

Simulation von Menschenmengen im urbanen Umfeld

AXEL MEINERT^{1,2}, STEFAN HAHMANN¹, STEPHAN KOPF² & PATRICK BRAUSEWETTER¹

Zusammenfassung: Die Simulation von Fußgängern und Menschenmengen besitzt eine große Relevanz in der Planung von Veranstaltungen, der Simulation von Evakuierungen und der realitätsnahen Modellierung von Fußgängerströmen. Dieser Beitrag gibt zunächst einen Überblick zu für diese Aufgabenstellung geeigneten physikalisch-mathematischen Modellen, wobei das agentenbasierte Social-Force-Modell vertieft wird. Des Weiteren wird diskutiert, inwiefern OpenStreetMap-Daten in entsprechende Simulationen integriert werden können. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Anforderungen an ein Programm abgeleitet, welches Fußgänger und Menschenmengen im urbanen Umfeld visualisiert. Eine prototypische Implementierung wird vorgestellt und deren Performanz in Bezug auf die maximale Anzahl der simulierbaren Menschen getestet.

1 Motivation

Die Simulation von Fußgängern und Menschenmengen besitzt eine große Relevanz in der Planung von Veranstaltungen und baulichen Anlagen, in der Entwicklung von Evakuierungsszenarien und in der Analyse menschlichen Verhaltens. Lange Zeit lag der Fokus der Simulationsmodellierung in der Entwicklung von Verkehrssimulationen. Eine in vielen Erdteilen wachsende Bevölkerung, die stärkere Urbanisierung und größer werdende Umweltprobleme führen dazu, dass alternative Fortbewegungsarten an Bedeutung gewinnen, weshalb auch die Analyse des Fußgängerverkehrs bzw. von Fußgängerströmen in den Vordergrund rückt.

Gerade für die Planung von Großveranstaltungen nimmt die Relevanz von Fußgängersimulationen zu. Nicht nur die wachsende Bevölkerung, sondern auch eine zunehmende Eventisierung und Kommerzialisierung innerhalb der Gesellschaft prägen diese Entwicklung. Damit einhergehende Unglücksfälle wie z.B. bei der Love Parade in Duisburg 2010 (HELBING & MUKERJI 2012) oder mehrere Vorfälle während des Hadsch in Mekka (JOHANSSON 2009) erhöhen das Gefahrenbewusstsein bei Veranstaltern und Sicherheitsbehörden, die dadurch intensiver Evakuierungsszenarien entwickeln, auch mit Unterstützung entsprechender Fußgängersimulations-Software. HELBING et al. (2002) nennen eine unvollständige Liste von Unglücksfällen, die große mediale Aufmerksamkeit erlangten. Ein Ziel dieses Beitrags ist daher die Unterstützung der Arbeit von Sicherheitsbehörden durch verbesserte Fußgängersimulationen.

Ein weiteres konkretes Ziel ist es, die Menschenmengen in Demonstrationen realistisch zu simulieren. Damit soll deren Darstellung in einer Simulationssoftware für das Training von Stabsarbeit verbessert werden. Wir leisten zudem einen Beitrag durch die Analyse des OpenStreetMap-Datensatzes hinsichtlich der für die Fußgängersimulation sinnvoll nutzbaren Objekten.

¹ Fraunhofer IVI, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Dresden, Zeunerstraße 38, D-01069 Dresden, E-Mail: [axel.meinert, stefan.hahmann, patrick.brausewetter]@ivi.fraunhofer.de

² Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069 Dresden, E-Mail: stephan.kopf@htw-dresden.de

2 Literaturüberblick

Um das Programm zur Fußgängersimulation aufzubauen haben wir die möglichen Modellierungsansätze und bereits bestehenden Fußgängersimulationen analysiert und entsprechende Erkenntnisse in den Kapiteln zum Forschungsstand zusammengefasst. Um in späteren Schritten eine Vereinfachung der Menschenmenge zu ermöglichen beschäftigt sich ein Kapitel mit Verfahren zur Ableitung von Umrissen. Wie bereits in der Einleitung dargestellt ist die Einbindung von OSM-Daten die zweite elementare Zielsetzung dieser Arbeit. Dazu entsprechend beschäftigt sich Kapitel 4 mit der Motivation zur Nutzung von OpenStreetMap und den bisher gewonnenen Erkenntnissen. Konkrete Anforderungen an das Programm und erste Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Abschließend folgt ein zwischenzeitliches Resümee, mit Ausblick auf die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten.

2.1 Forschungsstand – Modelltypen

Die Modellierung von Fußgängersimulationen kann mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen umgesetzt werden. Gängige wissenschaftliche Unterteilungen differenzieren nach dem Aggregationsgrad der Modellierung (KRETZ 2007), dem Raumbezug, dem Verhalten der Personen, stochastischen oder deterministischen Verhalten, dem Zweck und der Verfügbarkeit. Der Aggregationsgrad gliedert sich in mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Simulationen. Mikroskopische Modellierungsansätze beschreiben jeden Fußgänger individuell. Der mesoskopische Ansatz stellt die Fußgänger ebenso individuell dar, jedoch wird die Bewegung der Fußgänger einheitlich berechnet und entspricht somit keiner Individualisierung mehr. Sowohl die graphische Darstellung als auch die rechnerische Modellierung erfolgt beim makroskopischen Aggregationsgrad für alle Fußgänger als Kollektiv. Der Raumbezug unterscheidet zwischen Gitter- und Netzwerkstrukturen bzw. einem kontinuierlichen Raum. Das Verhalten der Personen kann auf künstlicher Intelligenz oder Regeln basieren, des Weiteren funktional oder implizit sein. Nach allgemeinen Fußgänger-Modellen oder spezifischen, wie z.B. einer Evakuierungssimulation, unterscheidet der Zweck der Modellierung. Die Verfügbarkeit differenziert nach Open Source, kommerziellen oder noch nicht implementierten Produkten.

Drei verschiedene Modelltypen werden im Folgenden untersucht: die fluiddynamische Modellierung, die Modellierung basierend auf Zellulären Automaten und die Kräfte-basierte Modellierung.

Die fluiddynamische bzw. gaskinetische Modellierung (KORMONOVÁ 2013) nimmt an, dass das Bewegungsverhalten, welches sich bei Flüssigkeiten oder Gasen beobachten lässt, denen von Menschen ähnelt. Darauf aufbauend werden physikalische Gleichungen, welche die Bewegungen der Partikel beschreiben, auf die Bewegung der Fußgänger adaptiert. Im Falle der fluiddynamischen Herangehensweise handelt es sich um Anpassungen basierend auf den Navier-Stokes-Gleichungen. Dahingegen nutzt die gaskinetische Modellierung den Boltzmann-Ansatz. Entsprechende Modelle gibt es bereits seit der Mitte des 20. Jahrhunderts. Die ersten populären Simulationen kamen von TOGAWA (1955), welcher die Evakuierung bei Bränden untersucht hat, und PREDTECHENSKII et al. (1978), der die Bewegung von Menschenmengen in Gebäuden modelliert hat. Neuere Modellierungsansätze sind u.a. durch HELBING (1990) und HUGHES (2000) beschrieben. Die Ansätze der fluiddynamischen Modellierung besitzen die Eigenschaften der makrosko-

pischen Aggregation. Im Fall einer Fußgängersimulation bedeutet das, dass Visualisierung und Berechnung immer die komplette Menschenmenge umfassen. Ein Nachteil dieser Modellierungsart ist, dass das menschliche Verhalten mit physikalisch exakten Gesetzen nur grob angenähert werden kann (SCHADSCHNEIDER et al. 2009).

Zelluläre Automaten (ZA) sind eine Modellierungsform, welche weit über das Gebiet der Verkehrssimulationen hinaus Verwendung findet. Erste ZA wurden ebenfalls bereits in der Mitte des 20. Jahrhundert entwickelt. Diese beschreiben im Allgemeinen einen Raum welcher durch ein Raster gebildet wird, dessen Zellen verschiedene Zustände annehmen können. Auf ZA basierende Simulationen arbeiten in der Regel mit diskreten Zeitschritten (TOFFOLI 1991). Jeder ZA muss vier Grundbedingungen erfüllen (BURSTEDDE et al. 2001; SCHADSCHNEIDER et al. 2009):

- Die geometrische Anordnung des ZA ist ein Raster. Die meisten ZA nutzen ein zweidimensionales Raster.
- Das Raster muss eine explizite geometrische Form besitzen, z.B. rechteckig oder hexagonal. Die geometrische Form muss regelmäßig sein, sodass Nachbarschaften entstehen, beispielsweise eine Vierer-, Sechser- oder Achter-Nachbarschaft.
- Die Anzahl der Zellzustände, welche das Raster bilden, muss festgelegt sein. Ein einfaches Beispiel ist die Belegung mit zwei Zuständen. Dabei hieße der erste Zustand, dass die Zelle besetzt ist und der zweite, dass sie frei ist.
- Der nächste Zustand einer Zelle wird ausschließlich aus dem Einfluss der direkten Nachbarzellen bestimmt, woraus folgt, dass der Zustand einer Zelle, welche sich nicht in der direkten Nachbarschaft einer anderen Zelle befindet, keinen Einfluss auf diese Zelle nehmen kann.

Die Fußgängermodellierung mit Hilfe von ZA ist dem mikroskopischen Aggregierungsgrad zuzuordnen. Im Unterschied zum fluiddynamischen Modell ist die Berechnung räumlich und zeitlich diskret, da sich die Fußgänger nur von Rasterzelle zu Rasterzelle bewegen können.

Kräfte-basierte Modelle beruhen auf der Berechnung von Differentialgleichungen und sind damit der kontinuierlichen Berechnungsmethodik zuzuschreiben. Vom Aggregationsgrad sind sie, wie die ZA, den mikroskopischen Modellen zuzuordnen. In der Modellierungsgruppe der Kräfte-basierten Modelle gibt es verschiedene Modellierungsansätze. Ein weit verbreiteter Vertreter ist das Social-Force-Model (SFM) nach HELBING et al. (1995). Die Grundannahme des SFM ist, dass die Partikel, welche im Sinne des Modells Agenten genannt werden, sogenannten sozialen Kräften ausgesetzt sind. Diese Kräfte beeinflussen die Stärke und Richtung der Bewegung des Agenten. Die Größen dieser Kräfte umschreibt die folgende Formel, welche auf HELBING et al. (2005) beruht:

$$\vec{f}_{\alpha}(t) = \vec{f}_{\alpha}^0(\vec{v}_{\alpha}) + \vec{f}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha}) + \sum_{\beta(\neq\alpha)} \vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha}, \vec{v}_{\alpha}, \vec{r}_{\beta}, \vec{v}_{\beta}) + \sum_i \vec{f}_{\alpha i}(\vec{r}_{\alpha}, \vec{r}_i, t) \quad (1)$$

Die Formel besteht aus vier Kraftkomponenten, welche auf die Agenten einwirken:

- Der erste Term beschreibt die Beschleunigungskraft welche auf den Agenten wirkt. Die Kraft resultiert daraus, dass sich der Agent mit einer gewünschten Geschwindigkeit in Richtung seines Zieles fortbewegen möchte.
- Der zweite Term beschreibt die Abstoßungskräfte zwischen Fußgängern und Hindernissen.

- Der dritte Term beschreibt abstoßende Kräfte zwischen den Agenten untereinander.
- Der vierte Term beschreibt anziehende Kräfte zwischen den Agenten untereinander (z.B. bei Gruppen) und von bestimmten Objekten.

Die Parameter dieses Modells sind bereits durch empirische Untersuchungen kalibriert worden, was dazu führt, dass fußgängerspezifische Prozesse heute durchaus realitätsnah beschrieben werden können. JOHANSSON et al. (2007) haben die Laufwege von Fußgängern mittels Video-Tracking in realen Umgebungen untersucht. Unter anderem basiert ihre Arbeit auf Videoaufnahmen des Haddsch. Weiterhin haben HOOGENDORN & DAAMEN (2007) und MOUSSAÏD et al. (2009) verschiedene Versuchsszenarien in Hallen nachgestellt, aufgenommen und im Fall von Moussaïd mit aufgenommenen Videos von belebten Straßen verglichen.

Aufgrund der vorliegenden durch empirische Untersuchungen kalibrierten Modelle haben wir uns als Modellgrundlage für das Social-Force-Modell nach Helbing entschieden. Das Modell hat gleich mehrere Vorteile, welche unseren Zielstellungen entsprechen. Dazu gehören insbesondere der mikroskopische Aggregationsgrad und die vergleichsweise leichte Implementierbarkeit.

2.2 Forschungsstand – Ableitung von Umrissen

Bei der Verarbeitung und Analyse von großen Datenmengen ist es vorteilhaft, diese zu strukturieren und zu vereinfachen. Gerade hinsichtlich der Visualisierung einer Fußgängersimulation kann es von praktischem Nutzen sein, die Darstellung so zu abstrahieren, dass anstelle einer Vielzahl von einzelnen Agenten nur der abgeleitete Umriss der entstehenden gesamten Menschenmenge betrachtet werden kann.

Im Bereich der Computergrafik gibt es zwei Methoden, die für die Ableitung von Umrissen von Punktwolken im zweidimensionalen Raum verwendet werden können: die konvexe Hülle und die nicht-konvexe Hülle. Eine konvexe Hülle definiert sich als kleinste konvexe Menge, in der die zu untersuchenden Punkte enthalten sind. Dabei bedeutet Konvexität, dass alle Verbindungsstrecken zweier beliebiger Punkte ebenfalls innerhalb der konvexen Hülle liegen (PREPARATA & SHAMOS 1985; LANG 2016).

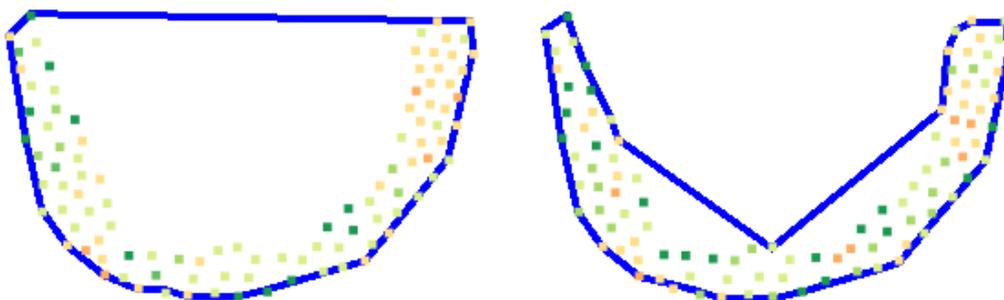


Abb. 1: Screenshot einer Menge von Fußgängern mit einer Umrissableitung aufbauend auf einer nahezu konvexen Hülle (links) und einer nicht-konvexen Hülle (rechts).

Im Gegensatz dazu, kann die nicht-konvexe Hülle jede mögliche Form annehmen, wovon die konvexe Hülle ein Sonderfall ist. Aufgrund einer fehlenden strikten Definition ist die Ableitung nicht-konvexer Umrisslinien komplexer, so dass für eine Punktwolke üblicherweise eine Vielzahl an nicht konvexen Hüllen existiert. Im Bereich der Computergrafik gibt es dafür verschie-

dene Ansätze, wie beispielsweise die Methode der Alpha-Shapes (EDELBRUNNER et al. 1983) oder Chi-Shapes (DUCKHAM et al. 2008). Die Methode der Chi-Shapes nutzt einen Algorithmus, welcher auch eine konvexe Hülle entstehen lassen kann. Viel wahrscheinlicher ist es jedoch, dass eine nicht-konvexe Hülle entsteht, wobei deren Bedingung ist, dass sie von der entsprechenden konvexen Hülle eingeschlossen wird. Dabei lässt sich hinzufügen, dass bei einer identischen Punktmenge in Abhängigkeit der verwendeten Parameter verschiedene Hüllen entstehen können. Der Parameter Chi legt fest, wie stark das entstehende Shape in Richtung Konvexität, oder ins Gegenteil, streben soll. Ein Beispiel für das Aussehen eines solchen Chi-Shapes im Vergleich zur konvexen Hülle ist in Abbildung 1 zu sehen. Es wird deutlich, dass die abgeleitete Umrisslinie besser der Form der Punktmenge entspricht, als die konvexe Hülle.

3 Softwareüberblick

Es existiert eine Vielzahl an Programmen für Fußgängersimulationen. So zählt KRETZ (2007) bereits 2007 um die 50 Programme bzw. Modellierungsansätze. Die nachfolgende Auswahl an Fußgängersimulationen stellt einen Ausschnitt daraus dar. Insbesondere werden frei verfügbare Programme und Bibliotheken betrachtet: die Pedestrian Crowd Simulation Library (PEDSim), Crowd-Sim und der Jülich Pedestrian Simulator (JuPedSim).

PEDSim ist eine in C++ programmierte Bibliothek (libpedsim). Die Bibliothek implementiert den mikroskopischen Modellierungsansatz des Social-Force-Modells nach Helbing. Ein weiterer Bestandteil ist eine graphische Benutzeroberfläche (Qt-Framework). Die Modifizierbarkeit und Wiederverwendung des Programms ist durch Verwendung der GNU General Public Licence (GPL) (graphische Benutzeroberfläche) und der GNU Lesser General Public License (LGPL) (eigentliche Bibliothek libpedsim) gegeben. PEDSim verfügt über eine ausführliche Dokumentation.

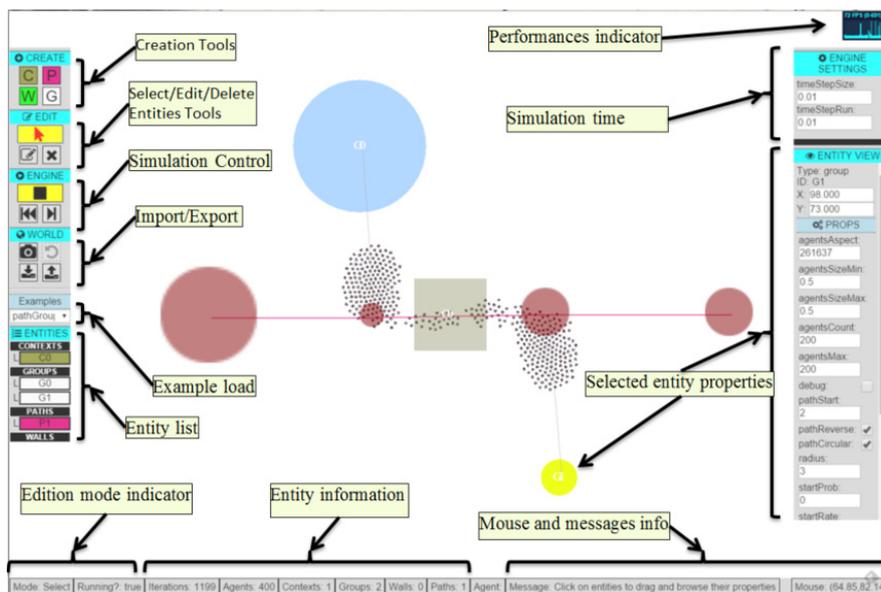


Abb. 2: Simulationsoberfläche der Fußgängersimulation Crowd-Sim, aufrufbar unter der Internetadresse <https://rawgit.com/Jacq/crowd-sim/master/demo/index.html>

Im Gegensatz zu PEDSim ist Crowd-Sim mehr als Simulationsumgebung denn als Bibliothek anzusehen. Der Modellierungsansatz ist wiederum derselbe, welcher auch in PEDSim genutzt wird, das SFM von Helbing. Crowd-Sim ist eine Browseranwendung und in JavaScript implementiert. Es steht unter der MIT-Lizenz. Crowd-Sim wird derzeit nicht weiterentwickelt. Die Darstellung der Parameter für die Fußgängersimulation ist intuitiv. Abbildung 2 zeigt die Anwendung mit den Möglichkeiten zum Setzen von Fußgängern, von Hindernissen, von Wegpfaden und der Simulationsparameter.

Sehr aktuell, und insbesondere für den wissenschaftlichen Betrieb gedacht, hat das Forschungszentrum Jülich mit JuPedSim eine Fußgängersimulation veröffentlicht (KEMLOH et al. 2016). Das Programm implementiert mehrere Modellierungsansätze. So stehen z.B. verschiedene Kräfte-basierte Modelle, wie beispielsweise das generalisierte Zentrifugalkraftmodell (CHRAIBI et al. 2010), und diverse Geschwindigkeits-basierte Modelle, wie u.a. das kollisionsfreie Geschwindigkeitsmodell (TORDEUX et al. 2015), zur Verfügung. JuPedSim ist in den Programmiersprachen C++ und Python geschrieben und wird unter der Lizenz LGPL bereitgestellt.

4 OpenStreetMap-Daten

Der OpenStreetMap (OSM) Datensatz kann als Datengrundlage für die Simulation von Menschenmengen in urbanen Umgebungen genutzt werden, da existierende Geoobjekte insbesondere in Großstädten sehr detailliert aufgenommen sind und der Datensatz frei verfügbar ist. Die in den OSM-Daten vorhandenen semantischen Informationen in Form von Tags bzw. Attributen können genutzt werden, um für die Simulation nicht relevante Daten auszusortieren. Teilweise vorhandene Informationen z.B. zur Breite von Straßen und Wegen sind relevant für Fußgängersimulation im urbanen Kontext.

Für die Umsetzung der Fußgängersimulation wurden die vom Dienstleister Geofabrik aufbereiteten OSM-Daten genutzt. Diese gruppieren die OSM-Daten nach den Geometrietypen Punkt, Linie und Polygon. Dies entspricht einer Datenaufbereitung für die Verwendung in Geoinformationssystemen, welche bei den Primärdaten nicht vorhanden ist. Weiterhin sind in den Geofabrik-Daten einige Polygon-Objekte gleichzeitig als Punkt-Objekte abgebildet. Es ist zu beachten, dass dieser Datensatz nur eine bestimmte Auswahl der OSM Daten umfasst (RAMM 2017).

Aufbauend auf den Daten der Geofabrik konnte eine Tabelle entwickelt werden, welche als Vorlage für die Nutzung in einer Fußgängersimulation angesehen werden kann. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl wichtiger Objektarten, sortiert nach dem Geometrietyp und den jeweiligen Layer-Namen.

Tab. 1: Auswahl an geeigneten OSM-Daten (basierend auf den Daten der Geofabrik) für die Integration als Hindernisse in eine Fußgängersimulation.

| <i>Geometrie</i> | <i>Layer-Name</i> | <i>Feature</i> | <i>Beschreibung</i> |
|------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|
| <i>Punkt</i> | | | |
| | <i>gis.osm_natural</i> | | |
| | | tree | Baum |
| | <i>gis.osm_pois</i> | | |
| | | post_box | Postkasten |
| | | telephone | Telefonzelle |
| | | recycling | Müllcontainer |
| | | bench | Bank |
| | | drinking_water | Trinkwasser |
| | <i>gis.osm_traffic</i> | | |
| | | traffic_signals | Ampeln |
| | | stop | Stoppschild |
| | | street_lamp | Straßenlaterne |
| | | barrier_fence | starrer Zaun |
| <i>Polygon</i> | | | |
| | <i>gis.osm_buildings</i> | | |
| | | building | Gebäude |
| | <i>gis.osm_landuse</i> | | |
| | | scrub | Gebüsch |
| | <i>gis.osm_water</i> | | |
| | | water | Wasser (z.B. Teich) |

Die Analyse der OSM-Daten zeigt, welche Probleme bei der Implementierung nach Tabelle 1 beachtet werden müssen:

- Einige Objekte im OSM-Datensatz sind nicht mit dem für eine Fußgängersimulation geeigneten Geometrietyt aufgenommen. Ein Beispiel hierfür sind Schranken, welche häufig als Punkt-Feature abgespeichert sind, für die Fußgängersimulation jedoch Linien sein müssten.
- Als Punkte gespeicherte Objekte, die in der Simulation als Hindernis betrachtet werden sollen, benötigen eine Art Standardgröße.
- Im OSM-Datensatz gibt es teilweise Redundanzen: so werden Objekte teilweise als Polygon und gleichzeitig als Punkt aufgenommen, etwa Point of Interests. Für eine bestmögliche Fußgängersimulation gilt es redundante Daten zu vermeiden.

5 Implementierung

5.1 Anforderungen

An die Entwicklung eines Programmes zur Fußgängersimulation kann eine Reihe an funktionalen Anforderungen gestellt werden. Die nachfolgende Liste zeigt einen Ausschnitt aus dem Anforderungskatalog, in welchem nur die elementarsten Anforderungen enthalten sind:

- Datenimport
 - Das Programm muss dem Nutzer erlauben Daten zu Fußgängern zu importieren.
 - Das Programm muss dem Nutzer erlauben Daten zu Hindernissen zu importieren.
 - Das Programm muss dem Nutzer erlauben Daten zu Wegpunkten zu importieren.
 - Das Programm muss dem Nutzer die Möglichkeit geben verschiedene Dateiformate zu importieren, z.B. OGC WKT und ESRI Shape.
- Information
 - Das Programm muss es dem Nutzer ermöglichen über verschiedene Informationen den Zustand der Simulation überblicken zu können.
- Simulationsparameter
 - Das Programm muss dem Nutzer ermöglichen verschiedene Simulationsparameter zu manipulieren.
- Darstellung
 - Im Programm muss an zentraler Stelle eine Karte untergebracht werden, in der die Simulation dargestellt wird.
 - Das Programm muss dem Nutzer die Möglichkeit geben die Sichtbarkeit von Objekten in der Karte zu steuern.

5.2 Umsetzung

Aufbauend auf dem Anforderungskatalog und den Forschungsständen der vorgestellten wissenschaftlichen Bereiche konnte ein Programm entwickelt werden, welches unsere grundlegenden Zielsetzungen erfüllt. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt, bei welchem eine 1.000 Personen umfassende Menschenmenge durch die Prager Straße in Dresden läuft. Um die Hindernisse zu modellieren, wurden die OSM-Daten der Geofabrik genutzt.

Insgesamt gliedert sich das Programm in vier Bereiche. Der obere Bereich besteht aus den Schaltflächen für die Steuerung der Simulation (Start, Stopp, Pause) und den Schaltflächen für das Laden der Daten (Fußgänger, Hindernisse, Wegpunkte). An dieser Stelle konnten alle Anforderungen umgesetzt werden, insbesondere das Laden der Geometrien zu Hindernissen, Wegpunkten und Fußgängern. Diese Daten können sowohl als Shape-Datei sowie als CSV-Datei importiert werden. In letzterem Fall wird OGC Well Known Text (WKT) als Geometrieformat angenommen. Der rechte Bereich des Programms bietet eine Reihe von Möglichkeiten zum Ein- und Ausblenden von Elementen der Simulation. Im unteren, hier nicht dargestellten Abschnitt, können zusätzlich einige Simulationsparameter manipuliert werden, z.B. die Simulationsge-

schwindigkeit und die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fußgänger. Informationen bezüglich des Programms, insbesondere der Simulation, werden im untersten Teil der Nutzeroberfläche angezeigt, z.B. die Gesamtanzahl der simulierten Fußgänger und die durchschnittliche Dichte der Menschenmenge in Personen/m². Die Hauptfunktionalität des Programmes bildet die Kartenansicht bzw. Simulationsansicht im mittleren linken Bereich. Hier wird die eigentliche Simulation visualisiert.

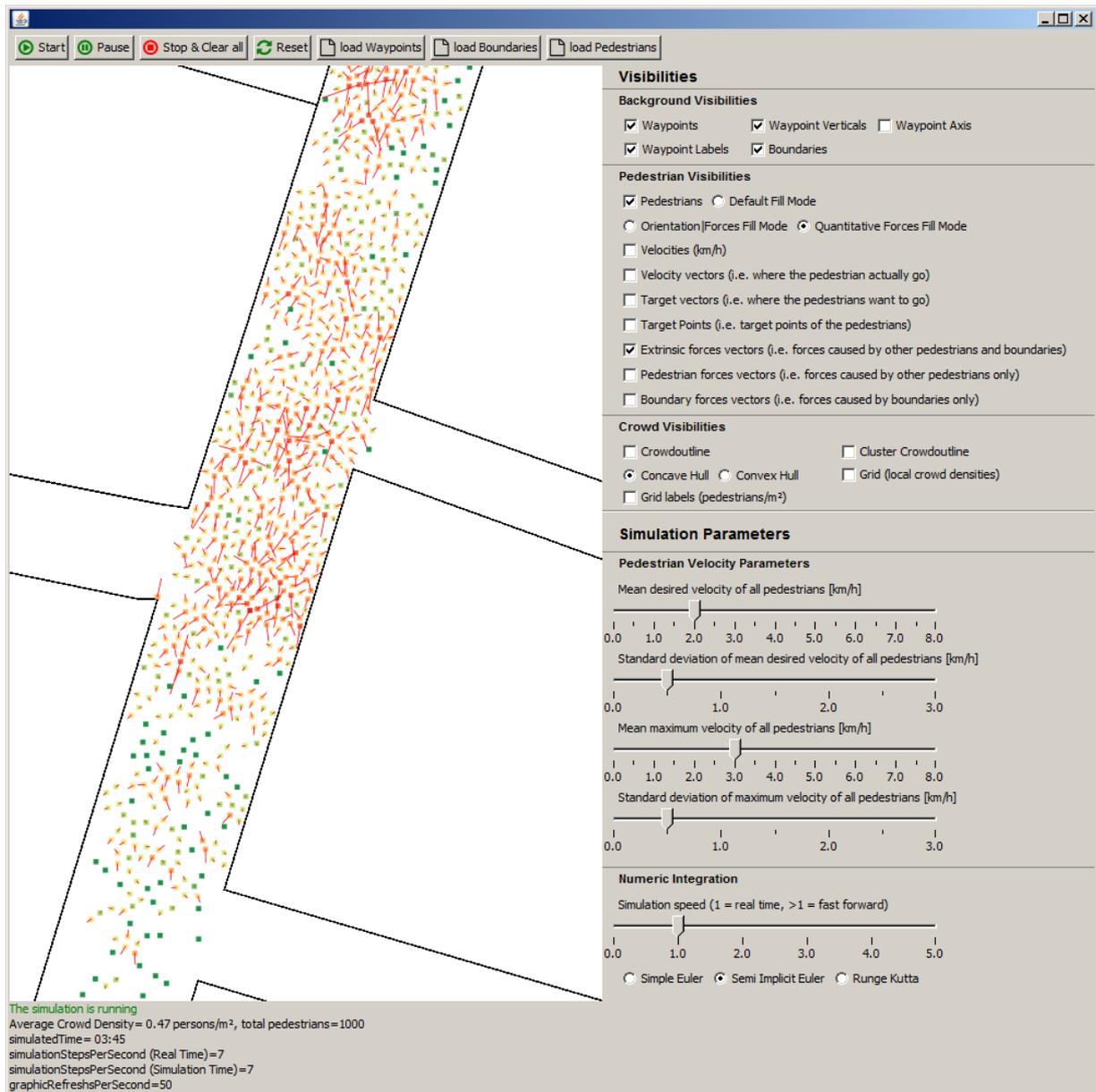


Abb.3: Ausschnitt aus der entwickelten Fußgängersimulation. Die Fußgänger laufen durch einen Teil der Prager Straße in Dresden, welche durch OSM-Daten visualisiert wurde. Die Farbdifferenzierung der Fußgänger quantifiziert die Stärke der Kräfte, die zu diesem Zeitpunkt auf sie wirken. Die roten Linien zeigen zusätzlich die Richtung der wirkenden Kräfte.

6 Fazit & Ausblick

Die entwickelte Fußgängersimulation wurde einem Performancetest unterzogen. Die Basis bildeten Shape-Dateien mit jeweils 300, 500, 600, 750, 1.000, 1.500 und 2.000 Fußgängern. Nach einer spezifischen Zeit, in der sich der Fußgängerstrom nach dem Start eingependelt hat, wurde die Performance, basierend auf den berechneten Simulationsschritten pro Sekunde, gemessen. Aus diesen Daten konnte eine Regressionskurve, mit folgender Formel, bestimmt werden:

$$y = \frac{12951}{x-4,35} \quad (2)$$

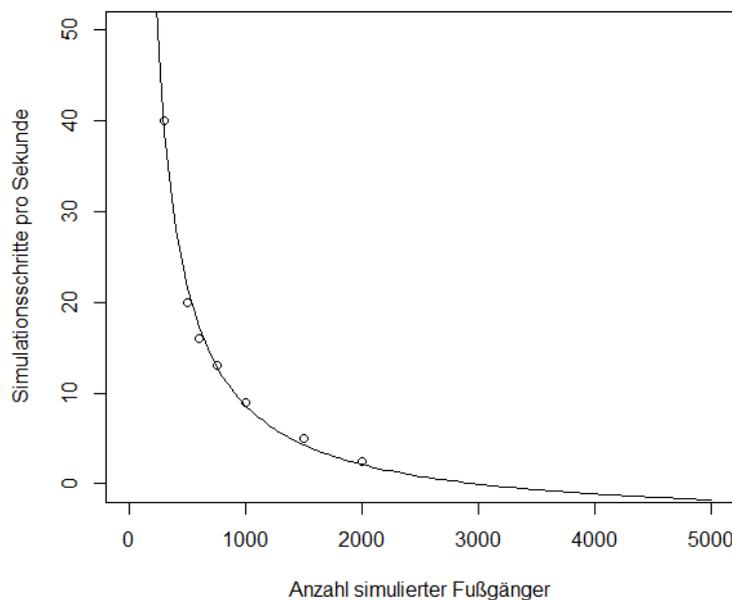


Abb. 4: Regressionskurve des Performancetests

Abbildung 4 zeigt die visualisierte Regressionskurve. Die x-Achse zeigt die Anzahl an Fußgängern und die y-Achse die Simulationsschritte pro Sekunde. Aufbauend auf den Ergebnissen aus Abbildung 4 und gleichzeitigen Tests der Simulation konnten wir feststellen, dass das Programm derzeit auf einem gebräuchlichen Arbeitsplatz PC mit bis zu 1.000 Fußgängern problemfrei einsetzbar ist. Der benutzte Testrechner läuft mit einem 64-bit Windows 7 System und einem 4-kernigen Intel-Prozessor mit 3,2 GHz Leistung. Weiterhin stand ein Arbeitsspeicher von 8 GB zur Verfügung. Bei einer Menge von 1.000 bis 2.000 Personen treten zunehmend Probleme auf, welche sich durch Ruckeln bemerkbar machen. Ab 2.000 Fußgängern läuft die Simulation nicht mehr flüssig genug, um verwendbare Ergebnisse zu produzieren. Außerdem werden die einzelnen Zeitschritte für die Simulation zu groß. Eine Verbesserung der Performance sehen wir als wichtige Verbesserung für zukünftige Arbeiten.

In Bezug zu OpenStreetMap sehen wir noch einen weiteren Untersuchungsbedarf. Dieser besteht einerseits darin Automatisierungsmöglichkeiten zu testen und andererseits die Primärdaten von OpenStreetMap analog zu den Geofabrik-Daten zu untersuchen. Konzeptuell besteht zudem das Ziel Anwendungslogik und Darstellung in der Bibliothek zu trennen, so dass eine Integration in andere Anwendungen leicht umsetzbar ist.

Weitere Forschungsarbeiten sind in das Projekt „TARGET“³ (EU H2020) eingebettet. Ein Aspekt dieser Arbeiten wird sein, das Modell so anzupassen, einsatztaktisch relevante Vorgehensweisen zu modellieren. Beispielsweise, wenn die Polizei versucht eine Menschenmenge zu stoppen – die Menschenmenge könnte stehen bleiben, die Polizisten angreifen oder sich auflösen, um in alle Richtungen davonzustürmen.

7 Dank

Die Forschungsarbeiten, die zu den vorgestellten Ergebnissen geführt haben, wurden durch das Forschungsrahmenprogramm H2020 der Europäischen Union unter dem Kennzeichen 653350 (TARGET) gefördert.

8 Literaturverzeichnis

- BURSTEDDE, C., KLAUCK, K., SCHADSCHNEIDER, A. & ZITTARTZ, J., 2001: Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **295**(3-4), 507-525.
- CHRAIBI, M., SEYFRIED, A. & SCHADSCHNEIDER A., 2010: Generalized centrifugal-force model for pedestrian dynamics. *Physical Review*, **E82**(4), 046111, 1-9.
- DUCKHAM, M., KULIK, L., WORBOYS, M. & GALTON, A., 2008: Efficient generation of simple polygons for characterizing the shape of a set of points in the plane. *Pattern Recognition*, **41**(10), 3224-3236.
- EDELSBRUNNER, H., KIRKPATRICK, D. & SEIDEL, R., 1983: On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Transactions on Information Theory*, **29**(4), 551-559.
- HELBING, D., 1990: Physikalische Modellierung des dynamischen Verhaltens von Fußgängern (Physical Modeling of the Dynamic Behavior of Pedestrians). PhD Thesis, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- HELBING, D. & MOLNÁR, P., 1995: Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review*, **E51**(5), 4282-4286.
- HELBING, D., FARKAS, I., MOLNÁR, P. & VICSEK, T., 2002: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian Evacuation Dynamics*, Schreckenberg, M. & Sharma, S.,D. (Hrsg.), Springer, Berlin, 21-58.
- HELBING, D., BUZNA, L., JOHANSSON, A. & WERNER, T., 2005: Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics. Experiments, Simulations, and Design Solutions. *Transportation Science*, **39**(1), 1-24.
- HELBING, D. & MUKERJI, P. 2012: Crowd disasters as systemic failures. Analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science*, **99**(1), 1-40.
- HOOGENDOORN, S. & DAAMEN, W., 2007: Microscopic Calibration and Validation of Pedestrian Models: Cross-Comparison of Models Using Experimental Data. *Traffic Granular Flow'05*, Schadschneider, A., Pöschel, T., Kühne, R., Schreckenberg, M. & Wolf, D. E. (Hrsg.), Springer, Berlin, 329-340.

³ <http://www.target-h2020.eu/>

- HUGHES, R. L., 2000: The flow of large crowds of pedestrians. *Mathematics and Computers in Simulation*, **53**(4-6), 367-370.
- JOHANSSON, A., HELBING, D. & SHUKLA, P. K., 2007: Specification of the Social Force Pedestrian Model by evolutionary adjustment to video tracking data. *Advances in Complex Systems*, **10**(2), 271-288.
- JOHANSSON, A., 2009: Data-driven modeling of pedestrian crowds. PhD Thesis, Technische Universität Dresden.
- KEMLOH, U., CHRAIBI, M. & SESSER, F., 2016: Jupedsim/Jupedsim: Jupedsim V0.8.1, DOI: 10.5281/zenodo.592209.
- KORMANOVÁ, A. 2013: A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling. *Acta Informatica Pragensia*, **2**(2), 39-50.
- KRETZ, T., 2007: Pedestrian Traffic. Simulation and Experiments. PhD Thesis, Universität Duisburg-Essen.
- LANG, H.W., 2016: Konvexe Hülle. Unter: <http://www.iti.fh-flensburg.de/lang/algorithmen/geo/convex.htm> (abgerufen am 05.01.2018).
- MOUSSAÏD, M., HELBING, D., GARNIER, S., JOHANSSON, A., COMBE, M. & THERAULAZ, G., 2009: Experimental study of the behavioral mechanisms underlying self-organization in human crowds. *Proceedings. Biological sciences*, **276** (1668), 2755-2762.
- PREDTECHENSKII, V.M. & MILINSKII, A.I., 1978: Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerind Publishing Company Inc., New Delhi.
- PREPARATA, F. & SHAMOS, M., 1985: Convex Hulls: Basic Algorithms. *Computational Geometry*. Springer, New York, 95-149.
- RAMM, F., 2017: OpenStreetMap Data in Layered GIS Format. Unter: <https://www.geofabrik.de/data/geofabrik-osm-gis-standard-0.7.pdf> (abgerufen am 16.01.2018).
- TOFFOLI, T. & MARGOLUS, N., 1991: Programmable matter: concepts and realization. *Physica D*, **47**, 263-272.
- TOGAWA, K., 1955: Study of Fire Escapes Based on the Observation of Multiple Currents. Report of the Building Research Institute, **14**, Tokyo, 1-29.
- TORDEUX, A., CHRAIBI, M. & SEYFRIED, A., 2015: Collision-free speed model for pedestrian dynamics. *Traffic and Granular Flow '15*, Knoop V. & Daamen, W. (Hrsg.), Springer, Berlin, 1-10.