

# Seminar

# Verkehrsinformatik

Simulation von  
Panikverhalten in Gebäuden



Hamburg, den 03. Juli 2006

Fachhochschule Wedel  
Master of Computer Science  
Sommersemester 2006

Prof. Dr. Sebastian Iwanowski  
Feldstraße 143  
22880 Wedel

Jörg Meister  
ms8295@fh-wedel.de

2. Semester



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>03</b>
<b>2 Selbstorganisationsphänomene in Fußgängergruppen .....</b>	<b>04</b>
2.1 Individuelle Verhaltenstendenzen in normalen Situationen .....	05
2.1.1 Routenwahl und Orientierung .....	05
2.1.2 Fortbewegungsgeschwindigkeit .....	06
2.1.3 Abstands- und Platzbedarf .....	06
2.2 Kollektive Bewegungsmuster in normalen Situationen .....	07
2.2.1 Segregation .....	07
2.2.2 Oszillation an Engstellen .....	08
2.3 Individuelle Verhaltenstendenzen in Paniksituationen .....	09
2.4 Kollektive Bewegungsmuster in Paniksituationen .....	10
<b>3 Modellierungsansätze .....</b>	<b>11</b>
3.1 Makroskopische Modelle .....	11
3.2 Mikroskopische Modelle .....	12
3.2.1 Kontinuierliche Modelle .....	12
3.2.2 Diskrete Modelle .....	14
3.3 Fundamentaldiagramme .....	15
<b>4 Modellkonzeption auf Basis zellulärer Automaten .....</b>	<b>16</b>
4.1 Gitterstrukturen .....	16
4.1.1 Darstellung von Fußgängern .....	16
4.1.2 Darstellung von Wänden und Hindernissen .....	17
4.1.3 Fazit zu Gitterstrukturen .....	17
4.1.4 Mapping .....	18
4.2 Nachbarschaften .....	19
4.2.1 VON NEUMANN .....	19
4.2.2 MOORE .....	20
4.2.3 Fazit zu Nachbarschaften .....	21
4.3 Zustände .....	21
4.4 Regeln .....	21
<b>5 Konklusion .....</b>	<b>25</b>
Abbildungsverzeichnis .....	26
Literaturverzeichnis .....	27

# 1 Einleitung

Der vorliegende Seminarbeitrag ist im Rahmen der Vorbereitung zu einer Master Thesis entstanden und soll einen einführenden Überblick über das Gebiet der Simulation von Fußgängern in Evakuierungssituationen geben.

Das Verhalten von Menschenmengen folgt bestimmten Gesetzmäßigkeiten, die sich v.a. in Massenpaniken tragisch auswirken können. Mit steigender Zahl an Großveranstaltungen – seien es Rock-Konzerte, Sportevents, Demonstrationen o.ä. – steigt auch die Gefahr von unkontrollierbaren Reaktionen durch die Masse und die Vergangenheit hat gezeigt, wie fatal die Auswirkungen sein können. In der heutigen Zeit und nach den Erlebnissen des 11. September 2001 mag der ein oder andere denken, dass v.a. terroristische Anschläge Grund für solch tragische Ereignisse seien. Und ganz verkehrt ist diese Annahme sicherlich nicht, denn große Menschenmassen sind „generell ein attraktives Ziel von Terroristen (...): Die potentielle Anzahl der Opfer ist groß, die Aufmerksamkeit durch die Weltöffentlichkeit garantiert, die Sicherheitsvorkehrungen oft gering, und die Chance, unerkannt zu bleiben, gegeben.“ [8, S.6] Dabei ist jedoch oftmals nicht die Explosion, das Feuer oder das Giftgas selbst Grund für die hohen Opferzahlen, sondern die daraus resultierende Massenpanik.

Aber die Realität ist noch grausamer: Wo das zuvor beschriebene Szenario das Unverständliche verständlich erscheinen lässt, ist in dem Moment jegliche Nachvollziehbarkeit verloren, da sich Fans in einem Stadion niedertrampeln, um die besten Plätze zu ergattern – so geschehen 1998 in Harare, Zimbabwe. Oder wenn Tausende in eine U-Bahn-Station drängen, nur um dem Regen zu entfliehen und dabei über fünfzig Menschen ihr Leben lassen – wie 1999 in Minsk, Weißrussland. Lange Listen mit Tragödien [10] zeugen davon, dass nicht nur *lebensbedrohliche* Situationen Paniken auslösen können, sondern diese häufig vollkommen überraschend und unerwartet schon aus kleinsten Impulsen heraus entstehen. [9] Wenngleich ehrlicher Weise gesagt werden muss, dass es auch andere Meinungen zum Thema *Panik* gibt, wie der Artikel von [3] exemplarisch belegt, indem es heißt: „After five decades studying scores of disasters such as floods, earthquakes and tornadoes, one of the strongest findings is that people rarely lose control.“ Die Bilder aber, die wir bspw. vom Europapokal-Endspiel zwischen Juventus Turin und dem FC Liverpool, 1985 im Heysel-Stadion, in Erinnerung haben, sprechen eine andere Sprache. Damals stürmten englische Hooligans einen mit Italienern besetzten Block und lösten dadurch eine Massenpanik aus, in deren Folge zahlreiche Menschen den Tod fanden, weil sie von anderen niedergetrampelt oder an Wänden und Zäunen zerquetscht wurden.

Simulationen können eine unterstützende Funktion bei der Analyse und darauf aufbauenden Gefahrenabwehr einnehmen: Durch vorausschauende Gebäudeplanung können von vornherein Engpässe im Fußgängerfluß vermieden werden.

Das Gebiet der Erforschung der Dynamiken in Fußgängergruppen ist seit vielen Jahrzehnten im Fokus ganz unterschiedlicher Fachrichtungen der Wissenschaften: Angefangen bei der Soziologie und Psychologie, die sich mit dem *Verhalten* von Personen auseinandersetzen, über die Physik, Mathematik und Informatik, welche versuchen, die gewonnenen Erkenntnisse in entsprechende Modelle zur Simulation umzusetzen, bis hin zur Virtual Reality-Szene, der Spiele- und Filmindustrie, welche die Ergebnisse nutzt, um realistisches Gruppenverhalten zu imitieren, oder der Architektur, für ein verbessertes Gebäudedesign.

Aufgrund des begrenzt zur Verfügung stehenden Raumes muss sich diese Arbeit jedoch auf manche wenige Ausschnitte aus diesem breiten Repertoire beschränken. Angefangen bei einigen grundlegenden Charakteristika, die das Verhalten von Fußgängern ausmachen, werden daraus resultierende Bewegungsmuster in Menschenmengen vorgestellt. Im dritten Kapitel dann wird eine stark vereinfachte Einteilung bisheriger Modellierungsansätze vorgestellt, bevor im vierten Kapitel einer dieser Ansätze vertiefend aufgegriffen und einige Modellierungsdetails erläutert werden. Das fünfte und letzte Kapitel schlussendlich wird ein Fazit der in dieser Ausarbeitung vorgestellten Fakten liefern und einen Ausblick auf die noch ausstehende Master Thesis geben.

## 2 Selbstorganisationsphänomene in Fußgängergruppen

Bevor wir uns der Frage widmen, *wie* das Verhalten von Fußgängern nachempfunden werden kann, müssen wir uns zunächst dem *wieso* zuwenden: Wieso nämlich ist es überhaupt möglich, das Verhalten von Fußgängergruppen zu simulieren? Eben weil sich, trotz der manchmal chaotisch anmutenden Erscheinungen, gewisse Regelmäßigkeiten erkennen lassen. In [8-10] werden zahlreiche *Bewegungsmuster* beschrieben, auch *Selbstorganisationsphänomene* genannt, teilweise beobachtet während empirischer Untersuchungen und Videoauswertungen. „Self-organization means that these patterns are not externally planned, prescribed, or organized, e.g., by traffic signs, laws, or behavioral conventions. Instead, the spatiotemporal patterns emerge due to the non-linear interactions of pedestrians. These interactions are more reactive and subconscious than based on strategic considerations or communications (...).“ [9, p.4]

Wieso aber kommt es zu diesen wiederkehrenden Mustern, wo doch der Einzelne individuelle Präferenzen, Absichten und Ziele hat? Nun, es gibt gewisse Verhaltensweisen, zu denen jeder unbewusst tendiert und die nahezu *automatisch* ausgeführt werden, so wie ein geübter Autofahrer auch nicht überlegen muss, wenn er blinkt, abbiegt oder schaltet. Diese Tendenzen und Muster zu erfassen und zu verstehen, ist ein erster Schritt, um das Flussverhalten großer Personenzahlen zu optimieren und Gefahrenpotentiale frühzeitig zu erkennen.

Üblicherweise wird zwischen normalem und Panikverhalten unterschieden: „Mit wenigen Ausnahmen wird Panikverhalten in Fällen knapper und schwindender Ressourcen beobachtet, die entweder überlebensnotwendig oder extrem begehrt sind. Man unterscheidet in der Regel zwischen panischer Flucht (Massenpanik, Bank- oder Börsenpanik) oder Besitzgier (Spekulationswahn, ‚Versessenheit‘), aber in manchen Fällen ist diese Einteilung fraglich. Es wird oft behauptet, dass panische Menschen von ihren kurzfristigen Interessen besessen sind und soziale oder kulturelle Normen völlig missachten.“ [8, S.5] Dabei spielen sowohl psychologische (*Herdentrieb*), als auch physiologische Prozesse eine Rolle. Denn während in normalen Situationen die Großhirnrinde das Handeln bestimmt, finden Alarmsignale in Paniksituationen den direkten Weg ins Stammhirn – die Angst übermannt einen, soll kampfbereit oder fluchtbereit machen. [8,10,19] Es „wird Adrenalin ausgeschüttet, das Herz schlägt schneller, der Blutdruck steigt, und es entsteht der sog. *Tunnelblick*, der eine Fokussierung auf das Überlebenswichtige garantieren soll und zu instinktiven statt überdachten Reaktionen führt.“ [8, S.5]

## 2.1 Individuelle Verhaltenstendenzen in normalen Situationen

Die nun folgenden Ausführungen zur Routenwahl und dem Gruppenverhalten von Fußgängern, sind an [6] angelehnt, während die empirischen Daten, zur Fortbewegungsgeschwindigkeit und zum Abstand, [21] entstammen.

### 2.1.1 Routenwahl und Orientierung

Der Weg eines Fußgängers kann als *Polygonzug* angenähert werden, in welchem die Knoten *Wegmarken* repräsentieren. Dabei haben Fußgänger eine natürliche Aversion gegen Umwege und suchen deshalb in der Regel den *kürzesten Weg* zu ihrem Ziel. Stehen zwei Wege gleicher Länge zur Auswahl, so wird jener bevorzugt, der am längsten geradeaus führt. Es kann aber durchaus auch einmal ein längerer Weg bevorzugt werden, wenn dieser andere Vorteile zu bieten hat. So ist die *Beschaffenheit/Begehbarkeit des Bodens* ein ebenfalls nicht zu vernachlässigender Faktor. Auch gibt es bei Fußgängern die Tendenz, vorangelegten Wegen zu folgen. Überschreiten die dadurch entstehenden Umwege jedoch eine gewisse Toleranzstufe, bahnen sich Fußgänger kurzerhand neue Wege, was sich in Parks und auf Campussen immer wieder über die Ausbildung von *Trampelpfaden* beobachten lässt [13].

### 2.1.2 Fortbewegungsgeschwindigkeit

Fußgänger bewegen sich mit einer ihnen angenehmen Geschwindigkeit fort, auch *Wunschgeschwindigkeit* genannt. Das entspricht in etwa der Geschwindigkeit, bei welcher der *Energieverbrauch pro km minimal* ist. Sie wird bestimmt von *intrinsischen* Gegebenheiten des Fußgängers wie Alter, Geschlecht und Größe, seinem Gesundheitszustand oder seiner Stimmungslage. Aufgrund *extrinsischer* Faktoren kann die Wunschgeschwindigkeit häufig nicht erreicht werden. Mögliche Gründe können sein:

- Zu hohe Verkehrsdichten,
- ungünstige Beschaffenheit des Bodens,
- Tageszeit, Witterung oder Länge des Weges.

In Fußgängermengen sind die Gehgeschwindigkeiten *normalverteilt* um den Mittelwert 1,34 m/s (4,83 km/h), mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s. Die Geschwindigkeiten von Männern (1,41 m/s) liegen dabei um 10,9 % höher als die der Frauen (1,27 m/s).

Da, bezogen auf das Körpergewicht, der Energieaufwand für alle Menschen annähernd gleich ist, lässt sich eine ideale Gehgeschwindigkeit bestimmen, bei welcher der Energieverbrauch im Mittel minimal wäre: Sie liegt bei 1,39 m/s (5 km/h).

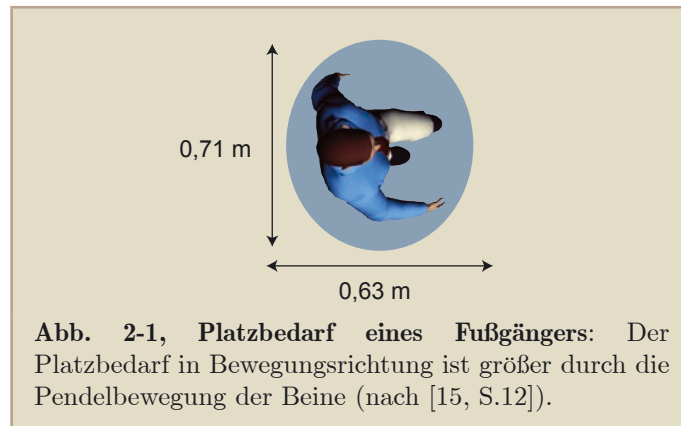
Auf Treppen wird eine *mittlere Horizontalgeschwindigkeit*  $v_h = 0,652$  m/s und eine *mittlere Vertikalgeschwindigkeit* von  $v_v = 0,362$  m/s erreicht, das entspricht 2,103 Schritten/s. Beim *Aufwärtsgehen* liegt die Geschwindigkeit um 6,5 % unter dem Mittel, beim *Abwärtsgehen* um 6,5 % darüber. Allgemein kann gesagt werden, dass im Bereich einer Treppe, verglichen mit der Ebene, eine Verlangsamung um etwa 51 % eintritt, d.h. es kann mit einer Halbierung der Horizontalgeschwindigkeit gerechnet werden.

### 2.1.3 Abstands- und Platzbedarf

Fußgänger halten, solange dies möglich ist, Abstand zueinander, zu Wänden und Objekten (*Territorialeffekt*). Es kann dabei zwischen dem *statischen* und *dynamischen* Platzbedarf unterschieden werden. Der statische Platzbedarf bezieht sich auf den ruhenden Körper, während der dynamische den Raumbedarf in der Bewegung beschreibt.

Die Projektion eines stehenden Körperrumrisses beträgt im Mittel  $0,15$  m<sup>2</sup>/P, woraus eine maximale Dichte von  $6,6$  P/m<sup>2</sup> resultiert. Solche Dichten sind allerdings äußerst selten, schon bei einer Dichte von  $3,0$  P/m<sup>2</sup> lassen sich Körperkontakte nicht länger vermeiden.

Der dynamische Platzbedarf ist wesentlich größer als der statische, weil die Pendelbewegung der Beine, sowie ein Sicherheitsabstand – bspw. für ein plötzliches Abbremsen des Vordermanns – berücksichtigt werden müssen.



In *Querrichtung* kommt es zu Schwankungen im Gang des Fußgängers, woraus eine *Bewegungsspur* entsteht. Hierfür wird für die Ebene eine Breite von 0,71 m angegeben, auf Treppen sind diese Bewegungen kanalisiert, hier reichen 0,6 m.

In *Längsrichtung* wächst mit der Geschwindigkeit auch der Platzbedarf. Als durchschnittliche *Schrittlänge* werden 0,63 m angegeben.

## 2.2 Kollektive Bewegungsmuster in normalen Situationen

Durch die zuvor beschriebenen individuellen Verhaltenstendenzen ergeben sich im Zusammenspiel vieler Fußgänger Bewegungsmuster. Im Folgenden werden zwei Beispiele für normale Situationen angegeben.

### 2.2.1 Segregation

Das Verhalten der *Bahnbildung* kann sowohl innerhalb von Gebäuden als auch auf der Straße beobachtet werden. Es besteht darin, dass Fußgänger mit entgegengesetzten Laufrichtungen normalerweise nicht gleichverteilt über den Gehweg/Korridor sind, sondern sich in Bahnen gleicher Laufrichtung auftrennen. Das Interessante dabei ist, dass dieses Verhalten nicht etwa aus der Intention der Beteiligten entsteht, ein solches Verhalten zu zeigen, oder weil sie sich vielleicht untereinander absprechen würden. Es entsteht vielmehr automatisch. Wie viele Bahnen es gibt, hängt dabei von Breite und Länge des Gehwegs/Korridors ab. [9] Dabei lässt sich eine *fluktuationsinduzierte Ordnung* feststellen: Mit steigender Fluktuation kommt es zu einer deutlichen Segregation, also einer geringeren Anzahl an Bahnen [10].

Resultat der Segregation ist die Minimierung der Zahl der Interaktionen (*Brems-/Ausweichmanöver*) mit entgegenkommenden Fußgängern, wodurch die mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit – global betrachtet – steigt. [9]



**Abb. 2-2, Segregationseffekte:** In Fußgängerzonen läßt sich die Ausbildung von Bahnen beobachten (*links*). Eine Stabilisierung dieser Bahnen kann durch Säulen oder andere Hindernisse erreicht werden (*rechts*) (aus [7, p.2]).

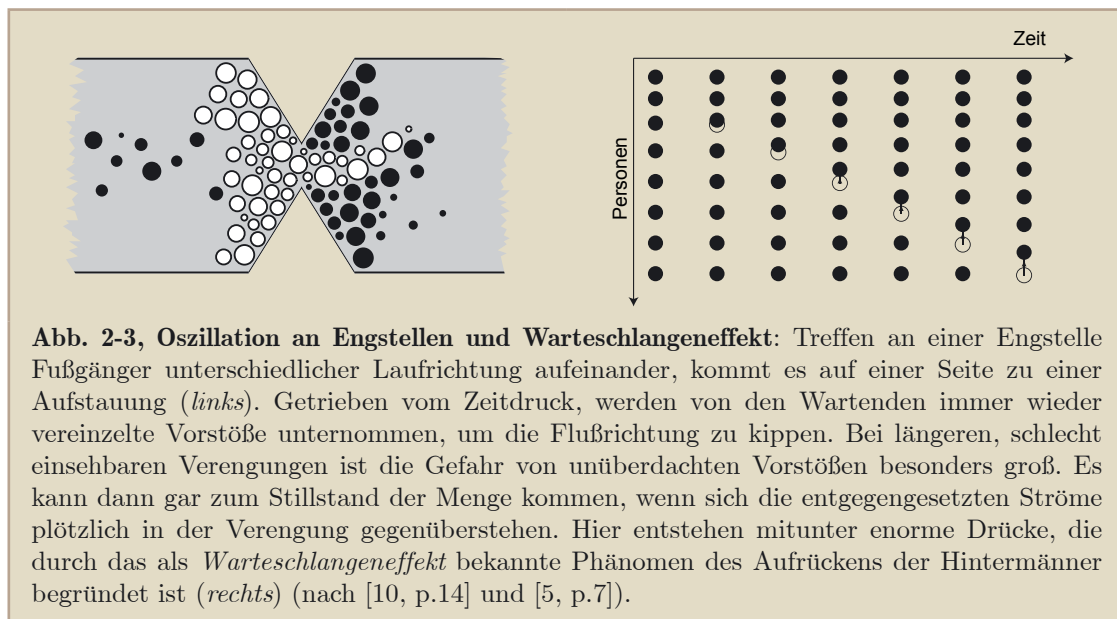
In Fällen großer Dichte und/oder besonders nervöser Fußgänger können Bahnen aufgrund missratener Überholmanöver auseinanderbrechen: Ungeduldige scheren aus dem Strom aus und versuchen, vor ihnen Laufende zu überholen. Wenn diese Manöver am Rande einer Bahn passieren, stehen sich die unterschiedlichen Laufrichtungen gegenüber und behindern einander. Säulen oder Bäume können hier eine stabilisierende Funktion übernehmen: Sie wirken wie Wände und senken die Attraktivität von Überholmanövern. Gleichzeitig bieten sie aber, gesetzt den Fall, dass die Gegenrichtung weniger frequentiert ist, die Möglichkeit, auch diese mitzubenutzen. [10] „In central Europe, pedestrians have a slight tendency to walk on the right-hand side. Although cars drive on the left-hand side in Great Britain, pedestrians in London tend to stay on the right-hand side as well. In Japan, the left-hand side is preferred (...).“ [9, p.6]

### 2.2.2 Oszillation an Engstellen

Verengungen stellen ein besonderes Problem im Gebäudebau dar, weil sie bei starker Frequentierung zu Oszillationseffekten führen. Dabei zeigt sich stets eine Laufrichtung als dominant, während die Fußgänger der anderen warten müssen. Da es – wie bei der Bildung von Bahnen bereits zu sehen war – einfacher ist, *mit*, als *entgegen* einem Strom zu laufen, passieren gleich mehrere Personen die Engstelle. Bei den Wartenden baut sich eine Ungeduld, ein Druck, auf, während er auf der anderen Seite immer geringer wird. Ist die Differenz groß genug, kippt die Flußrichtung. [9]

Die Oszillationsdauer steigt mit der Länge einer Engstelle, und aufgrund der schweren Einsehbarkeit auch die Gefahr unbedachter Vorstöße, die bei einem Scheitern – ähnlich wie die Überholmanöver bei der Bahnbildung – zum Stillstand führen können. Diese Situation ist besonders gefährlich, weil es zu einer *Kompression* der Menge kommt, in der sich gefährliche Drücke aufbauen können. [9]





Wie kommt es zur Kompression der Menge? Ein wartender Fußgänger wird durch zwei Faktoren maßgeblich beeinflusst: Zum einen durch den Wunsch, Abstand zu anderen zu halten (*Territorialeffekt*), zum anderen durch den Wunsch, vorwärts zu kommen (*Zeitdruck*). Zu Beginn gibt es ein Gleichgewicht zwischen diesen Faktoren. [5] „However, during waiting in the queue, the pressure of time increases, whereas the territorial effect is time independent. As a consequence, the individual moves forward a little after a while.“ [5, p.8] Dieses als *Warteschlangeneffekt* bekannte Phänomen hat eine Kompression der Menge zur Folge.

## 2.3 Individuelle Verhaltenstendenzen in Paniksituationen

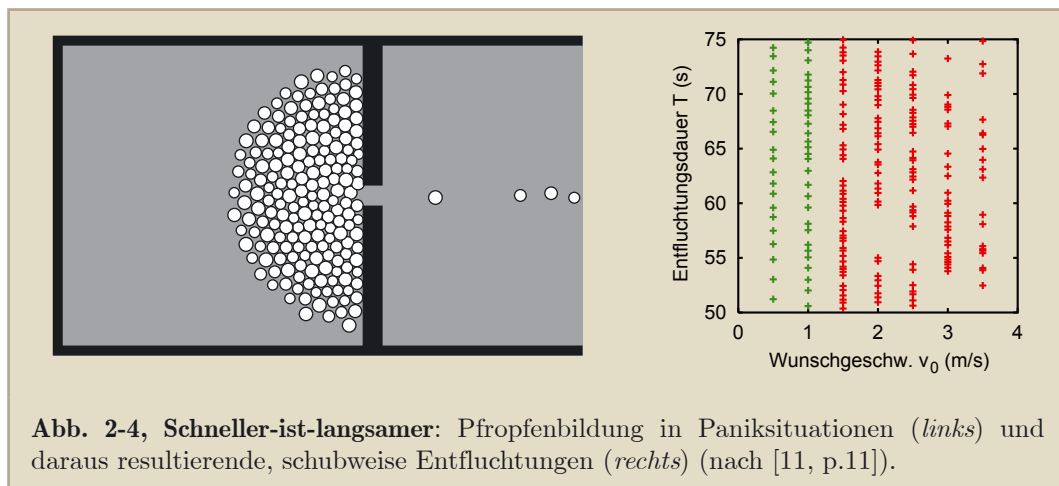
Wie schon in normalen, lassen sich auch in Paniksituationen bestimmte Charakteristika menschlichen Verhaltens identifizieren. Da es nur sehr wenige, systematische Studien von Panikverhalten gibt, lassen sich jedoch größtenteils nur *qualitative* Aussagen treffen [8, 10]:

1. **Routenwahl/Orientierung:** Die Nervosität des Einzelnen ist unter dem Druck der Gefahr erhöht und kann in *blindem Aktionismus* münden. Die Fortbewegung wird zunehmend unkoordinierter, die Neigung zum *Herdentrieb*, also das Verhalten anderer zu imitieren, steigt. Herdeneffekte treten Beobachtungen zufolge vermehrt dann auf, wenn die Sicht in Örtlichkeiten eingeschränkt ist, bspw. durch Rauchentwicklung. Oder aber wenn die betroffenen Personen keine Ortskenntnis besitzen – sie also bspw. nicht wissen, wo sich die nächsten Notausgänge befinden. Sie verlassen sich dann i.d.R. auf andere mit der Hoffnung, dass diese sich besser auskennen. Infolgedessen werden evtl. nicht alle vorhandenen Ausgänge optimal genutzt, in Evakuierungssituationen ein großes Problem.
2. **Geschwindigkeit:** Die Wunschgeschwindigkeiten steigen deutlich an.
3. **Abstand:** Die Bereitschaft zu physischen Interaktionen wächst.

## 2.4 Kollektive Bewegungsmuster in Paniksituationen

Die Schwierigkeit in der Analyse und Simulation von Massenpaniken ist das seltene und dazu häufig vollkommen unerwartete Auftreten, so dass insgesamt sehr wenig gesammelte Daten vorliegen. Und empirisch lassen sich solche Situationen aufgrund der erhöhten Gefahr für Leib und Leben auch nicht nachstellen. Für Paniksituationen wird hier nur ein Muster vorgestellt, auch wenn es mit *freezing-by-heating* mindestens ein weiteres gibt.

*Schneller-ist-langsam* (*Pfropfenbildung*), ist ein aus der Fertigungsindustrie bekanntes Problem bei Einfüllprozessen granularer Medien wie Salz, Reis, Sand o.ä. [9]



**Abb. 2-4, Schneller-ist-langsam:** Pfropfenbildung in Paniksituationen (*links*) und daraus resultierende, schubweise Entfluchtungen (*rechts*) (nach [11, p.11]).

Dabei kommt es um Engstellen herum zu Stauungen, da die Partikel sich durch Reibung gegenseitig am Durchkommen hindern. Bei aus einem geschlossenen Raum flüchtenden Menschen, mit Wunschgeschwindigkeiten jenseits der 1,5 m/s, kommt es zu bogenförmigen Blockaden am Ausgang. Brechen diese Bögen, sind schubweise Entfluchtungen das Ergebnis, wie dem Diagramm zu entnehmen ist. Je hektischer und nervöser die Personen dabei agieren, desto weniger schaffen es, über einen bestimmten Zeitraum gesehen, zu entkommen. [10]

Die Kräfte, die aufgrund der physischen Kontakte zwischen den Fußgängern wirken, können bis zu 4,5 N/m und mehr erreichen, was genügt, um Stahlbarrieren wie Papier zu verbiegen. Niedergerungene, stürzende Personen werden zu Hindernissen für die Nachfolgenden. In solchen Fällen hat sich gezeigt, dass Säulen, vor dem Durchgang platziert, wahre Wunder wirken können: Sie agieren wie Wellenbrecher, absorbieren einen Teil der wirkenden Kräfte und splitten die Menge in zwei Einzelströme auf. [9,10]

### 3 Modellierungsansätze

Wie auch schon im vorangegangenen Kapitel beschrieben, muss sich die Ausarbeitung auf die *wesentlichen* Unterschiede bisheriger Modellierungsansätze beschränken. Für eine detaillierte Darstellung fehlt der Raum.

Eine erste grobe Näherung aber kann durch Unterscheidung in *makroskopische* und *mikroskopische* Modelle stattfinden.

#### 3.1 Makroskopische Modelle

Die Beispiele zu den Selbstorganisationsphänomenen aus Kapitel 2 haben vor Augen geführt, dass es Ähnlichkeiten zwischen Fußgängermengen und *granularen* Medien gibt, so gibt es die Segregation eins zu eins als Schichtungsphänomen in granularen Medien, die Oszillation an Engstellen erinnert an die Funktionsweise einer Sanduhr und die Pfropfenbildung in Paniksituationen ist – wie im vorangegangenen Kapitel bereits erwähnt – ein aus der Fertigungsindustrie bei Einfüllprozessen bekanntes Problem. [12]

Darüber hinaus lassen sich in mittleren bis hohen Dichten aber auch Ähnlichkeiten zu *Flüssigkeiten* feststellen, man denke nur einmal an eine wartende Menge vor dem Kino, durch die sich einzelne Ströme von Menschen bewegen. Im Zeitraffer betrachtet, erinnert das schon sehr an ein Flussbett, durch das sich ein Wasserstrom bewegt. [12]



**Abb. 3-1, Analogie von Bewegungen in Fußgängermengen zu Flüssigkeiten:** Bewegen sich Menschen durch eine wartende Menge, bspw. vor der Kinokasse und wird das dann im Zeitraffer betrachtet, kommen Assoziationen zu einem Flussbett auf (aus [12, p.363]).

Schon in den 1970er Jahren hat sich HENDERSON mit der Darstellung von Fußgängermengen als fluiddynamische Systeme auseinandergesetzt. „However, his approach implicitly assumes energy and momentum to be collisional invariants which is obviously not the case for pedestrian interactions.“ [13, p.2]

## 3.2 Mikroskopische Modelle

Die zweite Kategorie von Modellen findet wesentlich häufiger Anwendung in der heutigen Zeit: Die mikroskopischen Modellansätze. Während in makroskopischen Modelle der *Fluss* die kleinste modellierbare Einheit beschreibt, ist es in mikroskopischen Modellen das *Individuum*, dem Charakteristika wie Wunschgeschwindigkeit, Ziel u.ä. zugeordnet werden. [15] Dabei sei hervorgehoben, dass es dennoch weiterhin um die Vorhersage der Entfluchtungsdauer für die *Gesamtheit* der Fußgänger geht, auch wenn diese als Individuen dargestellt werden. Die mikroskopischen Modelle können weiter unterteilt werden in *kontinuierliche* und *diskrete* Ansätze.

### 3.2.1 Kontinuierliche Modelle

Kontinuierliche Modelle haben ihren Namen daher, dass sie in Raum und Zeit kontinuierlich sind. Was natürlich in der Praxis nicht ganz stimmt, denn eine kontinuierliche Zeitbetrachtung ist im Computer nicht möglich.

Als Vertreter für die kontinuierlichen Modelle sei das *Soziale-Kräfte-Modell* von DIRK HELBING und ILLÉS FARKÁS erwähnt. Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, der auf die von KURT LEWIN formulierte Feldtheorie (*Vektorpsychologie*) zurückgeht. Dabei findet eine Vereinfachung des komplexen menschlichen Verhaltens auf einfache *Reaktionen* statt, hervorgerufen durch *soziale Kräfte*, deren vektorielle Addition eine Handlung begründen. [15] „There are some major differences between social forces and forces in physics. First, for social forces the NEWTONian law *actio = reactio* does not hold. Second, energy and momentum are no *collisional invariants* which implies that there is no energy or momentum conservation. Third, pedestrians (or, more general, individuals) are *active systems*, that produce forces and perform changes themselves. Fourth, instead of by *momentum transfer* via virtual particles the effect of social forces comes about by *information exchange* via complex mental, psychological and physical processes.“ [13, p.3]

Zum Modell: Ein Fußgänger  $i$  verändert über die Zeit  $t$  gesehen seine Position  $\vec{x}_i(t)$ , was Ausdruck findet in der folgenden *Bewegungsgleichung*:

$$\frac{d\vec{x}_i(t)}{dt} = \vec{v}_i(t) \quad (3.1)$$

Die *Änderung* dieser Geschwindigkeit wird beschrieben durch die *Beschleunigungsgleichung*, die auf dem *zweiten Newtonschen Axiom* ( $F = m \cdot a$ ) basiert:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{f}_i(t) + \vec{\xi}_i(t) \quad (3.2)$$

$\vec{f}_i(t)$  stellt den Summenterm der Kräfte dar und ist wie folgt aufgebaut:

$$\vec{f}_i(t) = m_i \cdot \frac{v_i^0(t) \vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \left[ \vec{f}_{ij}^{soc-rep}(t) + \vec{f}_{ij}^{soc-attr}(t) + \vec{f}_{ij}^{phys}(t) \right] + \sum_b \vec{f}_{ib}^{obj-rep}(t) + \sum_k \vec{f}_{ik}^{obj-attr}(t) \quad (3.3)$$

Wobei der erste Term den sogenannten *Beschleunigungsterm* darstellt, der die Anpassung der *aktuellen Geschwindigkeit*  $\vec{v}_i(t)$  an das *gewünschte Tempo* und die *gewünschte Richtung*  $v_i^0(t) \cdot \vec{e}_i^0(t)$  innerhalb einer sogenannten *Relaxationszeit*  $\tau_i$  beschreibt.  $(v_i^0(t) \cdot \vec{e}_i^0(t)) / \tau_i$  kann als *Antriebsterm* angesehen werden, während  $-\vec{v}_i(t) / \tau_i$  eine Art *dissipativer Reibungsterm* ist<sup>1</sup>.  $\vec{f}_{ij}^{soc-rep}(t)$  steht hierbei für *sozial repulsiv* wirkende Kräfte, was den Wunsch der Fußgänger abbildet, Abstand untereinander zu halten (*Territorialeffekt*).  $\vec{f}_{ij}^{soc-attr}(t)$  beschreibt *sozial attraktive* Kräfte, ist also bspw. hilfreich, wenn eine Gruppenzugehörigkeit modelliert werden soll, seien es Familien, Freunde oder Schulklassen.  $\vec{f}_{ij}^{phys}(t)$  sind physikalische Kräfte, die ausschließlich in Paniksituationen zur Geltung kommen, wenn sich die Fußgänger so nahe kommen, dass eine der *Kompression entgegenwirkende Körperkraft* einsetzen muss.  $\vec{f}_{ib}^{obj-rep}(t)$  beschreibt wie schon bei den sozialen Kräften wieder einen Anteil repulsiver Kräfte, diesmal geht er jedoch von Objekten aus – Fußgänger halten einen gewissen Abstand zu Wänden.  $\vec{f}_{ik}^{obj-attr}(t)$  zu guter Letzt stellt von Objekten ausgehende attraktive Kräfte dar. Damit kann z.B. die (v.a. auf die Damenwelt) von Schaufensterauslagen ausgehende Anziehungskraft nachempfunden werden.

$\vec{\xi}_i(t)$  „is a small amount of stochasticity added to the model to smoothen up the movement.“ [14, p.8] Es beschreibt *individuelle Fluktuationen*.

„Die Simulation dieses Modells läuft auf die numerische Integration von gekoppelten Differentialgleichungen hinaus.“ [16, S.32] Durch die Wechselwirkung der Fußgänger untereinander und mit Objekten, ergibt sich bei  $n$  Fußgängern/Objekten ein Rechenaufwand von  $O(n^2)$ . Ein weiteres Problem ist, dass „die zur numerischen Behandlung erforderliche Diskretisierung der eigentlichen Natur des Modells entgegensteht und nicht wie beim zellulären Automaten<sup>2</sup> integraler Bestandteil ist.“ [16, S.37] Darüber hinaus muss darauf geachtet werden, dass die zu berechnenden Kräfte nicht durch Wände hindurch wirken und dass ein weit entfernter Fußgänger in der Realität möglicherweise ja gar keinen Einfluß auf einen anderen hat.

In der Thesis wird sich ein ausführliches Kapitel zu diesem Modell finden, ansonsten können weitere Informationen v.a. in [10,14] eingesehen werden.

<sup>1</sup> Ist der zweite Term größer als der erste, bremst der Fußgänger, andernfalls beschleunigt er oder behält seine jetzige Geschwindigkeit bei.

<sup>2</sup> Siehe hierzu bitte das folgende Kapitel 3.2.2 *Diskrete Modelle*.

### 3.2.2 Diskrete Modelle

Wie der Name schon sagt, sind diese Modelle in Raum und Zeit diskret, d.h. die Bewegungsmöglichkeiten der Akteure sind begrenzt und das Update der Situation findet in Zeitschritten statt.

Die wohl bekanntesten Vertreter diskreter Modelle sind die *zellularen Automaten*. Sie können durch folgende Merkmale charakterisiert werden [22]:

- **Gitterstruktur:** Sie bestehen aus einem *regulären*<sup>3</sup>, diskreten *Gitter* an Zellen.
- **Nachbarschaft:** Die Nachbarschaft ist lokal und einheitlich.
- **Zellzustand:** Jede Zelle wird durch einen *Zustand* aus einer definierten, endlichen *Zustandsmenge* beschrieben. Über die Zeit gesehen findet eine Entwicklung im Automaten statt, innerhalb derer die Zellen ihren Zustand ändern können. Das Update geschieht in Zeitschritten.
- **Übergangsregeln:** Die vorher beschriebene Änderung der Zellzustände wird über *Regeln* bestimmt. Für alle Zellen kommen dabei dieselben Regeln zur Anwendung, der neue Zustand hängt lediglich vom vorherigen und denen umliegender Zellen ab.
- **Randbedingungen:** Sie bestimmen das Verhalten an den Rändern der Gitterstrukturen.

Ursprünglich im Bereich der Verkehrsinformatik angewendet<sup>4</sup>, haben die zellularen Automaten in den letzten Jahren und Jahrzehnten auch vermehrt in den Bereich der Fußgängersimulation Einzug gehalten. Aus Platzgründen können die einzelnen Ansätze hier nicht näher beschrieben werden, für Interessierte seien jedoch einige Namen genannt: GIPPS & MARKSJÖ, BLUE & ADLER, SCHADSCHNEIDER, BURSTEDDE und KIRCHNER [16], KLÜPFEL [17].

Durch die Diskretisierung von Raum und Zeit kommt es zu einer Reduktion des Rechenaufwands auf  $O(n)$ . Dadurch werden *echtzeitfähige* Simulationen möglich, mit Hilfe von *Monte-Carlo-Simulationen* können die kompletten statistischen Eigenschaften eines Modells quantifiziert und mit den vorliegenden empirischen Daten verglichen werden. [16]

---

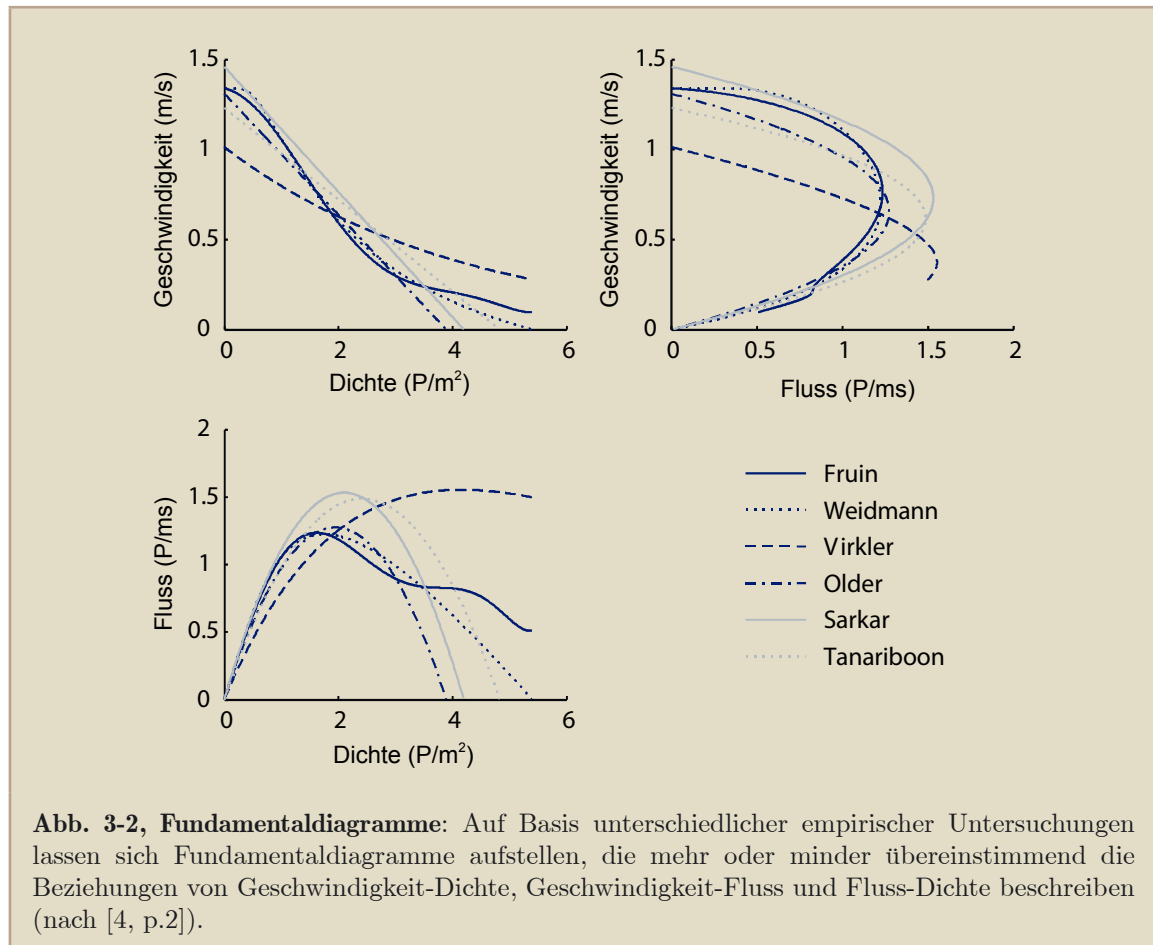
<sup>3</sup> Ein *reguläres Polygon* ist eine Form mit Seiten gleicher Länge und gleichgroßen Winkeln zwischen den Seiten. Beispiele für reguläre Polygone sind Dreieck, Viereck, Fünfeck, Sechseck usw. Eine *reguläre Kachelung* liegt dann vor, wenn innerhalb des Gitters nur eine Art eines regulären Polygons verwendet wird und die Polygone Vertex an Vertex platziert sind, ohne Lücken oder Überlappungen [2].

<sup>4</sup> Stichwort NAGEL-SCHRECKENBERG-Modell.

### 3.3 Fundamentaldiagramme

Ganz wichtig für die Modellkonzeption sind die sogenannten *Fundamentaldiagramme*, in denen die grundlegenden Beziehungen zwischen den Parametern *Geschwindigkeit*, *Fluss* und *Dichte* Ausdruck finden.

Während makroskopische Modelle diese Diagramme als *Eingabeparameter* zur Kalkulation der Entfluchtungszeiten erwarten, sind sie bei mikroskopischen Modellen das *Ergebnis* der Simulation.



**Abb. 3-2, Fundamentaldiagramme:** Auf Basis unterschiedlicher empirischer Untersuchungen lassen sich Fundamentaldiagramme aufstellen, die mehr oder minder übereinstimmend die Beziehungen von Geschwindigkeit-Dichte, Geschwindigkeit-Fluss und Fluss-Dichte beschreiben (nach [4, p.2]).

Die Fundamentaldiagramme können in mikroskopischen Simulationen also genutzt werden, um das eigene Modell gegen die empirischen Erkenntnisse zu validieren.

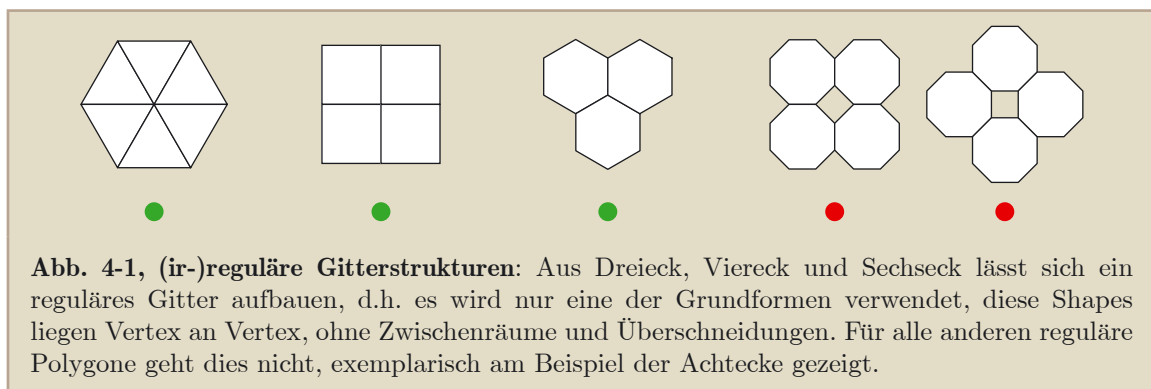


## 4 Modellkonzeption auf Basis zellulärer Automaten

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln zunächst geklärt wurde, warum man sich mit dem Thema der Fußgängersimulation beschäftigt, weshalb das Verhalten von Fußgängern nachzuempfinden ist und welche grundlegenden Modellansätze es dafür gibt, soll nun ein vertiefender Blick in die Welt mikroskopischer Simulationen, genauer auf Basis zellulärer Automaten, gegeben werden. Hier wird auch der Schwerpunkt der an diese Ausarbeitung anknüpfenden Master Thesis liegen. Nachdem in Kapitel 3.2.2 bereits beschrieben wurde, was unter einem zellulärer Automaten zu verstehen ist, sollen *einige*<sup>5</sup> ihrer Eigenschaften nun im Hinblick auf die Simulation von Fußgängern untersucht werden.

### 4.1 Gitterstrukturen

Generell gesehen gibt es keine Beschränkung in der Definition n-dimensionaler zellulärer Automaten, solange die entwickelte Gitterstruktur *regulär* ist. Was *regulär* in diesem Zusammenhang bedeutet, wurde bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert. Im zweidimensionalen Fall gibt es deshalb nur drei Grundformen, aus denen ein reguläres Gitter aufgebaut werden kann: *Dreieck*, *Viereck* und *Sechseck*. Fünfeck, Achteck o.ä. sind nicht möglich, wie in Abb. 4-1 verdeutlicht.

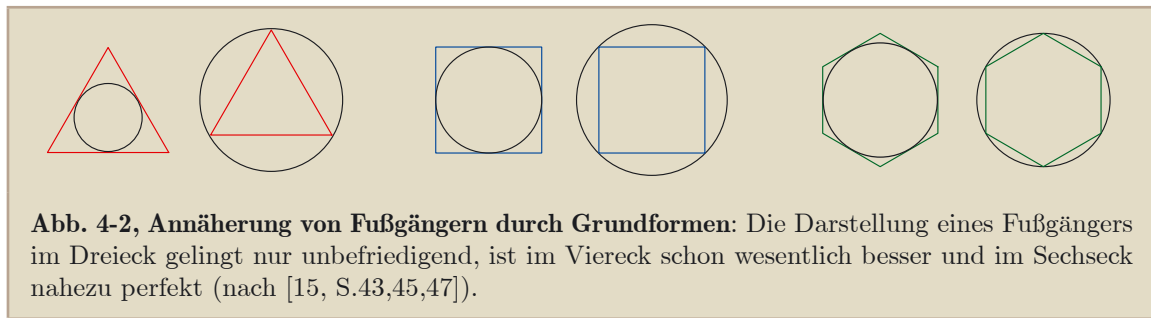


#### 4.1.1 Darstellung von Fußgängern

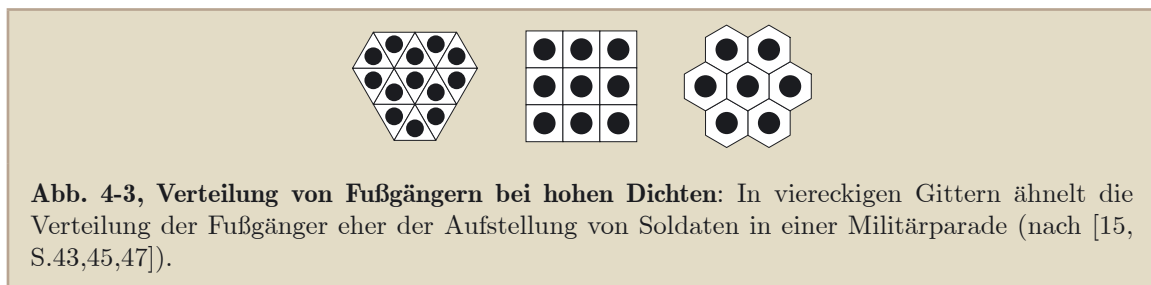
In den meisten mikroskopischen Simulationen von Fußgängern, werden diese als *kreisförmige* Annäherungen dargestellt, wie im *Soziale Kräfte-Modell* gesehen. Verglichen mit der drei- und viereckigen Grundform, erreichen wir die beste Übereinstimmung in sechseckigen Zellen.

<sup>5</sup> Nicht untersucht werden bspw. die *Randbedingungen* von ZA.



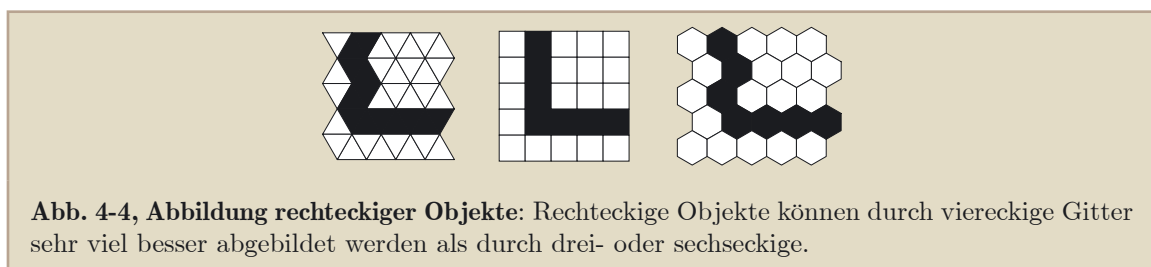


Bei hohen Dichten zeigen viereckige Gitter ans Militär erinnernde Muster, durch die saubere Aneinanderreihung der Fußgänger in horizontaler und vertikaler Achse. Verglichen damit wirkt die Anordnung in sechseckigen Gittern schon etwas natürlicher.



#### 4.1.2 Darstellung von Wänden und Hindernissen

Was die Darstellung von rechteckigen Objekten wie Wänden oder Hindernissen angeht, so kann die quadratische Gitterstruktur punkten, in drei- und sechseckigen Gittern entstehen teilweise Knicke.



#### 4.1.3 Fazit zu Gitterstrukturen

Schon nach diesen ersten Untersuchungen lässt sich feststellen, dass die dreieckigen Gitterstrukturen wenig vorteilhaft für einen Einsatz auf dem Gebiet der Fußgängersimulation erscheinen.

### 4.1.4 Mapping

Da natürlich die Darstellung von hexagonalen Strukturen wesentlich komplizierter ist als eine von viereckigen, lässt sie sich auf diese *mappen*. Nach [22] gibt es dabei zwei wesentliche Ansätze: *shear* und *shift mapping*. Der Mittelpunkt eines Sechsecks innerhalb einer hexagonalen Struktur lässt sich über

$$\left( i - \frac{j \% 2}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2} * j \right) \quad (4.1)$$

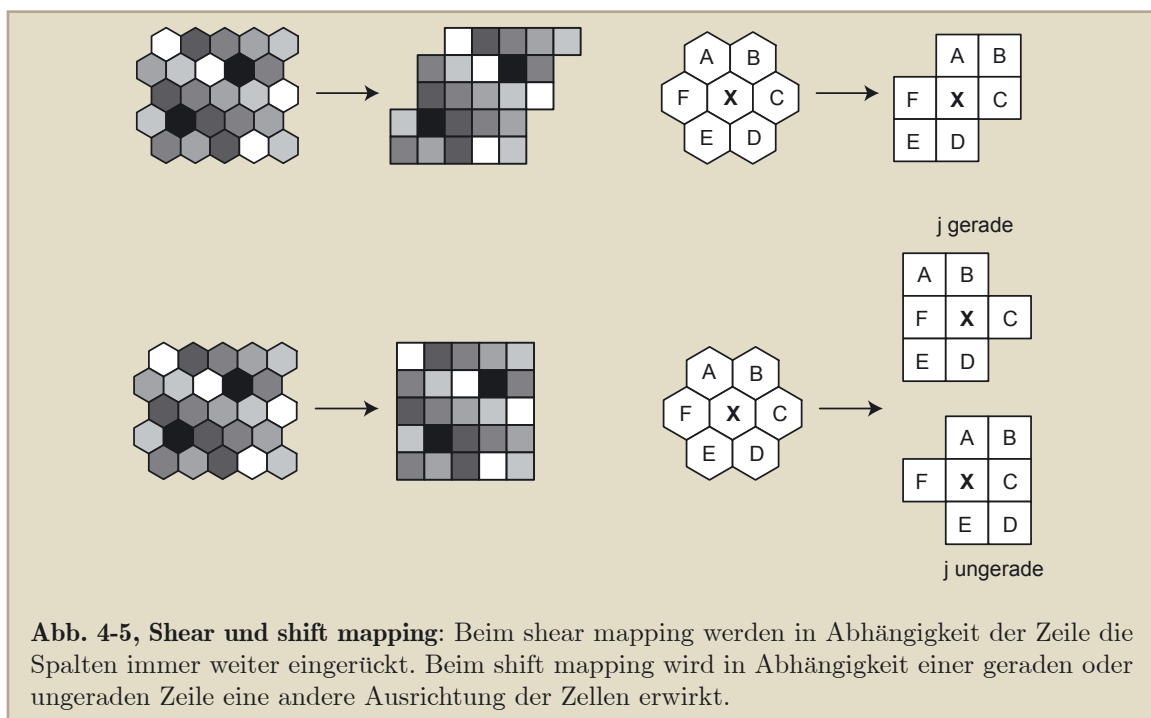
beschreiben, mit  $i$  als Spalte,  $j$  als Zeile und  $\%$  als *modulo*-Operator. Beim *shear mapping*<sup>6</sup> wird eine Zellennummer  $(i, j)$  auf

$$shear(i, j) = \left( i + \left\lfloor \frac{j}{2} \right\rfloor, j \right) \quad (4.2)$$

gemappt, wobei  $\lfloor x \rfloor$  die untere Grenze beschreibt. Das *shift mapping* ist mit

$$shift(i, j) = (i, j) \quad (4.3)$$

recht einfach gehalten. Hierbei werden die Zeilen alternierend in entgegengesetzte Richtungen geschiftet.



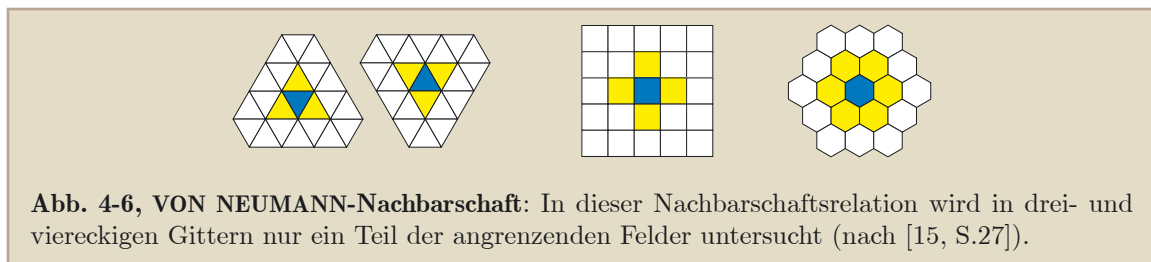
<sup>6</sup> Achtung: Diese Art des Shiftings funktioniert so nur, wenn die *linke untere* Ecke des Gitters (0,0) entspricht!

## 4.2 Nachbarschaften

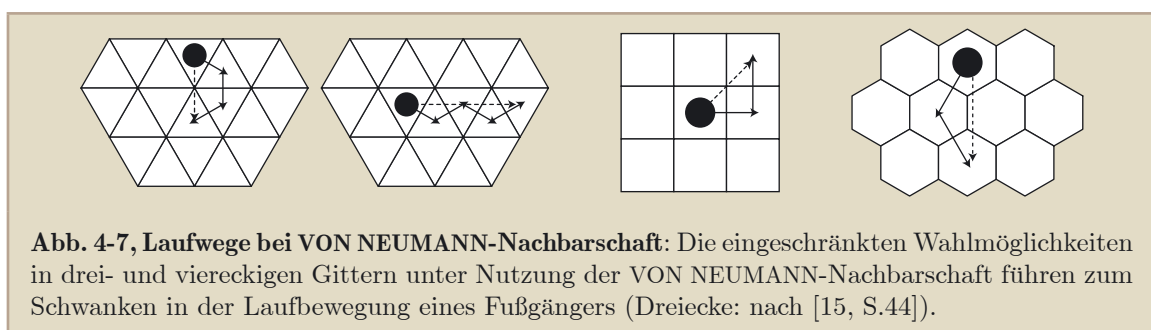
Die Nachbarschaft einer Zelle kann definiert werden als die Menge *adjazenter* Zellen. Es gibt zwei häufig verwendete Nachbarschaften, benannt nach ihren Erfindern: VON NEUMANN und MOORE.

### 4.2.1 VON NEUMANN

Die VON NEUMANN-Nachbarschaft betrachtet für Dreiecke die drei umliegenden Felder, für Vierecke die in den vier Himmelsrichtungen liegenden Nachbarn und für Sechsecke die sechs umliegenden Felder.



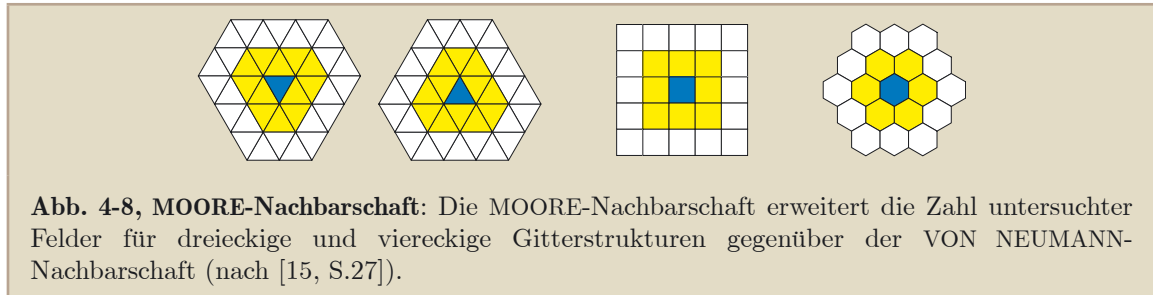
Bezogen auf Fußgängersimulationen bietet die VON NEUMANN-Nachbarschaft für drei- und viereckige Gitterstrukturen nicht genügend Freiheitsgrade in der Bewegung. Sowohl in dreieckigen, als auch in viereckigen Zellen entstehen unrealistische Bewegungen aufgrund der eingeschränkten Wahlmöglichkeiten. So gibt es in dreieckigen Gittern mit dieser Nachbarschaft keine Möglichkeit, die Mittelpunkte mehrerer paarweiser Dreiecke durch eine Gerade zu verbinden. Fußgänger sind gezwungen, im Zick-Zack zu laufen. Auch in sechseckigen Gittern stellt sich dieses Problem, hier lassen sich jedoch zumindest in einer Achse gerade Bewegungen ausführen. [15]



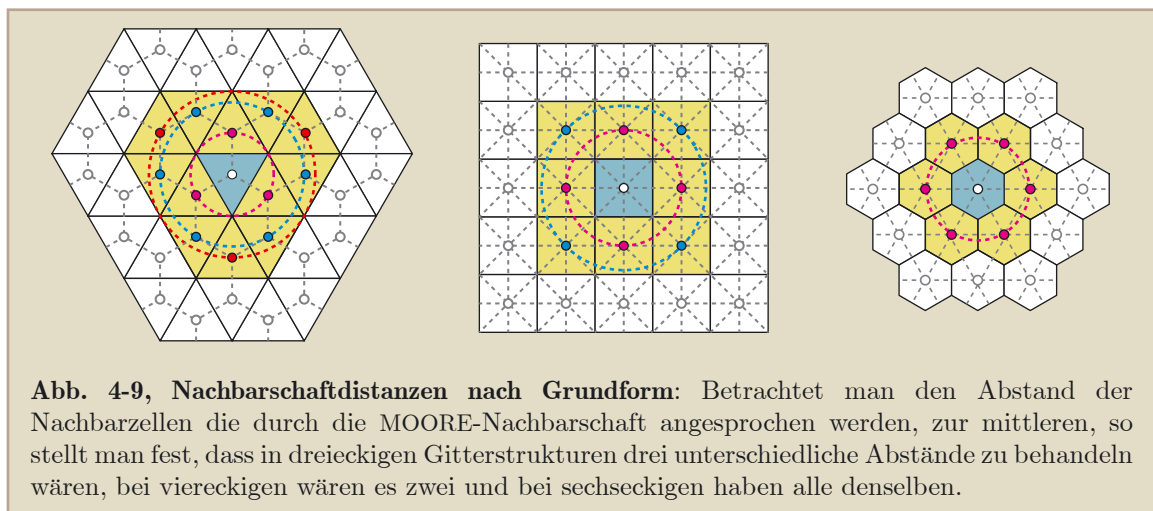
In viereckigen Gittern besteht bei dieser Nachbarschaft hingegen eher das Problem der Modellierung von Diagonalschritten, die nicht erlaubt sind. Dadurch sind Fußgänger gezwungen, zwei Felder zu durchlaufen, um auf eine diagonal gelegene Zelle zu gelangen.

### 4.2.2 MOORE

In der MOORE-Nachbarschaft erweitert sich der Kreis untersuchter Felder: Bei Dreiecken sind es nun zwölf, bei viereckiger Gitterstruktur acht und bei sechseckiger – das ist bemerkenswert – bleiben es sechs.

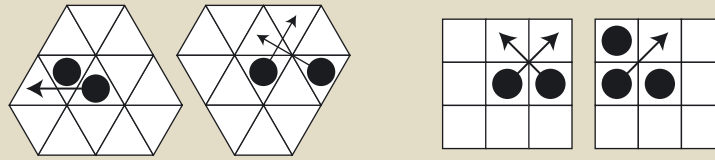


Aus dieser erweiterten Nachbarschaft ergeben sich jedoch neue Probleme: In drei- und viereckigen Gittern sind die Distanzen von der mittleren Zelle zu ihren Nachbarn ungleich. Dies müsste in der Simulation durch weitere Regeln beachtet werden, und das wäre gleichbedeutend mit erhöhter Komplexität.



In viereckigen Gitterstrukturen lässt sich die erhöhte Schrittweite für Diagonalbewegungen einfach über den Pythagoras beziffern: Er beträgt  $\sqrt{2} \approx 1,41$ . Wie in [17] vorgeschlagen, kann anstelle von Gleitkommazahlen auch mit ganzen gerechnet werden, indem mit zehn multipliziert und gerundet wird. Daraus ergeben sich aber mitunter Ungenauigkeiten. In sechseckigen Automaten sind alle Nachbarzellen äquidistant zur mittleren.

Ein zweites Problem ist das unerlaubter Züge, die aus der erweiterten Nachbarschaft resultieren. Sowohl in drei-, als auch in viereckigen Gitterstrukturen werden Schritte über andere Personen hinweg bzw. kreuzende Wege möglich. In sechseckigen Automaten stellt sich diese Schwierigkeit aufgrund des gleichbleibenden Abstands zwischen mittlerer und angrenzenden Nachbarzellen nicht.



**Abb. 4-10, Unerlaubte Schrittmöglichkeiten:** Durch die Erweiterung auf eine MOORE-Nachbarschaft entstehen mehr Freiheitsgrade. Dies ist in erster Instanz positiv zu bewerten, weil somit die Bewegungsmöglichkeiten des Einzelnen steigen. Es stellt sich jedoch heraus, dass dadurch auch unerlaubte Züge möglich werden (nach [15, S.44-47]).

Es ist denkbar, den Radius der Nachbarschaft zu erhöhen, oder auch vollkommen beliebige Nachbarschaften zu definieren. Für die Simulation von Fußgängern macht es jedoch keinen Sinn, Schritte auch in weit entfernte, nicht angrenzende Zellen zuzulassen, weil dies nicht den realen Bewegungsmöglichkeiten entspricht.

#### 4.2.3 Fazit zu Nachbarschaften

Auch in diesem Abschnitt bestätigt sich der schlechte Eindruck triangulärer Gitterstrukturen für unseren Anwendungszweck. Sie werden deshalb nicht weiter betrachtet. Zwischen vier- und sechseckigen Zellen fällt die Wahl dagegen schon schwerer, weshalb beide Gitterstrukturen in der Folge vergleichend abgehandelt werden.

### 4.3 Zustände

Die Zellen eines Gitters können im Wesentlichen drei Werte annehmen:

1. Die Zelle ist frei.
2. Die Zelle ist durch einen Fußgänger belegt. Dieser kann ruhen oder mit einer Geschwindigkeit versehen sein.
3. Die Zelle kann durch ein Hindernis/eine Wand belegt sein.

### 4.4 Regeln

Die Regeln eines zellularen Automaten zur Simulation von Fußgängerverhalten sind vielfältig und zielen auf die unter 2.1 und 2.3 beschriebenen Verhaltenstendenzen von Fußgängern ab. Da auch hier nicht sämtliche in einem kompletten Modell zu implementierenden Regeln beschrieben werden können, soll exemplarisch am Beispiel der Wegwahl verdeutlicht werden, wie das Verhalten von Menschen durch (einfache) Regeln abgebildet werden kann.

Um der Frage nach einer möglichen Modellierung des Wegwahlverhaltens von Fußgängern in Evakuierungssituationen nachgehen zu können, wollen wir uns zunächst die Ergebnisse eines Experiments anschauen, durchgeführt in einem großen Supermarkt in Japan. Dabei

wurde falscher Rauch in Verbindung mit Feualarm eingesetzt, um die Kunden zum Verlassen des Supermarkts zu bewegen. Nachdem alle 300 Personen das Gebäude verlassen hatten, wurden sie nach den Gründen für ihre Wegwahl befragt [1, zit. n. 18]:

1. **46,7 %** gaben an, dass sie Schildern und Auszeichnungen bzw. den Anweisungen der Verkäuferinnen folgten.
2. **26,3 %** gaben an, dass sie, um möglichst schnell vor dem Feuer zu entfliehen, in die dem Rauch entgegengesetzte Richtung liefen.
3. **16,7 %** benutzten den nächstgelegenen Ausgang.
4. **3,0 %** folgten anderen Personen.
5. **3,0 %** versuchten die Richtung, in welche die meisten Leute liefen, zu meiden.
6. **2,3 %** gaben an, dass sie in der Nähe einer Tür ein großes Fenster sahen, durch das sie hinausblicken konnten. Durch die Helligkeit angezogen, wählten sie ihn.
7. **1,7 %** suchten den Ausgang auf, durch den sie das Gebäude betreten hatten.

Viele Simulationsansätze implementieren weder Zeichen und Schilder, noch ein Gefahrenmodell mit realistisch anmutendem Rauch oder Feuer. Damit ist der dritte Punkt mit 16,7 % entscheidend: Im Gegensatz zu Fußgängern in Einkaufszentren, die viele Ziele besuchen und verschiedenste Tätigkeiten ausführen, sind Fußgänger in Evakuierungssituationen darauf bedacht, möglichst schnell aus der Gefahrenzone zu entkommen. Es ist somit zulässig, eine Vereinfachung weg vom *individuellen Routing*, hin zu einer *kollektiven Orientierung* vorzunehmen, um nicht die Vorteile der *Lokalität* von zellularen Automaten aufzugeben.

Es gibt einige Ansätze, um für einen gegebenen Raum eine Orientierung zu bestimmen, als womöglich bedeutendster Vertreter sollen hier die *Potentialfelder* vorgestellt werden. In [16] wird zwischen statischem und dynamischem differenziert: „Durch das *statische Grundfeld* werden durch die Geometrie vorgegebene Vorzugsrichtungen wie Ausgänge, oder Wände und Hindernisse realisiert. Für die Implementierung der Wechselwirkung zwischen den Fußgängern wird sich einer in Anlehnung an das biologische Phänomen der *Chemotaxis* konzipierte Idee bedient. Die Fußgänger hinterlassen bei ihrer Bewegung eine virtuelle Spur, die ihrerseits die Bewegung der anderen Fußgänger beeinflusst. Diese virtuellen Spuren bilden in ihrer Gesamtheit das *dynamische Grundfeld* und unterliegen zusätzlich Verfall und Diffusion.“ [16, S.38]

Mit dem statischen Grundfeld sollen attraktiv und repulsiv wirkende Raumregionen ausgezeichnet werden, weshalb allen Zellen des Gitters Werte zugewiesen werden. *Attraktoren* können dabei Ausgänge sein, *Repulsoren* Wände. Das kalkulierte Feld ist *zeitunabhängig*, d.h. es wird einmalig *vor* Beginn der Simulation berechnet und ändert sich danach nicht mehr. [16]

Welchen Wert eine Zelle erhält, wird über eine *Metrik* bestimmt. Im Normalfall geht es hierbei um den Abstand der Zelle zum Ausgang. Beginnend mit der Zelle des Ausgangs breiten sich die *Potentialwerte*  $d$  der Metrik wellenförmig aus. In den meisten *regelbasierten* Modellen erhalten weit entfernte Zellen dabei höhere Potentiale als solche nahe zum Ausgang, in *probabilistischen* ist es zumeist umgekehrt. Im ersteren Fall versuchen die Fußgänger den *minimalen* Potentialwerten zu folgen, um so schnellstmöglich zum Ausgang zu gelangen.

Zur Bestimmung der Potentialwerte gibt es verschiedene Metriken. Für einen leeren Raum mit nur einem Ausgang, kann die *euklidische Metrik* verwendet werden, die quasi die Luftlinie zwischen zwei Punkten widerspiegelt:

$$d(r, r_{exit}) = \sqrt{(r_{exit}^x - r^x)^2 + (r_{exit}^y - r^y)^2} \quad (4.4)$$

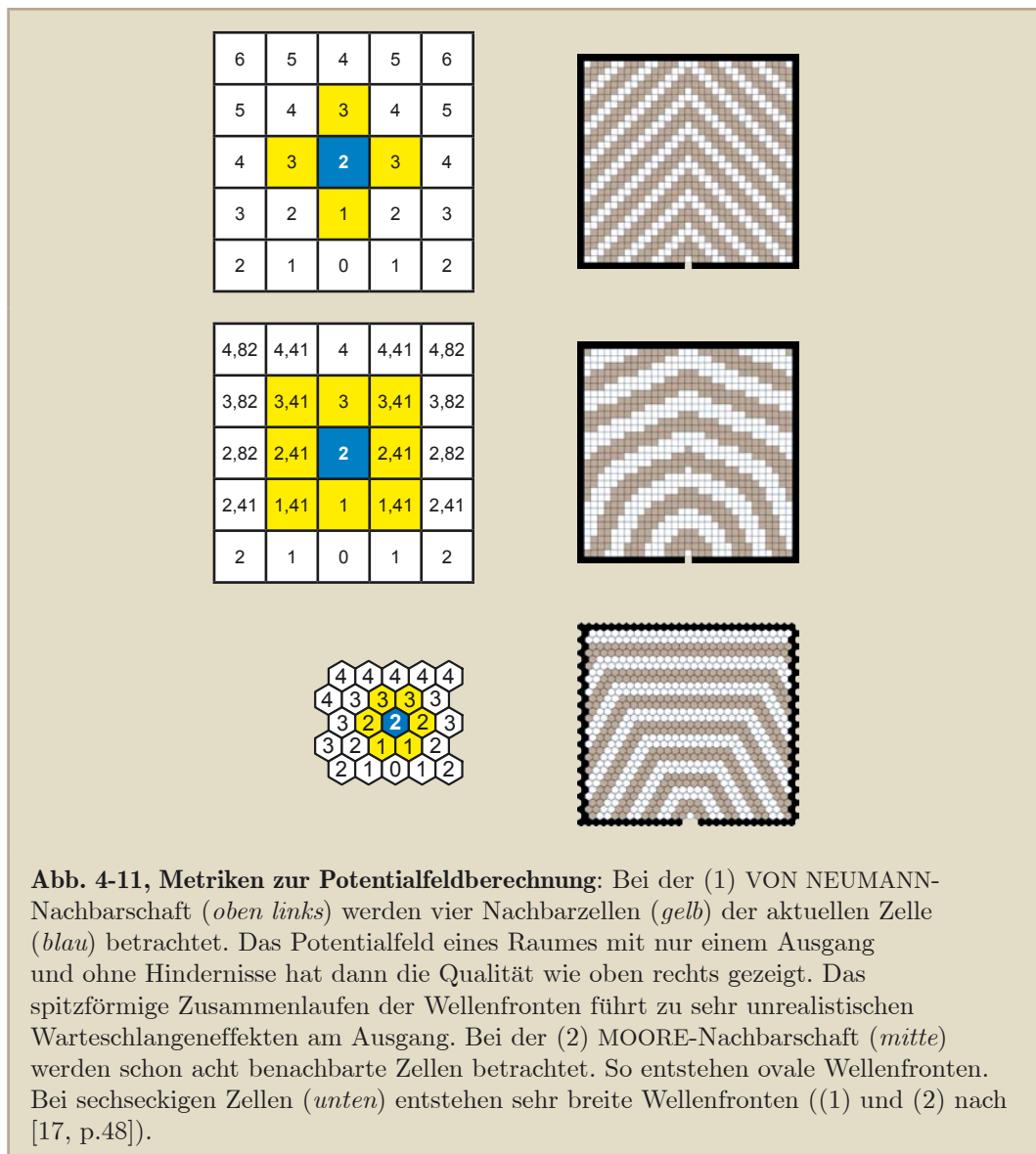
Für Räume mit Hindernissen ist sie jedoch ungeeignet, da sie die Luftlinie zwischen zwei Punkten beschreibt, diese aber nun durch ein Hindernis blockiert wird.

Besser geeignet – zumindest für quadratische Zellen – ist da schon die *Manhattan-Metrik*, welche den Abstand einer Zelle zum Ausgang nicht über die *direkte* Verbindung berechnet, sondern nur *horizontale* bzw. *vertikale* Schritte über *Kanten*, keinesfalls jedoch *diagonale* über *Ecken* zulässt und somit an Straßenzüge in Manhattan erinnert.

Der Vorteil der Manhattan-Metrik ist, dass mit ihr selbst komplexe Geometrien bedient werden können, da – entgegen der euklidischen – alternative Routen offenstehen, sollte sich auf dem Weg zum Ausgang ein Hindernis auftun.

Bei der Manhattan-Metrik werden – in quadratischen Zellen – vier mögliche Richtungen betrachtet, was der VON NEUMANN-Nachbarschaft entspricht. Wie Bild 4-11 zu entnehmen ist, entsteht dabei jedoch ein ungünstiges Muster für das Potentialfeld, da die Fußgänger in diesem Fall durch die spitzförmige Ausrichtung in die Mitte des Raumes gedrängt werden, wo die Potentialwerte am geringsten sind. Es kommt somit zu Warteschlangeneffekten an den Ausgängen. Abhilfe kann die Erweiterung auf eine MOORE-Nachbarschaft schaffen. Es entstehen dann ovale Wellenformen, die zu besseren Fluktuationen führen. In sechseckigen zellularen Automaten entstehen breite Wellenfronten mit demselben Potential, was in langen Korridoren mit Verzweigungen von Nutzen ist.

Algorithmisch gibt es verschiedene Ansätze, die Potentialfelder zu berechnen, in [20] werden mit einem *rekursiven*, einem *Warteschlangen*-Ansatz und einer *Prioritätswarteschlange* drei vorgestellt. Diese wurden auch im beiliegenden Demo-Programm *Potential Field Calculator* für viereckige und sechseckige zellulare Automaten umgesetzt. Die konkrete Implementation kann von der in [20] beschriebenen abweichen. Anhand des Programms lässt sich auch die Arbeitsweise der Algorithmen ablesen. Für hexagonale Gitterstrukturen wurde das *shift mapping* angewandt.



Eine große Stärke der Potentialfelder liegt neben der Einfachheit der Berechnung in der Möglichkeit, zusätzliche Informationen hinterlegen zu können. So wird ebenfalls in [20] vorgeschlagen, Informationen bspw. über die Begehbarkeit des Bodens in das statische Feld aufzunehmen.

Über Sensitivitätsparameter kann, wie in [16] beschrieben, der Einfluss von statischem und dynamischem Grundfeld auf die Wegwahlentscheidung variiert werden. In einem verräuchten Raum bspw. wäre es denkbar, den Anteil des statischen Grundfeldes zu senken, um fehlende Informationen über die Umgebung zu simulieren. In Paniksituationen könnte zusätzlich der Einfluss des dynamischen Feldes erhöht werden, um Herdenverhalten abzubilden.



## 5 Konklusion

Beginnend mit der Einleitung zu dieser Arbeit haben wir uns mit der Frage auseinandergesetzt, warum die Simulation von Fußgängern erstrebenswert ist und was denkbare Einsatzgebiete darstellen. Im zweiten Kapitel folgte dann die Begründung, warum die Simulation von menschlichem Verhalten überhaupt möglich ist – eben weil es gewissen Regelmäßigkeiten folgt. Wir haben die Verhaltenstendenzen jedes Einzelnen in normalen und auch in Paniksituationen kennengelernt, sowie einige daraus entstehende kollektive Bewegungsmuster. Die Charakteristika menschlichen Verhaltens, die wir betrachtet haben, fließen in der ein oder anderen Form in jedes Modell ein. Anhand der Bewegungsmuster und der Fundamentaldiagramme kann der Grad des Realismus eines Modells überprüft werden.

In Kapitel 3 wurde eine Einteilung in zwei wichtige Kategorien von Simulationsmodellen vorgestellt, von denen die mikroskopischen im vierten Kapitel mit Hilfe der zellularen Automaten näher beleuchtet wurden. Dabei wurde auf einige Charakteristika zellulärer Automaten unter Bezugnahme auf die Simulation von Fußgängern hingewiesen und die verschiedenen Gitterstrukturen und Nachbarschaften gegenübergestellt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen lässt sich festhalten, dass trianguläre Strukturen für unsere Zwecke ungeeignet erscheinen.

Insgesamt sei an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben, dass die vorliegende Seminararbeit nur eine *Einführung* in die Master Thesis darstellt, und aufgrund ihres Umfangs viele Bereiche nicht oder nur ungenügend abdecken konnte. Im Bereich der Regeln muss bei Entwurf eines eigenen Modellkonzepts sicherlich eine ganze Menge mehr beachtet werden, man denke da nur an das Stichwort *Multi-Speed-Modelle*<sup>7</sup>, in Folge dessen sich Fragen auftun, wie: Was ist mit den Laufwegen der Fußgänger, die mehr als eine Zelle pro Zeitschritt gehen dürfen? Sollen sie gesperrt werden oder nicht? Wie werden unterschiedliche Geschwindigkeiten in dem Updatemechanismus gehandhabt, so dass nicht ein heilloses Durcheinander entsteht? Was für Updatearten gibt es überhaupt und wie unterscheiden sie sich? Auch auf die Randbedingungen von zellularen Automaten wurde nicht eingegangen. Dies und vieles mehr wird Bestandteil einer wesentlich umfangreicheren Master Thesis sein (müssen), eine dazugehörige Implementation noch außen vor gelassen.

Wie bereits in der Einleitung geschrieben und im Rahmen des Vortrags hoffentlich auch bewiesen, ist das Thema interdisziplinär, sehr ergiebig und bietet somit auch viele Einstiegsmöglichkeiten für weitere Arbeiten.

---

<sup>7</sup> Also Modelle in denen die Fußgänger *unterschiedliche* Geschwindigkeiten haben.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Platzbedarf eines Fußgängers .....	07
Abb. 2-2: Segregationseffekte .....	08
Abb. 2-3: Oszillation an Engstellen und Warteschlangeneffekt .....	09
Abb. 2-4: Schneller-ist-langsam .....	10
Abb. 3-1: Analogie von Bewegungen in Fußgängermengen zu Flüssigkeiten .....	11
Abb. 3-2: Fundamentaldiagramme .....	15
Abb. 4-1: (ir-)reguläre Gitterstrukturen .....	16
Abb. 4-2: Annäherung von Fußgängern durch Grundformen .....	17
Abb. 4-3: Verteilung von Fußgängern bei hohen Dichten .....	17
Abb. 4-4: Abbildung rechteckiger Objekte .....	17
Abb. 4-5: Shear und shift mapping .....	18
Abb. 4-6: VON NEUMANN-Nachbarschaft .....	19
Abb. 4-7: Laufwege bei VON NEUMANN-Nachbarschaft .....	19
Abb. 4-8: MOORE-Nachbarschaft .....	20
Abb. 4-9: Nachbarschaftsdistanzen nach Grundform .....	20
Abb. 4-10: Unerlaubte Schrittmöglichkeiten .....	21
Abb. 4-11: Metriken zur Potentialfeldberechnung .....	24

## Literaturverzeichnis

- [1] Abe, K. (1986): *The Science of Human Panic* (auf Japanisch). Brain Publ. Co., Tokyo.
- [2] Alvarez, J. (2004): *The impossible tilings*. In: *Function*, no. 28, pp. 93-102. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter <http://www.math.nmsu.edu/~jalvarez/pdf/impossibletilings.pdf>
- [3] Clarke, L. (2002): *Panic: myth or reality?* In: *Contexts*, vol. 1, no. 3, pp. 21-26. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter [http://www.contextsmagazine.org/content\\_sample\\_v1-3.php](http://www.contextsmagazine.org/content_sample_v1-3.php)
- [4] Daamen, W./Hoogendoorn, S./Bovy, P. (2005): *First-order Pedestrian Traffic Flow Theory*. In: *Transportation Research Board Annual Meeting 2005*, pp. 1-14. Letzter Zugriff am 28-06-2006 unter <http://www.pedestrians.tudelft.nl/publications/TRB05d%20tft.pdf>
- [5] Helbing, D. (1992): *Models for Pedestrian Behavior*. In: *Natural Structures: Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature, Part II*, pp. 93-98. Stuttgart. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter [http://arxiv.org/PS\\_cache/cond-mat/pdf/9805/9805089.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/9805/9805089.pdf)
- [6] Helbing, D. (1997): *Verkehrsdynamik*. Springer, Berlin.
- [7] Helbing, D. (2003): *Agent-Based Simulation of Traffic Jams, Crowds, and Supply Networks – Reality, Simulation, and Design of Intelligent Infrastructures*. IMA „Hot Topics“ Workshop: Agent Based Modeling and Simulation. Letzter Zugriff am 20-05-2006 unter <http://www.ima.umn.edu/talks/workshops/11-3-6.2003/helbing/ima.pdf>
- [8] Helbing, D. (2004): *Sicherheit in Fußgängergruppen bei Massenveranstaltungen*. In: Freyer, W. and Groß, S. (Hrsg.): *Sicherheit in Tourismus und Verkehr*. Dresden. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter <http://www.age-info.de/PDF/SicherheitHelbing.pdf>
- [9] Helbing, D./Buzna, L./Johansson, A./Werner, T. (2005): *Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations and Design Solutions*. In: *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp.1-24.
- [Erhalt nach persönlicher Korrespondenz mit Prof. Dr. Helbing]
- [10] Helbing, D./Farkas, I./Molnár, P./Vicsek, T. (2002): *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*. In: Schreckenberg, M. and Sharma, S. (Eds.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 21-58. Springer, Berlin. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter <http://www.tu-dresden.de/vkiwv/vwista/publications/evacuation.pdf>
- [11] Helbing, D./Farkas, I./Vicsek, T. (2000): *Simulating Dynamical Features of Escape Panic*. In: *Nature*, vol. 407, pp. 487-490. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter [http://arxiv.org/PS\\_cache/cond-mat/pdf/0009/0009448.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0009/0009448.pdf)
- [12] Helbing, D./Molnár, P./Farkas, I./Bolay, K. (2001): *Self-organizing pedestrian movement*. In: *Environment and Planning B*, vol. 28, pp. 361-383. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter <http://pedsim.elte.hu/pdf/envplanb.pdf>

- [13] Helbing, D./Molnár, P./Schweitzer, F. (1994): *Computer Simulations of Pedestrian Dynamics and Trail Formation*. In: *Evolution of Natural Structures*, pp. 229-234. Stuttgart. Letzter Zugriff am 18-05-2006 unter [http://arxiv.org/PS\\_cache/cond-mat/pdf/9805/9805074.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/9805/9805074.pdf)
- [14] Johansson, A. (2004): Master Thesis *Pedestrian Simulations with the Social Force Model*. Dresden University of Technology, Institute for Transport & Economics. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter <http://vwitme011.vkw.tu-dresden.de/~johansson/thesis.pdf>
- [15] Kinkeldey, C. (2003): Studienarbeit *Fußgängersimulation auf der Basis zellularer Automaten*. Universität Hannover, Institut für Bauinformatik.  
[Erhalt nach persönlicher Korrespondenz mit Prof. Dr. Milbradt]
- [16] Kirchner, A. (2002): Dissertation *Modellierung und statistische Physik biologischer und sozialer Systeme*. Universität zu Köln, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter [http://www.thp.uni-koeln.de/~eb/phys/data/diss\\_aki.pdf](http://www.thp.uni-koeln.de/~eb/phys/data/diss_aki.pdf)
- [17] Klüpfel, H. (2003): Dissertation *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*. Universität Duisburg-Essen, Fakultät 4 – Naturwissenschaften. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=96883180x&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=96883180x.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=96883180x&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=96883180x.pdf)
- [18] Nishinari, K./Kirchner, A./Namazi, A./Schadschneider, A. (2004): *Extended floor field CA model for evacuation dynamics*. In: *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E87-D, no. 3, pp. 726-732. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter [http://arxiv.org/PS\\_cache/cond-mat/pdf/0306/0306262.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0306/0306262.pdf)
- [19] Sennewald, I. (2006): *Panikforschung*. In: *ARD nachtmagazin*. Letzter Zugriff am 21-05-2006 unter [http://sport.ard.de/wm2006/wm/news200601/11/video\\_panik\\_060111.jhtml](http://sport.ard.de/wm2006/wm/news200601/11/video_panik_060111.jhtml)
- [20] Stucki, P. (2003): Diplomarbeit *Obstacles in Pedestrian Simulations*. ETH Zürich, Dept. of Computer Science. Letzter Zugriff am 25-06-2006 unter <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=dipl&nr=129&part=text>
- [21] Weidmann, U. (1992): *Transporttechnik der Fußgänger*. In: *Schriftenreihe des IVT Nr. 90*, Zürich.
- [22] Weimar, J. (1997): *Simulation with cellular automata*. Logos-Verlag, Berlin.