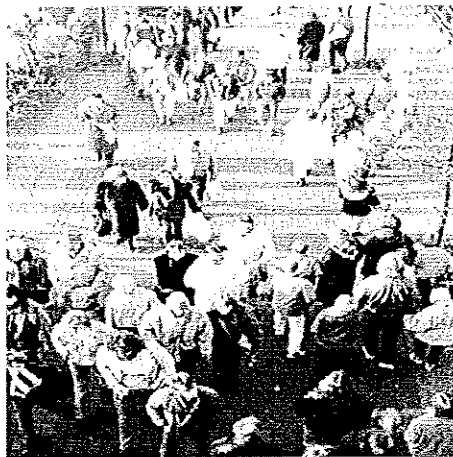


# Nichtlineare Phänomene in einem fluid-dynamischen Verkehrsmodell

Diplomarbeit

vorgelegt von

**Kai Bolay**



Hauptberichter: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Dirk Helbing

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Günter Wunner

II. Institut für Theoretische Physik

Universität Stuttgart

November 1998



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
Warum Fußgängermodelle? . . . . .	6
Theoretische Herausforderungen . . . . .	7
<b>1 Empirische Beobachtungen</b>	<b>9</b>
1.1 Geschwindigkeit . . . . .	9
1.2 Abstandhalten . . . . .	10
1.3 Kollektives Verhalten . . . . .	10
1.3.1 Bahnbildung . . . . .	10
1.3.2 Bahnstabilisierung durch Hindernisse . . . . .	12
1.3.3 Gruppenbildung . . . . .	12
1.3.4 Oszillation an Durchgängen . . . . .	13
1.3.5 Flußbett . . . . .	14
1.3.6 Kreisverkehr . . . . .	14
1.3.7 Trampelpfade . . . . .	14
1.4 Ziel- und Routenwahl . . . . .	16

<b>2</b>	<b>Bisherige Modelle</b>	<b>17</b>
2.1	Bedarfsabschätzung . . . . .	17
2.2	Evakuierung . . . . .	18
2.3	Routenwahl . . . . .	18
2.4	Makroskopische Modelle . . . . .	18
2.5	Mikroskopische Modelle . . . . .	19
2.5.1	Rastermodell . . . . .	19
2.5.2	Zellulärer Automat . . . . .	19
2.5.3	Das Soziale-Kräfte-Modell . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Simulation von Autobahnverkehr</b>	<b>25</b>
3.1	Das Bando Modell . . . . .	26
3.2	Das Modell von Nagel und Schreckenberg . . . . .	27
3.3	Das CA-Modell von Helbing . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Diskretisiertes Soziale-Kräfte-Modell</b>	<b>31</b>
4.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	33
4.2	Soziale Kräfte . . . . .	33
4.2.1	Antriebskraft . . . . .	33
4.2.2	Wechselwirkung zwischen Fußgängern . . . . .	34
4.2.3	Hindernisse und Attraktionen . . . . .	37
4.2.4	Fluktuationen . . . . .	39
4.3	Gradientenbestimmung . . . . .	39
4.4	Simulationsablauf . . . . .	40
4.4.1	Initialisierung . . . . .	40
4.4.2	Aktualisierung der Fußgängervariablen . . . . .	41

4.5	Rechenleistung . . . . .	41
4.6	Parameter . . . . .	43
4.7	Erweiterungen . . . . .	44
4.7.1	Dichteabhängige Wunschgeschwindigkeit . . . . .	44
4.7.2	Einbeziehung der Blickrichtung . . . . .	45
4.8	Ergebnisse . . . . .	45
4.8.1	Bahnbildung . . . . .	46
4.8.2	Oszillation an Engstellen . . . . .	47
4.8.3	Flußbett durch eine stehende Menge . . . . .	47
4.8.4	Kreisverkehr auf einer Kreuzung . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Qualitative und quantitative Bewertung</b>	<b>51</b>
5.1	Spezifikation der Bewertung . . . . .	51
5.1.1	Level of Service . . . . .	51
5.1.2	Effizienz . . . . .	52
5.1.3	Geschwindigkeitswechsel . . . . .	53
5.1.4	Wohlbefinden . . . . .	53
5.1.5	Kollisionen . . . . .	54
5.2	Einflüsse der Modellparameter . . . . .	54
5.2.1	Abhängigkeit von der Relaxationszeit $\tau$ . . . . .	55
5.2.2	Abhängigkeit vom Zeitschritt $\Delta t$ . . . . .	56
5.2.3	Abhängigkeit von der Dichte $\rho$ . . . . .	57
5.2.4	Abhängigkeit von der Potentialstärke $b_\beta$ . . . . .	59

<b>6 Optimierung</b>	<b>61</b>
6.1 Optimale Gestaltung von Fußgängeranlagen . . . . .	62
6.1.1 Bahnstabilisierung durch Hindernisse . . . . .	63
6.1.2 Gestaltungsmöglichkeiten an einer Kreuzung . . . . .	64
6.2 Optimierungsmethoden . . . . .	65
6.2.1 Simulated Annealing . . . . .	68
6.2.2 Genetische Algorithmen . . . . .	69
6.2.3 Evolutionsstrategien . . . . .	69
6.3 Evolution des Fußgängerverhaltens . . . . .	71
6.3.1 Evolution der Verhaltensstrategie in einer heterogener Population	72
6.3.2 Evolution der Verhaltensstrategie in einer homogener Population	74
6.3.3 Evolution des Ausweichverhaltens . . . . .	77
6.4 Evolutionäre Optimierung einer Fußgängeranlage . . . . .	79
<b>Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>
<b>Danksagung</b>	<b>97</b>

# Einleitung

Verkehr ist ein wichtiges Thema in unserer heutigen Gesellschaft. Mit der Entwicklung und Untersuchung von Modellen zur Simulation von Verkehr können Physiker dazu beitragen, daß die Mobilität, die uns unseren Wohlstand ermöglicht, erhalten bleibt. Das ungebremsst steigende Verkehrsaufkommen beim Autoverkehr macht es nötig, die vorhandene Infrastruktur umweltverträglich zu verbessern. Durch geeignete Modelle kann untersucht werden, welche Maßnahmen den Verkehrsfluß erhöhen. Aufgrund des hohen Stellenwertes des Autoverkehrs in unserer Gesellschaft und seiner enormen wirtschaftlichen Bedeutung hat das Interesse an seiner Erforschung, insbesondere bei Physikern, in letzter Zeit stark zugenommen.

Die Dominanz des Autoverkehrs hat in den '60er Jahren die Fußgänger an den Rand gedrängt. Erst in den '80er Jahren wurden Fußgängerzonen und Parks angelegt und verstärkt auf das Wohlbefinden dieser wichtigen Verkehrsteilnehmer geachtet. Fußgängermengen zeigen reichhaltige kollektive Bewegungsmuster. Mit Hilfe der quantitativen Soziodynamik ist es möglich, viele dieser faszinierenden Bewegungsmuster durch nichtlineare Wechselwirkungen zu erklären.

In dieser Arbeit soll ein Mikrosimulationsmodell entwickelt werden, das durch eine hohe Rechengeschwindigkeit die Untersuchung von Fußgängerströmen schneller als in Echtzeit ermöglicht, ohne dabei mikroskopische Selbstorganisationsphänomene vernachlässigen zu müssen. Dabei werden die Erkenntnisse aus der Modellbildung für den Autoverkehr verwertet.

Durch die hohe Rechengeschwindigkeit wird es möglich, Fußgängeranlagen schon in der Planungsphase zu evaluieren und zu optimieren. Die grafische Darstellung der Dynamik und die Möglichkeit, die Modellparameter während der Simulation zu ändern, erlauben die direkte Überprüfung der Einflüsse bestimmter Parameter.

## Warum Fußgängermodelle?

Schon sehr früh wurde bei der Messung der Orts- und Geschwindigkeitsverteilung von Fußgängern die Ähnlichkeit zu den entsprechenden Meßwerten von Molekülen in Flüssigkeiten und Gasen festgestellt. Dies legt die Anwendung von Methoden der Physik zur Untersuchung von Fußgängerströmen nahe.

Es ist erstaunlich, daß sich die Methoden der klassischen Mechanik und statistischen Physik als ausreichend erweisen, belebte Systeme zu beschreiben. Es sind sogar quantitative Aussagen möglich.

Obwohl Fußgänger einen freien Willen haben, zeigt es sich, daß dieser bei der reflexartigen Navigation in einer Fußgängergruppe eine untergeordnete Rolle spielt. Der Wille äußert sich überwiegend in dem Bestreben, eine Wunschrichtung mit einer Wunschgeschwindigkeit anzusteuern. Die Wahl dieser Wunschrichtung ist Ergebnis einer Routenplanung, die sich unabhängig von der Bewegung in der Menge behandeln läßt.

Fußgänger scheinen zu versuchen, Interaktionen zu minimieren, was zur Bahnbildung und eventuell auch zu einem Kreisverkehr an Kreuzungen führen kann. Selbst komplexe Phänomene, wie die Oszillation der Durchgangsrichtung an Engpässen, können verstanden werden, ohne zusätzlich kommunikative Prozesse oder strategisches Handeln anzunehmen. Sie sind Selbstorganisationsphänomene und als solche eine Konsequenz von nichtlinearen Wechselwirkungen. Makroskopische Modelle können diese Phänomene nur wesentlich schwerer berücksichtigen.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Realität ist aufgrund der leicht zugängliche Meßdaten relativ einfach. Das Verhalten von Fußgängern ist in erster Näherung aus eigener Erfahrung, aber auch aus (Zeitraffer-) Filmen bekannt. So ist eine Verifizierung des Modells ohne besonderen Aufwand möglich. Dies ist bei vielen anderen sozialen Systemen leider nicht so einfach möglich.

Gerade bei der Planung von Gebäuden, in denen sich viele Fußgänger aufhalten (z.B. Bahnhöfen, Flughäfen, Fußballstadien und Einkaufspassagen), ist die Möglichkeit der genauen Voraussage des Fußgängerflusses wichtig. Nur so kann in Notfällen (z.B. bei Feuer) eine erfolgreiche Evakuierung gewährleistet werden. Die Benutzungsqualität ist eine weitere wichtige Eigenschaft von Fußgängeranlagen, die bereits in der Planung berücksichtigt werden sollte.



---

## Theoretische Herausforderungen

Erschwert wird die physikalische Betrachtung von Fußgängerströmen durch den Umstand, daß viele Annahmen, die für die Behandlung von Gasen und Flüssigkeiten gelten, bei Fußgängermengen nicht haltbar sind. So ist die Energie- und Impulserhaltung verletzt; die Kräfte zwischen den einzelnen Fußgängern erfüllen nicht das Newtonsche Gesetz ( $\text{Actio} = \text{Reactio}$ ). Auch sind die Wechselwirkungen anisotrop, da Fußgänger hauptsächlich auf Vorgänge in Ihrem Blickfeld reagieren.

Weitere Komplikationen ergeben sich aus den starken Dichteschwankungen, die in Fußgängermengen auftreten.

Der freie Wille der Fußgänger schlägt sich hauptsächlich dadurch nieder, daß sich Ströme mit unterschiedlicher Zielrichtung kreuzen, wobei kein Fußgänger von seinem Zielwunsch abrückt. Bei Fußgängermengen handelt es sich also um getriebene Systeme. Daher erweisen sich auch Beschreibungsansätze aus dem Bereich der granularen Medien als sehr hilfreich.

Um die Rechenzeit einer Simulation möglichst klein zu halten, sind schwierige Entscheidungen bei der Modellierung zu treffen. Einerseits soll das Modell möglichst einfach und vor allem effizient zu implementieren sein, andererseits muß es weiterhin konsistent mit den bekannten Meßwerten bleiben und die beobachteten Selbstorganisationsphänomene zeigen.

Ein gutes Modell zeichnet sich dadurch aus, daß es mit möglichst wenigen Parametern auskommt, deren Bedeutung klar definiert ist. Dadurch wird die Kalibrierung des Modells stark vereinfacht, und die Einflüsse der Änderung bestimmter Parameter bleiben verständlich. Dennoch ist die Bestimmung eines *optimalen* Parametersatzes sehr schwierig. Da bei der Bewertung der Fußgängerströme viele Vorbedingungen einer analytischen Optimierung verletzt sind, müssen moderne Verfahren, wie z.B. die von der Natur inspirierten Evolutionsstrategien, zum Einsatz kommen.



# 1 Empirische Beobachtungen

Bereits in den 60er Jahren wurden Fußgängergruppen untersucht. Dabei stand die Entwicklung von Richtlinien zur Dimensionierung von Fußgängeranlagen im Vordergrund. Dazu wurden viele Daten erhoben. Die wichtigsten dieser Meßdaten sind in [Wei93] zusammengefaßt. In [Hel97] findet sich eine Übersicht und Zusammenfassung der empirischen Fakten, sowie eine ausführliche Literaturliste, die es ermöglicht, den gesamten Fundus an Meßwerten zu erschließen.

Jedes Modell wird daran gemessen, wie gut es die Wirklichkeit abbildet. Um einen Vergleich zu ermöglichen, müssen aussagekräftige empirische Daten vorliegen oder gewonnen werden. Glücklicherweise sind die wichtigsten Daten der Fußgängerdynamik direkt und einfach meßbar.

## 1.1 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit von Fußgängern liegt im Durchschnitt bei 1,34 m/s und ist nahezu normalverteilt (mit Standardabweichung 0,26 m/s). Auffällig ist, daß Männer mit 1,41 m/s im Durchschnitt ca. 10% schneller als Frauen (1,27 m/s) gehen. Auch vom Alter hängt die Geschwindigkeit ab: Am schnellsten sind die Zwanzigjährigen. Personen über 50 Jahre, bewegen sich deutlich langsamer.

Auch die Außentemperatur spielt eine Rolle: Bei Hitze wird aufgrund der hohen Anstrengung langsamer gegangen. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Art des Fußgängerverkehrs. Menschen, die sich auf dem Weg zur Arbeit befinden, gehen schneller und aggressiver.

Bei der Simulation sollte die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten entsprechend den äußeren Umständen und den erwarteten Nutzern vorgegeben werden.

## 1.2 Abstandhalten

Anders als Autofahrer nehmen Fußgänger bei hohen Dichten Berührungen (Kollisionen) mit anderen Fußgängern in Kauf. Dennoch sind sie natürlich bestrebt, insbesondere bei hoher Geschwindigkeit, möglichst nicht zusammenzustoßen. Deshalb halten sie einen geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand zu anderen Verkehrsteilnehmern (und Hindernissen) ein. Während schon bei einer Fußgängerdichte von über  $1 \text{ P/m}^2$  (eine Person pro Quadratmeter) von einem Gedränge gesprochen wird, kommt die Bewegung erst bei  $5,4 \text{ P/m}^2$  zum völligen Erliegen. Der minimaler Platzbedarf eines Fußgängers beträgt sogar nur  $0,15 \text{ m}^2$ .

Bei zu hohen Dichten kann leicht eine Panik entstehen, bei der die Steuerungsfähigkeit des Individuums stark eingeschränkt ist. Dies ist bei der Planung von Fluchtwegen zu berücksichtigen [EOI92].

Nicht nur zu anderen Fußgängern wird ein gewisser Abstand eingehalten, sondern auch zu Gebäuden. Normalerweise beträgt der Abstand zu Wänden in Gebäuden mindestens  $0,25 \text{ m}$ . Dabei hat die Beschaffenheit der Wand einen Einfluß auf den bevorzugten Abstand. Im Freien ist der Abstand von Hauswänden ca.  $0,45 \text{ m}$  und der zur Straße ca.  $0,35 \text{ m}$ .

## 1.3 Kollektives Verhalten

Beim Studieren von Zeitrafferfilmen [Arn89] wird sehr deutlich, daß sich in Fußgängergruppen kollektive Phänomene ausbilden, ohne daß es dazu einer zentralen steuernden Instanz bedarf. Diese Phänomene sind das Resultat nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fußgängern.

### 1.3.1 Bahnbildung

Schon bei geringer Dichte bilden sich Bahnen, in denen sich Fußgänger mit gleicher Gehrichtung bewegen. Fußgänger, die anderen folgen, müssen deutlich weniger ausweichen und bremsen und kommen dadurch schneller voran.

Die Bahnen werden immer wieder durch kreuzende und überholende Fußgänger gestört, bilden sich aber sehr schnell neu.



Abbildung 1.1: Bahnbildung auf dem Weg vom und zum Hamburger Fischmarkt (aus [Hel97])

Es wird empirisch beobachtet, daß Fußgänger im allgemeinen beim Ausweichen die rechte Seite bevorzugen. Dies ist erstaunlicherweise unabhängig von der im Straßenverkehr vorgeschriebenen Seite [Old68].

Computer-Simulationen zeigen jedoch, daß eine Vorzugsseite zwar Effizienzvorteile bringt, jedoch für die Ausbildung von Bahnen nicht notwendig ist. Diese entstehen auch bei einem vollständig symmetrischen Modell.

Bei der Elektrolyse einer Salzlösung treten ebenfalls entgegengesetzte, sich kreuzenden Ströme auf. Hier wird jedoch keine Bahnbildung beobachtet, weil sich die entgegengesetzten Ströme gegenseitig anziehen.

Eine Trennung in Bahnen wird jedoch bei Flüssigkeiten beobachtet, wenn diese aus einer Mischung von Teilchen bestehen, bei denen sich gleichartige Teilchen stärker anziehen als verschiedenartige [JR93], oder falls Teilchen unterschiedliche Dichte oder Größe haben (getriebene granulare Medien [Her95]).

### 1.3.2 Bahnstabilisierung durch Hindernisse

Durch Hindernisse in einem Korridor können die entstehenden Bahnen stabilisiert werden. Fußgängerflüsse mit unterschiedlicher Zielrichtung stören sich dann nicht gegenseitig.



Abbildung 1.2: Bahnstabilisierung durch regelmäßig angeordnete Säulen in einer Budapester U-Bahn-Station (Foto: D. Helbing)

Durch eine Art optische Verschränkung (siehe Abbildung 1.3 auf der nächsten Seite) wirkt eine Säulenreihe wie eine Wand. Folglich bemerken Fußgänger gar nicht, was auf der anderen Seite der Hindernisreihe passiert. So werden sie nicht gestört und bleiben in ihrer Bahn. Trotzdem ist die „Barriere“ leicht durchdringlich, da die Säulen in relativ großen Abständen angeordnet sind. Ein langsamer Fußgänger, der sich orientieren will, kann leicht die Seite wechseln.

### 1.3.3 Gruppenbildung

Befreundete Fußgänger halten einen kleineren Abstand zueinander als Fremde. Treffen sich Freunde und bleiben zu einem Gespräch stehen, oder bildet sich um einen Straßenkünstler eine Menschenansammlung, so hat dies unübersehbare Parallelen zur Keimbildung bei der Kondensation von Gasen [SSGEU88, SU91, SSG94, ESGS90]. Zur theoretischen Voraussage der Gruppengröße lassen sich Ratengleichungen aufstellen [CHJ61, Hel97].



Abbildung 1.3: Regelmäßig angeordnete Säulen erscheinen fast wie eine undurchdringliche Wand (Foto: D. Helbing)

#### 1.3.4 Oszillation an Durchgängen

An engen Durchgängen (z.B. Türen, schmalen Korridoren oder Treppen) ist zu beobachten, daß die Engstelle, bei hoher Personendichte, von ganzen Personenpulks in abwechselnder Richtung passiert werden. Dabei wächst die Frequenz des Richtungswechsels mit abnehmender Länge und zunehmender Breite der Engstelle. Bei ausreichender Breite wird die Engstelle in beiden Richtungen gleichzeitig passiert.

Die Simulation zeigt, daß für den Richtungswechsel keine Kommunikation zwischen den Fußgängern stattfinden muß. Es ist also nicht nötig, daß ein Fußgänger die Freundlichkeit besitzt, der anderen Bewegungsrichtung den Vortritt zu lassen (vgl. Abschnitt 4.8.2 auf Seite 47).

Aus der Physik sind ähnliche oszillierende Phänomene bekannt. Wird ein Becher, der am Boden eine kleine Öffnung hat, mit einer Salzlösung gefüllt und in ein Wasserbad gesetzt, so kann eine Oszillation der Durchflußrichtung auftreten [YOSN91]. Es wurde auch beobachtet, daß bei Sanduhren für bestimmte Parameter (wie z.B. die Korngröße des Sandes) Oszillationen auftreten können [WMH<sup>+</sup>93, LMH<sup>+</sup>96].

### 1.3.5 Flußbett

Bewegt sich eine Anzahl von Fußgänger durch eine stehende Menge, so bildet sich eine Art Flußbett aus (Abbildung 1.4). Dabei kommt es zu fingerartigen Ausstülpungen an den Grenzflächen [SO86].

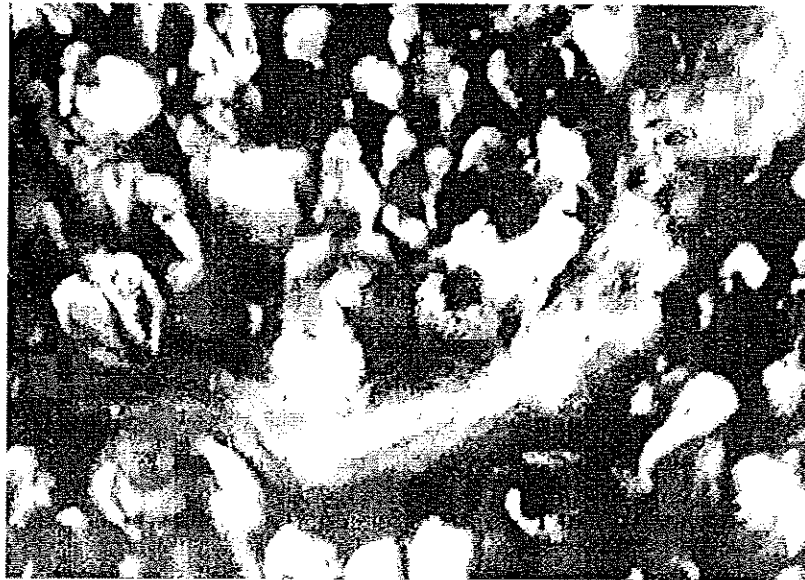


Abbildung 1.4: Aus einem Kino strömende Fußgänger bilden eine Art Flußbett (aus [Arn89])

### 1.3.6 Kreisverkehr

Ein selbstorganisierter Kreisverkehr an Fußgängerkreuzungen wurde noch nicht empirisch beobachtet. Abbildung 1.5 auf der nächsten Seite zeigt einen sehr schönen organisierten Kreisverkehr um die Kaaba in Mekka.

Bei getriebenen Teilchen ist die Bildung eines Vortex zu beobachten [DHT95]. Molnár [Mol95] findet einen Kreisverkehr auch bei der Simulation von Fußgängern.

### 1.3.7 Trampelpfade

In zahlreichen Parks lassen sich trotz bestehender Wege Trampelpfade beobachten. Sobald der relative Umweg eine bestimmte Toleranzgrenze überschreitet, verlassen



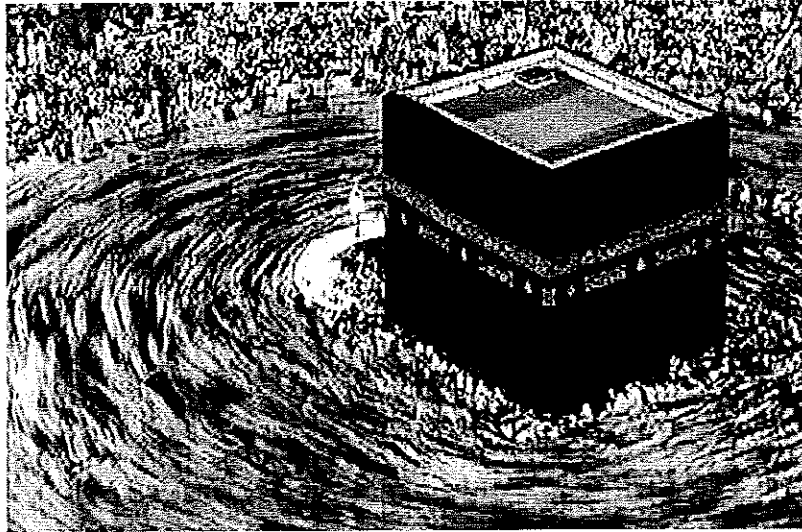


Abbildung 1.5: Kreisverkehr um die Kaaba in Mekka (aus [Nom97])



Abbildung 1.6: Trampelpfade auf dem Campus in Vaihingen der Universität Stuttgart (aus [Hel97])

die Fußgänger die angelegten Wege und lassen sich dabei kaum von Hindernissen oder schlechten Untergrundbedingungen beirren.

Trampelpfade sind nicht immer direkten Verbindungen zwischen Verkehrsknoten. Sie stellen einen Kompromiß zwischen einer möglichst kurzen Weglänge und der Nutzung

bereits vorhandener Wege dar. Helbing et. al. [Kel96], [HKM97] ist es gelungen, ein einfaches Modell zu entwickeln, das dieses Verhalten beschreibt: Fußgänger bevorzugen bereits vorhandene Pfade und nehmen dafür auch kleine relative Umwege in Kauf. Häufig genutzte Trampelpfade werden auffälliger und deshalb für andere Fußgänger attraktiver. Selten benutzte Pfade verwittern oder verwachsen mit der Zeit und verschwinden. Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet das in [SLF97] vorgestellte Modell zur Simulation von Ameisenstraßen.

## 1.4 Ziel- und Routenwahl

Muß ein Fußgänger mehrere Orte in beliebiger Reihenfolge besuchen, so ist er im Allgemeinen bemüht, die Gesamtstrecke möglichst gering zu halten. Obwohl die Abneigung gegen Umwege sehr groß ist, werden sie in Kauf genommen, wenn der Untergrund schwer begehbar ist oder große Steigungen überwunden werden müssen.

Die Planung der Wegstrecke geschieht unabhängig von der aktuellen Gehsituation. Ist das nächste Ziel nicht direkt von der aktuellen Position zu erreichen, so wählen die Fußgänger Zwischenziele, auf die sie geradlinig zusteuern. Bei der Wahl der Zwischenziele orientieren sie sich an markanten Punkten [Sch95]. Starke Richtungswechsel werden gemieden.

Nur in extremen Situationen, wie bei der kompletten Verstopfung eines Fußgängerwegs, oder falls der Fußgänger unterwegs merkt, daß er etwas vergessen hat, ändert sich die Wunschrichtung, bevor ein Zwischenziel erreicht wurde.

## 2 Bisherige Modelle

Für die verschiedenen Aspekte des Fußgängerverkehrs gibt es verschiedene Modelle. Die zunächst vorgestellten Modelle zur Bedarfsabschätzung, Evakuierung und zur Routenwahl vernachlässigen die dynamischen Effekte der individuellen Wechselwirkungen zwischen den Fußgängern. Während dies bei den Routenwahl-Modellen gerechtfertigt ist, leiden die anderen Modelle darunter, daß die Effekte der vielfältigen kollektiven Phänomene unberücksichtigt bleiben.

Ein Hauptgrund, der zur Vernachlässigung dieser Phänomene beigetragen hat, ist der hohe Rechenaufwand für mikroskopische Modelle.

### 2.1 Bedarfsabschätzung

Zur Bemessung von Fußgängeranlagen dienen einfache Regressionsmodelle, die in Analogie zur Hydrodynamik eine Gleichung für die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte aufstellen. Entscheidend ist hierbei das Fundamentaldiagramm, das den Zusammenhang zwischen Fluß und Dichte beschreibt. Die passenden Gleichungen für verschiedene Verkehrsflächen finden sich in [Wei93].

Den Fußgängern kann unter normalen Umständen nicht zugemutet werden, sich mit einer niedrigen Geschwindigkeit von nur 0,7 m/s und bei einer hohen Dichte von 1,75 P/m<sup>2</sup> fortzubewegen, obwohl dies die Werte für die höchste Leistungsfähigkeit sind. Es werden deshalb Bewertungsgrundlagen benötigt, die die Nutzungsqualität (den Level of Service) beschreiben (siehe Abschnitt 5.1.1 auf Seite 51).

## 2.2 Evakuierung

Da bei einer Evakuierung die Zeit bis zum Verlassen der Gefahrenzone im Vordergrund steht, werden häufig Warteschlangenmodelle verwendet, um den Ablauf einer Evakuierung zu simulieren (siehe [Løv93, Løv94] und [YM89]).

Dabei sind die Räume (mit begrenzter Kapazität) Knoten in einem Netzwerk, dessen Kanten die Verbindungswege (mit begrenzter Leistungsfähigkeit) sind.

Die Bewegung von einem Raum in einen anderen wird dann durch stochastische Modelle (z.B. Markov-Modelle oder Mastergleichungs-Modelle) beschrieben. Die Übergangsraten hängen von der Belastung der Knoten und Kanten, sowie deren baulicher Gestaltung ab. Sie müssen mit Hilfe von anderen Modellen oder durch Messung bestimmt werden.

## 2.3 Routenwahl

Die Auswahl der Ziele, die Fußgänger ansteuern, läßt sich mit entscheidungstheoretischen Modellen voraussagen. Dabei kommen häufig Varianten des sog. Multinomial-Logit-Modells zur Anwendung.

Sind die Ziele fest vorgegeben, so versuchen Fußgänger eine möglichst kurze Wegstrecke zu finden, die alle Ziele verbindet. Dieses Problem ist als Travelling-Salesman-Problem bekannt.

Um die Streckenbelastung in Wegenetzen zu bestimmen, kann der Warshall-Floyd-Algorithmus [Mol95, Kapitel 7] benutzt werden.

## 2.4 Makroskopische Modelle

Empirisch erhobene Daten über die Geschwindigkeits- und Dichteverteilung von Fußgängermengen weisen Ähnlichkeiten zu Verteilungen aus gaskinetischen und hydrodynamischen Modellen auf. Henderson und Mitarbeiter [Hen71, HJ74, Hen74] haben Messungen und vergleiche mit diesen Modellen durchgeführt. Die Annahme, daß Energie und Impulserhaltung gelten, ist jedoch unrealistisch.

Helbing verzichtet auf diese Annahmen und entwickelte Boltzmann-artige Gleichungen [Hel92a, Hel92b]. Dabei ist eine Berücksichtigung von verschiedenen Subpopulationen mit verschiedenen Wunschgeschwindigkeiten und Zielrichtungen nötig.

Die Annahme einer kontinuierlichen Phasenraumdicke, die diesen Ansätzen zugrunde liegt, ist jedoch nur für die Betrachtung von Mittelwerten über relativ große Flächen, Geschwindigkeits- und Zeitintervalle gerechtfertigt.

## 2.5 Mikroskopische Modelle

Mikroskopische Modelle haben den Vorteil, daß individuelle Unterschiede leicht berücksichtigt werden können. Alle Größen sind direkt zugänglich und ermöglichen eine genaue Analyse selbst von experimentell schwierig zu ermittelnden Daten, wie z.B. der Häufigkeit von Richtungs- und Geschwindigkeitswechsell.

Trotz dieser Vorzüge wurden bisher relativ wenige mikroskopische Modelle entwickelt.

### 2.5.1 Rastermodell

Im Modell von Ebihara, Ohtsuki und Iwaki [EOI92] zur Simulation von Evakuierungen bewegen sich die Fußgänger auf einem groben Raster. Jeder Rasterpunkt enthält Informationen über die Richtung und den Zustand der nächsten Ausgänge, sowie die Anzahl der Fußgänger an diesem Punkt. Die Lernfähigkeit der Fußgänger wird berücksichtigt. Die Dynamik der Bewegung zwischen den Knoten des Rasters wird aber vernachlässigt.

### 2.5.2 Zellulärer Automat

Von Gibbs und Marksjö [GM85] wird ein Modell beschrieben, daß die begehbare Fläche in ein quadratisches Gitter mit der Seitenlänge 0,5 m unterteilt. Auf diesem Gitter bewegen sich die Fußgänger. Ihre (Wunsch-)Geschwindigkeit kann Werte von 0 m/s bis 2,5 m/s in Schritten von 0,5 m/s annehmen. Jeder Gitterpunkt ist mit maximal einem Fußgänger belegt.

Jeder Fußgänger beeinflusst seine Umgebung, indem er das Feld auf dem er sich befindet und die acht umliegenden Felder mit Potentialwerten belegt. Auch Hindernisse und Wände werden durch eine Belegung von Feldern modelliert.

Zur Fortbewegung wird ein Fußgänger auf eines der acht umgebenden Felder bewegt, oder er bleibt stehen. Die Entscheidung hängt davon ab, auf welchem der neun Felder das Potential ein Minimum hat. Zu jedem Potentialwert wird noch ein weiterer Wert addiert, der umso größer ist, je stärker dieser Schritt von der Wunschrichtung abweicht.

Die unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten werden dadurch realisiert, daß bei Fußgängern mit Wunschgeschwindigkeit 2,5 m/s fünf mal pro Sekunde eine Fortbewegung versucht wird, bei kleineren Wunschgeschwindigkeiten entsprechend seltener.

Aufgrund der starken Diskretisierung, der leichten Parallelisierbarkeit und großen Zeitschritten ist dieses Modell sehr schnell zu simulieren. Es gibt wichtige Phänomene wie die Bahnbildung korrekt wieder. Leider ist das Modell zu grob, um Phänomene wie die Oszillation der Durchgangsrichtung an Türen oder einen Kreisverkehr an Kreuzungen beschreiben zu können. Auch lassen sich die Parameterwerte (Besetzungszahlen) nicht schlüssig aus den bekannten Verhaltensweisen der Fußgänger herleiten.

### 2.5.3 Das Soziale-Kräfte-Modell

Das Kräfteprinzip spielt in der Physik eine zentrale Rolle: Nach Newton ändert sich die Geschwindigkeit (bzw. der Zustand) eines Teilchens nur, wenn entsprechende Kräfte wirken. Beim menschlichen Verhalten ist es ähnlich: Wenn ein Individuum mit der Situation zufrieden ist, ändert es sein Verhalten nicht. Nur falls es einen Grund für eine Verhaltensänderung gibt, findet diese auch statt. Daher liegt es nahe zu versuchen, die Gründe für Verhaltensänderungen als sozialen Druck aufzufassen und sie durch soziale Kräfte zu beschreiben.

#### Die Theorie der sozialen Kräfte

In den Sozialwissenschaften und in der Psychologie werden Modelle entwickelt, die das Verhalten von Individuen im „sozialen Raum“ erklären und verstehen helfen.

Lewins soziale Feldtheorie [Lew51] erklärt das Verhalten eines Individuums durch das Zusammenwirken von Umgebung, öffentlicher Meinung, Trends und sozialen Normen. Diese Einflüsse werden zu einem sozialen Feld zusammengefaßt.

Die Dynamic Social Impact Theory von Latané [Lat81] beschreibt die soziale Wechselwirkung im realen Raum. Sie ist empirisch gut begründet. Unter sozialer Wechselwirkung versteht man in diesem Fall z.B. die Zuweisung einer Rolle in einer Gruppe oder die Übernahme einer Meinung in einer Diskussion. Dabei hängt die Wirkung auf das Zielindividuum funktional vom Produkt der Stärke  $S$ , der Direktheit  $I$  und der Anzahl  $N$  der anderen Individuen (Quellen) ab:

$$W = f(SIN) \quad (2.1)$$

Die Direktheit  $I$  modelliert den Einfluß, den die Quelle auf das Zielindividuum hat und ist von deren Beziehung zueinander abhängig. Im einfachsten Falle kann hier die inverse räumliche Distanz oder die Kontakthäufigkeit angenommen werden.

Das von Helbing [Hel92b] entwickelte Soziale-Kräfte-Modell beschreibt die Verhaltensweisen eines Individuums durch die Komponenten eines Vektors  $\vec{x}$  in einem mehrdimensionalen, kontinuierlichen Verhaltensraum. Es kann als mathematische Formulierung der sozialwissenschaftlichen Feldtheorien verstanden werden.

Das Verhalten eines Individuums  $\alpha$  ändert sich mit der Zeit durch den Einfluß einer sozialen Kraft  $\vec{F}$ , die von den Verhaltensweisen aller anderen Individuen  $\beta$  abhängt. Hinzu kommt ein Fluktuationsterm  $\vec{\mathcal{F}}$ , der Entscheidungen in ambivalenten Situationen, sowie zufällige und unsystematische Einflüsse modelliert:

$$\frac{d\vec{x}_\alpha(t)}{dt} = \vec{F}_\alpha(\{\vec{x}_\beta(t)\}, t) + \vec{\mathcal{F}}_\alpha(t) \quad (2.2)$$

Für die Kräfte gilt das Superpositionsprinzip: Sie können vektoriell addiert werden. Dies bedeutet, daß sich die verschiedenen sozialen Kräfte nicht gegenseitig beeinflussen. Es zeigt sich, daß diese Vereinfachung in vielen Anwendungsfällen gerechtfertigt ist.

Im Gegensatz zu physikalischen Systemen gilt jedoch nicht „Actio = Reactio“, da die gegenseitigen Einflüsse der Individuen untereinander durchaus unterschiedlich sein können.

Auch die in der klassischen Mechanik bewährte Energie- und Impulserhaltung ist bei sozialen Systemen nicht erfüllt, da z.B. externe Einflüsse ihre Wirkung im Laufe der Zeit verlieren, oder die Individuen aus eigenem Antrieb ein bestimmtes Ziel verfolgen.

### Spezifikation des Fußgänger-Modells

Von Helbing [Hel90, Hel91] stammt auch die Idee, das Soziale-Kräfte-Modell auf die Fußgängerbewegung anzuwenden. Die Behandlung von Fußgängermengen als physikalisches System liegt wegen der gemessenen Gemeinsamkeiten mit Flüssigkeiten und Gasen [Hen71, HJ74, Hen74] nahe.

Die Kräfte, die zur Entscheidung des Fußgängers führen, in eine bestimmte Richtung zu gehen, sind jedoch sozialer Natur. Einerseits strebt er eine bestimmte Ziel- bzw. Wunschrichtung an, andererseits will er Zusammenstöße mit Hindernissen oder anderen Fußgängern vermeiden. Die Verwendung von sozialen Kräften wird diesen Tatsachen gerecht.

Die Verwandtschaft von physikalischen und sozialen Kräften ermöglicht jedoch die Verwendung von in der Physik bewährten Vorgehensweisen.

In seiner Dissertation untersucht Molnár [Mol95] das Soziale-Kräfte-Modell zur Fußgängerbewegung ausführlich. Er benutzt folgenden Ansatz:

Der Ort  $\vec{r}_\alpha$  eines Fußgängers  $\alpha$  ändert sich gemäß:

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \vec{v}_\alpha. \quad (2.3)$$

Die Geschwindigkeit  $\vec{v}_\alpha$  wird durch das Zusammenspiel aller auf den Fußgänger wirkenden sozialen Kräfte verändert:

$$\frac{d\vec{v}_\alpha}{dt} = \underbrace{\vec{f}_\alpha^0}_{\text{Ziel}} + \underbrace{\sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta}}_{\text{Fußgänger}} + \underbrace{\sum_B \vec{f}_{\alpha B}}_{\text{Hindernisse}} + \underbrace{\sum_i \vec{f}_{\alpha i}}_{\text{Attraktionen}} + \underbrace{\sum_{\alpha'} \vec{f}_{\alpha\alpha'}}_{\text{Gruppen}} + \underbrace{\vec{\mathcal{F}}_\alpha}_{\text{Fluktuation}} \quad (2.4)$$

Dabei wird die Masse in die skalierten sozialen Kräfte hineingezogen. Die Geschwindigkeit besitzt einen maximalen Betrag  $v_\alpha^{max}$ .

Die Antriebskraft  $\vec{f}_\alpha^0$  beschreibt das Bestreben des Fußgängers, auf ein bestimmtes Ziel zuzusteuern. Dies wird durch eine exponentielle Anpassung der momentanen Geschwindigkeit  $\vec{v}_\alpha$  an die auf das Ziel gerichtete Wunschgeschwindigkeit  $\vec{v}_\alpha^0$  mit der Relaxationszeit  $\tau$  modelliert (Abbildung 2.1 auf der nächsten Seite).



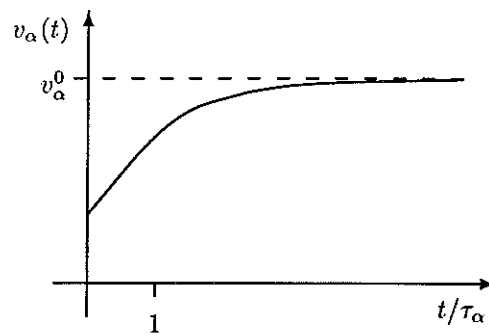


Abbildung 2.1: Exponentielle Anpassung der tatsächlichen Geschwindigkeit  $\vec{v}_\alpha$  an die Wunschgeschwindigkeit  $\vec{v}_\alpha^0$  (aus [Hel97])

Die abstoßenden Kräfte zwischen den Fußgängern und gegenüber Hindernissen hängen vom Abstand und den relativen Geschwindigkeiten ab. Für Gruppen und Attraktionen sind die Kräfte anziehend.

Die stochastischen Fluktuationen  $\vec{\mathcal{F}}_\alpha$  dienen mehreren Zwecken [Gil95]:

- Sie sind Stellvertreter für Einflüsse, die wegen ihres geringen Beitrags nicht im Modell berücksichtigt wurden.
- Sie verhindern Artefakte, die durch numerische Effekte hervorgerufen werden könnten.
- Sie vermeiden, daß das System in einem indifferenten Gleichgewicht stecken bleibt.
- Sie testen die Robustheit des Modells.

Alle diese Kräfte addieren sich nach dem Superpositionsprinzip. Die von Molnár durchgeführten Simulationen zeigen eindrucksvoll, daß dieser Ansatz Fußgängermengen sehr realistisch beschreibt. Es ist also möglich die Methoden der Physik zur Untersuchung von Fußgängern einzusetzen.

### Erweiterungen

Dieses Soziale-Kräfte-Modell läßt sich erweitern, um z.B. die Entstehung von Trampelpfaden (siehe Abschnitt 1.3.7 auf Seite 14) zu erklären [Kel96, HKM97]. Bei dieser

Erweiterung besitzen bestehende Wege ein attraktives Potential, das durch häufige Benutzung verstärkt wird. Bei Nichtbenutzung verwachsen die Wege jedoch, und die Attraktivität geht verloren.

In [Mol95, Kapitel 6] schlägt Molnár auch Erweiterungen vor, die Entscheidungen zur Routenwahl abhängig vom aktuellen Fußgängeraufkommen enthalten.

Auch an eine automatische Anpassung des Verhaltens der Fußgänger (d.h. ihrer Modellparameter) an die gegebene Verkehrssituation, um eine optimalere Fortbewegung zu gewährleisten, wird von ihm angedacht. Diese Gedanken werden in Abschnitt 6.3.1 auf Seite 72 aufgegriffen genauer untersucht.

## 3 Simulation von Autobahnverkehr

Der Stau von Kraftfahrzeugen auf Autobahnen, Landstraßen und in Innenstädten ist zu einem alltäglichen Phänomen geworden, das immensen volkswirtschaftlichen Schaden anrichtet. Allein durch den Neu- und Ausbau von Straßen läßt sich das Problem nicht lösen. Aus ökologischer Sicht ist ein weiterer Ausbau des Straßennetzes ebenfalls nicht wünschenswert. Es muß also das Ziel sein, die vorhandenen Straßen effektiver zu nutzen und unnötige Staus zu verhindern.

Aus empirischen Messungen ist bekannt, daß der Verkehr bei mittleren Dichten instabil wird und daß sich dann Stop-and-Go-Wellen bilden. Diese führen zu einem Zusammenbruch des Verkehrs (Stau aus dem Nichts).

Außer zur möglichst genauen Wiedergabe des aktuellen Verkehrsgeschehens werden Modelle benötigt, um zukünftige Entwicklungen voraussagen zu können. Nur so sind effektive Maßnahmen zur Vermeidung von Staus möglich.

Aus diesen Gründen wurden schon seit den 50er Jahren viele makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Modelle zur Verkehrssimulation entwickelt. Der reiche Erfahrungsschatz mit allen diesen Modellen kann genutzt werden, um ein gutes Fußgängermodell zu entwickeln.

Werden Spurwechsel vernachlässigt, so ist der Straßenverkehr nur eindimensional. Selbst wenn Spurwechsel in Betracht gezogen werden, bleibt diese zweite Dimension prinzipiell verschieden von der in Fortbewegungsrichtung. Dies ist ein grundsätzlicher Unterschied zum Fußgängerverkehr, der unzweifelhaft zweidimensional ist. Jederzeit können andere Fußgänger aus nahezu beliebiger Richtung auftauchen, denen ausgewichen werden muß. Dennoch gibt es viele Gemeinsamkeiten bei der Modellbildung von Auto- und Fußgängerverkehr, so daß sich ein Studium des Autoverkehrs lohnt.

### 3.1 Das Bando Modell

Bando et. al. [BHN<sup>+</sup>94, BHN<sup>+</sup>95] schlagen ein Modell vor, daß das Verhalten von individuellen Fahrern mit einfachen, einleuchtenden Gleichungen beschreibt. Bei niedrigen und sehr hohen Dichten ist der Verkehrsfluß stabil. Bei mittleren Dichten wird der Verkehr, wie in der Realität, instabil, und es bilden sich Stop-and-Go-Wellen. Die Gleichungen für Ort und Geschwindigkeiten lauten:

$$x_\alpha(t + \Delta t) = x_\alpha(t) + v_\alpha(t)\Delta t, \quad (3.1)$$

$$v_\alpha(t + \Delta t) = v_\alpha(t) + \frac{dv_\alpha(t)}{dt}\Delta t. \quad (3.2)$$

Die Beschleunigung  $\frac{dv_\alpha(t)}{dt}$  wird so gewählt, daß die Fahrzeuge auf die Wunschgeschwindigkeit der Fahrer  $v_\alpha^0$  zustreben. Außerdem muß der Sicherheitsabstand zum Vordermann berücksichtigt werden, so daß keine Unfälle auftreten. Dies bewerkstelligt die Gleichung:

$$\frac{dv_\alpha(t)}{dt} = \kappa_0[V'_e(s_\alpha(t)) - v_\alpha(t)]. \quad (3.3)$$

Hierbei ist die  $V'_e(s)$  die entfernungsabhängige Zielgeschwindigkeit eines Fahrers. Strebt der Abstand  $s$  zum Vordermann gegen  $\infty$ , so stimmt  $V_e$  mit der Wunschgeschwindigkeit überein.

Die Konstante  $\kappa_0$  beschreibt die Sensitivität der Fahrer, d.h. wie schnell sie auf eine veränderte Verkehrssituation reagieren. Dies kann auch mit der Relaxationszeit  $\tau = 1/\kappa_0$  beschreiben werden.

Es bleibt anzumerken, daß  $V_e(1/s) \equiv V'_e(s)$  im Falle eines stationären, räumlich homogenen Verkehrsflusses Gleichgewichtsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrzeugdichte  $\rho := 1/s$  ist. Die von Bando [BHN<sup>+</sup>94, BHN<sup>+</sup>95] vorgeschlagene Form für  $V'_e(s)$  ist zwar hypothetisch, führt aber zu realitätsnahen Ergebnissen und ist für eine analytische Untersuchung gut geeignet:

$$V'_e(s) = \tanh(s - 2) + \tanh(2). \quad (3.4)$$

## 3.2 Das Modell von Nagel und Schreckenberg

Das von Nagel und Schreckenberg [NS92, Nag95] entwickelte Modell zur Simulation von Schnellstraßen zerlegt das Straßennetz in Abschnitte (Zellen) der Länge  $\Delta x = 7,5$  m. Ein Abschnitt ist entweder leer oder enthält höchstens ein Auto. Auch die Geschwindigkeit kann nur diskrete Werte annehmen:

$$\Delta v = \hat{v} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{mit} \quad \hat{v} \in 0, 1, \dots, \hat{v}_{max}. \quad (3.5)$$

Für die Zeitdiskretisierung  $\Delta t$  wird üblicherweise 1 s gewählt und  $\hat{v}_{max} := 5$  gesetzt. Dies entspricht einer Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h.

Die Bewegung wird in Form von Regeln für einen zellulären Automaten ausgedrückt:

- Beschleunigung:** Hat ein Fahrzeug noch nicht die Maximalgeschwindigkeit  $\hat{v}_{max}$ , erreicht, so wird es auf  $\hat{v} + 1$  beschleunigt.  $\hat{v}_{max}$  übernimmt also auch die Rolle der Wunschgeschwindigkeit.
- Abbremsen:** Ist der Abstand  $\Delta j$  zum Vordermann kleiner oder gleich  $\hat{v}$ , so wird die Geschwindigkeit auf  $\Delta j - 1$  verringert um eine eventuelle Kollision im nächsten Zeitschritt zu verhindern.
- Zufallsschwankungen:** Um zufällige oder individuelle Geschwindigkeitsschwankungen zu modellieren, wird die Geschwindigkeit  $\hat{v}$  (soweit sie größer als 0 ist) mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  (üblicherweise 50%) auf  $\hat{v} - 1$  erniedrigt.
- Fortbewegung:** Schließlich werden alle Fahrzeuge um die ihrer Geschwindigkeit entsprechende Zellenzahl vorwärts bewegt.

Durch diese sehr vereinfachten Annahmen ist das Modell extrem schnell, und es können in Echtzeit Millionen von Fahrzeugen simuliert werden.

Trotz der einfachen Struktur treten in einem gewissen Dichtebereich, die aus der Realität bekannten Stop-and-Go-Wellen auf. Die Annahmen zum Beschleunigungs- und Bremsverhalten sind weitab der Realität, aber die gemittelten Verkehrsdaten stimmen erstaunlich gut mit Messungen überein. Um eine größere Realitätsnähe zu erreichen, wurden inzwischen viele Erweiterungen des Modells vorgeschlagen.

### 3.3 Das CA-Modell von Helbing

Das von Helbing [HH98] entwickelte Modell kann als diskretisierte Version des Bando-Modells verstanden werden, enthält aber auch das Modell von Nagel und Schreckenberg als Spezialfall und erlaubt eine ähnlich hohe Rechengeschwindigkeit. Es basiert auf den Gleichungen:

$$x_\alpha(t + \Delta t) = x_\alpha(t) + v_\alpha(t) \quad (3.6)$$

$$v_\alpha(t + \Delta t) = v_\alpha(t) + h(\kappa_0[V'_e(s_\alpha(t + \Delta t)) - v_\alpha(t)]) + \zeta_\alpha(t) \quad (3.7)$$

Dabei sind wie bei Nagel und Schreckenberg sowohl Ort  $x_\alpha$  als auch Geschwindigkeit  $v_\alpha$  diskret. Die Fluktuationen sind durch  $\zeta_\alpha$  beschrieben. Die Funktion  $h(v)$  sorgt dafür, daß die Geschwindigkeitsänderung ein ganzzahliges Vielfaches von  $\Delta v$  ist. Normalerweise wird einfach abgerundet. Da die Fahrzeugabstände nur Vielfache von  $\Delta x$  sein können, läßt sich die entfernungsabhängige Zielgeschwindigkeit  $V'_e(s)$  leicht tabellieren. Dadurch ist die hohe Rechengeschwindigkeit möglich.

Wird  $V'_e(s) = \max((s - 7,5 \text{ m})/\Delta t, 135 \text{ km/h})$ ,  $\Delta x = 7,5 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 1 \text{ s}$  und  $\kappa_0 = 1/\Delta t$  gewählt,  $h(v) = v$ , wenn  $v \leq 0$ , sonst aber  $h(v) = \Delta v$  und werden die Fluktuationen  $\zeta_\alpha$  so spezifiziert, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p = 50\%$  die Geschwindigkeit um  $\Delta v$  erniedrigt wird, dann entspricht dieses CA-Modell genau dem bereits vorgestellten Modell von Nagel und Schreckenberg.

Helbing schlägt als Parameter jedoch vor:  $\Delta x = 2,5 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 1 \text{ s}$  und  $\kappa_0 = 0.77\frac{1}{\text{s}}$ , sowie Fluktuationen  $\zeta_\alpha$  entsprechend den Regeln von Nagel und Schreckenberg, allerdings mit einer Wahrscheinlichkeit von nur  $p = 0,1\%$ . Mit diesen Parametern erhält man eine sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Daten.

Zusätzlich reproduziert das Modell dann alle charakteristischen Eigenschaften, die ein realistisches Verkehrsmodell haben sollte:

- Bei kleinen Dichten ist der Verkehrsfluß stabil. Verkehrsstörungen beliebiger Stärke lösen sich im Laufe der Zeit auf.
- Innerhalb eines bestimmten Dichtebereichs führt jede Störung zum Stau.
- Der Phasenübergang zu instabilem Verkehr ist von erster Ordnung.

- Zwischen dem stabilen und instabilen Dichtebereich gibt es metastabile Bereiche, in denen sich kleine Störungen auflösen, größere Störungen aber zu einem Stau führen.
- Der größte Verkehrsfluß wird bei ca. 30 Fz/km erreicht.
- Der Ausfluß aus Staus ist deutlich geringer als der maximal mögliche Fluß.
- Die Propagationsgeschwindigkeit der hinteren Staufront ist (anders wie z.B. im Bando-Modell) unabhängig von der durchschnittlicher Verkehrsdichte und beträgt konstant -12 km/h.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde ein Programm entwickelt, mit dem die Parameter dieses Modells interaktiv geändert werden können. Die Auswirkung auf die Dynamik des Modells sowie die Fluß-Dichte-, Geschwindigkeits-Dichte- und Geschwindigkeits-Fluß-Diagramme können direkt beobachtet werden. Auch eine Frequenzverteilung der Geschwindigkeiten und Abstände wird angezeigt.

Das Programm läßt sich im Internet unter der URL

<http://www.theo2.physik.uni-stuttgart.de/helbing/RoadApplet/>

abrufen. Es basiert auf den Vorarbeiten von B. Eisenblätter und L. Neubert [EN98] und Cay Horstmann [Hor96].

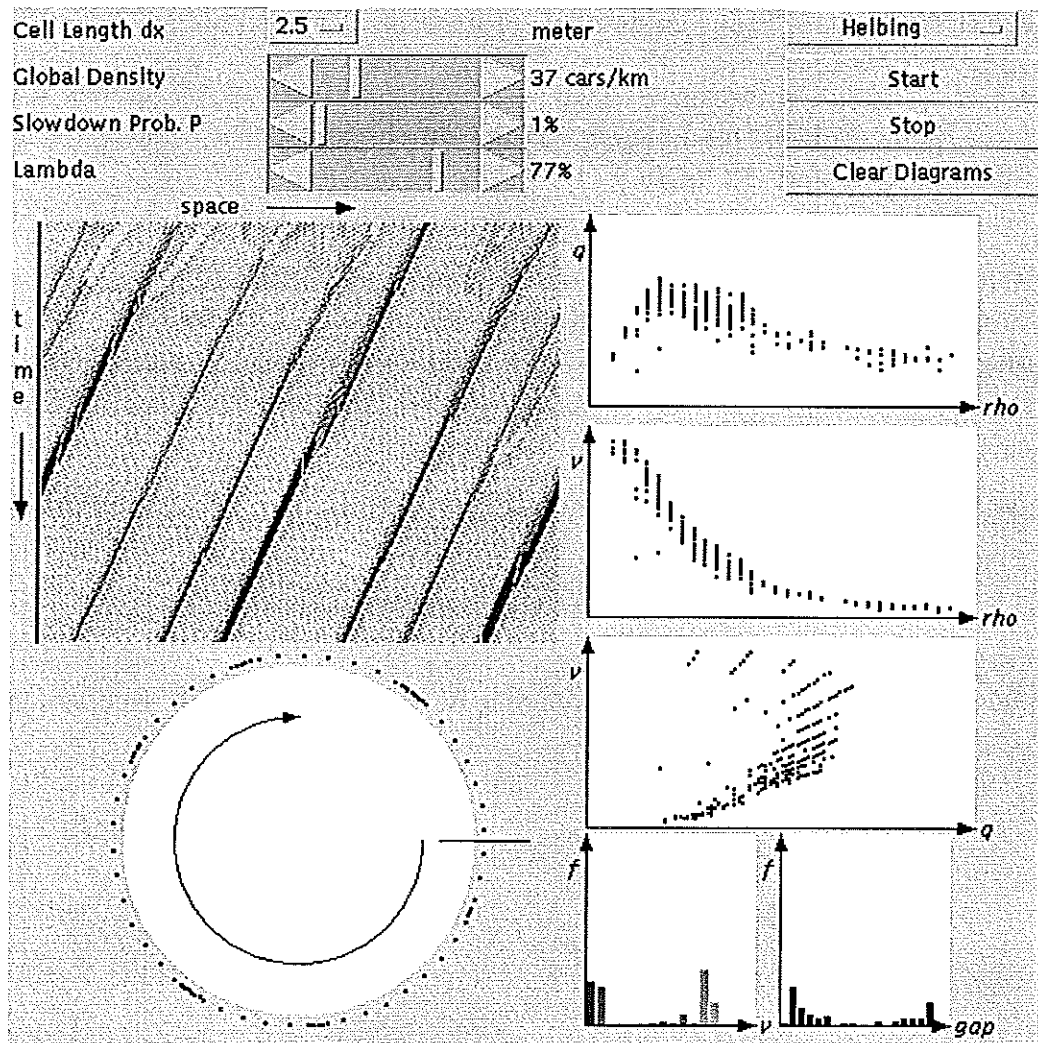


Abbildung 3.1: Interaktives Programm zum CA-Modell von Helbing



## 4 Diskretisiertes Soziale–Kräfte–Modell

Um die erstaunlichen Selbstorganisationsphänomene in Fußgängermengen genauer untersuchen zu können und zu verstehen, wie die Wechselwirkungsgesetze zustande kommen (siehe Abschnitt 6.3 auf Seite 71 zur Evolution des Fußgängerverhaltens), müssen für große Fußgängermengen zahlreiche Simulationsläufe durchgeführt werden. Um dies mit einem vertretbaren Rechenaufwand zu ermöglichen, wird ein schnelleres Simulationsmodell benötigt. Die dadurch bedingten Vereinfachungen sollen jedoch nicht zu einem Verlust der grundlegenden Eigenschaften realer Fußgängerströme führen.

Mit Hilfe eines solchen schnellen Simulationsmodells können auch Untersuchungen zur evolutionären Optimierung des Fußgängerverhaltens sowie praktisch relevante Optimierungsprobleme von Fußgängeranlagen untersucht werden. Dies war bisher aufgrund der Anforderungen an die Rechenleistung nicht möglich.

Das im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Modell ist ein diskretisiertes Kräftemodell, wie das von Helbing entwickelte CA-Modell für den Straßenverkehr (siehe Abschnitt 3.3 auf Seite 28). Es kombiniert die Vorteile der Fußgänger-Modelle von Gibbs und Marksjö einerseits sowie Helbing und Molnár andererseits: Die Rechengeschwindigkeit des zellulären Automaten sowie die Reproduktion der vielfältigen Phänomene und die soliden theoretischen Grundlagen des Soziale-Kräfte-Modells.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr, bei dem die Bewegung, wenn von Spurwechseln abgesehen wird, nur eindimensional in Richtung der Fahrbahn stattfindet, ist der Fußgängerverkehr ein zweidimensionales Problem.

Ein zentrales Element des CA-Modells von Helbing ist die entfernungsabhängige Zielgeschwindigkeit  $V_e'(s)$ . Durch sie wird sichergestellt, daß es zu keinen Unfällen

kommt. Im eindimensionalen Fall ist es sehr einfach, den Abstand  $s$  zum Vordermann zu bestimmen. Ganz anders ist die Situation im zweidimensionalen Fall: Es gibt keinen Vordermann, alle Fußgänger in der näheren Umgebung müssen beachtet werden, um einen Zusammenstoß zu verhindern. Hierzu muß der Abstand zu den anderen Fußgängern bekannt sein.

Der Rechenaufwand  $O$  zur Bestimmung der Abstände der Fußgänger untereinander wächst quadratisch mit der Fußgängeranzahl  $n$ :

$$O(n) \sim \frac{n(n+1)}{2} \quad (4.1)$$

Dies verhindert die effiziente Simulation von größeren Fußgängermengen. Ein möglicher Ausweg ist die Unterteilung der begehbaren Fläche in Teilbereiche, so daß jeweils nur der Abstand zu Fußgängern, die sich im gleichen oder in direkt benachbarten Teilbereichen aufhalten, bestimmt werden muß. Diesen Vorteil wird durch einen höheren Verwaltungsaufwand der Fußgängerdaten erkauft. Es muß sichergestellt sein, daß ein Fußgänger immer dem richtigen Teilbereich zugeordnet ist.

Das CA-Modell von Gibbs und Marksjö zeigt eine andere, elegante Möglichkeit auf, das Problem zu lösen: Die Fußgänger interagieren mit ihrer Umgebung durch ihr Potential. Da die Kräfte zwischen den Fußgängern und zwischen Fußgängern und Hindernissen, wie z.B. Wänden, rotationsfrei angenommen werden können, lassen sie sich als Gradient eines Potentials angeben. Nun werden die Abstoßungspotentiale aller Fußgänger und Hindernisse überlagert. Auf diesem Potentialgebirge findet die Bewegung statt. Eine Bestimmung der Abstände ist nicht nötig.

Die Potentialwerte werden auf einem diskreten Raster berechnet und abgespeichert. Das Raster kann aus Rechenzeitgründen nicht zu fein gewählt werden, da sonst der Geschwindigkeitsvorteil gegenüber dem traditionellen Kräftenmodell verloren geht.

Es besteht jedoch kein Grund, den Ort oder die Geschwindigkeit der Fußgänger ebenso zu diskretisieren wie dies bei rein diskreten Modellen (z.B. [Løv93, Løv94]) geschieht. Dies würde zu keinem Rechenzeitgewinn, jedoch zu Genauigkeitsverlusten führen.

Die Potentiale führen, trotz der Diskretisierung, zu einem genügend sanften und effektiven Ausweichen. Ein entscheidendes Element ist der variable Platzbedarf von Fußgängern. Das Oszillieren der Durchgangsrichtung an Engstellen (siehe Abschnitt 1.3.4 und 4.8.2) läßt sich durch ein rein diskretes Modell nicht reproduzieren. Die Fußgänger neigen dann auch eher zu Blockaden, was nicht realistisch ist.

## 4.1 Bewegungsgleichungen

Grundlage dieses Modells sind die Gleichungen (2.3) und (2.4) des Sozialen-Kräfte-Modells. Die Bewegungsgleichungen werden wie folgt diskretisiert:

$$\vec{r}_\alpha(t + \Delta t) = \vec{r}_\alpha(t) + \vec{v}_\alpha(t)\Delta t \quad (4.2)$$

$$\vec{v}_\alpha(t + \Delta t) = \vec{v}_\alpha(t) + \left[ \underbrace{\frac{1}{\tau_\alpha} (\vec{v}_\alpha^0 - \vec{v}_\alpha(t))}_{\text{Antriebskraft}} + \underbrace{\nabla V(\vec{r}_\alpha(t + \Delta t))}_{\text{Potentialkraft}} \right] \Delta t + \underbrace{\vec{\mathcal{F}}_\alpha}_{\text{Fluktuation}} \quad (4.3)$$

Es wird somit für die Antriebskraft eine exponentielle Anpassung an die Wunschgeschwindigkeit angenommen. Die Kräfte durch andere Fußgänger sowie Hindernisse und Attraktionen sind zu einer Potentialkraft zusammengefaßt. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Kräfte wirbelfrei sind und deshalb als Gradient eines Potentials ausgedrückt werden können. Auf Gruppenwechselwirkungen wird verzichtet.

## 4.2 Soziale Kräfte

### 4.2.1 Antriebskraft

Die von Helbing vorgeschlagene Form der Antriebskraft  $\vec{f}_\alpha^0$  führt zu einer exponentiellen Anpassung an die Wunschgeschwindigkeit  $v_\alpha^0$ . Es besteht kein Grund, von dieser einfachen Annahme abzuweichen:

$$\vec{f}_\alpha^0 = \frac{1}{\tau_\alpha} (\vec{v}_\alpha^0 - \vec{v}_\alpha(t)) \quad (4.4)$$

Simulations-Experimente mit einer konstanten Kraft, die nur wirkt, wenn von der Wunschgeschwindigkeit oder Wunschrichtung abgewichen wird, liefern weniger befriedigende Resultate. Es kann sich dann kein stabiles Kräftegleichgewicht einstellen: Entweder nehmen Kollisionen überhand oder die simulierten Fußgänger führen unrealistisch extreme Ausweichmanöver durch.

## 4.2.2 Wechselwirkung zwischen Fußgängern

Um Zusammenstöße zu verhindern, halten Fußgänger einen Abstand zueinander ein. Jeder Fußgänger beansprucht ein bestimmtes Territorium. Die Größe dieses Territoriums hängt hauptsächlich von der Dichte ab.

Dieser zentrale Effekt wird durch ein abstoßendes Potential modelliert, das auch möglichst realitätsnahe Ausweichmanöver hervorrufen sollte.

Die Kräfte zwischen den Fußgängern werden als relativ kurzreichweitig angenommen (wie bei [GM85]). Diese Näherung gilt nur bei relativ hohen Fußgängerdichten. Dies sind jedoch die Dichten, bei denen sich eine Untersuchung lohnt. Bei zu kleinen Dichten laufen die Fußgänger einfach mit ihrer Wunschgeschwindigkeit in ihre Wunschrichtung. Hindernissen wird weiträumig ausgewichen. Dabei treten keinerlei interessante kollektive Phänomene auf, die es sich zu untersuchen lohnt.

Wird eine Wechselwirkung angenommen, die nur von den beeinflussenden Fußgängern, also von deren Position und evtl. (Wunsch)-Geschwindigkeit abhängt, so wird die Kraft auf einen Fußgänger einfach ermittelt, indem die Potentiale aller anderen Fußgänger aufaddiert und dann der Gradient gebildet wird.

Bewegt sich ein Fußgänger, so muß dessen Potentialbeitrag an der alten Stelle subtrahiert und an der neuen Stelle addiert werden. Der Rechenaufwand steigt also nur linear mit der Anzahl der Fußgänger.

### Einfacher Potentialansatz

Ein einfacher und vernünftiger Ansatz ist ein exponentiell abfallendes, rotationssymmetrisches Potential:

$$V_\beta(\vec{r}) = b_\beta e^{-\|\vec{r}\|/\vartheta_\beta} \quad (4.5)$$

Der Parameter  $b_\beta$  bestimmt die maximale Potentialstärke, während  $\vartheta_\beta$  die Reichweite beeinflusst. Die Parameter können durch Kräftegleichgewichte abgeschätzt werden.

Mit diesem einfachen Potential zeigen sich schon die Bahnbildung (vgl. Abschnitt 1.3.1 und 4.8.1) und die Oszillationen an Engstellen (vgl. Abschnitt 1.3.4 und 4.8.2). Das Ausweichen ist aber sehr abrupt, da unberücksichtigt bleibt, daß Fußgängern mehr Platz in ihrer Bewegungsrichtung eingeräumt wird.

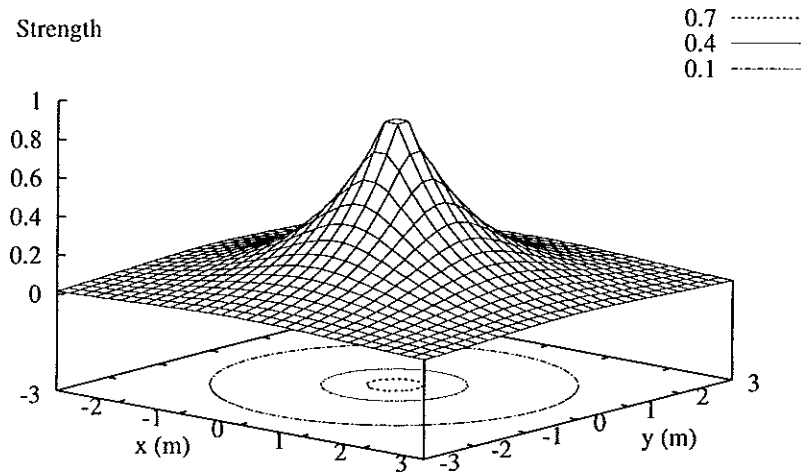


Abbildung 4.1: Rotationssymmetrisches, exponentiell abfallendes Potential

### Quadratisches Potential

Um wie im Modell von Nagel und Schreckenberg (vgl. Abschnitt 3.2 auf Seite 27) Kollisionen ganz auszuschließen, ist es möglich, ein quadratisches Potential zu verwenden:

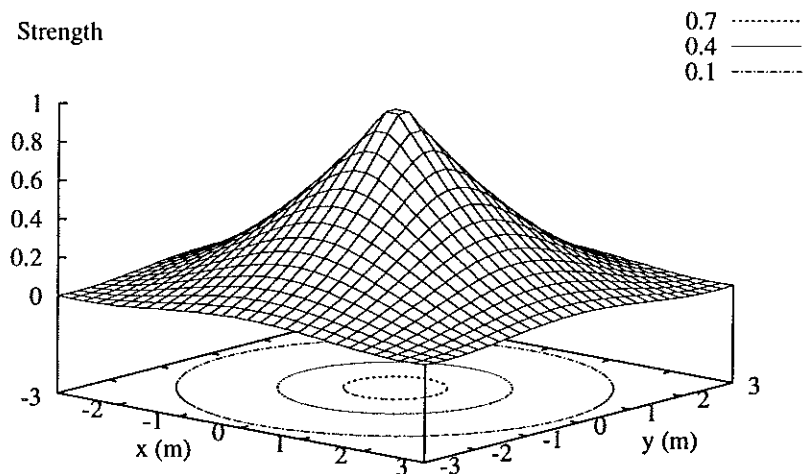


Abbildung 4.2: Quadratisches Potential

$$U_\beta(\vec{r}) = b_\beta \left( \frac{\vartheta_\beta - \|\vec{r}\|}{\vartheta_\beta} \right)^2 \quad (4.6)$$

Dieses Potential führt zu einer Kraft, die linear vom Abstand abhängt. Mit den passenden Parametern kann so, auch bei großen Zeitschritten  $\Delta t$ , verhindert werden, daß Fußgänger kollidieren. Damit ist eine sehr hohe Simulationsgeschwindigkeit möglich.

Dieses Potential führt jedoch zu einem unrealistisch starken Ausweichen zur Seite und ist deshalb unbrauchbar.

### Geschwindigkeitsabhängiges Potential

Die Beobachtung, daß die Fußgänger auch die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigen und sich deshalb Orten fernhalten, auf die sich andere zubewegen, führt zu einem realistischeren Potentialansatz:

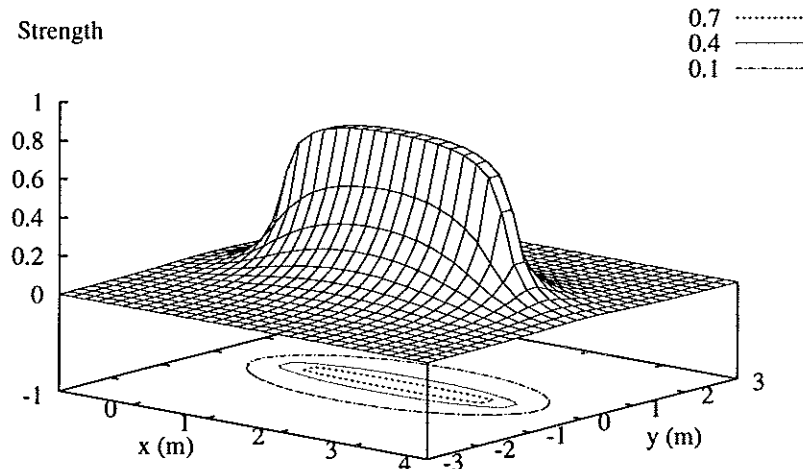


Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsabhängiges, exponentiell abfallendes Potential

$$U_\beta = b_\beta e^{\frac{1}{2} \sqrt{(\|\vec{r}\| + \|\vec{r} - T_\beta \vec{v}_\alpha\|)^2 - (T_\beta \|\vec{v}_\alpha\|)^2}} / \vartheta_\beta \quad (4.7)$$

Die Gleichung definiert hierbei eine Ellipse mit den beiden Brennpunkten bei  $\vec{0}$  und  $T_\beta \vec{v}_\alpha$ . Der zweite Brennpunkt entspricht dem Ort, den der Fußgänger  $\alpha$  nach der Zeit  $T_\beta$  erreicht haben will, d.h. es ist die Zeit, die die anderen Fußgänger vorausplanen.

Da sich alle Fußgänger, in unserem vereinfachten Modell, in der gleichen Potentiallandschaft bewegen, ist es leider nicht möglich, das Potential von den relativen Geschwindigkeiten der beteiligten Fußgänger abhängig zu machen. So könnte z.B. die Blickrichtung berücksichtigt werden, was zu noch realistischeren Ergebnissen führen würde.

### 4.2.3 Hindernisse und Attraktionen

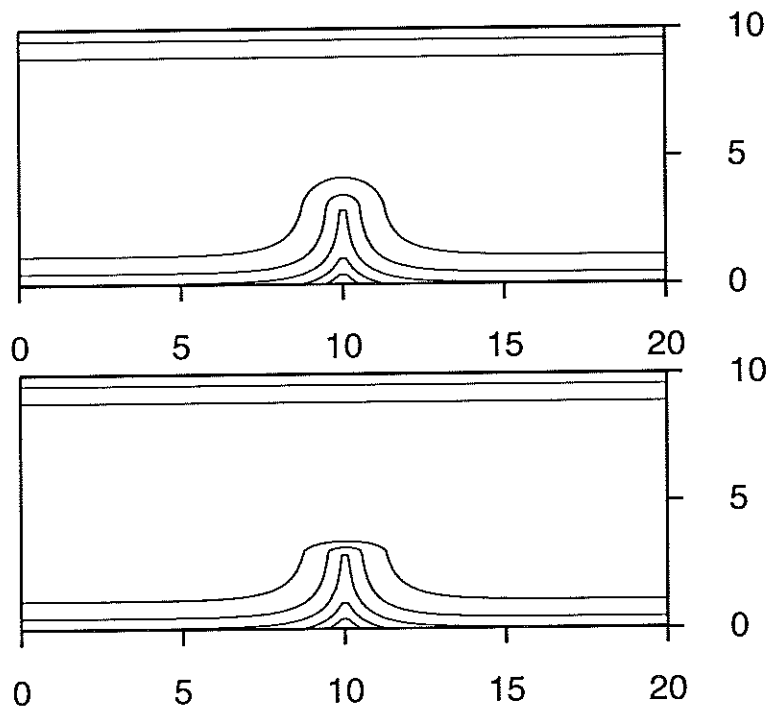


Abbildung 4.4: Potentialdarstellungen eines Korridors mit Trennwand (aus [Mol95]).  
Im unteren Bild ist das Potential abgeflacht, da Fußgänger Hindernisse dieser Art knapp passieren

Die Einflüsse von Hindernissen und Attraktionen werden durch abstoßende bzw. anziehende Potentiale modelliert.

$$V_{\alpha B} = b_B e^{-\|\vec{r}_{\alpha B}\|/\vartheta_B} \quad (4.8)$$

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, daß alle Fußgänger gleich auf das Hindernis reagieren.

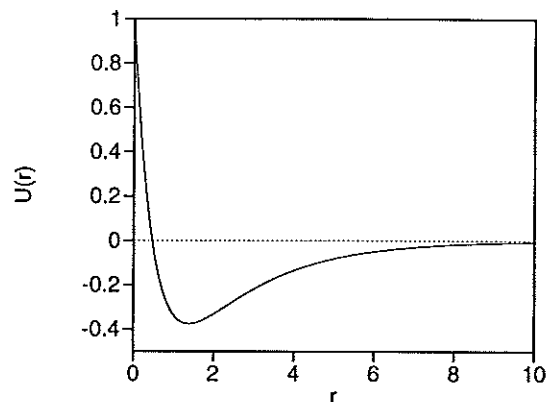


Abbildung 4.5: Potentialdarstellung von Attraktionen (aus [Mol95])

Bei Attraktionen wird ein kurzreichweitiges abstoßendes Potential mit einem langreichweitigen anziehenden Potential überlagert, so daß sich die Fußgänger zu einem Gleichgewichtsabstand hin bewegen (Abbildung 4.5).

Es gibt verschiedene Ansätze (Abbildung 4.6) zur Kombination der Einflüsse von verschiedenen festen Hindernissen:

- Alle Einflüsse werden überlagert (Superposition)
- Es wirkt nur der Einfluß mit der größten Wirkung

Je nach Situation muß beim Entwurf des Modells die eine oder andere Möglichkeit ausgewählt werden.

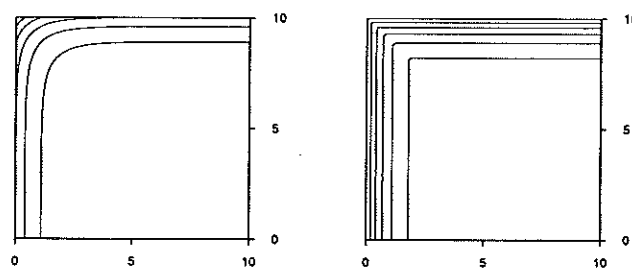


Abbildung 4.6: Die zwei Möglichkeiten zur Kombination von Einflüssen (aus [Mol95]). Links: Superposition, rechts: größte Wirkung



#### 4.2.4 Fluktuationen

Die Fluktuationen  $\vec{\mathcal{F}}_\alpha$  dienen hauptsächlich als Stellvertreter für geringe Einflüsse, die nicht im Modell berücksichtigt wurden (weitere Gründe für die Einführung von Fluktuationen sind in Abschnitt 2.5.3 auf Seite 23 beschrieben).

Ein einfacher Ansatz lautet:

$$\vec{\mathcal{F}}_\alpha = \mathcal{N}(0, \mu) \vec{e}_\alpha^\perp \quad (4.9)$$

mit der normalverteilten Zufallsvariablen  $\mathcal{N}(0, \mu)$ :

$$P(\mathcal{N}(0, \mu)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-x^2/2\mu}. \quad (4.10)$$

Um Ausweichmanöver bei einem indifferenten Gleichgewicht zu fördern, kann die Stärke der Fluktuation mit der Kraft, die einen Fußgänger von seiner Zielrichtung  $\vec{e}_\alpha^0$  abbringen will, gewichtet werden. Auch die Berücksichtigung des empirisch beobachteten bevorzugten Ausweichens nach rechts (vgl. Abschnitt 1.3.1 auf Seite 10) ist möglich:

$$\vec{\mathcal{F}}_\alpha = \langle \vec{e}_\alpha^0, \vec{f}_\alpha \rangle (\mu_a + \mathcal{N}(0, \mu)) \vec{e}_\alpha^\perp \quad (4.11)$$

Das Skalarprodukt  $\langle \vec{e}_\alpha^0, \vec{f}_\alpha \rangle$  zwischen Wunschrichtung  $\vec{e}_\alpha^0$  und äußerer sozialer Kraft  $\vec{f}_\alpha$  wird gerade dann maximal, wenn ein seitliches Ausweichen wünschenswert ist.

Die Stärke der symmetrischen Fluktuationen ist  $\mu$ , die der asymmetrische  $\mu_a$ . Es zeigt sich, daß durch asymmetrischen Fluktuationen eine höhere Effizienz von Fußgängerströmen erreicht werden kann (vgl. Abschnitt 6.3.3 auf Seite 77).

### 4.3 Gradientenbestimmung

Das Potential  $V_\alpha(\vec{r})$  ist die Summe der Potentiale, die den Einfluß von Hindernissen, Attraktionen und anderen Fußgängern beschreiben:

$$V_\alpha(\vec{r}) = \underbrace{\sum_{\beta \neq \alpha} V_\beta(\vec{r})}_{\text{Fußgänger}} + \underbrace{\sum_B V_B(\vec{r})}_{\text{Hindernisse}} + \underbrace{\sum_i V_i(\vec{r})}_{\text{Attraktionen}} \quad (4.12)$$

Der Ort  $\vec{r}_\alpha$  eines Fußgängers ist eine kontinuierliche Variable. In unserem diskreten Modell ist das Potential jedoch nur an diskreten Stellen definiert. Zur Bestimmung der Kraft müssen also die Komponenten des Orts auf Vielfache von  $\Delta x$  gerundet werden.

Zur Gradientenbestimmung bietet sich eine einfache lineare Näherung an:

$$\nabla_x V(x) = \frac{V(x + \Delta x) - V(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (4.13)$$

Dies führt jedoch tendenziell zu einer Unterschätzung der Kraft, deshalb ist die Verwendung von genaueren Methoden vorteilhaft:

$$\nabla_x V(x) = \frac{V(x) - V(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (4.14)$$

oder

$$\nabla_x V(x) = \frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x}, \quad (4.15)$$

je nachdem, ob bei der Bestimmung der diskreten Ortsvariablen  $x$ , bzw.  $y$  aus  $\vec{r}_\alpha$  auf- oder abgerundet werden mußte.

## 4.4 Simulationsablauf

### 4.4.1 Initialisierung

Zunächst werden die Potentiale von Hindernissen und Attraktionen berechnet und zum globalen Potential aufaddiert. Um später Rechenzeit zu sparen, werden auch alle (evtl. geschwindigkeitsabhängigen) Fußgängerpotentiale im voraus berechnet und tabelliert. Die dadurch viel höhere Rechengeschwindigkeit wird durch einen erhöhten Speicherbedarf erkauft.

Dann werden die einzelnen Fußgänger an ihre zufälligen Startpunkte gesetzt und mit einer normalverteilten Wunschgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 1.1 auf Seite 9) versehen. Ihre Potentiale werden ebenfalls zum Gesamtpotential addiert.

#### 4.4.2 Aktualisierung der Fußgängervariablen

Bei jedem Zeitschritt werden für jeden Fußgänger die gleichen Operationen ausgeführt:

1. Zunächst wird das Fußgängerpotential vom globalen Potential subtrahiert, um eine Selbstwechselwirkung auszuschließen.
2. Die soziale Kraft, die die Einflüsse aller anderen Fußgänger und der Hindernisse und Attraktionen beschreibt, wird durch die Berechnung des Gradienten des verbleibenden Gesamtpotentials berechnet.
3. Entsprechend der Bewegungsgleichungen (4.2) und (4.3) wird die neue Geschwindigkeit und der neue Ort berechnet.
4. Das neue Fußgängerpotential wird am neuen Ort zum globalen Potential addiert.

### 4.5 Rechenleistung

Ein vorrangiges Ziel bei der Entwicklung dieses Modells war die schnelle Rechengeschwindigkeit. Daher ist es sehr wichtig herauszufinden, in welchen Teil des Simulationsprogramms die meiste Rechenzeit verbraucht wird und wie an diesen Stellen optimiert werden kann. Auch einige Modellparameter haben einen großen Einfluß auf die Rechengeschwindigkeit.

Der weitaus zeitaufwendigste Teil der Simulation ist die Berechnung der sozialen Wechselwirkungskräfte, d.h. die Addition und Subtraktion der Fußgängerpotentiale an verschiedenen Orten.

Die Bestimmung der Fußgängerabstände untereinander hängt quadratisch von der Anzahl der Fußgänger ab. Dies würde eine Simulation von großen Fußgängermengen schwierig gestalten. Durch die Einführung eines globalen Gesamtpotentials kommt

man ohne diese Bestimmung aus. Dazu muß man aber davon ausgehen, daß die Wechselwirkung für alle Fußgänger gleich ist, d.h. jeder gesteht einem bestimmten Fußgänger das gleiche Territorium zu.

Zur Bestimmung eines Potentialwertes zu einem bestimmten Abstand zwischen zwei Fußgängern muß eine reellwertige Funktion berechnet werden. Dies ist relativ zeitaufwendig. Indem die Potentialwerte nur einmal berechnet und tabelliert werden (was sich aufgrund der Diskretisierung sowieso anbietet), wird sehr viel Rechenzeit eingespart. Aufgrund des begrenzten Speicherplatzes muß diese Tabelle bei größeren Abständen, wo das Potential gegen Null geht, abgeschnitten werden. Die diskrete Potentialreichweite  $\hat{\vartheta}_{max}$ , gibt an, nach wievielen ganzzahligen Vielfachen von  $\Delta x$  dies geschieht. D.h. die Potentialfunktion wird an  $\hat{\vartheta}_{max}^2$  Stützstellen ausgewertet.

Ist das Potential von der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  abhängig, so müssen für jeden möglichen Geschwindigkeitsvektor  $\hat{\vartheta}_{max}^2$  Potentialwerte berechnet und gespeichert werden. Um Speicherplatz zu sparen, ist es sinnvoll, hier die Geschwindigkeit ebenso wie den Ort zu diskretisieren. Einfacherweise wird  $\Delta v = \Delta x/s$  gewählt.

Die Potentiale für Hindernisse und Attraktionen müssen nur ein einziges mal zu Beginn der Simulation berechnet werden und bilden die Grundlage des Gesamtpotentials.

Messungen mit einem Profiler ergaben, daß 91% der Rechenzeit für die Addition/Subtraktion der Potentiale und nur 5% für die eigentliche Neuberechnung von Geschwindigkeit und Ort verbraucht werden.

Es ist selbstverständlich, daß das Verhältnis von Simulationszeit zu Rechenzeit umgekehrt proportional vom Zeitschritt  $\Delta t$  abhängt.

Durch die Einführung des Gesamtpotential steigt die Rechengeschwindigkeit nur linear mit der Fußgängeranzahl. Abbildung 4.7 auf der nächsten Seite zeigt das Ergebnis von zehn Messungen mit 5000 Zeitschritten (alle Laufzeitmessungen wurden auf einer DIGITAL Alpha Workstation mit 433 MHz Taktfrequenz und dem Java Development Kit 1.1.6 durchgeführt).

Die Rechenzeit ist jedoch quadratisch von der diskreten Potentialreichweite  $\hat{\vartheta}_{max}$  abhängig (vgl. Abbildung 4.8 auf der nächsten Seite), da diese die Anzahl der Additionen und Subtraktionen bestimmt. Das Zusammenspiel der Ortsdiskretisierung  $\Delta x$  und der Potentialreichweite  $\vartheta$  bestimmen die Untergrenze für  $\hat{\vartheta}_{max}$ . Eine feine Ortsdiskretisierung führt also nicht nur zu einem erhöhten Speicherbedarf, sondern auch zu drastisch längeren Rechenzeiten.

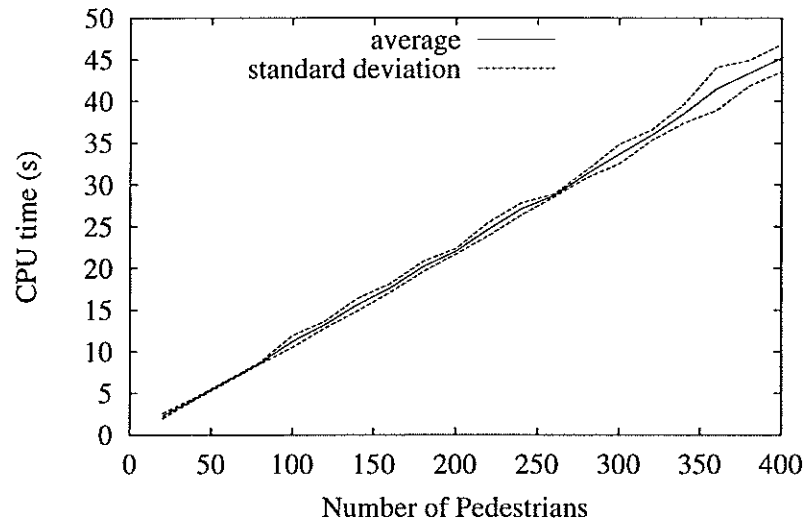
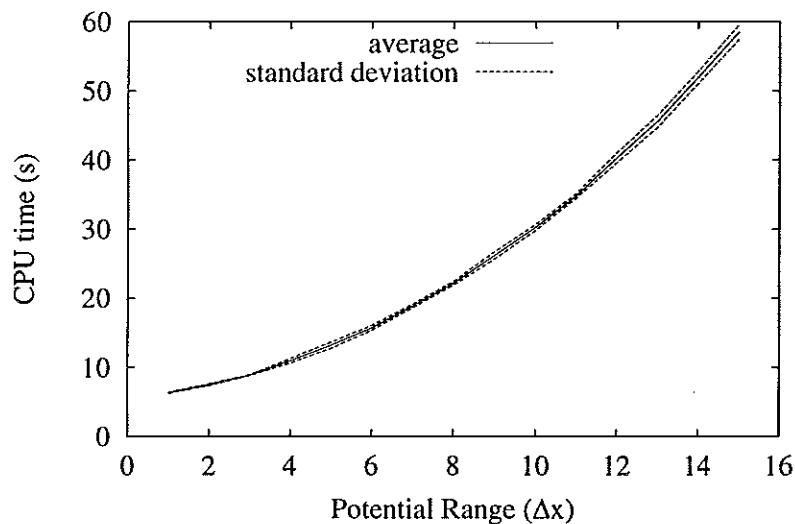


Abbildung 4.7: Rechenzeit in Abhängigkeit der Fußgängeranzahl

Abbildung 4.8: Rechenzeit in Abhängigkeit der diskreten Potentialreichweite  $\hat{v}_{max}$ 

## 4.6 Parameter

Das spezifizierte Modell enthält viele Parameter, die durch Performance- und Speicherplatzüberlegungen einerseits und die Anpassung an reale Fußgängerströme andererseits bestimmt werden müssen.

Für die Ortsdiskretisierung bietet sich  $\Delta x = 0,3$  m an, da der minimale Platzbedarf eines Fußgängers bei ca.  $0,1 \text{ m}^2$  liegt. Kleinere Ortsdiskretisierungen lassen die

Rechenzeit zu stark ansteigen, während bei größeren Diskretisierungen die Bewegungen sehr unrealistisch werden, da die Potentialsprünge zu sehr hohen, plötzlich auftretenden, Ausweichkräften führen.

Bei einer angenommenen Maximalgeschwindigkeit von 2,1 m/s ist mit einem Zeitschritt von  $\Delta t = 0,14$  s sichergestellt, daß keine Gitterpunkte übersprungen werden. Durch ein quadratisches Potential (vgl. 4.2.2 auf Seite 35) könnten zwar auch bei größeren Zeitschritten Kollisionen verhindert werden, aber die Bewegungen sind dann extrem unrealistisch. Auch eine größere Potentialreichweite ermöglicht längere Zeitschritte. Dies bringt jedoch keine Vorteile, da dies, aufgrund der dadurch nötigen Vergrößerung von  $\hat{v}_{max}$ , einen quadratischen Anstieg der Rechenzeit nach sich zieht.

Die Potentialstärken und Reichweiten werden durch Kräftegleichgewichte und den Vergleich mit empirischen Messungen bestimmt. Bei recht grober Diskretisierung müssen die dadurch verursachten Fehler durch modifizierte (stärkere) Potentiale behoben werden.

Bei Simulationen hat sich das geschwindigkeitsabhängige Potential (4.3) mit der maximalen Potentialstärke  $b_\beta = 12 \frac{m\Delta x}{s^2}$ , Reichweite  $\vartheta_\beta = 0,5$  m und der vorausgeschauten Zeit  $T_\beta = 0,6$  s in einer Kombination mit der Relaxationszeit  $\tau = 0,5$  s bewährt. Die diskrete Potentialreichweite  $\hat{v}_{max}$  kann in diesem Fall auf 4 beschränkt werden. In Abschnitt 6.3.2 auf Seite 74 zeigt sich jedoch, daß noch bessere Parameter möglich sind.

Für die Wände wurde  $b_B = 15 \frac{m\Delta x}{s^2}$  und  $\vartheta_B = 30$  m gewählt.

Die Potentialreichweiten und -stärken lassen sich durch Kräftegleichgewichte abschätzen.

Natürlich hängen die Parameter auch vom kulturellen Hintergrund, Altersdurchschnitt etc. ab (vgl. Abschnitt 1.1 auf Seite 9).

## 4.7 Erweiterungen

### 4.7.1 Dichteabhängige Wunschgeschwindigkeit

Bei Gedränge (Dichte  $> 1$  P/m<sup>2</sup>) zeigt das Modell Schwächen. Die simulierten Fußgänger bremsen nicht stark genug ab und Kollisionen nehmen überhand. Eine feinere Diskretisierung scheidet aus Rechenzeitgründen aus. Indem man die Wunschgeschwindigkeit, wie in den Modellen zum Autoverkehr ( $V'_e(s)$ , vgl. Abschnitt 3.1 und

3.3), dichteabhängig ansetzt ( $\bar{v}_\alpha^0(\rho)$ ), läßt sich das Problem beheben. Im Gedränge reagieren die Fußgänger dann nicht nur auf einzelne andere Fußgänger, sondern werden generell langsamer. Die Bestimmung der lokalen Dichte ist nicht direkt möglich. Der Potentialwert an einer bestimmten Stelle ist jedoch ein guter Schätzwert für die Dichte und kann zu diesem Zweck verwendet werden. Mit dieser Erweiterung kommt die Bewegung bei hohen Dichten (wie in der Realität) zum Stillstand.

### 4.7.2 Einbeziehung der Blickrichtung

Auch die Anisotropie der Fußgänger-Wechselwirkung ist mit dem bisherigen Ansatz nur unzureichend beschrieben. Es kommt zu einem unrealistischem Drängeln: Schnellere Fußgänger veranlassen langsamere Fußgänger, die vor ihnen gehen, zu einer Erhöhung ihrer Geschwindigkeit.

Dies läßt sich durch eine individuelle Gewichtung der Potentialkraft in Bezug auf die Bewegungsrichtung (in Richtung des Blickfelds) korrigieren:

$$F(\vec{r}_\alpha, \gamma) = \frac{(1 - \cos \gamma)}{2} \vec{\nabla} V(\vec{r}_\alpha) \quad (4.16)$$

wobei  $\gamma$  der Winkel zwischen Bewegungsrichtung  $\vec{v}_\alpha$  und äußerer sozialer Kraft  $\vec{\nabla} V(\vec{r}_\alpha)$  ist. Diese Zusatzgleichung ist jedoch nur bei beengten Verhältnissen notwendig, da sonst die nachfolgenden schnelleren Fußgänger einfach ausscheren und überholen.

## 4.8 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden exemplarisch Bilder zur verschiedenen Simulationen gezeigt. Viele interessante Phänomene offenbaren sich jedoch erst in der Dynamik. Um diese zu betrachten, kann der unter der URL

<http://www.theo2.physik.uni-stuttgart.de/helbing/Pedestrians/>

ein auf dem vorgestellten Modell basierender Simulator im Internet abgerufen werden.

### 4.8.1 Bahnbildung

Die Bahnbildung ist eines der auffälligsten kollektiven Phänomene, das auch empirisch oft beobachtet wird (vgl. Abschnitt 1.3.1 auf Seite 10).

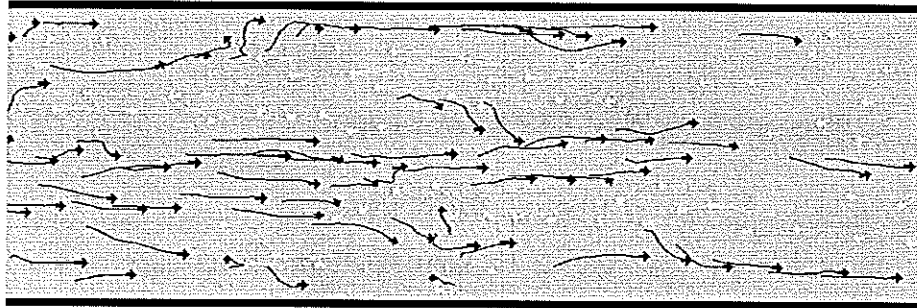


Abbildung 4.9: Bahnbildung in Fußgängerströmen

Die Bahnbildung ist sehr einfach in der grafischen Darstellung der Simulation zu erkennen. Wenn die Trajektorien der Fußgänger einzeichnet werden, ist dies besonders deutlich.

Der Mechanismus, der zur Bahnbildung führt, ist eine Art selbstorganisierte Optimalität: Es ist effizienter anderen Fußgängern mit der gleichen Wunschrichtung zu folgen, selbst wenn man dadurch etwas langsamer als beabsichtigt gehen muß. Beim Ausscheren aus der Bahn riskiert man eine Begegnung mit Fußgängern entgegengesetzter Gehrichtung, die zu aufwendigen Ausweich- und Bremsmanövern führt.

Zur quantitativen Untersuchung der Bahnbildung kann ein Vielfältigkeitsmaß  $H$  (Entropie) [Hak83, Mol95] definiert werden:

$$H(A, t) = - \sum_C \sum_{\vec{x}_i \in A} P(C, \vec{x}_i, t) \ln P(C, \vec{x}_i, t) \quad (4.17)$$

Dazu wird die begehbare Fläche  $A$  in gleichgroße Einheiten  $\vec{x}_i$  eingeteilt.  $C$  unterscheidet die verschiedenen Subpopulationen, z.B. die Fußgänger, die nach rechts gehen und jene die nach links gehen wollen.  $P(C, \vec{x}_i, t)$  ist der Anteil der Fußgänger der Subpopulation  $C$ , der sich zum Zeitpunkt  $t$  im Flächenstück  $\vec{x}_i$  befindet.



### 4.8.2 Oszillation an Engstellen

Auch die an engen Durchgängen, wie z.B. Türen, beobachtete Oszillation der Durchgangsrichtung (vgl. Abschnitt 1.3.4 auf Seite 13) wird erfolgreich simuliert.

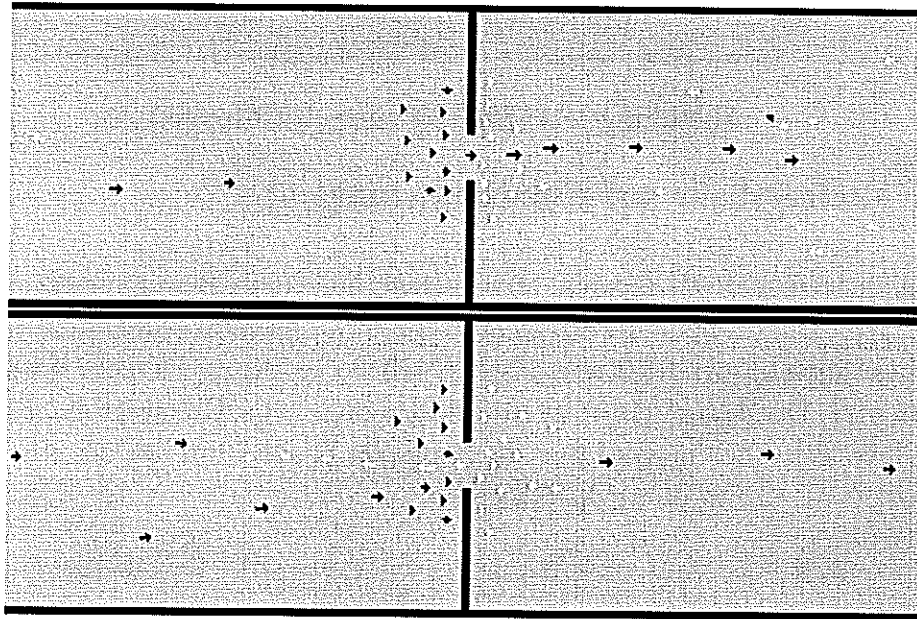


Abbildung 4.10: Oszillation an Engstellen

Wenn ein Fußgänger die Engstelle durchquert, wird es für die hinter ihm laufenden Fußgänger einfacher, die Engstelle ebenfalls zu durchqueren. Deshalb durchquert immer ein ganzer Pulk von Fußgängern die Engstelle in die selbe Richtung. Dadurch vermindert sich der „Druck“ auf dieser Seite der Engstelle, so daß es dadurch für die auf der anderen Seite wartenden Fußgänger einfacher wird, in eine zufällig auftretende Lücke vorzustößen und damit die Durchgangsrichtung umzukehren.

### 4.8.3 Flußbett durch eine stehende Menge

Strömen Fußgänger durch eine wartende Menge, so bildet sich eine Art Flußbett aus (siehe auch Abschnitt 1.3.5 auf Seite 14). Dabei nehmen die Fußgänger nicht unbedingt den direkten Weg, sondern stoßen in zufällig entstandene Lücken vor. Die nachfolgenden Fußgänger folgen den bereits benutzten Wegen und erweitern sie.

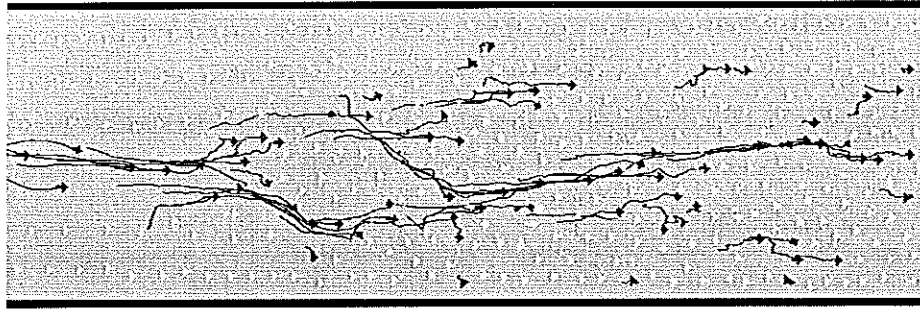


Abbildung 4.11: Bildung einer Art Flußbett

#### 4.8.4 Kreisverkehr auf einer Kreuzung

An Fußgängerkreuzungen können verschiedene kollektive Bewegungsformen auftreten. Die zwei grundlegenden Formen sind die abwechselnde Durchquerung in senkrechter und horizontaler Richtung, ähnlich wie sie im Straßenverkehr durch Ampeln induziert wird. Die andere Form ist ein selbstorganisierter Kreisverkehr. Keine dieser Formen läßt sich über längere Zeit in Reinform beobachten, da sie sehr kurzlebig sind.

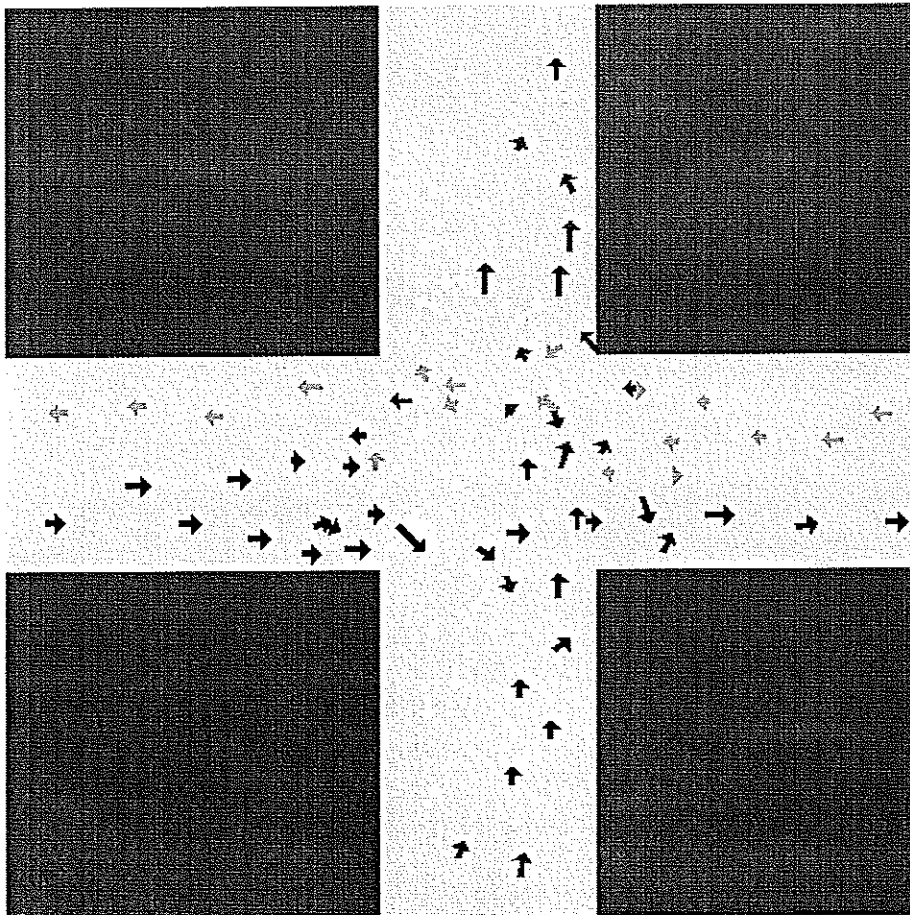


Abbildung 4.12: Kreisverkehr auf der Kreuzung



# 5 Qualitative und quantitative Bewertung

Um die Benutzungsqualität von Fußgängeranlagen einordnen zu können, wird ein wohl-definierter quantitativer Bewertungsmaßstab benötigt. Auch zur Optimierung sind objektive Größen, die direkt aus der Simulation gewonnen werden können, nötig. In seiner Dissertation [Mol95] entwickelt Molnár viele der hier vorgestellten quantitativen Bewertungsmaße. In [Sch97] finden sich Beiträge, die sich mit der Bewertung und Optimierung von komplexen Systemen auseinandersetzen.

## 5.1 Spezifikation der Bewertung

### 5.1.1 Level of Service

Anfang der '70er Jahre wurde das Level-of-Service-Konzept (LOS) von John J. Fruin für den Fußgängerverkehr adaptiert [Fru71]. Ähnliche Überlegungen machte Detlef Oeding schon 1963 [Oed63]. Allgemein werden die Kriterien nach Weidmann [Wei93] verwendet:

- [K1] Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl
- [K2] Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels
- [K3] Zwang zur Beachtung anderer Fußgänger
- [K4] Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels
- [K5] Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes
- [K6] Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung
- [K7] Behinderung beim Überholen
- [K8] Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Die Beurteilung geschieht qualitativ durch + gut, = mittelmäßig und – schlecht. In Tabelle 5.1 findet sich eine Charakterisierung der Kriterien in Abhängigkeit der Fußgängerdichte.

LOS	Dichte P/m <sup>2</sup>	Kriterien								Charakterisierung
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
A	0.00–0.10	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung
B	0.10–0.30	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung
C	0.30–0.45	=	+	=	=	=	=	=	+	schwache Behinderung
D	0.45–0.60	=	=	=	=	–	–	–	+	mäßige Behinderung
E	0.60–0.75	–	–	–	=	–	–	–	+	starke Behinderung
F	0.75–1.00	–	–	–	–	–	–	–	+	dichter Verkehr
G	1.00–1.50	–	–	–	–	–	–	–	=	mäßiges Gedränge
H	1.50–2.00	–	–	–	–	–	–	–	–	starkes Gedränge
I	2.00–5.40	–	–	–	–	–	–	–	–	massives Gedränge

Tabelle 5.1: Level-of-Service in der Ebene (aus [Wei93])

### 5.1.2 Effizienz

Die Effizienz einer Fußgängeranlage gibt an, wie schnell eine Anlage im Bezug auf die Wunschgeschwindigkeit durchquert werden kann (Kriterium K1):

$$Y_{\alpha}^1 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \frac{\langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle}{v_{\alpha}^0} = \underbrace{\frac{1}{v_{\alpha}^0 T}}_I \underbrace{\int_{t_0}^{t_0+T} dt \langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle}_{II} \quad (5.1)$$

$T$  ist die gesamte Zeit die zur Durchquerung gebraucht wird. In einem geraden Korridor, der vom einen Ende zum anderen durchquert wird, ist die Zielrichtung  $\vec{e}_{\alpha}^0$  zeitlich konstant. Term II entspricht dann der Länge des Korridors:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} dt \langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle = l_{\text{Korridor}} \quad (5.2)$$

Die Effizienz drückt dann das Verhältnis zwischen der Weglänge zum Ziel und der Strecke aus, die der Fußgänger in der Durchquerungszeit  $T$  auf freier Fläche zurückgelegt hätte.

Durch Drängeln kann es vorkommen, daß die Effizienz größer als 1 wird. In diesem Fall schieben nachfolgende Fußgänger so stark, daß die Wunschgeschwindigkeit übertroffen wird.

Durch eine spezielle Wahl der Wunschgeschwindigkeiten bzw. -richtungen, lassen sich mit der Effizienzmessung auch die Kriterien K5, K6 und K7 bestimmen.

### 5.1.3 Geschwindigkeitswechsel

Die Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels K2, läßt sich durch die Bestimmung der Varianz der Geschwindigkeit in Zielrichtung messen:

$$\begin{aligned}
 Y_{\alpha}^2 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \left( \frac{\langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle}{v_{\alpha}^0} \right)^2 - \left( \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \frac{\langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle}{v_{\alpha}^0} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \left( \frac{\langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle}{v_{\alpha}^0} \right)^2 - (Y_{\alpha}^1)^2
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Die Betrachtung der Geschwindigkeit in Zielrichtung  $\langle \vec{e}_{\alpha}^0, \vec{v}_{\alpha} \rangle$  bedeutet, daß die Varianz sowohl die Effekte von Abbrems-, als auch von Ausweichmanövern der Fußgänger enthält. Deshalb wird mit  $Y_{\alpha}^2$  auch das Kriterium K4, die Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels, abgedeckt.

### 5.1.4 Wohlbefinden

Je mehr ein Fußgänger äußeren Einflüssen ausgesetzt ist, desto unwohler fühlt er sich. Er ist nicht mehr nur mit seinem Ziel und dem Weg dorthin beschäftigt, sondern muß sich auf seine Umgebung konzentrieren.

Für Einkaufsflächen hat dies auch eine ganz praktische Bedeutung: Konzentrieren sich die Passanten auf das Verkehrsgeschehen, so bedeutet das weniger Aufmerksamkeit für Warenangebote.

Eine passende Größe ist durch die Varianz der Beeinflussung, d.h. der äußeren sozialen Kraft (Potentialkraft) gegeben:

$$Y_{\alpha}^3 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \|\vec{\nabla}V(\vec{r}_{\alpha}(t))\|^2 - \left\| \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \vec{\nabla}V(\vec{r}_{\alpha}(t)) \right\|^2 \quad (5.4)$$

Je geringer diese Belastung für den Fußgänger ausfällt, desto höher ist die Qualität des Weges (Kriterium K3).

### 5.1.5 Kollisionen

Das Kriterium K8 läßt sich im Rahmen des diskretisierten Modells zwanglos ermitteln. Sobald ein Fußgänger in eine Zelle eintritt, in der sich bereits ein anderer Fußgänger befindet, kann von einer unbeabsichtigten Berührung ausgegangen werden.

Dies gilt natürlich nur für kleine Zellengrößen  $\Delta x^2$ . Bei großen Zellen (die jedoch für realistische Simulationen ungeeignet sind) können sich mehrere Fußgänger in einer Zelle befinden, ohne sich zu berühren. In diesem Fall müßte von einer Kollisionswahrscheinlichkeit kleiner als 100% ausgegangen werden.

## 5.2 Einflüsse der Modellparameter

Die wichtigsten Bewertungsmaße sind sicherlich die Effizienz einerseits und die Anzahl der Kollisionen andererseits. Um einen groben Überblick über die Auswirkung einer Variation der wichtigsten Parameter zu erhalten, wurden einige Simulationen eines Korridors (Länge 27m, Breite 12m) mit 100 Fußgängern entgegengesetzter Wunschrichtung und normalverteilter Wunschgeschwindigkeit durchgeführt. Da die Ergebnisse streuen, wurden für jede Parameterkombination zehn Simulationen durchgeführt und der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet.

Als jeweils nicht veränderte Parameter wurden folgende Parameter gewählt:

Diskretisierung:  $\Delta x = 0,3 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0,14 \text{ s}$ ,  $v^{max} = 2,1 \text{ m/s}$  (bzw.  $\hat{v}^{max} = 7$ )



Fußgängerpotential: Exponentiell abfallend und geschwindigkeitsabhängig mit:  $b_\beta = 12 \frac{\text{m}\Delta\text{x}}{\text{s}^2}$ ,  $\vartheta_\beta = 0,5 \text{ m}$ ,  $T_\beta = 0,6 \text{ s}$  und  $\hat{\vartheta}_{max} = 4$

Beschleunigungszeit:  $\tau = 0,5 \text{ s}$

Fluktuationen:  $\mu = 100$  (symmetrisch),  $\mu_a = 0$  (asymmetrisch)

Wandpotential:  $b_B = 15 \frac{\text{m}\Delta\text{x}}{\text{s}^2}$  und  $\vartheta_B = 0,3 \text{ m}$

### 5.2.1 Abhängigkeit von der Relaxationszeit $\tau$

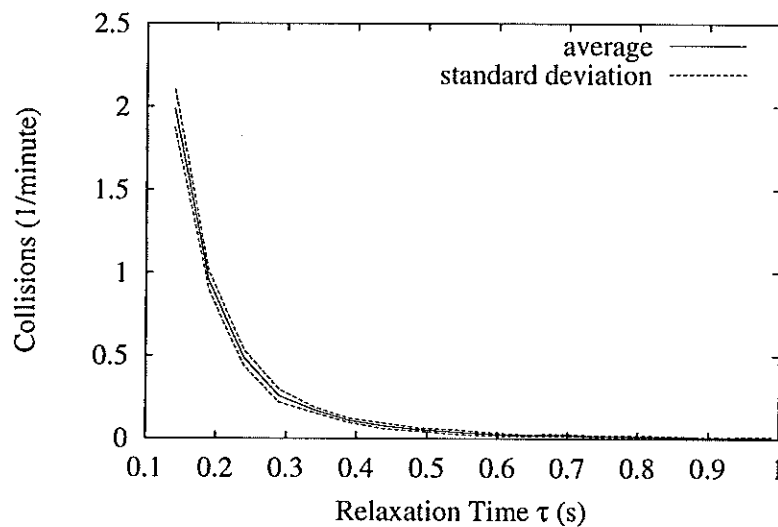


Abbildung 5.1: Kollisionen in Abhängigkeit von  $\tau$

Die Relaxationszeit  $\tau$  bestimmt die Agressivität der Fußgänger. Wird sie sehr klein gewählt, so steigt zwar die Effizienz, aber es kommt zu häufigen Kollisionen. Bei sehr großem  $\tau$  weichen die Fußgänger sehr weiträumig aus.

Die Kollisionen nehmen mit zunehmender Relaxationszeit ungefähr exponentiell ab. Eine Relaxationszeit  $\tau$  kleiner als 0,3 s kann nur gewählt werden, wenn die anderen Parameter (vor allem die Stärke der Fußgängerpotentiale) entsprechend angepaßt werden.

Die Effizienz nimmt mit steigendem  $\tau$  monoton ab. Die Fußgänger kommen sehr stark von ihrem Wunschkurs ab. Dies ist für Situationen, bei denen die Fußgänger ein bestimmtes Ziel erreichen wollen, unrealistisch. Für Touristen, die einfach nur bummeln, ist jedoch ein hoher Wert von  $\tau$  angebracht.

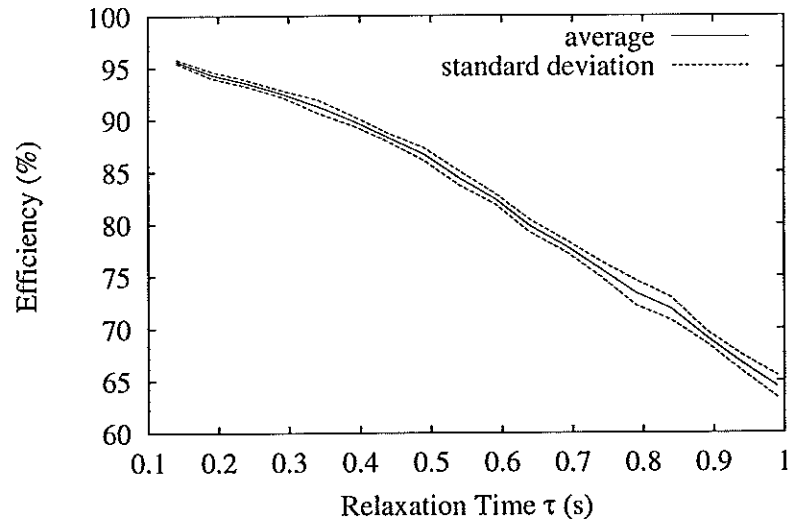


Abbildung 5.2: Effizienz in Abhängigkeit von  $\tau$

### 5.2.2 Abhängigkeit vom Zeitschritt $\Delta t$

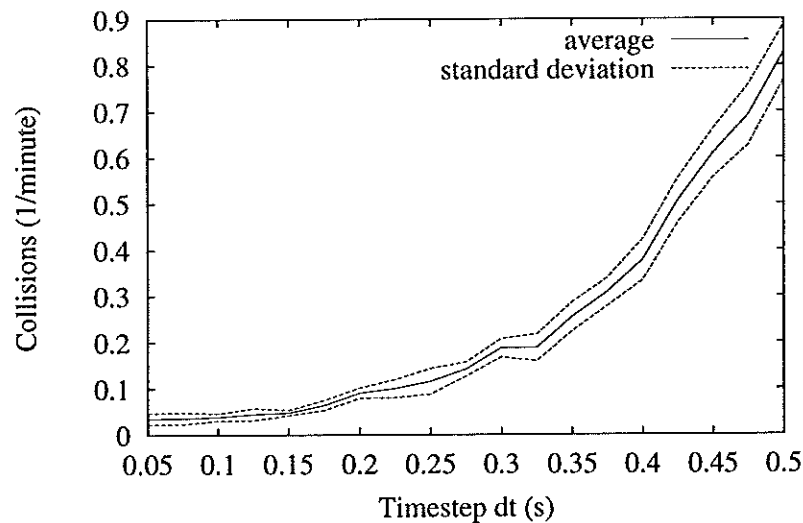
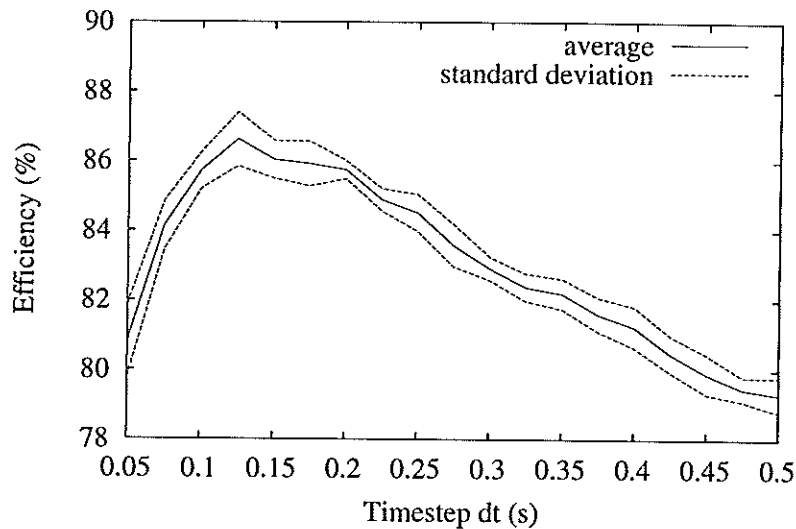


Abbildung 5.3: Kollisionen in Abhängigkeit von  $\Delta t$

Der Zeitschritt  $\Delta t$  ist eine sehr wichtige Größe, da er direkt die Simulationsdauer beeinflusst. Durch einen Zeitschritt von 0,14 s ist, bei einer maximalen Geschwindigkeit von 2,1 m/s sichergestellt, daß sich kein Fußgänger mehr als  $\Delta x = 0,3$  m pro Zeitschritt fortbewegt und somit keinen Gitterpunkt überspringt.

Bei großen Zeitschritten bemerken die Fußgänger Hindernisse zu spät, und es kommt

Abbildung 5.4: Effizienz in Abhängigkeit von  $\Delta t$ 

zu Kollisionen. Sie dringen auch in Bereiche mit großen Kräften vor und neigen zu abrupten Ausweichmanövern, die sich negativ auf die Effizienz auswirken.

Bei Zeitschritten bis zu 0,3 s bleibt die Kollisionshäufigkeit praktisch konstant. Darüber erweist sich die Zeitdiskretisierung als zu grob.

Es ist auf den ersten Blick erstaunlich, daß die Effizienz für Zeitschritte zwischen 0,05 s und 0,14 s zunächst zunimmt. Bei sehr kleinen Zeitschritten wirken sich jedoch selbst kleine Potentialwerte an den Rändern aus, was zu einem sanfteren, aber auch weiträumigeren Ausweichverhalten führt. Der erhöhte Platzbedarf macht sich effizienzmindernd bemerkbar.

Bei größeren Zeitschritten stellen sich dann die abrupten Richtungswechsel ein, die die effizienzsteigernde Bahnbildung stören, und so zu einem nahezu linearen Abfall der Effizienz führen.

Bei einem Zeitschritt um 0,15 s weichen die Fußgänger sanft, aber platzsparend aus, so daß die Effizienz dort ein Maximum hat.

### 5.2.3 Abhängigkeit von der Dichte $\rho$

Die Benutzungsqualität korreliert direkt mit der Fußgängerdichte (vgl. Abschnitt 5.1.1 auf Seite 51). Bei dichtem Verkehr steigt die Anzahl der Brems- und Ausweichmanöver immens an. Eine freie Bewegung ist nicht mehr möglich.

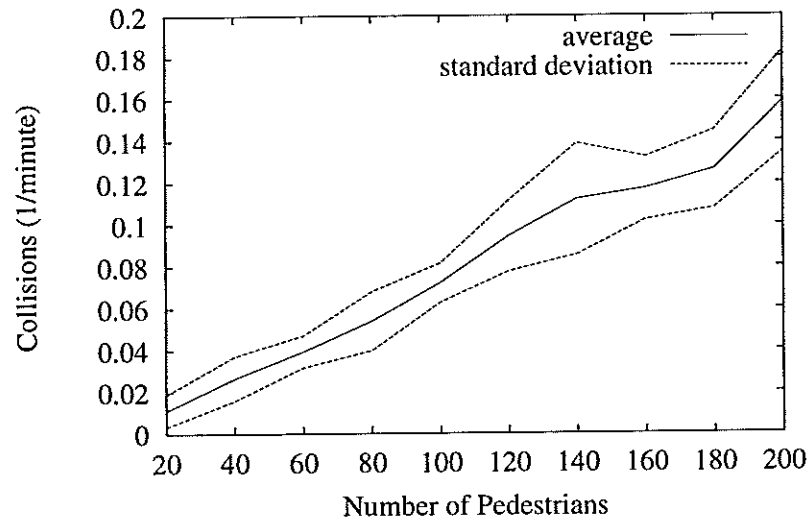


Abbildung 5.5: Kollisionen in Abhängigkeit von der Fußgängeranzahl

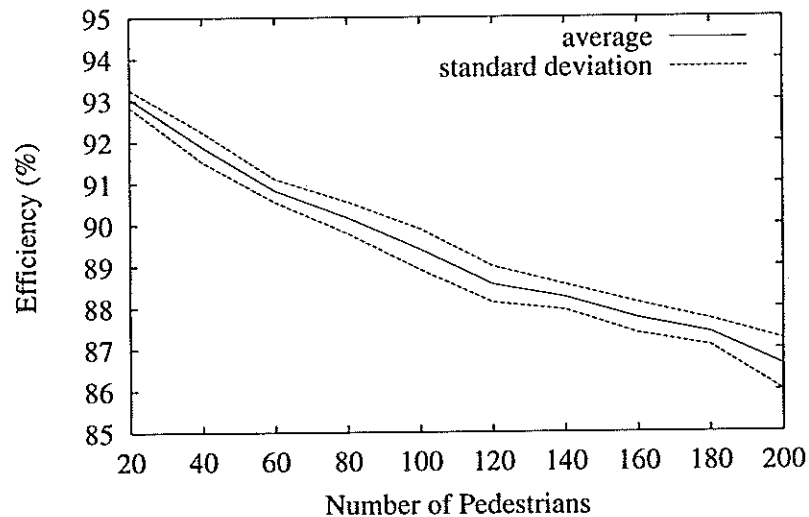


Abbildung 5.6: Effizienz in Abhängigkeit von der Fußgängeranzahl

Wie zu erwarten, steigt die Anzahl der unbeabsichtigten Berührungen (Kollisionen) mit zunehmender Dichte.

Die Effizienz sinkt nahezu linear mit der Dichte. Dies entspricht den Messungen in [Mol95].

Bei hohen Dichten (größer als  $1,0 \text{ P/m}^2 \hat{=} 324$  Fußgängern, nicht im Diagramm) versagt das Modell. Die Anzahl der Kollisionen steigt sehr steil an, und die Fußgänger bremsen nicht in ausreichendem Maße ab. Die mittleren Abstände der Fußgänger

haben dann die gleiche Größenordnung wie die Potentialdiskretisierung. Will man an der Diskretisierung festhalten (siehe Abschnitt 4.5 auf Seite 41) und dennoch brauchbare Ergebnisse bei hohen Dichten erzielen, so müssen zusätzliche Terme (siehe Abschnitt 4.7.1 auf Seite 44) eingeführt werden, die dafür sorgen, daß die Wunschgeschwindigkeit der experimentell gesicherten Geschwindigkeits-Dichte-Relation angepaßt wird. Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich, fällt dann die Effizienz bei hohen Dichten rapide ab.

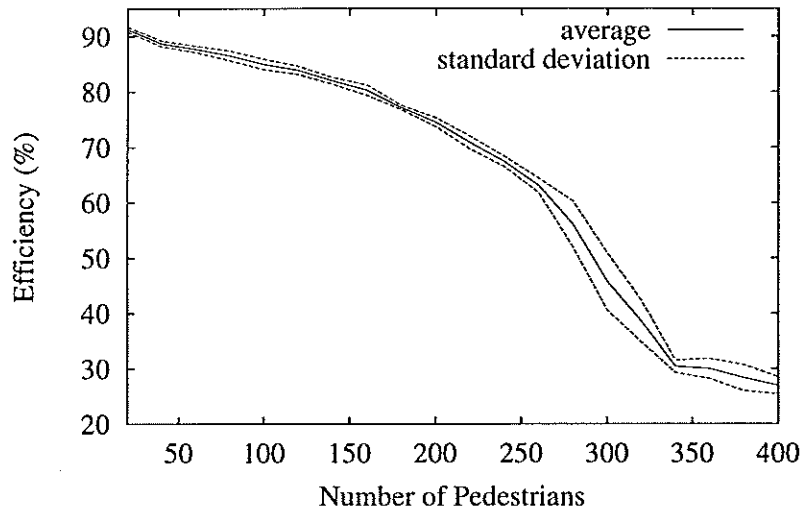


Abbildung 5.7: Effizienz in Abhängigkeit der Fußgängeranzahl (mit Korrekturtermen für hohe Dichten)

#### 5.2.4 Abhängigkeit von der Potentialstärke $b_\beta$

Der Gleichgewichtsabstand, den Fußgänger einhalten, wird durch die Potentialstärke  $b_\beta$  und die Potentialreichweite  $\vartheta_\beta$  bestimmt.

Potentialstärken von über  $15 \frac{\text{m}\Delta X}{\text{s}^2}$  verhindern Kollisionen sehr effektiv. Die Fußgänger weichen weiträumig aus. Unter  $10 \frac{\text{m}\Delta X}{\text{s}^2}$  steigt die Anzahl der Kollisionen rapide an, da nicht genügend ausgewichen wird. Natürlich reicht bei weniger aggressiven Fußgängern (Beschleunigungszeit  $\tau > 0,5$  s) auch eine kleinere Potentialstärke aus, um ein erfolgreiches Ausweichen zu ermöglichen.

Der erhöhte Platzbedarf der einzelnen Fußgänger bei starken Potentialen wirkt sich natürlich negativ auf die Effizienz aus. Die weiten Umwege beim Ausweichen stören

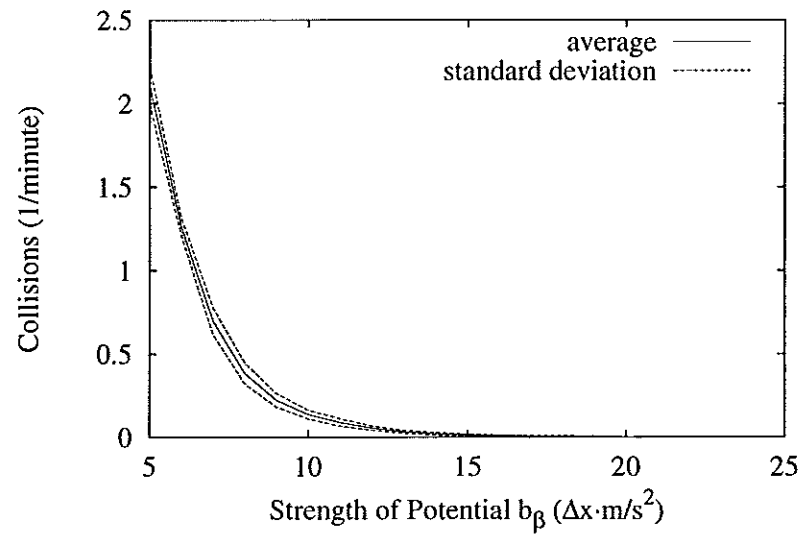


Abbildung 5.8: Kollisionen in Abhängigkeit von  $b_\beta$

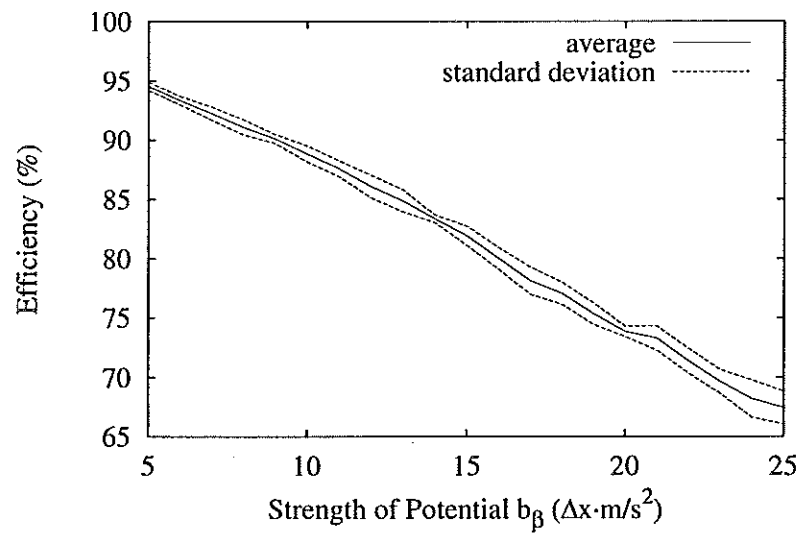


Abbildung 5.9: Effizienz in Abhängigkeit von  $b_\beta$

die Bahnbildung. Abbildung 5.9 zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Effizienz und Potentialstärke.

## 6 Optimierung

Das Thema Optimierung ist ein wichtiger Aspekt in Wirtschaft, Verwaltung, Mathematik, Physik und auch in den Sozialwissenschaften. Ziel ist es, aus mehreren Alternativen die beste auszuwählen, bzw. ein Verfahren zu entwickeln, das dies möglichst schnell und fehlerfrei ermöglicht.

Im Zusammenhang mit der Simulation von Fußgängerströmen bietet es sich an, die Gestaltung von Fußgängeranlagen wie z.B. Fußgängerzonen, Flughäfen, Bahnhöfen, Einkaufszentren oder Veranstaltungshallen zu optimieren. Dies kann noch während der Planungsphase geschehen, indem verschiedene Anlagengrundrisse simuliert werden und dann entschieden wird, welche am besten für den gewünschten Verwendungszweck geeignet sind.

Es ist jedoch auch möglich, das Verhalten der Fußgänger selbst als Optimierungsaufgabe zu sehen. Diese Vorgehensweise ist mit jener im Forschungsgebiet des künstlichen Lebens (Artificial Life) [Lan87, Lan90] verwandt.

Es ist bekannt, daß sich Kinder im Vergleich zu Erwachsenen ineffizienter fortbewegen und häufiger mit anderen Fußgängern zusammenstoßen. Im Laufe ihres Lebens erlernen sie eine optimale Verhaltensstrategie. Dies ist auch im Hinblick auf die Parameterwahl für die Simulation relevant. Zwar lassen sich die Relaxationszeiten, Potentialstärken und -reichweiten aus Kräftegleichgewichten abschätzen, aber eine genaue Kalibrierung ist so nicht möglich. Diese wird mittels einer Optimierung möglich, wenn davon ausgegangen wird, daß sich Fußgänger in der Realität optimal verhalten. Eine Untersuchung des Ausweichverhaltens ist ebenfalls möglich.

Auch auf einer höheren Ebene gibt es weitere Optimierungsprobleme. Das wichtigste ist dabei das Routenwahlverhalten: Es ist die Strecke auszuwählen, mit der alle Ziele möglichst günstig erreicht werden können. Dieses Problem ist in der Informatik unter dem Namen Travelling Salesman Problem (TSP) wohlbekannt. Der in dieser

Diplomarbeit entwickelte Simulator eignet sich allerdings nur für Optimierungsaufgaben auf untergeordneten Ebenen, z.B. die bereits angesprochene Gestaltung von Fußgängeranlagen und der Verhaltensstrategie. Die Ergebnisse dieser Optimierung können dann als Grundlage für die Optimierung auf höheren Ebenen dienen.

Durch die im Kapitel 5 vorgestellten Bewertungsgrundlagen kann entschieden werden, welche von mehreren möglichen Alternativen die beste ist. Meistens steht jedoch nicht nur ein Ziel, wie z.B. die Effizienz, im Vordergrund. So sollten die Kollisionen nicht überhand nehmen. Sind mehrere Ziele gleichzeitig zu erreichen, so müssen diese gewichtet werden. Dies ist meist eine sehr schwierige Aufgabe.

Besonders einfach ist die Optimierung, wenn die Auswahl der möglichen Alternativen sehr gering ist. Dann kann einfach jede Alternative ausprobiert werden. Bei einer Vielzahl von Alternativen wird ein automatisches Verfahren, das erfolgversprechende Realisierungen ausprobiert und die beste auswählt, benötigt.

## 6.1 Optimale Gestaltung von Fußgängeranlagen

Wie schon bei Molnár [Mol95, Kapitel 5] vorgeschlagen, lassen sich die Grundrisse von Fußgängeranlagen in Bezug auf verschiedene Bewertungskriterien verbessern. Meistens ist natürlich eine Steigerung der Effizienz und eine Verhinderung von Kollisionen das vorrangige Ziel. Bei Verkaufsflächen sollte dagegen gesteigerter Wert auf das Wohlbefinden gelegt werden. Auch sollten die Kunden durch die Verkehrsführung nicht vom Warenangebot abgelenkt werden.



Abbildung 6.1: Effizienzsteigerung durch Vermeidung von Ecken (aus [Hel97])

Es zeigt sich, daß eine Verringerung der Verkehrsfläche nicht unbedingt zu einer Verschlechterung der Effizienz führen muß. Dazu werden zwei einfache Fälle systematisch untersucht.



### 6.1.1 Bahnstabilisierung durch Hindernisse

In einer Straße, in der Fußgänger in beide Richtungen laufen, bilden sich Bahnen aus. Werden z.B. Bäume in einer Art Allee zwischen diesen Bahnen gepflanzt, so ist zu vermuten, daß dadurch die Bahnen nicht gestört werden. Es tritt sogar eine Stabilisierung ein. Der gleiche Effekt tritt in einem Korridor auf, in dem Säulen als Hindernisse vorhanden sind (siehe Abbildung 1.2 auf Seite 12).

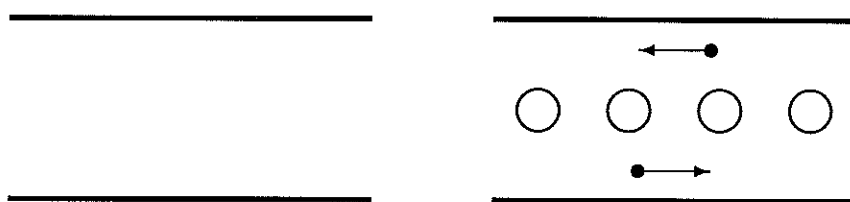


Abbildung 6.2: Effizienzsteigerung durch Bahnstabilisierung mit Hindernissen (aus [Hel97])

Das Schaubild 6.3 auf der nächsten Seite zeigt die Effizienz einer Straße in Abhängigkeit der Anzahl der Bäume, die entlang der Querrichtung bzw. senkrecht dazu gepflanzt werden. Die Fußgängerparameter wurden wie in Abschnitt 4.6 auf Seite 43 gewählt. Das Potential eines Baumes ist von der einfachen, exponentiell abfallenden Form (4.5). Die Potentialstärke und Reichweite entspricht der einer Wand.

Es zeigt sich, daß die Effizienz praktisch nicht zurück geht, gleichgültig ob sehr wenige Bäume pro Reihe gepflanzt, oder ob die Reihen sehr eng bepflanzt sind. Im ersten Fall ist die Gesamtzahl der Bäume sehr gering und zeigt deshalb keine Auswirkungen. Im zweiten Fall werden die Bahnen stabilisiert und dadurch der Platzverlust ausgeglichen. Sind die Bäume zahlreich, stehen jedoch relativ weit auseinander, so führt dies zu erheblichen Behinderungen, wie im Schaubild bei 10 Bäumen pro Reihe deutlich wird. Sind die Baumreihen zu eng, so reicht der Platz für die vorgegebene Anzahl von Fußgängern nicht mehr aus.

Nimmt man ein asymmetrisches Ausweichen der Fußgänger an, so ist der Einbruch der Effizienz nicht so drastisch, da sich die entgegengesetzten Bewegungsrichtungen sehr schnell separieren.

In Wirklichkeit sind die Auswirkungen von Baumreihen noch größer. Aufgrund der begrenzten Sichtmöglichkeiten werden benachbarte Bahnen gar nicht mehr wahr-

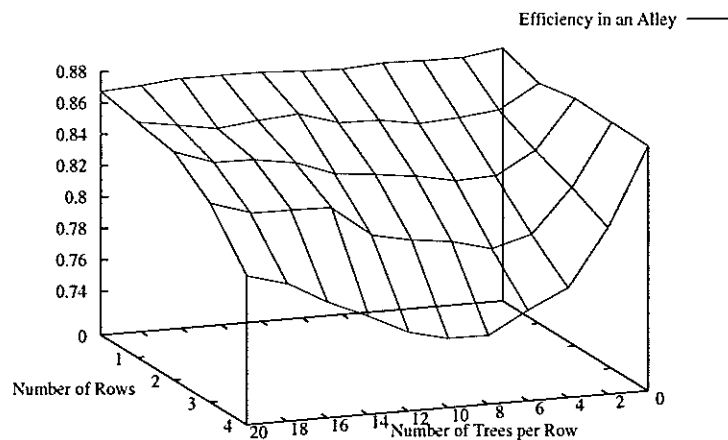


Abbildung 6.3: Effizienz, abhängig von Bäumen auf der Straße

genommen (siehe Abbildung 1.3 auf Seite 13). Die Baumreihe erscheint wie eine Wand. Diese langreichweitigen Sichteffekte können von dem einfachen diskreten Modell natürlich nicht wiedergegeben werden.

### 6.1.2 Gestaltungsmöglichkeiten an einer Kreuzung

Auf einer Fußgängerkreuzung konkurrieren zwei selbstorganisierte Muster. Entweder wechseln sich horizontale und vertikale Richtung ab, oder es kommt zu einer Art Kreisverkehr. Mit einem Hindernis in der Mitte der Kreuzung läßt sich der Kreisverkehr stabilisieren. Dadurch bleibt die Effizienz trotz stark eingeschränktem Platz stabil. Wird das Hindernis zu groß, dann ist die Kreuzung verstopft, und die Effizienz fällt ab (Abbildung 6.5 auf der nächsten Seite).

Molnár [Mol95] erzielte mit einem Hindernis sogar Effizienzsteigerungen von über 15%. Dies konnte mit dem hier untersuchten, vereinfachten Modell jedoch nicht reproduziert werden. Die Ausbildung eines Kreisverkehrs ist abhängig von der Leichtigkeit der Beeinflussbarkeit der Bewegungsrichtung und sehr stark abhängig von der Wahl der Wechselwirkungskräfte. Die im diskreten Modell auftretenden Kräfte ändern sich jedoch sprunghaft, was einem stabilen Kreisverkehr sehr abträglich ist. Selbst bei einer stark erhöhte Relaxationszeit  $\tau$  und asymmetrischen Fluktuationen ist mit einem Hindernis keine Verbesserung erreichbar.

Mit einer Ampel könnte das andere grundlegende Muster, die abwechselnde Durchquerung in horizontaler und vertikaler Richtung, stabilisiert werden. Es ist jedoch

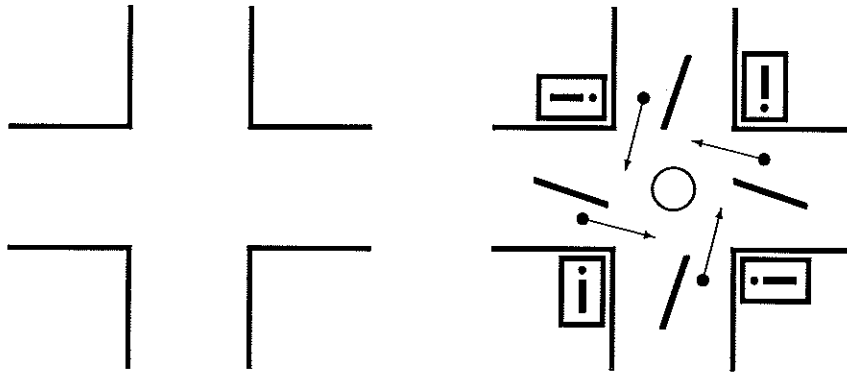


Abbildung 6.4: Gestaltungsmöglichkeiten einer Fußgängerkreuzung (aus [Hel97]): Durch ein Hindernis in der Mitte der Kreuzung, Attraktionen und Absperrungen kann ein Kreuzverkehr stabilisiert werden

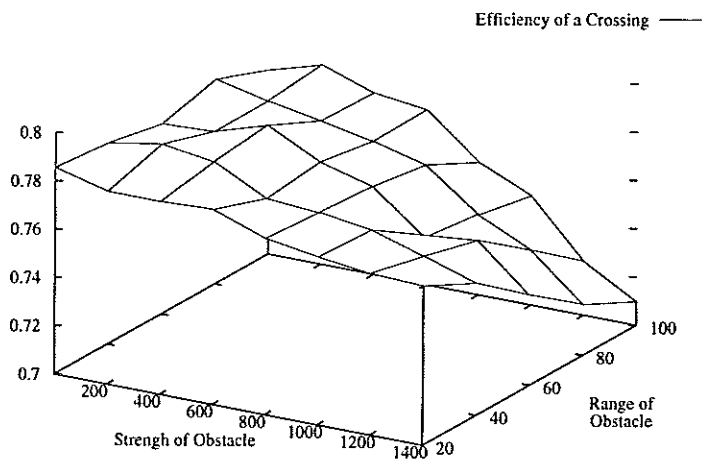


Abbildung 6.5: Effizienz in Abhängigkeit von der Stärke und Reichweite des Hindernisses auf der Kreuzung

anzuzweifeln, ob Fußgänger eine Ampel auf einer reinen Fußgängerkreuzung respektieren würden.

## 6.2 Optimierungsmethoden

Methoden zur Suche des Optimums können grob in drei Klassen eingeteilt werden: Enummerative Methoden, analytische Methoden und Zufallsmethoden.

### Enumerative Methoden

Im vorhergehenden Abschnitt wurden einfach systematisch Stichproben aus dem Suchraum gemacht und bewertet. Das ist konzeptionell sehr einfach und ermöglicht bei wenigen Parametern einen schnellen Überblick. Im allgemeinen wird der Suchraum für jeden Parameter in äquidistanten Schritten abgesucht. Bei höherdimensionalen Parameterräumen ist diese enumerative Methode jedoch ungeeignet, da die Anzahl der Stichproben exponentiell mit der Anzahl der Dimensionen ansteigt (Fluch der Dimensionen). Es wird keinerlei Vorwissen über das zugrundeliegende Modell verwendet, und die Ergebnisse von bereits gemachten Stichproben beeinflussen die weitere Suche nicht. Es werden also viele vorhandene Informationen nicht genutzt.

### Analytische Methoden

Die Versuche, der Optimierung mathematisch Herr zu werden, führten im 18. Jahrhundert zur Entwicklung der Differential- und Variationsrechnung durch viele bedeutende Mathematiker wie Newton, Euler, Lagrange und Johannes Bernoulli. Ist die Abhängigkeit der Bewertung von den Parametern in analytischer Form bekannt und sind die Vorbedingungen (z.B. die Existenz eines wohldefinierten Gradienten) erfüllt, so kann das Optimum gefunden werden, indem der Gradient gleich Null gesetzt wird. In der Realität sind jedoch viele Vorbedingungen nicht erfüllt: Die Bewertung eines bestimmten Parametersatzes kann z.B. nur durch Simulation bestimmt werden oder die zu optimierende Funktion ist stark verrauscht. Selbst wenn die Vorbedingungen erfüllt sind, sind die entstehenden Gleichungssysteme meist nur näherungsweise zu lösen. Durch Nebenbedingungen, wie z.B. einem eingeschränkten Wertebereich für bestimmte Parameter, wird die Situation nochmals deutlich komplizierter.

Indirekte analytische Methoden suchen das Optimum in der Richtung des größten Gradienten (hillclimbing). Vorbedingung ist auch hier, daß der Gradient bestimmbar ist. Ist die zu optimierende Funktion nicht unimodal, sondern hat mehrere Maxima, so muß durch Hilfsverfahren sichergestellt werden, daß das Verfahren nicht bei einem Nebenmaxima stecken bleibt. Dies kann z.B. geschehen, indem mehrere Optimierungsdurchläufe mit zufällig gewählten Startpunkten durchgeführt werden.

### Zufallsmethoden

Dieses Vorgehen führt direkt zu den Zufallsmethoden. Der einfachste Ansatz wäre, rein zufällige Stichproben aus dem Parameterraum zu untersuchen. Dies ist jedoch nicht erfolgreicher als die enumerative Methode mit äquidistanten Suchschritten. Vorteile erhält man nur, wenn das Wissen, das mit bereits gemachten Stichproben

gesammelt wurde, zur Beeinflussung der Auswahl des nächsten Suchpunktes genutzt wird (siehe z.B. Monte-Carlo-Methoden [Fis96]).

Da die Ergebnisse der Fußgängersimulationen, selbst bei gleichen Parametern, durch die stochastische Natur der Bewegung relativ starken Schwankungen unterliegen, müssen sehr robuste Verfahren zur Anwendung kommen. Die Simulationsdauer ist trotz des verwendeten diskretisierten Kräfte Modells nicht vernachlässigbar. Es dauert, im Vergleich zum einfachen Berechnen eines Funktionswertes, sehr lange, bis einem Parametersatz eine bestimmte Bewertung zugeordnet werden kann.

Aus diesen Gründen sollten Optimierungsverfahren verwendet werden, die schnell zu besseren Lösungen führen und dabei möglichst viele bereits gewonnene Informationen weiterverwenden. Aufgrund der stark verrauschten Bewertungsmaße müssen die Verfahren sehr robust sein und keinen Vorbedingungen, wie z.B. die Existenz eines Gradienten, unterliegen.

Im Vordergrund steht dabei nicht das mathematisch beweisbare Auffinden eines Optimums, sondern die praktische Verbesserung der bisher bekannten besten Parameterwerte.

Akzeptiert man die Hypothese, daß die biologische Evolutionsmethode eine optimale Strategie zur Anpassung der Lebewesen an die Umwelt darstellt, so ist es vielversprechend, diese Methode auch zur Optimierung von technischen, wirtschaftlichen und sozialen Systemen, einzusetzen.

Die wesentlichen Elemente der evolutionären Optimierung sind:

**Selektion:** Von mehreren möglichen Lösungen (Punkten im Parameterraum) „überleben“ nur die erfolgreichsten.

**Mutation:** Diese zugehörigen Parameter werden dann leicht verändert um eventuell noch erfolgreichere Lösungen zu finden.

**Crossover:** Es ist auch möglich, Teile von erfolgreichen Lösungen zu kombinieren.

**Reproduktion:** Die so ausgewählten und veränderten Parametersätze stellen die nächste Generation dar, die bewertet wird

Nachfolgend werden die wichtigsten Vertreter solcher „bionischen“ \* Zufallsverfahren vorgestellt.

### 6.2.1 Simulated Annealing

Eine sehr einfache Variante eines evolutionären Algorithmus ist der von Kirkpatrick [KJV83] zum Simulated Annealing weiterentwickelte Metropolis-Algorithmus. Dieser Algorithmus wurde zur Erzeugung von Boltzmann-verteiltern Ensembles entwickelt [MRR+53].

Die stationäre Verteilung von Lösungen nach dem Metropolis-Algorithmus ist die Boltzmann-Verteilung:

$$P(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(\vec{x}, t) \sim e^{-\beta F(\vec{x})} \quad (6.1)$$

Dabei ist  $\beta$  proportional zur „inversen Temperatur“ und  $F(\vec{x})$  eine reellwertige Bewertungs- bzw. Fitnessfunktion, deren Optimum gefunden werden soll.

Aufgrund der Exponentialfunktion ist die Wahrscheinlichkeitsdichte bei niedriger Temperatur in der Nähe des Optimums der Bewertungsfunktion am größten.

Nach einer Mutation, die einen durch den Parameter-Vektor  $\vec{x}$  beschriebenen Zustand in den zufällig gewählten Zustand  $\vec{x}'$  überführt, erfolgt die Selektion mit der Akzeptanzwahrscheinlichkeit  $A$ , die von der Differenz der Bewertungsfunktion (Fitnessdifferenz)  $\Delta F = F(\vec{x}') - F(\vec{x})$  abhängt:

$$A(\vec{x}', \vec{x}) = \begin{cases} 1 & : \Delta F \leq 0 \\ e^{-\beta \Delta F} & : \Delta F > 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

D.h. eine Verbesserung wird immer akzeptiert. Die Akzeptanzrate von Verschlechterungen hängt von der inversen Temperatur  $\beta$  ab. Nach und nach wird die Temperatur

---

\* Bionik: Wissenschaft der Nutzbarmachung von Resultaten der biologischen Evolution. Aufgabe der Bionik ist die Analyse von biologischen Prozessen und Strukturen und deren technische Synthese in Konstruktionen von Morgen. Die Idee der Bionik gründet sich auf die Tatsache der Evolution und Koevolution in der Natur. Die Techniken des Lebens sind optimiert und aufeinander abgestimmt. Es ist eine Chance, durch Nachbildung biologischer Prinzipien eine leistungsfähige Lösung zu erhalten, die zugleich in die Umwelt paßt. Denn wer heute von sanfter Technik spricht, tut dies meist mit einem Seitenblick auf die Biologie.

abgesenkt, so daß am Ende die optimale Lösung „eingefroren“ wird. Am Anfang verhindert die hohe Temperatur ein Steckenbleiben in Nebenmaxima. Das Crossover spielt bei diesem Verfahren keine Rolle.

### 6.2.2 Genetische Algorithmen

In den späten '60er und frühen '70er Jahren wurden, unter Anleitung von John Holland an der University of Michigan, die genetischen Algorithmen entwickelt. In [Gol89] findet sich eine gute Einführung in diese Methode. Grundlage ist die Kodierung der Parameter nach dem Vorbild der biologischen Gene: Ein Bit-String, bestehend aus Nullen und Einsen, bestimmt den Parameterwert.

Es wird jeweils eine ganze Anzahl von potentiellen Lösungen simuliert. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Lösung Einfluß auf die nächste Generation von Lösungen nehmen kann, ist proportional zur relativen Fitneß im Vergleich zu den anderen Lösungen.

Die so ausgewählten Lösungen werden mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit mutiert, indem ein zufällig ausgewähltes Bit invertiert wird. Der wichtigste Schritt ist jedoch das Crossover. Hier werden die Bit-Strings zweier Lösungen der Eltern-Generation an einer zufällig gewählten Stelle getrennt und jeweils mit dem anderen Elternteil vertauscht. So entstehen Lösungen, die die positiven Eigenschaften der erfolgreichen Eltern kombinieren. Es kann passieren, daß durch das Crossover ein Parameterwert entsteht, der außerhalb des erlaubten Parameterbereichs fällt. In diesem Fall kann dieser Parametersatz entweder verworfen, repariert oder durch Strafterme bei der Bewertungsfunktion benachteiligt werden.

Mit Hilfe des Schema-Theorems läßt sich beweisen, daß dieses Vorgehen zu einer schnellen Konvergenz gegen die optimale Lösung führt [Mic96].

### 6.2.3 Evolutionsstrategien

Die von Hans-Paul Schwefel [Sch77] und Ingo Rechenberg [Rec73] entwickelte Evolutionsstrategie entstand fast zeitgleich mit den genetischen Algorithmen. Die ähnlichen Ansätze waren jedoch lange Zeit gegenseitig unbekannt.

Bei den Evolutionsstrategien wird eine mögliche Lösung, wie beim Simulated Annealing, durch einen Vektor im Parameterraum dargestellt. Im einfachsten Fall, der

zweigliedrigen Evolutionstrategie, konkurrieren nur zwei Lösungen. Die Ausgangslösung  $\vec{x}$  und der durch Mutation entstandene Nachkomme  $\vec{x}'$ . Die Mutation erfolgt hierbei durch

$$\vec{x}' = \vec{x} + \vec{\mathcal{N}}(0, \mu) \quad (6.3)$$

Der Vektor  $\vec{\mathcal{N}}$  enthält unabhängige, normalverteilte Zufallzahlen mit der Standardabweichung  $\mu$ . Wie in der Natur sind kleine Änderungen weit häufiger als große. Die beiden Vektoren werden bewertet und der schlechtere wird verworfen. In [BHS91] wird der Beweis erbracht, daß dieses Verfahren konvergiert. Es konvergiert sogar meistens schneller als deterministische Verfahren.

Um die Konvergenzgeschwindigkeit zu beschleunigen, kann die Schrittweite  $\mu$  gesteuert werden. Zu Beginn der Optimierung sollte mit starken Mutationen der ganze Parameterraum erforscht werden. Später ermöglichen kleine Mutationen die genauere Lokalisierung des Optimums.

Anhand von zwei sehr allgemeinen Modellen schlägt Rechenberg [Rec73] die  $\frac{1}{5}$ -Erfolgsregel vor. Die Erfolgswahrscheinlichkeit  $W$  ist der Anteil der erfolgreichen Mutationschritte im Vergleich zur Gesamtzahl der Mutationschritte. Nach jeweils  $k$  (z.B. 10) Generationen wird überprüft, wie groß die aktuelle Erfolgswahrscheinlichkeit  $W$  ist. Abhängig davon wird die Schrittweite geändert:

$$\mu' = \begin{cases} c_d \mu & : W < 1/5 \\ \sigma & : W = 1/5 \\ c_i \mu & : W > 1/5 \end{cases} \quad (6.4)$$

Dabei ist  $c_d < 1$  (z.B. 0.85) und  $c_i > 1$  (z.B. 1/0.85). So wird in der Nähe des Optimums (wenn große Mutationen nicht zum Erfolg führen) genauer gesucht.

Im Laufe der Zeit wurde dieses Verfahren weiterentwickelt. Es kann zum Beispiel eine ganze Gruppe von Individuen (Parametersätzen) gleichzeitig untersucht werden. Von diesen erhalten nur die erfolgreichsten die Möglichkeit zur Reproduktion. Im allgemeinen wird die Populationsgröße konstant gehalten. Es ist auch möglich, das von den genetischen Algorithmen bekannte Crossover mit einzubeziehen. Dafür können z.B. einzelne Parameterwerte zwischen Individuen ausgetauscht werden, oder die Werte werden, z.B. durch Mittelung, kombiniert. Die deterministische Regelung der Schrittweite durch die  $\frac{1}{5}$ -Erfolgsregel kann durch das Einbeziehen der Standardabweichung  $\mu$  in den Evolutionsprozeß ersetzt werden.



Die Evolutionsstrategie ist eine sehr effiziente Optimierungsstrategie, die für komplexe und zeitlich veränderliche Umgebungen besonders geeignet und auf Multiagentensysteme, wie den Fußgängerverkehr, geradezu zugeschnitten ist.

Es ist leider nicht möglich, eine für alle Einsatzbereiche optimale evolutionäre Strategie zu benennen. Nur eine genaue Voruntersuchung des zu optimierenden Modells ermöglicht es, aus dem reichhaltigen Baukasten für Evolutionsstrategien erfolgversprechende Methoden auszuwählen. In der Literatur (z.B. [Sch77, Bae96]) wird eine Vielzahl von Modifikationen der Grundidee vorgeschlagen und in verschiedenen Anwendungsfällen getestet.

## 6.3 Evolution des Fußgängerverhaltens

Im Laufe ihres Lebens lernen Fußgänger eine optimale Fortbewegungsstrategie, die es ihnen ermöglicht, effizient und möglichst kollisionsfrei ans Ziel zu kommen. Es bietet sich an zu testen, in wie weit Evolutionsstrategien in der Lage sind, diesen Lernprozeß zu modellieren. Molnár hat diese Untersuchung vorgeschlagen [Mol95], sie jedoch nicht durchgeführt.

Es ist zwar möglich, die Parameter durch Kräftegleichgewichte abzuschätzen; dabei treten jedoch Unsicherheiten auf, die nur durch ein Optimierungsverfahren ausgeräumt werden können. Die aus den Kräftegleichgewichten gewonnenen Werte verwendet man als Startwerte für die Optimierung.

Nach erfolgreicher Optimierung erhält man als Nebeneffekt einen guten Parametersatz, der für weitergehende Experimente, wie z.B. die Grundriß-Optimierung, zur Verfügung steht.

Es ist denkbar, statt der Potentialparameter  $b_\beta$ ,  $\vartheta_\beta$  und  $T_\beta$ , den gesamten zweidimensionalen Potentialverlauf der Optimierung zu unterwerfen. Doch dies führt zu einer starken Vermehrung der Parameterwerte. Statt der drei Parameter müßten dann für jede der  $\hat{v}_{max}^2$  diskreten Geschwindigkeiten  $\hat{v}_{max}^2$  Parameter optimiert werden. Dies sind bei  $\hat{v}_{max} = 5$  und der diskreten Potentialreichweite  $\hat{v}_{max} = 4$  ganze 400 Parameter. Eine solche Optimierung ist, trotz der sehr effizienten Evolutionsstrategie, aus Rechenzeitgründen gescheitert.

Das Ziel der Parameteroptimierung ist eine hohe Effizienz bei möglichst wenigen Kollisionen. Die Fitneßfunktion  $F$  wird also definiert als Differenz zwischen der ge-

wichteten Effizienz  $Y_\alpha^1$  und der Anzahl der Kollisionen  $C_{\alpha,total}$  eines Fußgängers in 10000 simulierten Zeitschritten der Länge  $\Delta T = 0,14$  s (also ca. 23,3 Minuten):

$$F = 100Y_\alpha^1 - C_{\alpha,total} \quad (6.5)$$

Der Gewichtungsfaktor 100 wurde empirisch ermittelt, so daß die Fitneß im allgemeinen positiv ist. Für manche Selektionsverfahren ist dies notwendig, z.B. wenn die Selektionswahrscheinlichkeit proportional zur relativen Fitneß gewählt wird. In den nachfolgenden Simulationen wurde die Selektion jedoch nur anhand der Rangfolge durchgeführt, so daß das Vorzeichen von  $F$  unerheblich ist. Der Gewichtungsfaktor bestimmt dann nur die relative Wichtigkeit der beiden Faktoren. Es zeigt sich, daß der genaue Wert des Gewichtungsfaktors  $F$  kaum eine Auswirkung auf das Ergebnis der Simulation hat. Werte von 50 bis 200 führen zu praktisch den gleichen Ergebnissen. In [Gol89, Kapitel 3] finden sich Einzelheiten zu den Auswirkungen der Reskalierung von Fitneß-Funktionen.

### 6.3.1 Evolution der Verhaltensstrategie in einer heterogener Population

In ersten Versuchen werden sowohl die Relaxationszeit  $\tau$ , als auch die Potentialparameter  $(b_\beta, T_\beta, \vartheta_\beta)$  jedes einzelnen Fußgängers unabhängig von den anderen Fußgängern mutiert. Dies entspricht der realistischen Situation, in der die Fußgänger mit unterschiedlichen Verhaltensweisen konfrontiert werden und trotzdem ein optimales Verhalten entwickeln.

Simuliert werden 200 Generationen von je 100 Fußgängern, die mit entgegengesetzten Wunschrichtungen durch einen Korridor gehen. Nach einer Generation überlebt jeweils die bessere Hälfte der Parametersätze. Die andere Hälfte wird durch mutierte Versionen der erfolgreichen Parameter ersetzt. Alternativ wird auch die von den genetischen Algorithmen bekannte Selektion untersucht, bei der die Überlebenswahrscheinlichkeit proportional zur relativen Fitneß ist. Die Mutationsrate wird durch die  $\frac{1}{5}$ -Erfolgsregel gesteuert.

Es zeigt sich, daß die Fitneß der Population insgesamt abnimmt. Es findet also keine Optimierung statt. Das System entfernt sich vom Optimum.

Zwar sinkt die Relaxationszeit schnell auf den minimal möglichen Wert, um eine möglichst große Effizienz zu erreichen. Um das dadurch verursachte Ansteigen von

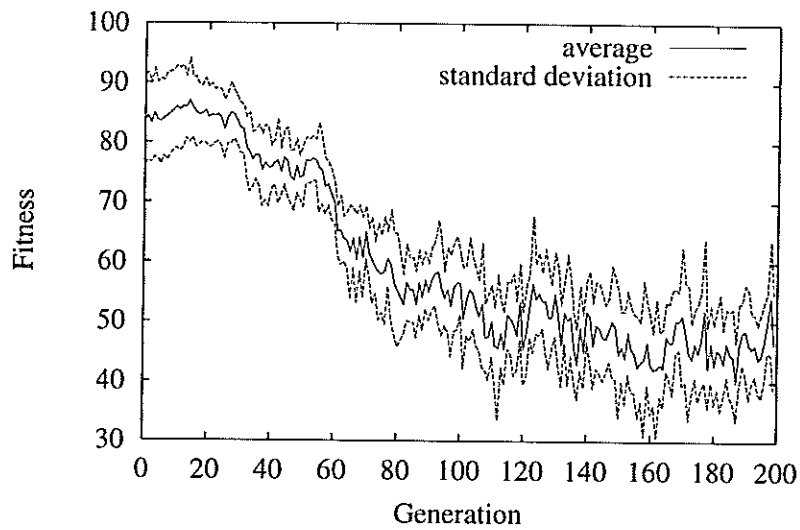


Abbildung 6.6: Fitneß bei Evolution mit heterogener Population

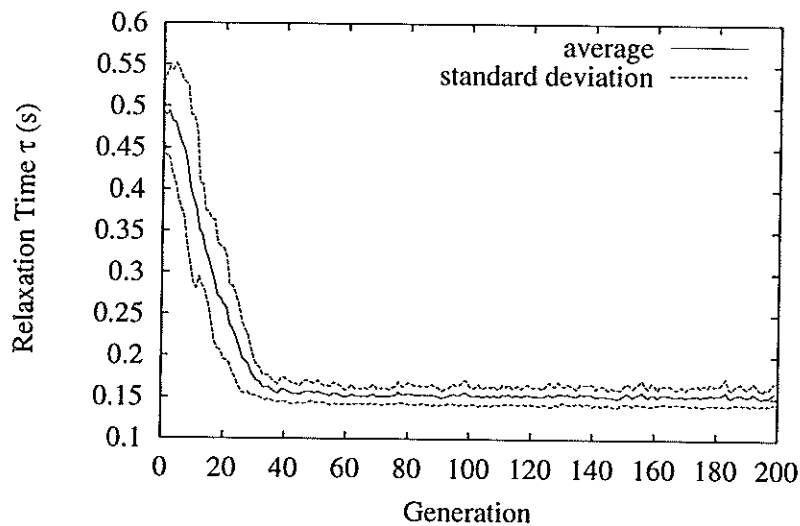


Abbildung 6.7: Relaxationszeit bei Evolution mit heterogener Population

Kollisionen zu kompensieren, steigt die Potentialstärke jedoch unkontrolliert. Dadurch sinkt die Effizienz für alle Fußgänger.

Das Problem liegt in der vereinfachenden Modellannahme, daß jeder Fußgänger von allen anderen gleich wahrgenommen wird. Das Potential ist dem Fußgänger, dem ausgewichen werden soll, zugeordnet. Dieser Fußgänger hat durch ein starkes Potential nur Vorteile. In der Optimierung setzen sich also Fußgänger durch, die andere stark abstoßen. In der Realität hängt das Ausweichverhalten jedoch von der Wahrnehmung ab. Aufmerksame Fußgänger sind erfolgreicher. Das Problem liegt also an der

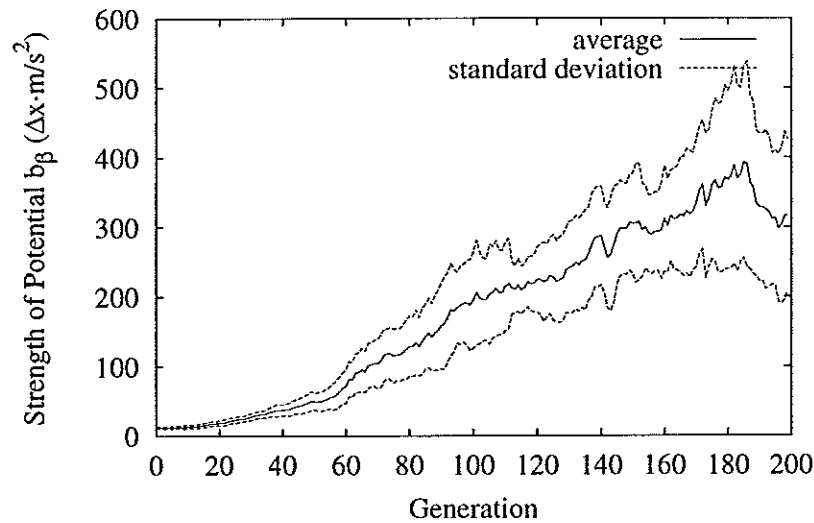


Abbildung 6.8: Potentialstärke bei Evolution mit heterogener Population

Art des simulierten Modells. Obwohl das Potential die Aufmerksamkeit der anderen Fußgänger beschreibt, wird es dem Beobachteten zugeordnet.

Es zeigt sich also, daß das Modell für die Simulation der Evolution heterogener Populationen ungeeignet ist. Eine erfolgreiche Lösung wäre nur möglich, wenn das Potential vom Beobachter abhängt. Dies ist im Rahmen dieses diskreten Modells mit einem gemeinsamen Gesamtpotential nicht möglich. Zur Einführung eines beobachterabhängigen Potentials müßte die Entfernung zwischen den Fußgängern bestimmt werden und jeder Fußgänger würde eine andere Potentiallandschaft wahrnehmen. Dies würde zu einer Explosion der Rechenzeit führen.

### 6.3.2 Evolution der Verhaltensstrategie in einer homogener Population

Als Ausweg bleibt nur die Simulation mit homogenen Parametern. Dabei hat jeder der 100 Fußgänger den gleichen Parametersatz. Nach dem Simulationslauf wird die Fitness bestimmt und mit dem Ergebnis bei variierten Parametern verglichen. Nur die erfolgreicher Parameteransätze werden übernommen. Das ist eine zweigliedrige Evolutionsstrategie.

Der große Nachteil ist hierbei, daß pro Simulationslauf nur ein Parametersatz getestet werden kann, obwohl 100 Fußgänger unterwegs sind. Es zeigt sich jedoch, daß das Optimum trotzdem nach erstaunlich wenigen Generationen erreicht wird.

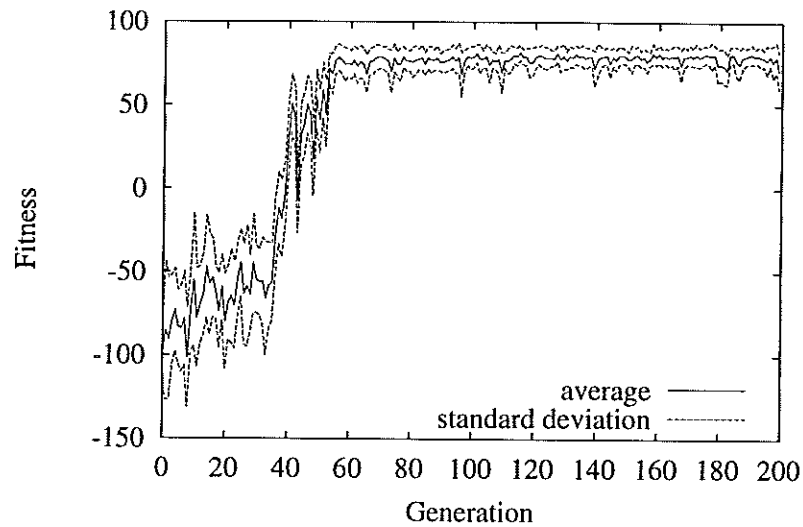


Abbildung 6.9: Fitneß bei Evolution mit homogener Population

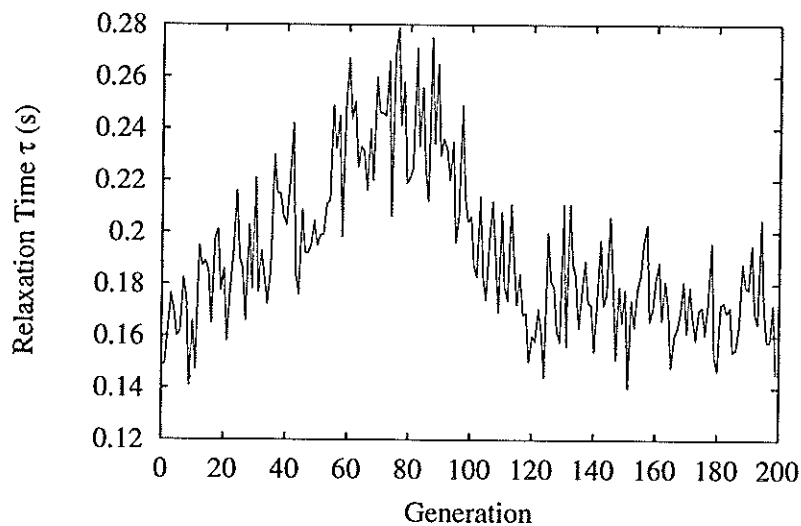


Abbildung 6.10: Relaxationszeit bei Evolution mit homogener Population

Wie erhofft strebt die Fitneß, selbst bei ungünstigen Startwerten, schnell in Richtung des Optimums.

An den in den Abbildungen 6.9, 6.10 und 6.11 gezeigten Simulation ist interessant, daß die Relaxationszeit zunächst ansteigt, um das anfänglich absichtlich sehr schwache Potential auszugleichen. Ist das Potential dann jedoch auf einen realistischen Wert angestiegen, dann sinkt die Relaxationszeit wieder, um eine höhere Effizienz zu sichern.

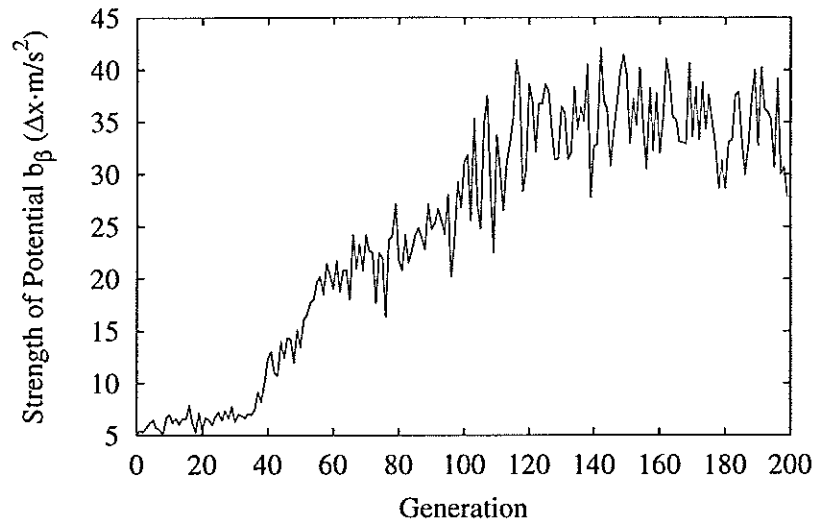


Abbildung 6.11: Potentialstärke bei Evolution mit homogener Population

Nach ca. 120 Generationen sind die optimalen Parameterwerte erreicht. Die Potentialstärke  $b_B$  ist auf  $35 \frac{m\Delta x}{s^2}$  angewachsen. Die Relaxationszeit  $\tau$  hat sich bei 0,17 s stabilisiert. Die Potentialreichweite  $\vartheta_\beta$  pendelt sich auf 0,44 m ein. Die Zeit  $T_\beta$ , die die Exzentrizität des geschwindigkeitsabhängigen Potentials beschreibt, beträgt nur 0,14 s. Das so entstehende Potential ist also sehr symmetrisch.

Bei den gleichen Startwerten ist es jedoch auch möglich, daß sich eine andere „optimale“ Parameterkombination ergibt:  $b_B = 15 \frac{m\Delta x}{s^2}$ ,  $\tau = 0,27$  s,  $\vartheta_\beta = 0,45$  m und  $T_\beta = 0,76$  s.

Viele Untersuchungen mit den unterschiedlichsten Startwerten zeigen, daß es offensichtlich zwei „optimale“ Bereiche gibt:

Der eine liegt bei hohen Potentialstärken  $b_B$  von  $33 \frac{m\Delta x}{s^2}$  bis  $37 \frac{m\Delta x}{s^2}$  mit aggressiven Relaxationszeiten von 0,16 s bis 0,17 s. Die Potentialreichweite variiert zwischen 0,35 m bis 0,45 m und  $T_\beta$  von 0,05 s bis 0,15 s. Diese Fußgänger sind sehr effizient (90% bis 92%), kollidieren jedoch relativ häufig,  $C_{\alpha, total}$  liegt bei 8 bis 11.

Der andere Fall beschreibt gemütlichere Fußgänger mit einer Potentialstärke  $b_B$  von  $12 \frac{m\Delta x}{s^2}$  bis  $15 \frac{m\Delta x}{s^2}$  mit Relaxationszeiten von 0,25 s bis 0,35 s. Die Potentialreichweite liegt im Bereich von 0,42 m bis 0,46 m und vorausgeschaut Zeit  $T_\beta$  ist mit 0,75 s bis 0,8 s deutlich länger. Diese Fußgänger sind mit nur 82% bis 83% nicht so effizient, aber sie kollidieren deutlich weniger ( $C_{\alpha, total}$  zwischen 0 und 2).

Aufgrund der gewählten Fitness-Funktion sind diese beiden Parameterkombinationen

gleich erfolgreich. Erstaunlicherweise verschieben sie sich nur wenig, selbst wenn die Gewichtung zwischen Kollisionshäufigkeit und Effizienz geändert wird,

Bei anderen Grundrissen (z.B. einer Kreuzung) oder anderen Dichten ändern sich die Ergebnisse auch nur unwesentlich.

Beide Parameterkombinationen sind realistisch. Die großen Potentiale und kleinen Relaxationszeiten beschreiben Fußgänger, die es eilig haben und wenig Rücksicht nehmen. Die zweite Kombination ähnelt den von Hand gefundenen Parametern. Nur die Relaxationszeit ist etwas niedriger. Diese Fußgänger verhalten sich sehr vorausschauend. Sie gehen zielgerichtet, aber ohne großen Zeitdruck.

### 6.3.3 Evolution des Ausweichverhaltens

Indem der asymmetrische Anteil der Fluktuationen zur Mutation freigegeben wird, kann untersucht werden, ob es für die Fußgänger Vorteile bringt, sich beim Ausweichen für eine Vorzugsseite zu entscheiden. Eine spieltheoretische Behandlung dazu findet sich z.B. in [Hel97].

Bei der Simulation sind alle Parameter, außer den symmetrischen und asymmetrischen Fluktuation, fest vorgegeben. Die Fitness-Funktion ist dieselbe wie in den vorhergehenden Abschnitten.

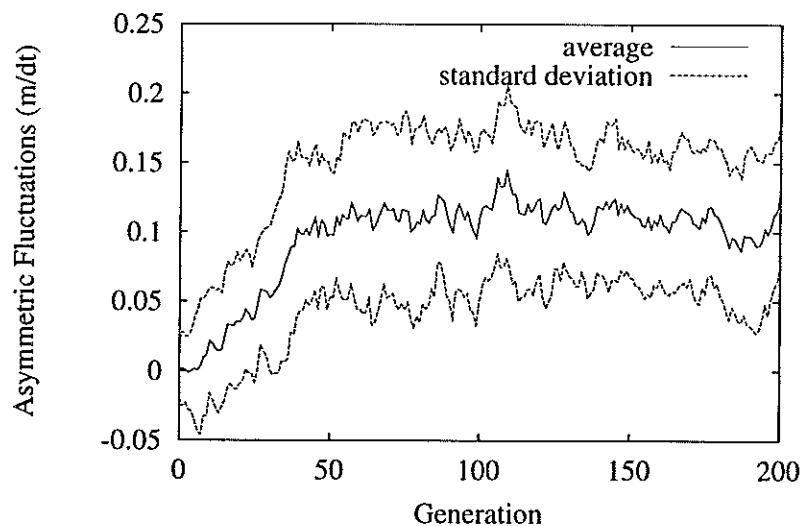


Abbildung 6.12: Asymmetrischer Anteil  $\mu_a$  der Fluktuationen bei mittlerer Dichte ( $\rho = 0,3 \text{ P/m}^2$ )

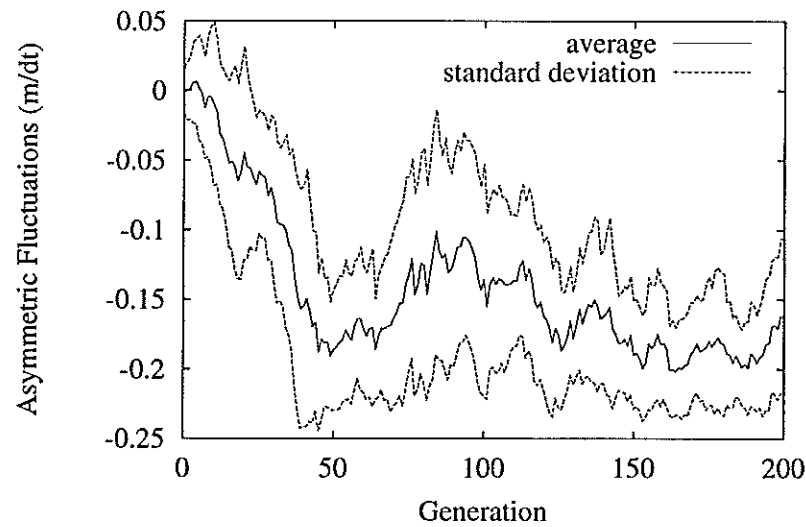


Abbildung 6.13: Asymmetrischer Anteil  $\mu_a$  der Fluktuationen bei niedriger Dichte ( $\rho = 0,15 \text{ P/m}^2$ )

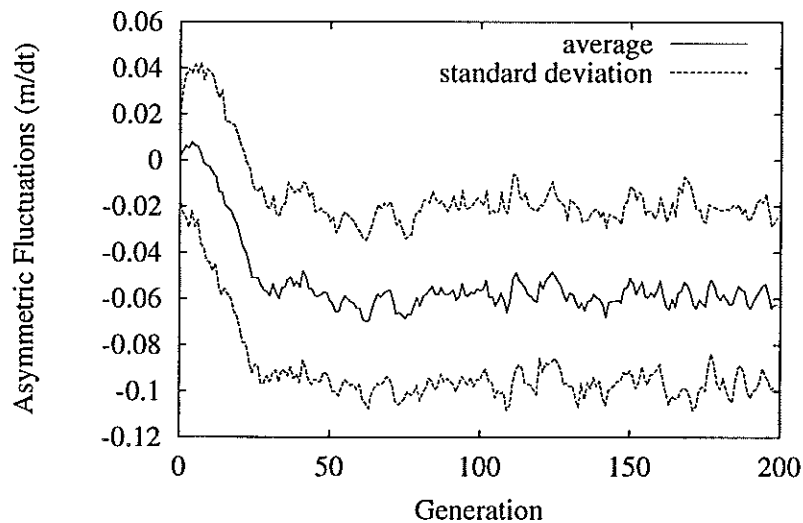


Abbildung 6.14: Asymmetrischer Anteil  $\mu_a$  der Fluktuationen bei hoher Dichte ( $\rho = 0,6 \text{ P/m}^2$ )

Bereits nach wenigen Generationen ist eine Entscheidung für eine bestimmte Ausweichrichtung gefallen. Sie bleibt stabil. Aufgrund der symmetrischen Ausgangssituation ist eine Entscheidung für rechts oder links gleich wahrscheinlich.

Die Stärke der idealen asymmetrischen Fluktuationen hängt, wie den Abbildungen 6.12, 6.13 und 6.14 entnommen werden kann, von der Fußgängerdichte ab. Ist



die Dichte gering ( $0,15 \text{ P/m}^2$ ), so wird natürlich weiträumiger ausgewichen ( $\mu_a \approx 190$ ), bei mittlerer Dichte ( $0,3 \text{ P/m}^2$ ) sind es noch  $\mu_a \approx 100$  und bei hoher Dichte ( $0,6 \text{ P/m}^2$ ) schließlich nur noch  $\mu_a \approx 60$ .

## 6.4 Evolutionäre Optimierung einer Fußgängeranlage

Rechenberg beschreibt in [Rec73] wie eine Evolutionsstrategie zur Optimierung einer Überschalldüse eingesetzt werden kann.

Dieses Verfahren wird nun zur Optimierung eines Korridors mit unterschiedlich breiten Enden eingesetzt. Es ist zu erwarten, daß sich durch die Vermeidung von Ecken, in denen Fußgänger stecken bleiben können, die Effizienz steigern läßt (vgl. Abbildung 6.1 auf Seite 62). Die Fußgänger, die in eine Ecke gedrängt wurden, können nur zurück in den Hauptstrom gelangen, indem sie sich seitlich hineindrücken und dadurch die Hauptströmung stören.

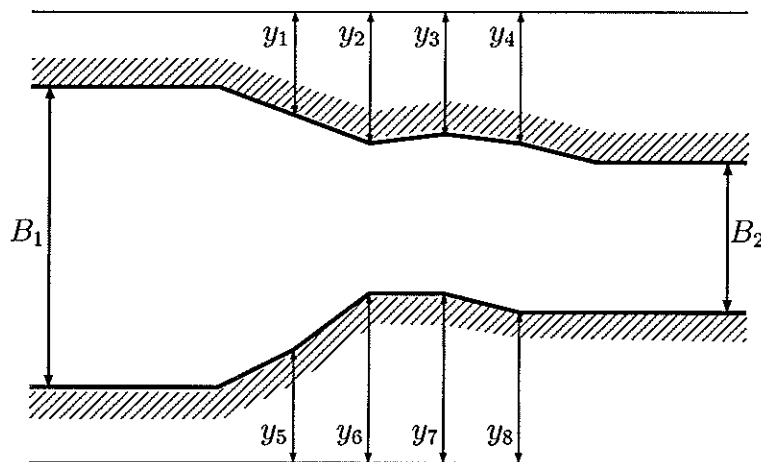


Abbildung 6.15: Variationsmöglichkeiten eines Korridors mit unterschiedlich breiten Enden  $B_1$  und  $B_2$  (aus [Mol95]). Die Ausrichtung der Wandstücke  $y_1 \dots y_8$  kann optimiert werden

In ersten Ansätzen wurde das Evolutionsprinzip in der Form herangezogen, wie es zur Optimierung der Fußgängerparameter verwendet wurde. Das bedeutet, daß alle Parameterwerte (im Falle des Korridors in Abbildung 6.15 sind das die  $y$ -Koordinaten

$y_1 \dots y_8$  der Wandstücke) unabhängig voneinander bei jedem Evolutionsschritt mutiert werden. Das zweigliedrige Evolutionsverfahren sorgt dafür, daß ein Parametersatz solange weiterlebt, bis ein besserer Nachfolger gefunden wurde.

Die durchgeführten Versuche zeigen schnell, daß dieses Verfahren nur extrem langsam konvergiert. Die Streuung bei der Bewertung einer bestimmten Konfiguration ist sehr groß. Selbst bei einer sehr langen Simulationsdauer (50.000 Zeitschritte) treten noch Effizienzwankungen von 5% auf. Da die in einer Generation erzielbaren Effizienzgewinne in der gleichen Größenordnung liegen, können sich bessere Varianten nur sehr langsam durchsetzen. Eine Erhöhung der Mutationsstärke ist nicht erfolgreich, weil dadurch sehr viele sehr schlechte Konfigurationen erzeugt werden, bevor ein Glückstreffer gelingt. Die Informationsübertragung von einer Generation zur nächsten findet dann nicht mehr ausreichend statt. Es dauert mehrere tausend Generationen, bevor sich die Effizienz dem Optimum annähert.

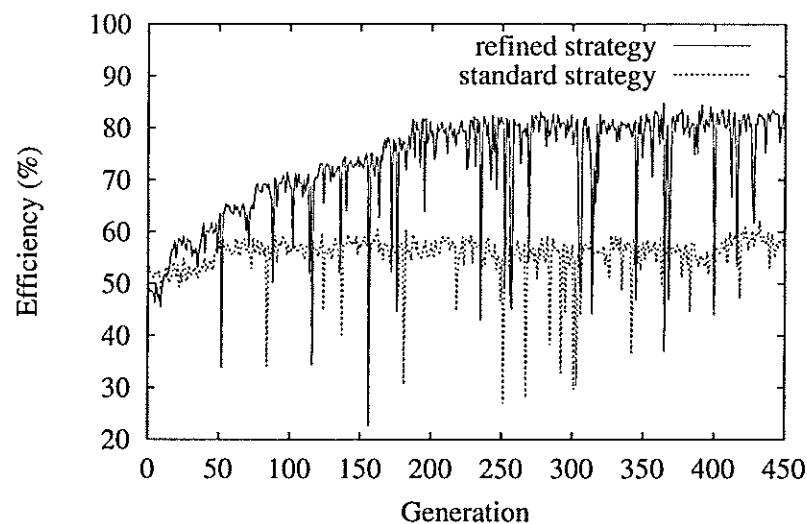


Abbildung 6.16: Entwicklung der Effizienz bei der Grundriß-Optimierung eines Korridors mit ursprünglicher und modifizierter Evolutionsstrategie

Die Konvergenzgeschwindigkeit läßt sich durch ein Bündel von Maßnahmen drastisch erhöhen:

- *Es wird immer nur ein bestimmtes, zufällig ausgewähltes Wandstück mutiert.* Anders als bei den Verhaltensparametern der Fußgänger sind bei der Grundriß-

Optimierung alle Einstellgrößen von der gleichen Art. Die Auswirkung von bestimmten Parametern auf die Effizienz ist relativ unabhängig von den anderen Parametern. Bei den Verhaltensparametern kann es z.B. sein, daß nur eine gleichzeitige Erhöhung der Potentialstärke  $b_\beta$  und ein Absenken der Relaxationszeit  $\tau$  eine Verbesserung bringt. Bei der Grundriß-Optimierung sind, in der hier untersuchten einfachen Form, solche Synergieeffekte nicht möglich. Die gleichzeitige Mutation verstärkt nur das ohnehin starke Rauschen. Alternativ dazu kann man die Mutationsstärke verringern.

- *Die Mutationsrate wird nicht nach der  $\frac{1}{5}$ -Erfolgsregel angepaßt.* Diese Regel gilt nur für deterministische Fitnessfunktionen, bei denen gleiche Parameter zur gleichen Fitness führen. Durch das starke Rauschen ist es möglich, daß lange Zeit keine Verbesserung möglich ist, obwohl sich die Parameter noch weit ab vom Optimum befinden. Die Regel würde in diesem Fall die Mutationsstärke verringern, was die Chancen, einen Weg in Richtung des Optimums zu finden, noch weiter verringert.
- *Findet (zufälligerweise) einmal keine Mutation statt, so wird die aktuelle Konfiguration ein weiteres mal bewertet.* Fällt die Bewertung schlechter als beim letzten mal aus, so wird diese schlechtere Bewertung übernommen. So wird verhindert, daß eine am oberen Ende des Schwankungsbereiches gelegene Bewertung dem weiteren Fortschritt dauerhaft im Weg steht. Durch die Abwertung der aktuellen Konfiguration wird die weitere Entwicklung stimuliert.

Die so modifizierte Evolutionsstrategie erreicht bereits nach wenigen hundert Generationen eine optimale Effizienz (Abbildung 6.16 auf der vorherigen Seite). Die erfolgreichen Zwischenschritte sind in Abbildung 6.17 auf Seite 83 zu sehen. Anfänglich werden bessere Wandstellungen in schneller Folge gefunden. Die letzten kleinen Verbesserungen dauern jedoch schon an die 100 Generationen. Offensichtlich ist der optimale Grundriß für eine Engstelle, wenn die Winkel der Wände in Richtung der Engstelle immer kleiner werden.

Eine starke Verbesserung der Konvergenzrate wird erzielt, wenn die Anlage zunächst nur mit Fußgängern der gleichen Wunschrichtung durchströmt wird. Dadurch minimiert man das störende Rauschen, das durch die komplizierten Interaktionen sich durchdringender Ströme verstärkt wird. Erst wenn eine nahezu optimaler Grundriß gefunden ist, läßt man verschiedene Wunschrichtungen zu. Die dabei auftretenden kollektiven Bewegungsmuster erfordern natürlich meistens eine Korrektur des

Grundrisses. Aber durch die Voroptimierung hält sich die zusätzliche Rechenzeit in Grenzen.

Da die Simulationsdauer mit der Fußgängeranzahl steigt, bietet es sich auch an, eine grobe Optimierung bei geringer Dichte durchzuführen. Sobald ein guter Grundriß gefunden wurde, kann bei hoher Dichte untersucht werden, welche Detailverbesserungen noch nötig sind.

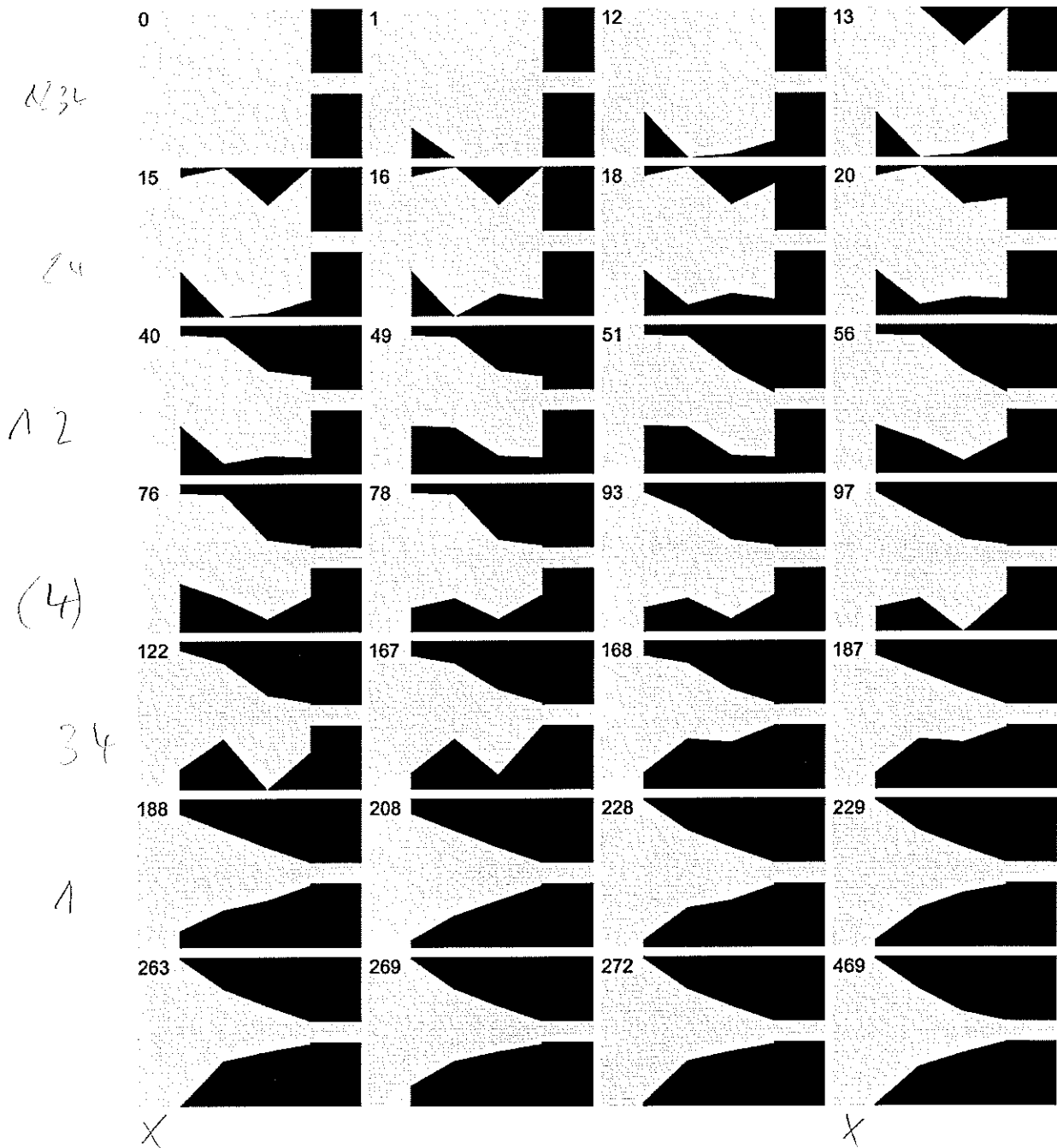


Abbildung 6.17: Zwischenstufen bei der Optimierung eines Korridors mit unterschiedlich breiten Enden



# Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Diplomarbeit ist es gelungen, ein Modell zu entwickeln, welches die Simulation von Fußgängerströmen schneller als in Echtzeit erlaubt. Dennoch zeigt dieses Modell vielfältige, auch empirisch beobachtbare, kollektive Verhaltensmuster.

Durch die Einführung einer quantitativen Bewertung wurde es möglich, unterschiedliche Verkehrssituationen genau zu untersuchen, da die Modellparameter entsprechend der zu erwartenden Nutzung wählbar sind. Verschiedene Entwürfe zur Verbesserung einer Fußgängeranlage konnten untersucht und verglichen werden.

Das erstellte Simulationsprogramm ist sehr benutzerfreundlich und erlaubt die direkte Beeinflussung der Parameter während des Simulationsablaufs. Die Darstellung der Fußgängerbewegung erfolgt in Echtzeit aus der Vogelperspektive. Dadurch sind die kollektiven Bewegungsmuster sehr gut sichtbar.

Aufgrund der Verwendung der modernen Programmiersprache Java ist das Simulationsprogramm auf allen gängigen Computersystemen einsetzbar. Es ist sogar möglich, Simulationen interaktiv im Internet durchzuführen. Dadurch sind die Forschungsergebnisse weltweit verfügbar und direkt nachvollziehbar.

Die Verwendung einer Evolutionsstrategie machte es möglich, sowohl das Verhalten der Fußgänger als auch die Gestaltung von Fußgängeranlagen, automatisch zu optimieren. Diese Methode stellt dabei unter Beweis, wie vielseitig und robust sie ist.

Bei der Verhaltensoptimierung wurde der empirisch ermittelte Parametersatz verbessert und eine zweite, ebenso geeignete Parameterkombination zur Simulation von Fußgängern in Eile gefunden.

Durch die Optimierung eines einfachen Grundrisses wurde gezeigt, daß eine entsprechend angepaßte Evolutionsstrategie auch hierfür bestens geeignet ist.

Zur Optimierung von komplizierteren Fußgängeranlagen, blieb leider nicht genügend

Zeit. Die modulare, objektorientierte Struktur des Simulationsprogramms macht eine Erweiterung in dieser Richtung jedoch sehr einfach.

Die einzelnen Programmteile sind unabhängig voneinander einsetzbar. Es ist also auch möglich, die vorhanden Möglichkeiten zur Visualisierung, Bewertung und Optimierung für ein anderes, nicht notwendigerweise auf den Fußgängerverkehr beschränktes Modell zu benutzen.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Bahnbildung auf dem Weg vom und zum Hamburger Fischmarkt (aus [Hel97]) . . . . .	11
1.2	Bahnstabilisierung durch regelmäßig angeordnete Säulen in einer Budapestester U-Bahn-Station (Foto: D. Helbing) . . . . .	12
1.3	Regelmäßig angeordnete Säulen erscheinen fast wie eine undurchdringliche Wand (Foto: D. Helbing) . . . . .	13
1.4	Aus einem Kino strömende Fußgänger bilden eine Art Flußbett (aus [Arn89]) . . . . .	14
1.5	Kreisverkehr um die Kaaba in Mekka (aus [Nom97]) . . . . .	15
1.6	Trampelpfade auf dem Campus in Vaihingen der Universität Stuttgart (aus [Hel97]) . . . . .	15
2.1	Exponentielle Anpassung der tatsächlichen Geschwindigkeit $\vec{v}_\alpha$ an die Wunschgeschwindigkeit $\vec{v}_\alpha^0$ (aus [Hel97]) . . . . .	23
3.1	Interaktives Programm zum CA-Modell von Helbing . . . . .	30
4.1	Rotationssymmetrisches, exponentiell abfallendes Potential . . . . .	35
4.2	Quadratisches Potential . . . . .	35
4.3	Geschwindigkeitsabhängiges, exponentiell abfallendes Potential . . . . .	36
4.4	Potentialdarstellungen eines Korridors mit Trennwand (aus [Mol95]) . . . . .	37
4.5	Potentialdarstellung von Attraktionen (aus [Mol95]) . . . . .	38

4.6	Die zwei Möglichkeiten zur Kombination von Einflüssen (aus [Mol95])	38
4.7	Rechenzeit in Abhängigkeit der Fußgängeranzahl . . . . .	43
4.8	Rechenzeit in Abhängigkeit der diskreten Potentialreichweite $\hat{\vartheta}_{max}$ . .	43
4.9	Bahnbildung in Fußgängerströmen . . . . .	46
4.10	Oszillation an Engstellen . . . . .	47
4.11	Bildung einer Art Flußbett . . . . .	48
4.12	Kreisverkehr auf der Kreuzung . . . . .	49
5.1	Kollisionen in Abhängigkeit von $\tau$ . . . . .	55
5.2	Effizienz in Abhängigkeit von $\tau$ . . . . .	56
5.3	Kollisionen in Abhängigkeit von $\Delta t$ . . . . .	56
5.4	Effizienz in Abhängigkeit von $\Delta t$ . . . . .	57
5.5	Kollisionen in Abhängigkeit von der Fußgängeranzahl . . . . .	58
5.6	Effizienz in Abhängigkeit von der Fußgängeranzahl . . . . .	58
5.7	Effizienz in Abhängigkeit der Fußgängeranzahl (mit Korrekturtermen für hohe Dichten) . . . . .	59
5.8	Kollisionen in Abhängigkeit von $b_\beta$ . . . . .	60
5.9	Effizienz in Abhängigkeit von $b_\beta$ . . . . .	60
6.1	Effizienzsteigerung durch Vermeidung von Ecken (aus [Hel97]) . . . .	62
6.2	Effizienzsteigerung durch Bahnstabilisierung mit Hindernissen (aus [Hel97]) . . . . .	63
6.3	Effizienz, abhängig von Bäumen auf der Straße . . . . .	64
6.4	Gestaltungsmöglichkeiten einer Fußgängerkreuzung (aus [Hel97]) . . .	65
6.5	Effizienz in Abhängigkeit von der Stärke und Reichweite des Hinder- nisses auf der Kreuzung . . . . .	65
6.6	Fitneß bei Evolution mit heterogener Population . . . . .	73

---

6.7	Relaxationszeit bei Evolution mit heterogener Population . . . . .	73
6.8	Potentialstärke bei Evolution mit heterogener Population . . . . .	74
6.9	Fitneß bei Evolution mit homogener Population . . . . .	75
6.10	Relaxationszeit bei Evolution mit homogener Population . . . . .	75
6.11	Potentialstärke bei Evolution mit homogener Population . . . . .	76
6.12	Asymmetrischer Anteil $\mu_a$ der Fluktuationen bei mittlerer Dichte ( $\rho = 0,3 \text{ P/m}^2$ ) . . . . .	77
6.13	Asymmetrischer Anteil $\mu_a$ der Fluktuationen bei niedriger Dichte ( $\rho = 0,15 \text{ P/m}^2$ ) . . . . .	78
6.14	Asymmetrischer Anteil $\mu_a$ der Fluktuationen bei hoher Dichte ( $\rho = 0,6 \text{ P/m}^2$ ) . . . . .	78
6.15	Variationsmöglichkeiten eines Korridors mit unterschiedlich breiten Enden (aus [Mol95]) . . . . .	79
6.16	Entwicklung der Effizienz bei der Grundriß-Optimierung eines Korridors mit ursprünglicher und modifizierten Evolutionsstrategie . . . . .	80
6.17	Zwischenstufen bei der Optimierung eines Korridors mit unterschiedlich breiten Enden . . . . .	83



# Literaturverzeichnis

- [Arn89] Thomas Arns. Videofilme des Verhaltens von Fußgängergruppen, 1989. Erhältlich bei Thomas Arns, Wannenstr. 22, 70199 Stuttgart.
- [Bae96] Thomas Baeck. *Evolutionary Algorithms in theory and Practice*. Oxford University Press, New York/Oxford, 1996.
- [BHN<sup>+</sup>94] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Structure stability of congestion in traffic dynamics. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 11 (2):203–223, 1994.
- [BHN<sup>+</sup>95] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Dynamic model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, 51:1035–1042, 1995.
- [BHS91] T. Baeck, F. Hoffmeister, and H.-P. Schwefel. A survey of evolution strategies. In R. Belew and L. Booker, editors, *Proceedings of the Fourth International Conference of Genetic Algorithms*, pages 2–9. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1991.
- [CHJ61] James S. Coleman, John Hopkins, and John James. The equilibrium size distribution of freely-forming groups. *Sociometry*, 24(1):36–45, March 1961.
- [DHT95] Y. Limon Duparcmeur, H. Herrmann, and J. P. Troadec. Spontaneous formation of vortex in a system of self motorised particles. *Journal de Physique I France*, 5:1119–1128, 1995.
- [EN98] B. Eisenblätter and L. Neubert. Traffic simulation based on cellular automata, 1998. [http://traffic.comphys.uni-duisburg.de/ca\\_model/simulation.html](http://traffic.comphys.uni-duisburg.de/ca_model/simulation.html).

- [EOI92] Manabu Ebihara, Akira Ohtsuki, and Hideaki Iwaki. A model for simulating human behavior during emergency evacuation based on classificatory reasoning and certainty value handling. *Microcomputers in Civil Engineering*, 7:63–71, 1992.
- [ESGS90] W. Ebeling, L. Schimansky-Geier, and F. Schweitzer. Stochastic theory of nucleation in open molecular systems. *Zeitschrift für Physikalische Chemie Neue Folge*, 169:1–10, 1990.
- [Fis96] George S. Fishman. *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer Series in Operations Research. Springer Verlag, 1996.
- [Fru71] John J. Fruin. Designing for pedestrians: A level-of-service concept. *Highway Research Record*, 355:1–15, 1971. Highway Research Board, Washington D.C.
- [Gil95] Nigel Gilbert, Mai 1995. Seminarvortrag auf Schloß Dagstuhl.
- [GM85] P. G. Gibbs and B. Marksjö. A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27:95–105, 1985.
- [Gol89] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [Hak83] Hermann Haken. *Synergetics*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 3rd edition, 1983.
- [Hel90] Dirk Helbing. Physikalische Modellierung des dynamischen Verhaltens von Fußgängern. Master's thesis, III. Physikalisches Institut der Georg-August-Universität, Göttingen, 1990.
- [Hel91] Dirk Helbing. A mathematical model for the behavior of pedestrians. *Behavioral Science*, 36:298–310, 1991.
- [Hel92a] Dirk Helbing. A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6(6):391–415, 1992.
- [Hel92b] Dirk Helbing. *Stochastische Methoden, nichtlineare Dynamik und quantitative Modelle sozialer Prozesse*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 1992. Verlag Shaker, 1993.
- [Hel97] Dirk Helbing. *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungsansätze*. Springer Verlag, 1997.

- [Hen71] L. F. Henderson. The statistics of crowd fluids. *Nature*, 229(5):381–383, February 1971.
- [Hen74] L. F. Henderson. On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 8:509–515, 1974.
- [Her95] H. J. Herrmann. Simulating granular media on the computer. In P. L. Garrido and J. Marro, editors, *3rd Granada Lectures in Computational Physic*, pages 67–114. Springer, Heidelberg, 1995.
- [HH98] D. Helbing and B. A. Huberman. Coherent moving states in highway traffic. *Nature*, Dec 1998. in print.
- [HJ74] L. F. Henderson and D. M. Jenkins. Response of pedestrians to traffic challenge. *Transportation Research*, 8:71–74, 1974.
- [HKM97] Dirk Helbing, Joachim Keltsch, and Péter Molnár. Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*, 388:47–50, 1997.
- [Hor96] Cay Horstmann. *Traffic Simulator Applet*. Core Java. Sun Microsystems Press / Prentice Hall, 1996. <http://www.mathcs.sjsu.edu/faculty/horstman/corejava/RoadApplet.html>.
- [JR93] D. D. Joseph and Y. Y. Renardy. *Fundamentals of Two-Fluid Dynamics*, volume Part I: Mathematical Theory and Applications. Springer, New York, 1993.
- [Kel96] Joachim Keltsch. Pfadbildung durch Selbstorganisation mit active walker. Master's thesis, II. Institut für Theoretische Physik, Universität Stuttgart, 1996.
- [KJV83] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.
- [Lan87] Christopher G. Langton, editor. *The proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, volume VI. Addison Wesley, 1987.
- [Lan90] Christopher G. Langton, editor. *Workshop on Artificial Life*, volume X. Addison Wesley, 1990.
- [Lat81] Bibb Latané. The psychology of soicial impact. *American Psychologist*, 1981.

- [Lew51] Kurt Lewin. *Field Theory in Social Science*. Harper, New York, 1951.
- [LMH<sup>+</sup>96] T. Le Pennec, K.J. Maloy, A. Hansen, M. Ammi, D. Bideau, and Xiao-Lun Wu. Ticking hour classes: experimental analysis of intermittent flow. *Physical Review E*, 53(3):2257–2264, 1996.
- [Løv93] Gunnar G. Løvas. Modelling and simulation of pedestrian traffic flow. In *European Simulation Multiconference*, pages 469–473. Ecole Normale Supérieure de Lyon, June 1993.
- [Løv94] Gunnar G. Løvas. Modelling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research B*, 28B(6):429–443, 1994.
- [Mic96] Zbigniew Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, 3rd edition, 1996.
- [Mol95] Péter Molnár. *Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen*. PhD thesis, II. Institut für Theoretische Physik, Universität Stuttgart, 1995.
- [MRR<sup>+</sup>53] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*, 21:1087–1092, 1953.
- [Nag95] Kai Nagel. *High-speed microsimulations of traffic flow*. PhD thesis, Universität Köln, 1995.
- [Nom97] Ali Kozuyoshi Nomachi. *Mekka*. Frederking + Thaler, 1997.
- [NS92] Kai Nagel and Michael Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I France*, 2:2221–2229, 1992.
- [Oed63] Detlef Oeding. Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs. In *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, volume 22 of *Forschungsberichte*. Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1963.
- [Old68] S. J. Older. Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control*, pages 160–163, August 1968.
- [Rec73] Ingo Rechenberg. *Evolutionstrategie*. Frommann-Holzboog, 1973.



- 
- [Sch77] Hans-Paul Schwefel. *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels Evolutionsstrategien*. Birkhäuser, Basel/Stuttgart, 1977.
- [Sch95] Martin Schenk. *Untersuchungen zum Fußgängerverhalten*. PhD thesis, Städtebauliches Institut, Universität Stuttgart, 1995.
- [Sch97] Frank Schweitzer, editor. *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*. Gordon and Breach, London, 1997.
- [SLF97] F. Schweitzer, K. Lao, and F. Family. Active random walker simulate trunk trail formation by ants. *Biosystems*, 41(3):153–166, 1997.
- [SO86] H. E. Stanley and N. Ostrowski, editors. *On Growth and Form*. Martinus Nijhoff, Boston, 1986.
- [SSG94] Frank Schweitzer and L. Schimansky-Geier. Clustering of active walkers in a two-component system. *Physica A*, 206:359–379, 1994.
- [SSGEU88] F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier, W. Ebeling, and H. Ulbricht. A stochastic approach to nucleation in finite systems: Theory and simulations. *Physica A*, 150:261–279, 1988.
- [SU91] Frank Schweitzer and H. Ulbricht, editors. *Nucleation - Clusters Fractals*, Rostock, 1991.
- [Wei93] Ulrich Weidmann. *Transporttechnik der Fußgänger*. Technical report, Institut für Verkehrsplanung, ETH, Zürich, 1993. Schriftenreihe Nr. 90.
- [WMH<sup>+</sup>93] Xiao-Lun Wu, K. J. Maloy, A. Hansen, M. Ammi, and D. Bideau. Why hour classes tick. *Physical Review Letters*, 71(9):1363–1366, 1993.
- [YM89] Steven J. Yuhaski and J. MacGregor-Smith. Modeling circulation systems in buildings using state dependent queuing models. *Queueing Systems*, 4:319–338, 1989.
- [YOSN91] Kenichi Yoshikawa, Noboru Oyama, Masaru Shoji, and Satoshi Nakata. Use of a saline oscillator as a simple nonlinear dynamical system: Rhythms, bifurcation, and entrainment. *American Journal of Physics*, 59(2):137–141, February 1991.



# Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mir die Fertigstellung dieser Arbeit ermöglicht haben:

- bei Priv.-Doz. Dr. Dirk Helbing für die interessante Aufgabenstellung, sein Interesse am Fortgang dieser Arbeit, die ständige Hilfsbereitschaft,
- bei Prof. Dr. G. Wunner für die Übernahme des Mitberichts,
- bei Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Weidlich für die freundliche Aufnahme an sein Institut,
- bei allen Institutsmitgliedern für das gute Arbeitsklima,
- bei Benno Tilch für die sehr angenehme Atmosphäre in unserem Zimmer, und einige wertvolle Tips,
- bei meiner Freundin Natascha (Наташа) für Ihre Geduld,
- und ganz besonders bei meinen Eltern und Großeltern für Ihre Unterstützung vor und während des Studiums.

