 5.2.2 | Mikroskopischer Simulationsschritt | 52 |
| 5.2.3 | Makroskopischer Simulationsschritt | 53 |
| 5.3 | Ergebnisvisualisierung | 54 |
| 6 | Kalibrierung | 55 |
| 6.1 | Parameter | 55 |
| 6.2 | Population | 56 |
| 6.3 | Szenario | 57 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 6.4 Ergebnisse | 57 |
| 7 Evaluierung | 59 |
| 7.1 Szenarien | 60 |
| 7.2 Räumungsverlauf | 62 |
| 7.2.1 Herangehensweise | 62 |
| 7.2.2 Resultate | 62 |
| 7.3 Performance | 64 |
| 7.3.1 Herangehensweise | 64 |
| 7.3.2 Resultate | 64 |
| 7.4 Fazit | 70 |
| 8 Zusammenfassung | 71 |
| 9 Ausblick | 73 |
| Abbildungsverzeichnis | 75 |
| Tabellenverzeichnis | 77 |
| Literaturverzeichnis | 78 |

1 Einleitung

1.1 Motivation

”1,4 Millionen Partyfreunde aus aller Welt waren nach Duisburg gekommen, um gemeinsam zu feiern. Doch das Open-Air-Spektakel endete in einer Tragödie”, so beschrieb 2010 die Süddeutsche Zeitung das Unglück der Loveparade [zei, a]. Dabei starben 19 Menschen und 342 weitere Besucher des Festes wurden schwer verletzt [zei, b]. Das Unglück entstand durch die unbedachte Schließung eines Ausgangs des Geländes, weshalb sich die Besucher nicht wie geplant verteilen konnten. Dadurch entstand eine Rückstauung, welche schlussendlich zu einer Panik unter den Besuchern führte. Wenn die Ablauf- und Räumungskonzepte diese Situation abgedeckt hätten und überprüft worden wären, hätte dieses Unglück vermieden werden können.

Zur Überprüfung solcher Konzepte werden meist klassische Handrechenverfahren, wie die Methode von Predtetschenski und Milinski [Predtetschenski and Milinski, 2015], eingesetzt. Diese können jedoch das Personenverhalten nur begrenzt widerspiegeln [Harney, 2002]. Deshalb kommen heutzutage für komplexe Szenarien, wie Großveranstaltungen, auch computergestützte Personenstromsimulationen zum Einsatz.

Simulationen nutzen meist einen makro- oder mikroskopischen Ansatz, um die Personenbewegungen zu modellieren. Makroskopische Ansätze modellieren lediglich das aggregierte Verhalten der Fußgänger, während mikroskopische jede Einzelperson individuell betrachten [Duives et al., 2013]. Dadurch erlauben letztere den Fußgängern individuelle Eigenschaften zuzuweisen. Jedoch ist die Einzelmodellierung deutlich rechenaufwändiger. Die Wahl des Verfahrens stellt somit einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Skalierbarkeit dar [Duives et al., 2013]. Zusätzlich sind die makroskopischen Ansätze meist

auf einen spezifischen Anwendungsfall ausgelegt und nicht allgemein einsetzbar [Harney, 2002].

Da bei der mikroskopischen Simulation nicht nur jede Person einzeln betrachtet sondern auch der gesamte Betrachtungsbereich fein aufgelöst werden muss, wird dies besonders bei großen Szenarien rechenintensiv. Deshalb werden in der Praxis große Bereiche oft in kleinere unterteilt und getrennt voneinander simuliert. Dies verhindert jedoch ein Zusammenspiel zwischen den Bereichen. Besonders bei der Räumungssimulation von zwei parallel nebeneinander stattfinden Großveranstaltungen stellt dies ein Problem dar. Diese würden von einander unabhängig simuliert werden. Somit kann das Zusammenspiel auf gemeinsam genutzten Wegen nicht beachtet werden.

Das Problem dieses Ansatzes wird besonderes bei der Betrachtung des Cannstatter Volksfests (genannt Wasen) und der Mercedes Benz Arena klar. Diese befinden sich direkt nebeneinander und müssen durch ihre örtliche Nähe in Räumungsfall teilweise auf dieselben Fluchtwege zurückgreifen. Auf dem Volksfestgelände befinden sich bis zu 90 000 Besuchern gleichzeitig. Zusätzlich finden während des Volksfests Spiele in der Arena statt, in welcher bis zu 60.449 Besucher Platz finden können [Inf, 2020]. Die Umgebung des Geländes ist in Abbildung 1.1 visualisiert.



Abbildung 1.1: Übersicht der Umgebung des Wasen und der Mercedes Benz Arena basierend auf einer Google Earth Luftaufnahme [Goo, 2020]

Schon die alleinige Berechnung der Räumungssimulation des Volksfests mit Hilfe der mikroskopischen Simulationssoftware *crowd:it* mit knapp 90 000 Besuchern dauerte über 8 Stunden und sorgte für Speicherengpässe (Intel Xeon Gold 6136 Prozessor, 12 Kerne, 200GB RAM). Eine Simulation der großflächigen Räumung beider Gelände ist somit aktuell mit *crowd:it* nicht ohne Weiteres durchführbar. Betrachtet man die Veranstaltungen allein, werden jedoch gemeinsam genutzte Fluchtwege vernachlässigt. Deshalb soll innerhalb dieser Arbeit das Problem der großflächigen Räumungssimulation mehrerer parallel stattfindender Großveranstaltungen im urbanen Raum innerhalb der Simulationssoftware *crowd:it* gelöst werden.

1.2 Problemlösung

Ein gängiger Ansatz zur Verbesserung der Performance stellt die Integration von makroskopischen Komponenten in mikroskopischen Modellen dar [Ijaz et al., 2015]. Beispielsweise kann die Performance der Navigation verbessert werden, indem diese von einem makroskopischen Modell übernommen wird. Die tatsächliche individuelle Bewegung der Fußgänger wird dabei weiterhin durch das mikroskopische Modell realisiert [Kneidl et al., 2013]. Diese Art der Hybridmodelle setzt jedoch immer noch die feine Diskretisierung im gesamten Betrachtungsbereich. Dadurch ist es besonders für die Betrachtung komplexer großer Szenarien, wie Großveranstaltungen, nicht geeignet.

Eine weiteres Lösungsverfahren ist die räumliche Aufteilung des Betrachtungsbereiches in Zonen. Diese werden anschließend mit unterschiedlichen Modellen (mikro- oder makroskopisch) simuliert [Ijaz et al., 2015]. Dadurch müssen die Fußgänger nur in den mikroskopischen Zonen individuell bewegt werden, wodurch die Rechenzeit reduziert werden kann.

Bei Großveranstaltungen sind die kritischen Bereiche meist im Vorfeld bekannt. Diese Bereiche müssen mikroskopisch simuliert werden, während für den restlichen Betrachtungsbereich eine makroskopische Betrachtung ausreichend wäre. Anhand dieser Kriterien kann der Betrachtungsbereich in mikro- bzw. makroskopische Zonen aufgeteilt werden. Dadurch eignet sich der zonen-basierte Ansatz besonders für die Betrachtung von parallelen Großveranstaltungen.

Über diesen Ansatz liegen jedoch noch kaum Arbeiten vor. Die wenigen, verfügbaren sind meist nicht validiert und beinhalten keine vollständige Beschreibung des Hybridmodells. Oft wird nicht beschrieben, welche Modelle eingesetzt werden und / oder wie sich die Personen in den Übergangsbereichen zwischen den Zonen verhalten. Ebenfalls fehlt eine Beschreibung anhand, welcher Kriterien die Zonen festgelegt wurden. Dies macht die Arbeiten schwer bis nicht reproduzierbar. Ein weiterer Nachteil der bestehenden Verfahren stellt das Fehlen eines übergreifenden Verhaltens zwischen den Modellen dar.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und prototypische Implementierung eines zonenbasierten, hybriden Simulationsmodells innerhalb des bestehenden Personenstromsimulators *crowd:it*. Das Modell soll auf die Räumungssimulation von parallel stattfindenden Großveranstaltungen im urbanen Raum ausgelegt werden. Als mikroskopisches Modell soll das im Simulator bestehende *Optimal Step Modell* (*OSM*) (siehe Abschnitt 2.2.1) eingesetzt und mit einem geeigneten makroskopischen Modell innerhalb eines Modells (intramodellar) kombiniert werden. Innerhalb der Zonen sollen unterschiedliche Ziele und Wege abbildbar sein, da die Räumung der Personen zu unterschiedlichen Bereichen ermöglicht werden soll.

Der Hauptfokus der Entwicklung des Modells soll auf der Gewährleistung der Validität der Ergebnisse und der Verbesserung der Performance gelegt werden. Somit wird innerhalb der Arbeit kein Schwerpunkt auf der Verbesserung des Speicherbedarfes gelegt.

Die Zonen sollen so gewählt werden, dass die kritischen Bereiche mit dem *OSM* simuliert werden, während für den restlichen Betrachtungsbereich ein makroskopisches Modell verwendet wird. Innerhalb des makroskopischen Modells dürfen ausschließlich Informationen genutzt werden, welche bereits im bestehenden Simulator vorliegen (siehe Abschnitt 2.5). Ebenfalls sollen die Eigenschaften der Fußgänger zonenübergreifend erhalten bleiben.

In dieser Arbeit werden Kriterien zur Definition der Zonen aufgestellt und die Zonen manuell zugewiesen. Durch die zeitliche Einschränkung dieser Arbeit wird somit auf eine Entwicklung und Implementierung einer automatischen Zonendefinition verzichtet.

Anschließend sollen die Performance und Genauigkeit dieses hybriden Ansatzes anhand beispielhafter Testszenarien überprüft werden.

Für die restliche Arbeit können die Begriffe Fußgänger und Person als gleichbedeutend aufgefasst werden.

1.4 Struktur der Arbeit

Um die Inhalte dieser Arbeit in den richtigen Kontext zu setzen, wird in Abschnitt 2 zunächst ein Überblick über die Personenstromsimulation geschaffen. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die bestehenden, mikroskopischen und makroskopischen Modelle gelegt. Anschließend werden die bestehenden, hybriden Ansätze vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit für die Räumungssimulation paralleler Großveranstaltungen bewertet. Zuletzt wird der bestehende Simulator *crowd:it* vorgestellt.

In Abschnitt 3 wird auf die Auswahl eines geeigneten makroskopischen Modells für den Einsatz im Hybridmodell eingegangen. Dabei werden Kriterien entwickelt, um einen Vergleich der Modelle im Bezug zu dem hier betrachteten Anwendungsfall zu ermöglichen.

Das entwickelte Hybridmodell wird im Abschnitt 4 vorgestellt. Dabei werden die Modellkomponenten dargestellt. Diese gliedern sich in Zonendefinition, Personenerhaltung, Zonenübergangsverhalten, Navigation und Diskretisierung.

In der weiteren Arbeit wird die Implementierung des Prototypen und die Kalibrierung des Modells erläutert. Im folgenden Abschnitt 7, werden die Ergebnisse des Prototypen anhand einiger, beispielhafter Testszenarien evaluiert. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die Abweichung der Räumungszeiten im Vergleich zur reinen mikroskopischen Simulation und die Performance gelegt.

Zum Schluss wird eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick gegeben.

2 Personenstromsimulation

In den letzten Jahrzehnten wurden viele unterschiedliche Modelle zur Simulation von Fußgängerströmen entwickelt. Sie finden hauptsächlich Anwendung bei der Überprüfung von Räumungskonzepten. Darüber hinaus werden sie zur Planung von Verkehrskapazitäten und Besuchermanagement eingesetzt.

Zur Beschreibung der Fußgängerbewegungen werden unterschiedliche Ansätze genutzt. Allgemein können sie in makro- und mikroskopische Ansätze unterteilt werden. Während mikroskopische Modelle die Fußgänger individuell modellieren, betrachten makroskopische lediglich das aggregierte Verhalten. Beispielhaft sind die beiden grundsätzlichen Ansätze anhand zweier Beispielmodelle in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Beispiel makroskopische Modell repräsentiert die Fußgänger anhand der Personendichte, während innerhalb des mikroskopischen Modells jeder Fußgänger durch einen Kreis repräsentiert wird. Zusätzlich bestehen noch einige hybride Ansätze. Auf diese Ansätze wird in einem späteren Abschnitt detaillierter eingegangen.

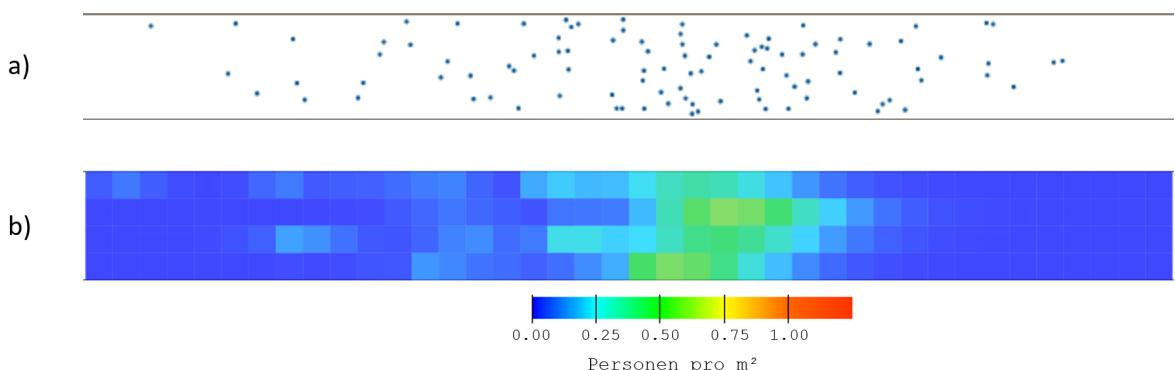


Abbildung 2.1: Beispielhafte Darstellung eines mikroskopischen (a) und makroskopischen (b) Modells anhand eines einfachen Ganges

Innerhalb der folgenden Abschnitte wird ein Überblick über die unterschiedlichen Aspekte zur Modellierung von Fußgängerströmen und den unterschiedlichen Ansätzen gegeben. Die hybriden Ansätze werden ebenfalls auf ihre Anwendbarkeit für das hier betrachteten Szenario (Simulation von Großveranstaltungen im urbanen Raum) bewertet. Zuletzt wird bestehender Simulator *crowd:it* vorgestellt.

2.1 Allgemein

Um die Fußgängerbewegungen abzubilden, muss unabhängig vom gewählten Ansatz, festgelegt werden wie Fußgänger und Betrachtungsbereich zu modelliert sind. Zusätzlich muss definiert werden, wie die Personen innerhalb des Betrachtungsbereichs navigieren. Auf diese Aspekte wird im Folgenden genauer eingegangen.

2.1.1 Fußgänger

Um die Fußgängerbewegungen abzubilden, muss zunächst festgelegt werden, wie Fußgänger repräsentiert werden. Zur Beschreibung der Fußgänger können unterschiedlichste Aspekte herangezogen werden. So können Fußgänger anhand ihres Alters, Körpergröße und Platzbedarf beschrieben werden. Für die Simulation der Bewegung der Fußgänger wird meist ein aus der Verkehrssimulation bekannter Zusammenhang zwischen der Fahrzeugdichte und des Verkehrsflusses herangezogen. Um dies auf Fußgängerbewegungen zu übertragen, müssen die Begriffe Geschwindigkeit, Dichte und Fluss in den Zusammenhang der Fußgängerbewegungen gebracht werden.

Definition 1 (Gehgeschwindigkeit): *Die Gehgeschwindigkeit v beschreibt die Geschwindigkeit, in der sich ein einzelner Fußgänger fortbewegt. Sie wird in m/s angeben. [Weidmann, 1993]*

In der weiteren Arbeit wird die Gehgeschwindigkeit lediglich als Geschwindigkeit bezeichnet.

Definition 2 (Wunschgeschwindigkeit): Die Wunschgeschwindigkeit v_w repräsentiert die Geschwindigkeit des Fußgängers im freien Lauf auf einer geraden Strecke ohne Hindernisse. Die momentane Geschwindigkeit eines Fußgängers entspricht somit der Wunschgeschwindigkeit außer er wird durch äußere Einflüsse gebremst.

Definition 3 (Personendichte): Als Personendichte wird die Anzahl der Personen pro Quadratmeter bezeichnet. Die Personendichte wird als ρ bezeichnet und wird in Fußgänger pro Quadratmeter (P/m^2) angegeben. [Weidmann, 1993]

Definition 4 (spezifischer Personenfluss): Der spezifischer Personenfluss J beschreibt die Anzahl der Personen, welche innerhalb eines festgelegten Zeitraums eine festgelegte Linie überqueren. Er wird in Fußgänger pro Sekunde pro Meter (P/ms) angegeben und aus der der Personendichte und Geschwindigkeit abgeleitet werden ($J = \rho * v$). [Vanumu et al., 2017]

Durch diese Eigenschaften kann die grundlegende Bewegung der Fußgänger beschrieben werden. Zusätzlich verwenden einige Modelle noch weitere Eigenschaften, wie Gruppenzugehörigkeit und Reaktionszeit.

2.1.2 Simulationsumgebung

Der virtuelle Raum der Simulation wird als Simulationsumgebung bezeichnet und durch ein sogenanntes Umgebungsmodell beschrieben. Hierbei wird zwischen dem ein- (a) bzw. zwei-dimensionalen (b) Modell und Graphen (c) unterschieden. Dabei verwenden die ersten beiden ein kontinuierliches Modell, um den Raum dazustellen, während Graphen den Raum in einzelne Segmente unterteilen, welche durch Knoten repräsentiert werden. Zur Veranschaulichung sind die Variationen anhand eines einfachen Beispiels zweier durch einen Gang verbundener Räume in Abbildung 2.2 illustriert. (Vergleiche [Hughes, 2002], [Hartmann et al., 2013] & [Løvås, 1994])

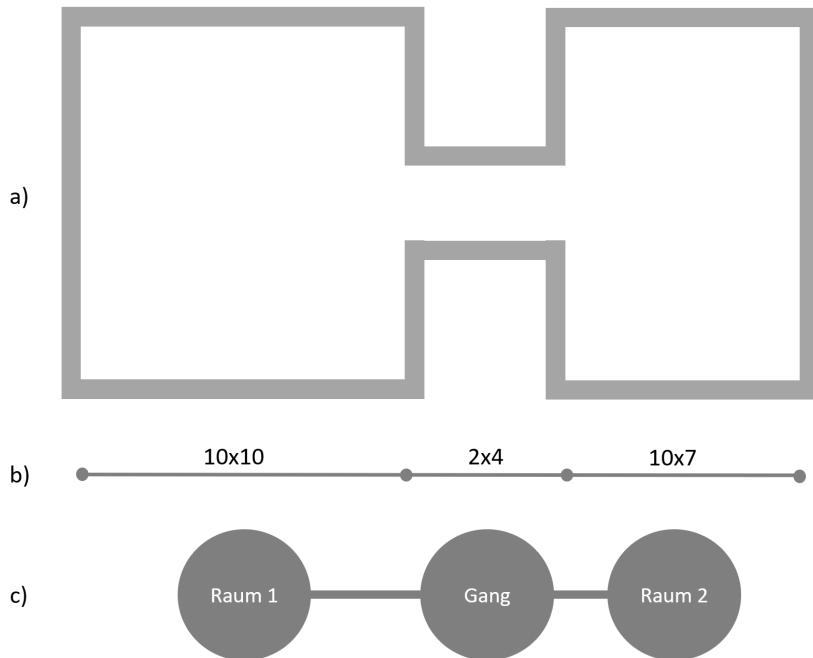


Abbildung 2.2: Darstellung der Simulationsumgebungsmodelle am Beispiel als zwei- (a), ein- dimensionales (b) Modell und Graph (c)

2.1.3 Navigation

Um innerhalb einer zweidimensionalen Simulationsumgebung zu navigieren, werden so genannte Wegpunkte definiert. Diese beschreiben festgelegte Punkte / Bereiche, welche durch einen Fußgänger erreicht werden sollen. Somit kann ein Wegpunkt einen Zwischenstopp oder ein Endziel beschreiben.

Zwischen den Wegpunkten werden zur Navigation meist Graphen und/oder *Potentialfelder* eingesetzt. Zweitens weisen jedem Punkt im Raum ein *Potenzial* Φ zu. Dieses beschreibt die geschätzte Reisedauer von diesem Punkt zum nächsten Wegpunkt. (Vergleiche [Hughes, 2002] & [Kneidl et al., 2013])

2.2 Mikroskopische Modelle

Mikroskopische Simulationsmodelle betrachten die zu simulierenden Personen als Individuen und haben zum Ziel, Interaktionen zwischen den Fußgängern möglichst realistisch zu beschreiben. Dabei sollen sie lokale Phänomene, wie Bahnenbildung, Stoßwellen und Stau vor Engstellen, abbilden [Schadschneider et al., 2009].

Zu den ersten mikroskopischen Ansätzen zählen die Social Force Modelle. Als Grundidee wird angenommen, dass jeder Fußgänger von anziehenden und abstoßenden Kräften beeinflusst wird. Die daraus resultierenden Kraftfelder werden in einem gemeinsamen Kraftfeld überlagert, entlang dessen sich der Fußgänger bewegt. Jeder Fußgänger wird somit von den auf ihn wirkenden Kräften gesteuert, auf welche er selbst keinen Einfluss hat. (Vergleiche [Helbing and Molnár, 1995] & [Chraibi et al., 2013])

Eine andere Art mikroskopischer Modelle basiert auf zellulären Automaten. Diese zerlegen den Raum in Zellen, auf denen sich Fußgänger bewegen können. Die Bewegung der Fußgänger wird dabei durch Zellwerte und -zustände der eigenen und direkten Nachbarzellen sowie Regelsätzen bestimmt. Aus diesem Grund können nur lokale Einflüsse modelliert werden. Ebenfalls kann durch die räumliche Diskretisierung nur eine begrenzte Anzahl von Bewegungsrichtungen abgebildet werden und die maximal Dichte ist durch die Zellgröße vorbestimmt. (Vergleiche [Blue et al., 1997] & [Kirik et al., 2009])

Daraufhin wurden Modelle entwickelt, welche die Ansätze der Social Force Modelle mit den zellulären Automaten kombinieren (z.B. [Kretz, 2009]). Hier werden die Zellen des Automaten mit Potentialfeldwerten belegt. Eine weitere Kombinationsmöglichkeit der Ansätze stellt das Optimal Step Model (OSM) [Seitz and Köster, 2012] dar. Auf dieses wird im Abschnitt 2.2.1 genauer eingegangen.

Die letzte Ausprägung der mikroskopischen Modelle sind die sogenannten Verhaltensmodelle. Die Grundidee ist, dass jedem Fußgänger individuelle Verhaltenssätze und -regeln zugewiesen werden. Dadurch können kognitive Prozesse und Einzelverhalten abgebildet werden. Jedoch sind sie rechenaufwändiger als die kräfte- und automaten-basierten Modelle und es liegen für die meisten Regelsätze noch keine Validierungsmöglichkeiten vor. (Vergleiche [Kneidl et al., 2013])

2.2.1 Optimal Step Model

Das Optimal Step Modell (OSM) [Seitz and Köster, 2012] modelliert Fußgänger als Einzelpersonen mit individuellen Wunschgeschwindigkeiten. Durch die Geschwindigkeit kann die aktuell maximale Schrittweite s des Fußgängers bestimmt werden. Der Fußgänger kann alle Punkte innerhalb einer Kreisscheibe mit Radius s erreichen. Auf dieser wird die nächste, für die Person attraktivste Position ausgewählt. Dies ist schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt.

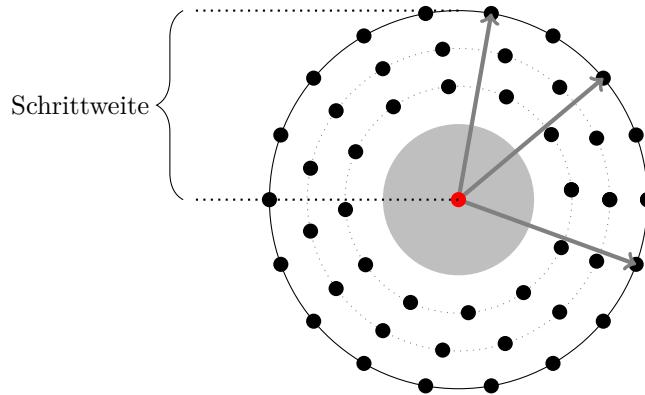


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Kreisscheibe auf welcher die nächste Position ausgewählt wird. Die möglichen nächsten Positionen sind durch die schwarzen Punkte dargestellt. Der Mittelpunkt des Fußgängers (grau) wird durch einen roten Punkt repräsentiert. Erstellt nach [Seitz et al., 2015]

Um die nächstbeste Position zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass Personen von Wegpunkten angezogen werden. Von Hindernissen und anderen Personen werden sie abgestoßen. Diese Kräfte werden in einen Gradienten eines skalaren Potentialfelds zusammengefasst. Durch die Superposition der Teilpotentiale kann jedem Punkt \vec{x} im Raum ein Gesamtpotential Φ_{OSM} zugeordnet werden. Dieses kombiniert das abstoßende Hindernispotential Φ_O , das abstoßende Personenpotential Φ_P und das anziehende Zielpotential Φ_t . Für einen Fußgänger l ergibt sich das Gesamtpotential $\Phi_{OSM}(\vec{x})$:

$$\Phi_{OSM}(\vec{x}) = \sum_{j=1}^m \Phi_{o,j}(\vec{x}) + \sum_{i=1, i \neq l}^n \Phi_{p,i}(\vec{x}) + \Phi_t(\vec{x}) \quad (2.1)$$

mit n Personen und m Hindernissen im Szenario. Die für den Fußgänger nächste attraktivste Position besitzt somit das kleinste Potential auf der Kreisscheibe.

2.3 Makroskopische Modelle

Innerhalb von makroskopischen Modellen wird eine gesamtheitliche Sicht auf das zu modellierende Szenario betrachtet. Somit kennt jeder Fußgänger die genaue Position aller anderen Fußgänger. Der Fokus solcher Modelle liegt darin, Kenngrößen eines Szenarios (bspw. Räumungsdauer) zu bestimmen. Daher dienen aggregierte Werte als Parameter, wie Durchschnittsdichten oder -geschwindigkeiten. Bekannte Vertreter solcher makroskopischer Simulationsansätze sind netzwerkbasierte Modelle, strömungs-basierte, gaskinetische Modelle und Kontinuumsmodelle. Um ein geeignetes Modell zur Integration im Hybridmodell auszuwählen, wird in diesem Abschnitt zunächst ein Überblick über die existierenden makroskopischen Modelle gegeben und das ausgewählte Modell im Detail vorgestellt. Der genaue Auswahlprozess ist in Abschnitt 3 beschrieben.

Netzwerkflussmodelle verwenden ein graph-basiertes Umgebungsmodell und werden oft dazu eingesetzt, Optimierungsprobleme, wie das Quickest Flow Problem, für Fußgängerströme zu adaptieren und zu lösen. Dadurch eignen sie sich besonders für die Modellierung von Räumungsszenarien. Die Ergebnisse dieser Modelle entsprechen minimalen Räumungsdauern unter Annahme von bestimmten Eingangsparametern. (Vergleiche [Borgers and Timmermans, 1986], [Løvås, 1994] & [Tjandra, 2003])

Strömungs-basierte und gaskinetische Modelle basieren auf der Analogie zwischen Strömungsphänomenen bei Fluiden bzw. Ausbreitung von Gasen, und der Bewegung von Menschenmassen im Raum. Eingeführt von Henderson, modellieren sie die Interaktionen zwischen Personen mittels der Boltzmann Transport Gleichung [Henderson, 1974]. Henderson geht dabei von den konventionellen Gleichungen aus, in denen der Erhalt von Energie und Impuls angenommen werden. Interaktionen zwischen Fußgängern werden als Kollisionsprozess beschrieben, in dem Energie und Impuls ausgetauscht wird. Dieses Modell wurde unter anderem von Helbing [Helbing, 1992] weiterentwickelt.

Einen weiteren Ansatz stellen die Kontinuumsmodelle dar. Diese verwenden ein globales Potentialfeld, anhand dessen die Bewegungsrichtung der Fußgänger definiert ist. Die Potentialfelder werden entweder auf Basis der Minimierung von Reisezeiten (bspw. [Hughes, 2000], [Hughes, 2002]) und/oder auf Basis der Minimierung von Unbehagen gebildet (bspw. [Treaille et al., 2006]).

2.3.1 Modell von Hughes

Das 2002 von Roger L. Hughes vorgestellte Modell [Hughes, 2002], zählt zu den Kontinuumsmodellen und ist auf die Simulation von Räumungsszenarien ausgelegt. Es wird in dieser Arbeit, im entwickelten Hybridmodell, als makroskopisches Modell eingesetzt.

Grundsätzlich basiert das Modell auf der Kombination von Erhaltungssätzen und Hypothesen über das Personenverhalten, welche später genauer erläutert werden. Das Modell erlaubt die Simulation von unterschiedlichen Personentypen. Zwei Personen gehören dem gleichen Personentyp an, wenn sie den gleichen Wegpunkt anstreben und sich mit ähnlicher Geschwindigkeit bewegen.

Neben dem ursprünglichen Modell von Hughes liegen noch einige weiterführende Arbeiten zu diesem Modell vor (beispielsweise [Hughes, 2003], [Goatin and Mimault, 2013], [Carrillo et al., 2015], [Carlini et al., 2016] [Carrillo et al., 2016]). Auf diese Arbeiten wird nicht weiter eingegangen, da sich in der weiteren Arbeit auf die Betrachtung der Grundmodelle beschränkt wurde.

Die Fußgänger, repräsentiert durch die Personendichte $\rho(x, y, t)$ (abgekürzt durch ρ), versuchen ein Gebiet $\Omega \subset \mathbb{R}$ schnellstmöglich zu verlassen. Um dies zu erreichen, werden nach Hughes [Hughes, 2002] folgende drei Annahmen für das Personenverhalten getroffen:

Hypothese 2.1: *Die Bewegungsgeschwindigkeit der Fußgänger wird allein von der umgebenden Personendichte und den Verhaltensmerkmalen der Fußgänger (Personentyp) bestimmt.*

Die Geschwindigkeitskomponenten (u, v) eines Fußgängers können somit durch $u = f(\rho) * \hat{\Phi}_x$ und $v = f(\rho) * \hat{\Phi}_y$ beschrieben werden. Wobei $\hat{\Phi}_x$ und $\hat{\Phi}_y$ den Richtungskosinus der Bewegung und $f(\rho)$ die Geschwindigkeit der Fußgänger in Abhängigkeit der Dichte darstellt.

Hypothese 2.2: *Fußgänger besitzen ein geteiltes Verständnis, der zu verrichtenden Aufgabe, um ihr gemeinsames Ziel zu erreichen. Dieses Verständnis wird als Potential bezeichnet. Befinden sich zwei Personen an unterschiedlichen Positionen, welche das*

gleiche Potential besitzen, bietet es für keinen von ihnen einen Vorteil die Plätze zu tauschen.

Ein Fußgänger bewegt sich somit entlang des Potentials. Für die Richtungskosinusse $\widehat{\Phi}_{Hx}$ und $\widehat{\Phi}_{Hy}$ des Fußgängers ergeben sich somit:

$$\widehat{\Phi}_{Hx} = \frac{-\partial\Phi_H/\partial x}{\sqrt{(-\partial\Phi_H/\partial x)^2 + (-\partial\Phi_H/\partial y)^2}}, \quad \widehat{\Phi}_{Hy} = \frac{-\partial\Phi_H/\partial y}{\sqrt{(-\partial\Phi_H/\partial x)^2 + (-\partial\Phi_H/\partial y)^2}} \quad (2.2)$$

Wobei das Potential Φ_H die gewichtete Reisezeit eines Fußgängers zum Wegpunkt an einer bestimmten Position darstellt.

Hypothese 2.3: *Die Fußgänger versuchen ihre geschätzte Reisezeit zu minimieren. Sie weichen von diesen Verhalten jedoch ab, um hohe Dichten zu vermeiden. Es wird angenommen, dass dieses abweichende Verhalten getrennt von der Reisezeit betrachtet werden kann. Damit versucht der Fußgänger ein Produkt aus der Reisezeit und einer Funktion der Dichte zu minimieren.*

Der Abstand zwischen den Potentialen der Fußgänger muss proportional zur Geschwindigkeit sein, also

$$\frac{1}{\sqrt{(-\partial\Phi/\partial x)^2 + (-\partial\Phi/\partial y)^2}} = g(\rho) * \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.3)$$

mit einem entsprechend skalierten Potential. $g(\rho)$ beschreibt die Personenabstoßung in Abhängigkeit von ρ .

Insgesamt kann aus diesen Annahmen folgende partielle Differentialgleichung zur Beschreibung des Personenflusses für einen Personentypen aufgestellt werden:

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho * g(\rho) * f(\rho)^2 * \frac{\partial\Phi_H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho * g(\rho) * f(\rho)^2 * \frac{\partial\Phi_H}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.4)$$

$$g(\rho) * f(\rho) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial \Phi_H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_H}{\partial y}\right)^2}} \quad (2.5)$$

Dies kann vereinfacht dargestellt werden als:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho * g(\rho) * f(\rho)^2 * \nabla \Phi_H \right) = 0 \quad (2.6)$$

$$f(\rho) * g(\rho) = \frac{1}{\|\nabla \Phi_H\|} \quad (2.7)$$

Für die Personengeschwindigkeit und -abstößung werden, wie vorgeschlagen, folgende Funktionen angenommen:

$$f(\rho) = \begin{cases} v_H, & \text{if } \rho \leq \rho_{trans} \\ v_H * \sqrt{\frac{\rho_{trans}}{\rho}}, & \text{if } \rho_{trans} < \rho \leq \rho_{crit} \\ v_H * \sqrt{\frac{\rho_{trans} * \rho_{crit}}{\rho_{max} - \rho_{crit}}} - \frac{\sqrt{\rho_{max} - \rho}}{\rho}, & \text{if } \rho_{crit} < \rho \leq \rho_{max} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$g(\rho) = \begin{cases} 1, & \text{if } \rho \leq \rho_{crit} \\ \frac{\rho * (\rho_{max} - \rho_{crit})}{\rho_{crit} * (\rho_{max} - \rho)}, & \text{if } \rho_{crit} < \rho \leq \rho_{max} \end{cases} \quad (2.9)$$

mit v_H , ρ_{trans} , ρ_{crit} und ρ_{max} konstant (meist 1.4 m/s , 0.8 P/m^2 , 2.8 P/m^2 und 5.0 P/m^2).

Das Modell zeigt für geringen Dichten ein instabiles Verhalten [Kormanová, 2013], wodurch die Personendichte negativ werden kann. Sobald dies einmal aufgetreten ist, setzt es sich durch Fehlerfortpflanzung fort und verfälscht die Ergebnisse. Deshalb wird das bestehende Modell in Abschnitt 3.4.3 um eine weitere Bedingung erweitert.

2.4 Hybridmodelle - Stand der Forschung

Über die letzten Jahre entstanden viele unterschiedliche Hybridmodelle, welche mikro- und makroskopische Ansätze kombinieren. Diese Modelle können grob in schichtenbasierte, sequenzielle und zonen-basierte Modelle unterteilt werden [Ijaz et al., 2015]. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die bestehenden Arbeiten auf dem Gebiet der Hybridmodelle gegeben und ihre Anwendbarkeit für das betrachtete Szenario, zweier parallel stattfindender Großveranstaltungen, bewertet.

2.4.1 Schichten-basierte und sequenzielle Modelle

Schichten-basierte Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass für den gesamten Simulationsbereich beide Modelle eingesetzt werden. Jedem Modell werden nur spezifische Aspekte (Schichten) der Simulation zugewiesen. Meist wird das makroskopische Modell zur globalen Pfadplanung eingesetzt, während gewünschte Verhaltensweisen der Einzelpersonen, wie die Umgehung von lokalen Hindernissen, vom mikroskopischen Modell übernommen werden [Ijaz et al., 2015]. Beispiele für schichten-basierte Modelle liefern die Arbeiten von Gloor et. al. [Gloor et al., 2004], Abdelghany et. al. [Abdelghany et al., 2016] und Lämmel et. al. [Lämmel et al., 2010].

Sequenzielle Modelle, wie bspw. die Arbeit von Xiong [Xiong et al., 2013], setzen ähnlich zu schichten-basierten Modellen beide Modellarten im ganzen Simulationsbereich ein. Sie werden jedoch nicht parallel, sondern sequenziell ausgeführt. Zunächst wird das makroskopische Modell verwendet, um die Bewegungsmuster der Menge zu steuern. Anschließend wird auf der Ergebnispersonenmenge das mikroskopische Modell angewendet, um Einzelpersonenverhalten zu simulieren [Ijaz et al., 2015].

Bewertung

Beide Ansätze setzen eine feine Diskretisierung und individuelle Bewegung aller Fußgänger im gesamten Betrachtungsbereich voraus. Dadurch sind sie ähnlich rechen- und specheraufwändig wie mikroskopische Ansätze. Deshalb sind sie nicht für das betrachteten Szenario geeignet.

2.4.2 Zonen-basierte Modelle

Zonen-basierten Modelle unterteilen den Simulationsbereich in einzelne kleinere Bereiche, welche je nach Bereich mikro- bzw. makroskopisch simuliert werden [Ijaz et al., 2015].

Der Übergang zwischen den Zonen von mikro- nach makroskopisch wird meist als Aggregation bezeichnet. Analog dazu wird der Übergang von makro- nach mikroskopisch Disaggregation genannt. Bei der Disaggregation werden Einzelpersonen aus den Daten des makroskopischen Modells generiert, während bei der Aggregation die Einzelpersonen zusammengefasst werden. Dies ist schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt. (Vergleiche [Xiong et al., 2009], [Rabiaa and Foudil, 2016])



Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Übergangs zwischen der mikro- (weiß) und makroskopischen (grau) Zonen

Die bestehenden zonen-basierten Arbeiten können anhand der Wahl der Zonenübergänge kategorisiert werden. Es wird zwischen dem Einsatz von Übergangskanten oder Übergangsbereiche unterschieden. Bei der Verwendung von Ersteren, werden die Personen entlang der gesamten Kantenlänge (dis-)aggregiert (z.B. [Anh et al., 2012], [Biedermann et al., 2014], [Chooramun et al., 2012]). Im Gegensatz dazu werden die Übergangsbereiche in Zellen eingeteilt, in welchen die Fußgänger entsprechend bei der (Dis-) Aggregation hinzugefügt/entfernt werden (z.B. [Rabiaa and Foudil, 2016], [Xiong et al., 2010]). Als Übergangskanten können die Ränder der Zonen eingesetzt werden, während für Übergangsbereiche zusätzliche Bereiche entlang der Zonenränder definiert werden müssen. Die Übergangstypen sind in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt.

Da es nur wenige Arbeiten auf dem Gebiet der zonen-basierten Ansätze gibt, welche oft aufeinander aufbauen, werden sie anhand der Autoren gegliedert vorgestellt.

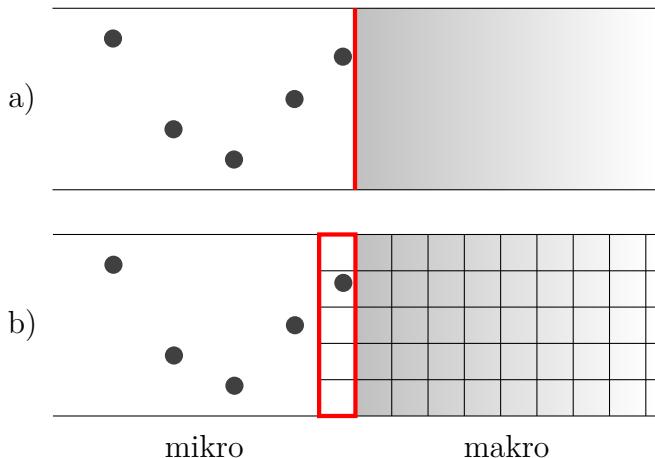


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung von einer Übergangskante (a) und eines -bereiches (b) (rot) zwischen einer mikro- (weiß) und makroskopischen (grau) Zone

Chighoub Rabiaa

Chighoub Rabiaa und Cherif Foudil versuchten 2016 Echtzeitsimulationen zu ermöglichen. Dazu soll indem innerhalb einer Zone dynamisch zwischen den makro- und mikroskopischen Modellen abhängig von der Personendichte gewechselt werden [Rabiaa and Foudil, 2016]. Die Autoren schlagen vor, dass die Zonen mit hoher Personendichte makroskopisch simuliert werden sollen und sonst mikroskopisch. Um zwischen den Zonen zu wechseln wird ein Übergangsbereich eingesetzt. Wird ein Modellwechsel innerhalb einer Zone durch einen Dichtewechsel ausgelöst, wird die Operation (Dis-)Aggregation auf die gesamte Zone angewendet. Für die Aggregation eines Bereiches wird lediglich die Dichte der Personen innerhalb der Zone berechnet, während für die Disaggregation die Dichte in Einzelpersonen umgewandelt wird. Eine detailliertere Beschreibung des Übergangsverhaltes ist nicht angegeben.

Muzhou Xiong

Muzhou Xiong et al. stellten bereits im Januar 2009 einen ersten hybriden Modellierungsansatz vor [Xiong et al., 2009]. Es wird vorgeschlagen, das mikroskopische Modell nur für instabile Zustände zu verwenden. Ansonsten soll das makroskopische Modell verwendet werden. Ein Szenario gilt als stabil, wenn der Personenfluss konstant ist und keine

Änderung in der Szenarioumgebung, wie zum Beispiel Öffnung einer Tür, stattfindet. Beim Zustandwechsel wird die Operation (Dis-)Aggregation auf das gesamte Szenario angewendet.

Dieser Ansatz wurde 2010 zu einem zonen-basierten Modell weiterentwickelt [Xiong et al., 2010]. Dabei wird das makroskopische Modell auf einem regulären Gitter ausgewertet und ein entsprechender Übergangsbereich zur (Dis-)Aggregation eingesetzt. Am Anfang jedes Zeitschrittes werden die Personen in den Übergangsbereichen (dis-)aggregiert.

Nguyen Thi Ngoc Anh

Das von Nguyen Thi Ngoc Anh et al. entwickelte Modell soll zur Evakuierungssimulation einer gesamten Stadt eingesetzt werden [Anh et al., 2012]. Sie schlagen vor die Straßenkreuzungen mit einem mikroskopischen Modell und den Rest mit einem makroskopischen Modell zu simulieren. Bei der Aggregation wird lediglich die Anzahl der Fußgänger in der makroskopischen Zone erhöht. Die aggregierten Fußgänger werden nach einer festgelegten Zeitspanne am Rand der mikroskopischen Zone disaggregiert. Die Zeitspanne wird anhand des maximalen Personenflusses der Straße bestimmt.

Biedermann

Das von Daniel H. Biedermann et al. entwickelte Framework soll den Einsatz von beliebigen Modellen innerhalb der Zonen erlauben [Biedermann et al., 2014]. Zum Einsatz des Frameworks muss das Szenario in feste Zonen unterteilt werden, welche mit festgelegten Modellen simuliert werden. Jedes Modell kennt nur die ihr zugewiesene Zone. Das Framework verwaltet alle Zonen und übernimmt die Verwaltung der Übergabe der Fußgänger an das nächste Modell. Beim Übergang werden die Fußgänger mit beiden Modellen simuliert. Dazu werden sie aus dem einen Modell gelöscht und im anderen an der nächstmöglichen Stelle und Zeitpunkt hinzugefügt. Da das Framework unterschiedliche Diskretisierungen in den Modellen erlaubt, werden zusätzliche Zeitschritte in den großer diskretisierten Modellen eingeführt.

In einer weiteren Arbeit [Biedermann et al., 2016] stellten sie die Anwendung des Frameworks für die Kombination von drei Modellen vor.

Chooramun

In ihrer Arbeit [Chooramun et al., 2011] stellen N. Chooramun et al. das *Hybrid Spatial Discretisation* (HSF) Model für Evakuierungssimulationen vor. Dieses erlaubt die Einteilung des Szenarios in feste Zonen denen jeweils eines von drei unterschiedlichen Modellen (Netzwerk-, Automaten- und Agenten-basiertes Modell (kontinuierlich)) zugeordnet werden kann. Die Zonen sind durch die räumliche Einteilung des Gebäudes festgelegt.

In der weiterführenden Arbeit [Chooramun et al., 2012] wird das HSF-Modell anhand der Implementierung genauer vorgestellt. Es wird erstmals beschrieben, dass Übergangskanten eingesetzt werden. Beim Verlassen der Netzwerkzone werden die Personen auf den Zellen des Automaten bzw. den Randbereich der Agenten-basierten Zone platziert. Kann keine valide Position gefunden werden, wird der Fußgänger von der Kante verwaltet, bis ein solcher Platz frei wird. So sollen ungültige Zustände im System vermieden werden. Nach dem Eintreten in die mikroskopische Zone wird ein sogenanntes Ausweichverhalten ausgelöst, welches eine realistischere Verteilung der Fußgänger erzeugen soll. Um in die Netzwerkzone einzutreten, muss lediglich gewährleistet werden, dass die maximale Auslastung dieser noch nicht erreicht ist.

In der neuesten hier betrachteten Arbeit [Chooramun et al., 2019] wird das Modell lediglich zur Simulation von Evaluierungssimulationen eingesetzt und mit den Ergebnissen einer rein mikro- bzw. makroskopischen Simulation verglichen.

Bewertung

Da die bestehenden Modelle meist auf die Simulation von Gebäuden ausgelegt sind, werden die Übergangskanten meist in Türen platziert. Der durch die gleichmäßige (Dis-)Aggregation entlang der Übergangskante entstehende Fehler, ist für Türen vernachlässigbar. Bei der Betrachtung von urbanen Großveranstaltungen liegen meist keine Türen vor, in welchen die Übergangskanten platziert werden könnten. Somit müssen breitere Wege von

einer Übergangskante überspannt werden. Der hierbei entstehende Fehler kann nicht einfach vernachlässigt werden. Somit ist die Verwendung von Übergangskanten für den hier betrachteten Anwendungsfall nicht geeignet.

Bei der Verwendung von Übergangsbereichen müssen diese zusätzlich zu den Zonen definiert werden. Oft ist die Größe dieser Bereiche an die Diskretisierung der makroskopischen Zone gebunden. Dies sorgt dafür, dass sie nicht einfach für komplizierte Szenarien, wie Veranstaltungen, eingesetzt werden können.

Des Weiteren wird in den Arbeiten die Bildung von Staus zwischen den Fußgängern nicht beachtet. So wird nicht definiert, wie damit umgegangen wird, wenn keine valide Position bei der Disaggregation gefunden oder die makroskopische Zone ihre maximal Personenanzahl / Dichte erreicht hat. Ein weiteres Problem der Modelle, stellt die fehlende Information über das verwendete Navigationsverhalten dar. So ist nicht bekannt, ob eine zonen-übergreifende Navigation verwendet wird oder lediglich zu den Übergangskanten bzw. -Bereichen innerhalb einer Zone navigiert wird. Der Fehler einer zonen-beschränkten Navigation kann nur als vernachlässigbar betrachtet werden, wenn die Personen entlang dem gesamten Übergang gleichmäßig (dis-)aggregiert werden.

In den bisherigen zonen-basierte Hybridmodelle wird nicht beschrieben, wie die Personen innerhalb der Zonen navigieren. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Navigation lediglich innerhalb einer Zone stattfindet. Für die Modelle, welche eine Übergangskante einsetzen, ist dies ein valider Ansatz da die Personen anschließend entlang der gesamten Kante (dis-)aggregiert werden. Für die Verwendung von Übergangsbereichen stellt dies jedoch ein Problem dar. Dies ist darin begründet, dass die Fußgänger direkt nach dem Übergang in die nächste Zone die Richtung wechseln könnten und es somit zu unrealistischen Stauungsverhalten am Rand der Zonen kommen kann.

Ein weiterer Nachteil der bestehenden Modelle ist, dass sie meist gar nicht bzw. nur mit mikroskopischen Simulationsergebnissen validiert wurden. Somit kann nicht gewährleistet werden, dass die Modelle realitätsnahe Ergebnisse liefern. Darüber hinaus sind die bestehenden Ergebnisse meist nicht reproduzierbar, da die verwendeten mikro- bzw. makroskopischen Modelle nicht erwähnt werden.

2.5 Bestehender Simulator - crowd:it

crowd:it ist ein bestehender Personenstromsimulator der accu:rate GmbH [Sof, 2020]. Er setzt zur Simulation der Fußgänger eine erweiterte Version des Optimal Step Model's ein (siehe Abschnitt 2.2.1). Da das zu entwickelnde Hybridmodell in den bestehenden Simulator integriert werden soll, wird im Folgenden ein Überblick über die für das Hybridmodell relevanten Informationen gegeben.

2.5.1 Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung wird mit Hilfe eines zwei-dimensionalen Modells beschrieben. Innerhalb des Modells werden betretbare Flächen, Simulationsobjekte und Hindernisse unterschieden. Hindernisse repräsentieren Objekte, welche von Fußgängern nicht durchquert werden können, während sie mit Simulationsobjekten interagieren können.

Es stehen zwei Typen von Simulationsobjekten zur Verfügung. Zum einen gibt es geschlossene Simulationsobjekte (bspw. Personenquellen, Wartezonen, Treppen), welche durch Polygone repräsentiert werden. Zum anderen existieren linienförmige Simulationsobjekte (bspw. Portale).

Für die Hindernisse werden ebenfalls zwei Typen unterschieden (geschlossene und offene). Geschlossene Hindernisse werden als Polygon repräsentiert, während offene lediglich durch einen Polygonzug dargestellt werden. Dadurch besitzen sie kein eigenes Volumen.

Über die bisher genannten Daten hinaus verwendet *crowd:it* keine weiteren Informationen über die Umgebung wie Arten eines Raumes (Gang, Vorlesungssaal, etc.), Innen-/Außenraum, Höhe eines Hindernisses. Das Hybridmodell ist ebenfalls auf diese Umgebungsdaten beschränkt. Ein Beispiel für die Simulationsumgebung ist in Abbildung 2.6 gegeben.

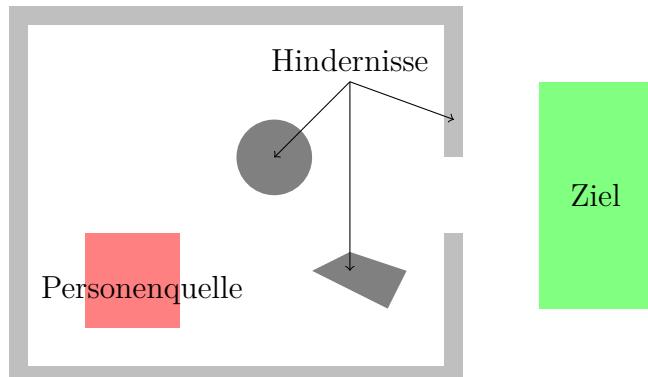


Abbildung 2.6: Darstellung eines einfachen Beispielszenarios mit einer Personenquelle (rot), Ziel (grün) und drei Hindernissen (grau)

2.5.2 Fußgänger

Innerhalb von *crowd:it* werden Fußgänger als Kreise modelliert. Dieser repräsentiert den Platzbedarf eines Fußgängers. Zusätzlich erhält jeder Fußgänger individuelle Attribute. Es wird zwischen dynamischen und statischen Attributen unterschieden. Statische Attribute werden am Anfang der Simulation zugewiesen und sind unveränderlich. Dynamische Attribute können sich während der Simulationszeit verändern.

Innerhalb des Hybridmodells sollen die Personenattribute zonenübergreifend erhalten werden. Deshalb wird in Tabelle 2.1 ein Überblick über die für das Hybridmodell relevanten Attribute eines Fußgänger gegeben.

2.5.3 Navigation

Zur Navigation wird lediglich ein lokales Zielpotentialfeld verwendet. Dieses beschreibt, wie in Abschnitt 2.2.1 definiert, die Reisezeit von einer Position zum nächsten Wegpunkt.

Um das Zielpotentialfeld zu bestimmen, wird vom nächsten Wegpunkt ausgehend, eine sich nach außen ausbreitende Wellenfront verwendet. Die Reisegeschwindigkeit dieser wird anhand der Nähe zu Hindernissen und anderer Fußgänger bestimmt. Erreicht die Welle ein Hindernis, wird die Ausbreitung an dieser Position gestoppt. Somit beschreibt

| Art | Attribut | Beschreibung |
|------------|-----------------------|---|
| statisch | Fußgänger ID | Eindeutiger Bezeichner für diesen Fußgänger |
| | Wunschgeschwindigkeit | siehe Abschnitt 2.1.1 |
| | Torsodurchmesser | Beschreibt den Platzbedarf eines Fußgängers angenähert durch einen Kreis, bestimmt durch dessen Durchmesser |
| | Wahrnehmungsradius | Radius in welchen anderen Fußgänger für das Potentialfeld bzw. für die Wahl des nächsten Schrittes mit einbezogen werden. |
| | Komfortradius | Komfortdistanz zu anderen Fußgängern |
| | Pfad | Zusammenstellung aller Wegpunkte, welche durch diesen Fußgänger abgelaufen werden müssen. |
| dynamisch | Gruppenzugehörigkeit | Personengruppe, in welcher sich dieser Fußgänger bewegt. |
| | Geschwindigkeit | siehe Abschnitt 2.1.1 |
| | Nächster Wegpunkt | Nächster Wegpunkt, welcher momentan vom Fußgänger angestrebt wird. |

Tabelle 2.1: Attribute eines Fußgängers in *crowd:it*

der Ankunftszeitpunkt der Wellenfront an einer Position die Reisezeit. (vergleiche [Seitz et al., 2015] und [Zönnchen, 2013])

Zur Berechnung der Wellenausbreitung wird die Fast Marching Methode auf einem regulären Gitter verwendet [Sethian, 1996]. Zwischen den Diskretisierungspunkten des Gitters werden die Werte interpoliert.

2.5.4 Zeitliche Diskretisierung

crowd:it verwendet eine diskretisierte Form des *OSM*. Dazu wird eine feste Zeitschrittänge Δt_{OSM} eingeführt. Diese wird so gewählt, dass der Fußgänger mit der größten Wunschgeschwindigkeit in jedem Zeitschritt einen vollständigen Schritt ausführen kann. Damit die Wunschgeschwindigkeit der anderen Fußgänger eingehalten werden kann, lassen diese einzelne Zeitschritt aus.

3 Makroskopisches Modell - Modell von Hughes

Bevor das Hybridmodell entwickelt werden kann, muss ein für diesen Anwendungsfall geeignetes, makroskopisches Modell ausgewählt werden. Dafür müssen bestehende Modelle analysiert und bewertet werden. In diesem Abschnitt wird der Auswahlprozess genauer erläutert. Anschließend wird für das ausgewählte Modell einige für das Hybridmodell benötigte Aspekte definiert. Dazu zählen die Wahl des Umgebungsmodells, die verwendeten Personentypen, der Umgang mit der Instabilität des Modells und die Diskretisierung.

3.1 Auswahl

Um das Auswahlverfahren zu beschreiben, wird zunächst auf die verwendete Methodik eingegangen. Anschließend werden die einzelnen Schritte vorgestellt und das Ergebnis präsentiert.

3.1.1 Methodik

Um ein makroskopisches Modell auszuwählen, müssen als erstes die zu betrachtenden Modelle festgelegt werden. Anschließend müssen Bewertungskriterien zum Vergleich dieser Modelle aufgestellt und festgelegt werden.

Da eine vollständige Untersuchung aller makroskopischer Modelle den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, musste sich auf die bekanntesten Grundmodelle beschränkt werden. Somit wurden keine Erweiterungen der Modelle miteinbezogen. Ein Modell wird als bekannt angesehen, wenn dieses von mehreren anderen wissenschaftlichen Arbeiten referenziert wird. Die Liste der betrachteten Modelle wird als unvollständig angesehen. Es werden nur Modelle berücksichtigt, die im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit vorgestellt werden. Kommerzielle Produkte werden somit nicht betrachtet.

Im ersten Analyseschritt werden die Modelle in Modellarten unterteilt. Es werden kontinuierliche und Netzwerk-Modelle unterschieden. Unter dem Begriff der kontinuierlichen Modelle werden die Kontinuumsmodelle und strömungs-basierten Modelle zusammengefasst.

Für jede Modellart werden anschließend alle Vor- und Nachteile für den betrachteten Anwendungsfall gesammelt und anhand dieser Informationen die optimale Modellart ausgewählt. Lediglich die Modelle der ausgewählten Modellart werden weiter analysiert. Alle anderen werden somit frühzeitig von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Als zweiter Schritt werden Bewertungsaspekte für die übrigen Modelle aufgestellt, anhand welcher anschließend ein Modell ausgewählt wird.

3.1.2 Modellarten

Die betrachteten Modelle können Tabelle 3.1 entnommen werden. Diese beinhaltet zusätzlich die Zuordnung in die Modellarten.

Aus den betrachteten Modellen wurden folgende Vor- und Nachteile für die Modellart abgeleitet. Netzwerkmodelle setzen als Umgebungsmodell Graphen ein, während kontinuierliche ein- bzw. zwei-dimensionale Umgebungsmodelle verwenden. Dadurch sind kontinuierliche deutlich rechen- und speicherintensiver als Netzwerkmodelle. Jedoch sind Netzwerkmodelle meist auf einen spezifischen Anwendungsfalls ausgerichtet, welcher ebenfalls einen bestimmten Graphen voraussetzt. Dadurch kann der Graph nicht für

| Modellart | Modelle |
|----------------|--|
| Netzwerk | Modell von Borgers und Timmerman [Borgers and Timmermans, 1986] Modell von Lovas [Løvås, 1994] Modell von Tjandra [Tjandra, 2003] |
| Kontinuierlich | Helbings fluid dynamic model [Helbing, 1992] Modell von Hughes [Hughes, 2002] Modell von Colombo-Rosini [Colombo et al., 2012] Modell von Hartmann [Hartmann et al., 2013] Modell von Piccoli [Piccoli and Tosin, 2009] Modell von Hoogendoorn [Hoogendoorn et al., 2017] |

Tabelle 3.1: Zusammenfassung aller betrachteten Modelle mit zugehöriger Modellart

ein anderes Netzwerkmodell wiederverwendet werden, wodurch die Modelle schwer austauschbar sind. Zusätzlich werden meist weiterführende Informationen über die Simulationsumgebung (beispielsweise Raumart) benötigt. Diese sind in den bisher in *crowd:it* zur Verfügung stehenden Informationen (siehe 2.5.1) nicht enthalten.

Kontinuierliche Modelle sind hingegen meist auf allgemeine Räumungs- bzw. Ablaufsimulationen ausgelegt. Zusätzlich verwenden sie oft ähnliche Umgebungsmodelle und setzen häufig wie das OSM ein Potentialfeld zur Navigation ein. Dies erlaubt die Modelle einfacher untereinander auszutauschen. Zusätzlich könnte das gleiche Navigationsverhalten und Umgebungsmodell wie in den mikroskopischen Zonen genutzt werden.

| Modellart | Vorteile | Nachteile |
|----------------|--|---|
| Netzwerk | <ul style="list-style-type: none"> • Geringer Speicherbedarf • Geringer Rechenaufwand | <ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige Grapherstellung • Spezifischer Anwendungsfall • Graphaufbau modellabhängig |
| Kontinuierlich | <ul style="list-style-type: none"> • Meist allgemeine Räumungs- bzw. Ablaufsimulationen • Leicht austauschbar • Potentialfeld-basierte Navigation | <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Speicherbedarf • Hoher Rechenaufwand |

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der Bewertung der Modellarten Netzwerk und Kontinuierlich

Die Vor- und Nachteile der Modellarten sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Wegen hohen Einschränkungen der Netzwerkmodelle, wurde trotz des höheren Rechen- und Speicherbedarfes zugunsten der kontinuierlichen Modelle entschieden.

3.1.3 Bewertungsaspekte

Zur Entwicklung der Bewertungsaspekte muss das betrachtete Szenario „Räumungssimulation von Großveranstaltungen im urbanen Raum“ genauer analysiert werden. Als Haupt Bewertungspunkt kann somit die Unterstützung von Räumungssimulationen festgelegt werden. Des Weiteren können die Personenstrommodelle teilweise auch auf die Simulation von Abläufen genutzt werden. Diese werden beispielsweise zur Überprüfung von Besucherströmen in Museen genutzt. Eine Unterstützung dieser Art von Simulationen würde somit erlauben, dieses entwickelte Hybridmodell in einem weiteren Kontext einzusetzen. In dieser Arbeit wird lediglich eine Räumungssimulation betrachtet. Deshalb wurde die Unterstützung von Ablaufsimulationen nur zur Bewertung des möglichen Anwendungsbereichs des entwickelten Modells miteinbezogen. Dadurch kann dieser Bewertungsaspekt als optional angesehen werden.

Für die nächsten Bewertungsaspekte müssen die Besucher der Veranstaltung herangezogen werden. Zum einen halten sich auf einem Veranstaltungsgelände oft sehr unterschiedliche Besucher auf, somit muss das makroskopische Modell ebenfalls heterogene Personengruppen unterstützen. Zum anderen bewegen sich die Besucher teilweise in unterschiedliche Richtungen und Wegpunkten, um beispielsweise zu ihrem Auto zurück zu kehren. Deshalb muss das makroskopische Modell multi-direktionalen Fluss der Fußgänger unterstützen.

Zuletzt muss sichergestellt werden, dass das Hybridmodelle valide Ergebnisse liefert. Deshalb muss das makroskopische Modell bereits validiert sein. Ein Modell gilt als validiert, wenn die Simulationsergebnisse mit Realdaten oder den Ergebnissen eines validierten mikroskopischen Modells validiert wurden.

Die entwickelten Bewertungsaspekte sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

| Bewertungs-aspekt | Beschreibung |
|------------------------------|---|
| Räumungs-simulation | Das Modell muss die Simulation von Räumungen unterstützen. |
| Ablauf-simulation (optional) | Das Modell soll die Simulation von Abläufen erlauben. |
| Heterogene Personengruppen | Das Modell muss Personen mit unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten unterstützen. |
| Multidirektonaler Fluss | Das Modell muss erlauben, dass Personen innerhalb eines Bereiches zu unterschiedlichen Wegpunkten navigieren. |
| Validiert | Das Modell muss bereits validiert worden sein. |

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der entwickelten Bewertungsaspekte für kontinuierlichen makroskopische Modelle

3.1.4 Ergebnis

Die Auswertungsergebnisse der Modelle sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die vollständige Tabelle mit allen Quellen und weiteren Informationen ist in der Tabelle in Anhang A zu finden. Dabei wurden die Modelle von einer weiteren Analyse ausgeschlossen, wenn ein zentraler Bewertungsaspekt nicht erfüllt werden konnte. Durch Informationsmangel nicht evaluierbare oder durch vorzeitigen Ausschluss nicht evaluierte Bewertungsaspekte sind durch „?“ markiert.

| | Grundlage | Räumungs-simulation | Ablauf-simulation (optional) | Heterogene Personengruppen | Multi-direktonaler Fluss | Validiert |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------|
| Helbing | Fluiddynamik | Nein | Ja | Ja | Ja | Nein |
| Hughes | Kontinuums-modell | Ja | ? | Ja | Ja | Ja |
| Hartmann | Generalisierte kinetische Modelle | Ja | Nein | Ja | ? | Ja |
| Colombo-Rosini | Fluiddynamik | Ja | Nein | ? | Nein | Ja |
| Hoogendorn | Fundamental-diagramme | Nein | Ja | ? | Ja | Nein |
| Piccoli | Diskretes Eu-ler Modell | Ja | ? | Ja | ? | Nein |

Tabelle 3.4: Auszug aus der vollständigen Tabelle im Anhang A der Auswertungsergebnisse der kontinuierlichen makroskopischen Modelle anhand der in Tabelle 3.3 definierten Bewertungskriterien (Nicht evaluierte Bewertungsaspekte sind durch „?“ markiert)

Letztendlich wurde sich für das Modell von Hughes entschieden, da dieses alle zentralen Bewertungsaspekte erfüllt.

3.2 Simulationsumgebung

Für das Modell von Hughes kann sowohl ein ein-dimensionales als auch ein zwei-dimensionales Umgebungsmodell eingesetzt werden. Um das ein-dimensionale Umgebungsmodell zu erstellen, muss das bereits vom mikroskopischen Modell vorliegende zwei-dimensionale Modell entsprechend auf eine Dimension reduziert werden. Dieses muss sämtliche Hindernisse auf den Wegen und Unterschiede zwischen den Wegbreiten durch das Potentialfeld abbilden können.

Auf Veranstaltungen befinden sich oft Essensstände und Sitzgelegenheiten auf den Wegen, wodurch hier eine relativ komplizierte Simulationsumgebung vorliegt. Zusätzlich stehen in *crowd:it*, wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, keine Informationen zu betretbaren Flächen zur Verfügung. Deshalb ist die automatische Generierung eines ein-dimensionalen Umgebungsmodells sehr aufwändig. Zusätzlich liegt bereits das vom OSM genutzte zwei-dimensionale Umgebungsmodell vor.

Dementsprechend wurde sich trotz des höheren Rechenaufwandes für das zwei-dimensionale Umgebungsmodell entschieden.

3.3 Personentypen

Das Modell von Hughes unterstützt unterschiedliche Personentypen. Diese unterscheiden sich durch ihre *Wunschgeschwindigkeit* und ihren nächsten *Wegpunkt* (siehe Abschnitt 2.3.1). Für jeden Typen muss das Modell für den gesamten Betrachtungsbereich berechnet werden. Der Rechenaufwand ist somit linear abhängig zur Anzahl der Personentypen. Eine Verdopplung der Anzahl der Personentypen bedeutet dadurch automatisch eine Verdopplung des Rechenaufwandes.

Personen innerhalb eines Bereichs werden oft zur selben Sammelstelle evakuiert. Dadurch ist der nächste Wegpunkt der Fußgänger innerhalb einer makroskopischen Zone größtenteils identisch. Jedoch unterscheiden sich die Wunschgeschwindigkeiten der Einzelpersonen in *crowd:it* stark. Würde für jede Wunschgeschwindigkeit ein eigener Personentyp angelegt werden, hätte dies eine enorme Auswirkung auf die Rechenzeit.

Um dieses Problem zu bewältigen, können die Wunschgeschwindigkeiten zusammengefasst und ihr Mittelwert verwendet werden. Dies sorgt jedoch automatisch für einen inakzeptablen Fehler, sobald die Geschwindigkeiten stark voneinander abweichen. Alternativ können ähnliche Geschwindigkeiten zusammengefasst und jeweils ihr Mittelwert als eigener Personentyp betrachtet werden. Der dadurch entstehende Fehler wird als vernachlässigbar angesehen.

Die Festlegung der Personentypen muss dementsprechend pro Anwendungsfall entschieden werden.

3.4 Diskretisierung

Um das Modell von Hughes zu berechnen, muss ein numerisches Verfahren zur Lösung der partiellen Differentialgleichung auf einem zweidimensionalen-Gitter ausgewählt werden. Typische Verfahren zur Lösung von solchen Gleichungen, stellen Finite Differenzen und Finite Volumen dar. Jedes dieser Verfahren ist für bestimmte Anwendungsfälle ausgelegt.

Im Finite Differenzen Verfahren wird für jeden Punkt im Raum die kontinuierliche Darstellung der Gleichung durch einen Satz von diskreten Gleichungen, sogenannte Finite Differenzen, ersetzt. Die meisten Verfahren dieser Art sind auf ein reguläres kartesisches Gitter angewiesen. Die Methode wird daher in der Regel nicht für unregelmäßige Geometrie angewendet. Die Lösung der gesuchten Variable erfolgt auf den Gitterpunkten. (Vergleiche [Mazumder, 2016])

Das Finite Volumen Verfahren ist auf die Diskretisierung von partiellen Differentialgleichungen, denen ein Erhaltungssatz (Kontinuum) zugrunde liegt, ausgelegt. Bei korrekter Anwendung werden die Erhaltungseigenschaften der Gleichung bewahrt, man spricht deswegen auch von einem konservativen Diskretisierungsverfahren. Das Berechnungsgebiet wird dabei durch finite (endliche) Volumen diskretisiert. Diese können eine beliebige polygonale oder polyedrische Gestalt aufweisen. Dadurch können auch komplizierte Geometrien dargestellt werden. Die Lösung der gesuchten Variablen erfolgt in den Mittelpunkten der finiten Volumen. Dabei werden in jedem diskreten Zeitschritt die zu- bzw. abfließenden Inhalte über die Kanten der Nachbarvolumen betrachtet. (Vergleiche [Mazumder, 2016])

Da das Modell von Hughes auf Erhaltungssätzen basiert und auf einer komplizierten Geometrie angewendet werden soll, ist somit das Finite Volumen Verfahren für diesen Anwendungsfall besonders geeignet.

Durch die zeitliche Einschränkung der Arbeit wurde auf eine Implementierung einer Triangulierung verzichtet und sich auf die Lösung des Modells auf einem regulären, kartesischen Gitter ($\Delta x \hat{=} \Delta y$) beschränkt.

3.4.1 Anwendung des Finite Volumen Verfahrens

Um das Finite Volumen Verfahren anzuwenden, wird die makroskopische Zone in sogenannte Kontrollvolumen unterteilt. Für diese wird anschließend der integrale Erhaltungssatz angenähert um die zu- bzw. abfließende Dichte für das Kontrollvolumen zu erhalten. Für diese Arbeit werden die makroskopischen Zellen mit Hilfe eines regulären, kartesischen Gitters diskretisiert. Die Kontrollvolumen sind somit durch das Gitter begrenzt.

Um das Finite Volumen Verfahren anzuwenden, muss zunächst die Integralform der partiellen Differentialgleichung aufgestellt werden. Anschließend kann die Näherung für die Personendichte ρ innerhalb eines Volumens V_i zum diskreten Zeitpunkt $t + 1$ hergeleitet werden.

Dafür wird die vereinfachte Form des Modells von Hughes (siehe Gleichung 2.6) betrachtet:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho * g(\rho) * f^2(\rho) * \nabla \Phi) = 0 \quad (3.1)$$

Im ersten Schritt wird die Integralform für ein bestimmtes finites Volumen V_i aufgestellt:

$$\int_{V_i} \frac{\partial \rho}{\partial t} dA = \int_{V_i} \operatorname{div}(\rho * g(\rho) * f^2(\rho) * \nabla \Phi) dV \quad (3.2)$$

Da der Rand des Volumens $\partial V_i = S$ durch das Gitter festgelegt wird, ist dieser abschnittsweise glatt. Dadurch kann der rechte Term mit Hilfe des Gaußschen Integralsatzes wie folgt umgewandelt werden:

$$\int_{V_i} \frac{\partial \rho}{\partial t} dA = \oint_S \vec{n} * \rho * g(\rho) * f^2(\rho) * \nabla \Phi dS \quad (3.3)$$

wobei \vec{n} einen Normalenvektor darstellt, welcher senkrecht auf dem Rand des Volumens steht und nach außen zeigt.

Da der Rand des Volumens in eine endliche Anzahl an Stücken unterteilbar ist, kann das Integral über den Rand des Volumens mit einer Summe über die vier Einzelkanten f dargestellt werden:

$$\int_{V_i} \frac{\partial \rho}{\partial t} dA = \sum_f \vec{n}_f * \rho_f * g(\rho_f) f^2(\rho_f) (\nabla \Phi)_f * A_f \quad (3.4)$$

wobei ρ_f die Personendichte, n_f die Normale und $(\nabla \Phi)_f$ der Gradient des Potentials jeweils am Mittelpunkt der Kante f darstellen. A_f beschreibt die Länge der Kante f .

$(\nabla \Phi)_f$ und ρ_f können mit Hilfe der Werte der Nachbarzelle ngb_f der Kontrollzelle i wie folgt berechnet werden:

$$\rho_f = \frac{\rho_i + \rho_{ngb_f}}{2}, \quad (\nabla \Phi)_f = \frac{\Phi_i - \Phi_{ngb_f}}{\Delta x} \quad (3.5)$$

Als erster Näherungsschritt muss anschließend angenommen werden, dass der Wert am Mittelpunkt des Kontrollvolumens dem Mittelwert ρ_i innerhalb Volumens entspricht.

$$\rho_i = \frac{1}{V_i} * \int_{V_i} \rho dA \quad \Rightarrow \quad \rho_i * V_i = \int_{V_i} \rho dA \quad (3.6)$$

$$\int_{V_i} \frac{\partial \rho}{\partial t} dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_i} \rho dA = V_i * \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (3.7)$$

Anschließend wird für die partielle Ableitung der Dichte nach der Zeit der Vorwärtsdifferenzenquotient eingesetzt:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \frac{\rho_i^{t+1} - \rho_i^t}{\Delta t} + \mathcal{O}(\Delta t) \quad (3.8)$$

wobei ρ_i^T die Dichte zum Zeitpunkt T im Mittelpunkt des Kontrollvolumens V_i darstellt.

Daraus ergibt sich die folgende Näherung:

$$V_i * \frac{\rho_i^{t+1} - \rho_i^t}{\Delta t} = \sum_f \vec{n}_f * \rho_f * g(\rho_f) f^2(\rho_f) (\nabla \Phi)_f * A_f \quad (3.9)$$

Dies kann anschließend nach ρ_i^{t+1} umgestellt werden:

$$\rho_i^{t+1} = \frac{\sum_f \vec{n}_f * \rho_f * g(\rho_f) f^2(\rho_f) (\nabla \Phi)_f * A_f}{V_i} * \Delta t + \rho_i^t \quad (3.10)$$

3.4.2 Stabilität des Finite Volumen Verfahrens

Wie in allen numerischen Verfahren ist die Stabilität der gewählten Methode abhängig von der gewählten Schrittgröße. Zur Überprüfung der Stabilität können unterschiedliche Konvergenzbedingungen eingesetzt werden. Für das Finite Volumen Verfahren gilt die Konvergenzbedingung nach Courant-Friedrichs-Lowy als notwendige Bedingung für die Konvergenz. Sie gibt an, um wie viele Zellen sich eine betrachtete Größe pro Zeitschritt maximal fortbewegt. Für den eindimensionalen Fall ist die Courant-Zahl definiert als:

$$c = \frac{u * \Delta t}{\Delta x} \leq c_{max} \quad (3.11)$$

u stellt den Betrag der Geschwindigkeit und Δx die örtliche Diskretisierung dar. Δt beschreibt die zeitliche Diskretisierung und somit die Zeitschrittänge. Der Wert von c_{max} ist abhängig von dem gewählten numerischen Verfahren. Für das Finite Volumen Verfahren sollte $c \leq 1$ gelten. (Vergleiche [Mazumder, 2016])

Für den zweidimensionalen Fall ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Courant-Zahl c :

$$c = \frac{u_x * \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y * \Delta t}{\Delta y} \leq c_{max} \quad (3.12)$$

u_x und u_y stellen dabei den Betrag der Geschwindigkeiten und Δx bzw. Δy die Diskretisierung in x - bzw. y -Richtung dar.

Zur Bestimmung von c muss lediglich die maximale Geschwindigkeit der partiellen Differentialgleichung in x und y -Richtung bestimmt werden. Dafür wird die Änderung in x bzw. y -Richtung betrachtet:

$$u_x = g(\rho) * f(\rho)^2 * \frac{\partial \Phi_H}{\partial x} \quad \text{bzw.} \quad u_y = g(\rho) * f(\rho)^2 * \frac{\partial \Phi_H}{\partial y} \quad (3.13)$$

$f(\rho)$ als auch $g(\rho)$ werden für $\rho < \rho_{trans}$ maximal. $\frac{\partial \Phi_H}{\partial x}$ bzw. $\frac{\partial \Phi_H}{\partial y}$ werden maximal ($= 1$), wenn der Gradient des Potentials entgegen x - bzw. y -Richtung verläuft. So mit wird der gesamt Term maximal, wenn $\frac{\partial \Phi_H}{\partial x} = 1$ bzw. $\frac{\partial \Phi_H}{\partial y} = 1$ ist und $\rho < \rho_{trans}$.

Nun wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sowohl $\frac{\partial \Phi_H}{\partial x} = 1$ als auch $\frac{\partial \Phi_H}{\partial y} = 1$ zeitgleich gelten kann. Dadurch ergeben sich folgende maximal Geschwindigkeiten in x - bzw. y -Richtung:

$$u_x = g(\rho) * f(\rho)^2 \quad \text{bzw.} \quad u_y = g(\rho) * f(\rho)^2, \quad \rho < \rho_{trans} \quad (3.14)$$

Anhand dieser Geschwindigkeiten, der örtlichen Diskretisierung der entsprechenden makroskopischen Zone und der Courant-Friedrichs-Lowy Bedingung kann nun bestimmt werden, für welche Δt das Modell stabil ist und diese Wert entsprechend im Finite Volumen Verfahren eingesetzt werden.

3.4.3 Instabilität für geringen Dichten

Das Modell von Hughes ist, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, für geringe Dichten instabil. Diese Instabilität äußert sich durch die Entstehung von negativen Dichten, welche sich während der Simulation durch Fehlerfortpflanzung immer weiter verstärken.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein zusätzlicher Korrekturschritt eingefügt. Dieser wird nach der Berechnung der Dichteänderung (siehe Gleichung 3.10) und vor der tatsächlichen Anwendung dieser durchgeführt. Innerhalb des Korrekturschrittes wird die

abfließende Dichte jeder makroskopischen Zelle so skaliert, dass sie maximal der aktuellen Dichte der Zelle entspricht. Dies ist vereinfacht in Algorithmus 1 dargestellt.

Algorithm 1 Pseudocode des Korrekturschrittes für die numerische Berechnung des Modells von Hughes

```
1: for each cell in macroArea do
2:   modifications  $\leftarrow$  getModifications(cell)
3:   outFlowingSum  $\leftarrow$  0
4:   for each domod  $\in$  modifications
5:     if isOutflowing(mod) then
6:       outFlowingSum  $\leftarrow$  outFlowingSum + mod
7:     density  $\leftarrow$  cell.getDensity()
8:     if outFlowingSum > density then
9:       scale  $\leftarrow$  density/outFlowingSum i := 0 4 1
10:      if isOutflowing(mod) then
11:        modifications[i]  $\leftarrow$  modifications[i] * scale
12:
13:   setModificiations(cell, modifications)
```

Durch den Einsatz dieses Korrekturschrittes kann die Instabilität des Modells umgangen werden und die Dichte wird zu keinem Zeitpunkt negativ.

4 Multiskalares Hybridmodell (MuSka-Modell)

Nach der Wahl eines geeigneten makroskopischen Modells kann nun das im Rahmen dieser Arbeit erstellte, multiskalare, zonen-basierte Hybridmodell *MuSka* vorgestellt werden. Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, wird das OSM (siehe Abschnitt 2.2.1) als mikroskopisches und das Modell von Hughes (siehe Abschnitt 2.3.1) als makroskopisches Modell eingesetzt.

Wie in den bereits zuvor behandelten Arbeiten, zu zonen-basierten Hybridmodellen, werden die Begriffe Aggregation und Disaggregation für den Übergang in die makro- bzw. mikroskopische Zone verwendet (siehe Abschnitt 2.4.2). Bei der Aggregation müssen die einzelnen Personen zusammengefasst werden, während bei der Disaggregation Einzelpersonen anhand der Dichtedaten generiert werden.

Innerhalb der nächsten Abschnitte wird auf alle zonen-übergreifenden Aspekte eingegangen. So werden die Kriterien zur Erstellung der Zonen vorgestellt als auch auf die zonenübergreifende Personenerhaltungen eingegangen. Anschließend wird das Verhalten in den Übergangsbereichen zwischen den Zonen und das Navigationsverhalten beschrieben. Zuletzt wird die zeitliche Diskretisierung des Modells vorgestellt.

4.1 Zonendefinition

Um die kritischen Bereiche mit dem mikroskopischen Modell zu simulieren, während der restliche Simulationsbereich makroskopisch simuliert wird, müssen Kriterien zur Erstellung der Zonen definiert werden. Eine Zone stellt dabei einen Teilbereich des Betrach-

tungsbereiches dar. Innerhalb einer Zone wird ein festgelegtes Simulationsmodell (mikro- bzw. makroskopisch) verwendet.

Es wird festgelegt, dass die eine Zone jeweils von einem Polygon repräsentiert wird. Die Kanten des Polygons müssen entweder auf der Kante eines Hindernisses liegen oder den Übergang zu einer weiteren Zone darstellen. Kanten zwischen zwei Zonen werden als Übergangskanten bezeichnet (siehe Abschnitt 2.4.2). Zu einer Zone können mehrere Übergangskanten führen. Des Weiteren wird festgelegt, dass Übergangskanten keine Hindernisse oder Simulationsobjekte schneiden und nicht in oder Nahe einer Wegverengung (bspw. Tür) platziert werden dürfen. Ein Bereich wird als Wegverengung angesehen, wenn die Wegbreite sich in den letzten 10 Metern um mehr als 50% reduziert.

Eine Übergangskante wird für einen Personentypen als Aggregationskante bezeichnet, wenn Personen dieses Typs beim Übertritt die makroskopische Zone betreten. Analog dazu wird sie für die Disaggregation als Disaggregationskante bezeichnet.

Um die Definition der Zonen zu vereinfachen, müssen lediglich makroskopische Zonen definiert werden. Der restliche Betrachtungsbereich setzt sich automatisch aus mikroskopischen Zonen zusammen. Liegen Zonen des gleichen Typs nebeneinander, werden sie als eine Zone angesehen. Für die makroskopischen Zonen werden folgende Anforderungen gestellt. Die Zone darf:

- keine Hindernisse beinhalten
- keine Simulationsobjekte (Treppen, Personenquellen etc.) beinhalten, welche nicht von dem makroskopischen Modell unterstützt werden
- in keine Bereiche platziert werden, in denen unterschiedliche Personenflussrichtungen erstmals aufeinandertreffen

Die Zonen werden manuell zugewiesen. Dies ist anhand eines einfachen Beispieles einer Kreuzung in Abbildung 4.1 dargestellt.

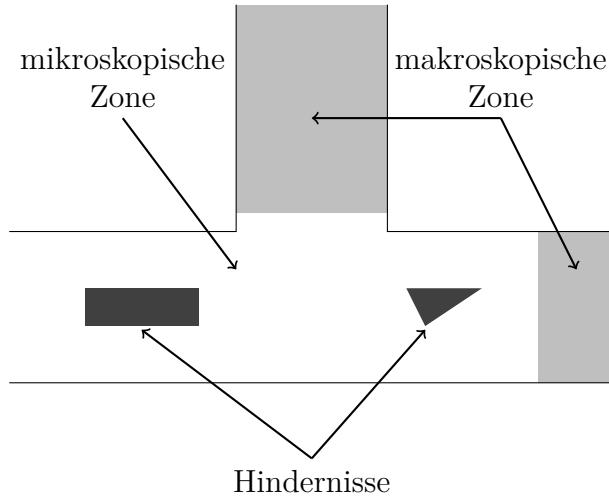


Abbildung 4.1: Zonendefinition am Beispiel einer einfachen Kreuzung mit Hindernissen

4.2 Personenerhaltung

Beim Übergang der Personen von einer mikroskopischen in eine makroskopische Zone werden die Attribute der Personen in einen Dichtewert und einen Personentypen zusammengefasst. Dadurch verlieren die Personen ihre individuellen Eigenschaften (siehe 2.5.2). In den bisherigen Modellen werden neue Personen bei der Disaggregation anhand des Personentyps neu erzeugt. Dabei kann jedoch nicht gewährleistet werden, dass die gleichen Kombinationen der Attribute vergeben werden. Dadurch können die Personen beispielsweise ihre Gruppenzugehörigkeit verlieren. Ebenfalls wird nicht beachtet, dass Fußgänger mit geringeren Wunschgeschwindigkeiten mehr Zeit benötigten, um eine Zone zu durchqueren als Personen mit höherer Geschwindigkeit.

Um dieses Verhalten zu verbessern sollen die Einzelpersonen nach Verlassen der makroskopischen Zone nicht neu generiert werden. Stattdessen werden die Fußgänger bei der Aggregation zu einer sortierten Liste hinzugefügt und bei der Disaggregation wieder entnommen. Zur Sortierung wird jeder Person i beim Aggregationszeitpunkt ein geschätzter Disaggregationszeitpunkt $\widehat{t}_{D,i}$ zugewiesen. Dadurch kann gewährleistet werden, dass sich langsamere Fußgänger länger in der makroskopischen Zone aufhalten als schnellere.

Um den Disaggregationszeitpunkt eines Fußgängers bei der Ankunft in der makroskopi-

schen Zone zu schätzen, werden folgende Annahmen getroffen:

Hypothese 4.1: *Die Wegstrecke des Fußgängers in der Zone entspricht annähernd der Differenz aus dem Potential an der Aggregationsposition und des minimalen Potentials in der Zone.*

Dies ist darin begründet, dass die Fußgänger im Modell von Hughes immer den kürzesten Weg verwenden, welche durch das Potential beschrieben ist. Da sie die Zone entlang der Disaggregationskante verlassen wollen, befinden sich entlang der Kante die geringsten Potentiale.

Somit kann die Wegstrecke $\widehat{L}_{i,j}$ eines Fußgängers i in der Zone j mit minimalen Potential $\Phi_{j,P_{n \min}}$ wie folgt angenähert werden:

$$\widehat{L}_{i,j} = \Phi(x_{A,i}) - \Phi_{j,P_{n \min}} \quad (4.1)$$

wobei $t_{A,i}$ und $x_{A,i}$ den Aggregations-Zeitpunkt und -Position des Fußgängers beschreiben.

Hypothese 4.2: *Da die Geschwindigkeit der Fußgänger in der makroskopischen Zone lediglich von der umliegenden Dichte abhängt, werden alle Fußgänger innerhalb der Zone um etwa den gleichen Faktor abgebremst.*

Daraus folgt, dass die Abbremsung des einzelnen Fußgängers innerhalb der makroskopischen Zone für den Vergleich der Reisezeiten aller Fußgänge innerhalb der Zone vernachlässigt werden kann. Somit kann die Reisezeit mithilfe der Wegstrecke und der Personengeschwindigkeit abgeschätzt werden. Für die Näherung des Disaggregationszeitpunktes $\widehat{t}_{D,i,j}$ eines Fußgängers i des Personentyps P_n mit Wunschgeschwindigkeit v_i in Zone j kann somit folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$\widehat{t}_{D,i,j} = t_{A,i} + v_i * \widehat{L}_{i,j} \quad (4.2)$$

4.3 Zonenübergangsverhalten

Um zwischen den Zonen und somit den Modellen zu wechseln, muss das Verhalten und die Wahl des Zonenübergangs (Übergangsbereich vs. -kante) definiert werden. Die zuvor betrachteten zonen-basierten Hybridmodelle wurden lediglich auf Gebäude ausgelegt, deshalb konnten sie die Übergangskanten in den Türen platzieren. Auf Veranstaltungsgeländen im urbanen Bereich stehen meist keine Türen zur Platzierung der Übergangskanten zur Verfügung. Deshalb muss der Zonenübergang auf einem der Fußgängerbereiche /-wege durchgeführt werden. Diese können je nach Veranstaltung sehr breit sein. Dementsprechend würde eine gleichmäßige (Dis-)Aggregation entlang der Übergangskante die Simulationsergebnisse verfälschen.

Um diesen Fehler zu verringern, werden die Übergangskanten in einzelne Abschnitte unterteilt. Entlang dieser wird die makroskopische Zone in entsprechende Übergangsbereiche eingeteilt. Innerhalb dieser Arbeit werden die Übergangsbereiche entsprechend der Zellen der makroskopischen Zonen gewählt. Die Bereiche können anschließend für die (Dis-)Aggregation unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Abschnitte werden analog zur Übergangskante als Disaggregations- bzw. Aggregationsabschnitt bezeichnet. Dies gilt ebenfalls für die Bereiche. Zur Verdeutlichung ist dies schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt.

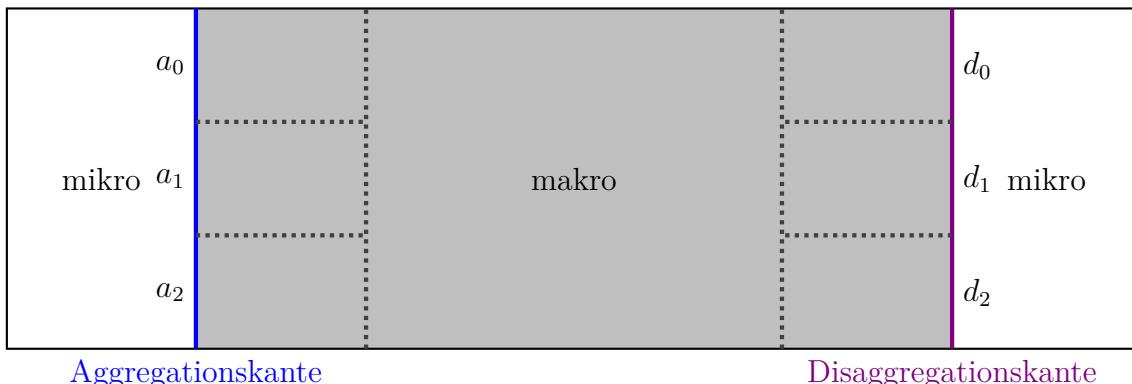


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung einer makroskopischen Zone (grau) mit Aggregations- (blau) und Disaggregationskante(violett). Zusätzlich sind die Aggregationsabschnitte (a_n) und Disaggregationsabschnitte (d_n) dargestellt.

4.3.1 Aggregation

Bei der Aggregation werden die Attribute des Fußgängers zu einem Dichtewert und einem Personentyp, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, zusammengefasst. Ein Fußgänger i kann aggregiert werden, sobald sein Mittelpunkt innerhalb der makroskopischen Zone liegt. Ein Fußgänger darf die makroskopische Zone nur betreten, wenn die mittlere Personendichte $\bar{\rho}_k$ im entsprechenden Abschnitt k unter der kritische Personendichte ρ_{crit} liegt. Dies erlaubt, dass sich der makroskopische Personenstau in der mikroskopischen Zone fortsetzt.

Bei der Aggregation wird zunächst der Disaggregationszeitpunkt $\widehat{t_{D,i}}$ ermittelt und der Fußgänger der Liste zur Personenerhaltung hinzugefügt (siehe Abschnitt 4.2). Anschließend wird die Personendichte im entsprechenden Aggregationsbereich gleichmäßig um einen Fußgänger erhöht und dieser aus der mikroskopischen Zone entfernt.

4.3.2 Disaggregation

Bei der Disaggregation wird aus den Dichtewerten einer Disaggregationszelle die entsprechende Anzahl der zu disaggregierden Personen berechnet und zur mikroskopischen Zone hinzugefügt.

Um die zu disaggregierende Personenanzahl zu berechnen, wird zunächst der Personenfluss J_k zum Zeitpunkt t in jedem Disaggregationsabschnitt k berechnet. Dieser kann anhand der mittleren Personendichte $\bar{\rho}_k$ in k und der Personengeschwindigkeit v_l in Abhängigkeit der Dichte $f(v_l)$ des Personentyps l bestimmt werden:

$$J_k = f(v_l) * \bar{\rho}_k \quad (4.3)$$

Anhand des Personenfluxes kann anschließend die Anzahl der Fußgänger $\hat{n}_{D,k}$, welche den Bereich über den Abschnitt k mit Länge l_k in einem festgelegten Zeitschritt mit Länge Δt_D verlassen, wie folgt berechnet werden:

$$\hat{n}_{D,k} = J_k * l_k * \Delta t_D \quad (4.4)$$

Die maximale Disaggregationszeitschrittlänge $\Delta t_{D_{max}}$ muss dabei so klein gewählt werden, dass die Anzahl der Fußgänger n , welche den Abschnitt verlassen, immer kleiner gleich der Anzahl der Fußgänger n_k im Bereich k ist. Somit muss die Disaggregationszeitschrittlänge kleiner gleich der maximalen Zeitschrittlänge $\Delta t_{H_{max}}$ zur Berechnung der makroskopischen Zone gewählt werden. Dieser kann, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, berechnet werden. Zur Vereinfachung wird in der weiteren Arbeit Δt_D gleich Δt_H gesetzt.

Da nur ganzzahlige Fußgängeranzahlen disaggregiert werden können, muss eine Sonderregelung für die verbleibenden Fußgänger getroffen werden.

Wird in einem Zeitraum weniger als ein Fußgänger in einem Disaggregationsabschnitt disaggregiert, werden solange Abschnitte zusammengefasst, bis ein vollständiger Fußgänger disaggregiert werden kann. Dieser wird anschließend im Abschnitt mit dem höchsten Personenfluss disaggregiert.

Kann kein vollständiger Fußgänger durch das Zusammenfassen der Abschnitte disaggregiert werden, wird die restliche Fußgängeranzahl zum nächsten Disaggregationszeitraum hinzugefügt. Der Wert darf jedoch die Gesamtanzahl der Fußgänger n_k innerhalb der Zellen nicht überschreiten, da sonst mehr Fußgänger disaggregiert werden als innerhalb der Zone vorhanden. Diese stellt eine maximale, obere Schranke dar. Dieses Verhalten wird ebenfalls für verbleibende, unvollständigen Fußgänger nach der erfolgreichen Disaggregation verwendet. Die Gesamtanzahl der Fußgänger n_k im Bereich k kann mithilfe der Dichte und dem Flächeninhalt A_k berechnet werden:

$$n_k = A_k * \bar{\rho}_k \quad (4.5)$$

Die Gesamtanzahl der disaggregierten Personen in einem Aggregationsabschnitt k wird als $n_{D,k_{ges}}$ bezeichnet.

Innerhalb des Zeitraums Δt_D werden n Fußgänger disaggregiert. Für die Disaggregation wird der Fußgänger mit dem geringsten geschätzten Disaggregationszeitpunkt $\widehat{t}_{D,i}$ der Personenerhaltungsliste entnommen und an einer zufällige, valide Position entlang des Disaggregationsabschnittes platziert. Eine Position gilt als valide, wenn der Fußgänger an dieser Position keine Hindernisse oder andere Fußgänger überschneidet. Kann keine

solche Position gefunden werden, wird der Fußgänger nicht aus der Personenerhaltungsliste entfernt und es werden keine weiteren Fußgänger in diesem Zeitabschnitt innerhalb dieses Disaggregationsabschnittes disaggregiert.

4.4 Navigation

Aus der üblichen Weitläufigkeit der Veranstaltungen und dadurch Einsatz breiter Fußgängerwege, folgt dass die Übergänge der Zonen breite Flächen überspannen müssen. Besonders vor Kreuzungen neigen Fußgänger auf solchen Wegen dazu, sich vorzeitig auf der entsprechenden Wegseite einzuordnen. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, würde der Bereich vor der Kreuzung makroskopisch simuliert werden, die Kreuzung selbst jedoch mikroskopisch.

In Abbildung 4.3 ist eine Abbiegung durch eine reine mikroskopische Simulation dargestellt. Wie zu erkennen ist, bewegen sich die Personen bereits weit vor der Kreuzung auf die gewünschte Abbiegeseite zu.

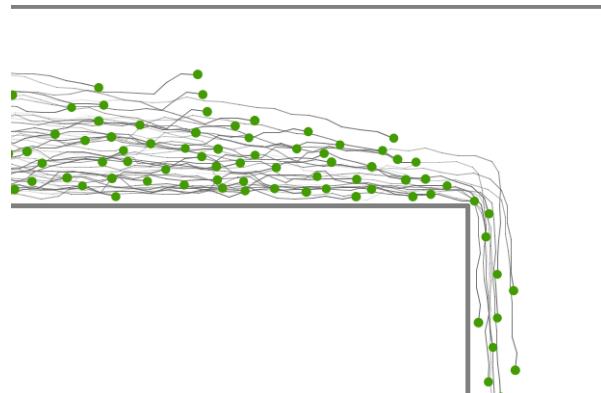


Abbildung 4.3: Beispielhafte Darstellung des Verhaltens von Personen vor einer Wegecke anhand einer mikroskopische Simulation. Die Fußgänger sind grün dargestellt und ihre zugehörigen Trajektorien hellgrau

Für die Navigation innerhalb der Zonen kann entweder eine zonen-übergreifende (globale) oder -beschränkte (lokale) Navigation verwendet werden. Bei einer lokalen Navigation würden die Personen zu den nächsten Übergangskanten, welche erlauben die Zone zu verlassen, navigieren. Wenn die Übergangskanten nahe einer solchen Abbiegung platziert werden, könnte somit das vorzeitige Einordnungsverhalten nicht reproduziert werden. Deshalb wird eine globale Navigation benötigt.

Da sowohl das *OSM* (mikro) als auch das Modell von Hughes (makro) ein Potentialfeld zur Navigation einsetzen, müssten somit zwei Potentialfelder generiert werden. Dadurch

würde sich der Speicherbedarf für die Navigation im Gegensatz zur reinen mikroskopischen Simulation verdoppeln.

Da die beiden Potentialfelder jeweils die gewichtete Reisezeit der Fußgänger repräsentieren, wird vorgeschlagen, das bestehende Potentialfeld Φ_{OSM} des OSM 's ebenfalls für das Modell von Hughes einzusetzen. Nachdem das Modell von Hughes jedoch ein andere Gewichtung der Reisezeit voraussetzt (siehe 2.5), muss das Potentialfeld des OSM 's dazu entsprechend skaliert werden.

Um den Skalierungsfaktor c_s zu berechnen wird die Definition für das Potentialfeld Φ_H herangezogen:

$$g(\rho) * f(\rho) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial \Phi_H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_H}{\partial y}\right)^2}} \quad (4.6)$$

Da lediglich der Gradient des Potentialfeldes zu Berechnung benötigt wird, kann der Gradient des Potentialfelds Φ_H wie folgt ersetzt werden:

$$g(\rho) * f(\rho) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{c_s * \partial(\Phi_{OSM})}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{c_s * \partial(\Phi_{OSM})}{\partial y}\right)^2}} \quad (4.7)$$

Somit ergibt sich für den Skalierungsfaktor c_s

$$c_s = \frac{1}{g(\rho) * f(\rho) * \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi_{OSM}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{OSM}}{\partial y}\right)^2}} \quad (4.8)$$

4.5 Zeitliche Diskretisierung

Wie im Abschnitt 2.5.4 beschrieben, werden zur Berechnung des *OSM* in *crowd:it* feste Zeitschritte eingesetzt. Die Zeitschrittlänge beträgt dabei Δt_{OSM} . Für die Diskretisierung des Modells von Hughes wird ebenfalls eine feste Zeitschrittlänge Δt_H eingesetzt (siehe Abschnitt 3.4). Verwenden die Modelle unterschiedliche Diskretisierungen, muss definiert werden, wie die Personen beim Übergang zwischen den Zonen und den Diskretisierungsschritten behandelt werden.

Die einfachste Lösung besteht darin, beide Modelle mit der gleichen Zeitschrittlänge Δt zu diskretisieren. Damit würde das Modell mit der höheren, maximalen Schrittlänge Δt_{max} deutlich häufiger als notwendig berechnet werden. Dieser Lösungsweg würde deshalb einen starken Einfluss auf die gesamt Berechnungsdauer haben. Dementsprechend wird diese Lösung als unzureichend eingestuft.

Als weitere Option kann die Schrittlänge des Modells mit der höheren Länge so gewählt werden, dass sie einem mehrfachen der Schrittlänge des anderen Modells entspricht. Diese Lösung hat den Vorteil, dass die Schrittlänge konstant bleibt und die Ergebnisse der beiden Modelle im gleichen Zeitschritt feststehen. Deshalb wurde sich insgesamt für diese Methode entschieden.

Innerhalb dieser Arbeit wurden sowohl in der Kalibrierung als auch in der Evaluierung die Diskretisierung der makroskopischen Zone so gewählt, dass $\Delta t_{H_{max}} > \Delta t_{OSM}$ gilt. So mit ergibt sich für die Zeitschrittlänge Δt_H für das Modell von Hughes:

$$\Delta t_H = \Delta t_{OSM} * m, \quad m \in \mathbb{N}_+ \quad (4.9)$$

Dies ist in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt.

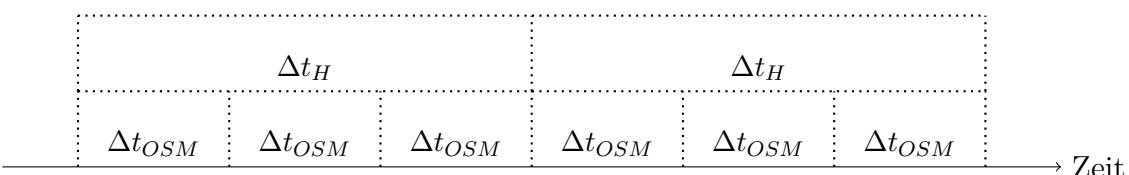


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Zeitdiskretisierung des mikro- als auch des makroskopischen Modells innerhalb des Hybridmodells

Um sicherzustellen, dass keine Person sich innerhalb eines Zeitschrittes mehrfach bewegen, muss die Aggregation und Disaggregation nach der Berechnung der mikroskopischen, wie auch nach der makroskopischen, Zonen ausgeführt werden. Dies ist in Abbildung 4.5 verdeutlicht.

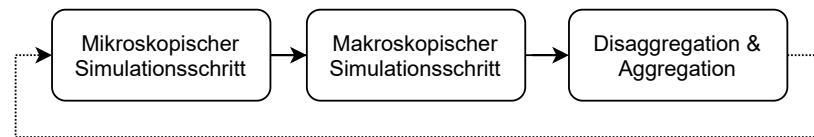


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Simulationsschritte innerhalb des Hybridmodells

5 Implementierung

Um die Funktionalität und Performance des *MuSka-Modells* zu verifizieren, wurde eine prototypische Implementierung in *crowd:it* (siehe Abschnitt 2.5) integriert.

crowd:it setzt sich aus zwei getrennten Projekten zusammen, zum einen der *PostVis* zum anderen dem *Kernel*. Die *PostVis* stellt die Nutzerschnittstelle dar. So können darin die Simulationsparameter durch den Nutzer definiert als auch die Simulationsergebnisse visualisiert und analysiert werden. Der Kernel übernimmt die tatsächliche Berechnung der Simulation.

Für die Integration des Hybridmodells müssen beide Projekte angepasst werden. Innerhalb der *PostVis* muss die Erstellung und Parametrisierung der makroskopischen Zonen, als auch die Visualisierung der Dichtewerte ermöglicht werden. Die Implementierung des tatsächlichen Hybridmodells erfolgt innerhalb des *Kernels*.

5.1 Manuelle Zonendefinition

Für die Erstellung der makroskopischen Zonen wurde der bereits vorhandene Mechanismus zur Generierung der Simulationsobjekte (Personenquellen, Treppen, etc.) adaptiert. Dabei werden die bestehenden dxf-Pläne des Geländes / Gebäudes durch zusätzliche Polygone im CAD-Tool angereichert. Diese Polygone werden als Simulationsobjekt markiert. Die Pläne werden anschließend in *crowd:it* importiert. Alle unmarkierten Objekte sind Hindernisse, während alle markierten als Simulationobjekte aufgefasst werden. Diesen Objekten können anschließend Typen (beispielsweise Personenquelle) sowie weitere Parameter zugewiesen werden.

5.2 Berechnung des Hybridmodells

Zur Berechnung des Hybridmodells muss sowohl die Initialisierung als auch die iterative Berechnung angepasst werden. Innerhalb ersterer müssen zusätzlich die makroskopischen Zonen sowie die Zonenübergänge erstellt werden. Die iterative Berechnung muss außerdem um einen *makroskopischen Simulationsschritt* und die *Zonenübergangsschritte* (Aggregation und Disaggregation) erweitert werden.

Deshalb wurde der bestehende Simulationkernel um die zusätzlichen Module *MacroKernelModule*, *AggregationKernelModule* und *DisaggregationKernelModule* erweitert (siehe Abbildung 5.1). Das *MacroKernelModule* übernimmt die Berechnung der einzelnen makroskopischen Zonen, während die Module *AggregationKernelModule* und *DisaggregationKernelModule* den Übergang zwischen den Zonen ermöglichen. Das *MacroKernelModule* verwaltet zusätzlich die aggregierten Fußgänger, während ihrem Aufenthalt in der makroskopischen Zone.

Sowohl die Disaggregation als auch die Aggregation wurden entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 4.3 implementiert.

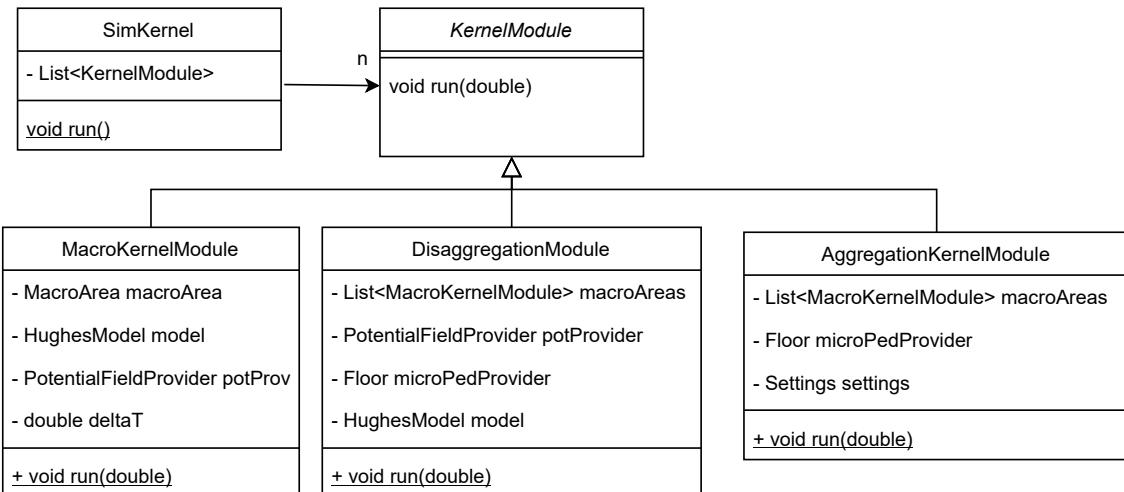


Abbildung 5.1: Klassendiagramm der Erweiterung des bestehenden *SimKernel* s um die für das Hybridmodell benötigten zusätzlichen Module: *MacroKernelModule*, *DisaggregationKernelModule* und *AggregationKernelModule*

5.2.1 Übergreifende Navigation

Die makro- als auch mikroskopischen Zonen sollen innerhalb des *MuSka-Modells* das gleiche Navigationsfeld verwenden. Da dieses möglichst nur einmal angelegt werden soll, muss ein entsprechender Zugriffsmechanismus erstellt werden. Dazu wurde ein sogenannter *PotentialFieldManager* und ein *PotentialFieldProvider* eingeführt. Während der *PotentialFieldManager* alle bestehenden Navigationsfelder (auch genannt Potentialfelder) verwaltet, ermöglicht der *PotentialFieldProvider* eine einfache Schnittstelle für das makroskopische und Aggregations-Modul. Der *PotentialFieldProvider* erledigt somit die Konvertierung der Personentypen des makroskopischen Modells zu der für die Potentialfeldberechnung benötigten Eingabedaten. Ein ähnlicher Mechanismus steht bereits analog für die mikroskopische Simulation bereit.

Die für die Berechnung der makroskopischen Zone benötigten Potentialfeldwerte werden nach der ersten Abfrage innerhalb des *PotentialFieldProvider* zwischengespeichert. Dies ist darin begründet, dass ihr Wert über alle Zeitschritte hinweg konstant bleibt und somit nur einmal berechnet werden muss.

5.2.2 Mikroskopischer Simulationsschritt

Innerhalb des mikroskopischen Simulationsschrittes muss als einzige Anpassung sichergestellt werden, dass die Personen die makroskopische Zone nur betreten dürfen, wenn die Dichte der entsprechenden Zelle unterhalb der maximalen Dichte ρ_{max} liegt. Dafür musste ein weiterer Schritt in der Kollisionserkennung mit anderen Fußgängern hinzugefügt werden. Somit wird bei jedem Schritt des Fußgängers überprüft, ob dieser eine nahegelegene makroskopische Zelle betritt. Der Schritt ist lediglich valide, wenn die makroskopische Zelle die maximale Dichte noch nicht erreicht hat.

5.2.3 Makroskopischer Simulationsschritt

Innerhalb des Kernels wird jede makroskopische Zone durch eine Instanz der abstrakten Basisklasse *MacroArea* repräsentiert. Diese verwalten die entsprechenden makroskopischen Zellen der Zone. Jede einzelne makroskopische Zelle ist definiert durch ihren Flächeninhalt und ihrer aktuellen Personendichten je Personentyp und wird durch eine Instanz der abstrakten Basisklasse *MacroCell* dargestellt.

Für die Implementierung der Zonen mit einem regulären Gitter als Diskretisierung wurden diese Basisklassen entsprechend erweitert. Hierfür wurden die beiden Klassen *RegularMacroArea* und *RegularMacroCell* implementiert. Erstere verwaltet die regulären makroskopischen Zellen innerhalb eines zweidimensionalen Arrays. Die *RegularMacroCell* kennt zusätzlich seine Position in Form der Index-Werte innerhalb dieses Arrays.

Diese Implementierung wurde gewählt um den Prototypen in Zukunft leicht um ein irreguläres Diskretisierungsgitter erweitern zu können. Eine Klassenübersicht kann folgenden Diagramm 5.2 entnommen werden.

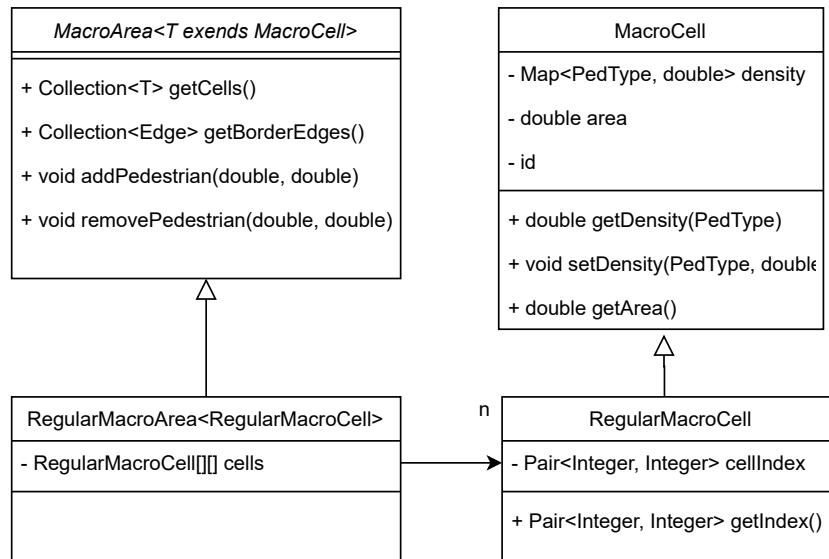


Abbildung 5.2: Klassendiagramm der Kernel internen Repräsentation der makroskopischen Zonen

Um die tatsächlichen Fußgängerbewegungen innerhalb der makroskopische Zone zu berechnen, wurde analog ein abstrakte Basisklasse *MacroCalculator* sowie eine Erwei-

terung *RegularMacroCalculator* implementiert. Innerhalb des *RegularMacroCalculator* wird, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, die Veränderung der Personendichte innerhalb eines Zeitschrittes zu den Nachbarzellen berechnet. Diese wird jedoch nicht sofort angewendet, vielmehr wird zunächst ein Korrekturschritt durchgeführt. Dieser stellt die Einhaltung der zusätzlich eingefügten künstlichen Zusatzbedingung (siehe Abschnitt 3.4.3), zur Vermeidung von negativen Dichten, sicher. Innerhalb des Korrekturschrittes wird für jede Zelle die gesamte abfließende Personendichte bestimmt. Überschreitet sie die aktuelle Personendichte innerhalb der Zelle, werden alle abfließende Einzeldichten prozentual herabgesenkt. Anschließend wird die korrigierte Veränderung der Personendichten auf die Zellen angewendet.

5.3 Ergebnisvisualisierung

Zur Visualisierung der Simulationsergebnisse werden nach jedem Simulationsschritt (mikro., makro., Aggregation, Disaggregation) die Positionen der mikroskopischen Personen als auch die gesamt Dichte jeder makroskopischen Zellenpersistiert. Die mikroskopischen Personen werden, wie bisher, als Kreise dargestellt, während die Zellen der makroskopischen Zone entsprechend der Dichtewerte eingefärbt werden.

6 Kalibrierung

Innerhalb der Evaluierung (Abschnitt 7) soll ein Vergleich zwischen dem Hybrid und dem mikroskopischen Modell gezogen werden. Um dies zu ermöglichen, muss zunächst das Hybridmodell entsprechend kalibriert werden. Innerhalb dieser Arbeit wird wegen der zeitlichen Einschränkung lediglich eine stark vereinfachte Kalibrierung durchgeführt. Ziel ist es, Räumungszeiten zu erzielen die dem mikroskopischen Modell ähneln. Dazu werden die Parameter anhand eines Szenarios kalibriert. Für jede Parameterkombination wird dabei die Räumungszeiten für beide Modelle (mikroskopisch und hybrid) bestimmt und gegenübergestellt. Als Räumungszeit wird der Zeitpunkt angesehen, an welchen alle Personen ihr Ziel erreicht haben und aus dem Szenario entfernt wurden.

Um diese Kalibrierung möglichst allgemeingültig zu gestalten, wird das Szenario mit vier verschiedenen Personendichten initialisiert und jeweils die Einzelabweichung zur rein mikroskopischen Simulation bestimmt. Als Gesamtabweichung der Räumungszeiten wird die Summe der absoluten Einzelabweichungen betrachtet. Die Parameterkombination mit möglichst minimaler Gesamtabweichung wird als optimale Kalibrierung angesehen.

Für das mikroskopische Modell wird am Anfang jeder Simulation der Seed des Pseudo-Zufallszahlen-Generator auf null gesetzt. Dies ermöglicht die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

6.1 Parameter

Die Kalibrierung wird durch ρ_{trans} , ρ_{crit} und ρ_{max} (siehe Gleichungen 2.8 und 2.9) charakterisiert. Bei diesen handelt es sich ausschließlich um Parameter des makrosko-

pischen Modells, da das Hybridmodell selbst keine weiteren veränderbaren Parameter aufweist.

Für die Parameter wurden alle möglichen Kombinationen der in Tabelle 6.1 angegeben Belegungen überprüft. Diese wurden von den in [Hughes, 2002] vorgeschlagenen Werten abgeleitet.

| Parameter | Menge von zu überprüfenden Werten |
|----------------|--|
| ρ_{crit} | 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 |
| ρ_{trans} | 2.9, 2.8, 2.7, 2.6, 2.5, 2.4, 2.3, 2.2 |
| ρ_{max} | 4.6, 4.5, 4.4 |

Abbildung 6.1: Menge aller zu überprüfender Parameterwerte innerhalb der Kalibrierung

6.2 Population

Da jede Population eine eigene Kalibrierung des makroskopischen Modells voraussetzt, wird in dieser Arbeit aufgrund der zeitlichen Einschränkung auf die Verwendung und somit Kalibrierung von unterschiedlichen Populationen verzichtet.

Die Personen werden anhand der folgender Populationsbeschreibung generiert. Allen Personen wird der gleiche Torsoradius 0.44 m zugewiesen, somit erhält jeder den gleichen Platzbedarf. Die Geschwindigkeiten werden als normalverteilt angenommen. Der Erwartungswert der Normalverteilung wird dabei als 1.45 m/s angenommen, die Standardabweichung als 0.04 m/s . Zusätzlich werden die Wunschgeschwindigkeiten durch einen Maximalwert 1.50 m/s und einen Minimalwert 1.40 m/s beschränkt.

Diese Geschwindigkeiten werden als ähnlich angesehen. Dadurch wird angenommen, dass eine weitere Unterteilung der Personentypen entsprechend der Geschwindigkeit innerhalb der makroskopischen Zonen nicht notwendig ist.

6.3 Szenario

Für die Kalibrierung wird ein einfacher Gang mit einer makroskopischen Zone in der Mitte betrachtet. Am Anfang des Ganges befindet sich eine Quelle, in welcher in der ersten Sekunde Personen (500 / 1000 / 1500 / 2000) generiert werden. Den Personen wird als nächster Wegpunkt ein Ziel am Ende des Ganges zugewiesen. Alle Personen laufen gleichzeitig los. Innerhalb dieses Personenziels werden die Personen aus dem Szenario entfernt. Somit modelliert das Szenario eine stark vereinfachte Räumung durch einen Gang. Für die makroskopische Zone wird eine örtliche Diskretisierung von $2.5 \times 2.5 m$ großen Zellen angenommen. Das Szenario ist in Abbildung 6.2 mit den zugehörigen Maßen dargestellt.

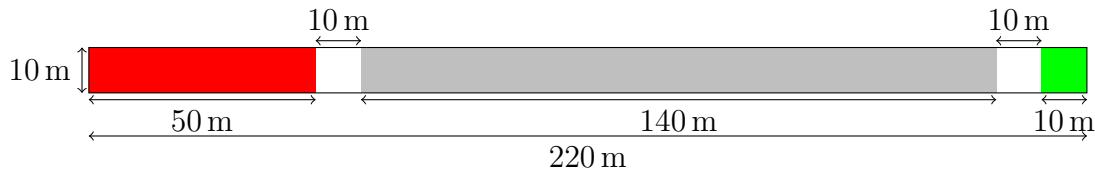


Abbildung 6.2: Simulationsszenario zur Kalibrierung des Hybridmodells mit einer Personenquelle (rot), Personenziel (grün) und einer makroskopischen Zone (grau)

Innerhalb dieses Szenarios gibt es keine alternative Wegwahl für die Fußgänger.

6.4 Ergebnisse

Insgesamt wurden 144 Parameterkombinationen überprüft. Für diese wurden jeweils mikroskopisch als auch hybrid Simulationen mit vier verschiedenen Personenanzahlen erstellt und die Einzelabweichungen berechnet. Die vollständigen Ergebnisse der Gesamträumungszeiten und Abweichungen können Anhang B entnommen werden. Die wichtigsten Ausschnitte der Gesamträumungszeiten und Abweichungen zur mikroskopischen Simulation sind den Tabellen 6.1 und 6.2 zusammengefasst.

Insgesamt führte die in Tabelle 6.3 dargestellte Parameterkombination zu der geringsten Gesamtabweichung gegenüber der rein mikroskopischen Simulation. ρ_{crit} und ρ_{max} entsprechen dabei den in [Hughes, 2002] vorgeschlagenen Parameterwerten, lediglich ρ_{trans} weicht ab (vorgeben 2.7).

| | | Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | |
|---------------|-----|---------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| Scenario | | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Mikroskopisch | - | - | - | - | 163,18 | 206,41 | 248,01 | 289,08 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 | |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 | |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Tabelle 6.1: Ausschnitt aus der Tabelle im Anhang B der Gesamträumungsräumungszeiten für das Kalibrierungsscenario

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|--|------------|------------|------------|------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2,3 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,3 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,3 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Tabelle 6.2: Ausschnitt aus der Tabelle im Anhang B der Abweichung der Gesamträumungsräumungszeiten für das Kalibrierungscenarios

| Parameter | Optimaler Wert nach Kalibrierung |
|----------------|----------------------------------|
| ρ_{crit} | 0,8 |
| ρ_{trans} | 2,2 |
| ρ_{max} | 4,5 |

Abbildung 6.3: Zusammenfassung der gewählten Parameter für das makroskopische Modell

7 Evaluierung

Mit Hilfe des Prototypen kann das *MuSka-Modells* evaluiert werden. Dazu wird sowohl die Performance als auch die Räumungszeit mit den Ergebnissen des rein mikroskopischen Modells verglichen. Hierbei werden drei beispielhafte Szenarien eingesetzt. Für diese werden jeweils drei unterschiedliche Varianten (Personenzahlen) betrachtet.

Innerhalb der Evaluierung wird die kalibrierte Population, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, angenommen. Für jede der Simulationen wurde ebenfalls der gleiche Seed (0) für den Pseudo-Zufallszahlen-Generator gesetzt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss miteinbezogen werden, dass die Performance des Hybridmodells stark von der Zusammensetzung des Szenarios und der Personenanzahl abhängt. Die gewählten Szenarien können dabei keine allgemeine Aussage über den maximalen Performance-Gewinn treffen. Zusätzlich ist zu beachten, dass innerhalb des mikroskopischen Modells bereits ein Performance Verbesserungen durchgeführt wurden, während das makroskopische Modell bisher nur prototypisch implementiert ist.

Aufgrund der Einfachheit der betrachteten Szenarien wurde zu Gunsten der Performance des mikroskopischen Modells lediglich ein statisch Zielpotentialfeld gewählt. Aus diesem Grund wird die aufwändige Berechnung des Potentialfelds lediglich einmalig am Anfang der Simulation und nicht, wie im dynamischen Fall, in jedem Zeitschritt durchgeführt.

Zur Evaluierung wurde ein Lenovo T480s mit 16GB Ram und einen Intel Core i7-8550U Prozessor eingesetzt.

7.1 Szenarien

Um unterschiedliche Aspekte des Modells zu evaluieren, werden drei verschiedene Szenarien herangezogen. In jedem der Szenarien werden zu Sekunde Eins Personen in einer oder mehreren Quellen generiert. Alle Personen bewegen sich gleichzeitig auf ein festgelegtes Ziel zu. Für jedes der Szenarien werden drei Varianten verglichen. Diese unterscheiden sich durch die generierte Personenanzahl (100, 200, 300) in Sekunde Eins.

Die drei betrachteten Szenarien sind in den Abbildungen 7.1 - 7.3 dargestellt. Die exakten Dimensionen der Szenarien können den Abbildungen entnommen werden.

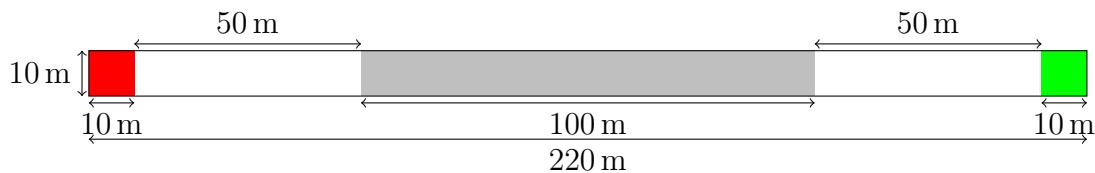


Abbildung 7.1: Erstes Szenario zur Evalierung des Modells: Einfacher Gang mit einer makroskopischen Zone (grau), einer Personenquelle (rot) und einem Personenziel (grün)

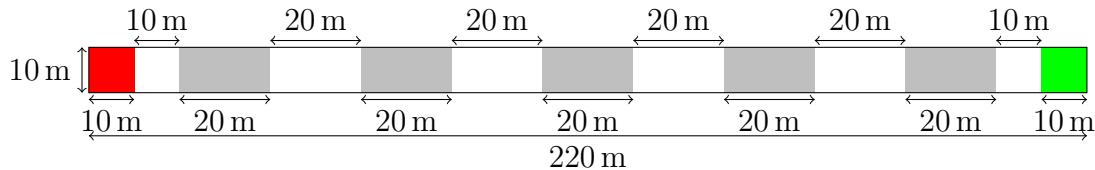


Abbildung 7.2: Zweites Szenario zur Evalierung des Modells: Einfacher Gang mit multiplen makroskopischen Zonen (grau), einer Personenquelle (rot) und einem Personenziel (grün)

Bei dem ersten Szenario (Abbildung 7.1) handelt es sich um einen gerade Gang mit einer einzelnen makroskopischen Zone. Diese überspannt die Hälfte des Ganges zwischen Quelle und Ziel. Somit kann die Berechnungsgeschwindigkeit zwischen mikroskopischen und makroskopischen Modell gegenüber gestellt werden.

Das zweite Szenario (Abbildung 7.2) stellt den gleichen Gang wie das erste Szenario dar. Es ist jedoch in mehrere, kleinere Zonen unterteilt. Insgesamt besteht der Gang aus fünf makroskopischen und sechs mikroskopischen Zonen. Die makroskopischen Zonen

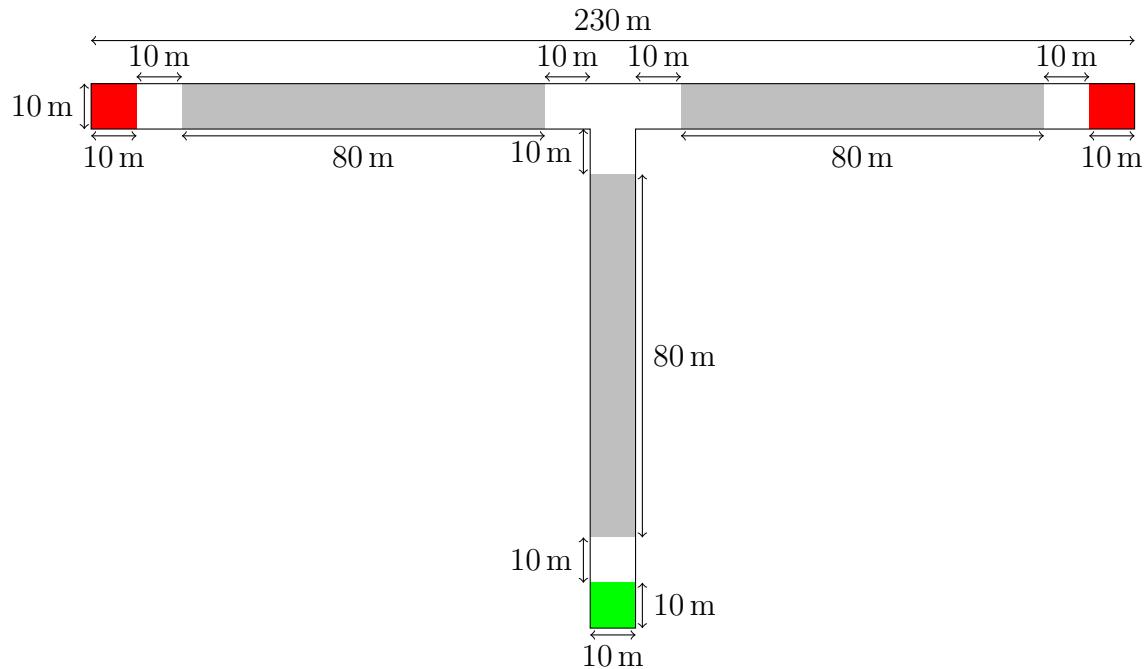


Abbildung 7.3: Drittes Szenario zur Evaluierung des Modells: T-Kreuzung mit mehreren makroskopischen Zonen (grau), einer Personenquelle (rot) und einem Personenziel (grün)

überspannen wie im ersten Szenario 50% des Ganges zwischen Quelle und Ziel. Unter Einbeziehung des ersten Szenarios kann somit der Einfluss der Zonenübergänge auf die Gesamtträumungszeit und die Rechenzeit analysiert werden.

Das letzte Szenario (Abbildung 7.3) stellt eine T-Kreuzung dar, an welcher Personen aus zwei Richtung aufeinander treffen, um anschließend den gleichen Weg weiter zu folgen. In Sekunde Eins werden jeweils 50% der zu generierenden Gesamtpersonenzahl in den Quellen am Ende der zwei Wege, welche zur Kreuzung führen, erzeugt. Die Kreuzung selbst wird durch eine mikroskopische Zone repräsentiert, während die Wege zu und von der Kreuzung makroskopisch simuliert werden. Mit diesem Szenario soll ein realistischer Anwendungsfall des Hybridmodells abgebildet werden.

7.2 Räumungsverlauf

In diesen Abschnitt werden die Ergebnis der mikroskopischen und hybriden Simulation gegenübergestellt.

7.2.1 Herangehensweise

Um die Ergebnisse zu vergleichen, werden die Räumungsverläufe genauer betrachtet. Als Räumungsverlauf wird die Anzahl der Personen im Szenario im Zeitverlauf bezeichnet. Somit beschreibt der Räumungsverlauf wie viele Personen pro Zeitschritt den sicheren Bereich noch nicht erreicht haben.

Für jede Variante der Szenarien wird dazu jeweils ein Simulationslauf mikroskopische und hybrid durchgeführt.

7.2.2 Resultate

In den Abbildungen 7.4 - 7.6 sind die Räumungsverläufe für die drei Szenarien jeweils für alle drei Varianten dargestellt. Da die Personen erst in Sekunde Eins generiert werden, springt der Verlauf in der ersten Sekunde auf die zu generierende Personenanzahl.

Für alle Varianten kann beobachtet werden, dass das Hybridmodell sich den Ergebnissen des mikroskopischen Modells stark annähert. Es entsteht lediglich eine leichte Verzögerung für die letzten 10 Personen. Dies liegt daran, dass sich die geringen Restdichten der letzten Personen zunächst langsam am Rand der makroskopischen Zonen sammeln müssen, bis diese vollständig disaggregiert werden können.

Vergleicht man die Ergebnisse der ersten beiden Szenarien fällt auf, dass das zweite Szenario die mikroskopische Simulation etwas besser annähert als das Erste. Lediglich bei der Räumung der letzten Personen weicht das zweite Szenario stärker von der mikroskopischen Simulation ab. Dies kann erneut durch die verzögerte Disaggregation der letzten Personen erklärt werden. Insgesamt hat die Anzahl der Zonenübergänge somit lediglich einen Einfluss auf die Räumungszeiten geringer Personendichten.

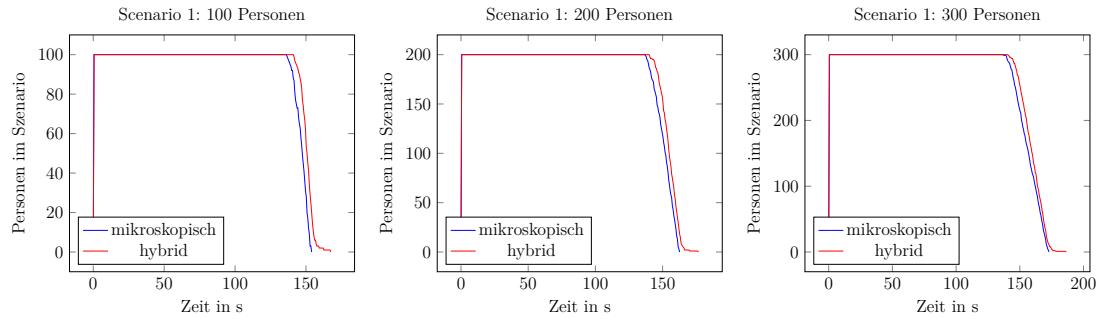


Abbildung 7.4: Scenario 1: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells

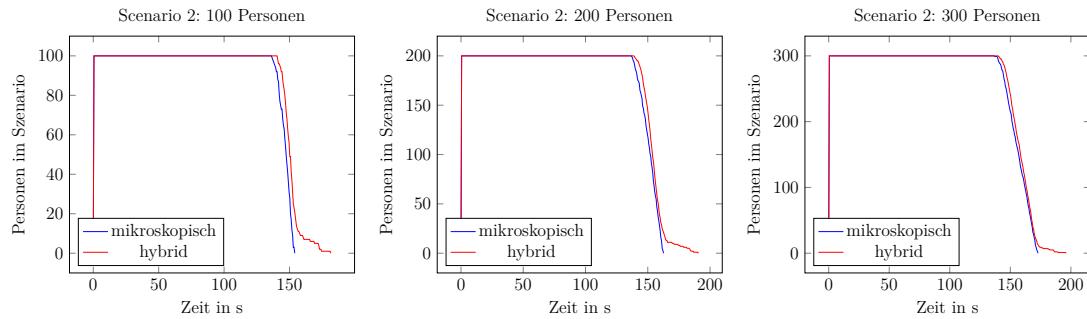


Abbildung 7.5: Scenario 2: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells

Im letzten Szenario nähert sich der Räumungsverlauf der hybrid Simulation geringfügig schlechter, an die Räumungskurve der mikroskopischen Simulation, an. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch die Aufteilung der Personenanzahl auf zwei Quellen innerhalb der ersten makroskopischen Zone generell eine geringe Dichte auftritt.

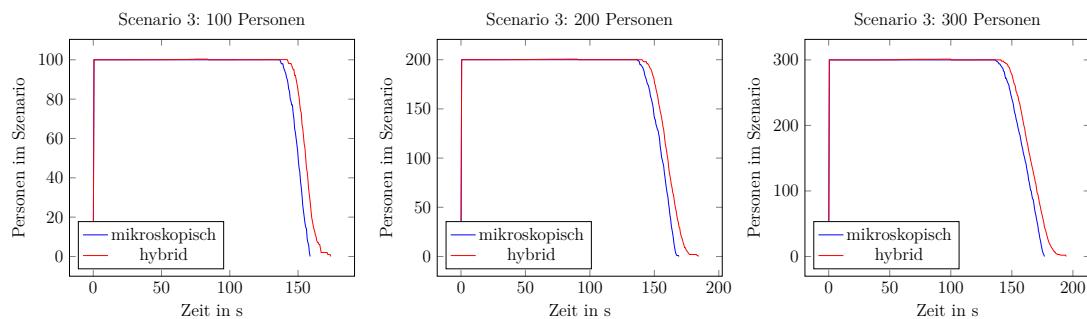


Abbildung 7.6: Scenario 3: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells

7.3 Performance

Im Folgenden wird die Performance der beiden Modelle in Form der Rechenzeit genauer betrachtet.

7.3.1 Herangehensweise

Für jede der Szenarienvarianten wurden je Modell zehn Simulationsläufe durchgeführt. In jedem dieser Durchläufe wurde die Gesamtrechenzeit bestimmt. Als Gesamtrechenzeit wird der Zeitraum bezeichnet, welcher benötigt wird, um alle Berechnungsmodule auszuführen. Als Module wird, wie im Abschnitt 5 definiert, zwischen mikroskopischer und makroskopischer Berechnung als auch Aggregation und Disaggregation unterschieden. Für die Hybridsimulationen werden die Teillaufzeiten der Module zusätzlich getrennt betrachtet. Der Mittelwert der Einzelläufe wird als Performancemetrik festgelegt.

7.3.2 Resultate

Eine vollständige Tabelle der Gesamt- und Teilrechenzeiten der einzelnen Simulationen kann Anhang C entnommen werden.

Zunächst werden die mittleren Gesamtrechenzeiten der beiden Modelle gegenübergestellt. In Abbildungen 7.7 - 7.9 sind diese für alle Szenarien und Varianten dargestellt. In jedem Fall dauert die Berechnung der mikroskopischen Simulation länger als die der hybriden. Für beide Modelle kann beobachtet werden, dass die Rechenzeit entsprechend der Personenanzahl steigt. Zusätzlich ist ersichtlich, dass mit zunehmender Personenanzahl der Rechenzeitunterschied zwischen den Modellen zunimmt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das Hybridmodell besonders für hohe Personenanzahlen die Performance verbessern kann.

Durch den Einsatz des Hybridmodells konnte durchschnittlich 37% der Rechenzeit im Gegensatz zum rein mikroskopischen Modell eingespart werden. Im besten Fall konn-

te im dritten Szenario mit 300 Personen sogar eine Ersparnis von 54% erreicht werden.

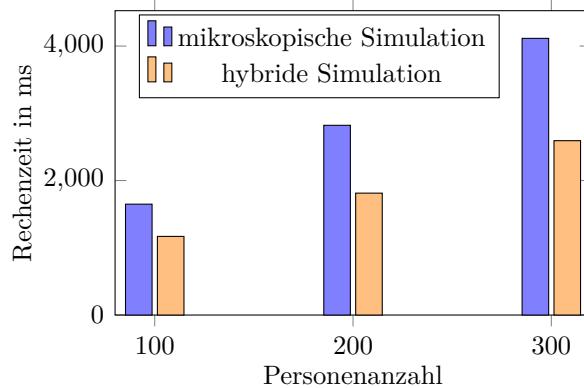


Abbildung 7.7: Scenario 1: Überblick der mittleren Gesamtrechenzeit der mikroskopischen und hybriden Simulationen

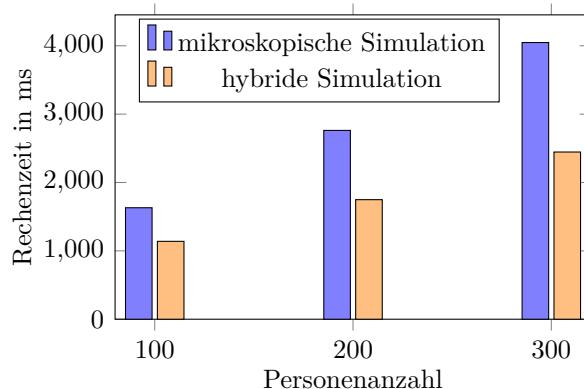


Abbildung 7.8: Scenario 2: Überblick der mittleren Gesamtrechenzeit der mikroskopischen und hybriden Simulationen

Vergleicht man die Ergebnisse des ersten und zweiten Szenarios (Abbildung 7.7 und 7.8) so stellt man fest, dass die Unterteilung des Szenarios in mehrere Zonen zu einer minimal geringeren Gesamtlaufzeit führt. Dies ist durch die Verteilung der Personen im Szenario begründet und wird bei der Betrachtung der Rechenzeiten der Einzelmodule genauer erläutert.

Als nächstes werden die Teillaufzeiten der einzelnen Module der Hybridsimulation betrachtet. Diese sind in den Abbildungen 7.10 - 7.12 dargestellt. Allgemein gilt, dass die Rechenzeit des mikroskopischen Moduls die der restlichen Module deutlich übersteigt.

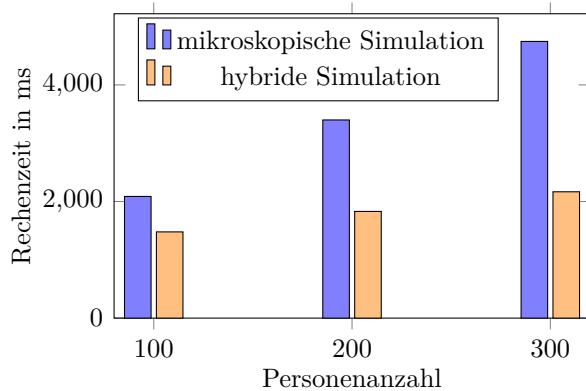


Abbildung 7.9: Scenario 3: Überblick der mittleren Gesamtrechenzeit der mikroskopischen und hybriden Simulationen

Die restlichen Module scheinen im Rechenzeitvergleich zum mikroskopischen Modul vernachlässigbar.

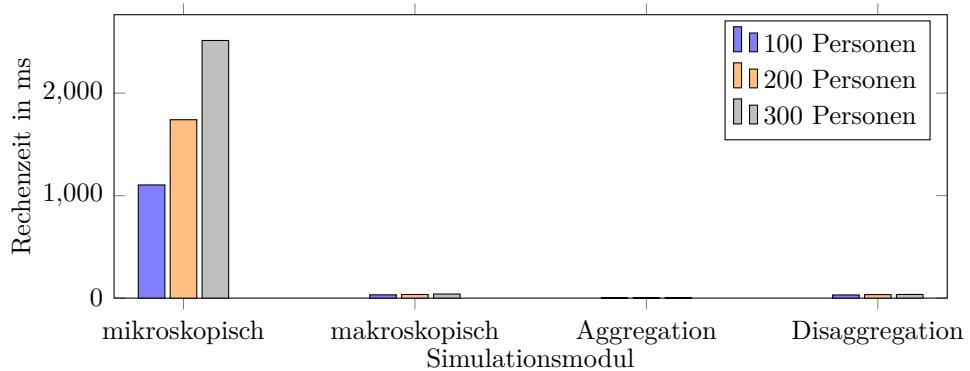


Abbildung 7.10: Scenario 1: Überblick der mittleren Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation

Die Rechenzeit des mikroskopischen Moduls steigt, wie erwartet, auch im Hybridmodell mit der zu simulierenden Personenanzahl. Auffällig ist, dass im zweiten Szenario das mikroskopische Module nahezu identische Rechenzeiten wie im ersten Szenario erzielt. Dies ist darin begründet, dass die Personen der beiden Szenarien innerhalb der mikroskopischen Zonen die gleiche Gesamtwegstreckenlänge überqueren müssen und die Geschwindigkeit der Fußgänger innerhalb des Szenarios nahezu konstant bleibt. Die Rechenzeit des mikroskopischen Modells ist direkt an die zurückzulegende Wegstreckenlänge und die erreichten Geschwindigkeiten gekoppelt.

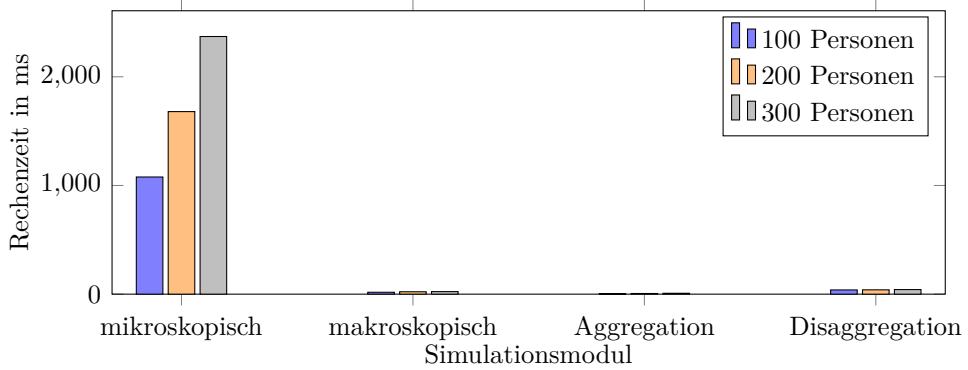


Abbildung 7.11: Scenario 2: Überblick der mittleren Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation

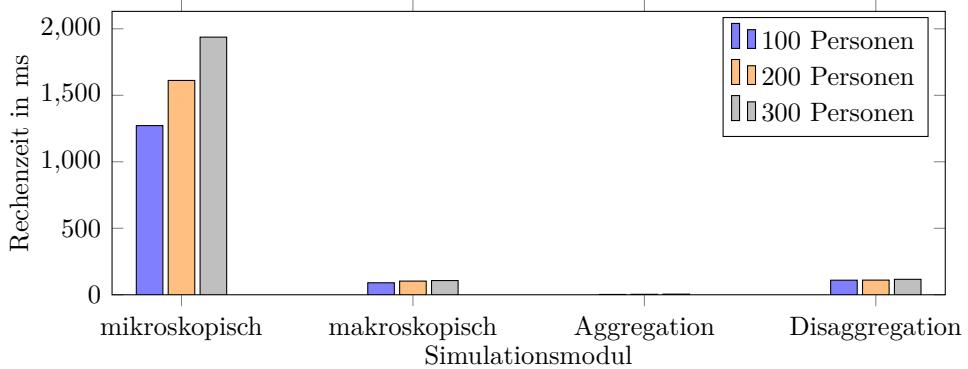


Abbildung 7.12: Scenario 3: Überblick der mittleren Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation

Um die Rechenzeit der Module makroskopisch, Aggregation und Disaggregation genauer betrachten zu können, wurden die Teillaufzeiten getrennt vom mikroskopischen Modul in Abbildung 7.13 - 7.15 dargestellt. Allgemein steigt die Rechenzeit der Module makroskopisch und Disaggregation mit der Personenanzahl nur geringfügig.

Für das makroskopische Modul ist das Verhalten darin begründet, dass die Personen sich innerhalb der Szenarien kaum verteilen. Dadurch steigt die Anzahl der Zeitschritte, in welchen sich Personen innerhalb der makroskopischen Zone befinden, nur minimal. Die makroskopischen Zonen werden lediglich in Zeitschritten berechnet, in welchen sich tatsächlich Personen innerhalb der Zone aufhalten. Deshalb benötigt das makroskopische Modul trotz Anstieg der Personenanzahl kaum eine höhere Rechenzeit. Das Disaggregationsmodul wird analog zum makroskopischen Modul lediglich berechnet, wenn sich

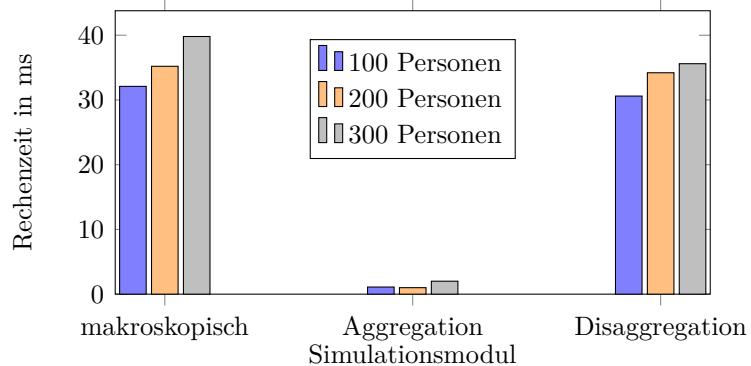


Abbildung 7.13: Scenario 1: Überblick der mittleren Teilrechenzeit der Module Aggregation, Disaggregation und makroskopisch der hybriden Simulation

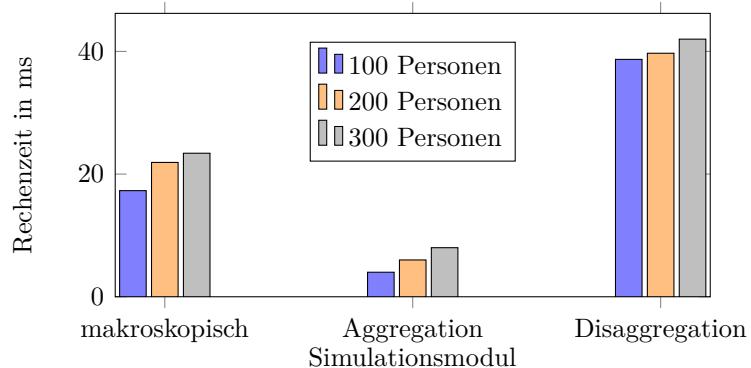


Abbildung 7.14: Scenario 2: Überblick der mittleren Teilrechenzeit der Module Aggregation, Disaggregation und makroskopisch der hybriden Simulation

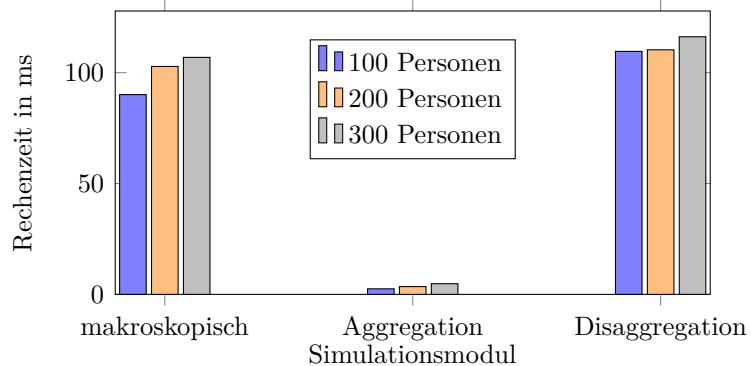


Abbildung 7.15: Scenario 3: Überblick der mittleren Teilrechenzeit der Module Aggregation, Disaggregation und makroskopisch der hybriden Simulation

Personen innerhalb der makroskopischen Zone aufhalten. Somit steigt auch hier die Rechenzeit mit der Personenanzahl kaum.

Die Aggregation muss im Gegensatz zum makroskopischen und Disaggregationsmodul in jedem Zeitschritt für jede makroskopische Zone ausgeführt werden. Zusätzlich wird das Modul um so rechenaufwändiger desto mehr Personen aggregiert werden. Deshalb ist die Aggregation im ersten Szenario mit einer makroskopischen Zone deutlich weniger rechenaufwändig als im zweiten Szenario mit mehreren makroskopischen Zonen. Da dieses Modul jedoch die geringste Rechenzeit von allen Modulen aufweist, wird dieses Verhalten für das Gesamtmodell als vernachlässigbar betrachtet.

Innerhalb der ersten beiden Szenarien wird die gleiche Länge des Weges durch makroskopische Zonen abgedeckt. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Anzahl der dazu verwendeten Zonen. Auffällig beim Vergleich der Teillaufzeiten in Abbildung 7.13 und 7.14 ist das innerhalb des zweiten Szenarios das makroskopische Module deutlich gerin gere Rechenzeiten aufweist, als im ersten Szenario. Eine Begründung hierfür liefert, dass sich nahezu alle Personen zu jedem Zeitpunkt in lediglich einer der fünf makroskopischen Zonen aufhalten. Dadurch muss jeweils nur eine makroskopische Zone berechnet werden. Dies steht im Gegensatz zum ersten Szenario, in welchem nach Eintritt der ersten Person in der makroskopischen Zone die gesamte deutlich größere Zone in jedem Zeitschritt berechnet werden muss.

Ebenfalls auffällig ist, dass das zweite Szenario ähnliche Disaggregationsrechenzeiten wie das erste Szenario aufweist. Dies ist darin begründet, dass das Disaggregationsmodul in jedem Zeitschritt berechnet wird, in welchen sich Personen innerhalb der makroskopischen Zone aufhalten. Da die Personen sich im zweiten Szenario meistens in einer der Zonen aufhalten, muss die Disaggregation ebenfalls nur für diese eine Zone berechnet werden. Kombiniert man die Zeitschritte, in welchen sich Personen innerhalb der einzelnen makroskopischen Zonen befinden, erhält man in etwa die gleiche Anzahl wie im ersten Szenario.

Das dritte Szenario unterscheidet sich von den ersten beiden Szenarios darin, dass die Rechenzeit des makroskopischen und Disaggregations Moduls deutlich höher ausfällt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die makroskopischen Zonen eine größere Fläche als in den ersten beiden Szenarien abdecken und somit über einen längeren Zeitraum berechnet werden müssen.

7.4 Fazit

Zusammengefasst konnte innerhalb der Evaluierung anhand von drei Szenarien gezeigt werden, dass das Hybridmodell ähnliche Räumungsverläufe wie das rein mikroskopische Modell erzeugt. Lediglich bei den letzten Personen entstand durch den Einsatz des Hybridmodells eine leichte Verzögerung. Diese kann durch das Disaggregationsverhalten von geringen Restdichten begründet werden. Wird ein Szenario in mehr makroskopischen Zonen unterteilt, wird dieser Effekt noch weiter verstärkt. Da es lediglich die letzten 5% der Personen betrifft, wird dies als vernachlässigbar angesehen und die Ergebnisse als ausreichend genau betrachtet.

Bei der Betrachtung der Performance konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz des Hybridmodells im Durchschnitt 37% der Rechenzeit gespart wurde. Im besten Fall des Anwendungsbeispiels konnte sogar eine Ersparnis von 54% erreicht werden. Grundsätzlich bietet das Modell bei höheren Personendichten eine größere Rechenzeitsparnis. Dies ist besonders interessant, da für das mikroskopische Modell lediglich ein statisches Navigationsfeld eingesetzt wurde.

Innerhalb des Hybridmodells benötigt das mikroskopische Modul die höchste Rechenzeit, welche mit wachsender Personenanzahl weiter steigt. Die Performance der Module makroskopisch, Aggregation und Disaggregation steigen nur minimal mit der Personenanzahl. Die Rechenzeit der Aggregation ist dabei abhängig von der Zonenanzahl. Während die Rechenzeit des makroskopischen und Disaggregationsmodul hauptsächlich von dem Szenarioaufbau abhängt. Eine Unterteilung des Szenarios in mehrere Zonen kann die Performance des makroskopischen Moduls verbessern, da kleinere Zonen weniger rechenaufwändig sind und die makroskopischen Zonen generell nur berechnet werden, wenn sie Personen beinhalten.

8 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Arbeit wurde ein hybrides Personenstromsimulationsmodell, genannt *MuSka-Modell*, entwickelt. Dieses erlaubt anhand definierter Kriterien den Simulationsbereich in Zonen zu unterteilen, welche anschließend mikro- bzw. makroskopisch simuliert werden. Dazu wurden zunächst einige makroskopische Modelle analysiert und eines für diesen Anwendungsfall geeignetes ausgewählt. Die Wahl fiel dabei auf das Kontinuumsmodell von Hughes.

Zum Übergang zwischen den Zonen wird ein sogenanntes Aggregations- (mikro → makro) bzw. Disaggregationsverhalten (makro → mikro) eingesetzt. Die Übergangskanten zwischen den Zonen werden entsprechend der Diskretisierung in der makroskopischen Zone in sogenannte Abschnitte unterteilt. Diese werden zu Aggregation und Disaggregation einzeln betrachtet. Dies ermöglicht ein realistisches Verhalten auch für die besonders breiten Fußgängerwege auf Veranstaltungsgeländen im urbanen Raum. Um zonenübergreifende Staus zu gewährleisten, dürfen Personen die anliegenden Zonen lediglich betreten, wenn ein entsprechender Platz zur Verfügung steht.

Da sowohl innerhalb des mikroskopischen als auch des makroskopischen Modells die Personen entlang eines Potentialfeldes navigieren, wird ein einziges Potentialfeld für beide Modelle eingesetzt. Dies ermöglicht eine beliebige Positionierung von Zwischenavigationsszielen unabhängig von den Zonengrenzen.

Um das Hybridmodell zu evaluieren, musste dieses zunächst kalibriert werden. Da es innerhalb der Evaluierung mit dem rein mikroskopischen Modell verglichen werden sollte, wurde es mithilfe einer vereinfachten Kalibrierung darauf abgestimmt ähnliche Räumungszeiten zu generieren. Dazu wurden die Parameter für ein einfaches Räumungsszenario variiert.

Im Rahmen der Evaluierung wurden die Räumungsverläufe und Rechenzeiten, mit denen des rein mikroskopischen Modell verglichen. Hierfür wurden drei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Für jedes Szenario wurden zusätzlich drei unterschiedliche Varianten (Personenanzahlen) simuliert.

Es konnte gezeigt werden, dass das Hybridmodell ähnliche Räumungsverläufe wie das rein mikroskopische Modell erzeugt. Lediglich bei den letzten Personen entstand durch den Einsatz des Hybridmodells eine leichte Verzögerung. Da dies jedoch nur wenige Personen betrifft, wird es als vernachlässigbar angesehen.

Bei der Analyse der Performance konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz des Hybridmodells im Durchschnitt 37% der Rechenzeit gespart werden kann. Im besten Fall des Anwendungsbeispiels konnte sogar eine Ersparnis von 54% erreicht werden. Diese Werte konnten erreicht werden, obwohl für das mikroskopische Modell lediglich ein statisches Navigationsfeld verwendet wurde. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung eines dynamischen Navigationsfeldes zu einem noch weitaus höheren Performancegewinn führen würde.

An der Gesamtaufzeit des Hybridmodells hat das mikroskopische Modul den größten Anteil. Diese Teillaufzeit ist abhängig von der Personenanzahl und steigt proportional dazu mit. Die Rechenzeiten der Module makroskopisch und Disaggregation hingegen sind steigen nur leicht mit der Personenanzahl. Einen großen Einfluss auf die Performance des makroskopischen Moduls hat der Aufbau des Szenarios. So kann die Unterteilung des Szenarios in kleinere Zonen die Performance verbessern.

Insgesamt könnte mithilfe des *MuSka-Modells* zukünftige Szenarien um voraussichtlich 37% schneller berechnet werden, ohne von großen Einbußen der Qualität der Ergebnisse ausgehen zu müssen.

9 Ausblick

Innerhalb dieser Arbeit wurden viele Aspekte des Hybridmodells nicht in voller Tiefe behandelt. Zusätzlich sind dabei weitere offene Fragen aufgekommen, die weiterführend betrachtet werden sollten.

So könnten in weiterführenden Arbeiten noch andere makroskopische Modelle auf ihre Einsetzbarkeit innerhalb des Hybridmodells überprüft werden, da in der Auswahl lediglich Grundmodelle betrachtet wurden. Diese könnten anschließend in das entwickelte Hybridmodell eingesetzt und mit den Ergebnissen des hier vorgestellten Prototypen verglichen werden.

Des Weiteren konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass das Hybridmodell besonderes für hohe Personenanzahlen einen Performancegewinn erzeugt. Für geringe Dichten ist die jedoch die Berechnung der makroskopischen Zonen verhältnismäßig aufwändig. Deshalb könnte überlegt werden, ob wie in der Arbeit von Rabiaa [Rabiaa and Foudil, 2016] vorgeschlagen, die makroskopische Zone in eine mikroskopische Zone umgewandelt wird, sobald diese unterhalb einer bestimmte Personendichte fällt. Zusätzlich könnten die Zonen dynamisch generiert und angepasst werden. Dazu müsste eine Methode zur automatischen Erstellung der Zonen erstellt werden. Diese war von dieser Arbeit ausgeschlossen.

Innerhalb des Prototypen wurde bisher nur eine Lösung des makroskopischen Modells auf Basis eines regulären Diskretisierungsgitters ermöglicht. In Zukunft sollten weitere Diskretisierungsgitter implementiert werden, um die tatsächliche unregelmäßige Geometrie von Veranstaltungsgeländen zu unterstützen.

Der Fokus dieser Arbeit wurde hauptsächlich auf die Verbesserung der Performance und Erhaltung der Räumungszeit gelegt. In Zukunft könnte der Speicherbedarf des Hybridmodells genauer betrachtet werden. Eine mögliche Verbesserungsmethode stellt,

die Optimierung der Berechnung des zonenübergreifend genutzten Navigationfeldes dar. Dieses wird bisher auf einem regulären Gitter berechnet. In einer zukünftigen Version des Modells könnte das Navigationsfeld auf einem irregulären Gitter berechnet werden (bspw. [Zwickenpflug, 2018]). Dadurch würde sowohl der Speicherbedarf als auch die Performance verbessert werden. Besonders für die makroskopischen Zonen ist dies interessant, da lediglich ein Wert pro Zelle benötigt wird.

Zusätzlich könnte analysiert werden wie groß der Einfluss der Breite der Übergangsabschnitte und somit der Diskretisierung der makroskopischen Zonen auf den Räumungsverlauf ist. Auch könnten noch weitere Disaggregationsmethoden entwickelt werden.

Innerhalb der Kalibrierung wurde nur ein sehr einfaches Szenario eingesetzt und lediglich mit der mikroskopischen Simulation verglichen. In Zukunft sollte das Hybridmodell mit Hilfe eines Szenarios aus dem realen Anwendungsbereich kalibriert werden. Ebenfalls wäre es erstrebenswert, die Kalibrierung anhand von unterschiedlichen Szenarien durchzuführen. Zusätzlich könnten weitere Aspekte der Simulationsergebnisse, wie bspw. den Räumungsverlauf, zur Evaluierung der Kalibrierungsgüte herangezogen werden.

Des Weiteren wurde der Prototyp bisher nur für kleine künstlich erzeugte Szenarien evaluiert. Da das Modell jedoch auf Großveranstaltungen ausgelegt ist, sollte es in Zukunft ebenfalls innerhalb solcher Szenarien evaluiert werden.

Zusammengefasst bestehen auf dem Gebiet der hybriden Personenstrommodell und im besonderen für das hier entwickelte *MuSka-Modells* noch viele offene Forschungsfragen. Mit dem Hintergrund des in dieser Arbeit gezeigten möglichen Performancegewinns verspricht das Modell auch in Zukunft viele lohnenswerte Zugewinne für die Personenstromsimulation. Deshalb ist eine weitere Forschung auf diesem Gebiet sinnvoll.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Übersicht der Umgebung des Cannstatter Volksfestgeländes (Wasen) und der Mercedes Benz Arena | 2 |
| 2.1 | Beispielhafte Darstellung eines mikroskopischen (a) und makroskopischen (b) Modells | 6 |
| 2.2 | Darstellung der Simulationsumgebungsmodelle am Beispiel | 9 |
| 2.3 | OSM: Schematische Darstellung der Kreisscheibe | 11 |
| 2.4 | Schematische Darstellung des Übergangs zwischen der mikro- (weiß) und makroskopischen (grau) Zonen | 17 |
| 2.5 | Schematische Darstellung von einer Übergangskante und eines -bereiches | 18 |
| 2.6 | Einfaches Beispielszenario für eine Personenstromsimulation | 23 |
| 4.1 | Zonendefinition am Beispiel einer einfachen Kreuzung mit Hindernissen | 40 |
| 4.2 | Beispiel der Übergangsbereiche einer makroskopischen Zone | 42 |
| 4.3 | Verhalten der Fußgänger an einer Wegecke | 46 |
| 4.4 | Schematische Darstellung der Zeitdiskretisierung des mikro- als auch des makroskopischen Modells innerhalb des Hybridmodells | 48 |
| 4.5 | Simulationsschritte des Hybridmodells | 49 |
| 5.1 | Klassendiagramm der Erweiterung des bestehenden SimKernels | 51 |
| 5.2 | Klassendiagramm der Kernel internen Repräsentation der makroskopischen Zonen | 53 |
| 6.1 | Menge aller zu überprüfender Parameterwerte innerhalb der Kalibrierung | 56 |
| 6.2 | Simulationsszenario zur Kalibrierung des Hybridmodells | 57 |
| 6.3 | Zusammenfassung der gewählten Parameter für das makroskopische Modell | 58 |
| 7.1 | Erstes Szenario zur Evalierung des Modells | 60 |
| 7.2 | Zweites Szenario zur Evalierung des Modells | 60 |
| 7.3 | Drittes Szenario zur Evalierung des Modells | 61 |

| | |
|---|----|
| 7.4 Scenario 1: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells | 63 |
| 7.5 Scenario 2: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells | 63 |
| 7.6 Scenario 3: Räumungsverlauf des mikroskopischen als auch des hybriden Modells | 63 |
| 7.7 Scenario 1: Gesamtrechenzeit der mikroskopischen und hybriden Simulationen | 65 |
| 7.8 | 65 |
| 7.9 Scenario 3: Gesamtrechenzeit der mikroskopischen und hybriden Simulationen | 66 |
| 7.10 Scenario 1: Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation | 66 |
| 7.11 Scenario 2: Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation | 67 |
| 7.12 Scenario 3: Teilrechenzeiten der Module der hybriden Simulation | 67 |
| 7.13 Scneario 1: Teilrechenzeiten der hybriden Simulation (makro., Agg-, Dis-aggregation) | 68 |
| 7.14 Scneario 2: Teilrechenzeiten der hybriden Simulation (makro., Agg-, Dis-aggregation) | 68 |
| 7.15 Scneario 3: Teilrechenzeiten der hybriden Simulation (makro., Agg-, Dis-aggregation) | 68 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Attribute eines Fußgängers in <i>crowd:it</i> | 24 |
| 3.1 | Zusammenfassung aller betrachteten Modelle mit zugehöriger Modellart . | 27 |
| 3.2 | Zusammenfassung der Modellartbewertung | 27 |
| 3.3 | Bewertungsaspekte der kontinuierlichen Modelle | 29 |
| 3.4 | Bewertung der Modelle anhand der Bewertungsaspekte | 29 |
| 6.1 | Ausschnitt der Gesamträumungszeiten für das Kalibierungsszenario . . . | 58 |
| 6.2 | Ausschnitt aus den Abweichungen der Räumungszeiten aus dem Kalibie- rungsszenario | 58 |

Literaturverzeichnis

[zei, a] Trauriges ende des techno-tanzes. <https://www.sueddeutsche.de/panorama/massenpanik-auf-der-loveparade-toedliches-ende-einer-grossen-party-1.979224>. *Süddeutsche Zeitung*, 24. Juli 2010, Zuletzt aufgerufen am 15.10.2020.

[zei, b] Viel alkohol, viel drogen. <https://www.sueddeutsche.de/panorama/massenpanik-bei-der-loveparade-augenzeugenberichte-viel-alkohol-viel-drogen-1.979261>. *Süddeutsche Zeitung*, 25. Juli 2010, Zuletzt aufgerufen am 15.10.2020.

[Goo, 2020] (2020). Google Earth. Screenshot: Umgebung Wa-sen und Mercedes Benz Arena. https://earth.google.com/web/search/Merzenstra%c3%9fe,+Stuttgart/@48.79368347,9.22692347,239.15997203a,4309.49893842d,35y,0.0000255h,0t,0r/data=CigiJgokCT1A-wQHkk1AESS4Iz-z-kZAGcY2BhIvYjJAIZhPPpKUadw_?hl=de. Zuletzt aufgerufen am 14.09.2020.

[Inf, 2020] (2020). Informationen über die Arena. <https://www.mercedes-benz-arena-stuttgart.de/arena/daten-fakten/>. Zuletzt aufgerufen am 13.08.2020.

[Sof, 2020] (2020). Software – crowd:it. <https://www.accu-rate.de/de/software-crowd-it-de/>. Zuletzt aufgerufen am 13.03.2020.

[Abdelghany et al., 2016] Abdelghany, A., Abdelghany, K., and Mahmassani, H. (2016). A hybrid simulation-assignment modeling framework for crowd dynamics in large-scale pedestrian facilities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86:159–176.

[Anh et al., 2012] Anh, N. T. N., Daniel, Z. J., Du, N. H., Drogoul, A., and An, V. D. (2012). A Hybrid Macro-Micro Pedestrians Evacuation Model to Speed Up Simulation

in Road Networks. In Dechesne, F., Hattori, H., ter Mors, A., Such, J. M., Weyns, D., and Dignum, F., editors, *Advanced Agent Technology*, volume 7068, pages 371–383. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

[Biedermann et al., 2014] Biedermann, D. H., Kielar, P. M., Handel, O., and Borrmann, A. (2014). Towards TransiTUM: A Generic Framework for Multiscale Coupling of Pedestrian Simulation Models based on Transition Zones. *Transportation Research Procedia*, 2:495–500.

[Biedermann et al., 2016] Biedermann, D. H., Torchiani, C., Kielar, P. M., Willems, D., Handel, O., Ruzika, S., and Borrmann, A. (2016). A Hybrid and Multiscale Approach to Model and Simulate Mobility in the Context of Public Events. *Transportation Research Procedia*, 19:350–363.

[Blue et al., 1997] Blue, V., Embrechts, M., and Adler, J. (1997). Cellular automata modeling of pedestrian movements. In *Computational Cybernetics and Simulation 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 3, pages 2320–2323 vol.3.

[Borgers and Timmermans, 1986] Borgers, A. and Timmermans, H. (1986). A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities within Inner-City Shopping Areas. *Geographical Analysis*, 18(2):115–128.

[Carlini et al., 2016] Carlini, E., Festa, A., and Silva, F. J. (2016). The Hughes model for pedestrian dynamics and congestion modelling. *arXiv:1611.06848 [math]*.

[Carrillo et al., 2015] Carrillo, J. A., Martin, S., and Wolfram, M.-T. (2015). An local version of the hughes model for pedestraian flow. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*.

[Carrillo et al., 2016] Carrillo, J. A., Martin, S., and Wolfram, M.-T. (2016). An improved version of the Hughes model for pedestrian flow. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 26(04):671–697.

[Chooramun et al., 2011] Chooramun, N., Lawrence, P., and Galea, E. (2011). Implementing a Hybrid Space Discretisation within an Agent Based Evacuation Model. In Peacock, R. D., Kuligowski, E. D., and Averill, J. D., editors, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pages 449–458. Springer US, Boston, MA.

- [Chooramun et al., 2012] Chooramun, N., Lawrence, P. J., and Galea, E. R. (2012). An agent based evacuation model utilising hybrid space discretisation. *Safety Science*, 50(8):1685–1694.
- [Chooramun et al., 2019] Chooramun, N., Lawrence, P. J., and Galea, E. R. (2019). Hybrid Spatial Modelling, from Modelling People in the Vicinity to Urban Scale Simulation of Pedestrians. In Satapathy, S. C., Bhateja, V., Somanah, R., Yang, X.-S., and Senkerik, R., editors, *Information Systems Design and Intelligent Applications*, volume 863, pages 439–448. Springer Singapore, Singapore.
- [Chrabi et al., 2013] Chrabi, M., Freialdenhoven, M., Schadschneider, A., and Seyfried, A. (2013). Modeling the Desired Direction in a Force-Based Model for Pedestrian Dynamics. In Kozlov, V. V., Buslaev, A. P., Bugaev, A. S., Yashina, M. V., Schadschneider, A., and Schreckenberg, M., editors, *Traffic and Granular Flow '11*, pages 263–275. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Colombo et al., 2012] Colombo, R. M., Garavello, M., and Lécureux-Mercier, M. (2012). A class of nonlocal models for pedestrian traffic. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 22(04):1150023.
- [Duives et al., 2013] Duives, D. C., Daamen, W., and Hoogendoorn, S. P. (2013). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37:193–209.
- [Gloor et al., 2004] Gloor, C., Stucki, P., and Nagel, K. (2004). Hybrid Techniques for Pedestrian Simulations. In Sloot, P. M. A., Chopard, B., Hoekstra, A. G., Hutchison, D., Kanade, T., Kittler, J., Kleinberg, J. M., Mattern, F., Mitchell, J. C., Naor, M., Nierstrasz, O., Pandu Rangan, C., Steffen, B., Sudan, M., Terzopoulos, D., Tygar, D., Vardi, M. Y., and Weikum, G., editors, *Cellular Automata*, volume 3305, pages 581–590. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Goatin and Mimault, 2013] Goatin, P. and Mimault, M. (2013). The Wave-Front Tracking Algorithm for Hughes' Model of Pedestrian Motion. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 35(3):B606–B622.
- [Harney, 2002] Harney, D. M. W. (2002). Pedestrian Modelling: Current Methods and Future Directions.

- [Hartmann et al., 2013] Hartmann, D., von Sivers, I., and ,Siemens AG, Corporate Technology, 80200 Munich (2013). Structured first order conservation models for pedestrian dynamics. *Networks & Heterogeneous Media*, 8(4):985–1007.
- [Helbing, 1992] Helbing, D. (1992). A Fluid-Dynamic Model for the Movement of Pedestrians. *Complex Systems*.
- [Helbing and Molnár, 1995] Helbing, D. and Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5):4282–4286.
- [Henderson, 1974] Henderson, L. F. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 8(6):509–515.
- [Hoogendoorn et al., 2017] Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., Knoop, V. L., Steenbakkers, J., and Sarvi, M. (2017). Macroscopic Fundamental Diagram for pedestrian networks: Theory and applications. *Transportation Research Procedia*, 23:480–496.
- [Hughes, 2000] Hughes, R. L. (2000). The flow of large crowds of pedestrians. *Mathematics and Computers in Simulation*, 53(4):367–370.
- [Hughes, 2002] Hughes, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6):507–535.
- [Hughes, 2003] Hughes, R. L. (2003). The Flow of Human Crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1):169–182.
- [Ijaz et al., 2015] Ijaz, K., Sohail, S., and Hashish, S. (2015). A Survey of Latest Approaches for Crowd Simulation and Modeling Using Hybrid Techniques. page 6.
- [Kirik et al., 2009] Kirik, E., Yurgel'yan, T., and Kruglov, D. (2009). The shortest time and/or the shortest path strategies in a CA FF pedestrian dynamics model. *arXiv:0906.4265 [math-ph]*.
- [Kneidl et al., 2013] Kneidl, A., Hartmann, D., and Borrman, A. (2013). A hybrid multi-scale approach for simulation of pedestrian dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37:223–237.
- [Kormanová, 2013] Kormanová, A. (2013). A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling. *Acta Informatica Pragensia*, 2(2):39–50.

- [Kretz, 2009] Kretz, T. (2009). Pedestrian traffic: On the quickest path. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2009(03):P03012.
- [Lämmel et al., 2010] Lämmel, G., Grether, D., and Nagel, K. (2010). The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(1):84–98.
- [Løvås, 1994] Løvås, G. G. (1994). Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(6):429–443.
- [Mazumder, 2016] Mazumder, S. (2016). *Numerical Methods for Partial Differential Equations: Finite Difference and Finite Volume Methods*. Elsevier Science.
- [Piccoli and Tosin, 2009] Piccoli, B. and Tosin, A. (2009). Pedestrian flows in bounded domains with obstacles. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 21(2):85–107.
- [Predtetschenski and Milinski, 2015] Predtetschenski, W. M. and Milinski, A. I. (2015). *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden Für Die Projektierung, Auflage 2015 W. M. Predtetschenski - A. I. Milinski*. Beilicke Brandschutz Verlag.
- [Rabiaa and Foudil, 2016] Rabiaa, C. and Foudil, C. (2016). Toward a Hybrid Approach for Crowd Simulation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(1).
- [Schadschneider et al., 2009] Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., and Seyfried, A. (2009). Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In Meyers, R. A., editor, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pages 3142–3176. Springer New York, New York, NY.
- [Seitz et al., 2015] Seitz, M. J., Dietrich, F., and Köster, G. (2015). The effect of stepping on pedestrian trajectories. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 421:594–604.
- [Seitz and Köster, 2012] Seitz, M. J. and Köster, G. (2012). Natural discretization of pedestrian movement in continuous space. *Physical Review E*, 86(4):046108.
- [Sethian, 1996] Sethian, J. A. (1996). A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(4):1591–1595.

- [Tjandra, 2003] Tjandra, S. A. (2003). Dynamic network optimization with application to the evacuation problem.
- [Treille et al., 2006] Treille, A., Cooper, S., and Popović, Z. (2006). Continuum crowds.
- [Vanumu et al., 2017] Vanumu, L. D., Ramachandra Rao, K., and Tiwari, G. (2017). Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review. *European Transport Research Review*, 9(4):49.
- [Weidmann, 1993] Weidmann, U. (1993). Transporttechnik der Fussgänger. (2):110.
- [Xiong et al., 2009] Xiong, M., Cai, W., Zhou, S., Low, M. Y. H., Tian, F., Chen, D., Ong, D. W. S., and Hamilton, B. D. (2009). A Case Study of Multi-Resolution Modeling for Crowd Simulation. page 9.
- [Xiong et al., 2010] Xiong, M., Lees, M., Cai, W., Zhou, S., and Low, M. Y. H. (2010). Hybrid modelling of crowd simulation. *Procedia Computer Science*, 1(1):57–65.
- [Xiong et al., 2013] Xiong, M., Tang, S., and Zhao, D. (2013). A Hybrid Model for Simulating Crowd Evacuation. *New Generation Computing*, 31(3):211–235.
- [Zönnchen, 2013] Zönnchen, B. (2013). Navigation around pedestrian groups and queuing using a dynamic adaption of traveling. Bachelor's thesis, Hochschule München.
- [Zwickenpflug, 2018] Zwickenpflug, V. (2018). Lösung der Eikonal Gleichung auf einem irregulären Gitter. Bachelor's thesis, Hochschule München.

Anhang A

| Name, Quelle | Grundlage | Räumungs-simulation | Ablauf-simulation | Heterogene Personen-gruppen | Multi-diektionaler Fluss | Validiert | Anmerkungen |
|--|--|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|
| Helbings Fluid dynamic mo-del, [Helbing, 1992] | Boltzmann-ähnliches gaskine-tisches Modell | konnte nicht aus-gewertet werden | Ja | Ja (Unter-teilung in Personenty-pen) | Ja | Nein [Kormanová, 2013] | |
| Modell von Hughes, [Hughes, 2002] | Kontinuums-modell | Ja | konnte nicht aus-gewertet werden | Ja (Unter-teilung in Personenty-pen) | Ja | ja [Kormanová, 2013] | Annahmen entsprechen OSM. Unterstützt Wellenbildung und das "BraessParadox [Hughes, 2003]" |
| Modell von Hart-mann, [Hartmann et al., 2013] | Generalisierte kinetische Modelle | Ja | Nein | Ja | Ja (nur Vorschlag / keine genaue Definition) | Vergleich mit mikroskopischen Model (Keine Realdaten) | In der Arbeit wird lediglich ein eindimensionales Umgebungsmodell beschrieben, ein zweidimensionales Modell soll aber möglich sein |
| Modell von Colombo-Rosini, [Colombo et al., 2012] | Angepasstes LWR Model | Ja | Nein [Kor-manová, 2013] | konnte nicht aus-gewertet werden | Nein [Kormanová, 2013] | ja [Kormanová, 2013] | Unterstützt das "Braess"Paradox und Schockwellen [Kormanová, 2013] |
| Modell von Daamen-Hoogendorn-Bovy, [Hoogen-doorn et al., 2017] | Fundamental-Diagramme | Nein | Ja | konnte nicht aus-gewertet werden | Ja | Nein | |
| Modell von Piccoli, [Piccoli and Tosin, 2009] | Diskretes Euler Mo-dell | Ja | konnte nicht aus-gewertet werden | Ja | Ja (Lane formati-on) | Nein | |

Anhang B

Vollständige Tabellen der Gesamträumungsdauern und Abweichungen zu mikroskopischen Simulation für die Kalibrierung.

| Scenario | Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | |
|---------------|---------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Mikroskopisch | - | - | - | 163,18 | 206,41 | 248,01 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 260,44 | 309,07 | 355 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 288 | 326,9 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 259,9 | 311,23 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 327,98 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 310,69 | 355 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,38 | 327,44 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,2 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,06 | 312,85 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |

| Scenario | Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | |
|----------|---------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 261,52 | 313,93 | 353,92 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 260,98 | 311,23 | 357,7 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,3 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,23 | 355,54 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 260,98 | 310,69 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 261,52 | 312,31 | 355,54 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,4 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 312,85 | 355,54 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |

| Scenario | Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | |
|----------|---------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 262,06 | 310,15 | 355 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 260,98 | 312,31 | 357,16 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,5 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 312,85 | 357,16 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 312,85 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,6 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |

| Scenario | Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | |
|----------|---------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,7 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,8 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,4 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |

| Setting | | | Gesamträumungsdauer für x Personen | | | | |
|----------|---------------|--------------|------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| Scenario | ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,5 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 0,5 | 199,92 | 262,6 | 311,77 | 356,62 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 0,6 | 188,58 | 242,07 | 286,92 | 326,36 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 0,7 | 181,01 | 228,56 | 269,63 | 305,29 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 0,8 | 177,23 | 217,21 | 253,42 | 289,08 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 0,9 | 176,69 | 211,81 | 244,23 | 278,81 |
| Hyrbid | 2,9 | 4,6 | 1 | 180,47 | 210,73 | 244,23 | 274,49 |

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|--|------------|------------|------------|------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| 2,2 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 54,03 | 61,06 | 65,92 | 217,75 |
| 2,2 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 39,99 | 37,82 | 138,87 |
| 2,2 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,2 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,2 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,2 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,2 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 53,49 | 63,22 | 67,54 | 220,99 |
| 2,2 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 38,9 | 138,87 |
| 2,2 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,2 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,2 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,2 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,2 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 62,68 | 65,92 | 221,53 |
| 2,2 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,37 | 38,36 | 137,79 |
| 2,2 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,2 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,2 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,2 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,3 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 55,65 | 64,84 | 67,54 | 224,77 |
| 2,3 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|--|------------|------------|------------|------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| 2,3 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,3 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,3 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,3 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,3 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 55,11 | 65,92 | 64,84 | 222,61 |
| 2,3 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,3 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,3 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,3 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,3 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,3 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 54,57 | 63,22 | 68,62 | 223,15 |
| 2,3 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,3 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,3 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,3 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,3 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,4 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,22 | 66,46 | 222,61 |
| 2,4 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,4 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,4 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,4 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,4 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,4 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 54,57 | 62,68 | 67,54 | 221,53 |
| 2,4 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,4 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,4 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,4 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,4 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,4 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 55,11 | 64,3 | 66,46 | 222,61 |
| 2,4 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,4 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,4 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,4 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,4 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,5 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 64,84 | 66,46 | 224,23 |

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|--|------------|------------|------------|------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| 2,5 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,5 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,5 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,5 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,5 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,5 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 55,65 | 62,14 | 65,92 | 220,45 |
| 2,5 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,5 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,5 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,5 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,5 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,5 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 54,57 | 64,3 | 68,08 | 223,69 |
| 2,5 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,5 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,5 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,5 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,5 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,6 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 64,84 | 68,08 | 225,85 |
| 2,6 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,6 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,6 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,6 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,6 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,6 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,6 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,6 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,6 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,6 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,6 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,6 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 64,84 | 67,54 | 225,31 |
| 2,6 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,6 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,6 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,6 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,6 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|--|------------|------------|------------|------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| 2,7 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,7 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,7 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,7 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,7 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,7 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,7 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,7 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,7 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,7 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,7 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,7 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,7 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,7 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,7 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,7 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,7 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,7 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,8 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,8 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,8 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,8 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,8 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,8 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,8 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,8 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,8 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,8 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,8 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,8 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,8 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,8 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,8 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,8 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,8 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |

| Setting | | | Abweichung zur Gesamträumungsdauer der mikroskopischen Simulation für x Personen | | | | Summe der Gesamtabweichungen |
|---------------|--------------|----------------|---|------------|------------|------------|---------------------------------|
| ρ_{crit} | ρ_{max} | ρ_{trans} | $x = 500$ | $x = 1000$ | $x = 1500$ | $x = 2000$ | |
| 2,8 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,9 | 4,4 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,9 | 4,4 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,9 | 4,4 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,9 | 4,4 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,9 | 4,4 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,9 | 4,4 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,9 | 4,5 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,9 | 4,5 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,9 | 4,5 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,9 | 4,5 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,9 | 4,5 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,9 | 4,5 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |
| 2,9 | 4,6 | 0,5 | 36,74 | 56,19 | 63,76 | 67,54 | 224,23 |
| 2,9 | 4,6 | 0,6 | 25,4 | 35,66 | 38,91 | 37,28 | 137,25 |
| 2,9 | 4,6 | 0,7 | 17,83 | 22,15 | 21,62 | 16,21 | 77,81 |
| 2,9 | 4,6 | 0,8 | 14,05 | 10,8 | 5,41 | 0 | 30,26 |
| 2,9 | 4,6 | 0,9 | 13,51 | 5,4 | 3,78 | 10,27 | 32,96 |
| 2,9 | 4,6 | 1 | 17,29 | 4,32 | 3,78 | 14,59 | 39,98 |

Anhang C

Einzelrechenzeiten der Varianten der Szenarien zur Auswertung der Performance aus Abschnitt 7.3. Die Rechenzeiten sind jeweils in Millisekunden angegeben. Jede Zeile repräsentiert einen mikroskopischen und einen hybriden Simulationslauf. Für den mikroskopischen Simulationslauf ist lediglich die Gesamtrechenzeit angegeben (Gesamt: mikro). Während für das Hybridmodell die Gesamtrechenzeit (Gesamt: hybrid) als auch die Rechenzeit der Module mikroskopisch (Modul: mikro.), makroskopisch (Modul: makro.), Aggregation (Modul: Agg.) und Disaggregation (Modul: Disagg.) angegeben ist.

Scenario 1

Personenzahl = 100

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 1676 | 1190 | 1122 | 34 | 2 | 31 |
| 1684 | 1148 | 1082 | 32 | 1 | 31 |
| 1672 | 1157 | 1091 | 32 | 1 | 31 |
| 1636 | 1163 | 1096 | 32 | 1 | 32 |
| 1694 | 1208 | 1143 | 33 | 1 | 30 |
| 1588 | 1161 | 1097 | 33 | 1 | 29 |
| 1665 | 1177 | 1111 | 32 | 1 | 32 |
| 1716 | 1184 | 1118 | 32 | 1 | 31 |
| 1588 | 1186 | 1123 | 31 | 1 | 30 |
| 1569 | 1120 | 1059 | 30 | 1 | 29 |

Personenanzahl = 200

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 2972 | 1843 | 1771 | 35 | 1 | 35 |
| 2793 | 1815 | 1744 | 35 | 1 | 33 |
| 2907 | 1820 | 1749 | 35 | 1 | 34 |
| 2849 | 1780 | 1708 | 36 | 1 | 33 |
| 2833 | 1772 | 1701 | 35 | 1 | 34 |
| 2661 | 1866 | 1792 | 36 | 1 | 35 |
| 2810 | 1742 | 1672 | 34 | 1 | 33 |
| 2669 | 1831 | 1757 | 36 | 1 | 36 |
| 2875 | 1794 | 1723 | 34 | 1 | 34 |
| 2845 | 1864 | 1790 | 36 | 1 | 35 |

Personenanzahl = 300

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 4124 | 2657 | 2579 | 37 | 2 | 37 |
| 4198 | 2573 | 2496 | 39 | 2 | 34 |
| 4163 | 2588 | 2510 | 40 | 2 | 35 |
| 4185 | 2723 | 2638 | 44 | 2 | 38 |
| 3999 | 2487 | 2410 | 39 | 2 | 35 |
| 3981 | 2602 | 2520 | 41 | 2 | 37 |
| 4139 | 2537 | 2459 | 40 | 2 | 35 |
| 4198 | 2675 | 2595 | 39 | 2 | 37 |
| 4049 | 2596 | 2520 | 40 | 2 | 33 |
| 4109 | 2489 | 2412 | 39 | 2 | 35 |

Scenario 2

Personenanzahl = 100

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 1684 | 1134 | 1068 | 18 | 4 | 42 |
| 1646 | 1140 | 1081 | 17 | 4 | 37 |
| 1616 | 1177 | 1113 | 18 | 4 | 40 |
| 1666 | 1148 | 1084 | 18 | 4 | 41 |
| 1614 | 1101 | 1044 | 16 | 4 | 36 |
| 1662 | 1176 | 1116 | 17 | 4 | 38 |
| 1665 | 1174 | 1110 | 18 | 4 | 40 |
| 1519 | 1106 | 1048 | 16 | 4 | 37 |
| 1612 | 1111 | 1052 | 17 | 4 | 37 |
| 1622 | 1125 | 1063 | 18 | 4 | 39 |

Personenanzahl = 200

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 2792 | 1774 | 1702 | 23 | 6 | 41 |
| 2747 | 1726 | 1657 | 21 | 6 | 41 |
| 2878 | 1765 | 1696 | 22 | 6 | 40 |
| 2725 | 1749 | 1680 | 22 | 6 | 40 |
| 2850 | 1748 | 1679 | 22 | 6 | 40 |
| 2758 | 1761 | 1692 | 22 | 6 | 39 |
| 2752 | 1698 | 1631 | 21 | 6 | 38 |
| 2600 | 1793 | 1722 | 23 | 6 | 40 |
| 2701 | 1731 | 1662 | 22 | 6 | 39 |
| 2817 | 1743 | 1676 | 21 | 6 | 39 |

Personenanzahl = 300

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 3975 | 2392 | 2318 | 23 | 8 | 41 |
| 3939 | 2450 | 2374 | 23 | 8 | 43 |
| 4279 | 2483 | 2408 | 24 | 8 | 41 |
| 4032 | 2438 | 2364 | 23 | 8 | 41 |
| 4000 | 2395 | 2321 | 24 | 8 | 41 |
| 4193 | 2480 | 2405 | 23 | 8 | 42 |
| 3905 | 2407 | 2332 | 23 | 8 | 42 |
| 4076 | 2480 | 2405 | 24 | 8 | 41 |
| 3894 | 2435 | 2357 | 23 | 8 | 45 |
| 4180 | 2498 | 2422 | 24 | 8 | 43 |

Scenario 3

Personenanzahl = 100

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 2049 | 1439 | 1239 | 88 | 2 | 108 |
| 2070 | 1489 | 1287 | 90 | 2 | 109 |
| 2173 | 1468 | 1265 | 90 | 3 | 109 |
| 2073 | 1470 | 1263 | 93 | 3 | 110 |
| 2042 | 1497 | 1295 | 90 | 2 | 107 |
| 2085 | 1503 | 1296 | 93 | 3 | 110 |
| 2166 | 1495 | 1250 | 90 | 2 | 151 |
| 2051 | 1488 | 1287 | 89 | 3 | 107 |
| 2126 | 1446 | 1249 | 87 | 2 | 106 |
| 2033 | 1493 | 1290 | 91 | 3 | 109 |

Personenanzahl = 200

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 3416 | 1826 | 1608 | 102 | 4 | 110 |
| 3368 | 1824 | 1605 | 103 | 3 | 111 |
| 3365 | 1825 | 1607 | 103 | 3 | 110 |
| 3373 | 1860 | 1638 | 104 | 4 | 112 |
| 3367 | 1824 | 1605 | 104 | 3 | 110 |
| 3612 | 1778 | 1568 | 101 | 3 | 105 |
| 3357 | 1849 | 1628 | 103 | 4 | 113 |
| 3408 | 1840 | 1619 | 103 | 4 | 112 |
| 3349 | 1825 | 1609 | 103 | 4 | 109 |
| 3372 | 1848 | 1631 | 102 | 3 | 111 |

Personenanzahl = 300

| Gesamt: mikro | Gesamt: hybrid | Modul: mikro. | Modul: makro. | Modul: Agg. | Modul: Disagg. |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 4695 | 2190 | 1957 | 112 | 6 | 114 |
| 4819 | 2152 | 1879 | 108 | 5 | 158 |
| 4871 | 2142 | 1916 | 108 | 5 | 112 |
| 4716 | 2168 | 1952 | 104 | 5 | 106 |
| 4709 | 2193 | 1969 | 105 | 5 | 113 |
| 4770 | 2179 | 1941 | 111 | 5 | 121 |
| 4706 | 2085 | 1868 | 104 | 4 | 106 |
| 4719 | 2176 | 1953 | 106 | 5 | 110 |
| 4652 | 2189 | 1967 | 104 | 4 | 112 |
| 4802 | 2194 | 1972 | 107 | 4 | 110 |