

FUSSGÄNGERSIMULATION AUF DER BASIS SECHSECKIGER ZELLULARER AUTOMATEN

Christoph Kinkeldey, Martin Rose
Institut für Bauinformatik
Universität Hannover

Kurzfassung: Zur Simulation von Fußgängerverkehr werden immer häufiger zellulare Automaten verwendet. Sie bieten eine schnelle Berechnung der Bewegung großer Menschenmengen. In der Regel werden hierzu viereckige Zellen eingesetzt. Bei solchen Zellen ist die Bewegung auf vier Richtungen beschränkt oder es müssen untypische Sonderregeln formuliert werden. In diesem Beitrag wird die Simulation von Fußgängern auf Basis zellulärer Automaten mit sechseckigen Zellen aufgezeigt. Anhand von Vergleichen mit viereckigen zellulären Automaten lassen sich Aussagen über die Abhängigkeit der beschriebenen Fußgängersimulation von der Gittergeometrie treffen.

1 Einleitung

Der Fußgängerverkehr spielt eine wesentliche Rolle bei der Planung stark frequentierter Wege, Plätze und Gebäude. Für den regulären Betrieb dieser Anlagen ist eine störungsfreie Nutzung zu gewährleisten und für Katastrophenfälle sind Fluchtwege vorzusehen. Vor allem die effektive Evakuierung von Stadien, Veranstaltungshallen, Flughäfen, Einkaufszentren und Ähnlichem stellt hohe Anforderungen an den planenden Ingenieur. Die Tatsache, dass selbst in der heutigen Zeit zahlreiche Unglücke bei Großveranstaltungen zu verzeichnen sind, zeigt den weiterhin bestehenden Forschungsbedarf.

Die Planung von Anlagen für Fußgänger erfordert eine ausreichend genaue Abbildung ihrer Bewegungen. Diese Abbildung entspricht einer Simulation, für die verschiedene Modellansätze existieren. Ein Ansatz ergibt sich durch die Verwendung von zellulären Automaten. Er ist weniger komplex als mikroskopische Ansätze, die die Bewegung jedes einzelnen Fußgängers sehr genau abbilden. Er berücksichtigt jedoch mehr individuelle Eigenschaften als makroskopische Ansätze, die den Fußgängerverkehr wie eine Strömung abbilden. In diesem Beitrag wird eine Simulation von Fußgängerverkehr auf Basis sechseckiger zellulärer Automaten vorgestellt.

2 Grundlagen

Die Grundlagen zur Simulation von Fußgängerverkehr ergeben sich aus einer Beschreibung und ausreichenden Abbildung der Eigenschaften und Verhaltensweisen des Verkehrs. Für die Abbildung stehen unterschiedliche Modellansätze zur Verfügung.

2.1 Fußgängerverkehr

Fußgängerverkehr ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Bewegung mehrerer Fußgänger in einem Gebiet. Jeder Fußgänger hat sein eigenes Ziel, das er mit einer Wunschgeschwindigkeit erreichen will. Die Wunschgeschwindigkeit wird üblicherweise durch eine Normalverteilung um einen Mittelwert abgebildet. Die mittlere Wunschgeschwindigkeit v^0 eines Fußgängers liegt nach [1] ungefähr bei $v^0=1.39$ m/s.

Auf dem Weg zu seinem Ziel wird der Fußgänger durch Hindernisse und andere Fußgänger behindert, wodurch sich seine Geschwindigkeit und seine Laufrichtung ändern. Die Reaktion des Fußgängers auf solche Behinderungen ist von seiner Geschwindigkeit und seinem Abstand zum Hindernis oder zu anderen Fußgängern und deren Geschwindigkeit abhängig. In der Abbildung dieser Abhängigkeiten unterscheiden sich die verschiedenen Modellansätze der Fußgängersimulationen.

Bei der Betrachtung aller Fußgänger in einem Gebiet lassen sich charakteristische Verkehrsphänomene erkennen. So bilden sich beispielsweise auf Plätzen Gruppen von Fußgängern. Diese Gruppenbildung wurde insbesondere von Coleman [2] untersucht. Sehr auffällig ist auch die Bildung von Bahnen auf breiten Gehwegen [3]. Ohne eine Vorschrift für das Gehverhalten organisieren sich die Fußgänger von selbst zu entgegengesetzt gerichteten Bahnen. Oszillationen an Durchgängen bilden ein weiteres, häufig zu beobachtendes Verkehrsphänomen [3]. Die Oszillationen entsprechen einem abwechselnden Passieren der Fußgänger auf den beiden Seiten eines Durchgangs, wie etwa einem Geschäftseingang oder einer Straßenbahntür.

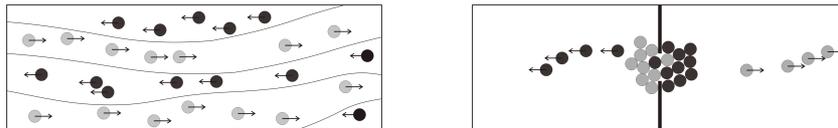


Abb. 1: Bahnenbildung und Oszillation an Durchgängen

2.2 Modellansätze für Fußgängerverkehr

Videoaufnahmen von Bewegungen großer Menschenmengen im Zeitraffer zeigen häufig ein Fußgängerverhalten, das sich mit Fluidströmungen vergleichen lässt. Daher erscheint eine makroskopische Modellierung von Fußgängerverkehr analog zur Abbildung von Flüssigkeits- oder Gasströmungen zweckmäßig. Bereits Anfang der siebziger Jahre hat Henderson [4] ein makroskopisches Fußgängermodell entwickelt, das die Fußgän-

gerbewegungen wie ein kompressibles Fluid abbildet. Helbing [5] hat diesen Ansatz weitergeführt. Makroskopische Fußgängersimulationen ermöglichen Untersuchungen der Fußgängergeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Fußgängerdichte in einem Gebiet. Ein grundsätzlicher Nachteil der makroskopischen Modelle besteht darin, dass sie einen Impuls- und Energieerhalt voraussetzen, der für Fußgängerverkehr jedoch nicht existiert.

Mikroskopische Fußgängermodelle bilden den Fußgängerverkehr als eine Menge von einzelnen Fußgängern ab. Das Verhalten eines Fußgängers ergibt sich aus dem eigenen Antrieb und der Reaktion auf seine Umwelt. Dieses Verhalten spiegelt sich in der Bewegung des Fußgängers wieder. Die Bewegung lässt sich durch die folgenden zwei Bestimmungsgleichungen abbilden:

$$\frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} = \mathbf{v}_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = \mathbf{a}_i(t) \quad (2)$$

Gleichung (1) beschreibt die zeitliche Änderung der Position eines Fußgängers i auf Grund seiner Geschwindigkeit. Gleichung (2) beschreibt die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit von i in Form seiner Beschleunigung. Die Beschleunigung ist die einzige Größe, mit der die Bewegung geändert werden kann. Helbing und Molnár [3] haben in einem sogenannten Soziale-Kräfte-Modell die Beschleunigung \mathbf{a}_i eines Fußgängers i als eine „subjektive“ Kraft \mathbf{f}_i formuliert. Diese Kraft setzt sich unter anderem aus Anteilen \mathbf{f}_i^0 für den eigenen Antrieb, \mathbf{f}_i^H für die Reaktion auf Hindernisse und \mathbf{f}_i^j für die Reaktion auf andere Fußgänger j zusammen:

$$\mathbf{a}_i(t) = \mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) + \sum_B \mathbf{f}_i^H(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) + \sum_j \mathbf{f}_i^j(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j) + \dots \quad (3)$$

Die Kräfte beschreiben den Einfluss des individuellen eigenen Antriebs, der subjektiven Reaktion auf ein Hindernis oder auf die Bewegung eines anderen Fußgängers j auf den Fußgänger i . Die Kraft \mathbf{f}_i wird als Gradient eines kontinuierlichen Potentials U_i abgebildet, das sich aus den Potentialen für die einzelnen Teilkräfte zusammensetzt:

$$\mathbf{f}_i(t) = -\nabla_{\mathbf{x}_i} \cdot U_i \quad (4)$$

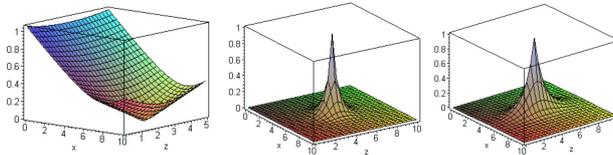


Abb. 2: Potential für ein punktförmiges Ziel, ein Hindernis und einen Fußgänger

3 Fußgängermodell auf Basis zellulärer Automaten

Zellulare Automaten zur Simulation von Fußgängerverkehr wurden erstmals 1985 von Gipps und Marksjö [6] vorgeschlagen. Schreckenberg wendete den von ihm und Nagel für Autobahnverkehr entwickelten zellularen Automaten [7] auf den Fußgängerverkehr an [8]. Der in diesem Beitrag vorgestellte Modellansatz entspricht einer Umsetzung des Soziale-Kräfte-Modells mit einem zellularen Automaten auf der Basis von Sechseck-Zellen.

3.1 Zellulare Automaten

Zellulare Automaten sind mathematische Modelle, die in den späten vierziger Jahren durch von Neumann und Ulam entdeckt und beschrieben wurden. Die Modelle bilden das Verhalten eines komplexen Systems über einen längeren Zeitraum ab. Die Abbildung des Verhaltens entspricht der Bestimmung von Zuständen des Systems zu diskreten Zeitpunkten des betrachteten Zeitraums. Dabei wird das komplexe System durch einfache Einzelsysteme und der Übergang zwischen den Zuständen der Einzelsysteme durch Regeln beschrieben. Ein zellulärer Automat besteht aus folgenden Komponenten:

- Reguläres Gitter L
- Nachbarschaftsrelationen $N \subseteq L^n$
- Endliche Zustandsmenge S
- Regeln $f : S^n \rightarrow S$

Das reguläre Gitter ergibt sich aus einer Diskretisierung des betrachteten Gebiets in gleiche Teilgebiete. Die Teilgebiete sind die Zellen des Automaten. In einer ebenen Fläche gibt es drei Möglichkeiten für eine derartige Diskretisierung durch konvexe Zellen: reguläre Dreiecke, Vierecke und Sechsecke. Dreiecke sind für zellulare Automaten wenig geeignet.

Die Nachbarschaftsrelationen werden durch die Zellform beeinflusst. Sechseckige Zellen haben sechs Nachbarzellen im gleichen Abstand zum Mittelpunkt der Zelle. Viereckige Zellen haben vier Nachbarzellen, mit denen sie jeweils eine gemeinsame Kante besitzen. Die Nachbarschaft zu diesen vier Nachbarzellen wird als von Neumannsche Nachbarschaftsrelation bezeichnet. Werden zusätzlich die vier Zellen mit einem gemeinsamen Eckpunkt zur Zelle berücksichtigt, so spricht man von einer Mooreschen Nachbarschaftsrelation (Abb. 3).

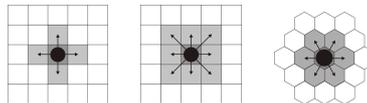


Abb. 3: Nachbarschaftsrelationen in einem Viereck-Gitter und einem Sechseck-Gitter

Jede Zelle eines zellularen Automaten besitzt zu einem Zeitpunkt einen Zustand. Die endliche Zustandsmenge beschreibt die möglichen Zustände der Zellen. Jede Zelle des zellularen Automaten kann nur Zustände dieser Zustandsmenge annehmen. Die Anzahl der Zellzustände wird auf möglichst wenige beschränkt.

Der Zustand jeder Zelle kann von einem Zeitpunkt zum folgenden in einen anderen Zustand der Zustandsmenge übergehen. Der Übergang wird durch Regeln in Abhängigkeit von den Zuständen der Nachbarzellen festgelegt. Die Regeln können beliebig formuliert werden, sollten jedoch möglichst einfach umzusetzen sein.

3.2 Modellierung des Fußgängerverkehrs

Für den Fußgängerverkehr wird das betrachtete Gebiet so in Zellen aufgeteilt, dass sich zu einem Zeitpunkt auf einer Zelle entweder genau ein oder aber kein Fußgänger befindet. Üblicherweise sind die Zellen quadratisch. Ihre Geometrie lässt sich mit minimalem Aufwand im Computer beschreiben. Der Nachteil der viereckigen Zellen ist die Nachbarschaftsrelation. Mit der Nachbarschaftsrelation nach von Neumann sind diagonale Bewegungen auf dem regelmäßigen Gitter nur unbefriedigend abbildbar. Nachbarschaftsrelationen nach Moore erfordern aufgrund der unterschiedlichen Abstände zu den Zellenmittelpunkten unterschiedliche Regeln für horizontale beziehungsweise vertikale und diagonale Bewegungen der Fußgänger. Die in diesem Beitrag vorgestellte Modellierung verwendet sechseckige Zellen, sodass die Regeln für die sechs verschiedenen Richtungen aller Zellen gleich sind. Damit lassen sich auf dem regelmäßigen Gitter Bewegungen in jede Richtung gut annähern. Darüber hinaus wirkt die in Abb. 4 dargestellte Verteilung der Individuen im Gebiet bei der Verwendung von Sechseckzellen natürlicher.

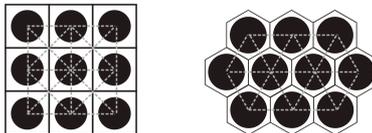


Abb. 4: Anordnung der Fußgänger bei voll besetztem Gitter

3.3 Diskrete Potentiale

Zur Modellierung der Bewegung eines Fußgängers ist nach Abschnitt 2.1 die Abbildung seines Ziels, seiner Geschwindigkeit und seiner Abstände zu Hindernissen oder anderen Fußgängern notwendig. Hierzu wurde in [9] versucht, die Entfernung und Richtung in einem zellularen Automaten durch Zellen abzubilden.

In diesem Ansatz wird der Einfluss auf einen Fußgänger durch diskrete Potentiale, bezogen auf die Zellen, modelliert. Die diskreten Potentiale für den eigenen Antrieb, für die Reaktion auf Hindernisse und die Reaktion auf andere Fußgänger entsprechen den kontinuierlichen Potentialen des Soziale-Kräfte-Modells. Im Unterschied zur dortigen

Verwendung wird im vorliegenden Modell das kontinuierliche Potential jedoch diskretisiert, indem es an den Zellenmittelpunkten ausgewertet und für jede Zelle als konstant angenommen wird. Die Entfernung und die Richtung eines Einflusses auf einen Fußgänger sind damit durch die Potentialwerte in den Nachbarschaftszellen beschrieben.

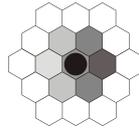


Abb. 5: Diskretes Potential für einen Fußgänger auf einer Zelle

3.4 Zustände

Im beschriebenen Modell werden zwei Zustandsmengen abgebildet. Die erste Menge von Zuständen gilt für alle Fußgänger gleichermaßen. Danach kann eine Zelle die folgenden Zustände besitzen:

- Zelle ist unbesetzt
- Zelle ist ein Hindernis
- Zelle ist durch einen Fußgänger besetzt

Die zweite Zustandsmenge beschreibt zusätzliche Zustände für alle durch Personen besetzten Zellen, wobei für jede der sechs Nachbarzellen ein Potentialwert bestimmt wird. Diese Potential-Zustände sind in der Regel für jeden Fußgänger zu einem Zeitpunkt unterschiedlich.

3.5 Regeln

Die Aktualisierung der Zellzustände geschieht in konstanten Zeitschritten nach definierten Regeln. Ist eine Zelle durch einen Fußgänger besetzt, werden die Potentiale aller Nachbarzellen betrachtet. Die Nachbarzelle mit dem geringsten Potentialbetrag wird als Wunschzelle deklariert. Liegt in mehreren Zellen dasselbe Potential vor, wird die Wunschzelle in einer Zufallsentscheidung ausgewählt. Nach der Betrachtung aller Zellen liegt eine Liste mit den Wunschzellen aller simulierten Individuen vor.

Nun ist zumeist eine Behandlung auftretender Konflikte nötig. Wenn zwei Fußgänger dieselbe gewünschte Zelle beanspruchen, entscheidet der Zufall, wem diese zugesprochen wird. Nach der Konfliktbehandlung kann die Aktualisierung der Zellzustände erfolgen, die im Modell die Bewegung der Individuen bedeutet.

3.6 Mehrere Geschwindigkeiten

Fußgängermodelle auf Grundlage zellularer Automaten können nach der berücksichtigten Anzahl verschiedener Gehgeschwindigkeiten der simulierten Individuen unterschieden werden. Als Single-Speed-Modell wird ein Modell bezeichnet, in dem ein Fußgänger

ger pro Zeitschritt entweder eine benachbarte Zelle betreten oder stehenbleiben kann. Daraus ergeben sich die möglichen Geschwindigkeiten von 0 oder 1 pro Zeitschritt. Sogenannte Multi-Speed-Modelle hingegen unterstützen mehrere Geschwindigkeiten.

Um verschiedene Gehgeschwindigkeiten ungleich 0 zu erreichen, müssen die simulierten Fußgänger unterschiedlich lange Wege pro Zeitschritt zurücklegen können. Dies ist im hier betrachteten Modell durch eine Aufteilung der Zeitschritte in Unterzeitschritte ermöglicht worden. Während die schnellsten Fußgänger bei jeder Aktualisierung eine Zelle vorrücken dürfen, müssen langsamere während einem oder mehreren Unterzeitschritten stehenbleiben. Um dies zu ermöglichen, erhalten alle besetzten Zellen einen Zähler, der die maximal möglichen Schritte eines Fußgängers in Abhängigkeit von seiner aktuellen Geschwindigkeit begrenzt.

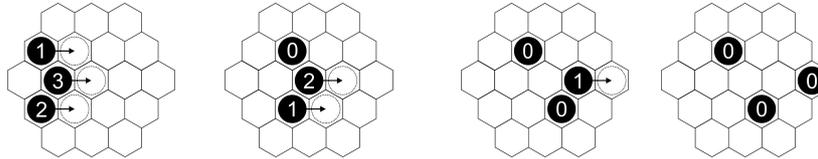


Abb. 6: Mehrere Geschwindigkeiten

Bei einem Multi-Speed-Ansatz muß eine Regel für das Beschleunigungsverhalten der Individuen gefunden werden. Jeder Fußgänger versucht, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Ist er keinen äußeren Störungen ausgesetzt, wird er beschleunigen, bis diese erreicht ist. Folglich wird seine aktuelle Gehgeschwindigkeit diesen Wert nicht überschreiten. Liegen Störungen durch andere Fußgänger oder Hindernisse vor, verringert die Person ihre Geschwindigkeit.

4 Modellverhalten

Die Umsetzung des Modells am Rechner erlaubt die systematische Untersuchung der Eigenschaften des vorgestellten Fußgängermodells. Qualitative Beobachtungen sind in [10] dokumentiert. Darüber hinaus sind quantitative Untersuchungen angestellt worden.

4.1 Generelle Eigenschaften des Modells

Zu den Eigenschaften des vorgestellten Modells auf Basis zellulärer Automaten ist zu sagen, dass es durch die Beschränkung auf wenige, einfache Zustände und Regeln die Simulation von Fußgängerverkehr mit geringem Rechenaufwand ermöglicht. Das Modell ist in der Lage, grundsätzliche Zusammenhänge des Fußgängerverkehrs wiederzugeben. Dazu zählt sowohl der Zusammenhang zwischen Fußgängerdichte und der Gehgeschwindigkeit, als auch die Tendenz zur Staubildung bei hohen Dichten. Allerdings ist das Modell im Vergleich zu anderen Ansätzen als relativ stauanfällig zu bezeichnen.

Auch charakteristische Phänomene des Fußgängerverkehrs lassen sich grundsätzlich abbilden. So ist es in Simulationen beispielsweise gelungen, die Bahnenbildung bei gegenläufigem Verkehr und die Oszillation an Durchgängen nachzubilden.

4.2 Vergleich zwischen Viereck- und Sechseckgitter

Im Zusammenhang mit Viereck-Gittern ist eine Nachbarschaftsrelation nach von Neumann verwendet worden, da die Definition nach Moore neben der unterschiedlichen Geschwindigkeiten bei Schritten in verschiedene Richtungen weitere Unzulänglichkeiten aufweist. Dazu gehört eine Reihe von Sonderfällen, in denen unzulässige Schritte über eine Ecke erlaubt sind.

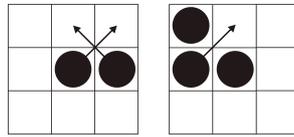


Abb. 7: Sonderfälle bei Viereck-Gittern mit Moorescher Nachbarschaftsrelation

Bei Simulationen auf Grundlage von Viereck-Gittern ist aufgefallen, daß im Vergleich zur Verwendung sechseckiger Zellen ein höherer Widerstand gegen Ausweichvorgänge zu beobachten ist. Daraus resultiert ein stärkeres Abbremsen der Individuen bei Gegenverkehr.

Die Abbildung von sich kreuzenden Fußgängerströmen oder rechteckiger Hindernisse gelingt im Gitter mit viereckigen Zellen weitaus befriedigender. Dieser Aspekt ist als Nachteil der Sechseck-Gitter zu sehen, die auf dem 60°-Winkel basieren.

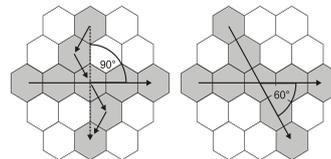


Abb. 8: Richtungen im Sechseck-Gitter

Um einen Vergleich zwischen den Gitterarten vorzunehmen, ist mit dem vorgestellten Fußgängermodell unter Verwendung von Viereck- und Sechseckzellen eine Vergleichssimulation in einem Korridor mit unterschiedlichen Dichten und Gegenverkehrsanteilen durchgeführt worden.

Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem bei hohen Fußgängerdichten bei Verwendung von Sechseckzellen höhere mittlere Durchschnittsgeschwindigkeiten zu beobachten waren. Dieser Effekt trat bereits bei Simulationen ohne Gegenverkehr auf, bei der Erhöhung des Gegenverkehrs verstärkte er sich deutlich (Abb. 9).

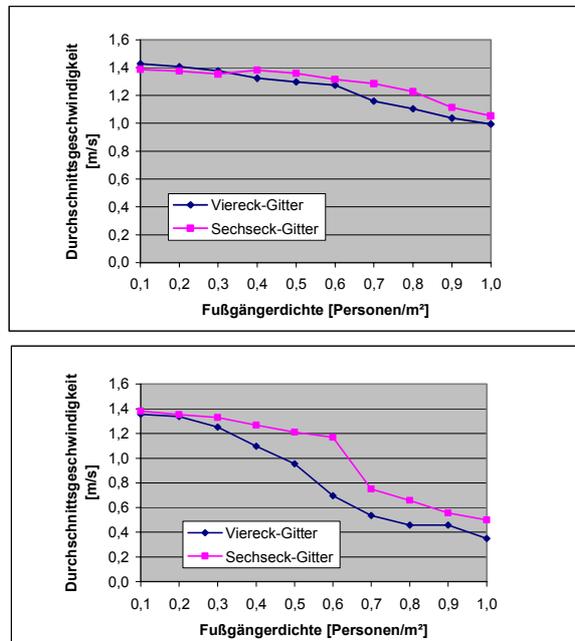


Abb. 9: Vergleich der erreichten Durchschnittsgeschwindigkeiten für einen Gegenverkehrsanteil von 0% (oben) und 20% (unten)

5 Ausblick

Der Großteil bestehender Fußgängermodelle auf Basis zellularer Automaten beruht auf Viereck-Gittern. In [10] ist gezeigt worden, welche Nachteile solche Gitter in diesem Zusammenhang aufweisen können und dass die Verwendung von Sechseck-Zellen eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt. Dazu gehören die Gleichheit der Schrittweiten in alle Richtungen und eine natürlichere Anordnung der Personen im Gebiet.

Das beschriebene Modell beruht auf der Besetzung einer Zelle durch genau einen Fußgänger. Dieses Prinzip bewirkt eine relativ grobe Diskretisierung des betrachteten Gebiets, da jede Zelle den minimalen Raumbedarf eines Individuums repräsentiert. In weitergehenden Untersuchungen könnte die Frage gestellt werden, ob andere Konzepte sinnvoll sein können. Ein alternativer Ansatz könnte darin bestehen, mehrere Zellen durch einen Fußgänger zu besetzen, um kleinere Zellenabmessungen zu erreichen. Auf diese Weise könnte unter anderem versucht werden, die Stauanfälligkeit des Modells zu mindern.

Literatur

- [1] D. Alrutz, B. Friedrich: Bemessungsgrundlagen für Fußgängerverkehrsanlagen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn (im Druck).
- [2] J.S. Coleman, J. Hopkins, J. James: The equilibrium size distribution of freely-forming groups. *Sociometry*, 24 (1): 36-45, 1961.
- [3] D. Helbing, P. Molnár: Self-organization phenomena in pedestrian crowds. In: F. Schweitzer, ed. *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, 2, Gordon and Breach, London, 1996.
- [4] L. Henderson: On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 8: 509-515, 1974.
- [5] D. Helbing: A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6 (6): 391-415, 1992.
- [6] P. Gipps und B. Marksjö: A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27: 95-105, 1985.
- [7] K. Nagel, M. Schreckenberg: A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I France*, 2: 2221-2229, 1992.
- [8] A. Schadschneider, C. Burstedde, A. Kirchner, K. Klauck, J. Zittartz: Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics. In: M. Schreckenberg, S.D. Sharma, ed. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, Berlin, 75-97, 2002.
- [9] M. Hain, M. Rose: Verkehrssimulation auf der Basis zellularer Automaten. In: J. Hanff, E. Kasparek, M. Rues, G. Schutte, ed. *Forum Bauinformatik 2000, Junge Wissenschaftler forschen*, VDI Verlag, 125-133, 2000.
- [10] C. Kinkeldey: Fußgängersimulation auf der Basis zellularer Automaten. Studienarbeit am Institut für Bauinformatik, Hannover, 2003.