

# Betrachtung der Modellierung und Simulation von Fußgängern im Kontext verschiedener Skalen

Daniel Biedermann, Peter Kielar, Oliver Handel

Technische Universität München, Deutschland

daniel.biedermann@tum.de

**Abstract.** Im Rahmen des BMBF geförderten Projektes MultikOSi ("Multikriterielle Vernetzung für Offenheit und Sicherheit") werden Unterstützungssysteme für den Kontext urbaner Events entwickelt. Diese sollen die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Unglücksfälle – wie die Katastrophe auf der Loveparade 2010 - reduzieren und zu einem erhöhten Sicherheitsgefühl und Wohlbefinden der Besucher führen. Personenstromsimulationen unterstützen die Planung und Durchführung von Großveranstaltungen indem das Laufverhalten von Fußgängern quantitativ bestimmt wird. Im MultikOSi Projekt beteiligt sich die Technische Universität München durch die Entwicklung neuartiger Methoden zur mehrskaligen Simulation von Fußgängern. Als ersten Schritt hinsichtlich der Modellierung mit unterschiedlichen Skalen wird eine Abgrenzung der verschiedenen skaligen Modelle präsentiert und der jeweilige Einsatzzweck der Modelltypen konkretisiert. Auf Basis dieser Einteilung wird ein Zoom-Ansatz postuliert. Dieser ermöglicht die dynamische Änderung der Ortsauflösung durch lokalen Wechsel der Simulationsmodelle.

## 1 Einleitung

Öffentliche Großveranstaltungen erfreuen sich einer wachsenden Beliebtheit (Betz et al., 2011). Hierbei erreichen bekannte Events wie das Münchner Oktoberfest auf eng begrenzten Flächen, siebenstellige Besucherzahlen (Nickl, 2013). Die Gefahren, die sich aus derart großen Menschenansammlungen ergeben können, wurden auf tragischer Weise auf der Loveparade 2010 in Duisburg sichtbar. Gründe für diesen Unglücksfall mit 21 Toten lagen unter anderem in der mangelhaften Vorbereitung dieses Events (Helbing and Mukerji, 2011). Personenstromsimulationen können die Organisatoren bei der Planung und Durchführung von Veranstaltungen unterstützen und hierdurch die Sicherheit von Besuchern erhöhen. In diesem Kontext arbeitet das fachübergreifende Forschungsprojekt MultikOSi ("Multikriterielle Vernetzung für Offenheit und Sicherheit"). Das Verbundprojekt hat sich zum Ziel gesetzt ganzheitliche und verbesserte Sicherheitskonzepte für städtische Events zu erarbeiten. In einem Teilprojekt arbeitet die Technische Universität München an der Entwicklung und Umsetzung neuartiger Methoden im Bereich der mehrskaligen Personenstromsimulation. Hierbei bezieht sich der Multiskalenansatz auf eine räumliche, kognitive und strategische Sichtweise, um so dem ganzheitlichen Ansatz der Forschungsfragestellung gerecht zu werden. Im Folgenden wird der räumliche Multiskalenansatz untersucht. Hierbei wird zwischen drei Hauptskalen (makroskopisch, mesoskopisch und mikroskopisch) unterschieden. Im Kontext urbaner Events können diese Ebenen Teilgebieten des Veranstaltungsgeländes zugeordnet werden. Die makroskopische Modellierung wird eingesetzt,

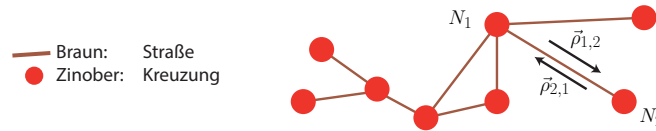


Abbildung 1: Makroskopisches Modell: Personenströme bewegen sich vom Knoten  $N_1$  zum Knoten  $N_2$  und vice versa.

wenn eine grobskalige Perspektive eingenommen wird. Im Kontext von urbanen Events ist diese Skala insbesondere von Interesse, wenn die An- und Abreisewege der Besucher im Fokus stehen oder die Auswirkungen von Managemententscheidungen untersucht werden sollen. Dem gegenüber beschreibt die mesoskopische Skala die örtlich und zeitlich diskretisierte Fortbewegung einzelner Personen. Realisiert wird diese Modellierung durch die Nutzung regelbasierter zellulärer Automaten. Als Zwischenebene der makroskopischen und mikroskopischen Skala werden mesoskopische Modelle in der Simulationen von Individuen unter Vernachlässigung feinskaliger Effekte eingesetzt. Im Kontext urbaner Events finden diese Simulationsmodelle in der Simulation des Veranstaltungsortes und seiner näheren Umgebung Verwendung. Bei der mikroskopischen Modellierung werden einzelne Individuen betrachtet. Diese Art der Modellierung wird angewendet, wenn genaue Abstände, Geschwindigkeiten und zeitliche Abfolgen von entscheidender Bedeutung sind. Viele Modelle der mikroskopischen Skala basieren auf physikalischen, mathematischen sowie agentenbasierten Prinzipien und generieren schlussendlich die Trajektorien der simulierten Fußgänger. Die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Skalen sind oft fließend und nicht immer klar voneinander abgrenzbar. Eine eindeutige Zuordnung einzelner Modellierungstechniken zu den unterschiedlichen Skalen ist nicht zweifelsfrei möglich. Die vorgenommene Einordnung soll eine grobe Orientierung liefern, für welche Skala welche Modelle prädestiniert sind.

## 2 Makroskopische Skala

Makroskopische Modelle betrachten das zu modellierende Szenario zumeist aus einer räumlich weitreichenden und zeitlich ausgedehnten Perspektive. Makroskopische Modelle haben somit eine gesamtheitliche Sicht auf den Untersuchungsgegenstand (Kneidl, 2013). Im Fokus dieser Modelle stehen aggregierte Werte, Rückkopplungsbeziehungen und globale kausale Abhängigkeiten und in der Regel keine konkreten individuellen Fußgänger oder Verkehrsmittel. Im Folgenden werden die beiden, als wichtigste Vertreter erachteten Techniken makroskopischer Modellierung, die Methode System Dynamics und die Netzwerkmodellierung, beschrieben.

System Dynamics ist eine in den 1950er Jahren am Massachusetts Institute of Technology entwickelte Methode zur ganzheitlichen Analyse und Simulation von komplexen dynamischen Systemen (Forrester, 1992). System Dynamics Systemmodelle können dabei helfen grundlegende übergeordnete Dynamiken im Kontext von Personenströmen und Verkehrsströmen aufzuzeigen. Hierdurch kann Komplexität und Unsicherheit im Zusammenhang mit strategischen Planungsvorhaben im Bereich der Personen- und Verkehrsmodellierung überschaubar gehalten werden. Die Methode ermöglicht in diesem Kontext die Verdichtung von Informationen für führende Entscheidungsträger, indem für das Systemverständnis und das Systemverhalten fundamentale wichtige kausale Abhängigkeiten aufgezeigt und simuliert werden können. Das Schlüsselkonzept liegt in dem sogenannten Endogeni-

sieren von Systemstruktur (Senge, 1990). Hierdurch wird es ermöglicht Systemverhalten emergent aus der einwickelten Modellstruktur zu erzeugen. Mit Hilfe des entwickelten Systemverständnisses ist es im Anschluss möglich, konkrete Handlungsempfehlungen für Policyoptionen und Steuerungsmechanismen zu entwickeln und anschließend auf ihre Implementierbarkeit hin zu untersuchen (Moxnes, 2009). Die Methode eignet sich sowohl zum qualitativen, als auch zum quantitativen Modellieren. Eine Besonderheit der System Dynamics Modellierung ist die Berücksichtigung nichtlinearer Abhängigkeiten und zeitverzögerter Feedbackbeziehungen, die bei anderen Modellierungsmethoden häufig nicht berücksichtigt werden, jedoch bei Prozessen, die sich auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen abspielen, von entscheidender Relevanz sind (Renn and Schweizer, 2009). In sogenannten Group Model Building Workshops ist es darüber hinaus möglich verschiedene Wissensträger zusammenzuführen und jedes vorhandene experimentelle und lokale Wissen systematisch mittels der System Dynamics Methode zu integrieren (Vennix, 1996). Ein Beispiel für ein kausales Diagramm, das die Ursache-Wirkungs-Beziehungen, die zu der Love Parade Katastrophe im Jahr 2010 geführt haben, aufzeigt, ist in der Arbeit von Helbing and Mukerji (2011) zu finden. Das Modell integriert eine Event-orientierte und eine Prozess-orientierte Perspektive. Verschiedene nachteilige, die Tragödie begünstigende, Events im Vorfeld und am Tag der Love Parade werden ebenso in Betracht gezogen wie eine Feedbackschleife mit positiver Polarität, welche die selbst verstärkenden Prozesse des Unglückes veranschaulicht.

Es gibt verschiedene Einsatzbereiche von netzwerkbasierten Modellen. Netzwerkbasierte Modelle sind sowohl in der Personenstromsimulation, als auch in der Verkehrsflusssimulation einsetzbar. Insbesondere eignen sich netzwerkbasierte Modelle dazu, Optimierungsprobleme beim Routing und bei der Wegewahl, durch entsprechende Algorithmen zu lösen. Zu diesen Algorithmen zählen zum Beispiel der Fastest Path (Dijkstra, 1959) und der Heuristic Path (Hart et al., 1968) Algorithmus. Des Weiteren ist es insbesondere im Bereich der Verkehrsplanung mit netzwerkbasierten Modellen möglich, makroskopische Raumplanungskonzepte zu unterstützen. Zum Beispiel ist es mit Hilfe eines Netzwerkmodells evaluierbar, kosteneffiziente Vermaschungsoptionen in der Straßenplanung zu finden (Tinhofer, 1981). Im Bereich der Personenstromsimulation existieren Algorithmen die aus einer Szenariogeometrie einen Sichtbarkeitsgraphen generieren (Kneidl, 2013). Auf diesem Netzwerkgraphen können Personenbewegungen simuliert werden. Dies ermöglicht auch die Modellierung und Simulation von Personenströmen im fein skaligen Bereich. Hartmann and Sivers (2013) verwenden ein diskretes Netzwerkflussmodell für Evakuierungssimulationen mit unidirektionalen Bewegungen auf den Kanten (siehe Abbildung 1). Im Kontext urbaner Eventveranstaltungen kann mit netzwerkbasierten Modellen insbesondere die Transportinfrastruktur, auf der Personen zum Event befördert werden, dargestellt werden. Netzwerkmodelle helfen die vorhandene Infrastruktur optimal auszunutzen, indem untersucht werden kann, wie sich an- und abreisende Personen- und Verkehrsströme auf bestmögliche Weise auf alle vorhandenen Netzwerkkanten und -knoten verteilen. Aufgrund ihrer punktförmigen Endpunkte sind Netzwerkmodelle dafür prädestiniert mit anderen Modelltypen gekoppelt zu werden. So ist es beispielsweise möglich das Eventgelände selbst als kontinuierliches Agentenmodell aufzubauen und an ein Netzwerkmodell zu koppeln, um damit die makroskopische Transportinfrastruktur mit in den Betrachtungsfokus zu rücken. Die gekoppelten Modelle können schließlich parallel auf einem Computer ausgeführt werden.

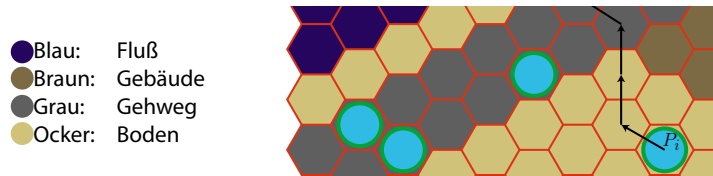


Abbildung 2: Mesoskopisches Modell: Zellweise Bewegung einer Person  $P_i$  über das hexagonale Gitterszenario

### 3 Mesoskopische Skala

Modelle der mesoskopische Skala entsprechen dem Bindeglied zwischen makroskopischen und mikroskopischen Personenstrommodellen. Die Umsetzung dieser Modelle erfolgt mittels zellulärer Automaten (Blue and Adler, 2001). Deren Verwendung setzt eine Diskretisierung des Raumes voraus. Das zu simulierende Szenario muss in Zellen gleicher Größe auf geteilt werden (siehe Abbildung 2). Die Größe einzelner Zellen entspricht dem Platzbedarf einer Einzelperson. Dadurch kann eine Zelle maximal von einem Individuum besetzt sein (Schadschneider et al., 2009). Diese mesoskopische Modellierung findet Verwendung, falls eine große Anzahl an Einzelpersonen simuliert werden soll, ohne dass eine exakte Positionsbestimmung der Fußgänger notwendig ist. In diesen Fällen können sich, durch die Verwendung zellulärer Automaten, erhebliche Geschwindigkeitsvorteile gegenüber der Simulation mikroskopischer Modelle ergeben. Für die Einheitszelle des Gitternetzes haben sich bei zellulären Automaten in der Personenstromsimulation rechteckige (Ji et al., 2013) und hexagonale (Hartmann, 2010) Geometrien durchgesetzt. Der Vorteil eines Rechteckigen Gitters liegt in der intuitiven Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems (Birch et al., 2007). Dagegen benötigt ein Gitternetz aus hexagonalen Einheitszellen ein komplexeres Koordinatensystem. Die Vorteile hexagonaler Einheitszelle liegen darin, dass die Mittelpunkte benachbarter Zellen in alle Laufrichtungen äquidistante Abstände aufweisen (Kneidl, 2013). Dagegen ist bei rechteckigen Elementarzellen diese Eigenschaft nur bei der Von-Neumann-Nachbarschaft gegeben.

Die Bewegungssteuerung der Fußgänger erfolgt bei zellulären Automaten durch regelbasierte Konzepte. Die Personen befolgen ein gemeinsames, endliches Set an Regeln und bewegen sich basierend auf diesen Beschränkungen lokal fort (Schadschneider, 2001). Durch Erweiterungen des zugrundeliegenden Regelwerkes können verschiedene Eigenschaften von Fußgängern beachtet werden. Beispielsweise beschreibt Bandini et al. (2011) Wahrnehmung und Gruppenverhalten mittels eines regelbasierten zellulären Automaten. Bei dem Übergang zu einer Nachbarzelle wird, basierend auf weiteren Regeln, eine Zelle ausgewählt und der Fußgänger auf dieses Feld positioniert. Für lokales Bewegungsverhalten ist dieses Vorgehen gut geeignet. Eine langfristige Zielnavigation der Personen mittels regelbasierter Modelle ist dagegen zu komplex. Hierfür müssten alle auftretenden Entscheidungen der Fußgänger hin zum Zielpunkt bei der Routenplanung beachtet werden. Um langfristige Wegfindung zu ermöglichen, können zellulare Automaten um ein Potential Feld oder einen Navigationsgraphen erweitert werden (Gloor et al., 2004; Kneidl et al., 2013). Hierdurch werden die lokalen Bewegungen der Fußgänger zum globalen Zielpunkt geleitet.

Mesoskopische Modelle werden für Szenarien angewandt bei denen die Simulation von Einzelpersonen notwendig ist, fein skaligere Effekte jedoch vernachlässigt werden können. Als Praxisbeispiel sei hier die Simulation des Weltjugendtages 2005 in Köln (Klüpfel, 2007) genannt. Aufgrund der hohen Anzahl an Personen ist hier eine rein mikroskopische Simulation zu rechenaufwendig. Die schnellere Berechnung zellulärer Automaten gegenüber

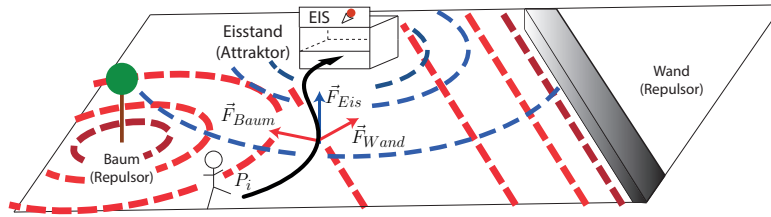


Abbildung 3: Mikroskopisches Modell: Die Superposition aller Kräfte bestimmt die Trajektorie des Fußgängers  $P_i$

feinskaligen kontinuierlichen Modellen wird durch eine erhöhte Ungenauigkeit erkauft. Aus der Diskretisierung des Raumes bei zellularen Automaten ergibt sich eine diskretisierte Fortbewegung der Fußgänger. Dies bewirkt Artefakte gegenüber der rein euklidischen Geometrie kontinuierlicher Modelle. Durch geeignete Maßnahmen können diese Abweichungen jedoch reduziert werden (Köster et al., 2011). Prinzipiell ist die Genauigkeit zellulärer Automaten auf die Größe der Einheitszelle limitiert. Der Nutzen mesoskopischer Modelle liegt in der Kombination eines hohen Realitätsgrades mit kurzen Rechenzeiten. Für die strategische Planung städtischer Events besitzen mesoskopische Modelle einen zu hohen Detaillierungsgrad. In diesen Fällen sollte auf makroskopische Netzwerkmodelle zurückgegriffen werden. Zudem sind sehr kritische Bereiche der Veranstaltung, wie beispielsweise die Ein- und Ausgangsbereiche von Veranstaltungen, für mesoskopische Modelle ungeeignet. Der Grund hierfür liegt in der Diskretisierung des Raumes. Neben Artefakten (Köster et al., 2011), begrenzt die Größe der Einheitszelle die maximale Genauigkeiten. Daher sollten feinskalige mikroskopische Personenstrommodelle für diese Bereiche verwendet werden. Weniger kritische Gebiete einer urbanen Veranstaltung können dagegen gut mittels zellulärer Automaten simuliert werden.

## 4 Mikroskopische Skala

Die mikroskopische Skala kann auf alle Modelle angewendet werden, die den Raum als kontinuierlich betrachten und feingranulare Trajektorien generieren können. Im Folgenden werden die verschiedenen Ansätze von Personenstrommodellen dargestellt, welche der mikroskopischen Skala zuzuordnen sind, als auch praktische Anwendungsgebiete beschrieben.

Modelle, die auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basieren, werden gängig als Kräfte-Modelle bezeichnet. Simulierte Personen in solchen Systemen verhalten sich wie Teilchen und agieren nach den Regeln physikalischer Gesetze. Vertreter sind das Social Force Model (Helbing et al., 2002) oder das Centrifugal Force Model (Yu et al., 2005). Physikalische Modelle haben gemein, dass sich die Partikel durch die Superposition aller Attraktoren und Repellen determinieren. Oft wird bemängelt, dass abstoßende Kräfte nicht räumlich begrenzt sind und unrealistische Bewegungsmuster, wie Überlappungen von Fußgänger mit Wänden, auftreten können (Chraibi, 2012; Köster et al., 2013). Die Darstellung von Fußgängern als Ellipsen (Chraibi et al., 2011) oder Polynome (Alonso-Marroquin et al., 2013) anstatt der häufig verwendeten Kreismodellierung, die Verbesserung der Attraktenpositionierung unter Berücksichtigung der Standorte benachbarter Partikel (Chraibi et al., 2012) oder die Betrachtung von Gruppenverhalten (Moussaïd et al., 2010), sind Beispiele für Möglichkeiten den Realismus der Simulationsausgaben physikalischer Mo-

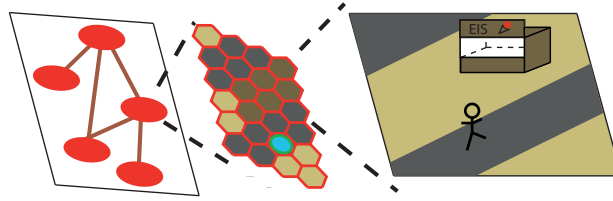


Abbildung 4: Zoom zwischen unterschiedlichen Skalen: Vom Makroskopischen über das Mesoskopische zum Mikroskopischen (v.l.n.r.)

delle zu verbessern. Nachteilig an den physikalischen Personenstrommodellen ist, dass ein simulierter Fußgänger keinerlei eigenes Entscheidungssystem besitzt und deshalb nur stark vereinfacht realitätsnahes Verhalten generiert.

Des Weiteren existieren Modelle, welche einen mathematischen Optimierungsansatz verfolgen. In Hoogendoorn and Bovy (2004), wie auch in Park et al. (2013), wird nach vorgegeben Nutzenfunktionen eine optimale Trajektorie berechnet. Ebenfalls ist der Einsatz von mathematischen Methoden für die Umsetzung des optimalen nächsten Schrittes einer Person modelliert (Seitz and Köster, 2012) worden. Mikroskopische Modelle sind für Evakuierungs- und Normalbedingungsszenarien einsetzbar, denn Personenstrommodelle mit einem kontinuierlichem Bewegungsraum zeigen ihre Stärken, wenn kleine Änderungen der Simulationskonfiguration zu analysieren sind. Sei es die demografische Zusammensetzung der Fußgänger oder ein verändertes Layout des Szenarios, kleinste Charakteristika beeinflussen den Simulationsablauf. Bereiche eines Veranstaltungsgebietes, welche eine hohe Objektdichte vorweisen, können deshalb gut mit mikroskopischen Modellen untersucht werden. Hierzu zählen beispielsweise der Eingangsbereich mit Personenkontrollen (Schleusen), die Rettungswege und Notausgänge im Evakuierungsfall sowie hoch frequentierte Orte (Getränkestand, Bühnenvorplatz, Toiletten). Verallgemeinert sind hier alle hoch frequentierten Bereiche, mit einer erwarteten hohen Fußgängerdichte, einzuordnen. Die Forschung im Bereich der mikroskopischen Fußgängersimulationen befasst sich häufig mit speziellen räumlichen Layouts wie Flaschenhals- (Chraibi et al., 2011; Helbing et al., 2002) und Gegenstromszenarien (Dai et al., 2013). Die mikroskopischen Simulationen werden zudem auf größere Bereiche eines Szenarios (Dai et al., 2013; Moldovan et al., 2007) oder inner-häuslicher Veranstaltungen mit extrem hohen Personenzahlen und -dichten (Alonso-Marroquin et al., 2013) angewendet. Durch mikroskopische Modelle lassen sich Personenstromphänomene in kritischen Eventgebieten mit hoher Genauigkeit simulieren. In solchen Kontexten wird der maximale Modellnutzen erreicht.

## 5 Diskussion

Im Zusammenhang mit der Planung von urbanen Events hat jede Betrachtungsskala ihren geeigneten Einsatzbereich. Im Kontext der verschiedenen zeitlichen Planungsphasen des Veranstalters kann jede Skala einer bestimmten Planungsphase zugeordnet werden. Makroskopische Modelle spielen insbesondere bei dem rahmenbildenden, langfristigen Betrachtungshorizont eine Rolle. Mittelfristige Planungsprozesse werden am Besten durch mesoskopische Modelle abgedeckt. Mikroskopische Modelle sind für kurzfristige Planungsprozesse prädestiniert. Analog erfolgt die Einordnung nach der Genauigkeit der Resultate im Vergleich zum realen Geschehen. Makroskopische Modelle können in kurzer Zeit große Menschenmengen mittels aggregierter Parameter simulieren, erreichen hierbei jedoch ver-

hältnismäßig ungenaue Ergebnisse. Daher eignen sich diese Modelle zur quantitativen Bestimmung des An- und Abreiseverkehrs auf einer Veranstaltung. Rechenaufwendigere Mesoskopische Modelle können auf Grund ihres höheren Detaillierungsgrades für Berechnungen auf dem Festivalgelände verwendet werden. Die Simulation hoch sensitiver Bereiche sollte über Modelle der mikroskopischen Skala erfolgen. Diese können durch ihre kontinuierliche Simulation den Raum beliebig genau auflösen. Verschiedene Teilbereiche eines Events sollten von Personenstrommodellen der entsprechenden Skala berechnet werden. Für eine umfassende Simulation eines Veranstaltungsszenarios ist eine gesamtheitliche Integration aller Teilgebiete nötig. Dies erfolgt über eine gemeinsame Kopplung der verwendeten Modelle. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich, falls Personen den Wirkungsbereich eines Personenstrommodells verlassen und in einen anderen Teilbereich des Szenarios übertreten. Hierbei müssen räumliche und kognitive Informationen zwischen den Modellen ausgetauscht und angepasst werden. Eine besondere Problematik ergibt sich bei Übergängen von groben in hoch aufgelöste Teilgebiete. Beispielsweise müssen beim Übergang von makroskopischen Modellen in fein skaligere Gebiete aus den aggregierten Parametern konkrete Individuen erzeugt und korrekt platziert werden. Zudem muss trotz der Übergänge zwischen den Skalen die Kohärenz des Gesamtsystems erhalten bleiben. Beispielsweise dürfen durch den Übergang keine zusätzlichen Fußgänger entstehen oder unrealistische Geschwindigkeiten erreicht werden. Um eine dynamische Zuordnung der Skalen auf die entsprechenden Teilbereiche der Veranstaltung zu ermöglichen ist ein Zoom-Ansatz zu entwickeln (siehe Abbildung 4). Bei diesem kann der Nutzer zur Laufzeit der Simulation Bereiche des Szenarios kennzeichnen. Diese Areale werden anschließend mit den gewünschten Personenstrommodellen simuliert. Beispielsweise ist zu Beginn eines Festivals der Eingangsbereich ein hoch sensitiver Bereich. Hat jedoch ein Großteil der Besucher den Eingangsbereich passiert, so verlagert sich die Sensitivität auf attraktive Orte innerhalb des Eventgeländes. Durch den dynamischen Zoom Ansatz kann der Nutzer auf diese Prioritäten-Änderungen reagieren und die Simulation den neuen Gegebenheiten entsprechend anpassen.

## Literatur

- Alonso-Marroquin, F., Lozano, C., Ramirez-Gomez, A. and Busch, J. (2013), ‘Simulation of counter flow pedestrian dynamics in hallways using spheropolygons’, *arXiv preprint arXiv:1310.8482*.
- Bandini, S., Rubagotti, F., Vizzari, G. and Shimura, K. (2011), A cellular automata based model for pedestrian and group dynamics: motivations and first experiments, *in* ‘Parallel Computing Technologies’, Springer, pp. 125–139.
- Betz, G., Hitzler, R. and Pfdenhauer, M. (2011), Zur einleitung: Eventisierung des urbanen, *in* ‘Urbane Events’, Springer, pp. 9–24.
- Birch, C. P., Oom, S. P. and Beecham, J. A. (2007), ‘Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology’, *Ecological Modelling* **206**(3), 347–359.
- Blue, V. J. and Adler, J. L. (2001), ‘Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways’, *Transportation Research Part B: Methodological* **35**(3), 293–312.
- Chraibi, M. (2012), *Validated force-based modeling of pedestrian dynamics*, Vol. 13, Forschungszentrum Jülich.
- Chraibi, M., Freialdenhoven, M., Schadschneider, A. and Seyfried, A. (2012), Modeling the desired direction in a force-based model for pedestrian dynamics, Technical report, arXiv preprint arXiv:1207.1189.
- Chraibi, M., Kemloh, U., Schadschneider, A. and Seyfried, A. (2011), ‘Force-based models of pedestrian dynamics’, *Networks and Heterogeneous Media* **6**(3), 425–442.
- Dai, J., Li, X. and Liu, L. (2013), ‘Simulation of pedestrian counter flow through bottlenecks by using an agent-based model’, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **392**(9), 2202–2211.
- Dijkstra, E. W. (1959), ‘A Note on Two Problems in Connexion with Graphs’, *Numerische Mathematik* **1**, 269–271.

- Forrester, J. W. (1992), ‘Policies, decisions and information sources for modeling’, *European Journal of Operational Research* **59**, 42–63.
- Gloor, C., Stucki, P. and Nagel, K. (2004), Hybrid techniques for pedestrian simulations, in ‘Cellular Automata’, Springer, pp. 581–590.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B. (1968), ‘A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths’, *Systems Science and Cybernetics* **4**(2), 100–107.
- Hartmann, D. (2010), ‘Adaptive pedestrian dynamics based on geodesics’, *New Journal of Physics* **12**(4), 043032.
- Hartmann, D. and Sivers, I. v. (2013), ‘Structured first order conservation models for pedestrian dynamics’, *Networks and Heterogeneous Media* **8**(4), 985–1007.
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnár, P. and Vicsek, T. (2002), Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations, in ‘Proceedings of the 1th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics’, pp. 21–58.
- Helbing, D. and Mukerji, P. (2011), ‘Crowd Disasters as Systemic Failures : Analysis of the Love Parade Disaster Crowd Disasters as Systemic Failures : Analysis of the Love Parade’.
- Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P. H. (2004), ‘Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models’, *Transportation Research Part B: Methodological* **38**(2), 169–190.
- Ji, X., Zhou, X. and Ran, B. (2013), ‘A cell-based study on pedestrian acceleration and overtaking in a transfer station corridor’, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **392**(8), 1828–1839.
- Klüpfel, H. (2007), The simulation of crowd dynamics at very large events—calibration, empirical data, and validation, in ‘Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005’, Springer, pp. 285–296.
- Kneidl, A. (2013), ‘Methoden zur Abbildung menschlichen Navigationsverhaltens bei der Modellierung von Fußgängerströmen’.
- Kneidl, A., Hartmann, D. and Borrmann, A. (2013), ‘A hybrid multi-scale approach for simulation of pedestrian dynamics’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **37**, 223–237.
- Köster, G., Hartmann, D. and Klein, W. (2011), Microscopic pedestrian simulations: From passenger exchange times to regional evacuation, in ‘Operations Research Proceedings 2010’, Springer, pp. 571–576.
- Köster, G., Treml, F. and Gödel, M. (2013), ‘Avoiding numerical pitfalls in social force models’, *Physical Review E* **87**(6), 063305.
- Moldovan, H., Gilman, M., Knoblauch, P. and Woloj, S. (2007), Football stadium simulation—a microscopic simulation of the pedestrian access, in ‘Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005’, Springer, pp. 315–320.
- Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., Theraulaz, G. and Chirico, G. (2010), ‘The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics’, *PLoS ONE* **5**(4).
- Moxnes, E. (2009), ‘Diffusion of System Dynamics’.
- Nickl, W. (2013), ‘Presseinformation - Das Oktoberfest in Zahlen’.
- Park, J. H., Rojas, F. A. and Yang, H. S. (2013), ‘A collision avoidance behavior model for crowd simulation based on psychological findings’, *Computer Animation and Virtual Worlds* **24**(3-4), 173–183.
- Renn, O. and Schweizer, P. (2009), ‘Inclusive risk governance: concepts and application to environmental policy making’, *EPG* **19**(3), 174–185.
- Schadschneider, A. (2001), ‘Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory’, *arXiv preprint cond-mat/0112117*.
- Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C. and Seyfried, A. (2009), Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications, in ‘Encyclopedia of complexity and systems science’, Springer, pp. 3142–3176.
- Seitz, M. J. and Köster, G. (2012), ‘Natural discretization of pedestrian movement in continuous space’, *Physical Review E* **86**(4), 046108.
- Senge, P. M. (1990), *The fifth discipline : the art and practice of the learning organization*, 1st edn, Doubleday/Currency, New York.
- Tinhofer, G. (1981), Über ein Problem der diskreten Optimierung aus dem Bereich der Straßenplanung, in G. Fandel, D. Fischer, H.-C. Pföhl, K.-P. Schuster and J. Schwarze, eds, ‘DGOR SE - 53’, Vol. 1980 of *Operations Research Proceedings 1980*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 282–285.
- Vennix, J. A. M. (1996), *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using System Dynamics*, John Wiley & Sons, Nijmegen, The Netherlands.
- Yu, W., Chen, R., Dong, L. Y. and Dai, S. Q. (2005), ‘Centrifugal force model for pedestrian dynamics’, *Physics Review E* **72**(2), 26112–1 – 26122–7.