

# Simulation der Bewegung von Fußgängern, Menschenmengen und Evakuierungsprozessen

Andreas Keßel, Hubert Klüpfel und Michael Schreckenberg  
kessel,kluepfel,schreckenberg@traffic.uni-duisburg.de

Physik von Transport und Verkehr

Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Lotharstraße 1, 47048 Duisburg

## Kurzfassung

In diesem Artikel werden zwei Simulationen für Fußgängerverkehr vorgestellt. Beide beruhen auf einem Zellularautomaten-Modell. Das erste Modell beschreibt die grundsätzliche Bewegung von Fußgängern zwei entgegengesetzter Laufrichtung in einem langen Gang. Das zweite Modell stellt eine Evakuierungssimulation dar, die für verschiedene Problemstellungen angewandt wird.

## 1 Einleitung

Fußgängerbewegung kann analog zu Autoverkehr entweder auf einer makroskopischen oder einer mikroskopischen Ebene modelliert werden (für einen Überblick siehe [6] und Referenzen darin). Makroskopische Modelle beruhen auf den Ähnlichkeiten zwischen Fußgängerflüssen und Flüssigkeiten oder Gasen [5, 7, 8] und basieren auf der Kontinuitätsgleichung, die durch Daten über die Beziehung zwischen Dichte und Fluss ergänzt werden muss. Empirische Daten werden für die Anpassung von Parametern wie der Viskosität oder der Reynolds-Zahl benutzt.

In mikroskopischen Modellen werden die Fußgänger als Individuen betrachtet [4]. Im Gegensatz zu makroskopischen Ansätzen wird die Bewegung einzelner Personen modelliert. Dies erlaubt die Berücksichtigung von individuellem Verhalten. Jede Person wird durch einen Parametersatz beschrieben, der zum Beispiel die Reaktionszeit oder die Laufgeschwindigkeit beinhaltet. Für eine realistische Simulation werden diese Parameter über Verteilungsfunktionen festgelegt. Der Raum ist entweder kontinuierlich (Social-Force-Modell von Helbing [6]) oder diskret. Letztere Modelle gehören zur Klasse der Zellularautomaten-Modelle (CA) [1, 3, 10].

CA-Modelle für den Straßenverkehr sind im Grunde eindimensional. Ein ähnlicher Ansatz für Fußgängerbewegung, der um Überholvorgänge erweitert ist, ist in [1] dargestellt. Fußgängerverkehr ist jedoch im Allgemeinen anders: die Bewegung ist tatsächlich zweidimensional, Beschleunigung findet instantan statt und Änderungen der Laufrichtung sind möglich und benötigen nur kurze Zeit.

Der Aufbau des Artikels ist wie folgt. Im folgenden Abschnitt wird ein einfaches Random-Walk-Modell vorgestellt, sowie einige Ergebnisse diskutiert. Der nächste Abschnitt

stellt die grundlegenden Eigenschaften einer Evakuierungssimulation vor. Der letzte Abschnitt gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick.

## 2 Fußgänger

### 2.1 Modellbeschreibung

Für die Simulation von Fußgängerverkehr wird ein Zellularautomaten-Modell aus [10] verwendet. Die Fußgänger bewegen sich nach dem Random-Walk-Algorithmus in zwei entgegengesetzten Richtungen durch einen Gang der Länge  $L$  Zellen in  $x$ -Richtung und der Breite  $W$  Zellen in  $y$ -Richtung. Die Kantenlänge der quadratischen Zellen beträgt 40 cm. In  $y$ -Richtung hat der Gang feste Ränder. In  $x$ -Richtung sind die Randbedingungen periodisch. Die globale Dichte  $\rho_{\text{global}}$  wird vorgegeben und die Fußgänger zufällig im Gang verteilt.

Der Anteil der Fußgänger, die von rechts nach links laufen, an der globalen Dichte wird mit dem Parameter  $c$  variiert. Es gilt:

$$\rho_{\text{Linksläufer}} = \rho_{\text{global}} \cdot c$$

Die Maximalgeschwindigkeit beträgt  $v_{\text{max}} = 1$  Zellen/Zeitschritt. Ein Rückwärtsschritt ist den Fußgängern nicht erlaubt. Für die Auswahl der neuen Position werden die Zellen seitlich und vorwärts überprüft. Je nach Anzahl der unbesetzten Zellen berechnen sich die Richtungswahrscheinlichkeiten nach Tabelle 1. Besetzte Zellen erhalten eine Wahrscheinlichkeit von  $p = 0$ .

Richtung	Wahrscheinlichkeit
vorwärts	$p_{\text{vorwärts}} = D + \frac{1-D}{\text{Anzahl freie Zellen}}$
aufwärts	$p_{\text{aufwärts}} = \frac{1-D}{\text{Anzahl freie Zellen}}$
abwärts	$p_{\text{abwärts}} = \frac{1-D}{\text{Anzahl freie Zellen}}$

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeiten für die drei verschiedenen Bewegungsrichtungen.

Mit Hilfe der Drift  $D$  kann die Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{vorwärts}}$  erhöht werden.

Als Update wird ein zufällig-sequentieller Update (ZSU) und ein paralleler Update (PU) benutzt. Beim ZSU werden die Fußgänger in einer zufälligen Reihenfolge aktualisiert. Ein Zeitschritt umfasst die einmalige Aktualisierung aller Fußgänger. Die gewählte Zelle wird

sofort besetzt, so dass jeder Fußgänger bei der Aktualisierung eine andere Konfiguration sieht.

Beim PU berücksichtigen die Fußgänger alle die selbe Personenverteilung. Da deshalb Mehrfachbelegungen von Zellen auftreten, muss vor dem Bewegen der Fußgänger dieser Konflikt aufgelöst werden. Dafür wird per Zufallszahl entschieden, wer die Zelle besetzen darf [2]. Die anderen Fußgänger werden wieder auf ihre Ausgangsposition zurück gesetzt.

## 2.2 Ergebnisse

Zunächst wird die Abhängigkeit von  $\langle v \rangle$  von  $c$  untersucht. Dabei zeigt sich, dass  $\langle v \rangle$  mit steigendem  $c$  abnimmt (siehe Abbildung 1 (a)). Ebenfalls nimmt  $\langle v \rangle$  ab, wenn statt des ZSU der PU benutzt wird (vergleiche Abbildungen 1 (a) und (b)).

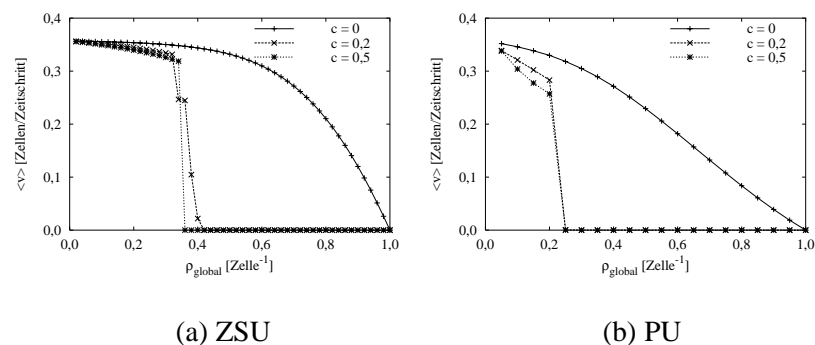


Abbildung 1:  $\langle v \rangle(\rho_{\text{global}})$  für den ZSU und den PU,  $D = 0$ . Zu erkennen ist die Abnahme von  $\langle v \rangle$  mit steigendem  $c$ . Die Gangbreite beträgt  $W = 10$  Zellen.

Durch die entgegengesetzten Laufrichtungen stehen sich bei größerem  $c$  häufiger Fußgänger unterschiedlicher Laufrichtung gegenüber. Dadurch kann die Zelle in Vorwärtsrichtung nicht gewählt werden.

Der PU führt aus zwei Gründen zu niedrigeren  $\langle v \rangle$  als der ZSU. Der erste Grund ist die Gleichzeitigkeit der Bewegung. Bei hintereinander stehenden Fußgängern kann dadurch nur der erste Fußgänger eine Zelle vorwärts laufen. Der hintere Fußgänger sieht bei der Richtungswahl vor sich eine besetzte Zelle. Durch die wechselnde Update-Reihenfolge beim ZSU kann sich der vordere Fußgänger wegbewegen und anschließend hat der hintere Fußgänger die Möglichkeit, eine Zelle vorwärts zu ziehen. Dieser Unterschied zeigt sich sehr deutlich im Falle  $c = 0$ .

Der zweite Grund ist die Art der Konfliktlösung. Sie führt dazu, dass auch Fußgänger auf ihre Ausgangsposition zurück gesetzt werden, die in diesem Zeitschritt einen Vorwärtsschritt gemacht hätten.

Die kritische Dichte  $\rho_{\text{kritisch}}$ , bei der die mittlere Geschwindigkeit auf  $\langle v \rangle = 0$  Zellen/Zeitschritt absinkt, ist beim PU niedriger als beim ZSU. Dies beruht, wie die niedrigere mittlere Geschwindigkeit, auf der Art der Konfliktlösung beim PU. Durch das Zurücksetzen

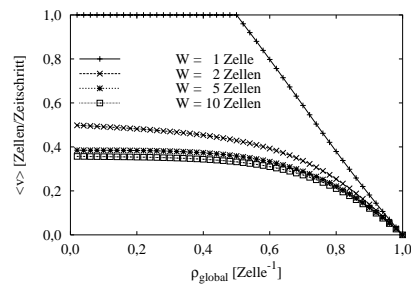


Abbildung 2: Verringerung der mittleren Geschwindigkeit mit steigender Gangbreite beim PU mit  $D = 0$  und  $c = 0$ .

von Fußgängern von mehrfach belegten Zellen wird die Staubildung gefördert.

Werden schmalere Gänge simuliert, steigt mit abnehmender Gangbreite  $W$  die mittlere Geschwindigkeit (siehe Abbildung 2). Der Grund ist die Einschränkung der Fußgänger in den Zellen an den Rändern. Durch die festen Ränder fällt eine Richtung bei Bestimmung der möglichen Zellen heraus. Dadurch erhöhen sich die Wahrscheinlichkeiten für die verbleibenden Richtungen. Dies erhöht die mittlere Geschwindigkeit. Bei  $W = 1$  Zelle steht nur die Vorwärtsrichtung zur Verfügung. Daher ergibt sich bei niedrigen Dichten eine mittlere Geschwindigkeit von  $\langle v \rangle = 1$  Zellen/Zeitschritt.

Eine Erhöhung der Drift  $D$  erhöht die mittlere Geschwindigkeit, da die Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{vorwärts}}$  ansteigt. Bei einer Drift von  $D = 1$  sind die  $\langle v \rangle(\rho_{\text{global}})$ -Graphen für alle Gangbreiten identisch mit dem Verlauf für  $W = 1$  Zelle. Eine Veränderung der Drift hat bei  $W = 1$  Zelle keinen Einfluss, da die Einspurigkeit immer für  $p_{\text{vorwärts}} = 1$  sorgt.

### 3 Evakuierung

Die grundlegenden Eigenschaften des Zellularautomaten, der für die Simulation von Fußgängerevakuierungen benutzt wird, werden im Folgenden erläutert [9]:

1. Der Grundriss wird in quadratische Zellen mit einer Kantenlänge von 40 cm unterteilt (siehe Abbildung 3).
2. Jede Zelle wird maximal von einer Person besetzt.
3. Die Bewegung der Personen wird durch ihre Richtung und Laufgeschwindigkeit beschrieben.
4. Verschiedene psychologische und soziale Komponenten, die nicht direkt im Modell vorkommen, werden durch die zufällige Veränderung der Laufgeschwindigkeit und -richtung berücksichtigt.

Die maximale Laufgeschwindigkeit beträgt 5 Zellen/Zeitschritt, entsprechend 2 m/s, wobei jede Person eine individuelle Höchstgeschwindigkeit  $v_{\text{max}}^i$  hat, die durch ihre physischen Fähigkeiten begrenzt ist.

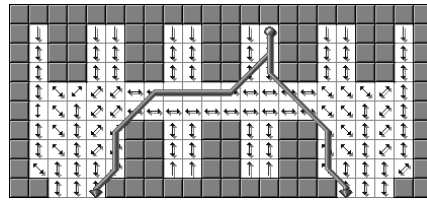


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Raumes. Laufrichtungsinformationen werden über die kleinen Pfeile vermittelt, die Schilder oder Fluchtwegweiser darstellen. Die dicken langen Pfeile stellen mögliche Routen dar.

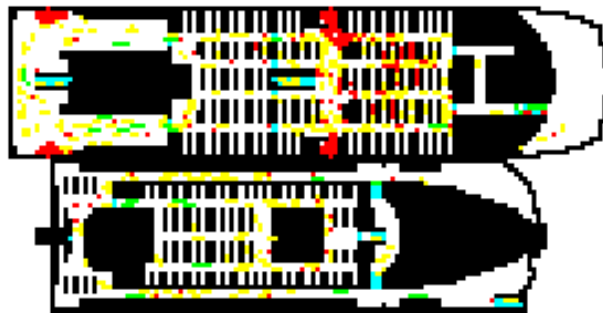


Abbildung 4: Beispiel einer Simulation einer Hochgeschwindigkeits-Fähre: Nicht begehbare Bereiche sind schwarz dargestellt. Stehende Personen sind dunkel grau, Personen mit maximaler Geschwindigkeit sind hell grau dargestellt. Zu Beginn befinden sich alle Personen in der rechten Hälfte. Der Ausgang ist auf der linken Seite des unteren Decks, im Bild oben dargestellt.

Die Updateprozedur entspricht dem oben erklärten ZSU. Für die Routenwahl werden so viele Zellen wie möglich in Vorwärtsrichtung berücksichtigt. Zur Orientierung werden die Schilder in den Zellen beachtet. Die maximale Sichtweite wird durch einen individuellen Parameter  $d_{\text{Sicht}}^i$  begrenzt. Wände und andere Personen reduzieren die Sichtweite. Falls die Ziel-Zelle besetzt ist, wird eine alternative Zelle ausgewählt. Abrupte Richtungswechsel (Schwanken) treten mit einer zufälligen Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{dir}}^i$  auf. Weiterhin gibt es einen Parameter  $p_{\text{vel}}^i$ , der die Unentschlossenheit bei der Orientierung berücksichtigt.

Ergebnisse einer Simulation sind in Abbildung 4 zu sehen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel sind zwei Modelle für den Fußgängerverkehr vorgestellt worden. Das erste Modell eignet sich für die Untersuchung grundsätzlicher Probleme bei der Simulati-

on von Fußgängerverkehr. Durch Untersuchungen an realen Fußgängermengen muss nun geklärt werden, welcher Update Geschwindigkeits–Dichte–Profile erzeugt, die eher realen Daten entsprechen. Auch muss durch Vergleich mit kontrollierten Experimenten geklärt werden, ob die kritischen Dichten, die in der Simulation ermittelt werden, in der Realität auftreten.

Das zweite Modell hat seine große Flexibilität schon bei der Simulation verschiedener Örtlichkeiten unter Beweis gestellt. Im Moment wird das Modell so erweitert, dass die Richtungsinformationen nicht mehr in den Zellen gespeichert werden, sondern jede Anlaufstelle ein Potenzial zugewiesen bekommt. Dadurch wird es möglich, durch zeitlich versetztes Einschalten von Potenzialen die Fußgänger nacheinander verschiedene Ziele anlaufen zu lassen.

## Literatur

- [1] V.J. Blue and J.L. Adler. *Modelling four directional pedestrian movements*. In: *Transportation Research Board, 79th Annual Meeting* (2000).
- [2] C. Burstedde. *Simulation von Fußgängerverhalten mittels zweidimensionaler zellulärer Automaten*. Master's thesis, Universität Köln (2001).
- [3] M. Fukui and Y. Ishibashi. *Self-organized phase transitions in CA-models for pedestrians*. *J. Phys. Soc. Japan* **8**, 2861–2863 (1999).
- [4] P.G. Gipps and B. Marksjö. *A micro-simulation model for pedestrian flows*. *Mathematics and Computers in Simulation* **27**, 95–105 (1985).
- [5] D. Helbing. *A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians*. *Complex Systems* **6**, 391–415 (1992).
- [6] D. Helbing. *Theoretical foundation of macroscopic traffic models*. *Physica A* **219**, 375 (1995).
- [7] L.F. Henderson. *On the fluid mechanics of human crowd motion*. *Transpn. Res.* **8**, 509–515 (1974).
- [8] S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy. *Pedestrian speed density functions using gas-kinetic modelling*. In: Piet H.L. Bovy and R. Thijs (eds.), *Estimators of travel time for road networks*, 107–130, Delft University Press (2000).
- [9] H. Klüpfel, T. Meyer-König, J. Wahle, and M. Schreckenberg. *Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships*. In: *Proc. Fourth Int. Conf. on Cellular Automata for Research and Industry*, 63–71, Karlsruhe (2000).
- [10] M. Muramatsu, T. Irie, and T. Nagatani. *Jamming transition in pedestrian counter flow*. *Physica A* **267**, 487–498 (1999).