

**Mikroskopische Modellierung und Simulation  
des Fußgängerverkehrs**

**Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von  
Timo Florian Bitzer  
aus Stuttgart**

<b>Hauptberichter:</b>	<b>Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel</b>
<b>Mitberichter:</b>	<b>Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch</b>
<b>Tag der mündlichen Prüfung:</b>	<b>3. August 2010</b>

**Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart**

**2010**



## **Vorwort**

Vielen gilt mein Dank für die Unterstützung auf dem steinigen Weg zum Abschluss dieser Dissertation.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie, die mich in guten wie in schlechten Tagen unablässig bei der Erreichung des Ziels unterstützt hat.

## **Erklärung**

Stuttgart, 3. August 2010

Gemäß §5 (3) der Promotionsordnung der Universität Stuttgart erkläre ich hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift abgesehen von den ausdrücklich bezeichneten Hilfsmitteln und den Ratschlägen von jeweils namentlich genannten Personen selbstständig verfasst habe.

Florian Bitzer

---

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Erklärung</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>5</b>
<b>Abbildungen</b> .....	<b>10</b>
<b>Tabellen</b> .....	<b>14</b>
<b>Glossar und Abkürzungen</b> .....	<b>15</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>19</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>20</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>22</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>24</b>
1.1 Stand der mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodellierung .....	24
1.2 Nexus, Mobilität und Bewegung .....	25
<b>2 Grundlagen und Modellentwicklung</b> .....	<b>28</b>
2.1 Charakteristische Merkmale des Fußgängerverkehrs .....	28
2.1.1 Grundlegende Eigenschaften .....	28
2.1.1.1 Zwei Dimensionen .....	28
2.1.1.2 Fußwegelängen .....	29
2.1.1.3 Routenwahlverhalten .....	30
2.1.2 Makroskopische Merkmale .....	31
2.1.2.1 Geschwindigkeit .....	31
2.1.2.2 Fluss .....	33
2.1.2.3 Dichte .....	34
2.1.2.4 Fundamentaldiagramm .....	35
2.1.2.5 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs .....	37
2.1.3 Mikroskopische Merkmale .....	39
2.1.3.1 Motorik des Gehens .....	39
2.1.3.2 Interaktion mit der Umgebung .....	40
2.1.3.3 Entstehung von Stauungen .....	41
2.1.3.4 Oszillieren des Flusses .....	41

2.1.3.5	Flussmuster konkurrierender Ströme.....	42
2.1.3.6	Bildung temporärer Spuren.....	43
2.1.3.7	Entstehung von Pfaden .....	43
2.2	Klassifizierung und Bewertung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle .....	44
2.2.1	Deterministisch, kontinuierlich, heuristisch.....	47
2.2.1.1	Reale Trajektorien .....	47
2.2.1.2	Deterministische Modelle .....	47
2.2.2	Stochastisch, diskret, abstrakt.....	48
2.2.2.1	Random-Walk Modell .....	48
2.2.2.2	Warteschlangenmodell .....	49
2.2.3	Stochastisch, kontinuierlich, abstrakt.....	49
2.2.3.1	Random-Direction Modell.....	49
2.2.3.2	Random-Waypoint Modell.....	50
2.2.4	Deterministisch, kontinuierlich, abstrakt .....	51
2.2.4.1	Optimal-Velocity Modell.....	51
2.2.4.2	Gravitationsmodell.....	52
2.2.4.3	Magnetkräftemodell.....	52
2.2.4.4	Social-Force Modell .....	54
2.2.4.5	Active-Walker Modell.....	56
2.2.4.6	Minimal-Route-Cost Modell .....	57
2.2.5	Deterministisch, diskret, abstrakt .....	58
2.2.6	Deterministisch, diskret, heuristisch.....	59
2.2.6.1	Deterministische Zelluläre Automaten .....	59
2.2.7	Stochastisch, diskret, heuristisch.....	63
2.2.7.1	Stochastische Zelluläre Automaten.....	63
2.2.7.2	Discrete-Choice Modell.....	65
2.2.8	Stochastisch, kontinuierlich, heuristisch.....	66
2.3	Updatereihenfolge .....	67
2.3.1	Sequentielles Update.....	67
2.3.2	Zufälliges Update .....	68

---

2.3.3	Sequentiell zufälliges Update .....	68
2.3.4	Paralleles Update .....	68
2.4	Ausgangsmodell des Simulationsframeworks.....	70
<b>3</b>	<b>Geometrische Datengrundlage .....</b>	<b>72</b>
3.1	Anforderungen an die Umgebungsgeometrie .....	72
3.2	Bekannte Datenformate .....	73
3.2.1	Geographic Data Format (GDF) .....	73
3.2.2	Drawing Exchange Format (DXF).....	74
3.2.3	Geography Markup Language (GML).....	75
3.3	Das Relationen- und Topologiekonzept von Nexus .....	76
3.4	Generieren von AWML-Dateien mit AutoCAD.....	78
<b>4</b>	<b>Simulationsframework.....</b>	<b>81</b>
4.1	Konzeption.....	81
4.2	Warum Entwicklung mit C#.NET? .....	82
4.3	Aufbereitung der Umgebungsgeometrie .....	83
4.3.1	Import von AWML-Dateien in die Simulationsumgebung .....	83
4.3.2	Diskretisierung der Vektordaten.....	85
4.3.3	Automatische Zuweisung der Flächeneigenschaft an jede Zelle .....	88
4.3.4	Sicherung des geometrischen Grundfeldes .....	94
4.4	Implementierung eines Zellulären Automaten.....	95
4.4.1	Parametrisierung der Quell-Ziel-Relationen .....	95
4.4.2	Navigation der Agenten.....	96
4.4.2.1	Anisotrope statische Grundfelder .....	97
4.4.2.2	Pseudoisotrope statische Grundfelder.....	97
4.4.2.3	Isotrope statische Grundfelder.....	99
4.4.2.4	Multiple statische Grundfelder für multiple Ziele .....	105
4.4.2.5	Dynamische Grundfelder für die Interaktion von Agenten .....	106
4.4.3	Initialisierung der Agenten .....	111
4.4.4	Algorithmen zur Bewegungsdurchführung.....	114
4.4.4.1	Linearer Algorithmus.....	114

4.4.4.2	Polynomischer Algorithmus .....	118
4.4.4.3	Exponentieller Algorithmus .....	119
4.4.5	Bewegung unter Verwendung anisotroper SFF .....	122
4.4.6	Bewegung unter Verwendung pseudoisotroper SFF .....	124
4.4.7	Bewegung unter Verwendung isotroper SFF .....	126
4.4.8	Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen .....	127
<b>5</b>	<b>Referenzszenario Campus Vaihingen .....</b>	<b>130</b>
5.1	Auswahlkriterien.....	130
5.2	Lage und verkehrliche Charakteristiken .....	130
5.3	Quellen für Umgebungsgeometrie.....	131
5.4	Quellen für Verkehrsaufkommen.....	133
<b>6</b>	<b>Fußgängerverkehrserhebung.....</b>	<b>138</b>
6.1	Klassifizierung der Erhebungsmethoden.....	138
6.1.1	Befragung und Wegebücher .....	139
6.1.2	Querschnittszählung.....	140
6.1.3	Stromerhebung .....	141
6.1.4	Kordonerhebung .....	142
6.1.4.1	Barcode und RFID.....	143
6.1.4.2	Akustische Aufzeichnungsverfahren .....	143
6.1.4.3	MAC-Adressen mobiler Endgeräte .....	144
6.1.5	Video-/Bildanalyse.....	145
6.2	Layout der durchgeführten Erhebung.....	147
6.2.1	Wahl des Kamerastandorts.....	147
6.2.2	Georeferenzierung der Standorte und Blickwinkel .....	150
6.2.3	Abbildungseigenschaften von Kameras und Objektiven .....	152
6.2.4	Synchronisation der Zeitstempel .....	153
6.2.5	Zeitpunkt und Rahmenbedingungen der Erhebung .....	154
<b>7</b>	<b>Auswertung und Ergebnisvalidierung.....</b>	<b>157</b>
7.1	Auswertung der erhobenen Daten .....	157
7.1.1	Aufbereitung der Rohdaten.....	157



7.1.2 Analyse des Bewegungsverhaltens.....	161
7.2 Simulation Referenzszenario .....	165
7.2.1 Angenommenes Verkehrsaufkommen.....	165
7.2.2 Ergebnisse der Simulation.....	166
<b>8 Fazit und Ausblick.....</b>	<b>170</b>
<b>9 Literatur.....</b>	<b>172</b>

## Abbildungen

Abb. 2-1: Mittlere Wegelängen, Wegedauern und Wegegeschwindigkeiten aus „Mobilität in Deutschland“ [Follmer et al. 2002].....	30
Abb. 2-2: Bewegungsraum von Fußgängern (Maße in m) [FGSV 1972] .....	35
Abb. 2-3: Ebene Projektion des Fundamentaldiagramms unidirektionaler Fußgängerströme .....	36
Abb. 2-4: Schematische Darstellung empirischer Beobachtungen bei zwei sich kreuzenden Fußgängerströmen.....	42
Abb. 2-5: Klassifizierung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle anhand von Zustand (kontinuierlich / diskret), Dynamik (deterministisch / stochastisch) und Charakter (abstrakt/heuristisch). Aufgeführt sind typische Beispiele bzw. Oberbegriffe für die Modellklassen. ....	45
Abb. 2-6: Evaluation der Leistungsfähigkeit von Datennetzen [Arbter et al. 2006].....	48
Abb. 2-7: Bewegungsmuster eines Agenten bei Random-Direction- (links) und Random-Waypoint Modell .....	50
Abb. 2-8: Visualisierung eines Simulationslaufs basierend auf dem Magnetkräftenmodell [Okazaki et al. 1993] .....	53
Abb. 2-9: Momentaufnahme einer Simulation basierend auf dem Sozialkräftenmodell [Helbing et al. 2000a].....	55
Abb. 2-10: Beispiel des Einflusses verminderter Durchschnittsgeschwindigkeiten auf die MRCF [Hoogendoorn et al. 2004] .....	57
Abb. 2-11: Quadratraster mit von Neumannscher und Moorescher Nachbarschaftsrelation sowie Wabenraster mit sechseckigen Zellen .....	61
Abb. 2-12: Unzulässige Manöver bei der Mooreschen Nachbarschaftsrelation .....	61
Abb. 2-13: Definition der Zellübertrittswahrscheinlichkeit $p_{ij}$ .....	63
Abb. 2-14: Die 33 diskreten Wahlmöglichkeiten ergeben sich aus der Überlagerung des Geschwindigkeits- und Richtungsverlaufs.....	66
Abb. 2-15: Wird mit der Wahrscheinlichkeit $p$ allen $n$ an einem Konflikt beteiligten Agenten die Bewegung verweigert, so kann ein	

Agent mit der Wahrscheinlichkeit $(1-p)/n$ die Bewegung durchführen .....	69
Abb. 3-1: Visualisierung des vektorbasierten GDF-Formats (links), Vergleich mit lageidentischem Stadtplanausschnitt .....	74
Abb. 3-2: Visualisierung des vektorbasierten DXF-Formats (links), Vergleich mit lageidentischem Orthofoto .....	75
Abb. 3-3: UML-Klassendiagramm der Nexus Verkehrs-Objekte, topologisch und geografisch .....	77
Abb. 3-4: Beispiel einer AWML-Datei.....	79
Abb. 4-1: Schematische Darstellung des Frameworks zur Fußgängerverkehrssimulation [Bitzer et al. 2005] .....	81
Abb. 4-2: Struktur der internen Datenhaltung .....	85
Abb. 4-3: Diskretisierung einer punktiert dargestellten Linie mit dem Bresenham-Algorithmus (links) und einem trigonometrischen Algorithmus (rechts). .....	86
Abb. 4-4: Der 4-Neighbour-Floodfill-Algorithmus.....	88
Abb. 4-5: Prinzip des Scan-Line-Algorithmus .....	89
Abb. 4-6: Vektorgrafik (links) und diskretisierte Darstellung mit Singularitätsstellen (schwarz eingefärbt) .....	90
Abb. 4-7: Kodierung der Zelleigenschaften des diskreten Raums .....	91
Abb. 4-8: Automatische Zuweisung der Flächeneigenschaft .....	93
Abb. 4-9: Generierung eines anisotropen statischen Grundfeldes mit Hindernis (schwarze Zellen) .....	97
Abb. 4-10: Generierung eines pseudoisotropen statischen Grundfeldes mit Hindernis (schwarze Zellen) .....	98
Abb. 4-11: „Manhattan Grid“ – Problem mit zugelassener diagonaler Bewegungsrichtung: Alle den durchgezogenen Linien folgenden Wege zwischen Quelle und Ziel sind gleich lang. Dicke durchgezogene Linie: Beste Annäherung an real kürzesten Weg. ....	99
Abb. 4-12: Methoden „generiere“ und „fülle“ zum Erzeugen isotroper statischer Grundfelder .....	100
Abb. 4-13: Methode „hindernisCheck“ zum Erzeugen isotroper statische Grundfelder .....	102

Abb. 4-14: Anisotropes, pseudoisotropes und isotropes statisches Grundfeld (v.l.n.r.), Darstellung mit Isopotentiallinien. Jeweils in der Bildmitte: Zusammenfluss gleicher Potentialwerte nach einem Hindernis .....	105
Abb. 4-15: Acht Vorzugsrichtungen $R_i$ der $DFF_i$ mit $i = \{0, 1, \dots, 7\}$ .....	107
Abb. 4-16: Diffusionsschema bei Bewegung senkrecht zu Zellkanten .....	107
Abb. 4-17: Diffusionsschemata bei diagonaler Bewegungsrichtung .....	108
Abb. 4-18: Diffusion und Zerfall des dynamischen Potentials .....	109
Abb. 4-19: Dynamisches Grundfeld bei diagonaler Bewegung .....	110
Abb. 4-20: Visualisierung der dynamischen Grundfelder.....	111
Abb. 4-21: Agentengenerierung in der Visualisierungs-klasse (C#-Quellcode) .....	113
Abb. 4-22: Bewegungsmethode mit linearem Bewegungsalgorithmus .....	115
Abb. 4-23: Normierte Summenhäufigkeiten der Potentialdifferenzen .....	117
Abb. 4-24: Gewichtung der Potentialdifferenzen .....	120
Abb. 4-25: Normierte Summenlinien der Potentialdifferenzen.....	121
Abb. 4-26: Wahrscheinlichkeit der dynamischen Spur eines Agenten zu folgen in Abhängigkeit von Entfernung und appliziertem Algorithmus.....	121
Abb. 4-27: Mögliche Kombinationen von zwei oder drei benachbarten Zellen mit kleinerem, gleichen Potential (anisotropes statisches Grundfeld).....	122
Abb. 4-28: Visualisierung eines anisotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten $Q_1$ , $Q_2$ und $Q_3$ .....	123
Abb. 4-29: Visualisierung eines pseudoisotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten $Q_1$ , $Q_2$ und $Q_3$ ....	125
Abb. 4-30: Visualisierung eines isotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten $Q_1$ , $Q_2$ und $Q_3$ .....	126
Abb. 4-31: Gegenüberstellung der Trajektorien von jeweils 1000 Agenten bei variierenden statischen Grundfeldern und Bewegungsalgorithmen .....	129
Abb. 5-1: Orthofoto Campus Vaihingen, Ausdehnung Referenzszenario..	131
Abb. 5-2: Ausgangsplan, berücksichtigte Layer und aufbereitete Geometrie (v.l.n.r.) des Campus Vaihingen.....	132

---

Abb. 5-3: S-Bahn und Bus am Campus Vaihingen [VVS 2007].....	133
Abb. 5-4: Tagesganglinie Zu- und Abgänge S-Bahn, Haltestelle Universität.....	134
Abb. 5-5: An Bushaltestelle Universität (Schleife) zu- / abgehende Fahrgäste .....	135
Abb. 6-1: Beispiel und Ausfüllhilfe für ein Wegebuch [Vogt et al. 2004] ..	139
Abb. 6-2: Layout einer Kordonzählung am Beispiel des Campus Vaihingen .....	142
Abb. 6-3: Messfahrzeug des Instituts für Verkehrsforschung des DLR und Fesselballon des IVD der Universität Stuttgart .....	148
Abb. 6-4: Standort Kamera 1 mit GPS-Empfänger auf Gebäude Pfaffenwaldring 55, Blickrichtung der Aufnahme nach Osten ..	149
Abb. 6-5: Standorte, Überlappungsbereiche und Gesamtabdeckung der vier Kameras .....	150
Abb. 6-6: Aufnahmebereiche der vier Kameras .....	151
Abb. 6-7: Messfeld zur Bestimmung der inneren Kamerapunkte unter Laborbedingungen. Zur Orientierung im Bild: Vier Wandsteckdosen am unteren Bildrand .....	153
Abb. 7-1: Anzahl von unterscheidbaren und dynamischen Objekten im Verlauf der Messkampagne (Kamera 1) .....	158
Abb. 7-2: Fußgängeraufkommen im Beobachtungszeitraum für den Kamerastandort 1 .....	159
Abb. 7-3: Unschärfe der empirisch ermittelten Positionen .....	161
Abb. 7-4: Lageabweichung der empirisch ermittelten Trajektorien (gestricheltes Oval).....	162
Abb. 7-5: Lage und Bezeichnung der Quell- und Zielbereiche im Orthofoto .....	163
Abb. 7-6: Empirisch ermittelte Trajektorien zwischen Quellbereich 1 und Zielbereich 6.....	164
Abb. 7-7: Exemplarische Darstellung der Visualisierung der Agenten (oben), der dynamischen Grundfelder (Mitte) sowie der zurückgelegten Trajektorien (unten) zum gleichen Zeitpunkt...	167

## Tabellen

Tab. 1-1: Beispiel für tabellierte Flächenmaße [FGSV 1992] .....	24
Tab. 2-1: Empirisch ermittelte mittlere Wunschgeschwindigkeiten.....	33
Tab. 2-2: QSV-Grenzwerte für Fußgängerdichte [FGSV 2001], spezifische Verkehrsstärke und mittlere relative Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit [Bohle et al. 2004] .....	38
Tab. 2-3: Gewählte Zellkantenlängen k unterschiedlicher Implementierungen von ZA zur Simulation des Fußgängerverkehrs.....	59
Tab. 4-1: Ermittlung der normierten Summenhäufigkeit einer Quell- Ziel-Matrix.....	96
Tab. 4-2: Tangens- und Kotangenswerte für X-Achsenabschnitt mit der Größe eins und diskrete ganzzahlige Y-Achsenabschnitte .....	104
Tab. 4-3: Statistische Auswertung der Wegelängen (in m) der letzten Zeile der in Abb. 4-31 dargestellten Simulationsergebnisse .....	128
Tab. 5-1: Hörerzahlen aus Lehrevaluation in Hörsälen V 7, 9, 38, 47 und 53 .....	136
Tab. 6-1: Klassifizierung der Erhebungsmethoden .....	138
Tab. 6-2: Mittels Bluetooth detektierte MAC-Adressen .....	145
Tab. 6-3: Protokoll der Erhebung vom 10. November 2005.....	156
Tab. 7-1: Anzahl der Trajektorien zwischen den definierten Quell- und Zielbereichen .....	164
Tab. 7-2: Anzahl aktiver Agenten, Berechnungszeit in Millisekunden .....	168
Tab. 7-3: Header und Anfang einer Tabelle zur Aufzeichnung der Trajektorie eines Agenten.....	168

## Glossar und Abkürzungen

- .NET** Die von Microsoft entwickelte .NET-Plattform dient als Basis zur Entwicklung und Ausführung von sich aus unterschiedlichen Programmiersprachen konstituierenden Anwendungen.
- Agent** Simulierter Fußgänger. Der Begriff der Agentensimulation folgt aus der objektorientierten Programmierung, bei der der Verhaltensrahmen eines simulierten Subjekts in einem gekapselten Codeabschnitt vorgegeben wird.
- ASCII** **A**merican **S**tandard **C**ode for **I**nformation **I**nterchange. 7-Bit-Zeichenkodierung zur Abbildung des lateinischen Alphabets (Groß- und Kleinschrift), der arabischen Ziffern sowie einiger Sonderzeichen.
- AutoCAD** Weit verbreitetes Programm für computergestützte Planung und Entwurf der Firma Autodesk.
- ASEP** **A**symmetric **E**xclusion **P**rocess. Musterbeispiel eines Teilchenhüpfprozesses, bzw. eines getriebenen Nicht-Gleichgewicht-Systems. Teilchen wandern dabei auf einer eindimensionalen Achse von einem diskreten Achsabschnitt zum nächsten.
- AWML** **A**ugmented **W**orld **M**odeling **L**anguage. Auf XML basierendes, jedoch nicht XML konformes Datenformat zur Repräsentation beliebiger Objekte [Dürr et al. 2005].
- CAD** **C**omputer **A**ided **D**esign. Computergestützter Entwurf von technischen Anlagen.
- CIL** **C**ommon **I**ntermediate **L**anguage. Mit der .NET-Plattform von Microsoft entwickelte Projekte werden beim Linken und Kompilieren des Codes in diese von Menschen lesbare Zwischensprache überführt.
- CLR** **C**ommon **L**anguage **R**untime. Virtuelle Maschine der .NET-Initiative von Microsoft, welche die CIL zur Laufzeit einer Anwendung in Maschinensprache übersetzt.
- DFE** **D**ynamic **F**loor **F**ield. Dynamisches Grundfeld. Nimmt mit Durchgang eines Agenten zu bzw. diffundiert und zerfällt mit der Zeit.
- DLL** **D**ynamic **L**ink **L**ibrary. Code-Bibliothek, die zur Laufzeit einer Anwendung gelinkt bzw. kompiliert wird.
- DLR** **D**eutsches Zentrum für **L**uft- und **R**aumfahrt

DWG	<b>D</b> rawing. Dateiformat der AutoCAD-Zeichnungen. Die Dokumentation der Dateistruktur ist nicht frei zugänglich.
DXF	<b>D</b> rawing <b>I</b> nterchange <b>F</b> ormat. Weit verbreiteter Industriestandard zum Austausch von CAD-Dateien.
FIFO	<b>F</b> irst <b>I</b> n, <b>F</b> irst <b>O</b> ut. Regel der Warteschlangentheorie oder Stapelverarbeitung die besagt, dass das zuerst in einen Container gelegte Element auch zuerst wieder entnommen wird.
GDF	<b>G</b> eographic <b>D</b> ata <b>F</b> iles. Europäisches Standard-Dateiaustauschformat für vektorbasierte Kartendaten, in erster Linie für Straßendaten entwickelt. Support durch ERTICO - ITS Europe.
GFF	<b>G</b> eometric <b>F</b> loor <b>F</b> ield. Geometrisches Grundfeld. Dient der Darstellung der Umgebungsgeometrie des betrachteten Bereichs im diskreten Raum, wobei jeder Zelle eine Flächeneigenschaft zugewiesen wurde.
GIS	<b>G</b> eo <b>i</b> nformation <b>s</b> ystem. System zur Haltung und Bearbeitung raumbezogener Daten.
GML	<b>G</b> eography <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage. Datenformat zum Austausch raumbezogener Objekte. Spezifische Anwendung von XML. Support durch das Open Geospatial Consortium.
GSM	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile Communications. Volldigitaler Mobilfunkstandard in über 200 Ländern.
ID	<b>I</b> dentifikationsbezeichnung oder Kennung von Sub- oder Objekten.
IVD	<b>I</b> nstitut für <b>V</b> erfahrenstechnik und <b>D</b> ampfkesselwesen der Universität Stuttgart
KONTIV	Die <b>k</b> ontinuierliche Erhebung zum <b>V</b> erkehrsverhalten ist der Oberbegriff für eine Serie von Umfragen, die im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bauen und Wohnungswesen durchgeführt werden.
LOS	<b>L</b> evel <b>o</b> f <b>S</b> ervice. Erläuterung siehe QSV.
MAC	<b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol. Hardware-Adresse zur eindeutigen Identifikation von elektronischen Geräten in einem Netzwerk.
MRCF	<b>M</b> inimal <b>R</b> oute <b>C</b> ost <b>F</b> unction, vgl. Abschnitt 2.2.4.5
Nexus	Sonderforschungsbereich 627 der Deutschen Forschungsgemeinschaft: "Umgebungsmodelle für Mobile Kontextbezogene Systeme"



OGC	<b>O</b> pen <b>G</b> eospatial <b>C</b> onsortium. Gemeinnützige Organisation zur Entwicklung allgemeingültiger Standards für raumbezogene Geodaten und zum Datenaustausch zwischen Geoinformationssystemen.
Parser	Computerprogramm, welches für die Zerlegung und Umwandlung einer beliebigen Eingabe in ein für die Weiterverarbeitung brauchbares Format zuständig ist.
QSV	<b>Q</b> ualitätsstufen des <b>V</b> erkehrsablaufs. International angewandtes Kriterium zur qualitativen und quantitativen Beschreibung vielfältiger Aspekte der Verkehrsqualität, üblicherweise dargestellt durch die Stufen A (sehr gut) bis F (ungenügend).
RFID	<b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> dentification. Verfahren zur automatischen Identifizierung von Sub- oder Objekten mittels Hochfrequenzfunk.
SFF	<b>S</b> tatic <b>F</b> loor <b>F</b> ield. Statisches Grundfeld, welches sich ausgehend von der Zielzelle ähnlich einem Potential äquidistant ausbreitet. Dient der Navigation der Fußgänger.
TCP/IP	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol/ <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol. Netzwerkprotokoll zur Übertragung von Datenpaketen im Ethernet/Internet.
UML	<b>U</b> nified <b>M</b> odeling <b>L</b> anguage. Standardisierte Sprache zur Modellierung von Software und Systemen aller Art.
UMTS	<b>U</b> niversal <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications <b>S</b> ystem. Mobilfunkstandard der dritten Generation mit deutlich höheren Übertragungsraten als beim GSM-Standard.
URL	<b>U</b> niform <b>R</b> esource <b>L</b> ocator. Adresse einer Ressource in einem Computernetzwerk.
UTM	<b>U</b> niversal <b>T</b> ransverse <b>M</b> ercator. Globales, metrisches Koordinatensystem
VBA	<b>V</b> isual <b>B</b> asic for <b>A</b> pplications. Programmiersprache zur Ergänzung und Erweiterung der Funktionalität von Microsoft Windows Programmen. Muss von der jeweiligen Anwendung unterstützt werden.
W3C	<b>W</b> orld <b>W</b> ide <b>W</b> eb <b>C</b> onsortium. Gremium zur Standardisierung der das World Wide Web betreffenden Techniken.
WKT	<b>W</b> ell <b>K</b> nown <b>T</b> ext. Standardisiertes Format zur Speicherung der Koordinaten geometrischer Objekte.

- W-LAN     **W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etwork. Drahtloses lokales Funknetz zur digitalen Datenübertragung.
- XML        **E**xtensible **M**arkup **L**anguage. Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente zur Haltung beliebiger Daten.
- ZA         **Z**ellulärer **A**utomat. Verkehrsteilnehmer (allg. Agenten) sind durch belegte Zellen repräsentiert, die sich in Abhängigkeit der definierten Übertrittsregeln über die Fläche von leeren Zellen „fortbewegen“.

**Formelzeichen**

D	Fahrzeugdichte in Fz/km
d	Fußgängerdichte in P/m <sup>2</sup>
Fz	Fahrzeug
h	Stunde
km	Kilometer
m	Meter
P	Person
Q	Verkehrsfluss des motorisierten Verkehrs in Fz/h
q	Verkehrsfluss in Fz/s
q <sub>s</sub>	Spezifische Verkehrsstärke in P/(m·s)
S	Weg in m
s	Sekunde
V	Geschwindigkeit in km/h
v	Geschwindigkeit in m/s
Δv	Differenz aus Momentan- und Wunschgeschwindigkeit

## **Zusammenfassung**

Das ungebremste Wachstum der verfügbaren Rechenleistung ermöglicht zunehmend die Simulation selbst komplexer Vorgänge mit einer großen Zahl von Randbedingungen und parallel ablaufender Prozesse. In den Verkehrswissenschaften rückt nach dem motorisierten Verkehr nun verstärkt auch die mikroskopische Simulation des Fußgängerverkehrs in den Blickpunkt des Interesses.

Zentraler Gegenstand dieser Arbeit ist die Generierung von realitätsnahen Fußgängertrajektorien als Eingangsparameter für die Simulation der Netzauslastung von Drahtlosnetzen und mobilen Ad-hoc-Netzen mit Hilfe eines zu entwickelnden Frameworks zur mikroskopischen Fußgängerverkehrsimulation. Zu diesem Zweck wurden zunächst umfangreiche Untersuchungen und Literaturrecherchen zu den Wesensmerkmalen des Fußgängerverkehrs sowie den bislang vorliegenden Modellansätzen vorgenommen.

Im Rahmen der Grundlagenarbeit zur Entwicklung eines geeigneten Fußgängerverkehrsmodells werden in Kapitel 2 zunächst die charakteristischen Merkmale des Fußgängerverkehrs, seine grundlegenden Eigenschaften sowie seine makroskopischen und mikroskopischen Merkmale eingehend untersucht. Anschließend werden bislang publizierte Modellansätze nach dem durch Zustand (kontinuierlich oder diskret), Dynamik (deterministisch oder stochastisch) und Charakter (abstrakt oder heuristisch) aufgespannten Raum klassifiziert und auf ihre Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung hin bewertet.

Kapitel 3 widmet sich den durch die Fußgängersimulation gestellten Anforderungen an die Umgebungsgeometrie und geht näher auf die gängigsten Datenformate ein, in denen geometrische Angaben zu Fußgängerverkehrsflächen zumeist vorliegen. Sodann wird das Relationen- und Topologiekonzept von Nexus vorgestellt, dessen Konventionen die Grundlagen zur Aufbereitung der Umgebungsgeometrie als Eingangsparameter für das Simulationsframework bilden.

Im zentralen Kapitel 4 wird die Entwicklung des eigentlichen Simulationsframeworks eingehend beschrieben. Bei der Implementierung des Zellulären Automaten wird zunächst ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung der geometrischen und dynamischen Grundfelder gelegt, um anschließend auf die Implementierung unterschiedlicher Algorithmen zur Bewegungsdurchführung näher einzugehen. Die Auswirkungen der vorgenannten zent-

ralen Aspekte auf Bewegung und Trajektorie des Agenten bilden den letzten Schwerpunkt des Kapitels.

Im Zuge der Arbeit wurde mit dem Campus Vaihingen der Universität Stuttgart ein Referenzszenario ausgewählt, für welches eine besonders gute Datenlage hinsichtlich Umgebungsgeometrie und Fußgängerverkehrsaufkommen zu erwarten war. In Kapitel 5 werden die charakteristischen Eigenschaften sowie verfügbare Datenquellen näher erläutert.

Zur Kalibrierung der mikroskopischen Eingangsparameter sowie zur Validierung der Simulationsergebnisse standen keine hinreichend detaillierten Verkehrsdaten zur Verfügung. In Kapitel 6 werden daher verfügbare Erhebungsmethoden zunächst klassifiziert, bevor das Layout der auf dem Campus durchgeführten Fußgängerverkehrserhebung dargelegt wird.

Kapitel 7 befasst sich mit der Auswertung der empirisch erhobenen Daten sowie den Ergebnissen der Simulation von drei charakteristischen Zeiträumen eines Wochentags, bevor in Kapitel 8 ein Fazit der geleisteten Arbeit sowie ein Ausblick auf die weiteren Entwicklungen gegeben werden.

## **Abstract**

The undamped growth of available computing power allows more and more the simulation of even complex activities with an important number of boundary values and concurrent processes. After the motorized traffic, now the micro simulation of pedestrian traffic gets more and more in the focus of interest within the transportation science.

Central subject matter of this work is the generation of realistic pedestrian trajectories as input parameter for the simulation of the workload of wireless networks and mobile ad-hoc networks by the use of a micro simulation framework which has to be developed. By this, detailed examinations and literature researches to determine the central characteristics of pedestrian traffic and existing model approaches had to be carried out first.

As part of the basic groundwork for the development of an appropriate pedestrian traffic model, the fundamental characteristics of pedestrian traffic and its macroscopic and microscopic characteristics are examined in detail in chapter 2. Following that, pedestrian traffic models which have been published up to now are classified by its state, dynamic and character and evaluated for its suitability for the given subject matter.

Chapter 3 discusses the requirements on the geometry given by the needs of the pedestrian simulation. Then, the most common data formats suitable for geometric information on pedestrian walking surfaces are explained in detail. Thereafter, the relations and topology concept of Nexus is presented. Its conventions form the basement to process the geometry as an input parameter for the simulation framework.

The central chapter 4 describes the development of the simulation framework. By the implementation of the cellular automata, a special emphasis is given on the layout of the geometric and dynamic floor fields. Furthermore, the different algorithms of processing the movement of the agents are explained in detail. The final focus of the chapter lies on the consequences for the movement execution resulting out of the aforementioned central implementation aspects.

In the course of this work, the campus Vaihingen of the Universität Stuttgart has been chosen as reference scenario. Considering the surrounding geometry and the volume of pedestrian traffic, relatively good information is available. Chapter 5 describes its characteristics and available data sources.

For calibration of the microscopic input parameters as well as for the validation of the simulation results, no sufficiently detailed traffic data has been

available. First, chapter 6 classifies available evaluation methods, then the layout of the evaluation executed on campus Vaihingen is explained in detail.

Chapter 7 is about the analysis of the empirical data and the results of the simulation of three characteristic spaces of time of an average weekday. Finally chapter 8 gives a conclusion on the results of this work and an outlook on the developments to come.

# 1 Einleitung

## 1.1 Mikroskopische Fußgängerverkehrsmodellierung

Vornehmlich seit Mitte der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts weckt die Modellierung der Mobilität von Fußgängern zunehmend das Interesse einer fachlich breit aufgestellten wissenschaftlichen Gemeinde.

Allgemein werden mikroskopische Simulationen zunehmend eher als einfacher denn als komplexer Ansatz betrachtet. Die revolutionäre Entwicklung von Speicherkapazität und Rechenleistung bei zeitgleichem Verfall der Preise ermöglicht zunehmend in großem Umfang die zeitgleiche Simulation zahlreicher interagierender Elemente.

Schlüsselaspekte sind dabei zunehmend die klare Strukturierung der zu Grunde zu legenden Spezifikationen, ein sorgfältiges Design mikroskopischer Simulationsumgebungen sowie deren Validierung auf operationaler Ebene.

Der Schwerpunkt mikroskopischer Fußgängersimulationen liegt heute einerseits bei Evakuierungssimulationen von Gebäuden und Veranstaltungsgeländen, andererseits bei der Entscheidungshilfe zur richtigen Dimensionierung von Einrichtungen und Flächen mit einem hohen Fußgängerverkehrsaufkommen. Auch die integrierte mikroskopische Betrachtung von straßenbegleitenden Rad- und Fußwegen gewinnt zunehmend eine höhere Bedeutung.

<b>Nutzbare Gehwegbreite</b>	<b>Summe Radfahrer und Fußgänger</b>	<b>davon Fußgänger</b>
> 2,50 bis 3,00 m	70	>40
> 3,00 bis 4,00 m	100	> 60
> 4,00 m	150	> 100

Tab. 1-1: *Beispiel für tabellierte Flächenmaße [FGSV 1992]*

Bisherige Bemessungsempfehlungen basieren zumeist auf Erfahrungswerten oder auf aus empirischen Untersuchungen abgeleiteten tabellierten Flächenmaßen in Abhängigkeit vom zu erwartenden Fußgängeraufkommen (vgl. Tab. 1-1). Diese erweisen sich jedoch oft als unflexibel und werden den jeweils ortsspezifischen Rahmenbedingungen vielfach nicht gerecht.



Architekten und Städteplaner sind oft mit der Fragestellung konfrontiert, wie Anlage und Dimensionierung von Fußgängerflächen das Verhalten des Einzelnen beeinflussen. Tabellierte Bemessungsempfehlungen helfen hierbei nicht weiter. Stattdessen stellt die mikroskopische Fußgängersimulation einen möglichen Lösungsansatz dar.

Schwerpunkt und zentrale Aufgabenstellung dieser Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 627 „Nexus“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist die Generierung realistischer Fußgängerpfade, so genannter Trajektorien als Eingangsparameter für die Simulation von Drahtlosnetzen und mobilen Ad-Hoc-Netzen.

Während Drahtlosnetze (GSM, W-LAN) aus auf ortsfester Infrastruktur basierenden Funkzellen bestehen, ist bei mobilen Ad-Hoc-Netzen jedes Endgerät zugleich ein Netzknoten [Breyer 2003]. Netzabdeckung und Übertragungsraten hängen somit entscheidend vom Bewegungsverhalten der Nutzer ab. Der mikroskopische Bewegungsverlauf einer großen Anzahl von Fußgängern soll im Rahmen dieser Arbeit simuliert und aufgezeichnet werden.

Nur am Rande betrachtet werden Ansätze zur Modellierung von Panik und Evakuierungsszenarien, da sich diese in ihren charakteristischen Phänomenen erheblich von Alltagssituationen des Fußgängerverkehrs unterscheiden [Helbing et al. 2002]. Derartige Modellansätze fließen in dieser Arbeit immer dann in die Betrachtungen mit ein, wenn sie dem besseren Gesamtverständnis dienen.

## **1.2 Nexus, Mobilität und Bewegung**

Die zunehmende Verbreitung von Sensortechnologien in Verbindung mit dem Vormarsch drahtloser Kommunikation und mobiler Endgeräte ermöglicht die Entwicklung kontextabhängiger Anwendungen und Dienste. Diese Anwendungen und Dienste berücksichtigen den Kontext von Sub- und Objekten, wie deren gegenwärtige Position, physikalische Umgebung oder Aktivität. Sie können auf Änderungen in der realen Welt reagieren, sich anpassen und Informationen in Abhängigkeit vom Anwendungskontext auswählen und aufbereiten.

Obwohl die Entwicklung hin zu einem Ubiquitous Computing [Mattern 2005], der vollständigen Durchdringung des Alltags durch intelligente Elektronik bereits in vollem Gange ist, birgt die Entwicklung noch ein enormes weitergehendes Potential. So sagte Gordon Moore Ende 2007 voraus, dass seine bereits in den 1960er Jahren formulierte und bis heute zutreffende Gesetzmäßigkeit einer Verdopplung der Computerleistung bzw. analog einer

Halbierung der Größe elektronischer Bauteile alle zwei Jahre [Moore 1965] noch mindestens 10 bis 15 Jahre anhalten wird.

In Analogie zum World Wide Web wurde in Rahmen von Nexus die Vision des World Wide Space entwickelt. Bei dieser offenen und verteilten Umgebung für ortsbezogene Daten handelt es sich um einen virtuellen Raum, der den Rahmen für die Integration und den Zugriff auf Kontext- und Umgebungsmodelle verschiedenster Provenienz bietet. Eine weitergehende Einführung in Ideen, Konzepte und Begriffe von Nexus wird in [Bauer et al. 2004] und in [Nicklas et al. 2001] gegeben.

Sensorielle Erfassung und mikroskopische Simulation der Bewegung mobiler Entitäten spielen im Rahmen von Nexus somit eine bedeutende Rolle. Beim Bewegungsverhalten der mobilen Entität ‚Fußgänger‘ können dabei drei Entscheidungsebenen unterschieden werden [Hoogendoorn et al. 2002], [Hoogendoorn et al. 2004]:

- Strategische Ebene: Aktivitätenwahl
- Taktische Ebene: Wegewahl
- Operationale Ebene: Bewegungsverhalten

Im Umkehrzug können Verhalten und Fähigkeiten von Fußgängern ebenfalls diesen drei Ebenen zugewiesen werden:

- Operational: Fähigkeits- und reflexbasiertes Verhalten
- Taktisch: Regelbasiertes Verhalten in Reaktion auf Umgebung
- Strategisch: Wissensbasiertes Verhalten

Eine Gegenüberstellung der Entscheidungsebenen des Bewegungsverhaltens und des Vier-Stufen-Algorithmus‘ zur Mobilitätsmodellierung zeigt, dass die Stufen Erzeugung, Verteilung und Aufteilung des Verkehrs der strategischen Ebene zuzuordnen sind. Die Verkehrsumlegung entspricht im Wesentlichen der taktischen und operationalen Ebene.

Eine mikroskopische Bewegungssimulation internalisiert zur Laufzeit lediglich die operationale und taktische Ebene, die strategische Ebene wird sinnvoller Weise im Vorfeld in einem separaten Modul abgebildet, welches jedoch nicht Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Versuche, auch die strategische Entscheidungsebene im Modell zur Laufzeit abzubilden oder auch die strategische Entscheidungsebene mikroskopisch zu modellieren führen nicht zu befriedigenden Ergebnissen [Cavens et al. 2005], [Kurose et al. 2001].

Die vorliegende Arbeit befasst sich mithin konkret mit der mikroskopischen Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs als maßgeblicher Teil-

aspekt der mikroskopischen Simulation der Mobilität von Fußgängern. Vor der Entwicklung eines eigenen Lösungsansatzes war hierzu zunächst eine intensive Auseinandersetzung mit den Wesensmerkmalen der Fußgängerbewegung sowie mit dem Für und Wider der bis dato entwickelten Modellansätze erforderlich.

## **2 Grundlagen und Modellentwicklung**

In jüngster Zeit befasst sich eine beachtliche Anzahl wissenschaftlicher Aufsätze mit dem Forschungsgebiet der Fußgängerverkehrsmodellierung. Im folgenden Kapitel wird zunächst auf phänomenologische Erkenntnisse näher eingegangen. Im zweiten Schritt werden die zahlreichen publizierten Modellansätze anhand dreier wesentlicher Merkmale klassifiziert und kritisch diskutiert.

Nach der Erläuterung der Bedeutung der Updatereihenfolge für das Simulationsergebnis und der Darstellung verschiedener Updatemethoden folgt die abschließende Modelldiskussion mit der Identifizierung und Weiterentwicklung des für die Zielstellung dieser Arbeit erfolgversprechendsten Ansatzes.

### **2.1 Charakteristische Merkmale des Fußgängerverkehrs**

Wenngleich einige der nachfolgend erläuterten Merkmale zunächst trivial zu sein scheinen, müssen sie zu einer integralen Beschreibung des Fußgängerverkehrs doch qualitativ und wenn möglich quantitativ dargestellt werden. Weitere Kenngrößen erweisen sich erst auf den zweiten Blick als grundlegend und wieder andere werden im Rahmen dieser Arbeit kritisch hinterfragt, nicht zuletzt, da sie sich auf eine unsichere empirische Datengrundlage stützen.

Nachfolgend wird zunächst auf grundlegende spezifische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs eingegangen. Anschließend werden die leichter quantifizierbaren makroskopischen Merkmale sowie wesentliche, tendenziell eher qualitativ zu beschreibende mikroskopische Merkmale dargestellt.

#### **2.1.1 Grundlegende Eigenschaften**

In einer ersten Näherung an das Forschungsfeld der mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodellierung liegt die Vermutung nahe, dass sich mikroskopische Ansätze zur Modellierung des motorisierten Individualverkehrs mit vergleichsweise geringem Aufwand adaptieren ließen. Ursächlich dafür, dass dies letztlich nicht möglich ist, sind die nachfolgend dargestellten grundlegenden Eigenschaften des Fußgängerverkehrs, welche völlig neue Modellansätze erforderlich machen.

##### **2.1.1.1 Zwei Dimensionen**

Auf den ersten Blick unterscheiden sich Streckennetze für den motorisierten Verkehr und Wegenetze für den Fußgängerverkehr in ihrer zweidimensiona-

len Projektion in die Ebene kaum voneinander: In beiden Fällen werden einzelne Streckenachsen über Streckenknoten zu einem mehr oder weniger komplexen Netz miteinander verbunden. Der zweite Blick offenbart jedoch große Unterschiede. Die Strecken des motorisierten Verkehrs sind im Regelfall in klar zuzuordnende Fahrstreifen untergliedert.

Auch wenn ein Polygonzug einer Streckenachse in der Ebene zahlreiche Richtungsänderungen aufweist, lässt sich der mikroskopische Verkehrsablauf letztlich doch als eindimensionales Problem abstrahieren. Alle grundlegenden und heute verbreitet Anwendung findenden Modellansätze machen sich diese Grundidee zu Eigen [Nagel et al. 1992], [Wiedemann 1974]. Fahrstreifenwechsel auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen werden im Regelfall durch zusätzliche Abbildungsvorschriften in Ergänzung des eindimensionalen Grundmodells dargestellt.

Bei Fußgängern ist Spurführung hingegen bis auf wenige Ausnahmen (vgl. Abschnitt 2.1.3.6) unbekannt, weshalb sich die Abstraktion eines Fußweges durch seine Achse als unzureichend erweist. Durch den flächenhaften Charakter des Fußgängerverkehrs muss ein Fußweg vielmehr durch seine tatsächlichen Begrenzungslinien repräsentiert werden, was zunächst eine detailgenaue Abbildung der Umgebungsgeometrie als Grundlage einer mikroskopischen Simulation erforderlich macht.

Zusätzlich sind Fußgänger nicht im gleichen Maß wie Kraftfahrzeuglenker an die für sie vorgesehene Infrastruktur gebunden. Ein Fußgängermodell darf somit keine Beschränkung auf die für eine Nutzung vorgehaltenen Flächen vornehmen, einzig sinnvolle Quelle für Restriktionen ist die anzutreffende Umgebungsgeometrie. Voraussetzung für die Allgemeingültigkeit eines mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodells ist somit die uneingeschränkte Gleichberechtigung beider Raumdimensionen der Ebene.

### **2.1.1.2 Fußwegelängen**

In hoch entwickelten Gesellschaften ist der Fußgängerverkehr im Regelfall kein captiver Modus. Vielmehr sind Fußwege zumeist Überbrückungswege im Rahmen längerer Transportketten. Darunter fallen Teilwege wie beispielsweise von der Wohnung zum eigenen Fahrzeug bzw. zur Bus- oder Bahnhaltestelle, der Umsteigeweg zwischen zwei öffentlichen Transportmitteln oder der Weg zwischen Parkplatz oder Haltestelle und dem Arbeitsplatz. Genauso wie eigenständige Fußwege zwischen zwei Aktivitäten sind diese bezogen auf mit anderen Modi zurückgelegten Wegen vergleichsweise kurz.

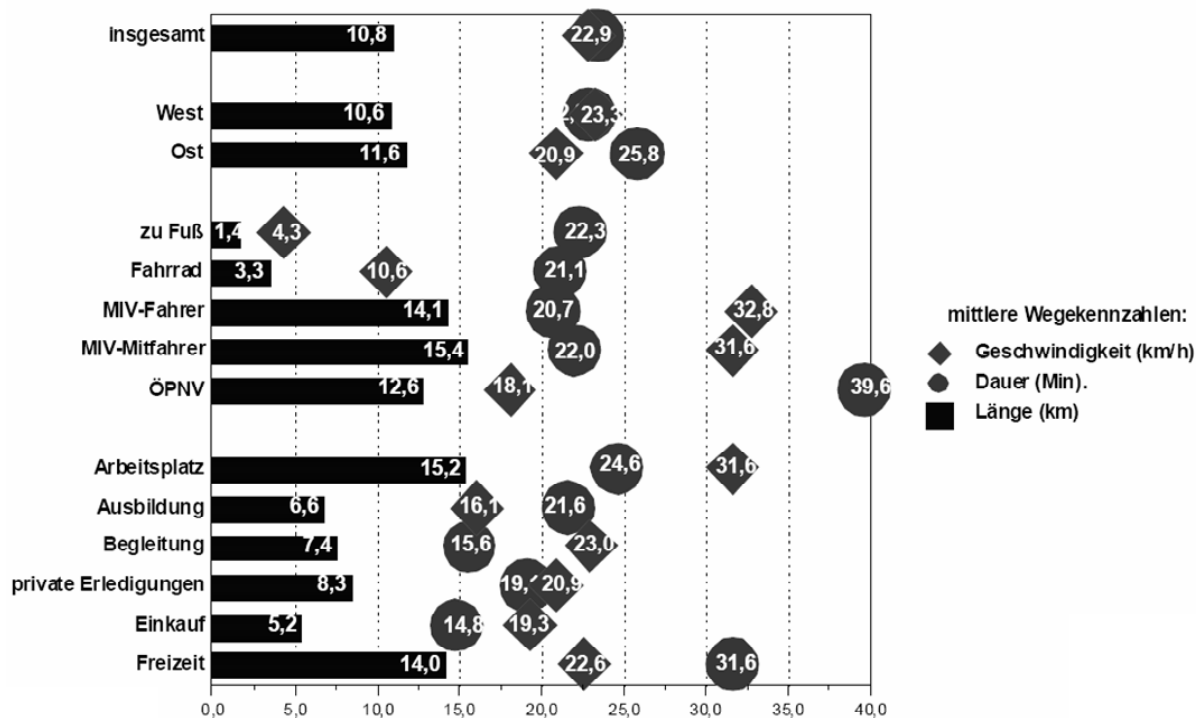


Abb. 2-1: Mittlere Wegelängen, Wegedauern und Wegegeschwindigkeiten aus „Mobilität in Deutschland“ [Follmer et al. 2002]

Entsprechend der Auswertung der durch Befragungen erhobenen und für die Bundesrepublik Deutschland repräsentativen Daten der KONTIV sind eigenständige Fußwege insgesamt im Durchschnitt etwas über einen Kilometer lang [Brög et al. 1999]. Dabei sind lediglich Freizeitwege im Schnitt länger als einen Kilometer, alle zu anderen Zwecken zurückgelegten Fußwege sind durchschnittlich sogar etwas kürzer, vgl. hierzu auch Abb. 2-1. Die relativ kurzen Fußwegelängen spielen insbesondere eine erhebliche Rolle in Zusammenhang mit dem im Folgeabschnitt beschriebene Routenwahlverhalten von Fußgängern.

### 2.1.1.3 Routenwahlverhalten

Das Routenwahlverhalten eines Fußgängers erweist sich als wesentlich vielschichtiger als jenes eines Kraftfahrzeuglenkers. Während bei Letzterem die Fahrtdauer zumeist das ausschlaggebende Kriterium darstellt, können bei Ersterem zahlreiche psychosoziale Entscheidungskriterien identifiziert werden [Millonig et al. 2005]. Befragungen im englischen Sprachraum zufolge steht hier an erster Stelle der Begriff der „Convenience“. Im Deutschen umfasst dieser vielschichtige Begriff neben der allgemeinen Zweckmäßigkeit, dem Nutzen und dem Vorteil des Weges auch Aspekte der Bequemlichkeit und des Komforts. Aber auch die subjektiv empfundene Sicherheit, Attraktivität und Einfachheit des Weges spielen eine große Rolle.

Dominant ist letztlich ein energieoptimiertes Routenwahlverhalten, bei dem der Fußgänger unter geringstmöglichem Energieeinsatz das von ihm vorge-sehene Ziel erreicht. Oftmals ist dieser energieoptimale Weg identisch mit der zeitlich und räumlich kürzesten Verbindung. Bisweilen werden jedoch auch Umwege in Kauf genommen, sofern damit ein schwer begehbarer Ab-schnitt umgangen werden kann.

Nach [Helbing et al. 2001] zeigt die Auswertung zahlreicher Video- und Film-aufnahmen eine große Umwegempfindlichkeit von Fußgängern, selbst dann, wenn der direkte Weg zum Ziel sehr stark frequentiert ist. Demzufolge wäh-len Fußgänger zumeist den aus ihrer Sicht kürzesten bzw. schnellsten Weg. Während Kapazität und Auslastung einer Strecke beim Routenwahlverhalten im motorisierten Verkehr eine erhebliche Rolle spielen, sind sie bezogen auf den Fußgängerverkehr somit eher von untergeordneter Bedeutung.

Aus der zusätzlichen Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.1.2 dargestellten kurzen Wegelängen resultiert die Schlussfolgerung, dass für die umfassende Modellierung des Fußgängerverkehrs kein der Modellierung des motorisier-ten Verkehrs vergleichbares Routenwahlmodell erforderlich ist. Es gilt die qualitative Aussage: Je kürzer die Quell-Ziel-Entfernung, desto weniger durch bauliche und topografische Merkmale vorgegebene Routenwahlalter-nativen bieten sich dem Fußgänger. Ein adäquates Fußgängerverkehrsmo-dell muss daher in der Lage sein, zur Laufzeit der Simulation die verbleiben-den Routenwahlentscheidungen auf der taktischen Entscheidungsebene ge-meinsam mit der Bewegungsdurchführung auf der operationalen Entschei-dungsebene abzubilden.

### **2.1.2 Makroskopische Merkmale**

Makroskopische Merkmale sind strombasierte Kenngrößen. Sie quantifizie-ren das kollektive Verkehrsverhalten. Zu ihnen zählen die klassischen Kenn-größen Geschwindigkeit, Fluss und Dichte. Während die Geschwindigkeit auch das Maß der Dynamik eines Individuums sein kann, sind Fluss und Dichte originär makroskopische Merkmale.

#### **2.1.2.1 Geschwindigkeit**

Die individuellen und mithin auch die mittleren Wunschgeschwindigkeiten von Fußgängern sind von zahlreichen endogenen und exogenen Faktoren abhängig [Bohle et al. 2004], [Klüpfel 2005], [Hoogendoorn et al. 2005]. Un-ter einer Wunschgeschwindigkeit ist dabei diejenige Geschwindigkeit zu ver-standen, die ein Fußgänger ohne Beeinflussung durch andere Verkehrsteil-

nehmer einschlagen möchte. Grob lassen sich die beeinflussenden Faktoren in vier Gruppen unterteilen:

- Persönliche Merkmale (Alter, Geschlecht, Größe, Gesundheitszustand)
- Wegmerkmale (Zweck, örtliche Vertrautheit, Wegelänge)
- Infrastruktur (Wegetyp, Beschaffenheit, Längsneigung)
- Umfeld (Umgebungsattraktivität, soziale Sicherheit, Witterung)

Beispielsweise wurden bezogen auf den Zweck des Weges für Berufs- und Pendlerverkehre tendenziell höhere Wunschgeschwindigkeiten ermittelt als für Einkaufs- und Freizeitverkehre [FGSV 2001], [Bohle et al. 2004], [FGSV 1972]. Dabei scheinen die beobachteten Geschwindigkeiten bei einer zumeist recht kleinen Standardabweichung zwischen 0,15 und 0,45 m/s normalverteilt zu sein.

Tab. 2-1 gibt einen Überblick zu empirisch erhobenen mittleren Geschwindigkeiten. Der Mittelwert über alle hier aufgeführten Werte liegt bei 1,34 m/s, die Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeiten bei lediglich 0,08 m/s. Diese Wunschgeschwindigkeiten stellen sich nur bei kleinem Fluss respektive kleiner Dichte ein. Bei höherem Verkehrsaufkommen sind Fluss und Dichte gegenüber den vorgenannten Faktoren hinsichtlich der resultierenden Geschwindigkeit dominant.



v [m/s]	Herkunft	Quelle
1,2	Europa	[Follmer et al. 2002]
1,22	Asien	[Tanariboon et al. 1991]
1,22	Nordamerika	[Virkler et al. 1994]
1,23	Asien	[Tanariboon et al. 1986]
1,25	Nordamerika	[Morall et al. 1991]
1,25	Nordamerika	[Pauls 1987]
1,30	Europa	[Older 1968]
1,3	Europa	[Burstedde et al. 2001]
1,31	Europa	[Trogenza 1976]
1,32	Nordamerika	[Navin et al. 1969]
1,32	Europa	[O'Flaherty et al. 1972]
1,34	Europa	[FGSV 2001]
1,35	Nordamerika	[Blue et al. 1998]
1,37	Nordamerika	[Sleight 1972]
1,38	Nordamerika	[Young 1999]
1,38	Europa	[Teknomo 2002]
1,4	Europa	[CROW; ASVV 1998]
1,4	Nordamerika	[Fruin 1971]
1,44	Australien	[Henderson 1971]
1,44	Europa	[Bohle et al. 2004]
1,45	Europa	[Knoflacher 1995]
1,46	Asien	[Sakar et al. 1997]
1,47	Europa	[Daly et al. 1991]

Tab. 2-1: Empirisch ermittelte mittlere Wunschgeschwindigkeiten

### 2.1.2.2 Fluss

Der Fluss wird in Zusammenhang mit dem motorisierten Verkehr oft auch als Verkehrsfluss  $Q$  [Fz/h] bezeichnet. Er bezeichnet die Zahl der Fahrzeuge, die pro Zeiteinheit einen bestimmten Zählquerschnitt passieren. Aufgrund der zweidimensionalen Ausdehnung des Fußgängerverkehrs in der Ebene,

muss zur Ermittlung des Fußgängerflusses die Breite des Querschnitts mit eingehen [Bohle et al. 2004]. Die spezifische Verkehrsstärke  $q_s$  [ $P/(m \cdot s)$ ] ist somit definiert als die Anzahl der Personen, die pro Sekunde einen Messquerschnitt von einem Meter Breite passieren. Unter  $q_{max}$  versteht man die (theoretische) Kapazität an der Stelle des Messquerschnitts.

Die spezifische Verkehrsstärke besitzt zwei zueinander orthogonale Komponenten. Im Falle unidirektionaler Verkehrsströme wird  $q_s$  im zur Bewegungsrichtung orthogonalen Messquerschnitt maximal, im tangentialen Messquerschnitt dagegen null.

### 2.1.2.3 Dichte

Auch die Fußgängerdichte wird in Äquivalenz zum motorisierten Verkehr definiert. Dort steht die Fahrzeugdichte  $D$  [ $Fz/km$ ] für die Zahl der Fahrzeuge pro Kilometer und – in der Regel – pro Fahrstreifen. Während hier die Betrachtung der longitudinalen Dimension hinreichend ist, muss beim Fußgängerverkehr der flächige Charakter Berücksichtigung finden. Demzufolge wird hier die Fußgängerdichte  $d$  [ $P/m^2$ ] definiert als die Zahl der Personen pro Quadratmeter.

Bereits in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts war die dichteste als angemessen erachtete geometrische Anordnung von Fußgängern und mithin die maximal erwünschte Dichte Ausgangspunkt für die Dimensionierung von Fußgängerverkehrsanlagen (Abb. 2-2). Basierend auf empirischen Erkenntnissen wurde zwischen den Zuständen Aufenthalt (Aufstell- und Warteflächen) und Bewegung (Fußwege) unterschieden.

In der vertikalen Projektion liegt die minimale durch einen Fußgänger belegte Fläche bei etwa  $0,085 m^2$  [Weidmann 1993], das in Aufenthalts- und Wartesituationen empirisch ermittelte spezifische Minimum liegt bei einem Platzbedarf von rund  $0,15 m^2$  [FGSV 1972]. Dies entspricht einem sehr starken Gedränge mit einer maximalen Dichte von bis zu  $6,7 P/m^2$ , in dem die Personen keine Bewegungsmöglichkeit haben. Der dynamische Platzbedarf für das Gehen ist deutlich größer (vgl. Abschnitt 2.1.3.1).

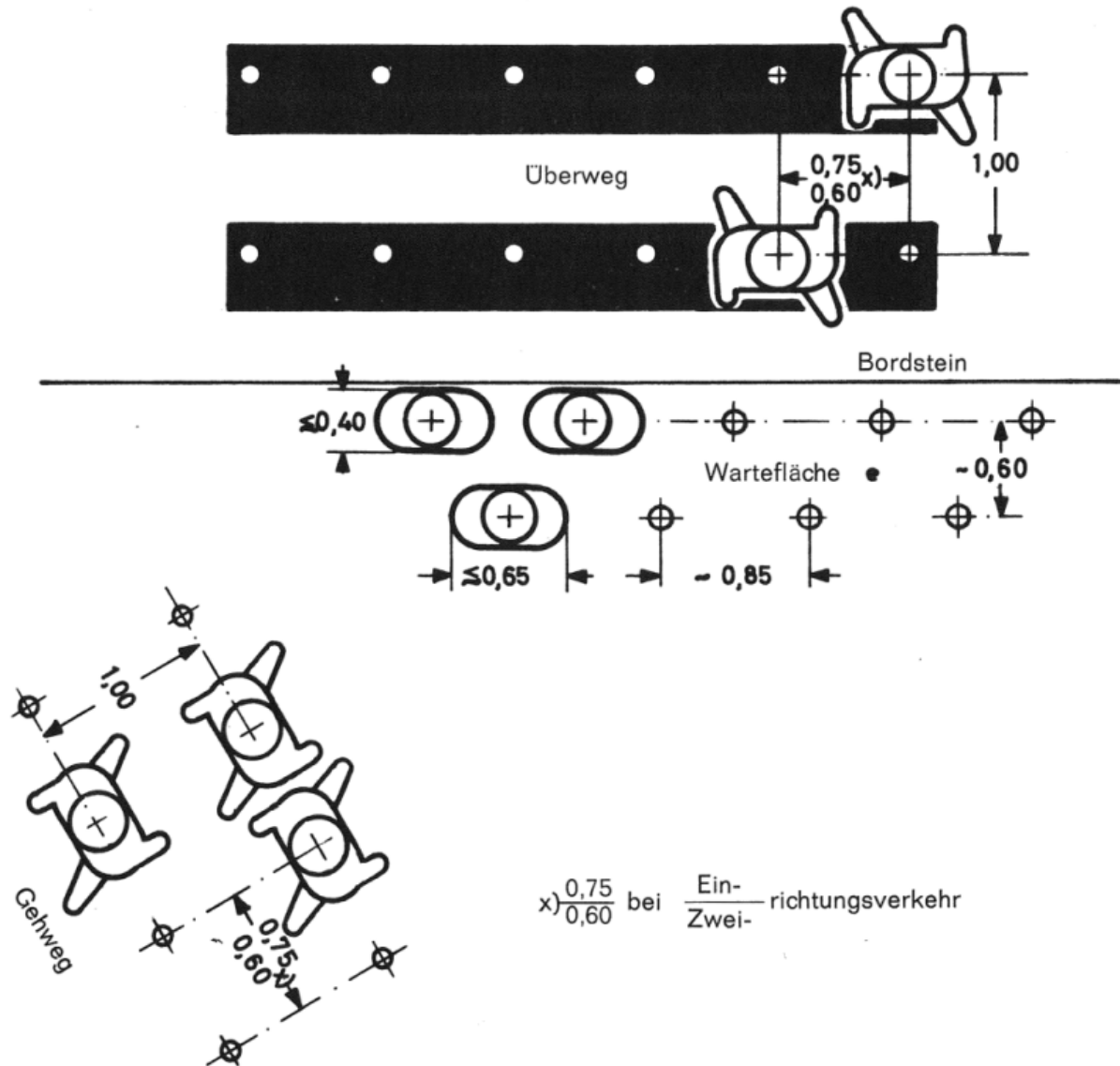


Abb. 2-2: Bewegungsraum von Fußgängern (Maße in m) [FGSV 1972]

#### 2.1.2.4 Fundamentaldiagramm

Empirisch erhobene Kenngrößen unidirektionaler Verkehrsströme können als dreidimensionale Punktwolke im durch die drei vorstehend beschriebenen makroskopischen Parameter aufgespannten Raum dargestellt werden. Diese in den Verkehrswissenschaften als Fundamentaldiagramm bezeichnete Darstellung fußt auf der Fundamentalbeziehung [2-1] Fluss ( $q$ ) gleich Geschwindigkeit ( $v$ ) mal Dichte ( $d$ ). Bei Projektion der räumlichen Darstellung in die jeweils durch zwei Achsen aufgespannten Ebenen ergeben sich die jeweiligen funktionalen Zusammenhänge Geschwindigkeit und Dichte, Geschwindigkeit und Fluss sowie Dichte und Fluss.

$$q = v \cdot d$$

[2-1]

Während zur Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge beim motorisierten Verkehr umfangreiches empirisches Datenmaterial zur Verfügung steht [Schick 2003], kann bezogen auf gerichtete Fußgängerströme nur auf vergleichsweise wenig Daten zurückgegriffen werden. Dabei erweist sich die Erhebung bei vorherrschenden Dichten nahe an der Kapazität von Fußwegen als ausgesprochen schwierig, da hier im Gegensatz zum motorisierten Verkehr spontane Richtungswechsel möglich sind. Die spezifische Verkehrsstärke  $q_s$  ist dann kaum noch messbar.

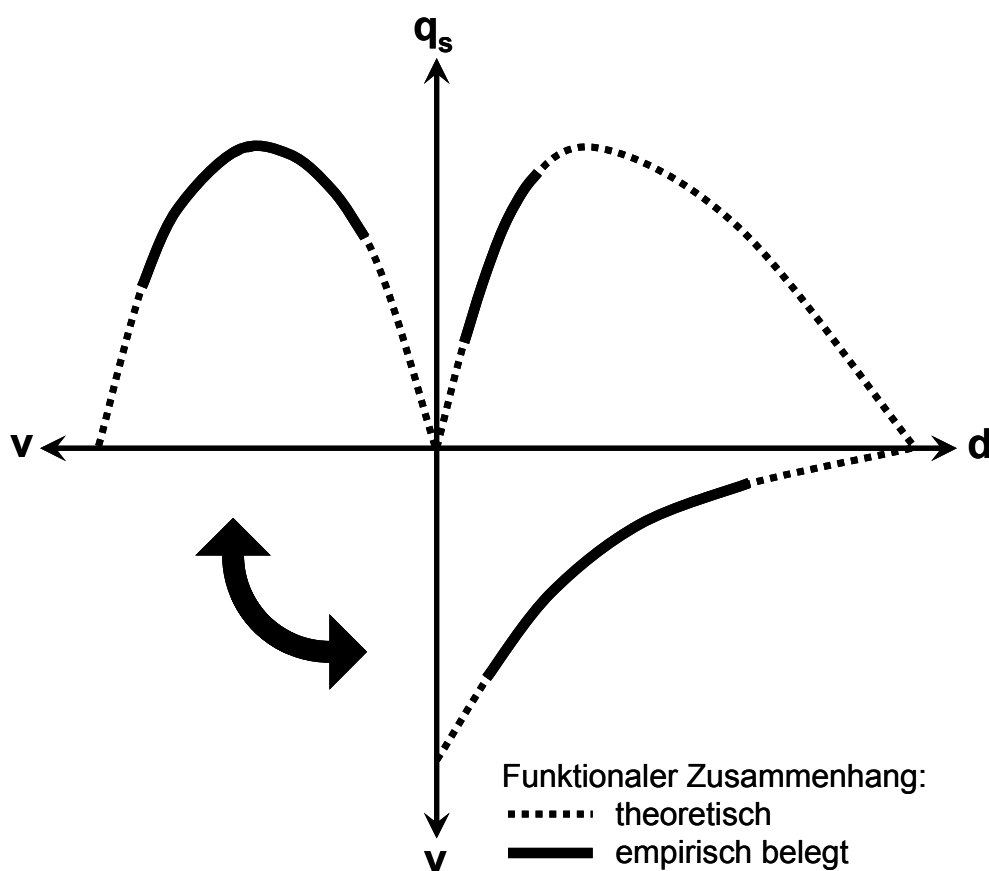


Abb. 2-3: Ebene Projektion des Fundamentaldiagramms unidirektionaler Fußgängerströme

Abb. 2-3 zeigt qualitativ die Projektion der funktionalen Zusammenhänge des Fundamentaldiagramms in die Ebene. Punktiert dargestellt sind hier die theoretischen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Fluss und Dichte. Die durchgezogenen Linien stellen diejenigen Bereiche dar, deren Relation durch empirische Erhebungen gerichteter Fußgängerverkehre nachgewiesen

werden konnten (vgl. [Hoogendoorn et al. 2003a], [AlGadhi et al. 2001] und [Bohle et al. 2004]).

Sehr gut nachweisbar ist der antiproportionale Zusammenhang von Geschwindigkeit und Dichte. Dagegen ist der empirische Nachweis theoretisch ermittelter Kapazitäten von Fußgängerflächen bislang noch nicht gelungen. So ermittelten [Bohle et al. 2004] und [Irzik 2003] für Fußgängerwege mit unidirektionalem Verkehr eine spezifische Verkehrsstärke von  $q_{s, \max} = 1,32 \text{ P}/(\text{m}\cdot\text{s})$  bei einer optimalen Dichte von  $d_{\text{opt}} = 2,25 \text{ P}/\text{m}^2$  und einer optimalen Geschwindigkeit von  $v_{\text{opt}} = 0,59 \text{ m/s}$ .

Bei den zugeordneten Erhebungen lagen die höchsten empirisch festgestellten spezifischen Verkehrsstärken jedoch lediglich bei  $q_s = 0,66 \text{ P}/(\text{m}\cdot\text{s})$ . Alle größeren „Messwerte“ entstanden basierend auf einer Simulation unter Verwendung des Social-Force-Modells nach Helbing. Der Einsatz eines nicht validierten Modells zur Ermittlung von makroskopischen Kenngrößen des Fußgängerverkehrs erscheint zumindest als fragwürdig. Aufgrund der publizierten Datenlage ist es nur schwer möglich, allgemeingültige Aussagen zum Fundamentaldiagramm des Fußgängerverkehrs zu treffen.

#### **2.1.2.5 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs**

Für Analyse- und Vergleichszwecke ist die Quantifizierbarkeit makroskopischer Kenngrößen von großem Vorteil. Allerdings bleiben kardinale Kenngrößen vielfach abstrakt, so lange sie nicht qualitativ bewertet werden. Das in den Verkehrswissenschaften wichtigste und international eingeführte Bewertungskriterium sind die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV). Im Zusammenhang mit dem Fußgängerverkehr hat [Fruin 1971] erstmals Qualitätsstufen (engl. Level of Service, kurz LOS) beschrieben und definiert. Sie orientieren sich an der Fußgängerdichte beziehungsweise reziprok an der durchschnittlich verfügbaren Fläche je Fußgänger [Millonig et al. 2005].

Basierend auf umfangreichen empirischen Untersuchungen fanden über die Fußgängerdichte definierte QSV für Bewegungs- und Wartesituationen Eingang in das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV 2001]. In einer weiteren Forschungsarbeit im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden QSV mit Hilfe der spezifischen Verkehrsstärke  $q_s$  festgelegt [Bohle et al. 2004]. Auch wurde eine Einteilung anhand der mittleren Obstruktionen  $\Delta v$  für die freie Geschwindigkeitswahl relativ zur mittleren Wunschgeschwindigkeit vorgenommen. Tab. 2-2 ordnet die festgelegten Grenzwerte der jeweiligen QSV von A bis F zu.

QSV	Fußgängerdichte $d$ [ $P/m^2$ ]		$q_s$ [ $P/(m \cdot s)$ ]	$\Delta v$ [%]
	Bewegung	Wartesituation		
A	$\leq 0,10$	$\leq 1,00$	$\leq 0,11$	$\leq - 5$
B	$\leq 0,25$	$\leq 1,50$	$\leq 0,24$	$\leq - 10$
C	$\leq 0,40$	$\leq 2,00$	$\leq 0,66$	$\leq - 25$
D	$\leq 0,70$	$\leq 3,00$	$\leq 1,11$	$\leq - 45$
E	$\leq 1,80$	$\leq 6,00$	$\leq 1,32$	$\leq - 50$
F	$> 1,80$	$> 6,00$	$> 1,32$	$> - 50$

Tab. 2-2: QSV-Grenzwerte für Fußgängerdichte [FGSV 2001], spezifische Verkehrsstärke und mittlere relative Abweichung von der Wünschgeschwindigkeit [Bohle et al. 2004]

In [FGSV 2001] werden die QSV wie folgt qualitativ beschrieben:

*Stufe A: Die Fußgänger haben freie Geschwindigkeitswahl. Sie werden durch andere Fußgänger äußerst selten beeinflusst. Die Verkehrsdichte ist sehr gering. In Wartesituationen gibt es keine Beeinträchtigungen.*

*Stufe B: Die Fußgänger werden nur selten wegen anderer Personen zur Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen gezwungen. Bei geringer Verkehrsdichte kommt es insgesamt nur zu geringfügigen Beeinträchtigungen. In Wartesituationen gibt es nur sehr geringe Beeinträchtigungen.*

*Stufe C: Die freie Geschwindigkeitswahl ist eingeschränkt. Die Verkehrsdichte erreicht ein spürbares Maß. Gelegentlich treten erzwungene Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen durch andere Fußgänger auf, die ständig beachtet werden müssen. In Wartesituationen sind Beeinträchtigungen durch andere Personen möglich, ohne dass es zu Körperkontakten kommt.*

*Stufe D: Die Geschwindigkeitswahl ist deutlich eingeschränkt. Fußgänger sind häufig zu Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen gezwungen. Die Verkehrsdichte ist hoch und die freie Bewegung stark behindert. Die mittlere Geschwindigkeit sinkt erkennbar ab. In Wartesituationen kommt es zur Bildung von Reihen oder Gruppen und zu unbeabsichtigten Körperkontakten mit anderen Personen. Der Verkehrszustand ist noch stabil.*

*Stufe E: Die Fußgänger haben keine freie Geschwindigkeitswahl. Gegenverkehr ist erheblich erschwert. Die Verkehrsdichte ist so hoch, dass es zu massiven Behinderungen kommt. In Wartesituationen sind Körperkontakte zu anderen Personen nicht zu vermeiden. Die Kapazität wird erreicht.*

*Stufe F: Der Zugang ist höher als die Kapazität. Richtungsänderungen sind kaum noch durchführbar, zeitweise kommt es zum Stillstand. Gegenverkehr ist unmöglich. Die Fußgänger haben ständig unabweisbare Körperkontakte zu anderen. Die Verkehrsanlage ist überlastet.*

Es zeigt sich, dass zur verbalen Beschreibung der QSV letztlich die Verkehrsverhältnisse auf mikroskopischer Ebene herangezogen werden, die selbst wiederum nur schwer quantifizierbar sind. In der plausiblen Nachbildung der mikroskopischen Dynamik des Verkehrs liegt jedoch die große Herausforderung für mikroskopische Fußgängerverkehrsmodelle. Der Analyse mikroskopischer Merkmale ist daher große Bedeutung beizumessen.

### **2.1.3 Mikroskopische Merkmale**

Mikroskopische Merkmale charakterisieren sowohl die Bewegung des einzelnen Verkehrsteilnehmers als auch kollektives Verhalten auf mikroskopischer Ebene. Vielfach sind sie nicht quantifizierbar sondern dienen der qualitativen Beschreibung der anzutreffenden Verkehrssituation. In Ermangelung empirischer Daten als Validierungsgrundlage ist die Emergenz real beobachtbarer mikroskopischer Merkmale vielfach ein Bewertungskriterium für die Qualität mikroskopischer Fußgängerverkehrssimulationen.

Die Mechanismen die zur Ausbildung der Vielzahl unterschiedlicher mikroskopischer Flussmuster führen sind noch nicht abschließend erforscht. Insbesondere die Rolle, die dabei aktive Pulkführer einnehmen, ist noch weitgehend unbekannt. Entsprechende Studien der Verhaltensbiologie zeigen, dass eine kleine Zahl von Entscheidern das Verhalten des Gesamtsystems maßgebend beeinflussen [Couzin et al. 2005]. Spektakuläre Experimente der Faculty of Biological Sciences der University of Leeds in Zusammenarbeit mit der Forschungsmagazin „Quarks & Co“ des Westdeutschen Rundfunks im März 2007 mit über 300 Teilnehmern zeigen, dass entsprechende Erkenntnisse aus Verhaltensforschungen bei Tierschwärmen durchaus auch auf den Menschen übertragbar sind.

#### **2.1.3.1 Motorik des Gehens**

Gehen und Laufen ist in mikroskopischer Hinsicht keine geradlinige Bewegung. Vielmehr schwankt der Körper mit jedem Schritt nach links und nach

rechts. Dieser Effekt wird „swaying“ (dt. schwanken/schaukeln) genannt [Knoflacher 1987]. Frequenz und Stärke des Schwankens ist von der Geschwindigkeit  $v$  des Fußgängers abhängig. Damit bestehen auch funktionale Zusammenhänge zwischen erforderlicher „Gehbreite“ oder Mindestentfernung zur vorausgehenden Person und  $v$ .

Keines der in der Fachliteratur dokumentierten mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodelle bildet dieses Schwanken bei der Vorwärtsbewegung unmittelbar ab. Vielmehr wird es teilweise durch einen von der Progressionsgeschwindigkeit abhängigen dynamischen Platzbedarf berücksichtigt. Andere Modelle berücksichtigen den Effekt durch einen Zuschlag bei der Ermittlung des durchschnittlichen Platzbedarfs je Fußgänger.

### **2.1.3.2 Interaktion mit der Umgebung**

In der Literatur werden zwei Formen der Interaktion des Fußgängers mit seiner Umgebung beschrieben [Hoogendoorn et al. 2005]. Der Begriff der einseitigen Interaktion bezeichnet das Verhalten von Fußgängern gegenüber passiven Hindernissen. Hierbei ergaben Untersuchungen kontextabhängige Unterschiede (Situation und Umgebung) bei den eingehaltenen Abständen [Bohle et al. 2004].

In die Bemessung von Fußgängerverkehrsanlagen fließen Vorgaben für umgebungsabhängige seitliche Abstände mit ein [FGSV 2001]. Damit begünstigt bereits die Umgebungsgeometrie die Herausbildung bevorzugter Pfade. Bei Ansammlungen von Menschen achtet jeder Fußgänger selbst auf den ihm zur Verfügung stehenden Platz. So lange eine Dichte von etwa zwei Personen je Quadratmeter nicht überschritten wird, kommt es dabei auch kaum zu Berührungen.

Die zweiseitige Interaktion beschreibt den wesentlich komplexeren Vorgang der Kooperation dynamischer Subjekte mit gemeinsamen Konfliktpunkten. Jeder Fußgänger führt beim Gehen unterbewusst wortlose Verhandlungen mit andern entgegenkommenden oder kreuzenden Personen. Kleinste Signale der Körpersprache zeigen dem jeweils Anderen, wem in Einzelfall Vortritt gewährt wird.

Auch hierbei kommt es nur in äußerst seltenen Fällen zu Kollisionen. Häufiger kommt es hingegen vor, dass sich entgegenkommende Fußgänger innerhalb von Sekundenbruchteilen genau spiegelbildliche Reaktionen signalisieren und sich damit kurzzeitig blockieren. Ohne die instinktive Kooperation von Fußgängern untereinander wäre das Gehen in mehrdirektionalen Verkehrssituationen nicht möglich [Wolff 1973].



### **2.1.3.3 Entstehung von Stauungen**

Wie beim motorisierten Verkehr kann es auch bei der Bewegung von Fußgängern zu Stauungen kommen. Typischerweise treten diese auf, wenn eine Engstelle eine geringere Kapazität aufweist als der vorhergehende Wegabschnitt und die aktuelle spezifische Verkehrsstärke größer ist als die Kapazität der Einengung. Aufgrund des zweidimensionalen Charakters des Fußgängerverkehrs sind die dabei auftretenden Staubilder allerdings heterogener als beim Straßenverkehr, sie werden maßgeblich geprägt durch die vorherrschende Umgebungsgeometrie.

Dem Straßenverkehr vergleichbare Stauwellen treten nur dann auf, wenn die Behinderung am Ende eines schmalen Korridors mit konstantem Querschnitt auftritt. Liegt hingegen vor der Engstelle eine freie Fläche oder eine Fläche mit heterogenen Einbauten, unterbinden die entstehenden Fluktuationen die Ausbildung von Stauwellen. Situations- und umgebungsabhängig können sich somit völlig unterschiedliche Verhältnisse einstellen.

### **2.1.3.4 Oszillieren des Flusses**

An Engstellen mit Gegenverkehr kann es zu einem oszillierenden Wechsel der Flussrichtung kommen. Bei spezifischen Verkehrsstärken unterhalb der Kapazität sind hierfür meist soziokulturelle Verhaltensmuster die Ursache. Die Entscheidung zum Gewähren oder Nehmen des Vortritts wird dabei analog zur zweiseitigen Interaktion getroffen (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Auch das Verlassen und Betreten von Verkehrsmitteln des öffentlichen Nahverkehrs ist im Normalfall von soziokulturellen Verhaltensmustern geprägt, bei denen zusätzliche Verhaltensregeln den persönlichen Wunsch des schnellsten Fortkommens dominieren.

Anders verhält es sich bei spezifischen Verkehrsstärken oberhalb der Kapazität des Engpasses. Unabhängig vom Ausbruch einer Panik ist dann die Bewegung des Einzelnen nicht mehr dem freien Willen unterworfen sondern stark vom Wunsch des Fortkommens der Gruppe abhängig. Es kann daher vorkommen, dass für einige Zeit die Engstelle nur in eine Richtung passiert werden kann.

Gelingt es einem Subjekt des als entgegengesetzten oder auch als feindlich bezeichneten Stroms sich einen Weg durch die Engstelle zu bahnen, kann die Flussrichtung gänzlich umschlagen, da nachfolgende Personen der ersten Person in der gleichen Richtung leichter folgen können. Die Umkehr der Flussrichtung ist spontan und folgt keinen spezifizierbaren Regeln.

### 2.1.3.5 Flussmuster konkurrierender Ströme

Der Fußgängerverkehr kennt im Regelfall keine Richtungstrennung. Für die Bewertung spezifischer Verkehrssituationen erweist sich dies im Vergleich zum motorisierten Verkehr als gravierender Nachteil. Empirische Untersuchungen bei spezifischen Verkehrsstärken von bis zu  $0,66 \text{ P}/(\text{m}\cdot\text{s})$  ergaben zwar keinen belastbaren Zusammenhang des Gegenverkehrs und der Fortbewegungsgeschwindigkeiten [Bohle et al. 2004], bei höheren spezifischen Verkehrsstärken nehmen die wechselseitigen Behinderungen konkurrierender Ströme jedoch stark zu.

Aufgrund der unbegrenzten Anzahl unterschiedlicher Konfliktsituationen ist eine übersichtliche Klassifizierung und Quantifizierung allerdings nicht möglich. Für die Ableitung von Kriterien zur Validierung mikroskopischer Fußgängersimulationen bleibt somit lediglich die Möglichkeit der deskriptiven Befundung mikroskopischer Beobachtungen.

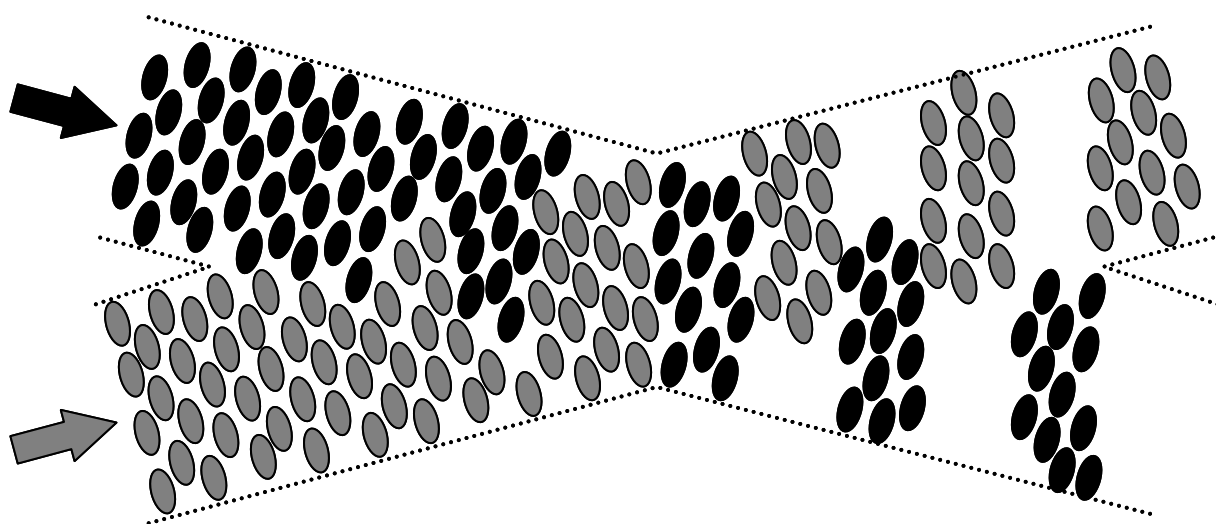


Abb. 2-4: Schematische Darstellung empirischer Beobachtungen bei zwei sich kreuzenden Fußgängerströmen

Ein empirisch gut belegtes Phänomen bei zwei sich kreuzenden Fußgängerströmen ist das oszillierende Pulsen der Ströme mit der Ausbildung von Streifen [Ando et al. 1988]. Abb. 2-4 zeigt die wechselseitige kontinuierliche Durchdringung der beiden Ströme, ohne dass dadurch einzelne Fußgänger zum Anhalten gezwungen werden. Dabei erfolgt die Ausrichtung der entstandenen Streifen orthogonal zur Summe der Richtungsvektoren der beiden beteiligten Ströme [Dzubiella et al. 2002]. Die Streifenbildung minimiert wechselseitige Obstruktionen und maximiert sowohl die individuelle als auch die durchschnittliche Geschwindigkeit der involvierten Fußgänger.

Sind mehr als zwei Ströme an einer Konfliktsituation beteiligt, konnte die Ausbildung stabiler Muster bislang nicht beobachtet werden. Stattdessen stellen sich kurzlebige Muster ein, die sich gegenseitig wieder zerstören und damit insgesamt ein recht chaotisches Erscheinungsbild abgeben. Am häufigsten entstehen dabei kurzlebige "Kreisverkehre", die eine Bewegung effizienter machen. Obwohl beteiligte Fußgänger hierbei einen kleinen Umweg machen müssen ist dies von Vorteil, da wieder Wechselwirkungen minimiert werden und so eine reibungslosere Fortbewegung ermöglicht wird [Helbing et al. 2001]. Auch vorübergehende Blockaden beteiligter Ströme sowie zeitweilige Pulkbildungen können beobachtet werden.

### **2.1.3.6 Bildung temporärer Spuren**

Ein Spezialfall der Begegnung zweier Fußgängerströme ergibt sich bei Bewegung in entgegengesetzten Richtungen. Bereits in unidirektionalen Verkehrssituationen neigen Fußgänger dazu einander auf dem gleichen Pfad zu folgen. Bei Gegenverkehr verstärkt sich dieser Effekt, es können sich selbstorganisierte Spuren herausbilden, die somit eine Richtungstrennung beider Ströme bewirken [AlGadhi et al. 2001]. Diese Spuren variieren dynamisch, lösen sich auf und bilden sich wieder neu. Auch hierdurch lassen sich, wie in allen konflikträchtigen Verkehrssituationen, Wechselwirkungen mit entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern reduzieren. Dabei korreliert die Zahl der Spuren mit der Breite des verfügbaren Bewegungsraums.

### **2.1.3.7 Entstehung von Pfaden**

Von allen Verkehrsteilnehmern weisen Fußgänger die größte Umwegempfindlichkeit auf. Selbst kleine durch die Wegeinfrastruktur vorgegebene Abweichungen von einer möglichen Ideallinie werden von zahlreichen Fußgängern ignoriert, sofern ihnen eine vom vorgegebenen Weg abweichende Alternative attraktiver erscheint. Wird eine Abkürzung beispielsweise durch die Zerstörung der Vegetation sichtbar, steigert sich die Attraktivität für eine Benutzung weiter [Helbing et al. 1997a].

Auf diese Weise können in Parks mit hoher Fußgängerfrequenz und einem ergonomisch ungünstig konzipierten Wegenetz ganze Systeme von Trampelpfaden entstehen. Oftmals verfügen diese aktiv gebildeten Wegenetze über eine eigene Dynamik: Wenig genutzte oder stark ausgetretene Pfade werden von der Vegetation zurückerobert, andere Pfade nähern sich weiter der spezifischen Ideallinie oder derjenigen der am stärksten frequentierten Quell-Ziel-Relation an.

Die hierbei zum Tragen kommenden Mechanismen ähneln jenen bei der Bildung temporärer Spuren. Da jene jedoch physisch nicht persistent sind fluktuieren sie sehr stark und führen nicht zur Ausbildung eines stabilen Zustandsbildes. Zudem sind temporäre Pfade grundsätzlich nur für unidirektionale Verkehre relevant, während aktiv gebildete Pfade mit einem physischen Abbild im Regelfall in beide Richtungen gleichermaßen genutzt werden.

### **2.2 Klassifizierung und Bewertung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle**

Das Forschungsgebiet der mikroskopischen Fußgängerverkehrssimulation ist vergleichsweise jung, da es sich aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes erst analog zur heute verfügbaren Computertechnologie entwickeln konnte. Grundsätzlich können bei der Simulation des Fußgängerverkehrs drei verschiedene Granularitätsstufen unterschieden werden: Makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Modelle [Helbing 2001].

Makroskopische oder fluid-dynamische Modelle basieren auf den Ähnlichkeiten zwischen Fußgängerströmen und Flüssigkeiten oder Gasen. Die Grundlage eines solchen Modells ist die Kontinuitätsgleichung resultierend aus dem Zusammenhang von Dichte und Fluss [Hoogendoorn et al. 2000a]. Mesoskopische oder gas-kinetische Modelle berücksichtigen zwar bereits einzelne Fußgänger, sie verhalten sich jedoch in Analogie zu Molekülen in Gasen, allerdings bezogen auf eine zweidimensionale Ebene. Die individuelle Dynamik resultiert somit einzig aus exogenen Faktoren. Dagegen wird bei mikroskopischen Modellen das Verhalten eines jeden einzelnen Fußgängers betrachtet, welches sowohl exogenen als auch endogenen, willensgesteuerten Einflüssen unterliegt.

Realitätsnahe gas-kinetische oder fluid-dynamische Theorien benötigen somit Korrekturfaktoren für das kognitive Verhalten des Menschen beispielsweise beim Begegnungs- und Ausweichverhalten. Dies stellt jedoch das Grundprinzip derartiger Modellansätze in Frage, da hierdurch der Energieerhaltungssatz außer Kraft gesetzt wird.

Auf dieser Basis können zwar durchaus in sich stimmige Theorien zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens formuliert werden [Helbing 1992], [Hoogendoorn et al. 2000b], für praktische Anwendungen ist jedoch die direkte Simulation der individuellen Fußgängerbewegung vorzuziehen, da sich diese als wesentlich flexibler erweist. Gegenwärtige Forschungsaktivitäten zur Simulation des Fußgängerverkehrs fokussieren sich daher hauptsächlich auf mikroskopische Modellansätze.

Vielfach werden in der Informatik simulierte Subjekte auch als Agenten bezeichnet. Insbesondere bei der objektorientierten Programmierung werden Agenten durch gekapselte Codeabschnitte repräsentiert, die den Verhaltensrahmen einer simulierten Entität vorgeben. Da diese Methode eine sehr effiziente Implementierung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle gestattet, werden sie oftmals als agentenbasierte Simulation implementiert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff „Agent“ daher oftmals synonym für „simulierten Fußgänger“ verwendet.

Es gibt keine zwingenden Grundprinzipien für die mikroskopische Modellierung der Fußgängerbewegung. Dementsprechend vielgestaltig sind die bis dato publizierten Modellansätze. Gleiches gilt auch für die Kriterien, mit deren Hilfe die unterschiedlichsten Modelle kategorisiert werden sollen. In der vorliegenden Arbeit werden ausgehend vom Ziel der Generierung realitätsnaher Fußgängertrajektorien drei zentrale Modellkriterien unterschieden: Zustand, Dynamik und Charakter.

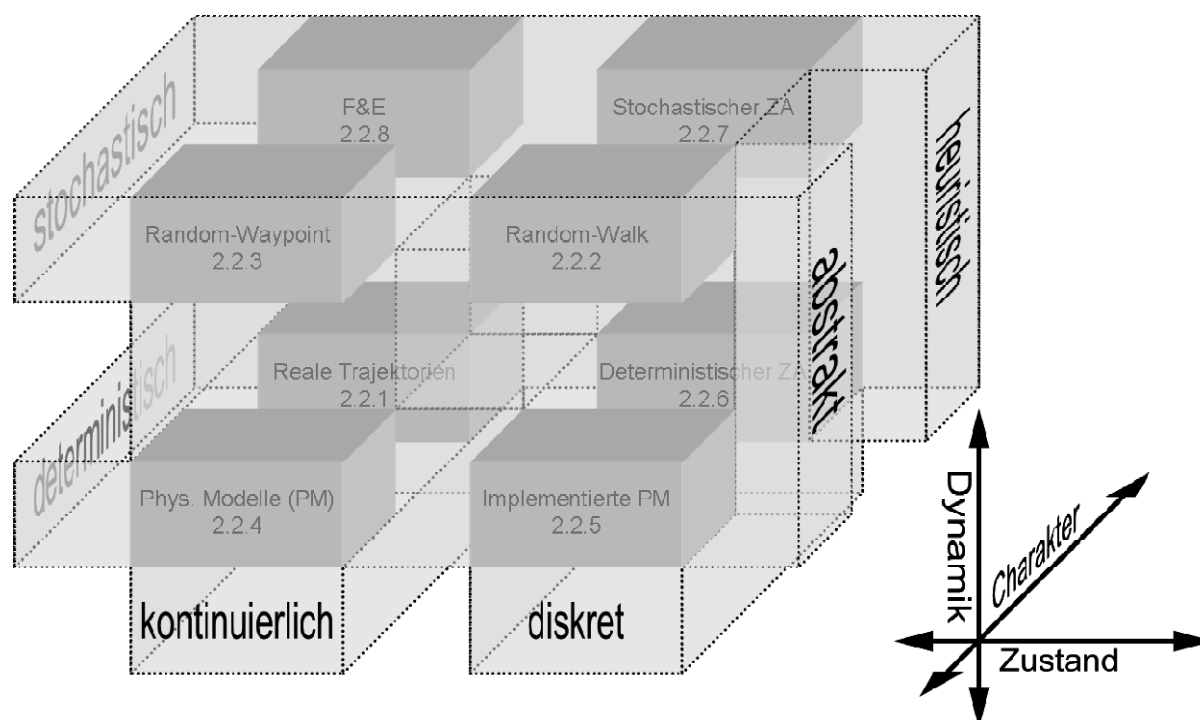


Abb. 2-5: Klassifizierung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle anhand von Zustand (kontinuierlich / diskret), Dynamik (deterministisch / stochastisch) und Charakter (abstrakt/heuristisch). Aufgeführt sind typische Beispiele bzw. Oberbegriffe für die Modellklassen.

In Weiterentwicklung von Vorarbeiten im Rahmen von Nexus [Arbter et al. 2006] werden diese Kriterien wie folgt definiert:

**Zustand:** Raum, Zeit und individuelle Merkmale können bei der Modellierung des Fußgängerverkehrs diskret oder kontinuierlich betrachtet werden, wobei auch heterogene Betrachtungsweisen möglich sind. Die vorgenommene Einteilung folgt daher der jeweils dominanten Merkmalsausprägung. Sofern diese bei der Implementierung vom jeweiligen Ausgangsmodell abweicht, wird im Rahmen dieser Arbeit eine entsprechende Unterscheidung vorgenommen.

**Dynamik:** Die Modellierung von Verhalten und Bewegung von Fußgängern kann deterministischen oder stochastischen Regeln folgen. Die Verwendung deterministischer Algorithmen setzt eine große Detailkenntnis der das individuelle Verhalten beeinflussenden Parameter voraus, welche heute in der Regel jedoch nicht verfügbar ist. Die unüberschaubare Anzahl relevanter Faktoren macht ein deterministisches Modell mit hohem Realitätsanspruch zudem sehr komplex, was sich negativ auf dessen Skalierbarkeit auswirkt.

Eine Selbstorganisation der Agenten kann zudem nur über die Einführung stochastischer Entscheidungsregeln erzielt werden. Ist die Unsicherheit hinsichtlich der mikroskopischen Ausprägung eines Merkmals zu groß, kann es mittels einer statistischen Verteilung aus dem zugehörigen aggregierten, makroskopischen Merkmal abgeleitet werden. Je schlechter sich also die Ausgangslage empirisch erhobener Daten darstellt, desto mehr stochastisch beeinflusste Parameter fließen in ein Fußgängerverkehrsmodell mit ein.

**Charakter:** Der Charakter eines mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodells variiert zwischen abstrakt und heuristisch. Ein abstraktes Modell leitet die Bewegungsparameter aus der Analogie zu physikalisch beschriebenen dynamischen Phänomenen wie beispielsweise dem Fluss granularer Medien ab. Dabei werden komplexe Systeme vielfach mit sehr wenigen Parametern beschrieben, die oftmals nicht auf die tatsächlich beobachtbaren Faktoren wie Beschleunigung, Verzögerung oder Distanzverhalten abgebildet werden können.

Da nach aktuellem Stand der Forschung kein konsistenter und mit Sicherheit zum Erfolg führender Algorithmus zur Modellierung des Fußgängerverkehrs bekannt ist, wird vielfach ein heuristischer Ansatz verfolgt. Den Ausgangspunkt der Modellformulierung bildet hierbei die Deskription der real beobachtbaren Entscheidungskriterien der Fortbewegung. Zur Kalibrierung und Validierung dieser Ansätze sind umfassende empirisch erhobene Datenreihen von großem Nutzen. Vielfach ist die Erhebung geeigneter mikroskopischer Daten ohne Einflussnahme auf den Verkehrsablauf allerdings recht schwierig.

Der durch die Merkmalsausprägungen der drei vorstehend beschriebenen Dimensionen aufgespannte Raum führt zu acht unterschiedlichen Modellklassen für mikroskopische Fußgängerverkehrsmodelle (Abb. 2-5). Ausgehend hiervon werden nachfolgend die bislang publizierten Modellansätze strukturiert, beschrieben und kritisch bewertet. Da die mikroskopische Modellierung alltäglicher Abläufe des Fußgängerverkehrs abseits von Evakuierungsszenarien bislang noch kaum Gegenstand der Forschung war und die Qualität bisheriger Fußgängerverkehrssimulationen nur schwer validiert werden kann, ist dieser Schritt für die Entwicklung eines geeigneten Modellansatzes im Rahmen der vorliegenden Arbeit von maßgebender Relevanz.

### **2.2.1 Deterministisch, kontinuierlich, heuristisch**

#### **2.2.1.1 Reale Trajektorien**

Kein mit vertretbarem Aufwand aufgestelltes Modell ist in der Lage, reale Trajektorien zu reproduzieren geschweige denn zu prognostizieren. Die unendliche Zahl individueller Verhaltensmuster, Entscheidungsmöglichkeiten und Interaktionen konterkariert ein solches Vorhaben. Denn selbst wenn eine hinreichend große Anzahl relevanter Parameter zum Ansatz gebracht werden könnte ist ein Scheitern spätestens bei der Implementierung des Modells vorgezeichnet, da die erforderliche empirische Datenbasis für eine Validierung des Modells nicht erhoben werden kann (vgl. Abschnitt 6).

Dennoch sind reale Trajektorien, also die Spuren oder Pfade der von Fußgängern zurückgelegten Wege das Qualitätsmaß für alle mikroskopischen Fußgängerverkehrsmodelle. Denn auch wenn individuelle Trajektorien in letzter Konsequenz nicht vorhergesagt werden können, misst sich die Qualität eines Modells an der Kongruenz aus Simulation und Realität der makroskopischen Verkehrsmerkmale. Mikroskopische Verkehrsmodelle werden daher bisweilen auch als Monte-Carlo-Simulationen bezeichnet, da erst eine hinreichend große Anzahl simulierter Stichproben Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zulässt.

#### **2.2.1.2 Deterministische Modelle**

Die Aufzeichnung und numerische Datenhaltung zur beliebigen Reproduzierung realer Trajektorien wird als deterministisches Modell bezeichnet [Breyer 2003]. Auch wenn sich mit diesem Ansatz kein großer Anspruch verbindet, ist er doch in der Nachrichtentechnik von großer Bedeutung (Abb. 2-6).

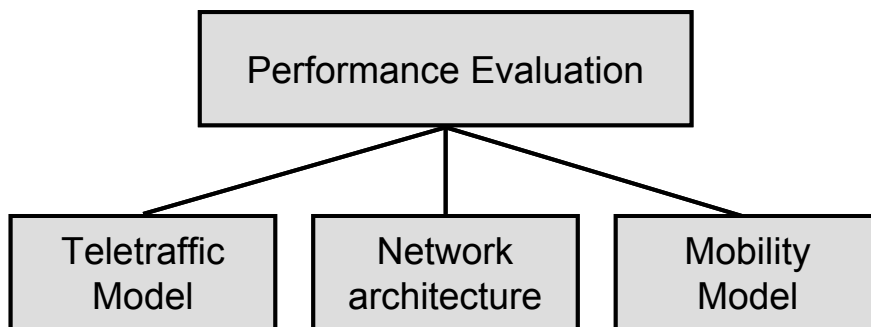


Abb. 2-6: *Evaluation der Leistungsfähigkeit von Datennetzen [Arbter et al. 2006]*

Neben einem Modell des Datenverkehrs und der Netzwerkarchitektur ist hier die Modellierung der Bewegung realer Nutzer eines Drahtlosnetzes (z.B. GSM, UMTS, W-LAN, mobiles Ad-Hoc-Netzwerk) ein wichtiger Baustein zur Evaluation der Leistungsfähigkeit. Schon eine kleine Veränderung des zu Grunde liegenden Bewegungsmodells kann einen signifikanten Einfluss auf die ermittelte Leistungsfähigkeit haben.

Da die Einrichtung eines Drahtlosnetzes zumeist in bereits bestehenden Umgebungsgeometrien erfolgt und damit eine Prognose des zu erwartenden Fußgängeraufkommens in der Regel überflüssig ist, können mit zu Grunde gelegten realen Trajektorien grundsätzlich die verlässlichsten Ergebnisse erzielt werden. Bislang scheitert dieser Ansatz jedoch zumeist am nicht darstellbaren Aufwand zur Aufzeichnung der Trajektorien, insbesondere bei hohen Dichten und Fußgängerzahlen, weshalb oftmals ein Rückgriff auf bisweilen recht primitive Bewegungsmodelle erfolgt.

## **2.2.2 Stochastisch, diskret, abstrakt**

### **2.2.2.1 Random-Walk Modell**

Das Random-Walk Modell ist vergleichbar mit der Brownschen Bewegung, da die Bewegung weitgehend zufällig modelliert wird, so wie sie in der Natur auf molekularer Ebene vorkommt [Breyer 2003]. Bei diesem bereits im Jahr 1926 von Albert Einstein formulierten Modell wird die zweidimensionale Ebene in ein Quadratraster eingeteilt, auf dem die Agenten sich von Zelle zu Zelle hüpfend fortbewegen. Dabei ist bei jedem Schritt die Übertrittswahrscheinlichkeit zu allen benachbarten und nicht belegten Zellen gleich groß.

Bei Zugrundelegung eines Open-Field-Szenarios, bei dem es keinerlei Restriktionen in Form nicht begehbare Zellen oder geometrischer Randbedingungen gibt, stellt sich nach hinreichender Dauer eines Simulationslaufs



hinsichtlich der Belegungshäufigkeit einzelner Zellen eine Gleichverteilung ein. Das Random-Walk Modell ist somit eines der einfachsten Modelle zur Generierung eines dynamischen Zustands, bezogen auf den Fußgängerverkehr allerdings nur mit einem äußerst geringen Realitätsanspruch.

### **2.2.2.2 Warteschlangenmodell**

Die Warteschlangentheorie kommt in zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Themenbereichen zum Einsatz. Systeme werden hier allgemein als eine Abfolge von Bedienstationen dargestellt, die in einer festgelegten Reihenfolge bestimmte Aufträge zu erledigen haben. Bezogen auf die Modellierung des Fußgängerverkehrs ist unter einer Bedienungsstation ein Raum oder ein Wegabschnitt zu verstehen, während die Fußgänger die zu verarbeitenden Aufträge repräsentieren.

In Zusammenhang mit der mikroskopischen Modellierung der Evakuierung von Fußgängern aus Gebäuden kam die Warteschlangentheorie bislang häufiger zur Anwendung [Løvas 1994], [Thompson et al. 1995], [Daamen 2004]. Jeder Raum eines Gebäudes wird dabei als Knoten bzw. Bedienungsstation modelliert, während die Türen zwischen den Gebäuden als Verbinder fungieren. Jeder Agent startet in einem Knoten, wartet in einem Verbinder und wird anschließend von der nächsten Bedienungsstation verarbeitet. Innerhalb einer Bedienungsstation erfolgt die Entscheidung über Aufenthaltsdauer und weiterem Weg in Abhängigkeit von Raumgröße, verfügbaren Ausgängen, aktueller Dichte und immanentem Ziel.

Zwar zeigt das Warteschlangenmodell eine hohe Simulationsgeschwindigkeit und gute Skalierbarkeit, hinsichtlich der Generierung von Trajektorien weist es jedoch zahlreiche Nachteile auf. So erweisen sich die als Bedienungsstationen repräsentierten Räume als „Black Boxes“, in denen das reale Begegnungs- und Ausweichverhalten nicht modelliert wird. Zudem ist der modellinhärente FIFO-Mechanismus insbesondere bei höheren Fußgängerdichten als wenig realistisch einzustufen.

### **2.2.3 Stochastisch, kontinuierlich, abstrakt**

#### **2.2.3.1 Random-Direction Modell**

Beim Random-Direction Modell startet ein Agent zu Beginn eines Simulationslaufs an einem zufällig ausgewählten Punkt der kontinuierlichen Simulationsfläche. Anschließend wird aus dem Intervall  $[0, 2\pi]$  eine Richtung  $\alpha$  zufällig ausgewählt, in die der Agent die ebenfalls zufällig ausgewählte Strecke aus dem Intervall  $[0, S_{\max}]$  zurücklegt. Dort angekommen verweilt der Agent

eine zufällig aus dem Intervall  $[0, t_{\max}]$  ausgewählte Wartezeit, bevor erneut eine neue Richtung ausgewählt wird. Bei einem Open-Field-Szenario verlassen die Agenten die Simulationsfläche an den Rändern und betreten sie wieder an der gegenüberliegenden Seite (Abb. 2-1, links). Damit können modell-exogene Restriktionen aus den Randbedingungen vermieden werden.

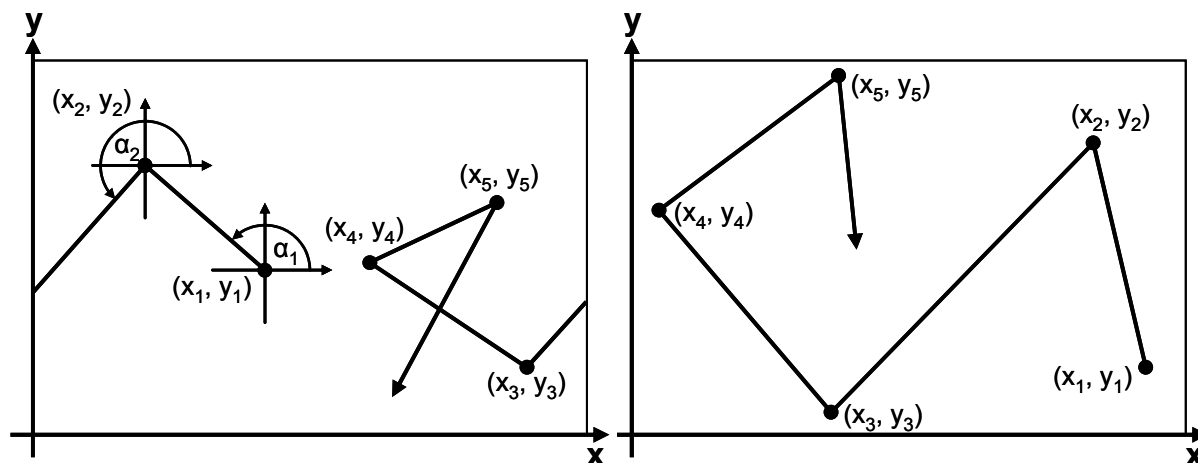


Abb. 2-7: Bewegungsmuster eines Agenten bei Random-Direction- (links) und Random-Waypoint Modell

### 2.2.3.2 Random-Waypoint Modell

Auch beim Random-Waypoint Modell startet ein Agent zu Beginn der Simulation an einer nach einer Gleichverteilung zufällig ausgewählten Position auf einer kontinuierlichen Ebene. Sodann wird ebenfalls anhand einer Gleichverteilung ein auf der Ebene liegender Wegpunkt zufällig ausgewählt und als Ziel des Agenten festgelegt. Dieses wird mit einer aus dem Intervall  $[v_{\min}, v_{\max}]$  zufällig ausgewählten konstanten Geschwindigkeit angegangen. Am Ziel angekommen verweilt der Agent ebenfalls eine zufällig aus dem Intervall  $[0, t_{\max}]$  ausgewählte Wartezeit. Anschließend wird wiederum ein neuer Wegpunkt als Ziel ausgewählt und der Prozess aus Bewegungs- und Ruhephase beginnt von Neuem.

Beschränkt sich der Anspruch an das Modell auf die möglichst einfache Erzeugung eines dynamischen Zustandes, so sind im Random-Waypoint Modell ebenso wie im recht ähnlichen Random-Direction Modell durchaus hierfür geeignete Ansätze zu sehen. Allerdings findet das Begegnungs- und Ausweichverhalten der Agenten bei diesen keine Berücksichtigung. Die Zahl der gleichzeitig auf der gleichen Fläche simulierten Agenten hat somit keinerlei Einfluss auf das Simulationsergebnis.

Zudem stellt sich bei einem Open-Field-Szenario bezüglich der kumulierten Dichte keine Gleichverteilung ein, da die Grenzen der Ebene im Gegensatz

zum Random-Direction Modell selten erreicht und nie überschritten werden. Modelle dieser Klasse sind für die realitätsnahe Simulation des Bewegungsverhaltens von Fußgängern ungeeignet.

#### **2.2.4 Deterministisch, kontinuierlich, abstrakt**

Ausgehend von den newtonschen Axiomen des Trägheits-, Aktions- und Reaktionsprinzips wurden in Analogie zu physikalisch beschriebenen Vorgängen unter Abstraktion der Fußgänger als Teilchen in einem Medium zahlreiche Modelle formuliert. Sie alle eint die Unzulänglichkeit, dass Fußgänger keineswegs nur von exogenen Kräften angetrieben werden sondern ganz im Gegenteil als willensgesteuerte Individuen zu betrachten sind.

Internalisiert ein physikalisches Modell individuelle Verhaltensweisen wie z.B. das Social-Force Modell, so ist dies in der Regel mit der Aufgabe des dem ursprünglichen Modelansatz zu Grunde liegenden Energieerhaltungssatzes verbunden. Bei gruppensdynamischem Verhalten, wie es beispielsweise bei Evakuierungsszenarien zu erwarten ist, liefern physikalische Modelle vielfach recht gute Ergebnisse.

Nachfolgend werden die wichtigsten physikalischen Modellansätze dokumentiert und kritisch diskutiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden sie insbesondere auf Ihre Eignung für die Simulation von Alltagssituationen hin untersucht, bei denen individuelle Verhaltensmuster vielfach als dominant anzusehen sind.

##### **2.2.4.1 Optimal-Velocity Modell**

Der ursprünglich eindimensionale Modellansatz findet im Wesentlichen Anwendung bei der Simulation des motorisierten Verkehrs. Maßgebende Eingangsgröße zur Ermittlung der optimalen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs ist dabei der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Anwendung auf den Fußgängerverkehr setzt eine zweidimensionale Modellerweiterung voraus [Sugiyama et al. 2002], [Sugiyama et al. 2003], [Nakayama et al. 2005]. Die dort vorgestellte Adaption der Bewegungsgleichung enthält jedoch keine modellendogene Orientierungskomponente, weshalb die Agenten sich während des Simulationslaufs nur an den vorgeprägten linearen Hauptbewegungsrichtungen orientieren.

Der Modellansatz ist nicht auf eine freie Richtungswahl in der Ebene erweiterbar, da dies zu undefinierten Kreuzungs- und Begegnungsfällen führen würde. Was für eine Studie des Begegnungs- und Ausweichverhaltens von Fußgängern ausreichend sein mag, ist für eine umfassende Simulation des Fußgängerverkehrs somit eher ungeeignet.

### **2.2.4.2 Gravitationsmodell**

Ähnlich den Random-Walk, -Direction oder -Waypoint Modellen ist dieses Modell ebenfalls für die einfache Simulation der Nutzerbewegung in Drahtlosnetzen entwickelt worden [Breyer 2003]. Den Agenten werden positive, negative oder neutrale Ladungen zugewiesen. Aufgrund der Abstoßung entfernen sich gleich geladene Teilnehmer von einander, während sich Teilnehmer unterschiedlicher Ladung aufeinander zu bewegen. Neutral geladene Teilnehmer werden nicht von der Anziehungskraft beeinflusst. Soll den Teilnehmern beispielsweise eine bewusste Bewegung hin zu einem Ort besseren Empfangs unterstellt werden, wird Sendern (z. B. UMTS-Basisstationen) eine positive Ladung und Empfängern eine negative Ladung zugewiesen.

Was für die Simulation des Handovers zwischen und der Lastberechnung in einzelnen Funkzellen ausrechend sein mag, ist für eine realitätsnahe Simulation des Fußgängerverhaltens jedoch ungeeignet, stellt der Wunsch nach einer besseren Empfangsstärke in der Realität doch wohl eher nicht die dominante Orientierungskomponente dar. Eine stärker am realen Bewegungsverhalten von Fußgängern orientierte Ausprägung eines Modells unter Verwendung repulsiver und adhäsiver Kräfte ist das nachfolgend dargestellte Magnetkräftemodell (vgl. Abschnitt 2.2.4.3).

### **2.2.4.3 Magnetkräftemodell**

In diesem ursprünglich von Shigeyuki Okazaki an der Fukui-Universität in Japan entwickelten Modellansatz erhalten alle Agenten, Hindernisse und Begrenzungen eine positive und alle Ziele eine negative Ladung [Okazaki et al. 1993]. Die Agenten bewegen sich mit zunehmender Geschwindigkeit auf das Ziel mit der höchsten Anziehungskraft zu, wobei sie gemäß der physikalischen Gesetze des Magnetismus von gleichnamigen Ladungen abgestoßen werden und so Kollisionen und weite Umwege vermeiden. Die Festlegung einer Maximalgeschwindigkeit verhindert, dass die Fußgänger den magnetischen Gesetzen folgend unendlich lange beschleunigen. Eine weitere abstoßende, über die jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren bestimmte Kraft vermeidet durch Richtungsänderungen Kollisionen mit anderen Fußgängern.

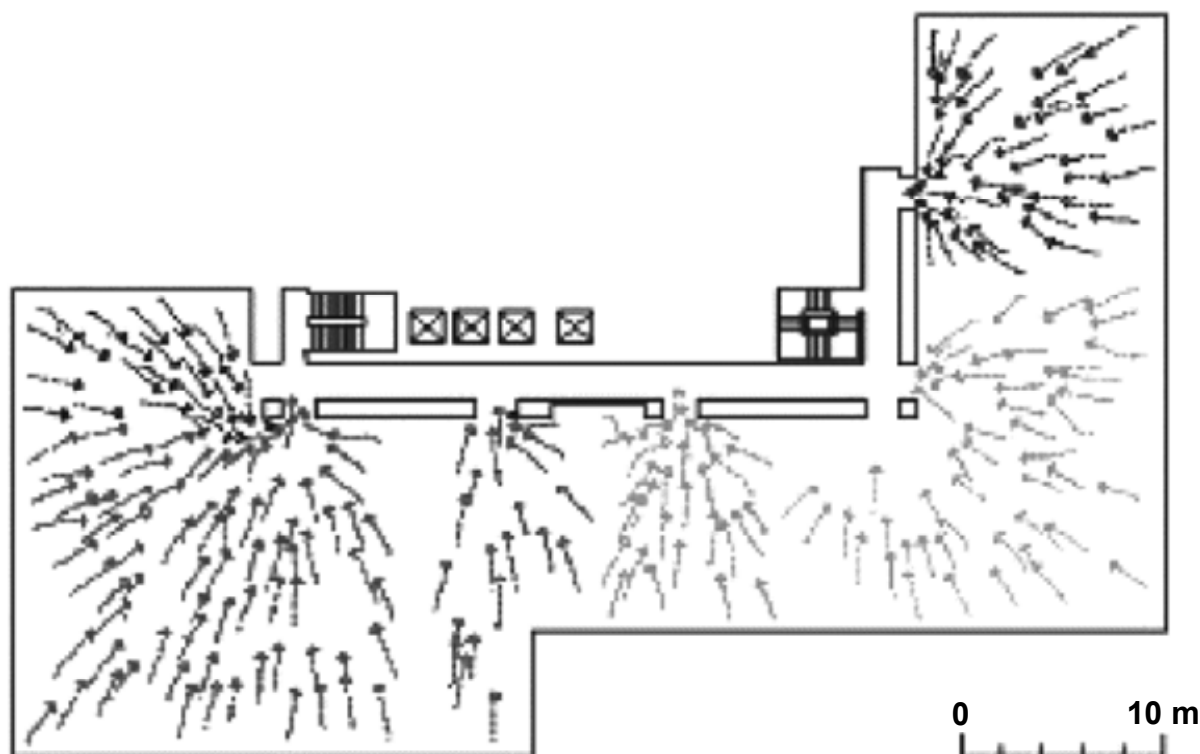


Abb. 2-8: Visualisierung eines Simulationslaufs basierend auf dem Magnetkräftemodell [Okazaki et al. 1993]

Abb. 2-8 zeigt eine Momentaufnahme eines Simulationslaufs von Okazaki. Agenten, deren Position, Richtung und Geschwindigkeit durch Pfeile angedeutet sind, streben den Ausgängen eines Gebäudes zu. Während an einigen Ausgängen Stauungen entstehen, werden andere teilweise kaum genutzt, obwohl die Ausgänge in direkter Nachbarschaft und Sichtweite zueinander liegen.

Dieses augenscheinlich wenig realistische Phänomen kommt dadurch zustande, dass zur Einführung multipler Ziele mehrere bipolare Ebenen einander überlagert werden. Agenten erfahren Adhäsion somit jeweils nur von dem zu Beginn des Simulationslaufs vorgegebenen Ziel, eine Umorientierung zur Laufzeit in Abhängigkeit dynamischer Entwicklungen ist nicht möglich.

Einerseits ist das Magnetkräftemodell unmittelbar verständlich und leicht zu kalibrieren, da nur wenige Parameter Berücksichtigung finden. Andererseits skaliert das Modell nur schlecht, da alle Agenten zu jeder Zeit untereinander interagieren und somit mit steigender Fußgängerzahl überproportional stark zunehmende kontinuierliche Berechnungen notwendig werden.

Zudem ist die Reproduktion von gegenläufigen Strömen und Oszillationen aufgrund der Beschränkung auf zwei Pole kaum möglich. Letztlich bietet ein auf Gesetzen des Magnetismus basierendes Modell keine hinreichende Er-

klärungen zum Verständnis der in Fußgängergruppen auftretenden Phänomene.

#### 2.2.4.4 Social-Force Modell

Eine Weiterentwicklung der vorstehend diskutierten Kräfte Modelle ist das sogenannte Sozialkräftemodell [Helbing et al. 1995], [Helbing et al. 2000a]. Es stellt ebenfalls eine Adaption der Newtonschen Axiome auf ein System bewegter Teilchen dar, allerdings unter Einführung einer den Teilchen inhärenten Kraftkomponente, welche die spezielle Charakteristik der individuellen Verkehrsteilnehmer besser berücksichtigt.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) \cdot e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad [2-2]$$

Die auf ein Teilchen bzw. einen Agenten  $i$  einwirkende resultierende Kraft entspricht dem Produkt aus seiner Masse  $m_i$  und der aktuellen Beschleunigung  $dv_i/dt$  (Gleichung [2-2], linke Seite). Diese Kraft setzt sich aus drei Komponenten zusammen (rechte Seite, von rechts nach links): Der Summe aller abstoßender Kräfte zwischen  $i$  und allen Hindernissen und Wänden  $f_{iw}$ , der Summe aller abstoßender Kräfte zwischen  $i$  und allen anderen Agenten  $j$  sowie der Kraft resultierend aus dem Produkt der Masse mit der Differenz aus Wunschgeschwindigkeit  $v^0(t)$  und aktueller Geschwindigkeit  $v(t)$  des Agenten  $i$  im Zeitintervall  $\tau$ .

Letztere Komponente ist von endogener Natur, jedes einzelne Teilchen besitzt sozusagen ein Kraftreservoir. In der Literatur wird dieser Modellansatz daher bisweilen auch als *Self-Driven Many Particle System* bezeichnet [Helbing 2001]. Da es sich hierbei um eine Modellierung für die Bewegung in der Fläche handelt, muss die Gleichung auf zwei zueinander orthogonale Achsen angewendet werden. Der Koeffizient  $e^0(t)$  dient dabei der Aufteilung der Wunschgeschwindigkeit auf die Betrachtungsachsen in Richtung auf das Ziel.

Abb. 2-9 zeigt die Momentaufnahme eines Simulationsszenarios, in dem die als Kreise dargestellten Agenten dem gemeinsamen Ausgang auf der rechten Seite des Raumes zustreben. Als maßgebende Variable zur Entwicklung von Panikzuständen wird die Wunschgeschwindigkeit angenommen: Je größer die Panik, desto höher die kollektive Wunschgeschwindigkeit. Nach Gleichung [2-2] wirkt dabei die Differenz aus Wunschgeschwindigkeit und realisierter Geschwindigkeit über die Masse und die Zeit als Kraftkomponente auf den Agenten in Richtung auf das Ziel. Mit anderen Worten: Je stärker

der Agent daran gehindert wird sein Ziel zu erreichen, desto stärker ist die Kraft die zur Zielerreichung aufgebracht wird.

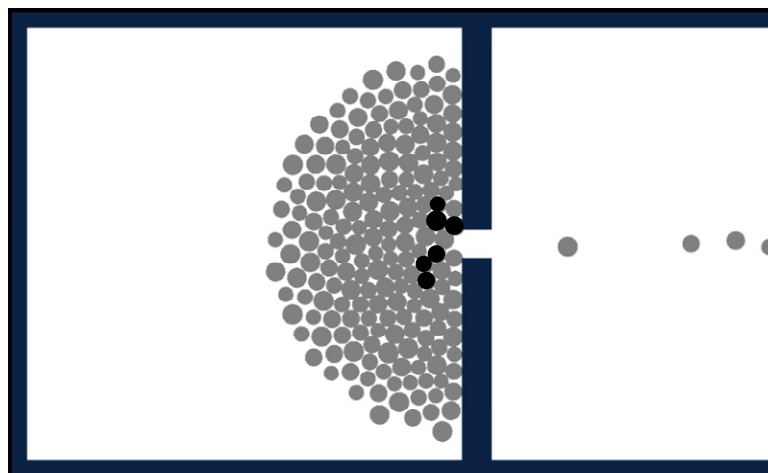


Abb. 2-9: Momentaufnahme einer Simulation basierend auf dem Sozialkräftemodell [Helbing et al. 2000a]

In einer dicht gedrängten Menge wirken auf den einzelnen Agenten somit ganz erhebliche resultierende Kräfte ein. Können diese Kräfte aufgrund einer Blockade nicht durch beschleunigte Ausweichbewegungen kompensiert werden bauen sich große Drücke auf. In Anlehnung an Fluide oder granulare Medien, die bei Erhöhung des Drucks einen kristallinen bzw. starren Zustand einnehmen können, nennt Helbing das Phänomen der Selbstblockade *Freezing by Heating* [Helbing et al. 2000b].

Werden bestimmte Drücke überschritten, so führt dies in der Realität zwangsläufig zu Verletzungen oder gar zum Tode. In der Simulation in Abb. 2-9 werden Agenten, die der Überschreitung eines Grenzdrucks ausgesetzt sind schwarz eingefärbt, bleiben stehen und stellen sodann für die verbleibenden aktiven Agenten ein zusätzliches Hindernis dar.

Wenngleich insbesondere der Umgang mit „verletzten“ Agenten stark zu hinterfragen ist, liefert das Social-Force Modell dem Augenschein nach bei der Simulation von Panik- und Evakuierungssituationen recht brauchbare Ergebnisse. Insbesondere bei Paniksituationen ist eine Validierung über den Augenschein hinaus jedoch ausgesprochen schwierig. Eine experimentelle Datenerhebung ist weder sinnvoll realisier- noch vertretbar. Herangezogen werden können in der Regel lediglich reale Katastrophenereignisse, von denen es jedoch nur wenig für eine mikroskopische Datenerhebung verwertbares Videomaterial gibt.

Ein großer Teil des Betrages und der Richtung der auf einen Agenten einwirkenden resultierenden Kraft ergibt sich aus der physischen Interaktion mit

anderen Agenten sowie mit der Umgebungsgeometrie. Trifft beim Social-Force Modell ein Agent in der unbehinderten Bewegung auf einen anderen Agenten oder ein stehendes Hindernis so weicht er tatsächlich erst dann aus, wenn es bereits zur Kollision gekommen ist.

Diese eher Molekülen eines Gases immanente Eigenschaft hat freilich wenig gemein mit dem realen menschlichen Bewegungsverhalten, Körperkontakt und Kollisionen mit anderen Fußgängern wo weit als möglich zu vermeiden. Für die Simulation des alltäglichen Fußgängerverkehrs erweist sich somit auch das Social-Force Modell in seiner ursprünglichen Ausprägung als weniger geeignet.

### **2.2.4.5 Active-Walker Modell**

Das Active-Walker Modell hat zum Ziel, die in der Realität beobachtbaren, zur Ausbildung von Pfaden führenden Phänomene der Selbstorganisation des Fußgängerverkehrs im Modell abzubilden. Zu Beginn eines Simulationslaufs ist das Modell vergleichbar mit einer unberührten Grasfläche. Fußgänger zertrampeln das Gras, nachfolgende Fußgänger bevorzugen die bereits gebildeten Pfade.

Wenig benutzte Pfade wachsen wieder zu. Die große Herausforderung besteht darin, diesen Ansatz auf bebaute Gebiete zu übertragen und die verschiedenen zur Pfadbildung und -auflösung beitragenden Faktoren richtig zu kalibrieren [Batty 1997]. Komplexe geometrische Randbedingungen können bei diesem Modell letztlich jedoch nur schwer berücksichtigt werden.

Vereinfachend kann das Active-Walker Modell als eine Erweiterung des Social-Force Modell (Abschnitt 2.2.4.4) um eine Komponente namens *Ground Potential* angesehen werden. Dieses *Ground Potential* wird bei Übergang eines Agenten verstärkt und durch zeitliche Effekte wieder abgeschwächt [Helbing et al. 1997b].

Zunächst unterscheidet sich die Komponente zur Ausbildung realer Pfade bspw. in einer Wiese bzw. zur Bildung temporärer Spuren einander folgender Fußgänger (Abschnitt 2.1.3.7 bzw. 2.1.3.6) nur durch unterschiedliche Werte für Diffusion und Zerfall des dynamischen Potentials. Bei genauerer Betrachtung spielt bei der Ausprägung temporärer Pfade jedoch auch die Gehrichtung eine entscheidende Rolle: Entgegengesetzt gerichtete Quell-Ziel-Beziehungen sind füreinander nicht attraktiv, vielmehr halten sie sogar Abstand voneinander. Das innovative Konzept zur Berücksichtigung dieses Effekts im Rahmen dieser Arbeit wird in Abschnitt 4.4.2.5 erläutert.



### 2.2.4.6 Minimal-Route-Cost Modell

Eine große Herausforderung bei der Modellierung des Fußgängerverkehrs stellt die Implementierung eines vorausschauenden Gehverhaltens dar. Während beim Social-Force Modell die Agenten zur Erreichung ihres Ziels auf dem kürzesten Weg regelrecht mit dem Kopf durch die Wand wollen, wird ihnen beim Minimal-Route-Cost Modell ein großes Maß an Vorausschauung zugebilligt. Dazu wird in einer zweidimensionalen Kostenfunktion der für die Erreichung des Ziels erforderliche Aufwand ermittelt [Hoogendoorn et al. 2004]. Folgende Faktoren finden Eingang in die Minimal-Route-Cost-Function (MRCF):

- Gehzeit zwischen Ausgangspunkt und Ziel
- Nähe zu aus der Umgebungsgeometrie resultierenden Hindernissen
- Anzahl der scharfen Richtungsänderungen (Direktheit des Weges)
- Zu erwartende Anzahl an Interaktionen mit anderen Agenten (QSV, vgl. Abschnitt 2.1.2.5)
- Attraktivität des Weges („Convenience“, vgl. Abschnitt 2.1.1.3)

Da insbesondere die Zahl der Interaktionen sich dynamisch ändert, muss die MRCF zu jedem Zeitschritt für die gesamte Simulationsfläche neu berechnet werden.

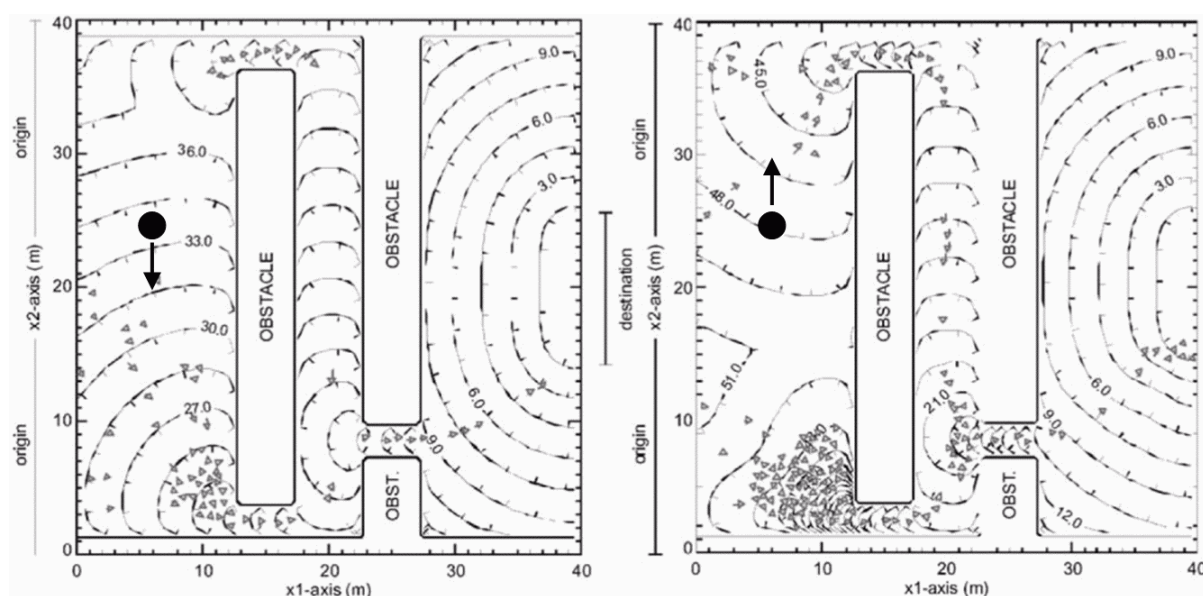


Abb. 2-10: Beispiel des Einflusses verminderter Durchschnittsgeschwindigkeiten auf die MRCF [Hoogendoorn et al. 2004]

Den Einfluss unterschiedlicher lokaler QSV zeigt Abb. 2-10. In der linken Abbildung streben viele als kleine Dreiecke dargestellte Agenten der Engstel-

le im Koordinatenbereich (15,2) zu. Dies führt letztlich zu einer hohen Fußgängerdichte und somit zu einer verminderten Durchschnittsgeschwindigkeit in diesem Bereich, dargestellt in der linken Abbildung. Somit ist beispielsweise ausgehend von der mit einem schwarz ausgefüllten Kreis markierten Position zunächst der Weg unten um das Hindernis herum der „kostengünstigere“. Im weiteren Verlauf der Simulation ist dies jedoch der Weg oben um das Hindernis herum.

Der hier vorgestellte analytische Ansatz weist allen simulierten Agenten identische Routenwahlkriterien zu. Sobald die MRCF also einem anderen Weg den Vorzug gibt, „entscheiden“ sich alle Agenten entsprechend dieser Vorgabe. Zudem wird den Agenten ein unrealistisches Maß an Voraussicht zugebilligt, selbst nicht einsehbare Hindernisse finden bei der Routenwahlentscheidung Berücksichtigung.

Letztlich involviert die MRCF eine Vielzahl von schwer quantifizierbaren und empirisch schwer belegbaren Parametern. Die Ermittlung der MRCF macht zu jedem Zeitschritt aufwändige analytische Berechnungen notwendig, der Aufwand steigt mit der Simulationsfläche zum Quadrat. Der Autor weist im Ausblick der Publikation selbst darauf hin, dass die Implementierung hinsichtlich der Simulationsgeschwindigkeit weiterer Verbesserungen bedarf. Eine Verwendung der MRFC im Rahmen der Aufgabenstellung dieser Arbeit erscheint daher als ungeeignet.

### **2.2.5 Deterministisch, diskret, abstrakt**

Unabhängige Modelle sind diesem Kriterium nicht zuzuordnen, da deterministische Modelle letztlich immer kontinuierlich formuliert werden. Gleichwohl ist es für die Simulation von physikalischen Modellansätzen nach Abschnitt 2.2.4 von großer Bedeutung, da die Implementierung als Programmcode letztlich nur numerisch und mithin diskret erfolgen kann.

Um dem großen Berechnungsaufwand für die auf einen Agenten einwirkenden Kräfte entgegenzuwirken, können die ortsbasierten Kräfte vorab in einem Quadratraster raumdiskret berechnet werden [Gloor et al. 2003a], [Gloor et al. 2003b], [Gloor et al. 2004]. Auch wenn die durchgeführten Bewegungen sodann im kontinuierlichen Raum berechnet werden, kann das zu Grunde liegende Modell dann allerdings nicht mehr als kontinuierlich bezeichnet werden.

Die Implementierung des Social-Force Modells läuft auf die numerische Integration von gekoppelten Differentialgleichungen hinaus. Auch dazu müssen Raum und Zeit diskretisiert werden, wobei jedoch Raum- und Zeitschritt sehr klein werden müssen, um die Diskretisierungsfehler auf ein vertretba-

res Maß zu reduzieren. Beim Active-Walker Modell ist zur Ermittlung und Darstellung des Pfadpotentials für eine effiziente Implementierung eine Diskretisierung des Raumes unabdingbar. Das in der Form eines Integrals definierte Potential kann dann numerisch in eine Summe konvertiert werden [Helbing et al. 1997a]. Letztlich zeigt sich, dass bei der numerischen Simulation des Fußgängerverkehrs eine Diskretisierung von Raum und Zeit unerlässlich ist, sofern der Modellansatz nicht per se bereits diskret ist (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.6.1).

## 2.2.6 Deterministisch, diskret, heuristisch

### 2.2.6.1 Deterministische Zelluläre Automaten

Mit der wachsenden verfügbaren Rechenleistung gewinnen Zelluläre Automaten (ZA) in zahlreichen Wissenschaftsgebieten zunehmend an Bedeutung, da sich mit ihnen viele analytisch schwer beherrschbare Vorgänge numerisch simulieren lassen. Stephen Wolfram definiert ZA in seinem monumentalen Standardwerk [Wolfram 2002] als Automaten (auch Einheiten oder Agenten), die sich lokalen, nachbarschaftlichen Besetzungsregeln gehorchend von Zelle zu Zelle fortbewegen.

In den Verkehrswissenschaften fanden ZA zunächst Anwendung beim motorisierten Verkehr. Hierbei wird ein Fahrstreifen als eine eindimensionale Folge von Zellen abstrahiert, die entweder frei oder durch einander folgende Fahrzeuge belegt sind [Nagel et al. 1992]. Der eindimensionale und gerichtete Charakter bleibt stets erhalten, plangleiche Knotenpunkte und Fahrstreifenverflechtungen werden mit modellexogenen Regeln berücksichtigt.

k [cm]	Quelle
45,7	[Blue et al. 1998]
40	[Burstedde et al. 2001]
75	[Kerridge et al. 2001]
40	[Klüpfel et al. 2001]
50	[Ohi et al. 2003]

Tab. 2-3: Gewählte Zellkantenlängen  $k$  unterschiedlicher Implementierungen von ZA zur Simulation des Fußgängerverkehrs

Bei Anwendung eines ZA zur Nachbildung des Fußgängerverkehrs zeigen sich rasch große Unterschiede. Der zweidimensionale, ungerichtete Charakter des Fußgängerverkehrs steht der Übernahme der Modellkonzepte aus dem motorisierten Verkehr entgegen. Erforderlich ist eine

- zweidimensionale Zellkonfiguration, sowie
- die Behandlung multipler Konfliktsituationen.

Im Zuge der Diskretisierung hat die Wahl der Zellkantenlänge sowie der damit korrelierenden Zeitschrittlänge großen Einfluss auf den Realitätsgrad der Simulation. Tab. 2-3 zeigt eine Übersicht über in der Literatur dokumentierte Größen quadratischer Zelleinteilungen. Nach [Kerridge et al. 2001] ist eine Zellseitenlänge von 0,75 m unter normalen städtischen Verkehrsbedingungen angemessen.

Diese relativ grobe räumliche Diskretisierung wird durch Wahl eines Zeitschrittes von einer Zehntelsekunde kompensiert. Ein Agent wird somit erst dann bewegt, wenn die zuge dachte Geschwindigkeit eine diskrete Dislokation impliziert. Dennoch erscheint eine aus der Zellgröße resultierende maximale Aufenthaltsdichte von ca. 1,8 P/m<sup>2</sup> generell als zu gering. Zudem wird eine feingliedrige Umgebungsgeometrie vielfach nicht hinreichend genau aufgelöst.

Die Größe sollte daher situationsabhängig für Dichten von bis zu sechs Personen je Quadratmeter angepasst werden, was einer Kantenlänge von etwa 0,4 m entspricht. Auch [Burstedde et al. 2001] verwendet eine Zellgröße von 0,4 × 0,4 m<sup>2</sup>, was etwa dem Platzbedarf in einer dichten Fußgänger Menge entspricht. Teilt man die Zellgröße durch eine mittlere Gehgeschwindigkeit von 1,3 m/s ergibt eine Zeitschrittlänge von 0,3 s, was wiederum der menschlichen Reaktionszeit entspricht.

Dabei ist zweitrangig, ob sich Agenten modellhaft von Zelle zu Zelle oder auf Gitterachsen von Knoten zu Knoten bewegen [Galea 2002]. Von großer Bedeutung für Realitätsgrad und Simulationsgeschwindigkeit sind dagegen Zellkonfiguration sowie die zulässigen Nachbarschaftsrelationen. Abb. 2-11 zeigt exemplarisch Quadratraster mit vertikal und horizontal zulässigem Zellübertritt (von Neumann), zusätzlich diagonal zulässigem Zellübertritt (Moore) sowie eine Konfiguration mit hexagonalen Zellen.

Auch Anordnungen mit gleichseitigen Dreiecken sind möglich, da auch diese ohne Zwischenräume angeordnet werden können. Bei der Mooreschen Nachbarschaftsrelation müssen zusätzlich unzulässige Manöver ausgeschlossen werden, da die Wege zweier Agenten sich innerhalb eines Zeitschrittes nicht kreuzen dürfen (Abb. 2-12).

Die unterschiedlichen Zellkonfigurationen offenbaren eine Schwachstelle der ZA. Die notwendige Beschränkung auf einige wenige Richtungen in den Nachbarschaftsrelationen führt zu einer Anisotropie bezüglich der Grundgesamtheit aller Bewegungsrichtungen. Bei der von Neumannschen Nachbarschaftsrelation sind zwar die Progressionslängen je Zeitschritt identisch, al-

lerdings ergeben sich erhebliche Verfälschungen bezüglich der realen Entfernungen, da immer nur orthogonale Bewegungen zugelassen sind.

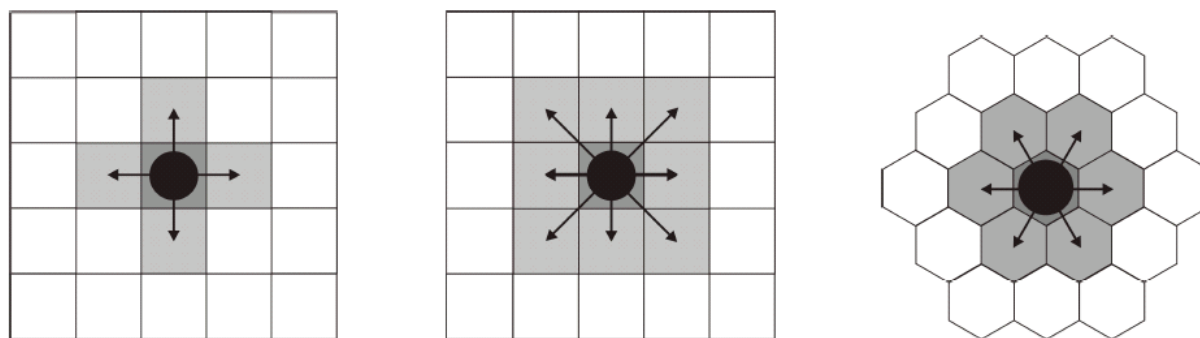


Abb. 2-11: Quadratraster mit von Neumannscher und Moorescher Nachbarschaftsrelation sowie Wabenraster mit sechseckigen Zellen

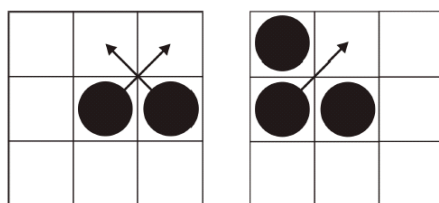


Abb. 2-12: Unzulässige Manöver bei der Mooreschen Nachbarschaftsrelation

Bei der Mooreschen Nachbarschaftsrelation wird dieses Problem zwar gemildert, allerdings um den Preis abweichender Progressionslängen und damit unterschiedlicher Geschwindigkeiten je Zeitschritt. Ein Ausgleich kann über ein Pausieren nach einer bestimmten Anzahl diagonalen Schritte erzielt werden [Schultz et al. 2005]. Ebenso wie eine hexagonale oder trianguläre Zellanzordnung macht eine zu große Zahl korrigierender Zusatzregeln den großen Geschwindigkeitsvorteil bei der Simulation gegenüber kontinuierlichen Modellansätzen allerdings weitgehend zunichte.

Aus der diskreten Gliederung des Raumes resultiert unmittelbar eine weitere Schwachstelle, da variierende Progressionsgeschwindigkeiten nur indirekt durch die Einführung komplementärer Regeln Berücksichtigung finden können. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Verfahren möglich. Zum Einen die Verkleinerung der Zeitschritte bei gleichbleibender Zellgröße, zum Anderen das Zulassen einer Progression um mehrere Zellen pro Zeitschritt.

Bei letzterem Verfahren müssen alle Zellen zwischen Start und Zielzelle während eines Zeitschrittes blockiert werden, um undefinierte Begegnungszustände zu vermeiden [Kessel et al. 2002]. Begegnungsfälle werden dabei allerdings nicht einheitlich abgearbeitet, sondern vielmehr vom Zusammenspiel zwischen Überschneidungslänge und Updatereihenfolge (vgl. Abschnitt 2.3)

bestimmt. Agenten, die zuerst am voraussichtlichen Schnittpunkt zweier Trajektorien eintreffen, kann somit keine höhere Wahrscheinlichkeit des Vortritts zugewiesen werden.

Bei einer Verkleinerung der Zeitschritte verweilt ein Agent hingegen so lange in einer Zelle, bis aufgrund seiner Progressionsgeschwindigkeit der Übertritt in die nächste Zelle ansteht [Kerridge et al. 2001]. Als Nebeneffekt kann mit diesem Verfahren auch die Anisotropie des Quadratrasters berücksichtigt werden. Würde ein Agent in von Neumannscher Relationsrichtung beispielsweise nach fünf Zeitschritten fortbewegt, so stünde die Fortbewegung in diagonalen Richtung bei gleicher Geschwindigkeit aufgrund des bei Faktor  $\sqrt{2}$  etwa um 1,4 längeren Weges erst nach sieben Zeitschritten an.

Zahlreiche Argumente wie die kurze Beschleunigungszeit zur Erlangung der Höchstgeschwindigkeit sowie die geringe Varianz der Gehgeschwindigkeiten [Burstedde et al. 2001] sprechen letztlich gegen die Zulassung einer Progressionslänge von mehr als einer Zelle. Beim stochastischen ZA (vgl. Abschnitt 2.2.7.1) können individuelle Wunschgeschwindigkeiten letztlich recht effektiv durch parametrierbare Zellübertrittswahrscheinlichkeiten abgedeckt werden.

Soll ein Agent nun also zum Leben erweckt werden, bedarf es Regeln für den Zellübertritt. Die Bewegung wird dabei dadurch erzeugt, dass eine neue Zelle als belegt, die bisher besetzte hingegen als frei gekennzeichnet wird. Diese Grundregel ist dabei keinesfalls trivial, da sich bei ZA Teilchen grundsätzlich auch vermehren oder absterben können. Bereits bei einem eindimensionalen ZA ergeben sich in Abhängigkeit der Belegung von drei benachbarten Zellen  $2^8 = 256$  unterschiedliche Belegungsregeln für den Folgezeitschritt. Hiervon simulieren nur einige wenige tatsächlich die Translokation von Objekten.

Wird die Bewegung in eine bestimmte Richtung ausgeführt, so stellt sich rasch die Frage nach dem Umgang mit Konflikten im Falle von Gegenverkehr oder kreuzendem Verkehr. Nach [Blue et al. 2000a] bestehen die Grundregeln für eine bidirektionale mikroskopische Fußgängersimulation in der Berücksichtigung von Seitenschritten (Spurwechseln), der Vorwärtsbewegung (Beschleunigen, Bremsen) sowie der Konfliktentschärfung (Blockadenvermeidung).

Nach dem Ansatz von Blue und Adler ist dabei dem Agenten selbst die Vorzugsrichtung immanent: Die Agenten gehen nach links, nach rechts, in vertikaler oder in horizontaler Richtung. Mit der Definition geeigneter Ausweichregeln stellt sich auch das Phänomen der Pfadbildung ein. Unterschieden wird dabei zwischen ungeordnetem Fluss und dynamischer Bildung von

multiplen Pfaden. Der ungeordnete Zustand ist in der Regel nur von kurzer Dauer, Spuren bilden sich von selbst heraus. [Blue et al. 2000b].

Aufgrund zahlreicher Zusatzregeln ist der hier geschilderte Ansatz zur Berücksichtigung einander kreuzender Agenten bereits sehr komplex. Dennoch ist noch ein weiteres Modellelement zur Zuweisung der Vorzugsrichtung in Abhängigkeit vom Ziel zu definieren. Müssen zur Zielerreichung Hindernisse umgangen werden, sind die Definition von Unterzielen sowie eines separaten Routenwahlalgorithmus' erforderlich. Ein Lösungsansatz hierfür ist die Definition von Entscheidungspunkten für Richtungswechsel [Dijkstra et al. 2001], [Kukla et al. 2003].

Eine umfassende und konsistente Modellierung mit Hilfe eines deterministischen ZA ist aber letztlich nicht möglich. Der deterministische Modellansatz eines ZA ist rein auf die operationale Ebene des Fußgängerverkehrs beschränkt, die taktische Ebene der Routenwahl kann nur in separaten Modulen abgebildet werden. Ein integraler Ansatz zur Abbildung sowohl der taktischen als auch der operationalen Ebene des Fußgängerverkehrs stellt dagegen der nachfolgend diskutierte stochastische ZA dar.

## 2.2.7 Stochastisch, diskret, heuristisch

### 2.2.7.1 Stochastische Zelluläre Automaten

Während die Diskretisierung der Umgebungsgeometrie mit derjenigen deterministischer ZA vergleichbar ist, wird zur Abdeckung der taktischen Entscheidungsebene eine andere Vorgehensweise gewählt. Die jeweilige Vorzugsrichtung ist den Agenten nicht vorgegeben. Vielmehr erfolgt hier die Entscheidung, in Richtung welcher Nachbarzelle ein Agent im nächsten Zeitschritt bewegt wird basierend auf einer 3x3 Matrix von Zellübertrittswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  zentrisch zur seiner aktuellen Position (vgl. Abb. 2-13).

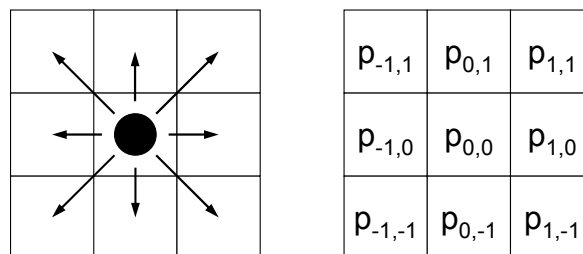


Abb. 2-13: Definition der Zellübertrittswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$

Ausgehend von [Kirchner et al. 2002], [Schadschneider et al. 2002] sowie eigenen Überlegungen kann  $p_{ij}$  wie folgt ermittelt werden:

$$p_{ij} = n \cdot \exp(g_S \cdot S) \cdot \exp(g_D \cdot D) \cdot b_{ij} \quad [2-3]$$

Darin sind:

$n$ : Normierungsfaktor (Skalar) der gewährleistet, dass  $\sum_{ij} p_{ij} = 1$

$g_S$ : Gewichtungsfaktor für den Einfluss des statischen Grundfeldes

$S$ : Matrix ( $s_{ij}$ ) mit  $i = \{-1, 0, 1\}$  und  $j = \{-1, 0, 1\}$  der statischen Potentialdifferenzen resultierend aus dem statischen Grundfeld. Es gilt:

$$s_{ij} = s_{\text{Aufenthalt}} - s_{\text{Nachbarzelle}} \quad [2-4]$$

$g_D$ : Gewichtungsfaktor für den Einfluss des dynamischen Grundfeldes

$D$ : Matrix ( $d_{ij}$ ) mit  $i = \{-1, 0, 1\}$  und  $j = \{-1, 0, 1\}$  der dynamischen Potentiale

$b_{ij}$ : Faktor der angibt, ob Zelle frei ( $b_{ij} = 1$ ) oder besetzt ist ( $b_{ij} = 0$ ).

Das statische Grundfeld  $S$  ist zeitlich unabhängig und wird durch die Präsenz von Agenten nicht verändert. Durch variierende Feldstärken bildet es die unterschiedlichen Begehbarkeiten der Umgebungsgeometrie (z.B. Wege, Wiesen, Hindernisse) im diskreten Raum ab. Zudem korreliert die Feldstärke mit der Entfernung zum Ziel und gewährleistet so die Zielorientierung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Algorithmen zur Berechnung statischer Grundfelder entwickelt und angewandt (Abschnitt 4.4.2.1 bis 4.4.2.3. Um eine Anwendbarkeit auf den alltäglichen Fußgängerverkehr zu ermöglichen, wird zur Modellierung multipler Ziele für jede Gruppe von Agenten mit identischem Ziel in Erweiterung bisheriger Implementierungen ein eigenes statisches Grundfeld ermittelt (vgl. Abschnitt 4.4.2.4).

Die Interaktion der Agenten erfolgt über den Belegungsfaktor  $b_{ij}$  sowie das dynamische Grundfeld. Die zugrunde liegende Idee für die Modellierung der Wechselwirkung zwischen den Agenten macht dabei Anleihen aus der Biologie: Agenten hinterlassen beim Gehen im dynamischen Grundfeld eine Spur, vergleichbar zu Chemotaxis bei Ameisen. So erhöht der Übergang eines Agenten das dynamische Potential, während es mit der Zeit diffundiert und zerfällt.

Der entscheidende Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Transformation weitreichender Interaktionen zwischen Agenten auf die unmittelbare Zellnachbarschaft. Damit wächst die Zahl der Wechselwirkungsterme, die in jedem Zeitschritt zu berechnen sind, nur linear mit der Zahl  $N$  der Fußgänger, was eine wichtige Voraussetzung für die Skalierbarkeit der Simulationsum-



gebung ist. Um dem gerichteten Charakter dynamischer Grundfelder bei der Ausbildung temporärer Spuren im Gegensatz zur Ausbildung realer Pfade Rechnung zu tragen, werden im Rahmen dieser Arbeit acht unabhängige dynamische Grundfelder für jede Vorzugsrichtung implementiert (vgl. Abschnitt 4.4.2.5).

Bestandteil der Durchführung eines Fußweges ist zudem die Bereitschaft, sich bei unvorhersehbar auftretenden Hindernissen spontan für einen neuen Weg zu entscheiden. Ein möglicher Lösungsansatz auf der operationalen Ebene die Einführung zweier Modi, eines „glücklichen“ sowie eines „unglücklichen“ Modus [Burstedde et al. 2001]. Während sich die Agenten beim „glücklichen“ Modus ungehindert mit der größten Wahrscheinlichkeit in Richtung des größten Potentials bewegen, erfolgt beim „unglücklichen“ Modus bei Belegung des direkten Weges eine Ausweichbewegung in Richtung von freien Zellen mit nächst kleinerem Potential.

Ein innovativer Lösungsansatz ermöglicht eine Umorientierung auf der taktischen Entscheidungsebene: Nach einem stochastisch auf Grundlage empirischer Daten verteiltem Zeitintervall wird der durch dynamische Hindernisse blockierte Abschnitt geometrisch geschlossen. Für das vorgegebene Ziel wird sodann ein neues statisches Grundfeld ermittelt und dem Agenten dynamisch zur Laufzeit der Simulation zugewiesen.

Neben anderen Bewegungsalgorithmen wurde der oben beschriebene Ansatz im Rahmen dieser Arbeit dergestalt implementiert, dass die Agenten bei Blockade der Zellen in Richtung des Ziels unmittelbar in Richtung von vom Ziel weiter entfernten Zellen ausweichen können (vgl. Abschnitt 4.4.4.3).

### **2.2.7.2 Discrete-Choice Modell**

Ein anthropologischer Ansatz der letztlich zu Selbstorganisation und Gruppendynamik führen soll ist das Discrete-Choice Modell [Antonini et al. 2005] und [Antonini et al. 2006]. Hierbei wird der Blickwinkel des Menschen von  $170^\circ$  in elf radiale Segmente aufgeteilt. Das mittlere Segment steht für die geradlinig fortgesetzte Bewegung, fünf Segmente zur Rechten bzw. zur Linken für unterschiedlich stark gekrümmte Bewegungsrichtungen. Die radialen Segmente werden durch drei konzentrische Ringsegmente überlagert. Sie stehen für verzögerte, gleichförmige und beschleunigte Bewegung (Abb. 2-14).

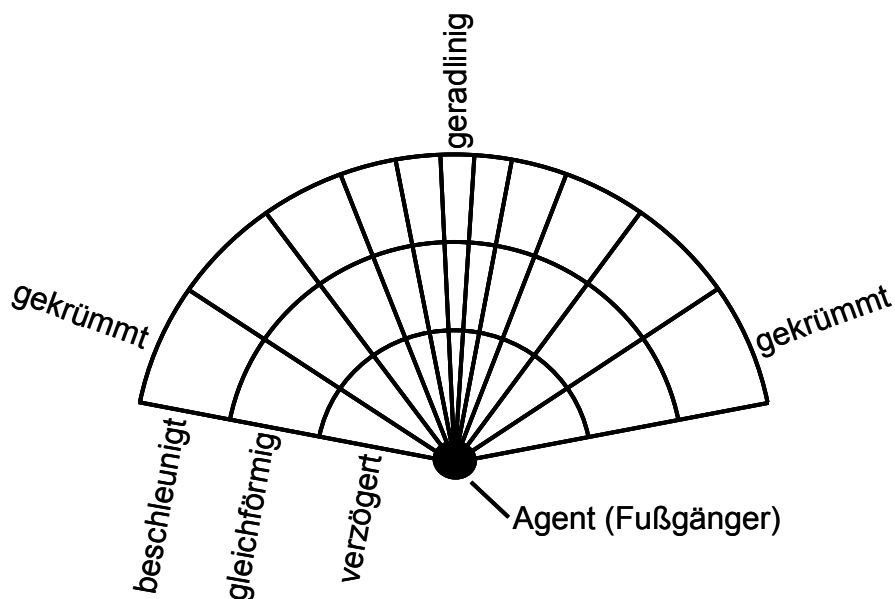


Abb. 2-14: Die 33 diskreten Wahlmöglichkeiten ergeben sich aus der Überlagerung des Geschwindigkeits- und Richtungsverlaufs

Die Herausforderung dieses Ansatzes besteht in der Entwicklung von Algorithmen zur plausiblen Zuweisung der Übertrittswahrscheinlichkeiten zu den 33 Segmenten unter Antizipation diverser Umwelteinflüsse. Dabei gibt es für zahlreiche mikroskopische Parameter keine ausreichende empirische Datengrundlage. Zwar bietet dieser Ansatz eine Lösung für die Anisotropie des diskretisierten Raumes, jedoch wird die Berechnung des Begegnungs- und Ausweichverhaltens sehr aufwändig, weshalb das Discret-Choice Modell schlecht mit einer großen Zahl von Agenten skaliert.

### 2.2.8 Stochastisch, kontinuierlich, heuristisch

Eine Klassifizierung und Bewertung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodele wäre nicht vollständig, ohne einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten zu geben. Mit der stetig zunehmenden Rechnerleistung und der fortschreitenden Miniaturisierung der Sensortechnik liegt das größte Entwicklungspotential im Bereich der stochastischen, kontinuierlichen und heuristischen Modelle.

Das zuletzt gezeigte Discrete-Choice Modell weist den Weg in diese Richtung. In einem heuristischen Ansatz stellt es das Individuum an den Ausgangspunkt der Überlegungen. Alle Entscheidungsparameter beziehen sich auf die Steuerung des realen Bewegungsablaufs. Gleichzeitig kommt das Modell ohne eine Diskretisierung der Umgebungsgeometrie aus, wenngleich die individuellen Orientierungsfelder sowie die Zeitachse nach wie vor einer Segmentierung unterliegen. Ohne die gleichförmige Raumaufteilung erfordert die

Implementierung jedoch einen hohen Rechenaufwand, weshalb das Modell für eine große Zahl simulierter Agenten (noch) ungeeignet ist. Als Entwicklungsziel sind hier Entscheidungsmodelle zu sehen, die für eine Anwendung im kontinuierlichen Raum eine hinreichend leistungsstarke Implementierung ermöglichen.

Letztlich entscheidet sich die Qualität eines Modells, welches zahlreiche heuristische Parameter internalisiert an der Erhebbarkeit von aussagekräftigem mikroskopischem Datenmaterial, um die Stochastizität des Modells so realitätsnah wie möglich zu kalibrieren. Die Validierung des Modells kann schließlich wiederum auf der Basis makroskopischer Kenngrößen des Fußgängerverkehrs erfolgen. Gerade die noninvasive Erhebung adäquaten mikroskopischen Datenmaterials stellt heute noch eine große Herausforderung dar, wobei die technische Entwicklung der Sensortechnik zunehmend neue Möglichkeiten eröffnet (siehe hierzu Abschnitt 6.1).

## **2.3 Updatereihenfolge**

Unabhängig vom zu Grunde liegenden Modell spielt die Updatereihenfolge bei der Simulation interagierender Agenten eine große Rolle. Die hierbei auftretenden Konflikte werden definiert als Ereignisse, bei denen zwei oder mehr Agenten in einem Zeitschritt den gleichen Platz einnehmen wollen [Kirchner et al. 2003a], [Kirchner et al. 2003b].

Obwohl diese Konflikte lokaler Natur sind, können sie starken Einfluss auf die globalen Merkmale eines Simulationslaufs haben, insbesondere bei Fußgängerdichten nahe dem Maximum. Dieses unmittelbar dem zweidimensionalen Charakter der Modelle geschuldete Phänomen hat keine Entsprechung bei eindimensionalen ZA zur Simulation des motorisierten Verkehrs. Hier hat die Updatereihenfolge lediglich Einfluss auf das Verhalten einander folgender Agenten (unterstellt, dass verkehrswidriges Verhalten nicht Bestandteil der Modellbetrachtung sei).

Nachfolgend werden verschiedene Updatereihenfolgen definiert sowie ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt.

### **2.3.1 Sequentielles Update**

Hierbei werden während eines Zeitschritts nacheinander alle Agenten berücksichtigt. Ohne weitere Berechnungsvorschriften geschieht dies immer in der gleichen Reihenfolge, beispielsweise in der Reihenfolge der Erzeugung der Agenten. Dies bedeutet, dass bei Konflikten immer der gleiche Agent (im Falle des Beispiels immer der schon länger existierende) bevorzugt werden würde. Implementierungsimmanente Faktoren würden somit das Bewe-

gungsverhalten beeinflussen, weshalb die sequentielle Updateregeln trotz der besten Rechenperformance aller Updateregeln nicht zum Einsatz kommen sollte.

Allerdings kann mit dieser Updateregeln bei einander folgenden Personen auch der höchste spezifische Fluss erzielt werden, da hierbei ein Agent in eine unmittelbar vor ihm von einem Vorgänger geräumte Zelle nachrücken kann. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist eine im Gleichschritt marschierende Fußgängerformation, bei der jeder Fußgänger immer unmittelbar den Platz des Vorgehens einnimmt. Werden im Beispiel die Agenten in der Reihenfolge erzeugt, bedarf es keiner zusätzlichen Regeln um den maximalen spezifischen Fluss zu erzielen.

Detailliertere Untersuchungen zum Einfluss der Updatemethode auf den maximalen spezifischen Fluss bei eindimensionalen ZA mit Hilfe des asymmetrischen Ausschlussverfahrens (ASEP) werden in [Rajewsky et al. 1998] eingehend erläutert.

### **2.3.2 Zufälliges Update**

Das zufällige Update der Agenten erzielt ähnlich gute Rechenzeiten wie das sequentielle Update. Allerdings wird hiermit nicht gewährleistet, dass alle Agenten im Verlauf einer Sequenz behandelt werden. Mit dem uneingeschränkt zufälligen Update sind Sequenzen quasi nicht existent, weshalb auch einzelne Zeitschritte nicht mehr klar abgrenzbar sind. Da die diskrete Zeitachse jedoch ein zentraler Bestandteil eines validen ZA ist, muss diese Updateregeln unbedingt verworfen werden. Sämtliche gegen die Zeit aggregierte Kenngrößen haben bei dieser Implementierung keine Gültigkeit.

### **2.3.3 Sequentiell zufälliges Update**

Im Gegensatz zum uneingeschränkt zufälligen Update ist hier die diskrete Zeitachse gewährleistet. Bewegte Agenten werden im Verlauf einer Sequenz von der Ausführungsliste gestrichen, so dass jeder Agent je Zeitschritt genau einmal behandelt wird [Keßel et al. 2002]. In Konfliktsituationen wird somit einem beteiligten Agenten sequentiell zufällig der Vortritt gewährt. Charaktereigenschaften wie ein entschlossener Gang können den Agenten daher nicht zugewiesen werden.

### **2.3.4 Paralleles Update**

Physikalische Modelle mit Zeit und Raum als kontinuierlichen Größen müssen mit deren Diskretisierung im Zuge der Implementierung (vgl. Abschnitt 2.2.5) per Definition ein paralleles Update der Agenten durchführen, um eine

fehlerhafte Adaption des Modellansatzes zu vermeiden. Ein paralleles Update der Agentenpositionen unterbindet Folgeabhängigkeiten wie sie bei den verschiedenen Anwendungsfällen des sequentiellen Updates entstehen können [Blue et al. 2000c].

Natürlich werden auch beim parallelen Update alle Agenten bei der Programmausführung konsekutiv behandelt. Bei der Implementierung eines ZA besteht eine Lösungsmöglichkeit darin, die Bewegungsschritte nach der Behandlung eines Agenten nicht sofort ausführen zu lassen. Zunächst werden alle Konfliktsituationen im Verlauf einer Sequenz identifiziert. Sodann können alle an einem Konflikt beteiligten Agenten die Bewegung mit der gleichen Wahrscheinlichkeit ausführen. Kommt ein Agent zum Zug, gehen alle anderen leer aus (Abb. 2-15).

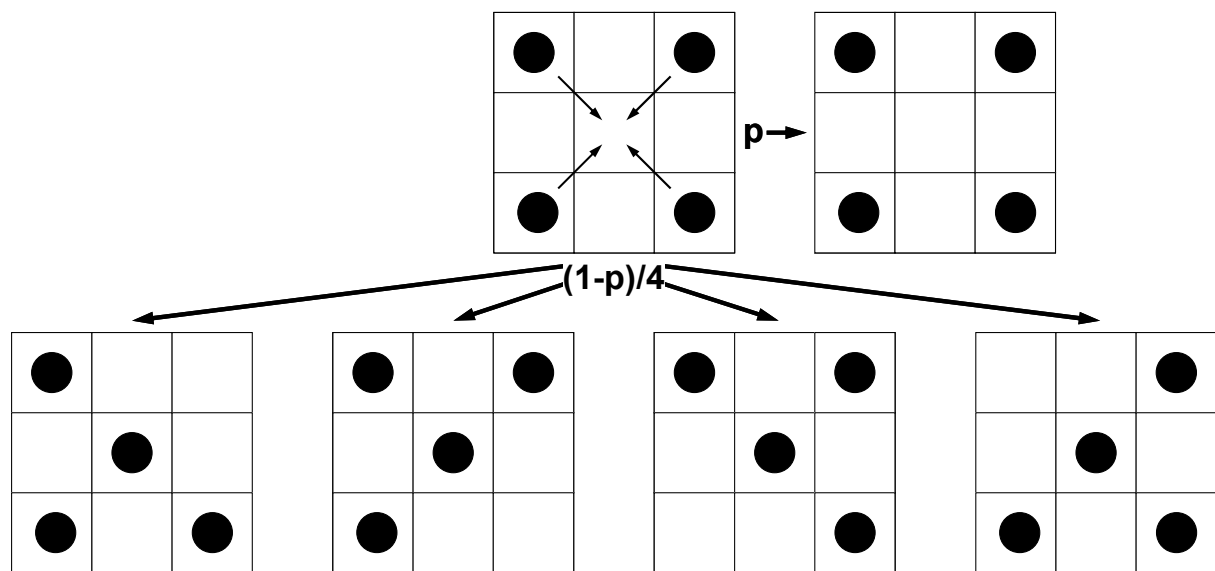


Abb. 2-15: Wird mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  allen  $n$  an einem Konflikt beteiligten Agenten die Bewegung verweigert, so kann ein Agent mit der Wahrscheinlichkeit  $(1-p)/n$  die Bewegung durchführen

Bis zu diesem Punkt unterscheidet sich das parallele Update im Ergebnis nicht vom sequentiell zufälligen Update. Ein paralleles Update ist jedoch erforderlich wenn auch die Möglichkeit eröffnet werden soll, dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit keiner der an einer Konfliktsituation beteiligten Agenten zum Zuge kommt. Dies entspricht einer heuristischen Annäherung an das als Fußgänger zuweilen erlebte Phänomen der Kollisionsvermeidung bei sich kreuzenden oder sich begegnenden Verkehren. Allerdings beansprucht ein paralleles Update die größte Rechenzeit aller geschilderten Updatemethoden.

Meist wird hier der Konflikt einer potentiell zu räumenden Zielzelle nicht behandelt, da dies zu zeitlich nicht auflösbaren Konfliktketten führen kann.

Wird beispielsweise ein Konflikt mit zwei auf eine Zielzelle aufrückenden Agenten identifiziert, auf deren aktuelle Positionen wiederum Agenten aufrücken wollen, so wird diesen eventuell die Bewegung verwehrt, obwohl möglicherweise andere ähnlich günstige Zielzellen konfliktfrei erreichbar gewesen wären. In diesem speziellen Fall würde sich ein sequentielles Update tatsächlich als die günstigere Variante erweisen.

### **2.4 Ausgangsmodell des Simulationsframeworks**

Die intensive Auseinandersetzung mit Vor- und Nachteilen diverser mikroskopischer Modellansätze im Rahmen dieser Arbeit, die experimentelle Implementierung des Social-Force Modells und eines deterministischen ZA sowie die gedankliche Weiterentwicklung erkannter Mängel führten letztlich allesamt zu der Erkenntnis, dass der Ansatz eines stochastischen ZA für die Belange des alltäglichen Fußgängerverkehrs die geringste Zahl gravierender Mängel aufweist. Dabei ist der stochastische ZA aber keineswegs nur der Modellansatz mit den wenigsten Negativpunkten, sondern auch derjenige mit den meisten positiven Aspekten.

So wurde bereits gezeigt, dass die Übertragung weitreichender Effekte wie beim Social-Force Modell auf den Nahbereich unmittelbar um die Position des Agenten eine vergleichsweise hohe Simulationsgeschwindigkeit ermöglicht (Abschnitt 2.2.7.1). Experimente zeigen, dass die Implementierung eines ZA mit vergleichbaren Eigenschaften etwa  $10^2$ -mal schneller ist als ein Social-Force Modell [Quinn et al. 2003].

Darüber hinaus findet die Beschränkung auf den Nahbereich aber auch Bestätigung in der Verhaltenspsychologie. So nehmen Fußgänger ihre unmittelbare Umgebung zumeist unterbewusst wahr, um kleinen Hindernissen und anderen Fußgängern schnell und kollisionsfrei ausweichen zu können. Bereits nur ein oder zwei Personen weiter entfernte Hindernisse oder Personen werden quasi ignoriert [Goffman 1971].

Die Skalierbarkeit von Simulationsumgebungen ist bei diskreten ereignisbasierten Systemen grundsätzlich gegeben. [Breyer 2003], der Berechnungsaufwand wächst linear mit der Zahl der Zellen. Beim Social-Force Modell erfolgt die Interaktion dagegen durch eine repulsive Kraft zwischen den simulierten Agenten. Daraus folgt, dass in jedem Schritt einer Simulation von  $N$  Agenten  $N^2-N$  Wechselwirkungsterme berechnet werden müssen.

Mit der Zahl der Agenten steigt der Rechenaufwand somit stark an, was der Simulation einer großen Zahl von Agenten entgegensteht. Der analytischen Natur des Modells folgend erhält man beim Social-Force Modell ein System von gekoppelten Differentialgleichungen, das nach entsprechender

Diskretisierung numerisch zu integrieren ist. Dabei steht die zur numerischen Behandlung erforderliche Diskretisierung der eigentlichen Natur des Modells entgegen. Sie ist nicht wie beim stochastischen ZA dessen integraler Bestandteil.

Eine sinnvolle Anwendung von ZA ist erst möglich seit günstig ausreichende Rechenleistungen zur Verfügung steht [Wolfram 2002]. Umgekehrt impliziert diese Annahme einen großen Nachholbedarf im Forschungsfeld der zellulären Simulation parallel zu analytischen Ansätzen.

Als Ausgangsmodell für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und implementierte Simulationsframework dient daher ein stochastischer ZA, welcher gemäß den aus dem alltäglichen Fußgängerverkehr erwachsenden Anforderungen angepasst und weiterentwickelt wurde.

### **3 Geometrische Datengrundlage**

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Anforderungen an die Umgebungsgeometrie als Grundlage für eine mikroskopische Fußgängerverkehrssimulation entwickelt. Sodann werden die am besten geeigneten Datenformate eingeführt, bevor detailliert auf die Aufbereitung der Geometrie eingegangen wird.

#### **3.1 Anforderungen an die Umgebungsgeometrie**

Die mikroskopische Simulation des Fußgängerverkehrs stellt hohe Anforderungen an die Umgebungsgeometrie. Generell muss für die mikroskopische Simulation von Bewegungsströmen die umgebende Geometrie mindestens eine Auflösung in der Größenordnung der Projektionsfläche der simulierten Objekte, wie bspw. Fahrzeuge, Fußgänger, Sandkörner oder Moleküle besitzen. Hinsichtlich der Aufbereitung der Umgebungsgeometrie stellte bei den vorgenannten Beispielen die Simulation des Fahrzeugverkehrs eine Ausnahme dar.

Da Fahrzeuge für ihre Fortbewegung im Regelfall an eine Fahrspur gebunden sind, genügt bei der Aufbereitung der Geometrie ein wahrheitsgetreuer Längenmaßstab, selbst die maßstäbliche Abbildung von Kurvenradien ist nicht zwingend notwendig. Als Grundlage für die mikroskopische Simulation des Fahrzeugverkehrs genügt somit letztlich die Abstraktion eines Fahrstreifens als Linien- bzw. Polygonzug.

Anders bei granularen Medien, deren Teilchen zur Ausführung der Bewegung zwei oder drei Dimensionen zur Verfügung stehen. Hier müssen die Begrenzungslinien der Bewegungsfläche bzw. die Begrenzungsflächen des Bewegungsraumes explizit und maßstäblich modelliert werden. In Hinblick auf den Fußgängerverkehr weisen einzelne Flächen wie befestigte Wege oder Wiesen zudem variierende Begehbarkeiten auf, was zusätzliche Anforderungen an Auflösung und Informationsgehalt der einer Simulation zu Grunde zu legenden Geometriedaten stellt.

Bei Betrachtung der verbreiteten Karten- und Plandarstellungen finden sich dort die vorstehend beschriebenen unterschiedlichen Anforderungen an den Detaillierungsgrad wieder. Während bei einer abstrakten Straßenkarte die befahr- bzw. begehbaren Flächen explizit dargestellt werden (z.B. Linienzug einer Straße), sind bei einem Gebäude- bzw. Detailflächenplan eines Geländeausschnitts in der Regel genau diejenigen Objekte explizit dargestellt, die hinsichtlich der Zugänglichkeit eine Restriktion darstellen (z.B. Straßen- oder Wegesrand).



Diesem Umstand ist hinsichtlich der Aufarbeitung der Umgebungsgeometrie als Grundlage für die mikroskopische Simulation des Fußgängerverkehrs Rechnung zu tragen. Er ist ein maßgebendes Kriterium zur Eignungsbewertung unterschiedlicher Ausgangsformate.

## **3.2 Bekannte Datenformate**

Die für die Simulation des Fußgängerverkehrs erforderliche Abbildung der Umgebungsgeometrie muss sowohl Lageinformationen als auch Objektattribute enthalten. Digitale Daten, die Orts- und Objektattribute miteinander verknüpfen, werden in der Regel in Geoinformationssystemen (GIS) gehalten. Während dort die ortsbezogenen Daten visualisiert werden, werden die objektbezogenen Daten in einer Datenbank abgelegt.

Einer unübersehbaren Anzahl proprietärer Datenformate steht eine recht überschaubare Menge offener und weit verbreiteter Formate gegenüber. Die drei wichtigsten der im Rahmen dieser Arbeit auf Ihre Eignung als Eingangsparameter untersuchten offenen Formate werden nachfolgend eingehender beleuchtet.

### **3.2.1 Geographic Data Format (GDF)**

Das Geographic Data Format ist ein Dateiformat zur Speicherung geografischer Objekte [ERTICO - ITS Europe 2006]. Voraussetzung für die Generierung eines gültigen GDF-Formats ist die Einhaltung präziser Regeln für die Kapselung der Daten sowie zur Beschreibung von Objekten wie Straßen, Hotels, Restaurants und Museen und deren Attribute und Relationen. Das GDF-Format wurde in erster Linie für den Einsatz in Fahrzeugnavigationssystemen entwickelt. Darüber hinaus kommen GDF-konforme Kartendaten heute in zahlreichen Verkehrsanwendungen zum Einsatz.

Der starke Fokus auf den motorisierten Verkehr führt zu einer recht rudimentären Spezifikation von Fußwegen. So werden Fußwege zumeist lediglich straßenbegleitend als Teil des jeweiligen Achsquerschnitts betrachtet. Demzufolge sind eigenständige Fußwege in den vorhandenen GDF-Datensätzen nur recht lückenhaft erfasst. Zudem können variable Querschnitte sowie Fußgängerflächen und Plätze mit der durch das GDF-Format vorgegebenen Ontologie nicht sinnvoll erfasst werden.



Abb. 3-1: Visualisierung des vektorbasierten GDF-Formats (links), Vergleich mit lageidentischem Stadtplanausschnitt

Abb. 3-1 stellt die in einer GDF-Datei eingepflegten Straßen und Wege einem lageidentischen Stadtplanausschnitt gegenüber. Selbst bei Nacherfassung der zahlreichen fehlenden eigenständigen Fußwege verbliebe das mit vertretbarem Aufwand nicht lösbare Problem, die komplexen Fußgängerflächen im Umfeld von Gebäuden und Plätzen durch Vektoren, Attribute und Relationen realitätsnah abzubilden.

Als geometrische Datengrundlage zur Simulation des Fußgängerverkehrs muss das GDF-Format somit als nicht geeignet bezeichnet werden. Dies gilt nebenbei bemerkt natürlich auch für sämtliche nicht kongruent abbildenden Lagekarten wie bspw. dem in Abb. 3-1 dargestellten Stadtplanausschnitt.

### 3.2.2 Drawing Exchange Format (DXF)

DXF ist ein ursprünglich von der Firma Autodesk entwickeltes Dateiformat zur Schaffung einer offenen Schnittstelle zum CAD-Programm AutoCAD. Autodesk veröffentlicht mit jeder neuen AutoCAD-Version noch immer neue DXF-Spezifikationen.

Äquivalent zum proprietären DOC- und offenen RTF-Format bei Microsoft-Textdokumenten beschreibt eine DXF-Datei eine CAD-Zeichnung mit allen Attributen und Formatierungen im ASCII-Format. Das offene DXF-Format wurde zwischenzeitlich zum Standard für den Austausch von CAD-Plänen bei nahezu allen Anbietern.

Abb. 3-2 zeigt im GIS ArcMap der Firma ESRI die Visualisierung einer mit AutoCAD geplanten Außenanlage mit zahlreichen Fußwegen. Die Überlagerung mit einem in Abb. 3-2 rechts dargestellten Orthofoto zeigt eine nahezu perfekte Kongruenz der beiden Datensätze.

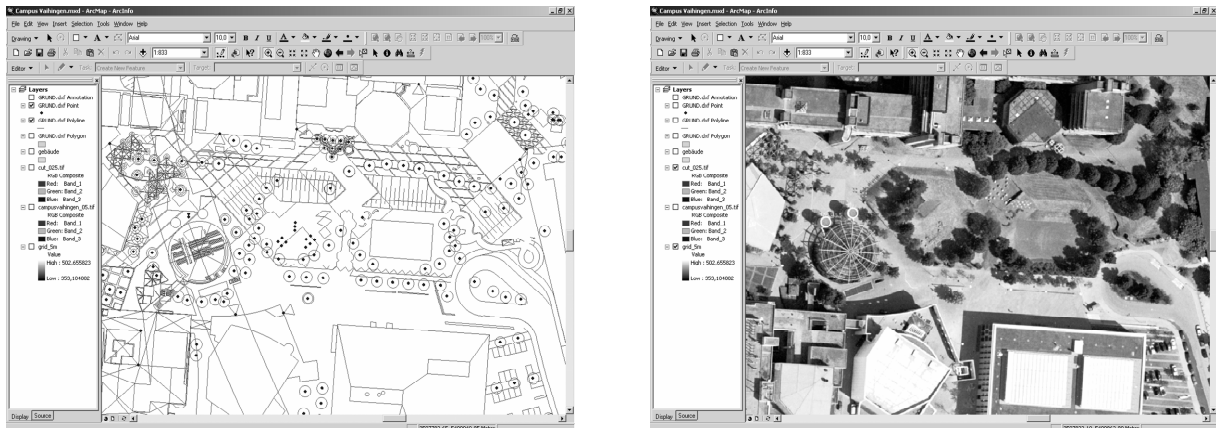


Abb. 3-2: Visualisierung des vektorbasierten DXF-Formats (links), Vergleich mit lageidentischem Orthofoto

Die Planung von Baumaßnahmen erfolgt heute nahezu ausschließlich mit CAD-Systemen. Einmal mit Hilfe von CAD-Systemen geplant, bleiben Objektpläne in elektronischer Form heute zumeist erhalten, vielfach dienen sie in der Folge dem Objektmanagement, wobei die elektronischen Baupläne dazu oft als Datengrundlage für andere EDV-Anwendungen vorgehalten werden.

Als Ausgangspunkt für die Umgebungsgeometrie bei der Simulation von Fußgängerverkehrsanlagen bietet sich das DXF-Format somit besonders an, da hinreichend detaillierte Pläne in elektronischer Form vielfach unmittelbar zur Verfügung stehen. Als nachteilig bei der Verwendung des DXF-Formats erweist sich die Tatsache, dass für die Definition von Attributen und Relationen geographischer Objekte keine einheitlichen Spezifikationen wie bspw. bei GML (vgl. Abschnitt 3.2.3) vorliegen.

Hinsichtlich der Einteilung der Zeichnungsebenen und der textuellen Parametrierung der Objekte sind eine Vielzahl differierender Schemata denkbar. Bei der Vorbereitung der Umgebungsgeometrie für die Fußgängersimulation sind die relevanten Parameter daher genau zu spezifizieren und die zur Verwendung anstehenden DXF-Dateien manuell oder automatisch entsprechend aufzubereiten.

### 3.2.3 Geography Markup Language (GML)

Die Geography Markup Language, kurz GML ist eine durch das Open Geospatial Consortium (OGC) entwickelte XML-Grammatik zur Beschreibung und Kapselung geografischer Objekte [Open Geospatial Consortium 2006]. GML dient sowohl als Modellierungssprache für geografische Soft-

waresysteme als auch als offenes Austauschformat für die Übermittlung geografischer Daten im Internet.

Mit GML wird ein generalistischer Ansatz verfolgt, der sowohl einfache Vektoren und Polygonzüge berücksichtigt als auch die Beschreibung von Flächen ermöglicht. GML ist somit in exzellenter Weise für die Aufbereitung und Speicherung der Umgebungsgeometrie als Grundlage für die Simulation des Fußgängerverkehrs geeignet. In Stichpunkten lässt sich die hierarchische Struktur von GML wie folgt beschreiben:

- Eine räumliche Umgebung wird definiert als eine Sammlung topologischer Elemente wie Straßen, Museen, Hotels, Restaurants, etc.)
- Topologische Elemente besitzen eine variierende Spezifizierungstiefe. Sie besitzen beschreibende Attribute wie Geschwindigkeitsbegrenzung, Fahrstreifenbreite oder Oberflächenbeschaffenheit aber auch Öffnungszeiten oder Preisniveau. Räumliche Attribute eines topologischen Elements sind seine geometrische Form und seine geographische Lage.
- Die Geometrie der Elemente wird durch übliche Geometrische Primitive (Punkt, Linie, Polygon, Fläche) definiert.
- Relationen zwischen Elementen wie „Teil von“ oder „Abbiegen untersagt“ können spezifiziert werden.

Aufgrund der universellen Einsetzbarkeit fanden die Grundideen von GML Eingang in das im Folgenden erläuterte Relationen- und Topologiekonzept von Nexus.

### **3.3 Das Relationen- und Topologiekonzept von Nexus**

Voraussetzung für die Entwicklung eines providerunabhängigen Weltdatenmodells ist die Entwicklung einer leistungsfähigen und flexiblen Objektbeschreibungssprache sowie eines umfassenden und konsistenten Relationen- und Topologiekonzepts [Arbter et al. 2004]. Neben der Zuweisung des weltweit eindeutigen *Nexus Object Locators* (NOL) sowohl an reale als auch an virtuelle Objekte müssen zusätzlich zu den räumlichen auch temporale und thematische Relationen erfasst werden können.

Die Beschreibung räumlicher Umgebungen mittels topologischer Objekte ist also nur ein Teilaspekt eines weit umfassenderen Ansatzes. Die GML-Konzeption findet daher eine adäquate Einbettung in das Nexus-Modell. Die Beschreibung aller Objekte erfolgt mit Hilfe der *Augemented World Modeling Language*, kurz AWML.

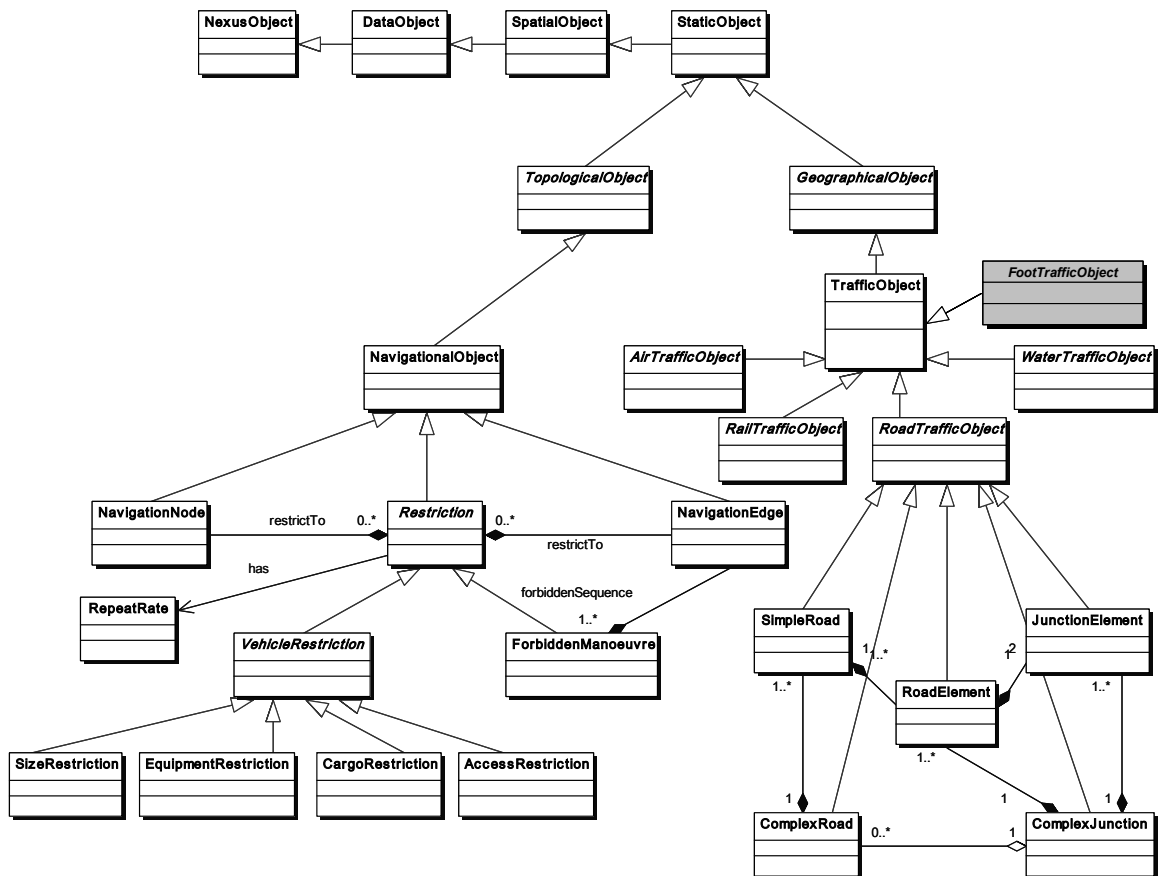


Abb. 3-3: UML-Klassendiagramm der Nexus Verkehrs-Objekte, topologisch und geografisch

Um möglichst umfassend Ausgangsdaten unterschiedlicher Qualität und Genauigkeit integrieren zu können, sind zur Berücksichtigung räumlicher Relationen (*SpatialRelations*) zwei unterschiedliche Konzepte vorgesehen. Sie können sowohl implizit durch topologische präzise Geometrien (*Topological-Objects*) als auch explizit durch topologische Relationen (*Topological-Relations*) ausgedrückt werden. Ist eine präzise Geometrie vorhanden, so ist eine explizite Modellierung der räumlichen Relationen nicht erforderlich.

Bezogen auf die durch Kanten und Knoten abstrahierte Geometrie des Straßennetzes wird zu Zwecken der Navigation und Simulation die GML-Konzeption modifiziert übernommen und erweitert [Dürr et al. 2005]. In Abb. 3-3 sind den topologischen Objekten (*TopologicalObjects*) daher thematische Relationen in Form von *NavigationalObjects* zugewiesen.

Bei der geografischen Repräsentierung der Verkehrsobjekte (*TrafficObjects*) wird zwischen Luft-, Schienen-, Straßen-, Schiffs- und Fußgängerverkehrsobjekten (Abb. 3-3, grau hinterlegt) unterschieden. Die Verwendung der im

Zusammenhang mit dem *FootTrafficObject* definierten Attribute zeigt das Codebeispiel in Abschnitt 3.4.

### 3.4 Generieren von AWML-Dateien mit AutoCAD

Zu Beginn dieser Forschungsarbeit standen im für die Datenhaltung von Nexus Objekten zu Versuchszwecken aufgesetzten *Nexus Spatial Model Server* keine im AWML-Format abrufbaren Fußwegobjekte zur Verfügung. Daher wurde ein Parser entwickelt, mit dem die für einen Simulationslauf relevante Fußwegegeometrie mit dem Programm AutoCAD von Autodesk aus einer DWG-Datei in ein gültiges AWML-Format exportiert werden kann. Als Nebeneffekt kann so die Benutzeroberfläche von AutoCAD der Simulationsumgebung als Geometrieeditor dienen.

AutoCAD 2005 stellt eine umfangreiche Unterstützung von Microsoft Visual Basic 6.0 (VBA) zur Verfügung. Die bereitgestellte Funktionalität erlaubt die Ansteuerung nahezu aller Objekte einer AutoCAD-Zeichnung. Zur Generierung von AWML-Dateien wird zunächst in einem beliebigen Dateipfad eine neue Textdatei erzeugt. In diese werden zu Beginn die Deklaration der XML-Version sowie die Kodierung der Textdatei aufgenommen.

Sodann werden die potentiell zur Verwendung kommenden Namensräume sowie die zum Parsen erforderlichen Schemadateien deklariert (siehe Abb. 3-4). In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass AWML-Dateien zwar gemäß der XML-Konventionen des W3C wohlgeformt sind, eine Gültigkeitsprüfung mit den zugehörigen Schemadateien jedoch nicht möglich ist [Bauer et al. 2004].

Im Anschluss an die Deklarationszeilen werden alle relevanten Zeichnungsobjekte AWML-konform eingefügt. Hierzu werden in der VBA-Applikation alle Objekte der aktuellen Zeichnung mit Hilfe eines Handles durchlaufen. Relevant sind alle Objekte bestimmter vordefinierter Zeichnungsebenen (sog. Layer), wie beispielsweise den Layern „Wiese“, „Weg“ oder „Bebauung“. Innerhalb dieser Layer finden bestimmte geometrische Grundelemente Berücksichtigung.

Ausgehend vom zweidimensionalen Charakter des Fußgängerverkehrs waren dies zunächst nur geschlossene Polygonzüge. Im Zuge der Generalisierung des Ansatzes werden jedoch auch einfache Linien und nicht geschlossenen Polygonzüge berücksichtigt, wobei die dadurch sinkenden Restriktionen für AutoCAD-Zeichnungsdateien zwangsläufig zu einem höheren Aufwand bei der Aufarbeitung der Geometrie innerhalb der Simulationsumgebung führen.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<awml:awml xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
  xmlns:nsat="http://www.nexus.uni-stuttgart.de/1.0/NSAT"
  xmlns:nsas="http://www.nexus.uni-stuttgart.de/1.0/NSAS"
  xmlns:awml="http://www.nexus.uni-stuttgart.de/2.0/AWML"
  xmlns:nscs="http://www.nexus.uni-stuttgart.de/1.0/NSCS"
  xmlns:eas="http://www.nexus.uni-
stuttgart.de/1.0/NavigationalObjects/EAS"
  xmlns:ecs="http://www.nexus.uni-
stuttgart.de/1.0/NavigationalObjects/ECS"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.nexus.uni-stuttgart.de/2.0/AWML
http://as.informatik.uni-
stuttgart.de/as/nexus/schema/2.0.2/NexusAwmlSchema.xsd
http://www.nexus.uni-stuttgart.de/1.0/NavigationalObjects/EAS
http://as.informatik.uni-
stuttgart.de/as/nexus/schema/2.0.2/NavigationAttributeSchema.xsd">
  <awml:nexusobject>
    <nsas:type>
      <nsas:value>ecs:FootTrafficObject</nsas:value>
    </nsas:type>
    <nsas:nol>
      <nsas:value>nexus:|/</nsas:value>
    </nsas:nol>
    <nsas:kind>
      <nsas:value>real</nsas:value>
    </nsas:kind>
    <nsas:pos>
      <nsas:value>
        <nsat:WKT srscode="31467">POINT (3507927.14254908
          5400991.50309849)
        </nsat:WKT>
      </nsas:value>
    </nsas:pos>
    <nsas:extent>
      <nsas:value>
        <nsat:WKT srscode="31467">POLYGON ((3507927.14254908
          5400991.50309849, 3507926.5915 5400983.1782,
          3507939.93899955 5400982.27399326, 3507940.55857435
          5400991.50309849, 3507927.14254908 5400991.50309849))
        </nsat:WKT>
      </nsas:value>
    </nsas:extent>
    <eas:walkable>
      <nsas:value>>false</nsas:value>
    </eas:walkable>
    <eas:faceType>
      <nsas:value>Bebauung</nsas:value>
    </eas:faceType>
  </awml:nexusobject>
</awml:awml>

```

Abb. 3-4: Beispiel einer AWML-Datei

Die Position des Basispunktes sowie die Koordinaten der geometrischen Objekte werden im WKT-Format abgelegt, wobei hier hinsichtlich der Berücksichtigung nationaler Notationskonventionen besondere Sorgfalt zu walten hat. Während in der Benutzeroberfläche von AutoCAD die angelsächsische bzw. europäische Notation von Zahlen frei gewählt werden kann, ist die europäische Notation bei der Ansteuerung der Zeichnungsobjekte über die VAB-Schnittstelle voreingestellt. Da die WKT-Konventionen jedoch die angelsächsische Notation verbindlich festsetzen, muss die Schreibweise der Koordinaten zur Fehlervermeidung in einem Zwischenschritt konvertiert werden.

Um die Gefahr eines möglichen Datenverlustes zu minimieren, erfolgt nach Abschluss der AWML-Generierung eine Konsistenzprüfung über die Anzahl möglicherweise nicht berücksichtigter Zeichnungsobjekte in den zu überprüfenden Layern.



## 4 Simulationsframework

### 4.1 Konzeption

Grundsätzliche Überlegungen hinsichtlich der Konzipierung eines Frameworks zur Simulation der Mobilität von Fußgängern führen letztlich immer zu einem Aufbau aus mindestens zwei zentralen Modulen: Der Simulation der strategischen Entscheidungsebene der Aktivitäts- und Wegewahl auf der einen sowie der Simulation der Ausführung der Bewegung auf taktischer/operationaler Entscheidungsebene auf der anderen Seite [Ferber 1999].

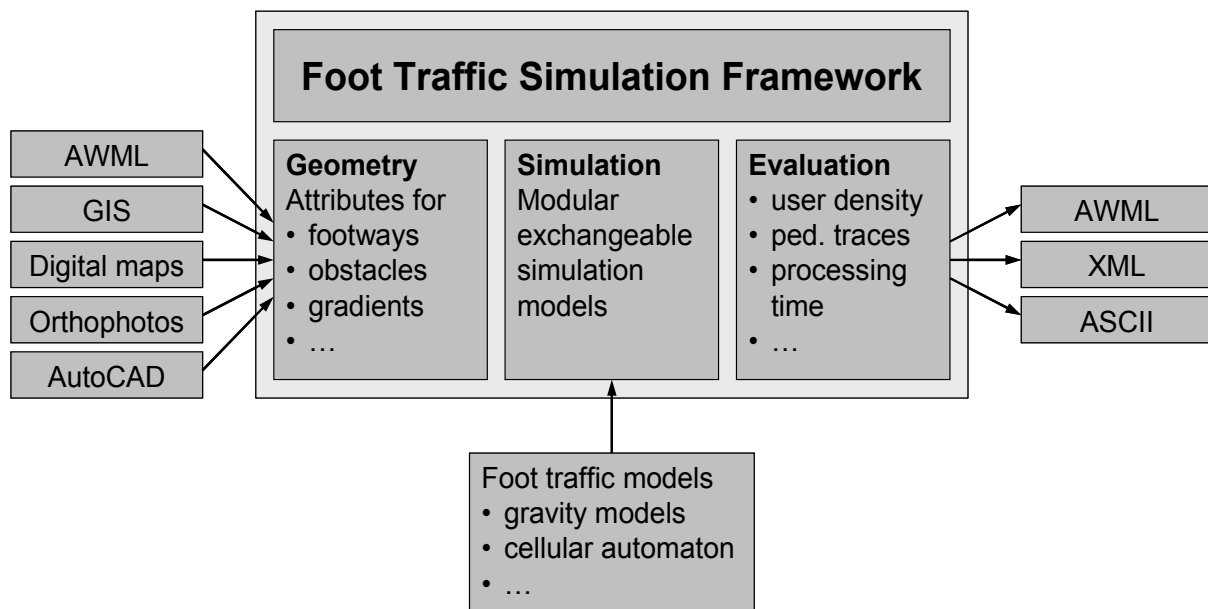


Abb. 4-1: Schematische Darstellung des Frameworks zur Fußgängerverkehrssimulation [Bitzer et al. 2005]

Bei der Implementierung konzentriert sich diese Arbeit im Wesentlichen auf die taktische und operationale Entscheidungsebene und somit auf das zentrale Modul der Simulation des Fußgängerverkehrs. Dabei werden vielfach jedoch auch Möglichkeiten zur Einbeziehung der strategischen Ebene aufgezeigt, ohne dabei den konsequent mikroskopischen und agentenbasierten Implementierungsansatz aufzugeben.

Vor der Simulationsdurchführung muss die Aufbereitung der Umgebungsgometrie erfolgen. Die im Rahmen dieser Arbeit implementierten Methoden werden in Abschnitt 4.3 eingehend erläutert. Die Datengewinnung zur Evaluation der Ergebnisse erfolgt zur Laufzeit, die Aggregation der mikroskopi-

schen Daten nach Abschluss eines Simulationslaufs. Der modulare Aufbau des Frameworks sowie die objektorientierte Programmierung ermöglichen ohne Schwierigkeiten eine spätere Ergänzung der Simulationsumgebung um weitere Methoden und Modellalternativen. In den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die im Rahmen dieser Arbeit implementierten zentralen Bestandteile des in Abb. 4-1 dargestellten Simulationsframeworks eingehender erläutert.

### **4.2 Warum Entwicklung mit C#.NET?**

Die Entscheidung für eine Migration der ersten mit C++ entwickelten Bausteine des Frameworks in ein C#.NET-Projekt wurde ausgelöst durch die exzellente Durchgängigkeit von C# für unterschiedliche Sprachräume. Gegenüber reinen C-Projekten mit fehlerfrei implementierter Speicherverwaltung sind für die Simulation zwar leichte Geschwindigkeitseinbußen hinzunehmen, da C#-Projekte analog zu Java ausgehend von der Common Intermediate Language (CIL) erst zur Laufzeit von der .NET Runtime-Umgebung in Maschinensprache übersetzt werden.

Diese Methode ermöglicht jedoch sowohl die Plattformunabhängigkeit der entwickelten Applikation als auch die Einbindung von Programmklassen und Bibliotheken, die mit anderen Programmiersprachen entwickelt wurden. So wurde der AWML-Parser im Rahmen der Nexus-Forschergruppe mit Java entwickelt. Der Java-Quellcode kann mit Hilfe eines Konverters in eine DLL umgewandelt werden, wodurch in der .NET-Entwicklungsumgebung die volle Funktionalität des Programmbausteins zur Verfügung steht. C# ermöglicht somit die reibungslose Einbindung sowohl von Java-Klassen als auch der zuvor bereits entwickelten C++-Komponenten.

Ein C#-Projekt setzt konsequent objektorientierte Programmierung voraus: Jedwede Funktionalität muss in Methoden und Klassen gekapselt werden. Methoden und Klassen besitzen Übergabeparameter und Rückgabewerte. Für die Implementierung eines agentenbasierten ZA eignet sich die objektorientierte Programmierung somit in optimaler Weise. Ein Agent wird dabei als eine Klasse mit Methoden und Feldern implementiert, die alle denkbaren Eigenschaften eines Fußgängers kapselt.

Auch eine modulübergreifende Verwendung eines Agenten ist problemlos möglich [Haklay et al. 2001]. Auf der taktischen bzw. operationalen Ebene kann ein Agent Werkzeuge zur Durchführung und Dokumentation der Bewegung enthalten. Relevante Parameter sind hierbei beispielsweise aktuelle Zeit, Position, Geschwindigkeit und Richtung. Aber auch die strategische Ebene kann vollumfänglich Berücksichtigung finden: geplante Aktivitäten,

Wunschgeschwindigkeit, Ansprüche an die Wegebeschaffenheit oder Bildungsmethoden für Aktivitätenketten sind einige der relevantesten Werkzeuge. Die konsequente Objektorientierung erleichtert somit ganz erheblich eine spätere Erweiterung des Programmcodes um weitere Eigenschaften.

### **4.3 Aufbereitung der Umgebungsgeometrie**

Um das als AWML-Datei repräsentierte Ergebnis einer Gebietsanfrage an den *Nexus Spatial Model Server* (vgl. Abschnitt 3.3) als geometrische Datengrundlage für die Simulationsumgebung verwenden zu können sind mehrere Aufbereitungsschritte erforderlich. So müssen zunächst die in Textform repräsentierten Umgebungsmodellldaten mit Hilfe eines Parsers in eine simulationsumgebungsinterne Datenhaltung überführt werden.

Für die Anwendbarkeit eines ZA muss die Vektorgeometrie sodann diskretisiert werden. Zudem sind die Eigenschaften der geometrischen Objekte jeder einzelnen Zelle innerhalb des Objekts zuzuweisen. Um diese recht zeitaufwändigen Rechenschritte nicht vor jedem einzelnen Simulationslauf durchführen zu müssen, erscheint zudem eine Sicherung der diskreten Ergebnismenge sinnvoll. Vorgenannte Schritte werden nachfolgend eingehender erläutert.

#### **4.3.1 Import von AWML-Dateien in die Simulationsumgebung**

Der Import von AWML-Dateien erfolgt ausgehend vom Hauptfenster des Simulationsframeworks. Die Teilanwendung überführt die in der AWML-Datei im ASCII-Format vorliegenden Geometriedaten in eine für die Simulationsumgebung geeignete Datenhaltung. Zur Kontrolle des erfolgreichen Imports wird der Vektordatensatz grafisch ausgegeben sowie ein Logfile zur Dokumentation der Datenhaltung erstellt.

Ein Parser für das AWML-Format wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Nexus“ mit der Programmiersprache Java 1.5 entwickelt. Mit Hilfe des Tools „ikvmc.exe“ [Frijters 2004] können die Java-Quelldateien in eine CIL-kompatible DLL übersetzt werden, wodurch in der .NET-Entwicklungsumgebung die volle Funktionalität bereitgestellt werden kann. Diese bemerkenswerte Durchgängigkeit unterschiedlicher Programmiersprachen wurde erst durch den .NET-Standard möglich, welcher nun mit der erstmals in Microsofts Visual Studio 2005 veröffentlichten Version 2.0 die meisten anfänglichen Schwächen überwunden hat.

Nach Aufruf der Teilanwendung holt der AWML-Parser mit Hilfe der jeweiligen URLs zunächst Informationen über die aktuell gültigen Nexus Typen, Attribute und Klassen ein. Dies geschieht zur Laufzeit des Programms, wes-

halb jederzeit auf die aktuell gültigen Nexusdefinitionen zugegriffen wird. Anschließend wird damit ebenfalls zur Laufzeit dynamisch die Schemadatei erstellt. Mit diesen Randbedingungen kann nun der Datenstrom einer beliebigen AXML-Datei gelesen werden.

Nach dem erfolgreichen Öffnen eines Input-Datenstroms wird für die Datenerhaltung innerhalb der Simulationsumgebung unmittelbar ein Datencontainer in Form einer Liste von Objekten mit dynamischer Größenzuweisung erzeugt (.NET Framework-Klasse: ArrayList). Eine Schleife durchläuft mit Hilfe eines Iterators der Ergebnismenge des Input-Datenstroms alle enthaltenen generischen Nexus-Objekte und erzeugt für jedes Objekt einen Hashtable. Dies ist eine Liste, bei der jedes Attribut unter einem Bezeichner abgelegt werden kann (siehe Abb. 4-2). Nachfolgend seien die wichtigsten Attribute sowie die von diesen annehmbaren Werte erläutert:

- „type“: Typ des Nexus-Objekts. Der Typ „FootTrafficObject“ weist auf eine vorwiegende Verwendung im Zusammenhang mit Fußwegegeometrien hin. Es können jedoch auch andere geometrische Objekte Verwendung finden, sofern sie das nachfolgende Attribut aufweisen.
- „walkable“: Gibt Auskunft über die Begehbarkeit. Boolesche Variable, kann die Werte „true“ oder „false“ annehmen.
- „faceType“: Art der Oberfläche, beispielsweise „Wiese“, „Weg“ oder „Bebauung“.
- „pos“: Position bzw. Ankerpunkt des geometrischen Objekts in Form eines Koordinatenpaars.
- „extent“: Dieses Attribut gibt nicht nur Auskunft über die Ausdehnung der Fläche, sondern auch über die Art des geometrischen Objekts. Die Klasse CGeometry dieses Attributs kapselt daher alle WKT-Konventionen.
- „kind“: Dieses wichtige Nexus-Attribut signalisiert, ob es sich hierbei um ein Realweltobjekt („real“) oder ein virtuelles („virtual“) Objekt der Augmented World im Sinne von Nexus handelt. Im Zusammenhang mit der Fußwegegeometrie ist es jedoch nur von nachgeordneter Bedeutung.
- „nol“: Nexus Object Locator. Eindeutige Adresse eines Nexus-Objekts.

Weitere Attribute sind im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Fußwegegeometrie ohne Belang, weshalb in dieser Stelle hierauf nicht weiter eingegangen wird.

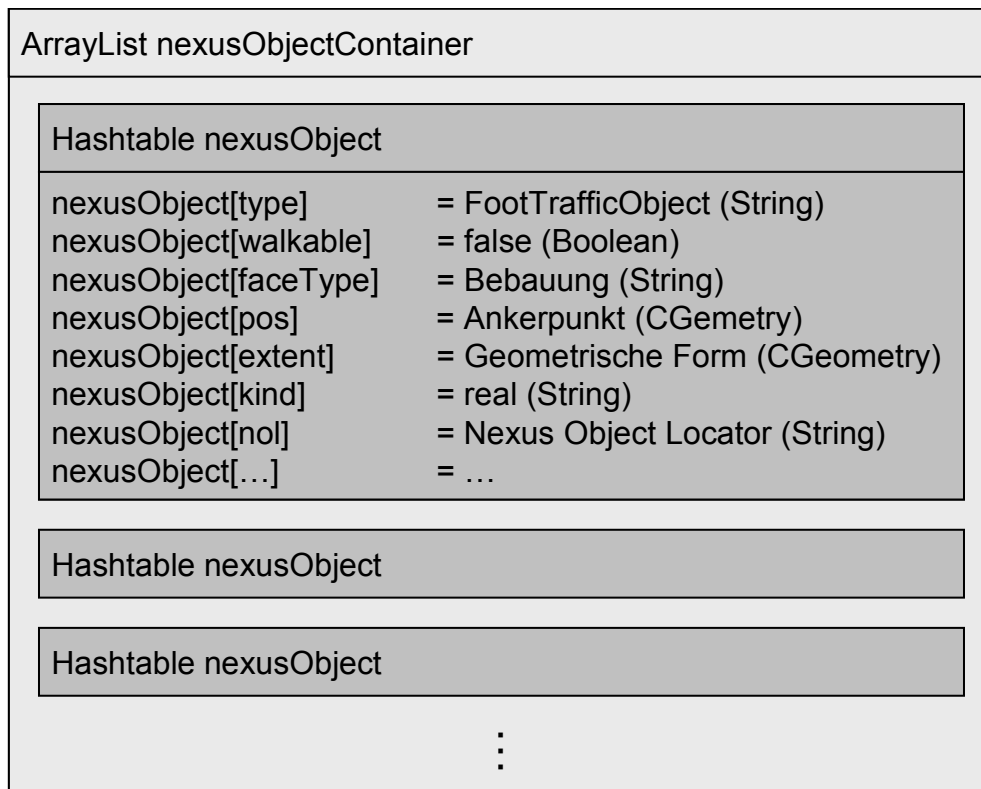


Abb. 4-2: Struktur der internen Datenhaltung

Vor der eingangs zu diesem Abschnitt aufgeführten graphischen Ausgabe der Vektordatensätze wird mittels der Überprüfung aller Koordinaten die Größe der Zeichnungsfläche ermittelt, ein lokales Koordinatensystem definiert und die Transformation für den lokalen Koordinatenursprung dokumentiert. Dieses lokale Koordinatensystem kommt auch bei allen weiteren Aufbereitungsschritten der Geometrie zur Anwendung.

#### 4.3.2 Diskretisierung der Vektordaten

Zur Realisierung des zeit- und raumdiskreten Ansatzes eines zweidimensionalen ZA ist es erforderlich, die üblicherweise in Form von Vektordaten vorliegende Umgebungsgeometrie zu diskretisieren. Darüber hinaus muss die mit den Grenzlinien der Flächen verbundene Information über die Art der Fläche jeder einzelnen Zelle des diskreten Raumes zugewiesen werden.

Da jedes digitale Ausgabegerät im Gegensatz zu einer analytisch beschriebenen geometrischen Figur nur über eine endliche Zahl an Bildpunkten verfügt, ist die Diskretisierung von Vektordaten fester Bestandteil eines jeden Computersystems. Üblicherweise sind die hierfür erforderlichen Algorithmen jedoch in der Hardware, beispielsweise in den Prozessoren einer Grafikkarte untergebracht, so dass diese Funktionalität für eine explizit diskrete Datenhaltung neu zu implementieren ist.

Der gängigste zu diesem Zweck entwickelte Algorithmus ist nach seinem Schöpfer Jack Bresenham benannt. Die hohe Effizienz des Verfahrens ergibt sich daraus, dass es völlig ohne Gleitkommazahlen auskommt. Als Eingangsparameter müssen lediglich die Start- und Zielkoordinaten einer jeden Linie bekannt sein. Für das vorliegende Projekt wurde der Bresenham-Algorithmus in der Entwicklungssprache C# neu implementiert und an die Erfordernisse der Simulationsumgebung angepasst. Die Vektordaten werden direkt aus der internen Datenhaltung übernommen und auf das in Abschnitt 4.2 ausgeführte lokale Koordinatensystem bezogen.

Unabhängig von der optimalen Zellgröße mit 0,4 m Kantenlänge (vgl. Abschnitt 2.2.6.1) kann diese frei gewählt werden. Die Informationen über den Inhalt der einzelnen Zellen werden aus dem Attribut „faceType“ der Geometrieobjekte bezogen, zahlencodiert (Abb. 4-7) und in einem zweidimensionalen Byte-Array abgelegt. Die Dimensionen des Byte-Arrays entsprechen der erforderlichen Anzahl an Zellen in horizontaler und in vertikaler Richtung.

Der Vorteil des Verzichts auf Gleitkommazahlen beim Bresenham-Algorithmus wird durch einen Rundungsfehler erkaufte. Dieser ist bei der feingranularen Darstellung auf einem Monitor vertretbar, zumal bei anspruchsvollen Visualisierungen auch heute noch der Berechnungsaufwand eine große Rolle spielt. Bei der Umlegung der Umgebungsgeometrie auf einen diskreten Raum mit einer Auflösung oberhalb des Dezimeterbereichs sind diese Rundungsfehler jedoch erheblich.

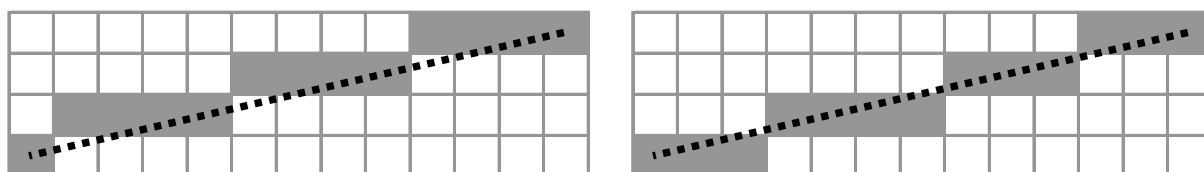


Abb. 4-3: Diskretisierung einer punktiert dargestellten Linie mit dem Bresenham-Algorithmus (links) und einem trigonometrischen Algorithmus (rechts).

So inkrementiert der Bresenham-Algorithmus den kleineren der beiden Achsenabschnitte zwischen Start- und Zielpunkt, sobald dieser den nächsten ganzzahligen Wert überschritten hat (Abb. 4-3, links). Die markierten Zellen stellen somit nicht die optimale Näherung der betrachteten Linie dar. Um die bestmögliche Diskretisierung zu erhalten, ist eine mathematische Rundung des Gleitkommawertes des entsprechenden Achsenabschnittes erforderlich. Hierzu wurde ein Algorithmus implementiert, der mit Hilfe einer trigonometrischen Funktion die erforderlichen Achsenabschnitte ermittelt. Ist der x-

Achsenabschnitt zwischen Startzelle S und Zielzelle Z größer als der y-Achsenabschnitt, so gilt für jeden Punkt  $(x_i, y_i)$  auf der Verbindungslinie zwischen S und Z:

$$x_i = x_s + \Delta x_i \cdot inc_x \quad [4-1]$$

$$y_i = y_s + \text{round}(\tan_{zS} \cdot \Delta x_i \cdot inc_x), \text{ mit} \quad [4-2]$$

$$\tan_{zS} = \frac{y_z - y_s}{x_z - x_s} \quad [4-3]$$

Ist der entsprechende y-Achsenabschnitt größer, so gilt entsprechend für jeden Punkt  $(x_i, y_i)$  auf der Verbindungslinie zwischen S und Z:

$$y_i = y_s + \Delta y_i \cdot inc_y \quad [4-4]$$

$$x_i = x_s + \text{round}(\cot_{zS} \cdot \Delta y_i \cdot inc_y), \text{ mit} \quad [4-5]$$

$$\cot_{zS} = \frac{x_z - x_s}{y_z - y_s} \quad [4-6]$$

Bei den Formeln [4-2] und [4-5] steht die Funktion  $\text{round}()$  für die ganzzahlige mathematische Rundung des resultierenden Achsenabschnitts.  $\Delta x_i$  bzw.  $\Delta y_i$  stehen für den entsprechenden Teilachsenabschnitt ausgehend vom Startpunkt S  $(x_s, y_s)$ . Durch die Berücksichtigung des Vorzeichens der Achsenabschnitte  $x_z - x_s$  bzw.  $y_z - y_s$  über  $inc_x = \{-1, 0, 1\}$  bzw.  $inc_y = \{-1, 0, 1\}$  und der Verwendung der vorzeichenbehafteten trigonometrischen Funktion Tangens und Kotangens kann auf eine Fallunterscheidung für die vier Quadranten verzichtet werden.

Mit diesem trigonometrischen Algorithmus wird bei einem vernachlässigbar größeren Berechnungsaufwand bezogen auf den Bresenham-Algorithmus im Zuge der Diskretisierung die größtmögliche Abbildungsgenauigkeit erzielt.

### 4.3.3 Automatische Zuweisung der Flächeneigenschaft an jede Zelle

Mit Abschluss der Diskretisierung der Vektordaten verfügen lediglich die die Grenzlinien repräsentierenden Zellen über die relevanten Flächeninformationen. Zur Erzeugung eines vollständigen geometrischen Grundfeldes (Geometric Floor Field, GFF) muss nun den innerhalb einer Fläche liegenden Zellen mit geeigneten Füllalgorithmen die Eigenschaft der Grenzlinien ebenfalls zugewiesen werden.

Dabei handelt es sich um ein Problem von erheblicher Komplexität, insbesondere wenn Flächen in geschachtelter Form vorliegen, was bei vorliegender Aufgabenstellung häufig der Fall sein kann. Im Wesentlichen können zwei verschiedene Verfahren unterschieden werden:

- Floodfill-Algorithmus: Ausgehend von einer Initialisierungszelle werden alle horizontalen und vertikalen leeren Nachbarzellen befüllt (sog. „4-Neighbour-Floodfill“ Algorithmus). Anschließend wird dieser Algorithmus auf alle soeben gefüllten Zellen angewandt. Nur über diagonale Nachbarschaftsbeziehungen zu einer Fläche gehörende Zellen bleiben bei dieser Implementierung unberücksichtigt (Abb. 4-4). Diesem Problem wird beim „8-Neighbour-Floodfill“ Algorithmus durch die zusätzliche Berücksichtigung der diagonalen Zellen Rechnung getragen. Hierbei besteht dann allerdings die Gefahr, dass nur durch diagonal aneinander stoßende Zellen begrenzte Flächen während des Füllvorgangs über den zu füllen beabsichtigten Bereich hinaus „auslaufen“. Dieses für bereits diskretisierte Geometrien optimal geeignete Verfahren birgt allerdings auch zwei schwerwiegende Nachteile. Zum einen eignet es sich nicht für die automatische Zuweisung der Zelleigenschaften, da zur Initialisierung immer eine Zelle im Inneren der Fläche benötigt wird. Zum anderen ist der Algorithmus hoch rekursiv, wobei viele Rekursionsaufrufe bereits gefüllter Zellen überflüssig sind.

```
void fill4(int x, int y)
{
    if (getPixel(x, y) == alteFarbe)
    {
        markierePixel(x, y, neueFarbe);

        fill4(x, y + 1);
        fill4(x, y - 1);
        fill4(x + 1, y);
        fill4(x - 1, y);
    }
    return;
}
```

Abb. 4-4: Der 4-Neighbour-Floodfill-Algorithmus



- **Scan-Line-Algorithmus:** Eine horizontale Scanlinie wird Zeile für Zeile durch die gesamte zur füllende Fläche bewegt. Dabei werden die Schnittpunkte zwischen der Scanlinie und den Polygonkanten berechnet. Beim erstmaligen Schneiden einer Polygonkante wird eine Fläche betreten, am zweiten Schnittpunkt wird die Fläche wieder verlassen. Im Beispiel der Abb. 4-5 liegen somit die Segmente  $(x_1, x_2)$  und  $(x_3, x_4)$  der Scanlinie innerhalb des Polygons. Dabei sind allerdings einige Sonderfälle zu beachten, für die geeignete Fallunterscheidungen vorzusehen sind. Trifft die Scanlinie beispielsweise auf einen Eckpunkt, von dem aus beide Linien nach oben bzw. nach unten verlaufen, so wird die Fläche an diesem Punkt weder betreten (äußerer Eckpunkt, siehe Scanlinie 3 in Abb. 4-5) noch verlassen (einspringender Eckpunkt). Verläuft von einem Eckpunkt eine Linie jedoch nach oben und eine nach unten, so ist der Schnittpunkt wie ein Schnittpunkt mit einer Kante des Polygons zu behandeln (siehe Scanlinie 2).

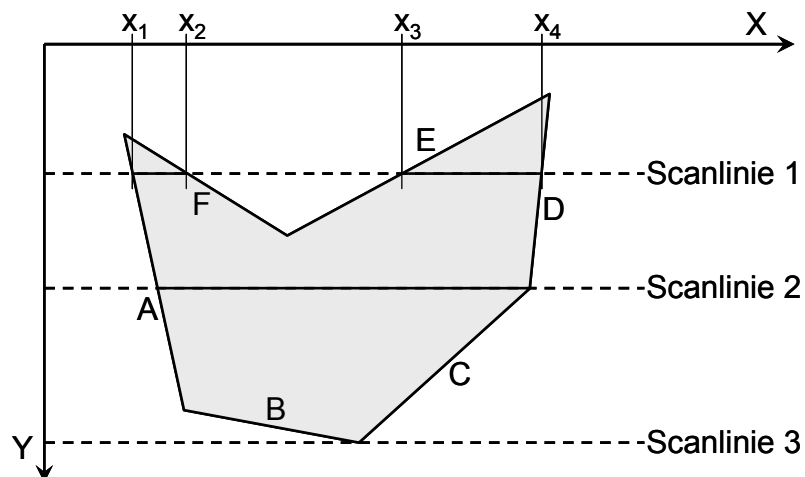


Abb. 4-5: Prinzip des Scan-Line-Algorithmus

Zur Initialisierung des Füllvorgangs sind beim Scan-Line-Algorithmus keine bekannten Punkte im Inneren der Polygone erforderlich, weshalb dieser sich für die automatisierte Zuweisung der Eigenschaften an die Zellen des diskretisierten Raums als geeigneter erwies. Da er sich konzeptionell jedoch auf die vektorielle Darstellung von Polygonzügen bezieht, waren für die Anwendung im Zusammenhang mit diskretisierten Geometrien einige wesentliche Adaptionen erforderlich, auf die im Weiteren ausführlicher eingegangen werden soll.

Durch die Diskretisierung der Kanten der Polygonzüge entstehen sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung Kantensegmente, die den Innenraum eines geschlossenen Polygons bzw. die Fläche außerhalb des Polygons

lediglich tangieren (Abb. 4-6). Zunächst wurden Anstrengungen unternommen, ausgehend von den Eckzellen alle zusammenfallende Linien repräsentierenden Zellen, bzw. Flächenabschnitte mit unmittelbar nebeneinander liegenden Begrenzungsstellen rekursiv zu ermitteln. Dieses scheiterte jedoch daran, dass durch die Möglichkeit der Berührung unterschiedlicher Polygonzüge keine allgemeingültigen Abbruchbedingungen formulierbar sind.

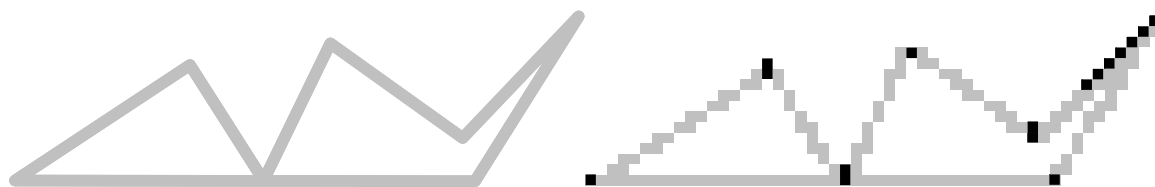


Abb. 4-6: Vektorgrafik (links) und diskretisierte Darstellung mit Singularitätsstellen (schwarz eingefärbt)

Daher werden in einem ersten Arbeitsschritt diese Singularitätsstellen nun im Zuge der Diskretisierung der Kanten durch Überwachung von Mehrfacheditierungen derselben Zelle, bzw. von horizontal unmittelbar benachbarten, jedoch zu unterschiedlichen Linien gehörenden Zellen mit derselben Flächeneigenschaft identifiziert. Durch dieses Verfahren werden insbesondere im spitzen Winkel aufeinander zulaufende Linien repräsentierende Zellen, die unter Umständen unmittelbar nebeneinander stehen bzw. direkt zusammenfallen zuverlässig gekennzeichnet.

Allein hierdurch können jedoch nicht alle Singularitätsstellen zuverlässig identifiziert werden, bzw. es werden auch Zellen markiert, die bei horizontaler Anwendung des Scan-Line-Algorithmus keine Singularitätsstellen darstellen. Daher werden in einem weiteren Arbeitsschritt für Eckzellen zusätzliche Kodierungen eingeführt, bzw. teilweise bereits als Singularitätsstelle gesetzte Kodierungen ersetzt. Aus Abb. 4-7 wird ersichtlich, dass die Ziffern 0 bis 9 für die Kodierung des Oberflächentyps reserviert sind. Die Ziffern 10 bis 90 dienen der Kodierung des Knotenzellentyps, wobei hier folgende Unterscheidungen vorgenommen werden:

- 10: Singularitätsstelle. Tritt ein, sofern von der betrachteten Zelle aus die vertikalen Vektoren beider anschließenden Linien nach oben bzw. nach unten verlaufen.
- 20: Eine Linie verläuft nach oben, die andere Linie nach unten. Im weiteren Verlauf ist diese Zelle wie eine gewöhnliche Zelle im Verlauf einer Polygonkante zu behandeln.

- 30 und 50: Erste Linie verläuft horizontal, zweite Linie verläuft nach oben bzw. reziprok. Treten diese Zellen im Verlauf einer horizontalen Kantensektion gemeinsam auf, so ergibt sich eine Singularität.
- 40 und 60: Erste Linie verläuft horizontal, zweite Linie verläuft nach unten bzw. reziprok. Treten diese Zellen im Verlauf einer horizontalen Kantensektion gemeinsam auf, so ergibt sich ebenfalls eine Singularität.
- 70: Knotenzelle in einer horizontal verlaufenden Kantensektion. Für die Ermittlung der Singularitätsstellen ohne Relevanz.

Die Zellkodierung im Zuge der Diskretisierung der Kanten mit Hilfe des Bresenham-Algorithmus ist damit abgeschlossen.

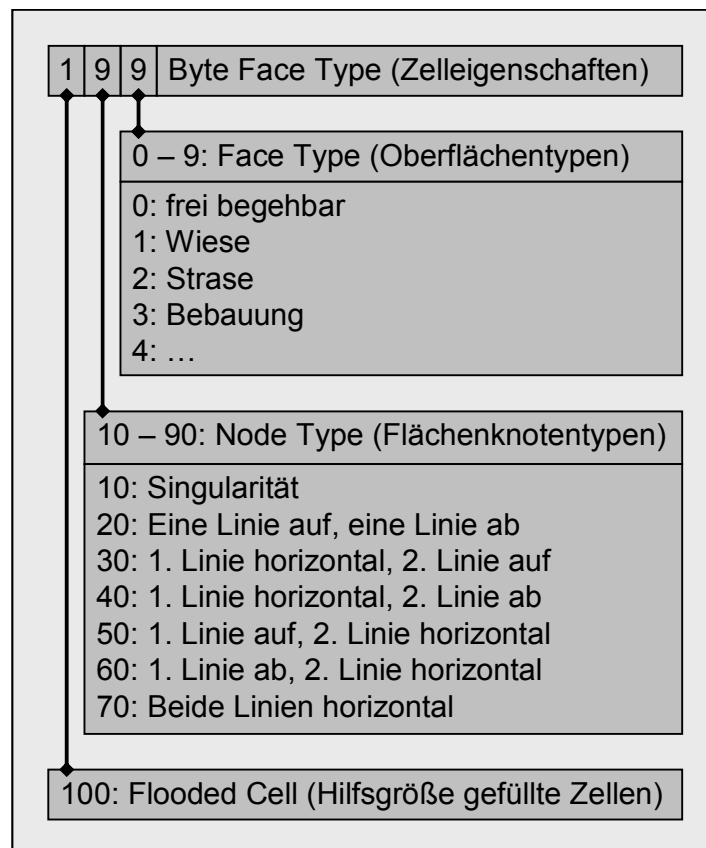


Abb. 4-7: Kodierung der Zelleigenschaften des diskreten Raums

Eine sich hieran anschließende Funktion hat zur Aufgabe, mit Hilfe der unterschiedlichen Kodierungen der Knotenzellen alle letztlich für den automatischen Befüllvorgang relevanten Singularitätsstellen zu identifizieren. Die im Verlauf eines horizontalen Kantensegments unter Umständen mehrfach auftretende Information über eine Singularitätsstelle wird abschließend immer der in Scanrichtung letzten Zelle eines horizontalen Kantensegments zugeordnet, wodurch die Zahl der Abfragen während des sich anschließenden eigentlichen Füllvorgangs drastisch reduziert werden kann. Bis auf die Ko-

dierung „10“ für eine Singularität werden alle Kodierungen wieder auf den reinen Oberflächentyp (Werte 0 bis 9) zurückgesetzt.

In der Funktion zur Zuweisung der Flächeninformation an die einzelnen Zellen wird erneut die gesamte Fläche Zeile für Zeile durchlaufen. Zu Beginn einer jeden Zeile wird ein Byte zur Speicherung der Zelleigenschaft deklariert, sowie ein Bytestapel, in den die Zelleigenschaften geschachtelter Flächen abgelegt werden (Abb. 4-8). Drei mit „falsch“ initialisierte boolesche Operatoren haben folgende Funktion:

- Singularität: Wahr, wenn aktuelles horizontales Kantensegment eine Fläche lediglich tangiert, jedoch weder betritt noch verlässt.
- Anfangskante: Wahr, wenn aktuelles horizontales Kantensegment eine Fläche beginnt.
- Endkante: Wahr, wenn aktuelles horizontales Kantensegment eine Fläche abschließt.

Sobald eine Zelle die Zusatzkodierung „10“ aufweist, wird der boolesche Operator „Singularität“ auf „wahr“ und die Kodierung wieder auf den reinen Oberflächentyp gesetzt. Anschließend werden vier Hauptfälle unterschieden:

- Aktuelle Zelle gehört zur Kante einer Fläche und Vorgängerzelle zum Inneren einer Fläche.
- Aktuelle Zelle und Vorgängerzelle sind Kanten unterschiedlicher Flächen.
- Aktuelle Zelle und somit das aktuelle horizontale Kantensegment repräsentieren eine Singularität.
- Aktuelle Zelle ist leer.

Bei den ersten beiden Hauptfällen wird in Abhängigkeit von der jeweils nachgeordneten Bedingung gemäß Abb. 4-8 im Fall einer neu beginnenden Fläche die Eigenschaft der aktuellen Zelle auf den Stapel gelegt sowie dem Byte „Zelleigenschaft“ zugewiesen. Im Fall einer endenden Fläche wird der oberste Wert, also die Eigenschaft der endenden Fläche vom Bytestapel genommen und anschließend der darunter liegende Wert dem Byte „Zelleigenschaft“ zugeordnet.

Liegt eine Singularität vor, so müssen die vorigen Prozessschritte korrigiert werden, da dann im Falle einer Anfangskante eine neue Fläche eben nicht betreten bzw. im Falle einer Endkante eben nicht verlassen wird. Der letzte Hauptfall repräsentiert den eigentlichen Zuweisungsvorgang. Im Falle einer leeren Zelle wird ihr der aktuelle Wert aus dem Byte „Zelleigenschaft“ zuzüglich der Hilfskodierung „100“ (siehe Abb. 4-7) zugewiesen.



Diese Hilfskodierung ist erforderlich um diejenigen Stellen an denen eine zu einer Kante gehörende Zelle auf eine zum Inneren einer Fläche gehörende Zelle gleicher Eigenschaft unmittelbar folgt eindeutig identifizieren zu können. Nach Abschluss des Füllvorgangs wird diese Hilfskodierung wieder entfernt.

Das für den Anwender ausgesprochen komfortable Verfahren der automatische Zuweisung der Zelleigenschaften unterliegt zwei wesentlichen Einschränkungen. Erstens kann es nur auf geschlossene Flächen angewandt werden. Durch die Anwendung auf den diskretisierten Raum ist es zwar ohne Belang, ob diese geschlossenen Flächen durch einen geschlossenen Polygonzug oder durch mehrere Linien desselben Typs erzeugt werden.

Flächen, die durch unterschiedliche Begrenzungskanten verschiedener Objekte aufgespannt werden, können jedoch nicht automatisch erkannt werden. Zweitens besteht die Gefahr, dass aufgrund der groben Rasterung des Raumes von im Regelfall 0,4 m Zellkantenlänge (vgl. Abschnitt 2.2.6.1) feingranulare Strukturen verschluckt werden und sich unterschiedliche Begrenzungslinien überlagern. Gehen dadurch Begrenzungszellen verloren, so kommt es bei der automatischen Zuweisung der Zelleigenschaften zwangsläufig zu Fehlern.

Um die Fehlertoleranz gegenüber komplexeren Umgebungsgeometrien zu erhöhen, ist daher auch die Möglichkeit der manuellen Eigenschaftszuweisung vorzusehen. Hierfür kommen dem Floodfill-Algorithmus vergleichbare Verfahren zum Einsatz, bei denen der Anwender eine Eigenschaft einer durch unterschiedliche Kanten begrenzten Fläche manuell zuweisen muss.

### **4.3.4 Sicherung des geometrischen Grundfeldes**

Das Einlesen unterschiedlicher Umgebungsgeometrieformate ist meist ein recht rechenintensiver und somit zeitaufwändiger Vorgang. Zudem wird insbesondere beim Parsen von AWML-Dateien online auf Ressourcen zugegriffen, die nicht immer und überall verfügbar sein müssen. Daher wird das zweidimensionale, den diskreten Raum repräsentierende Bytefeld als Bytestream in einer Datei abgelegt. Als geometrisches Grundfeld für die eigentlichen Simulationsoperationen kann somit anstelle eines externen Datenformats ein bereits erzeugtes Importergebnis eingelesen werden.

Hierbei erwähnenswert ist die Tatsache, dass während des Speichervorgangs am Ende jeder Zeile ein zusätzliches Byte mit der Kodierung 255 eingefügt wird, um im Zuge eines späteren Ladevorgangs die Dimensionen des den diskretisierten Raum repräsentierenden zweidimensionalen Bytefeldes automatisch ermitteln zu können. Dementsprechend markiert dieses Byte beim

Schreiben des Datenstromes den Zeilenumbruch, wobei es dabei selbst naturgemäß nicht geschrieben werden darf.

## **4.4 Implementierung eines Zellulären Automaten**

### **4.4.1 Parametrisierung der Quell-Ziel-Relationen**

Die unmittelbare Simulation von Fußgängerverkehrsabläufen findet in der Verkehrsplanung ihre Entsprechung in der letzten Stufe des Vier-Stufen-Algorithmus' zur Ermittlung des Verkehrsaufkommens, welcher die Schritte Erzeugung ausgehend von den vorhandenen Verkehrsbedürfnissen, Verteilung auf Quell-Ziel-Relationen, Aufteilung auf verschiedene Verkehrsträger und die Umlegung auf die vorhandenen Netze umfasst (vgl. Abschnitt 1.2). Somit setzt sie die Bekanntheit von Quell- und Zielpunkten sowie der zwischen diesen bestehenden Verkehrsstärken voraus.

Im Rahmen des vorliegenden Simulationsframeworks werden die relevanten Quell- und Zielzellen auf Basis des geometrischen Grundfeldes festgelegt. Zum Zeitpunkt der grafischen Festlegung werden ihre Koordinaten jeweils in einem Objektcontainer für Quell- bzw. Zielpunkte gespeichert. Zudem werden sie in eine Textdatei geschrieben in der außerdem eine zunächst nicht zugewiesene Quell-Ziel-Matrix mit den Dimensionen  $[Q \times Z]$  der Anzahl der Quellen  $Q$  und der Ziele  $Z$  erzeugt wird. Anschließend können dieser Matrix beliebige relative oder absolute Verkehrsstärken zugewiesen werden. Außerdem ist die erneute Editierung der Quell- und Zielpunktkoordinaten möglich.

Wird die Textdatei geladen, so werden die Quell- und Zielpunktkoordinaten erneut den jeweiligen Objektcontainern zugewiesen. Zudem wird die Quell-Zielmatrix in der im Beispiel der Tab. 4-1 dargestellten Form modifiziert, indem über die Zeilen die Summenhäufigkeit gebildet und mit der Gesamtsumme normiert wird.

Während mit den Koordinaten der Zielzellen im weiteren Verlauf die Generierung der statischen Grundfelder initialisiert wird (siehe Abschnitt 4.4.2), werden mit Hilfe der normierten Quell-Ziel-Matrix den Agenten bei ihrer Erzeugung jeweils eine Quell-Ziel-Relation zugewiesen (siehe Abschnitt 4.4.2.5).

	Q1	Q2	Q3	Q4	$\Sigma$
Z1	45	75	35	10	<b>165</b>
Z2	15	30	85	45	<b>175</b>
Z3	55	40	15	15	<b>125</b>
$\Sigma$	<b>115</b>	<b>145</b>	<b>135</b>	<b>70</b>	<b>465</b>

	Q1	Q2	Q3	Q4
Z1	45	120	155	165
Z2	180	210	295	340
Z3	395	435	450	465

	Q1	Q2	Q3	Q4
Z1	0,0968	0,2581	0,3333	0,3548
Z2	0,3871	0,4516	0,6344	0,7312
Z3	0,8495	0,9355	0,9677	1,0000

Tab. 4-1: Ermittlung der normierten Summenhäufigkeit einer Quell-Ziel-Matrix

#### 4.4.2 Navigation der Agenten

Da sich bei den meist nur wenige hundert Meter langen Fußwegen zwischen verschiedenen alltäglichen Aktivitätsorten die Wegewahl in erster Linie an den lokalen Gegebenheiten der Fußwegegeometrie orientiert, wurde an Stelle eines eigenständigen Navigationsmoduls die Wegewahl der Agenten auf mikroskopischer Ebene mit Hilfe von statischen Grundfeldern (Static Floor Field, SFF) realisiert. [Klüpfel 2003]. Diese Grundfelder entwickeln sich ausgehend von einer Zielzelle ähnlich einem Potential entsprechend der Ausbreitungsregeln gleichförmig über den gesamten begehbaren Bereich der betrachteten Fläche.

Individuell unterschiedliche Präferenzen hinsichtlich der Wegewahl (vgl. Abschnitt 2.1.1.3) können im Vorfeld eines Simulationslaufs in unterschiedlichen statischen Grundfeldern Eingang finden, welche merkmalsabhängig den Agenten zugewiesen werden. Dadurch kann die Zahl der unbekanntem, empirisch schwer belegbaren Parameter klein, der zu Grunde liegenden Regelsatz einfach und damit die Simulationsgeschwindigkeit hoch gehalten werden. Hinsichtlich der Ausbreitungsregeln bei der Implementierung der statischen Grundfelder wurden verschiedene Ansätze verfolgt, die nachfolgend eingehender erläutert werden.



#### 4.4.2.1 Anisotrope statische Grundfelder

Im einfachsten Fall wird jeweils allen an eine Zelle mit einem bestimmten Potentialwert diagonal und orthogonal unmittelbar anschließenden und begehbaren Zellen ein um den Wert 10 höheres Potential zugewiesen (siehe Abb. 4-9). Die Erhöhung erfolgt in 10er-Schritten, um auch im weiteren Verlauf noch mit ganzen Zahlen arbeiten zu können (vgl. Abschnitt 4.4.2.2 ff).

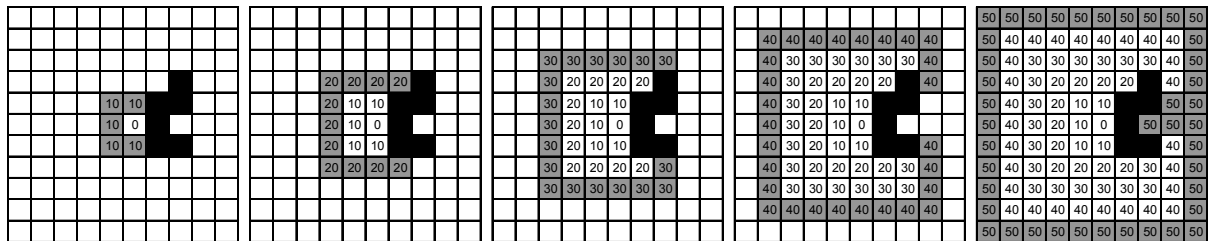


Abb. 4-9: Generierung eines anisotropen statischen Grundfeldes mit Hindernis (schwarze Zellen)

Ist dieser Vorgang für einen bestimmten Potentialwert für die gesamte zu betrachtende Fläche abgeschlossen und wurden noch nicht mit einem Potential versehene begehbare Zellen erkannt, wird der Potentialwert um einen Schritt erhöht und der Zuweisungsvorgang beginnt von neuem. Der Algorithmus endet, sobald der nächsthöhere Potentialwert keiner Zelle mehr zugewiesen werden kann. Durch die wesentlich geringere Zahl negativer Abfragen weist diese zweistufige Implementierung des Verfahrens eine erheblich höhere Rechengeschwindigkeit auf als eine zum gleichen Ergebnis führende Rekursion.

Bei dieser Implementierung ist der Potentialwert einer jeden Zelle äquivalent zur minimalen Anzahl der zur Erreichung des Ziels erforderlichen Zellübertritte (aus weiter oben erläuterten Gründen multipliziert mit Faktor 10<sup>1</sup>). Dabei kommt allerdings der anisotrope Charakter des einem zweidimensionalen ZA zu Grunde liegenden Quadratrasters voll zum Tragen (siehe Abb. 4-14, links), was zwangsläufig zu divergierendem Bewegungsverhalten in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung führen muss, wie durch die im weiteren Verlauf unter Anwendung unterschiedlicher Bewegungsalgorithmen durchgeführten Simulationsläufe eindeutig gezeigt werden kann.

#### 4.4.2.2 Pseudoisotrope statische Grundfelder

Grundsätzlich ist der beim Zellübertritt in diagonaler Richtung zurückgelegte Weg um die Quadratwurzel aus zwei länger als der Weg beim Zellübertritt in orthogonaler Richtung. Um den anisotropen Charakter der zunächst er-

läuterten Implementierung des statischen Grundfeldes zu entschärfen, wurde dieser Grundsatz bei der Zuweisung der Potentialwerte berücksichtigt.

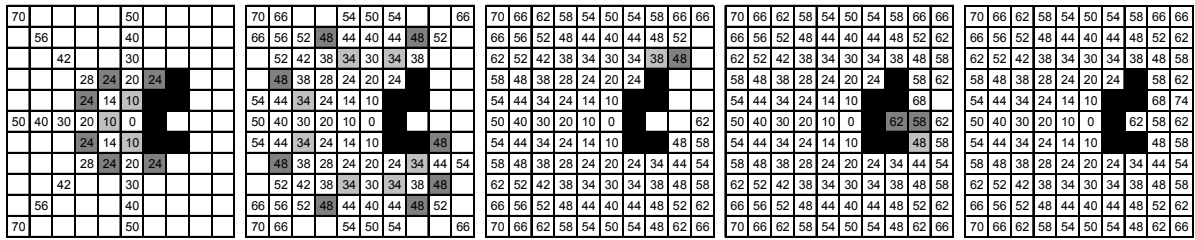


Abb. 4-10: Generierung eines pseudoisotropen statischen Grundfeldes mit Hindernis (schwarze Zellen)

Um weiterhin mit ganzen Zahlen arbeiten zu können, wird ausgehend von der Zielzelle allen Zellen in orthogonaler Richtung ein um 10 höherer Wert als der Vorgängerzelle zugewiesen und in diagonaler Richtung ein um 14 höherer Wert (siehe Abb. 4-10). Die Verwendung ganzer Zahlen führt gegenüber reellen Zahlen zu höheren Rechengeschwindigkeiten. Abbruchkriterien für die Wertzuweisung sind

- das Ende des Simulationsgebiets,
- eine nicht begehbare Zelle oder
- ein bereits zugewiesener Potentialwert, der nicht um mehr als 10 (bzw. 14) größer ist als der aktuell zu setzende Wert.

Das letztgenannte Kriterium kommt ausschließlich dort zum Tragen, wo nach einem Hindernis die begehbare Fläche wieder geschlossen wird. So wurde im vierten Bild von links in der Abb. 4-10 der grau hinterlegten Zelle mit dem Potentialwert 58 zunächst fälschlicherweise der Wert 78 zugewiesen.

Nach Abschluss eines Füllvorgangs ausgehend von einer bestimmten Zielzelle werden die Zellen mit dem nächst höheren Potentialwert und noch freien Nachbarzellen identifiziert (in Abb. 4-10 hellgrau hinterlegt). Sodann wird diesen unter Berücksichtigung der Zuweisungsregeln für orthogonale und diagonale Nachbarzellen ein Potentialwert zugewiesen (dunkelgrau hinterlegt) und beginnend mit letzteren erneut der soeben skizzierte Füllvorgang durchgeführt. Die Generierung des pseudoisotropen statischen Grundfeldes endet, sobald keine freien Nachbarzellen mehr identifiziert werden können.

Obwohl das erzeugte pseudoisotrope statische Grundfeld den theoretischen Ausbreitungseigenschaften eines äquidistanten Potentialfeldes bereits wesentlich näher kommt, entstehen ähnlich der anisotropen Implementierung Diskontinuitätsstellen, an denen sich die stets orthogonal zu den

Isopotentiallinien verlaufenden Falllinien vereinigen (vergleiche Abb. 4-14, Mitte). Hierdurch wird genau einer der bei einem Quadratraster zahlreich auftretenden gleich langen Wege zwischen Ausgangs- und Zielpunkt (Abb. 4-11) favorisiert, welcher in der Regel allerdings nicht dem real kürzesten Weg am nächsten kommt.

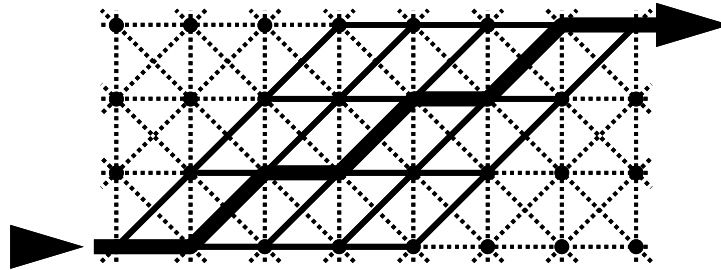


Abb. 4-11: „Manhattan Grid“ – Problem mit zugelassener diagonaler Bewegungsrichtung: Alle den durchgezogenen Linien folgenden Wege zwischen Quelle und Ziel sind gleich lang. Dicke durchgezogene Linie: Beste Annäherung an real kürzesten Weg.

Damit die von jeder begehbaren Zelle ausgehende Falllinie (bezogen auf den diskreten Raum ist dies der Pfad der größten Potentialunterschiede zwischen benachbarten Zellen) örtlich möglichst genau der real kürzesten Wegeverbindung entspricht, darf sich das Potential somit nicht entlang der in einem Quadratraster vorhandenen Zellübertrittsmöglichkeiten entwickeln, was die Implementierung des nachfolgend erläuterten analytischen Ansatzes erforderlich macht.

#### 4.4.2.3 Isotrope statische Grundfelder

Die theoretisch ideale Ausbreitung des Potentials ausgehend vom Zielpunkt erfolgt kreisförmig, vergleichbar dem Wellenschlag eines in eine glatte Wasseroberfläche geworfenen Steines. Unter der Annahme, das Potential an jedem Ort entspräche dem kürzesten Weg zum Zielpunkt gilt der bekannte Grundsatz:

$$P_{(x,y)} = \left| \vec{s}_{(x,y)} \right| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad [4-7]$$

Im Falle der ungehinderten Ausbreitung des Potentials wäre die Implementierung dieses Ansatzes denkbar einfach. Allerdings existieren in realen Umgebungsgeometrien zahlreiche Hindernisse, die ein Fußgänger umgehen muss. Die dabei entstehenden Brechungskanten müssen dann berücksich-

tigt werden. Dies bedeutet, dass für jede Zelle die kürzeste Verbindung zur Zielzelle bzw. zur nächsten Brechkante diskret ermittelt und die Begehbarkeit der dazwischen liegenden Zellen überprüft werden muss. Um Rundungsfehler zu vermeiden, müssen die Potentialwerte nun zudem als Gleitkommazahlen zugewiesen werden.

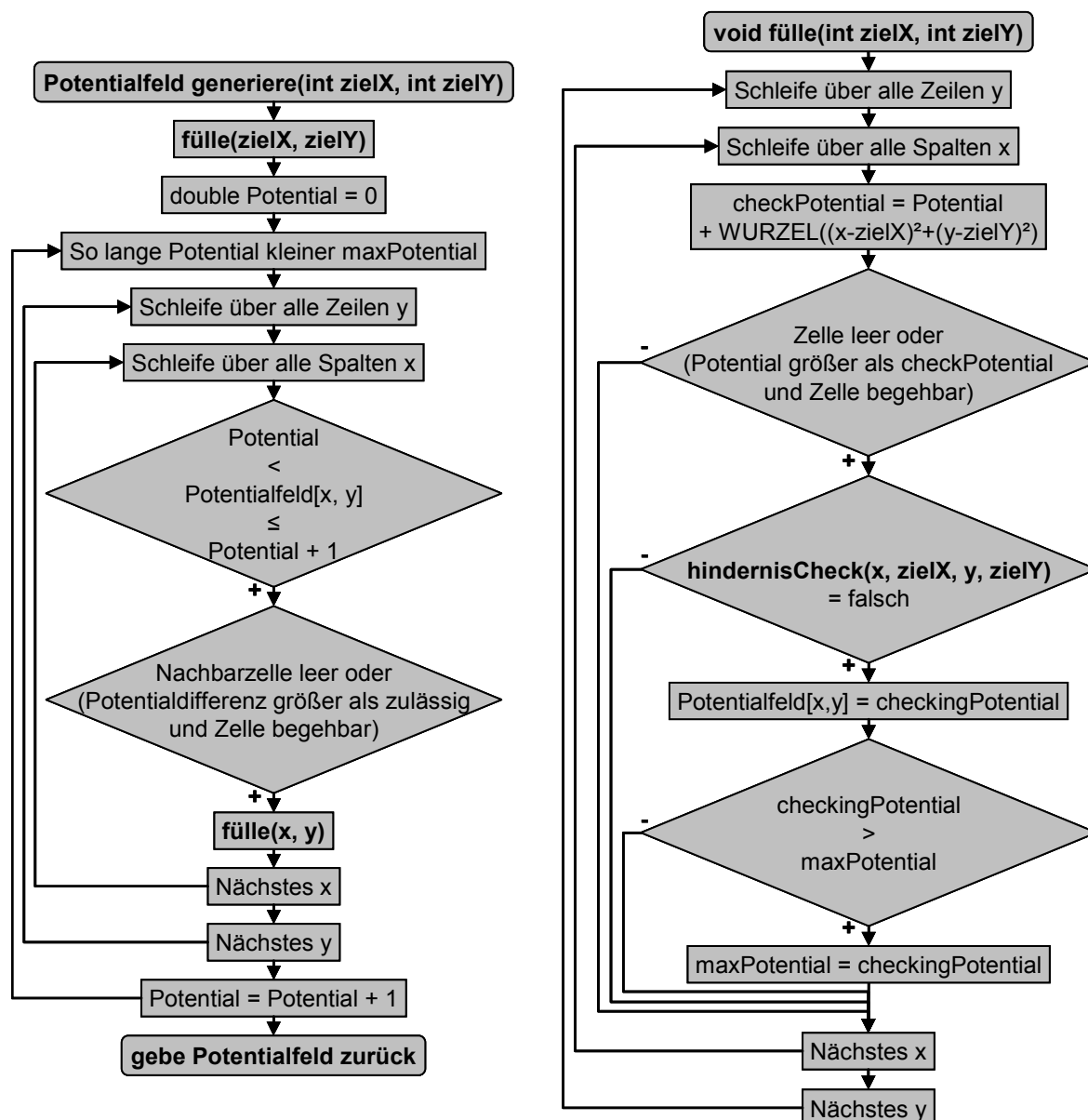


Abb. 4-12: Methoden „generiere“ und „fülle“ zum Erzeugen isotroper statischer Grundfelder

Die Implementierung wurde mit drei sich gegenseitig aufrufenden Methoden realisiert. Die das statische Grundfeld zurückgebende Methode „generiere“ (Abb. 4-12, links) ruft zunächst einmalig die Methode „fülle“ mit den Koordinaten der Zielzelle auf. Sodann wird eine doppelt genaue Gleitkommazahl für

den aktuellen Potentialwert erzeugt und mit null initialisiert. So lange nun dieser Potentialwert kleiner als der (von der Methode „fülle“ gesetzte) maximale Potentialwert ist, wird das gesamte statische Grundfeld nach Zellen durchsucht, die dem aktuellen Untersuchungsintervall für den Potentialwert entsprechen.

Wurde nun einer Nachbarzelle noch kein Potentialwert zugewiesen oder die Potentialdifferenz zwischen aktueller und Nachbarzelle ist größer als zulässig und sie ist begehbar, so wird erneut die Methode „fülle“ aufgerufen, dieses Mal mit den Koordinaten der aktuellen Zelle als Ausgangspunkt. Wurde das gesamte statische Grundfeld durchlaufen wird der Potentialwert um eine Stufe erhöht und das statische Grundfeld wird erneut durchsucht, sofern der Potentialwert noch kleiner ist als der maximale Potentialwert. Wird der Potentialwert größer als der maximale Potentialwert ist die Methode abgeschlossen und das fertig ermittelte statische Grundfeld wird zurückgegeben.

Sobald die Methode „fülle“ (Abb. 4-12, rechts) aufgerufen wird, ermittelt diese für jede Zelle den theoretisch zuzuweisenden Potentialwert als Summe des Potentialwerts der aufrufenden Zielzelle und des Abstands zwischen aktueller Zelle und aufrufender Zelle. Wurde einer Zelle nun noch kein Potentialwert zugewiesen oder der bereits zugewiesene Potentialwert ist größer als der theoretisch zuzuweisende Potentialwert und die Zelle ist begehbar, so wird die Methode „hindernisCheck“ (Abb. 4-13) aufgerufen.

Gibt diese „falsch“ zurück, so wird der theoretische Potentialwert der aktuellen Zelle zugewiesen. Zuletzt wird noch der maximale Potentialwert, das Abbruchkriterium für die „fülle“-Methode angepasst, sofern der eben zugewiesene Potentialwert größer ist als der bisherige maximale Potentialwert.

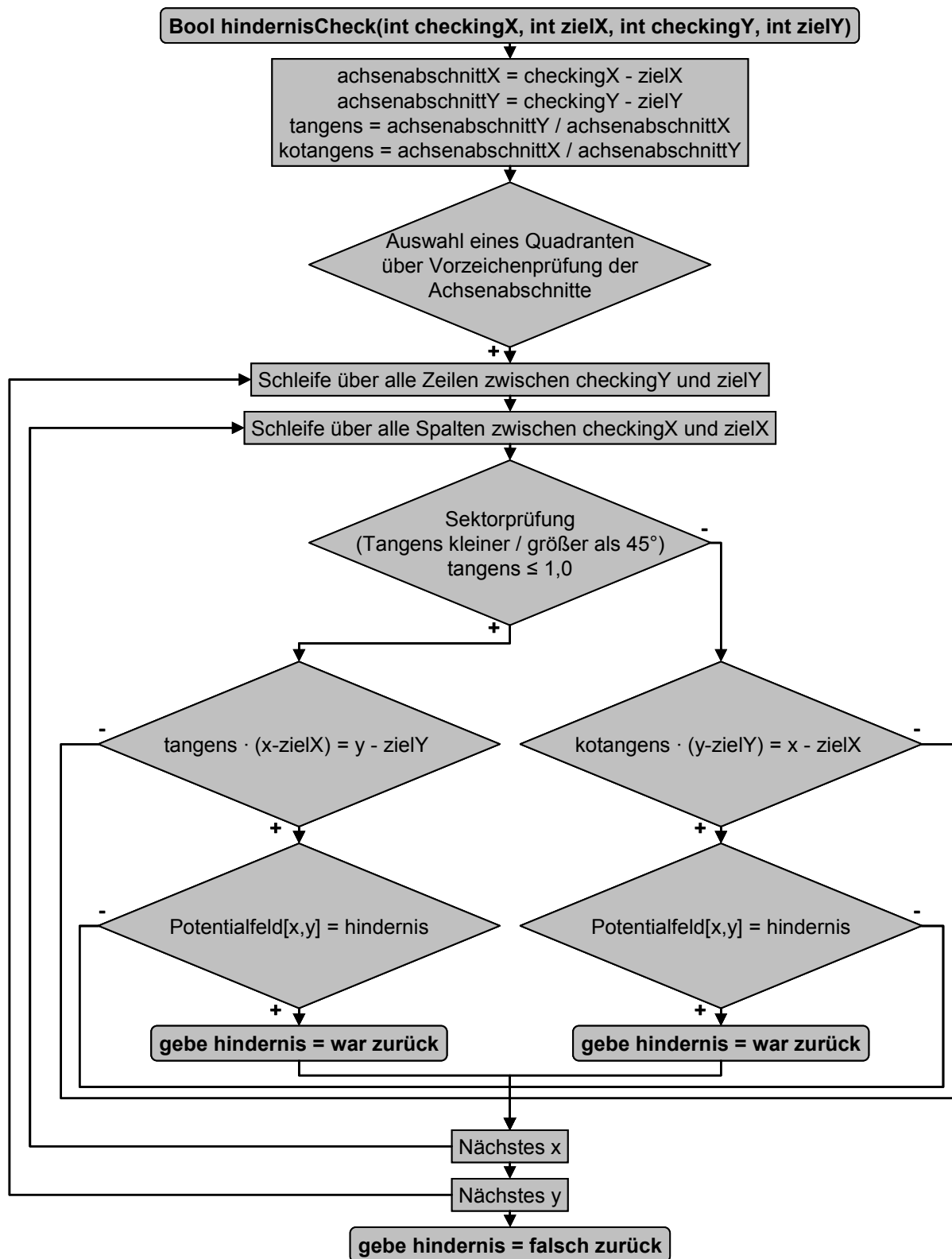


Abb. 4-13: Methode „hindernisCheck“ zum Erzeugen isotroper statische Grundfelder

Die einen booleschen Wert zurückgebende Methode „hindernisCheck“ überprüft, ob sich in direkter Linie zwischen der aufrufenden Zelle und der aktuellen Zielzelle eine nicht begehbare Zelle befindet. Dazu werden nach dem Aufruf zunächst die vorzeichenbehafteten X- und Y-Achsenabschnitte zwischen aufrufender Zelle und Zielzelle, sowie mit diesen der Tangens und reziprok der Kotangens berechnet.

Sodann wird ermittelt, in welchem Quadrant bezüglich der Zielzelle sich die aufrufende Zelle befindet. Zwischen der aufrufenden Zelle und der Zielzelle werden nun alle Zellen identifiziert, die näherungsweise auf der geraden Verbindungslinie liegen. Da diese Überprüfung mit Hilfe des Quotienten aus den beiden Achsenabschnitten erfolgt, der Tangens bei x gegen null bzw. reziprok der Kotangens bei y gegen null jedoch gegen unendlich geht (Tab. 4-2), wird jeder Quadrant an der ersten Winkelhalbierenden nochmals in zwei Sektoren unterteilt.

Bei Tangens kleiner und gleich 1,0 erfolgt die Prüfung mit Hilfe des Tangens, bei größer als 1,0 mit Hilfe des Kotangens. Dadurch kann gewährleistet werden, dass auch für kleine und große Winkel in jedem Quadranten zuverlässig der ganzzahlig richtig gerundete X- bzw. Y-Achsenabschnitt ermittelt werden kann.

x	y	tan	cot
1	1	1,00	1,00
1	2	2,00	0,50
1	3	3,00	0,33
1	4	4,00	0,25
1	5	5,00	0,20
1	6	6,00	0,17
1	7	7,00	0,14
1	8	8,00	0,13
1	9	9,00	0,11
1	10	10,00	0,10
1	11	11,00	0,09
1	12	12,00	0,08
1	13	13,00	0,08
1	14	14,00	0,07
1	15	15,00	0,07
1	16	16,00	0,06
1	17	17,00	0,06
1	18	18,00	0,06
1	19	19,00	0,05
1	20	20,00	0,05
1	21	21,00	0,05
1	22	22,00	0,05
1	23	23,00	0,04
1	24	24,00	0,04
1	25	25,00	0,04
1	26	26,00	0,04
1	27	27,00	0,04
1	28	28,00	0,04

Tab. 4-2: Tangens- und Kotangenswerte für X-Achsenabschnitt mit der Größe eins und diskrete ganzzahlige Y-Achsenabschnitte

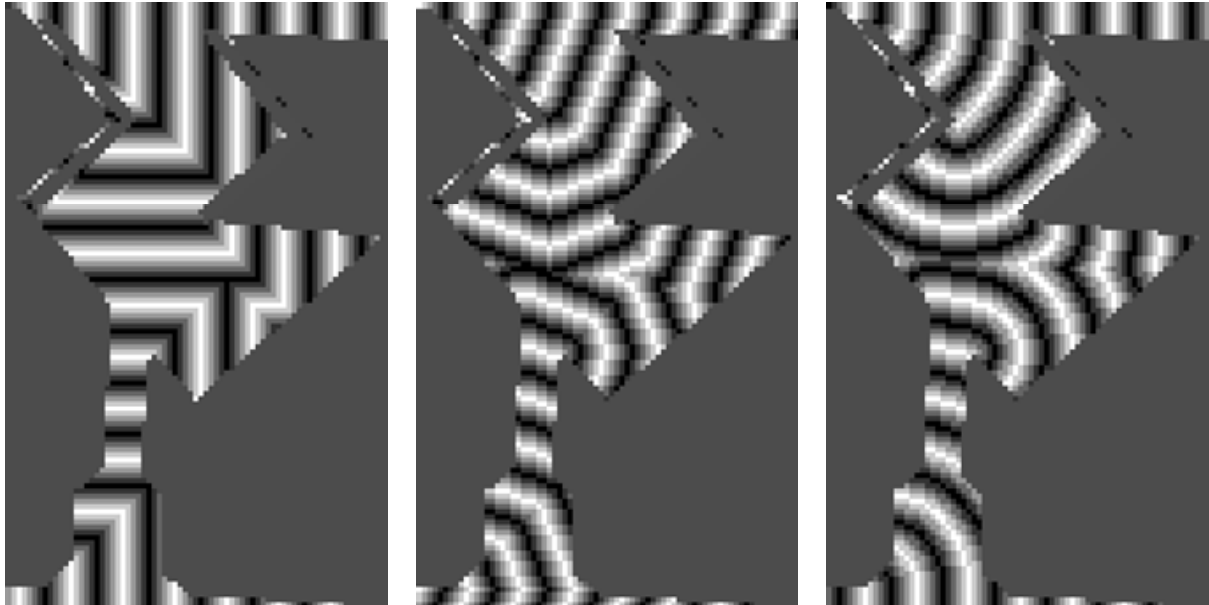
Zur Überprüfung wird der Tangens (der Kotangens) mit dem X-Achsenabschnitt (dem Y-Achsenabschnitt) zwischen Zielzelle und der aktuellen Zelle multipliziert und der ganzzahlig gerundete Wert mit dem Y-Achsenabschnitt (dem X-Achsenabschnitt) zwischen Zielzelle und der aktuellen Zelle verglichen.

Ist die Vergleichsprüfung zutreffend und ist die aktuelle Zelle nicht begehbar, so wird der boolesche Wert „hindernis“ mit „wahr“ zurückgegeben und die Methode beendet. Wird die Überprüfung des Quadranten abgeschlossen, ohne dass eine nicht begehbare Zelle auf der Verbindungslinie angetroffen wurde, wird der boolesche Wert „hindernis“ mit „falsch“ zurückgegeben.

Die vorliegende Implementierung eines isotropen statischen Grundfeldes ermittelt für jede Zelle diskret denjenigen Potentialwert, der an gleicher Stelle im kontinuierlichen Raum anzutreffen wäre. Auch wenn die Zellübertrittsbeziehungen hierbei in der Regel nicht das exakte Verfolgen der



theoretischen Falllinie im kontinuierlichen Raum erlauben, kann damit jedoch die bestmögliche Näherung im diskreten Raum erreicht werden (vergleiche Abb. 4-14, rechts).



*Abb. 4-14: Anisotropes, pseudoisotropes und isotropes statisches Grundfeld (v.l.n.r.), Darstellung mit Isopotentiallinien. Jeweils in der Bildmitte: Zusammenfluss gleicher Potentialwerte nach einem Hindernis*

#### **4.4.2.4 Multiple statische Grundfelder für multiple Ziele**

In der bisherigen Entwicklung der mikroskopischen Fußgängersimulation wurden statische Grundfelder vorwiegend im Zusammenhang mit Evakuierungsszenarien implementiert [Meyer-König et al. 2001], [Klüpfel 2003], [Galea 2002], bei der alle simulierten Fußgänger ausgehend von verschiedenen Orten in der Regel einem gemeinsamen Ziel zustreben. Bei der Adaption dieses Ansatzes für alltägliche Abläufe des Fußgängerverkehrs muss jedoch für jede Gruppe von Fußgängern mit demselben Ziel ein eigenes statisches Grundfeld generiert und zwischengespeichert werden.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt diese Zwischenspeicherung in einem Objektcontainer, wobei während eines Simulationslaufs für jeden Agenten über einen Index auf das jeweils zutreffende statische Grundfeld zugegriffen werden kann. Neben der Berücksichtigung multipler Quellen ermöglicht dieser Schritt zudem die Berücksichtigung einer beliebigen Anzahl von Zielen im Rahmen eines Simulationslaufs.

#### 4.4.2.5 Dynamische Grundfelder für die Interaktion von Agenten

Erfolgt die Navigation ausschließlich unter Berücksichtigung statischer Grundfelder sowie der durch andere Agenten verursachten Zellbelegungen, interagieren die Agenten lediglich mit ihrer ortsfesten Umgebung. Empirisch nachgewiesen sind jedoch auch Interaktionen mit vorausgehenden oder entgegenkommenden Fußgängern in Form der Ausprägung von Pfaden oder temporären Spuren (vgl. Abschnitt 2.1.3.6 und 2.1.3.7). Pfade und Spuren entstehen dort, wo für die Erreichung des Ziels der attraktivste bzw. optimale Weg vermutet wird.

Dabei wird die Lokalisation dieses vermuteten Optimums stark von der Wegwahl anderer Fußgänger beeinflusst. Übertragen auf einen ZA bedeutet dies, dass Zellen bei Durchgang eines Agenten für nachfolgende Agenten eine Attraktivitätssteigerung erfahren, die mit der Zeit parameterspezifisch diffundiert und zerfällt. Bei der Implementierung im Rahmen dieser Arbeit wird den Zellen diese Attraktivitätssteigerung in Form von dynamischen Potentialen zugewiesen, die ihrerseits in einem dynamischen Grundfeld (Dynamic Floor Field – DFF) abgelegt werden (vgl. Abschnitt 2.2.7.1).

Bei temporären Spuren spielt im Gegensatz zu persistenten Pfaden die Bewegungsrichtung und damit die Richtung des Zellübergangs des Agenten eine große Rolle. So ist ein Trampelpfad unabhängig von der Gehrichtung für all diejenigen Fußgänger attraktiv, für die er eine Optimierung des Weges in Hinblick auf das individuelle Ziel darstellt.

Bei temporären Spuren, wie sie sich beispielsweise bei zwei starken feindlichen Fußgängerströmen herausbilden, erfolgt die Attraktivitätssteigerung jedoch richtungsabhängig. Würde bei physisch inexistenten Spuren die Bewegungsrichtung der Agenten keine Berücksichtigung finden, so würde ein dermaßen implementiertes DFF die Herausbildung temporärer Pfade sogar erschweren anstatt sie zu befördern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Berücksichtigung dynamischer Interaktionen daher für jede zulässige Bewegungsrichtung ein eigenständiges, gerichtetes dynamisches Grundfeld implementiert (Abb. 4-15). Bewegt sich zur Laufzeit der Simulation ein Agent in die Richtung  $R_0$ , so wird der entsprechenden, vom Agenten soeben geräumten Zelle in den dynamischen Grundfeldern  $DFF_0$ ,  $DFF_7$  und  $DFF_1$  der festgelegte maximale dynamische Potentialwert  $dff_{max}$  zugewiesen.

Entsprechend wird bei der Bewegung in Richtung  $R_7$  mit den  $DFF_7$ ,  $DFF_6$  und  $DFF_1$  verfahren. Bei Bewegung in die verbleibenden Richtungen  $R_i$  mit  $i = \{1, 2, \dots, 6\}$  erfolgt die Zuweisung von  $dff_{max}$  entsprechend an  $DFF_i$ ,  $DFF_{i-1}$  und  $DFF_{i+1}$  (es gilt  $i$  modulo 8). Der maximale dynamische Potentialwert wird

mithin der tatsächlich vom Agenten exekutierte Richtung sowie den beiden „Nachbarrichtungen“ mit einer Richtungsabweichung von  $\pm 50$  gon zugewiesen.

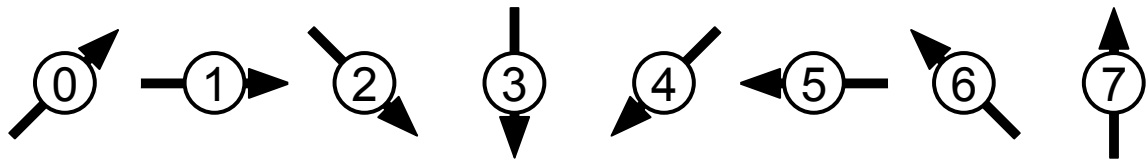


Abb. 4-15: Acht Vorzugsrichtungen  $R_i$  der  $DFF_i$  mit  $i = \{0, 1, \dots, 7\}$

Um den Charakter eines ZA konsequent beizubehalten, werden auch zur Berechnung der dynamischen Potentiale wiederum nur die Potentiale in unmittelbarer Nachbarschaft einer Zelle zum Zeitpunkt  $t-1$  herangezogen. Um für nachfolgende Agenten den gewünschten Effekt zu erzielen, erfolgt die Diffusion orthogonal zur Vorzugsrichtung  $R_i$  des dynamischen Grundfeldes  $DFF_i$  und der Zerfall mit den diskreten Zeitschritten.

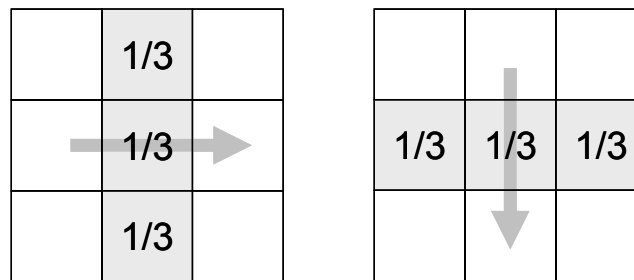


Abb. 4-16: Diffusionsschema bei Bewegung senkrecht zu Zellkanten

In Abb. 4-16 ist die maximale Diffusion des dynamischen Potentials je Zeitschritt bei  $DFF_1$  (links) und  $DFF_3$  (rechts) dargestellt. Dabei wird das vormalige Potential auf die Ausgangszelle und seine beiden Nachbarzellen zu gleichen Teilen aufgeteilt. Während die Festlegung der Nachbarzellen orthogonal zur Bewegungsrichtung bei Bewegung senkrecht zu den Zellkanten eindeutig ist, müssen bei einer Bewegung in diagonaler Richtung verschiedene Lösungsmöglichkeiten eingehender untersucht werden.

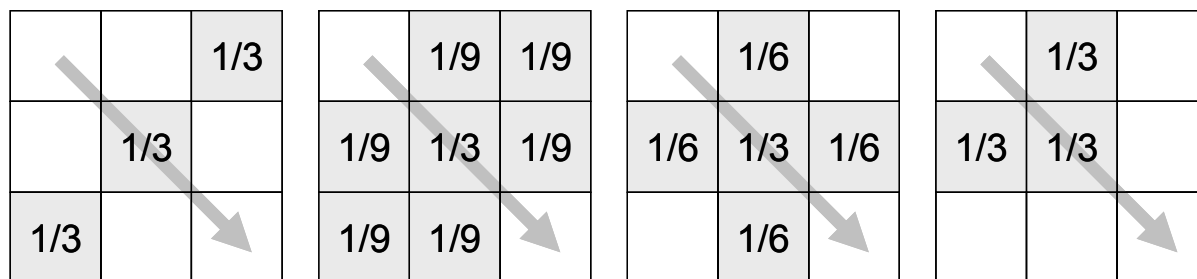


Abb. 4-17: Diffusionsschemata bei diagonaler Bewegungsrichtung

Die naheliegendste Lösung ist dabei die Definition der Nachbarzellen als diejenigen Zellen orthogonal zur Bewegungsrichtung, die sich jeweils an ihren Eckpunkten berühren (Abb. 4-17 links). Hierbei ergibt sich verursacht durch die Anisotropie des Quadratrasters bei den Vorzugsrichtungen  $R_i$  mit  $i = \{0, 2, 4, 6\}$  jedoch eine um  $\sqrt{2}$  höhere Diffusionsgeschwindigkeit. Zudem ergeben sich bei diesem Ausbreitungsschema schachbrettartige Lücken, denen kein dynamisches Potential zugewiesen wird.

Mit dem zweiten und dritten Schema von links wird die Entstehung dieser Lücken zwar verhindert, gleichzeitig steigt der Berechnungsaufwand zur Laufzeit der Simulation jedoch erheblich, da die Zahl der involvierten Zellen je Rechenschritt teilweise mehr als verdoppelt wird. In der vorliegenden Simulationsumgebung kommt daher das in Abb. 4-17 rechts dargestellte Diffusionsschema zu Anwendung, welches die Einführung eines gemeinsamen Algorithmus unabhängig von der jeweiligen Vorzugsrichtung für alle gerichteten dynamischen Grundfelder  $DFF_i$  ermöglicht.

Für die Berechnung von Diffusion und Zerfall des dynamischen Potentials muss ein zeit- und raumdiskreter Algorithmus implementiert werden, der die oben dargelegten Grundüberlegungen berücksichtigt. Der dynamische Potentialwert  $dff$  der Zelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  wird wie in der Berechnungsvorschrift [4-8] dargestellt ermittelt.

$$dff_{x,t} = (dff_{x,t-1} \cdot (1/d) + (dff_{x-1,t-1} + dff_{x+1,t-1}) / 2 \cdot (1 - 1/d)) \cdot z \quad [4-8]$$

Mit:

$dff$ : Diskreter dynamischer Potentialwert im dynamischen Grundfeld  $DFF_i$

$t$ : Diskreter Zeitpunkt

$x$ : Zelle mit Nachbarzellen  $x-1$  und  $x+1$

$d$ : Diffusion  $\{d \in \mathbb{R} \mid 1 \leq d \leq 3\}$

$z$ : Zerfall  $\{z \in \mathbb{R} \mid 0 \leq z \leq 1\}$

In dieser Form angewandt bedeutet ein Diffusionsparameter von  $d = 1$  eine identische Abbildung ohne jede Diffusion,  $d = 3$  hingegen eine gleichförmige Verteilung des dynamischen Potentials auf die Zelle selbst und ihre beiden Nachbarzellen. Bei einem Parameter  $z = 1$  für den Zerfall entspricht die Summe der dynamischen Potentiale über alle Zellen stets der Anzahl der zugewiesenen dynamischen Potentiale  $dff_{\max}$  multipliziert mit dessen Wert. Anders ausgedrückt: Ein Zerfall des dynamischen Potentials findet nicht statt. Umgekehrt zerfällt das dynamische Potential bei  $z = 0$  vollständig noch im Zeitschritt der Zuweisung.

Werden Nachbarzellen und diskrete Zeitschritte in der horizontalen, die Ausprägung des dynamischen Potentials in der vertikalen aufgetragen, so ergibt sich das in Abb. 4-18 dargestellte Bild. In diesem Beispiel wird das maximale dynamische Potential mit  $dff_{\max} = 15$  den Zellen  $x = 7$  und  $x = 15$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  neu zugewiesen. Sodann diffundieren die dynamischen Potentiale mit  $d = 1,5$  und  $z = 1,0$  im Diagramm über 18 Zeitschritte hinweg. Die Summe über die dynamischen Potentiale aller Zellen je Zeitschritt ergibt dabei immer die Summe  $30 = 2 \cdot dff_{\max}$ .

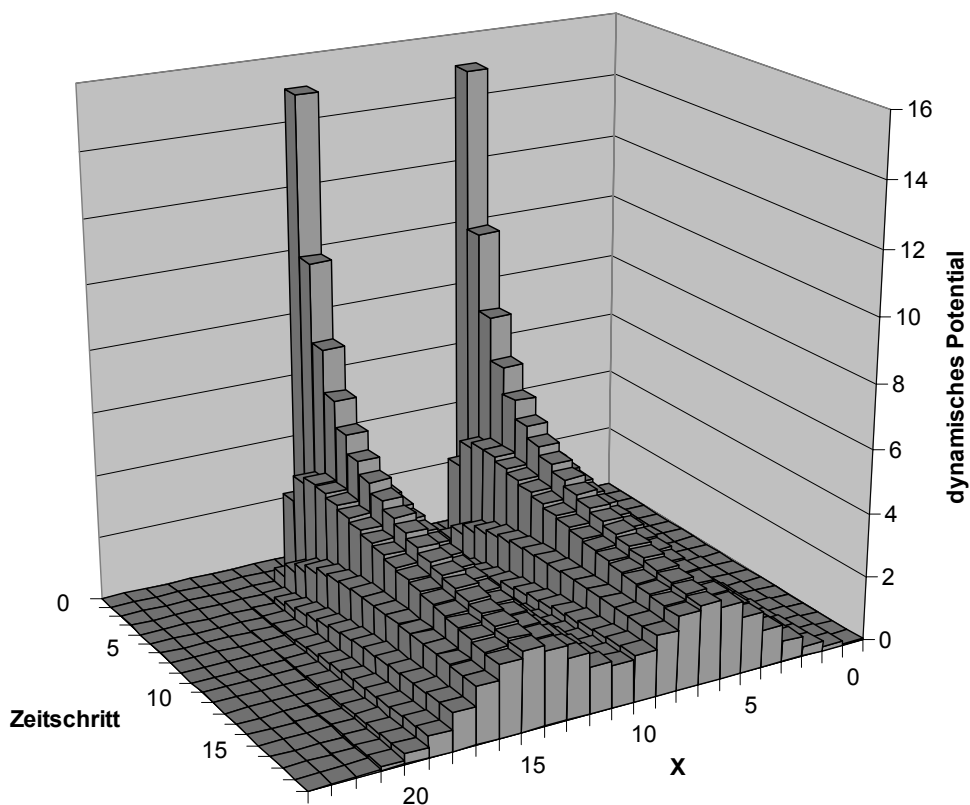


Abb. 4-18: Diffusion und Zerfall des dynamischen Potentials

Bei einer linearen Bewegung mit einer Geschwindigkeit von einer Zelle je Zeitschritt in Richtung  $R_i$  mit  $i = \{1, 3, 5, 7\}$  ergibt sich bei  $DFF_i$  entspre-

chend im Falle einer räumlichen Darstellung das gleiche Diagramm. Dazu muss lediglich die Ordinate „Zeitschritt“ durch den kartesischen Raumbezeichner „Y“ ersetzt werden. Anders verhält es sich hingegen bei der Bewegung in zelldiagonaler Richtung. Aufgrund der nichtlinearen Definition der Nachbarzellen ist bei den Richtungen  $R_i$  mit  $i = \{0, 2, 4, 6\}$  eine Raum-Zeit-Darstellung der  $DFF_i$  äquivalent zu Abb. 4-18 nicht möglich.

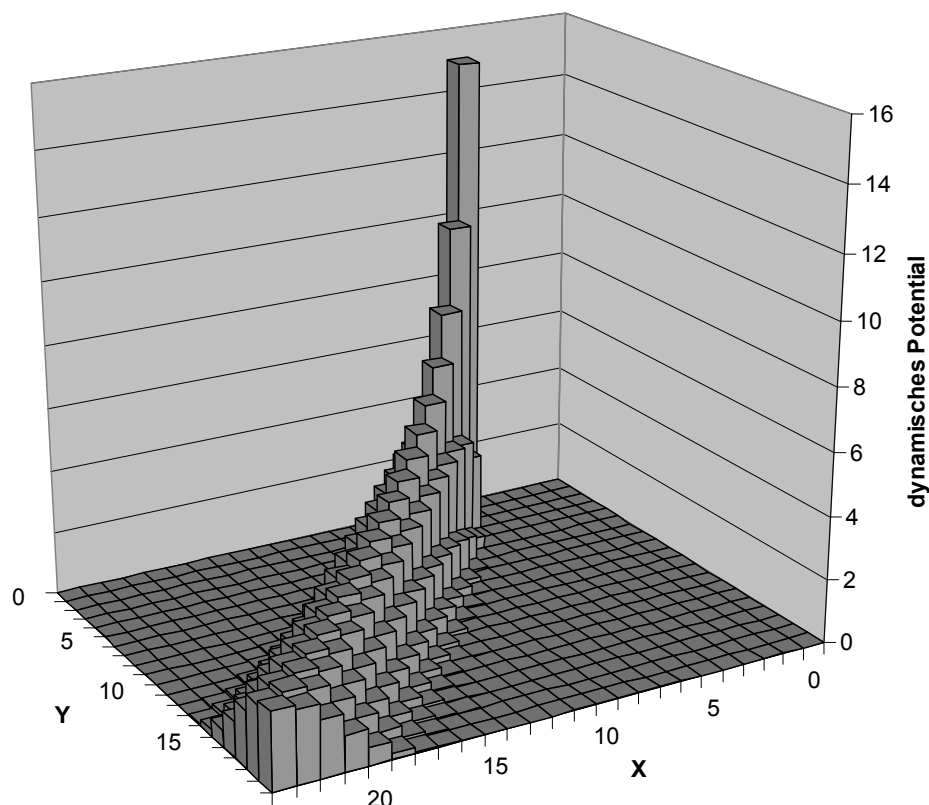


Abb. 4-19: Dynamisches Grundfeld bei diagonaler Bewegung

Eine räumliche Darstellung eines DFF mit zelldiagonaler Vorzugsrichtung zu einem Zeitpunkt  $t$  zeigt Abb. 4-19. Darin hat sich der das dynamische Potential bewirkende Agent ausgehend von der Zelle  $Z_{x,y}(24, 19)$  linear in zelldiagonaler Richtung fortbewegt und den dargestellten Zellgitterausschnitt an der Stelle  $Z_{x,y}(5, 0)$  soeben wieder verlassen. Der zuletzt geräumten Zelle wurde der Wert  $dff_{\max} = 15$  zugewiesen. Im Verlauf dieses Übergangs ist das dynamische Potential mit  $d = 1,5$  und  $z = 1,0$  diffundiert und zerfallen.

Aus der Berechnungsvorschrift [4-8] wird ersichtlich, dass sich das dynamische Potential der Zelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  aus den dynamischen Potentialen der Zellen  $x$ ,  $x-1$  und  $x+1$  zum Zeitpunkt  $t-1$  ermittelt. Für die Implementierung bedeutet dies, dass das neu zu berechnende dynamische Grundfeld  $DFF_{i,t}$  das  $DFF_{i,t-1}$  zur Laufzeit der Berechnung nicht überschreiben darf. Das zeilenweise Durchlaufen des zweidimensionalen Arrays würde ansons-

ten zu unzulässigen Ringschlüssen führen. Jedes der acht gerichteten dynamischen Grundfelder muss daher bei Neuberechnung zunächst einem temporären Array zugewiesen werden, bevor es nach Abschluss der Berechnung zurückgegeben werden kann. Insgesamt erweist sich dadurch die Berechnung der dynamischen Grundfelder im Zuge des Simulationsframeworks als besonders rechenintensiv.



Abb. 4-20: Visualisierung der dynamischen Grundfelder

Zu Zwecken der Visualisierung werden die acht einzeln berechneten gerichteten dynamischen Grundfelder in einer Ansicht kombiniert. Dabei wird aus der Überlagerung aller Felder jeweils das dynamische Potential mit der größten Ausprägung ausgewählt und in Graustufen dargestellt. Je dunkler die Darstellungsfarbe, desto größer die Ausprägung des dynamischen Potentials in der jeweiligen Zelle. Abb. 4-20 zeigt exemplarisch die Visualisierung der von 10 Agenten induzierten dynamischen Potentiale. Dabei bewegen sich die Agenten von der Quelle Q links unten zum Ziel Z rechts oben in der Abbildung. Im Fall des Beispiels diffundieren die dynamischen Grundfelder mit  $d = 1,8$  und zerfallen mit  $z = 0,95$ .

Aufgrund der losen Abfolge von Zellübertritten in diagonalen und in orthogonaler Richtung sowie wegen der teils dichten Folge von Agenten sind die von Diffusion und Zerfall erzeugten Muster nun nicht mehr in der Form achsensymmetrisch wie in den Abb. 4-18 und Abb. 4-19. Vielmehr ist das Ergebnis eine optimale Annäherung an die diskrete, richtungsabhängige Ermittlung der durch den Übergang von Agenten induzierten Attraktivitätssteigerung des anisotropen Zellgitters eines ZA.

#### 4.4.3 Initialisierung der Agenten

Die Bewegungssimulation erfolgt mit Hilfe zweier gekoppelter Klassen. Die erste Klasse dient der Visualisierung des Simulationslaufs, initialisiert die

Agenten und ruft die Methode zur Durchführung der Bewegung auf. Die zweite Klasse kapselt die Eigenschaften eines Agenten in der Form von Attributen und Bewegungsmethoden. Der Konstruktor der Visualisierungsklasse übernimmt von der Hauptanwendung die normierte Summenhäufigkeit der Quell-Zielbeziehungen (siehe Abschnitt 4.4.1) in Form einer zweidimensionalen Matrix von Gleitkommazahlen, den Objektcontainer der Quellpunkte sowie den Objektcontainer mit den statischen Grundfeldern für jede Gruppe von Agenten mit demselben Ziel.

Zudem wird ein zweidimensionales statisches Feld von booleschen Operatoren der Agentenklasse mit den gleichen Dimensionen wie die statischen Grundfelder initialisiert. Dieses hält während des Simulationslaufes fest, ob eine Zelle durch einen Agenten belegt oder frei ist.

Die Methode der Visualisierungsklasse zum Starten des Simulationslaufs weist das Ereignis eines Simulationsschritts einem Timer-Ereignis zu, welches in regelmäßigen, in Millisekunden festzulegenden Zeitintervallen ausgelöst wird, bis die Simulation beendet ist und der Timer somit gestoppt wird. Das Zeitintervall kann zur Laufzeit der Anwendung über die Gehgeschwindigkeit angepasst werden. Einschränkend ist hier festzustellen, dass insbesondere bei Berücksichtigung dynamischer Grundfelder (vgl. Abschnitt 4.4.2.5) die Simulationsgeschwindigkeit maßgeblich von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hardware bestimmt wird.

Zu Beginn eines jeden Simulationsschrittes wird der Timer bis zu dessen Beendigung angehalten. Sodann werden an jedem festgelegten Startpunkt in Abhängigkeit von den Generierungsregeln neue Agenten initialisiert. Diese Regeln können zufallsbasiert sein oder aus Ganglinien empirischer Datengrundlagen gespeist werden.



```

1:  if (randomNumber.NextDouble() <= MainWindow.GenerationProbability)
2:  {
3:      sdRelationChoice = randomNumber.NextDouble();
4:      agentGenerated = false;
5:      for (int d = 0; d < sdSumMatrix.GetLength(1); d++)
6:      {
7:          for (int s = 0; s < sdSumMatrix.GetLength(0); s++)
8:          {
9:              if (sdRelationChoice <= sdSumMatrix[s,d])
10:             {
11:                 agent[n] =
                     new GenerateAgents(n, s, d,
                     (Point)sourcePoints[s],
                     (double[,])sffArrayList[d]);
12:                 n++;
13:                 agentGenerated = true;
14:                 break;
15:             }
16:         }
17:         if (agentGenerated)
18:             break;
19:     }
20: }

```

Abb. 4-21: Agentengenerierung in der Visualisierungsklasse (C#-Quellcode)

Erfolgt die Generierung zufallsbasiert, so wird zunächst die festgelegte Erzeugungswahrscheinlichkeit je Zeitschritt mit einer Pseudozufallszahl verglichen (Abb. 4-21, Codezeile 1). Trifft dieser Vergleich zu, wird eine weitere Zufallszahl der Variablen `sdRelationChoice` zugewiesen (Codezeile 3). Sodann wird die normierte Matrix der Summenhäufigkeiten der Quell-Ziel-Relationen so lange durchlaufen, bis `sdRelationChoice` kleiner oder gleich der normierten Summenhäufigkeit der aktuell geprüften Quell-Ziel-Relation `sdSumMatrix[s,d]` ist. Für diese Relation wird dann ein neuer Agent erzeugt (Codezeile 11), wobei diesem dabei

- sein Index `n`,
- der Index seiner Quellposition `s`,
- der Index seiner Zielposition `d`,
- sein Quellpunkt `sourcePoints[s]` aus dem Objektcontainer sowie
- das vom Zielpunkt abhängende statisches Grundfeld `sffArrayList[d]`

zugewiesen wird. Weitere Zuweisungsparameter sind eine mit der Quell-Ziel-Matrix generierte relationsspezifische Darstellungsfarbe, ein Speicherpfad für das Protokoll des Agenten sowie der Index für den aktuellen Simulationsumlauf, auf deren Wiedergabe im Codeauschnitt aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wurde. Anschließend wird für jeden Agenten die Bewegungsmethode der Agentenklasse ausgeführt und das Ergebnis in Form der aktuellen Position in der Visualisierungsklasse angezeigt.

#### 4.4.4 Algorithmen zur Bewegungsdurchführung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sechs unterschiedliche Algorithmen bzw. Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Bewegung der Agenten eingehend untersucht. Die drei wichtigsten Ausprägungen, bezeichnet als linearer, polynomischer und exponentieller Algorithmus werden nachfolgend ausführlich dargestellt.

Dabei ergibt sich der Nutzen des zunächst dargestellten linearen Algorithmus weniger aus dem Realitätsgrad des Simulationsergebnisses als vielmehr aus der sehr anschaulichen Ableitung der Übertrittswahrscheinlichkeiten unmittelbar aus den Potentialdifferenzen.

##### 4.4.4.1 Linearer Algorithmus

Die Grundüberlegung für den linearen Bewegungsalgorithmus folgt der Definition der statischen und dynamischen Grundfelder. Während sich die statischen Potentiale ausgehend von der Zielzelle mit zunehmendem Wert ausbreiten, nimmt das dynamische Potential mit der Entfernung vom induzierenden Agenten ab. Mithin ist die optimale Richtung beim statischen Grundfeld in Richtung des kleinsten, beim dynamischen Grundfeld dagegen in Richtung des größten benachbarten Potentials. Damit ergibt sich für die Übertrittswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  mit  $i$  und  $j = \{-1, 0, 1\}$  gemäß Abb. 2-13:

$$p_{ij} = n \cdot ((sff_{0,0} - sff_{i,j}) + (dff_{i,j} - dff_{0,0})) \quad [4-9]$$

Mit:

$n$ : Normierungsfaktor der gewährleistet, dass  $\sum_{ij} p_{ij} = 1$ ,

$sff$ : statisches Potential aus dem zugeordneten statischen Grundfeld,

$dff$ : gerichtetes dynamisches Potential.

Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei dem Einsatz der gerichteten dynamischen Grundfelder. Für die aktuellen Position mit  $i = 0$  und  $j = 0$  des Agenten wird der dynamische Potentialwert aus dem gerichtetem dynamischen Grundfeld der im zurückliegenden Zeitschritt durch den Agenten ausgeführten Richtung herangezogen, hingegen für mögliche benachbarte Zielzellen der zugeordnete dynamische Potentialwert derjenigen Richtung, die sich aus einem Zellübertritt von aktueller Zelle zu möglicher Zielzelle ergeben würde.

Damit folgt ein Agent einem Vorgänger auch im Falle einer Richtungsänderung quasi auf dem „Grat“ erhöhter dynamischer Potentialwerte vergleichbar zur in Abb. 4-18 bzw. Abb. 4-19 dargestellten linearen Bewegung. Schlägt

ein nachfolgender Agent hingegen einen neuen Weg ein, so erfolgt dies basierend auf der um die negative Differenz der dynamischen Potentialwerte reduzierten Übertrittswahrscheinlichkeit.

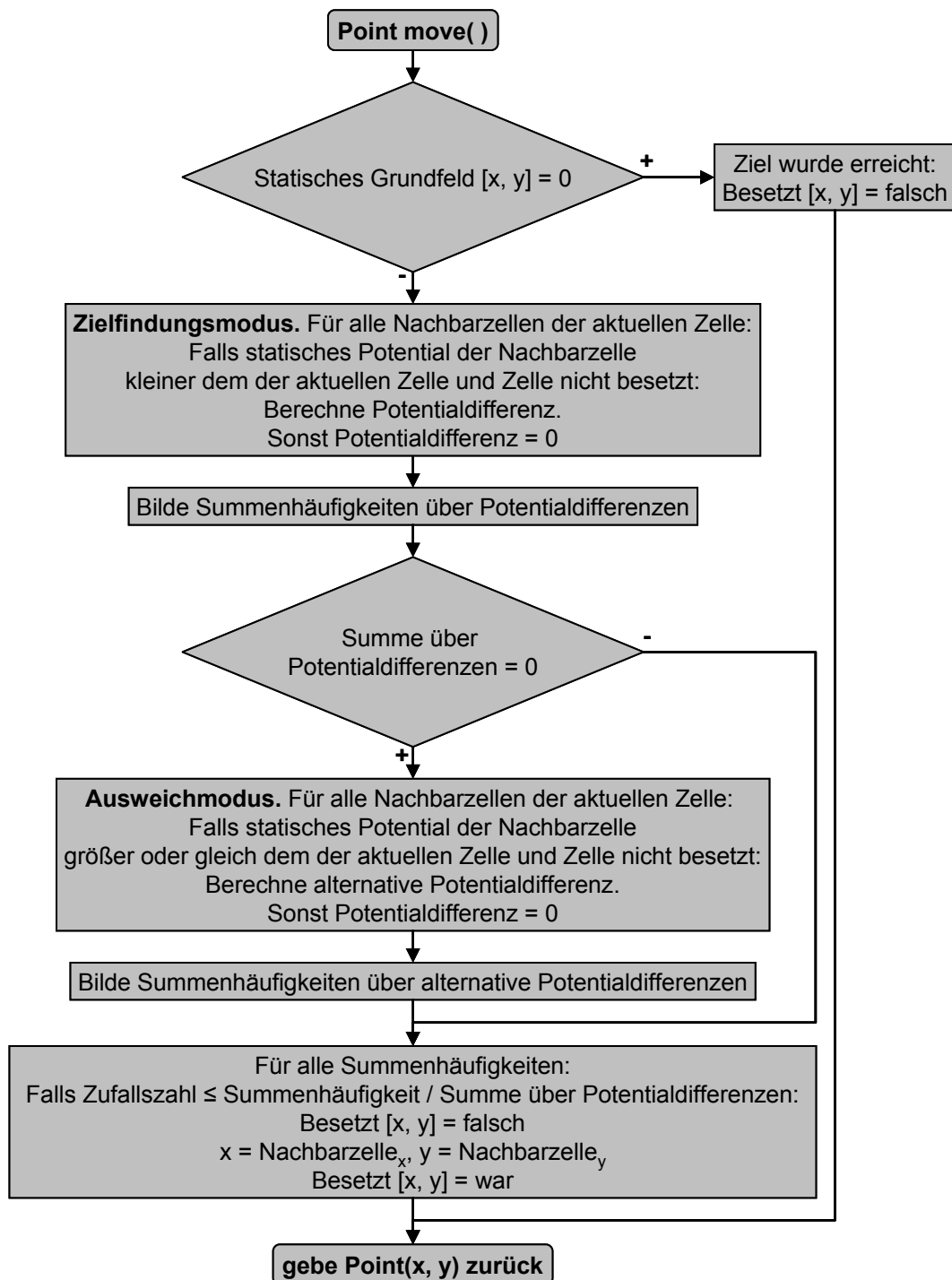


Abb. 4-22: Bewegungsmethode mit linearem Bewegungsalgorithmus

Im Zuge der Implementierung wird bei jedem Simulationsschritt für jeden Agenten zunächst überprüft, ob das statische Potential an der aktuellen Position  $[x,y]$  null beträgt (siehe Abb. 4-22). Ist dies der Fall, so hat der Agent

sein Ziel erreicht und der Wert des zweidimensionalen statischen Feldes von booleschen Operatoren *Besetzt* wird an der aktuellen Stelle zu *falsch* gesetzt.

Ist dies nicht der Fall, so werden im Zielfindungsmodus sodann alle orthogonalen und diagonalen Nachbarzellen der aktuellen Position überprüft ob sie

- nicht besetzt ( $Besetzt[x, y] = falsch$ ) und
- ob ihre statischen Potentialwerte *kleiner* dem der aktuellen Zelle sind.

Ist dies der Fall, so kommt für diese Zellbeziehungen (zunächst ohne Normierung mit der noch zu ermittelnden Summe  $n$  der Potentialdifferenzen) die Berechnungsvorschrift [4-9] zur Anwendung. Für alle anderen Zellbeziehungen wird die Potentialdifferenz zu null gesetzt. Schließlich werden über die Potentialdifferenzen die Summenhäufigkeiten gebildet (Abb. 4-23).

Insbesondere bei hohen Fußgängerdichten kann es während eines Simulationslaufs vorkommen, dass der direkte Weg zum Ziel durch andere Agenten blockiert ist. Für den vorstehend skizzierten Bewegungsalgorithmus bedeutet dies, dass die Summe der Potentialdifferenzen in diesem Fall null ergeben würde. Grundsätzlich kann ein dieser Arbeit zu Grunde liegender ZA die Agenten zwar keine strategischen Entscheidungen treffen lassen, eine solche Engstelle weiträumig zu umgehen.

Im Falle dass keine Nachbarzellen mit kleinerem statischem Potentialwert anzutreffen sind, kann jedoch die taktische Wahlmöglichkeit eingeräumt werden zu einer Zelle mit höherem oder gleichem Potentialwert auszuweichen. Hierbei sollen die dynamischen Potentiale unberücksichtigt bleiben. Entspricht die Summe über alle Potentialdifferenzen also null (Abb. 4-22), so werden im Ausweichmodus alle orthogonalen und diagonalen Nachbarzellen überprüft ob sie

- nicht besetzt ( $Besetzt[x, y] = falsch$ ) und
- ob ihre Potentialwerte *größer oder gleich* dem der aktuellen Zelle sind.

$$p_{ij} = n / (sff_{i,j} - sff_{0,0} + 1) \quad [4-10]$$

Ist dies der Fall, wird für diese Zellbeziehungen gemäß Gleichung [4-10] der Kehrwert aus der um eins erhöhten Differenz der statischen Potentialwerte gebildet. Mit der Erhöhung um eins wird zum einen ein Teilen durch null vermieden, zum anderen erhalten dadurch Nachbarzellen mit dem gleichen statischen Potentialwert wie die aktuelle Zelle das höhere Gewicht gegenüber benachbarten Zellen mit einem höheren Potentialwert. Bei allen anderen

Zellbeziehungen werden die Potentialdifferenzen zu null gesetzt und anschließend erneut die Summenhäufigkeiten gebildet.

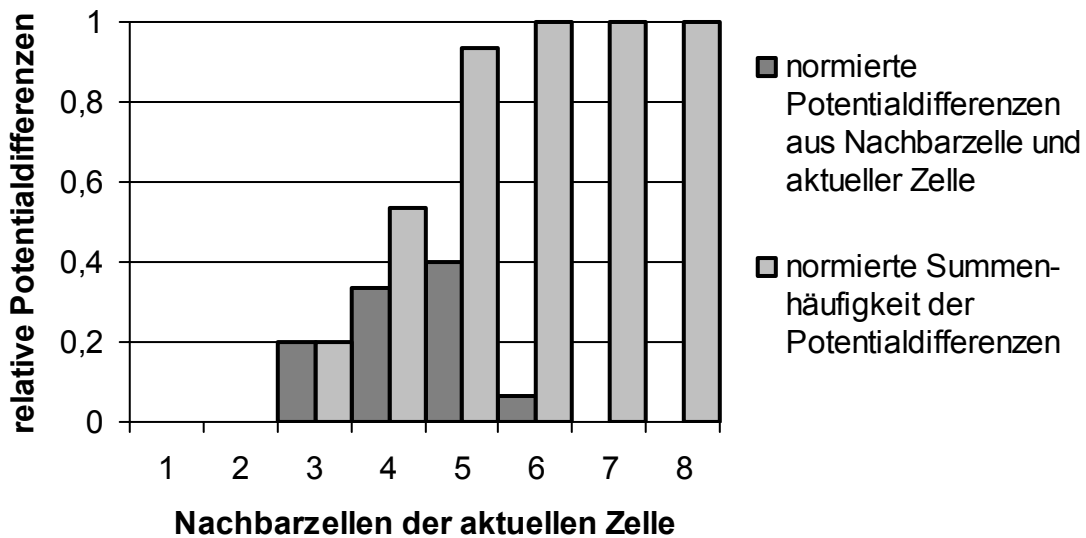


Abb. 4-23: Normierte Summenhäufigkeiten der Potentialdifferenzen

Die normierte Summenhäufigkeit der Potentialdifferenzen zwischen der aktuell betrachteten Zelle und ihren Nachbarzellen wird nun mit einer Pseudozufallszahl verglichen. Angenommen, eine Pseudozufallszahl betrüge 0,4, so würde die Prüfung im Beispiel der Abb. 4-23 für die Nachbarzelle Nummer 4 zutreffen. Der mit der aktuellen Zelle korrespondierende boolesche Wert *Besetzt* wird sodann auf *falsch* gesetzt und die Positionskoordinaten des Agenten werden mit denen der ausgewählten Zielzelle aktualisiert.

Zuletzt wird der der neuen Zelle zugeordnete boolesche Wert für *Besetzt* auf *wahr* gesetzt. Mit der Rückgabe der Koordinaten der Position des Agenten wird der durch die Visualisierungsklasse erfolgte Aufruf der Bewegungsmethode beendet.

Der vorstehend skizzierte lineare Bewegungsalgorithmus ist universell auf alle implementierten statischen Grundfelder anwendbar und weist aufgrund seiner Schlankheit eine sehr gute Skalierbarkeit auch bei einer hohen Zahl simulierter Agenten auf. Die Berechnungsstatistik zeigt, dass auch bei über 5000 zeitgleich aktiven Agenten die Dauer für die Berechnung eines Simulationsschrittes (ohne Visualisierung) auf dem für die Simulation eingesetzten Pentium 4, 3,2 GHz unter einer Millisekunde liegt.

Da sich die Wahrscheinlichkeit für einen Zellübertritt dabei unmittelbar an den ermittelten Differenzen der statischen Potentialwerte orientiert, hat die

Ausprägung des zu Grunde liegenden statischen Potentialfeldes zentrale Bedeutung für das Bewegungsverhalten der Agenten.

#### 4.4.4.2 Polynomischer Algorithmus

Erste Simulationsläufe unter Zugrundelegung der verschiedenen Ausprägungen der SFF zeigen durchweg Trajektorien mit einem z. T. recht unsteten Bewegungsverhalten der Agenten, was sich insbesondere durch häufige und starke Richtungswechsel äußert: Die Trajektorien wirken optisch unnatürlich unruhig und regelrecht zittrig, so dass das Ergebnis schon einer heuristischen Plausibilitätsprüfung kaum standhält. Die Varianz der linear aus den statischen und dynamischen Potentialen abgeleiteten Übertrittswahrscheinlichkeiten ist für den unmittelbaren Einsatz zur Zielführung ganz offensichtlich zu schwach ausgeprägt.

Da sich die statischen Potentiale unmittelbar aus der Entfernung zum Ziel ableiten, ist dieses Resultat zunächst erstaunlich, sollten Umwege in Abweichung von der Ideallinie doch damit gerade vermieden werden. Aus der Erfahrung eines jeden Fußgängers heraus ist dies aber sehr anschaulich nachvollziehbar. So ist der Einfluss der Richtung des jeweils nächsten Schrittes bezogen auf die Gesamtlänge des bis zum Ziel zurückzulegenden Weges minimal. Viele kleine Abweichungen von der Ideallinie bei einzelnen Schritten ergeben in der Summe jedoch stattliche Umwege.

Nachweislich neigen Menschen in realen Open-Field Szenarien ohne optische Orientierungspunkte wie beispielsweise in Wüsten aufgrund natürlicher anatomischer Asymmetrien zu kreis- oder spiralförmigen Bewegungsmustern, ohne dass sie sich des Fehlers aufgrund der nur minimalen Abweichung von der Wunschrichtung bei jedem einzelnen Schritt gewahr werden würden.

Der Bewegungsalgorithmus muss also dahingehend angepasst werden, dass große Potentialdifferenzen gegenüber kleineren Differenzen überproportional gewichtet werden. In der vorliegenden Arbeit erwies sich nach Prüfung verschiedener Möglichkeiten in Adaption des linearen Algorithmus die nachfolgende Lösung als besonders effektiv:

$$p_{ij} = \frac{\text{diff}_{ij}^{\text{GF}}}{\sum_{i,j} \text{diff}_{ij}^{\text{GF}}} \quad [4-11]$$

mit:

$$\text{diff}_{ij} = \begin{cases} (\text{sff}_{0,0} - \text{sff}_{i,j}) + (\text{dff}_{i,j} - \text{dff}_{0,0}), & (\text{sff}_{0,0} - \text{sff}_{i,j}) + (\text{dff}_{i,j} - \text{dff}_{0,0}) > 0 \\ 0 & , (\text{sff}_{0,0} - \text{sff}_{i,j}) + (\text{dff}_{i,j} - \text{dff}_{0,0}) \leq 0 \end{cases} \quad [4-12]$$

Entscheidende Ergänzung gegenüber dem linearen Bewegungsalgorithmus (vgl. 4.4.4.1) ist der Glättungsfaktor GF, mit dem die Potentialdifferenz  $\text{diff}_{ij}$  der statischen und dynamischen Potentiale aus aktueller Zelle und Nachbarzelle potenziert wird [4-11]. Dabei werden in Richtung des Ziels nur positive Potentialdifferenzen berücksichtigt. Ist diese negativ, so wird sie zu 0 gesetzt, siehe Gleichung [4-12]. Der Algorithmus ergänzt die erstmalige Berechnung der Potentialdifferenzen in der in Abb. 4-22 grafisch dargestellten Bewegungsmethode. Das Ausweichverhalten im Falle einer Blockade bleibt hingegen unverändert.

Durch das Potenzieren der Potentialdifferenzen wird bewirkt, dass die Zellübertrittswahrscheinlichkeit für große Potentialdifferenzen vergrößert und für kleine Potentialdifferenzen verkleinert wird. Hierdurch kann die Streuung der Trajektorien der Agenten zwar vermindert werden, bei größeren Glättungsfaktoren tritt jedoch auch die Anisotropie des zu Grunde liegenden Zellrasters stärker hervor, welche einzig bei Anwendung des isotropen statischen Grundfeldes unter Berücksichtigung des um  $\sqrt{2}$  längeren Weges in der Diagonalen überwunden werden kann (vgl. hierzu Abschnitt 4.4.7).

#### 4.4.4.3 Exponentieller Algorithmus

Mit Hilfe des polynomischen Algorithmus simulierte Trajektorien zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem real erfassten Bewegungsverhalten von Fußgängern. Gleichwohl bedarf es für Zellübertritte zu Zellen mit gleichem oder höherem statischen Potential einer eigenen Berechnungsvorschrift. Um den Agenten im gleichen Rechenschritt mit einer stark reduzierten Wahrscheinlichkeit auch den Übertritt zu einer vom Ziel weiter entfernten Zelle zu ermöglichen ist ein funktionaler Zusammenhang erforderlich, der im gesamten reellen Zahlenraum  $\mathbb{R}$  größere gegenüber kleineren Potentialdifferenzen überproportional gewichtet. Einen solchen Zusammenhang bietet die Exponentialfunktion: Neben exponentiell wachsenden Funktionswerten wird bei dieser ein beliebiges Argument  $\in \mathbb{R}$  immer in  $\mathbb{R}^+$  abgebildet.

Abb. 4-24 stellt die funktionalen Zusammenhänge zur Gewichtung der Potentialdifferenzen zwischen Ausgangs- und Zielzelle der drei untersuchten Bewegungsalgorithmen einander gegenüber. Dargestellt ist die Gewichtung für Potentialdifferenzen von -4 bis +2. Negative Potentialdifferenzen werden beim linearen und polynomischen Bewegungsalgorithmus mit der Kehrwertfunktion [4-10] gleich behandelt. Positive Potentialdifferenzen werden beim

linearen Algorithmus identisch abgebildet, beim polynomischen Algorithmus hingegen mit einem Glättungsfaktor GF potenziert. Bei beiden Algorithmen entsteht beim Nulldurchgang eine Diskontinuität, die im Zuge der Implementierung in Form einer sequentiellen Programmierung zu berücksichtigen ist (vgl. Abb. 4-22).

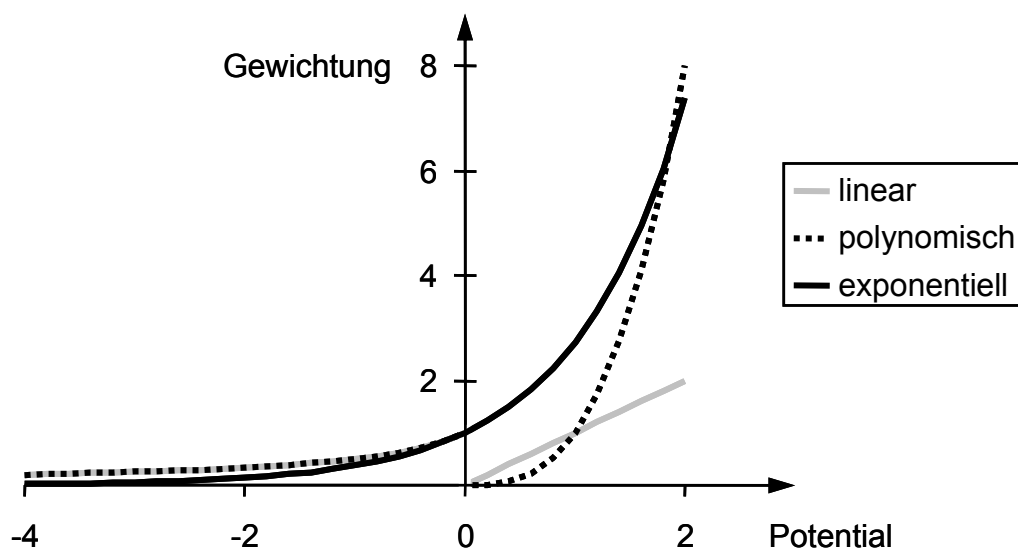


Abb. 4-24: Gewichtung der Potentialdifferenzen

Erfolgt die Gewichtung der Potentialdifferenzen mit einer Exponentialfunktion, so ist die zweistufige Implementierung von Zielfindungs- und Ausweichmodus obsolet. Bei dieser haben die Agenten mit einer vernachlässigbar kleinen Wahrscheinlichkeit zu jedem Zeitschritt die Möglichkeit sich auch dann vom Ziel zu entfernen, wenn der direkte Weg in Richtung Ziel offen steht. Ist der direkte Weg zum Ziel hingegen versperrt, so werden durch die Normierung die zunächst sehr kleinen Übertrittswahrscheinlichkeiten höher bewertet.

Abb. 4-25 zeigt die normierte Summenlinie für die drei Algorithmen unter der Annahme von Potentialdifferenzen im Intervall  $[-4, +2]$ . Alle drei Kurven zeigen eine progressiv wachsende Gradienten was belegt, dass bei allen Algorithmen die Übertrittswahrscheinlichkeiten mit zunehmender Potentialdifferenz wie erwünscht zunehmen. Bei einem empirisch bislang kaum belegten funktionalen Zusammenhang sind somit alle drei Algorithmen zulässig. Hinsichtlich Implementierung und Selbstorganisation der Agenten zur Laufzeit der Simulation überwiegen jedoch eindeutig die Vorteile der Exponentialfunktion.



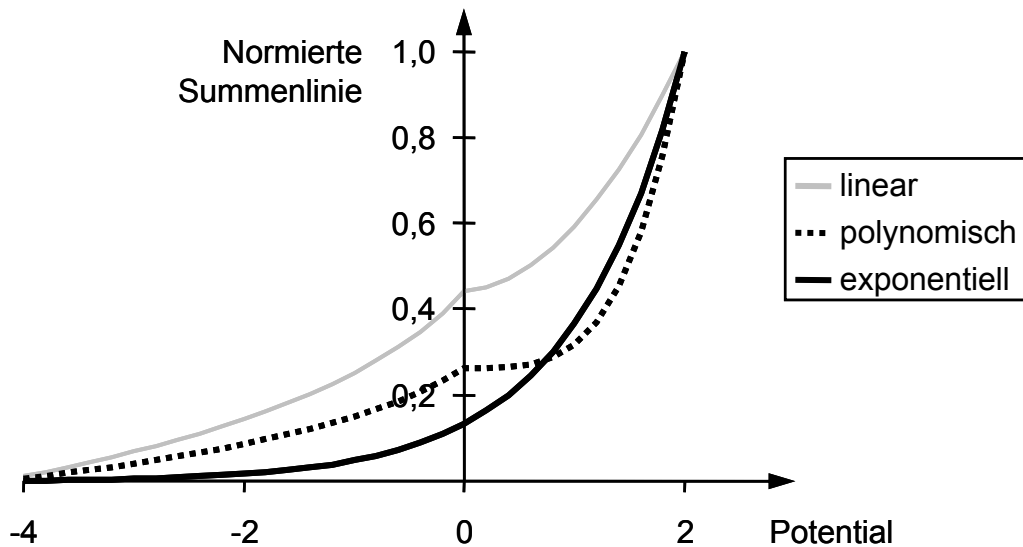


Abb. 4-25: Normierte Summenlinien der Potentialdifferenzen

Die Implementierung des exponentiellen Algorithmus erfolgt analog zu Gleichung [2-3]. Bei der Methode *move()* in Abb. 4-22 ergibt sich damit ein kombinierter Zielfindungs-Ausweichmodus in der soeben verbal beschriebenen Form, was mit einer deutlichen Vereinfachung und Kürzung des erforderlichen Quellcodes einhergeht.

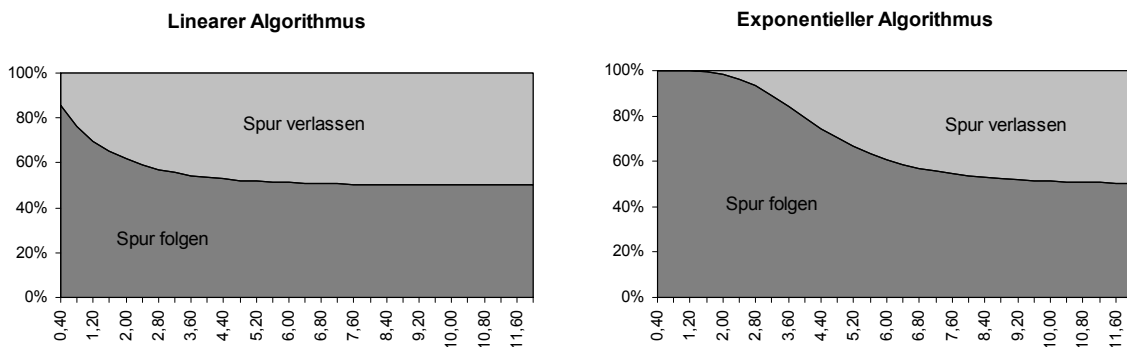


Abb. 4-26: Wahrscheinlichkeit der dynamischen Spur eines Agenten zu folgen in Abhängigkeit von Entfernung und appliziertem Algorithmus

Ein weiterer Vorteil des exponentiellen Algorithmus zeigt sich bei Untersuchung der Wahrscheinlichkeiten, mit der ein Agent einem anderen aufgrund des von Letzterem induzierten dynamischen Potentials in dessen Spur nachfolgt. Abb. 4-26 entstand unter der vereinfachenden Annahme, dass statt der Auswahl aus maximal acht unterschiedlichen Bewegungsrichtungen zu jedem Zeitschritt nur die digitale Auswahl zwischen der Spur des vorausgehenden Agenten folgen oder nicht folgen möglich wäre.

Weiterhin ist sowohl der statischen Potentialdifferenz als auch dem maximalen dynamischen Potential der Wert 10 zugewiesen, das dynamische Potenti-

al zerfällt mit  $z = 0,8$  je Zeitschritt. Die beiden Diagramme stellen die Wahrscheinlichkeiten für das Folgen bzw. Nichtfolgen in Abhängigkeit von der Entfernung (Zellkantenlänge =  $0,4$  m) zwischen den Agenten dar.

Es zeigt sich, dass beim linearen Algorithmus selbst unmittelbar hinter dem vorausgehenden Agenten die Wahrscheinlichkeit für das Folgen lediglich gut 80 % beträgt. Schon ab einem Abstand von etwa 5 m ist der Einfluss des dynamischen Grundfeldes quasi negierbar. Es zeigt sich, dass keine sinnvolle Auswahl von Gewichtungsparemtern möglich ist, mit denen die Wahrscheinlichkeit für das Folgen bei geringem Abstand gegen 100 % geht.

Anders beim exponentiellen Algorithmus, wo mit den Gewichtungsparemtern  $g_s$  und  $g_D$  nach Gleichung [2-3] nahezu jede Parität eingestellt werden kann. Die Implementierung des exponentiellen Algorithmus bietet somit ein Werkzeug, mit dem mit wenigen Parametern eine Kalibrierung an empirisch ermittelten Fußgängerverkehrsdaten vorgenommen werden kann.

#### 4.4.5 Bewegung unter Verwendung anisotroper SFF

Unter Zugrundelegung eines anisotropen statischen Grundfeldes (vgl. 4.4.2.1) mit parallel verlaufenden Äquipotentiallinien können bis zu drei benachbarte Zellen den gleichen nächst kleineren statischen Potentialwert aufweisen (Abb. 4-27).

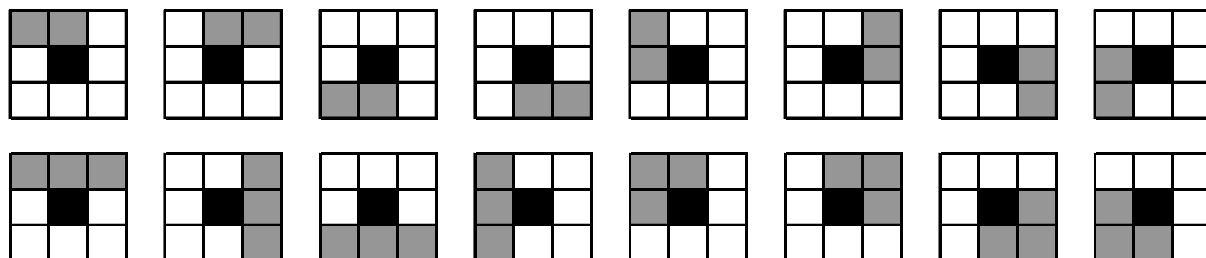


Abb. 4-27: Mögliche Kombinationen von zwei oder drei benachbarten Zellen mit kleinerem, gleichen Potential (anisotropes statisches Grundfeld)

Sofern nur genau eine benachbarte Zelle einen kleineren Potentialwert aufweist und diese Zelle nicht durch einen anderen Agenten besetzt ist, wird der Agent mit der größten Wahrscheinlichkeit dort hin bewegt. Stehen jedoch zwei oder drei benachbarte Zellen mit kleinerem und untereinander gleichem Potentialwert zur Auswahl, sind diese mit der jeweils gleichen Wahrscheinlichkeit das Ziel des Agenten. Die starke Anisotropie des Grundfeldes offenbart Abb. 4-31.

Hier sind die Trajektorien von jeweils 1000 Agenten aus 12 Simulationsläufen mit unterschiedlichen Randbedingungen dargestellt, bei denen die Agen-

ten ausgehend von zehn Quellen  $Q$  an den Rändern des Simulationsgebiets einem gemeinsamen Ziel  $Z$  in der Mitte zustreben. Die in der ersten Zeile der Abbildung dargestellten Simulationsläufe mit zu Grunde liegendem anisotropem statischem Grundfeld zeigen zwei zentrale Nachteile dieses Feldtyps.

Zum einen fehlt den Agenten bei parallel verlaufenden Isopotentiallinien die Fokussierung auf ihr Ziel. Da bei einer freien Fläche ohne Belegung durch andere Agenten immer drei benachbarte Zellen mit dem gleichen geringeren statischen Potentialwert zur Verfügung stehen und diese bei Anwendung aller Bewegungsalgorithmen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit zum Ziel werden, streben die Agenten in diesen Bereichen immer weiter auseinander.

In Abb. 4-28 kann dieser Vorgang anhand eines Höhenmodells des anisotropen statischen Grundfeldes nachvollzogen werden. An den Quellen  $Q_1$  und  $Q_2$  eingespeisten Agenten stehen so lange jeweils drei Nachbarzellen mit der gleichen Übertrittswahrscheinlichkeit zur Verfügung (dunkler dargestellte Zellen in Abb. 4-28), bis sie auf die Diagonale treffen, an der sie direkt ins Ziel geleitet werden.

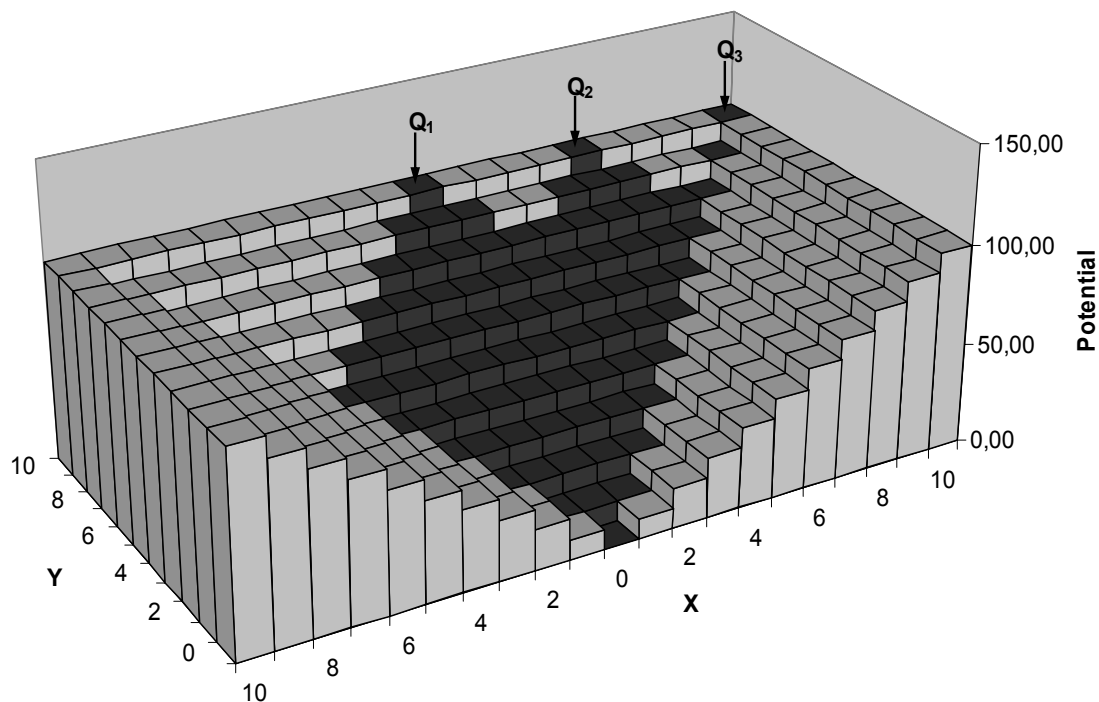


Abb. 4-28: Visualisierung eines anisotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_3$

Zum anderen steht an den rechtwinkligen Ecken der Isopotentiallinien immer nur genau eine benachbarte Zelle mit einem kleineren Potentialwert zur Verfügung, die zum Ziel eines Agenten werden muss, sofern sie nicht besetzt ist. In diesen Bereichen reihen sich die Agenten somit genau auf den Diago-

nalen hinter einander auf, so wie es im Beispiel der Abb. 4-28 den in  $Q_3$  eingespeisten Agenten ergeht.

Bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand erweist sich diese erste Implementierung eines statischen Grundfeldes somit als wenig realitätsnah. Für die weiteren Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wurde sie daher verworfen.

### **4.4.6 Bewegung unter Verwendung pseudoisotroper SFF**

Bei Verwendung von pseudoisotropen statischen Grundfeldern (vgl. 4.4.2.2) treten in der Nachbarschaft einer Zelle heterogenere Potentialwerte auf als dies bei den anisotropen statischen Grundfeldern der Fall ist. Damit kommen bei Abbildung der relativen Potentialdifferenz auf die Übertrittswahrscheinlichkeit unter Anwendung der drei Bewegungsmethoden nun größere Unterschiede zur Geltung.

Obwohl das erste Summenbild der Trajektorien (Abb. 4-31, zweite Zeile, linkes Bild) verglichen zur Ausprägung bei Zugrundelegung eines anisotropen statischen Feldes bereits eher real zu erwartenden Trajektorien entspricht, können in Abhängigkeit von der Position der Agenten in Orientierung auf das Ziel drei verschiedene Gruppen unterschiedlichen Bewegungsverhaltens identifiziert werden:

- Bewegung in orthogonaler Zielrichtung,
- Bewegung in diagonalen Zielrichtung,
- Bewegung im durch orthogonale und diagonale Zielrichtung begrenzten Sektor.

Im Trajektorienbild deutlich erkennbar ist eine geringfügig stärkere Streuung der Pfade in orthogonaler als in diagonalen Zielrichtung sowie eine im Vergleich deutlich erhöhte Streuung im sektoralen Bereich. Ursächlich hierfür sind die in Abhängigkeit von den Potentialunterschieden ermittelten Übertrittswahrscheinlichkeiten, wie in Abb. 4-29 klar zu erkennen ist. Hier sind für die in  $Q_1$  bis  $Q_3$  eingespeisten Agenten jeweils die Wege mit den größten Potentialdifferenzen und somit mit den größten Übertrittswahrscheinlichkeiten dunkler eingefärbt dargestellt.

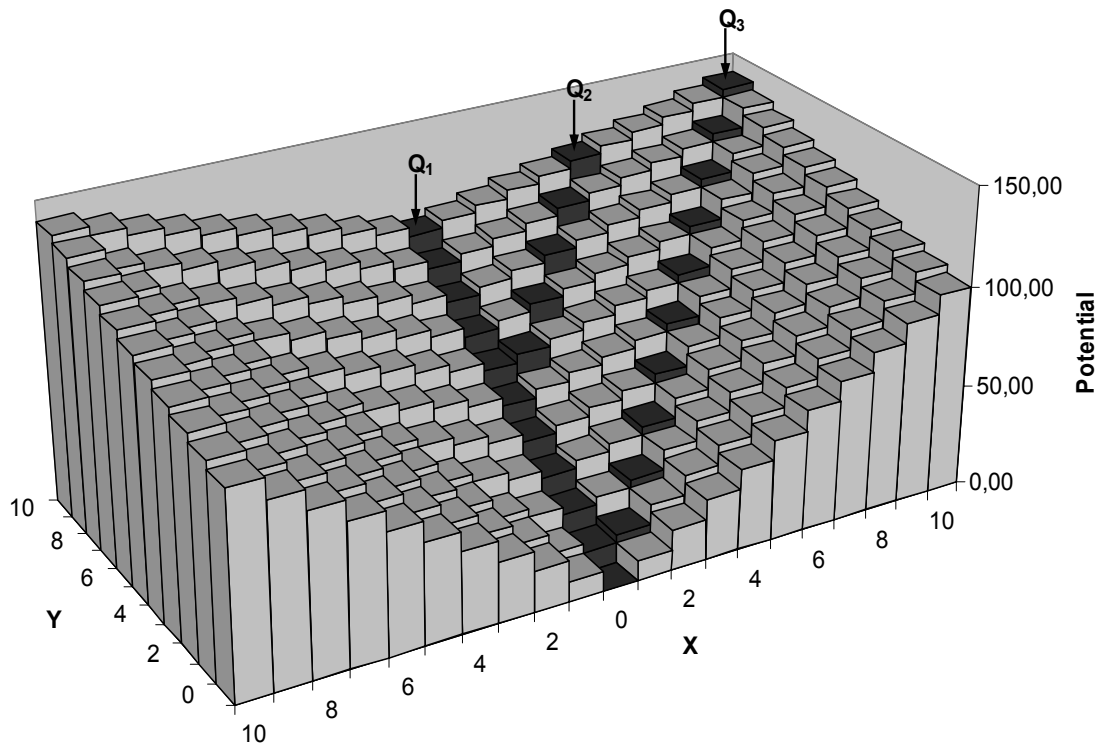


Abb. 4-29: Visualisierung eines pseudoisotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_3$

Für in  $Q_3$  eingespeiste Agenten beträgt die Potentialdifferenz in diagonaler Richtung 14 und in orthogonaler Richtung jeweils 4. Die damit in diagonaler Richtung auftretende größte diskrete Übertrittswahrscheinlichkeit beträgt somit ca. 64 % zu etwa 45 % für aus  $Q_1$  kommende Agenten bei Zellübertritt in orthogonale Richtung. Hier beträgt die Potentialdifferenz in orthogonaler Richtung 10 und in diagonaler Richtung jeweils 6. Im gesamten sektoralen Bereich zwischen diagonaler und orthogonaler Ursprungslinie beträgt die Übertrittswahrscheinlichkeit in orthogonaler Richtung etwa 36 % und in diagonaler Richtung 50 %.

Da hier also keine Übertrittswahrscheinlichkeit ein deutliches Übergewicht besitzt, kommt es zu der vergleichsweise hohen Streuung der Agenten. Werden große Potentialdifferenzen zum Zwecke der Glättung der Trajektorien stärker bevorzugt, so folgen die Trajektorien zunehmend dem in Abb. 4-29 erkennbaren Muster (Abb. 4-31, zweite Zeile, mittleres und rechtes Bild).

Auch das pseudoisotrope statische Grundfeld erweist sich bei Durchführung der Simulationsläufe somit als wenig zufrieden stellend, weshalb im Zuge der Arbeit auch die Implementierung des isotropen Grundfeldes betrieben wurde. Seine Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten sind im Folgeabschnitt dargestellt.

#### 4.4.7 Bewegung unter Verwendung isotroper SFF

Die vorliegende Implementierung des isotropen statischen Grundfeldes (vgl. 4.4.2.3) stellt die bestmögliche Näherung an die theoretische Ausbreitung eines äquidistanten Potentials im kontinuierlichen Raum dar. Das Trajektorienbild in Abb. 4-31 zeigt demzufolge unabhängig von der Bewegungsrichtung eine ähnliche Streuung und somit ein ähnliches Bewegungsverhalten der Agenten (dritte Zeile, linkes Bild).

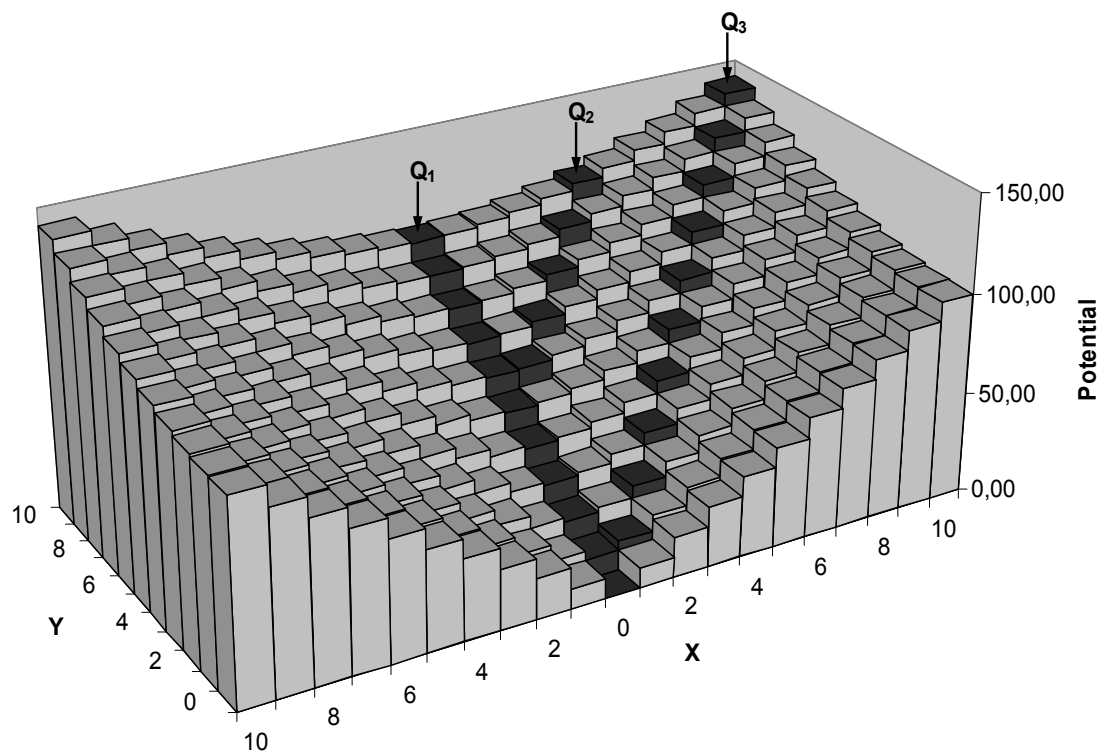


Abb. 4-30: Visualisierung eines isotropen statischen Grundfeldes als Höhenmodell und mit drei Quellpunkten  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_3$

Doch auch hier lässt sich die Anisotropie des zweidimensionalen Quadratrasters nicht ganz negieren. Abb. 4-30 zeigt wiederum einen Ausschnitt des Grundfeldes als Höhenmodell mit den dunkel eingefärbten Wegen der größten Potentialdifferenzen ausgehend von den Quellen  $Q_1$  bis  $Q_3$ . Im Gegensatz zum pseudoisotropen Grundfeld variieren hier im sektoralen Bereich zwischen orthogonaler und diagonaler Ursprungslinie jedoch die Potentialunterschiede zwischen orthogonaler und diagonaler Zellnachbarschaft: Je näher eine Zelle an der orthogonalen Ursprungslinie liegt, desto geringer wird der Unterschied der Potentialdifferenzen in diagonaler und orthogonaler Bewegungsrichtung, womit sich auch die entsprechenden Übertrittswahrscheinlichkeiten angleichen.

Bei unmittelbarer Korrelation von Potentialdifferenz und Übertrittswahrscheinlichkeit fällt die verbleibende Anisotropie des diskreten Raums hinsichtlich der Navigation zunächst nicht gravierend aus. Dies stellt sich jedoch gänzlich anders dar, falls mit Hilfe des polynomischen oder exponentiellen Algorithmus große Potentialdifferenzen überproportional gewichtet werden (Abb. 4-31, dritte Zeile, mittleres und rechtes Bild).

Hinsichtlich der Potentialdifferenzen kann der Anisotropie mit einem einfachen aber effektvollen Rechenschritt jedoch wirkungsvoll begegnet werden: Da sich die Potentialdifferenzen beim isotropen im Gegensatz zum anisotropen bzw. pseudoisotropen statischen Grundfeld unmittelbar aus den analytisch ermittelten Entfernungen vom Ziel ableiten, müssen die Potentialdifferenzen bei diagonalen Zellnachbarschaften lediglich um Faktor  $\sqrt{2}$  reduziert werden.

Beim anisotropen bzw. pseudoisotropen statischen Grundfeld wäre diese Operation wirkungslos, da sich hier Potential und Nutzung des diskreten Raums entlang der Kanten und Ecken des Quadratrasters entwickeln. Während die geometrische Anisotropie eine unabänderliche Grundeigenschaft eines ZA darstellt, kann die Anisotropie der Übertrittswahrscheinlichkeiten damit restlos überwunden werden (Abb. 4-31, letzte Zeile).

#### 4.4.8 Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen

Abb. 4-31 zeigt Simulationsergebnisse für alle drei statischen Grundfeldtypen sowie bei Modifizierung der Diagonalen beim isotropen Grundfeld mit Faktor  $\sqrt{2}$  (Zeilen eins bis vier) unter Verwendung des linearen, polynomischen und exponentiellen Bewegungsalgorithmus (linke, mittlere und rechte Spalte). Die geometrischen Formen der statischen Grundfelder sind am linken Rand der Abbildung grafisch wiedergegeben.

Im Falle der Zugrundelegung eines anisotropen Grundfeldes sind zwischen den drei Bewegungsalgorithmen wie zu erwarten keine systembedingten Unterschiede festzustellen, da die Potentialdifferenzen zu den benachbarten Zellen untereinander identisch sind und sich somit ihr Verhältnis auch bei einer Potenzierung oder einer exponentialen Abbildung nicht verändert (erste Zeile).

Anders sieht dies in der zweiten und dritten Zeile bei Verwendung eines pseudoisotropen bzw. isotropen statischen Grundfeldes aus, wo bei überproportionaler Gewichtung großer Potentialdifferenzen eine deutliche Abnahme der Streuung der Trajektorien erkennbar wird. Durch die damit einhergehende Bevorzugung des Weges der größten Potentialdifferenzen verlaufen die Trajektorien jedoch zunehmend in diagonalen Richtung bis zu jener

Stelle, an der sie auf eine orthogonale Ursprungslinie treffen (vgl. Abb. 4-29 und Abb. 4-30).

Eine letztlich zufrieden stellende Implementierung zeigt die letzte Zeile von Abb. 4-31. Insbesondere bei großen Glättungsfaktoren bewegen sich die Agenten mit lediglich kleinen Varianzen um die Ideallinie ins Ziel. Dies zeigt auch die statistische Auswertung der durch die Agenten zurückgelegten Wegelängen zwischen den Quellen  $Q_i$  ( $i = 1, \dots, 10$ ) und dem im Zentrum gelegenen Ziel  $Z$  (Tab. 4-3)

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	
linear	Agenten	102	108	94	100	105	99	109	92	94	97	<b>1000</b>
	Mittelwerte	71,0	70,5	86,0	65,0	85,5	71,1	70,6	85,9	65,1	85,8	<b>75,6</b>
	Standardabweichungen	2,91	2,37	3,92	2,83	2,77	2,95	3,05	2,74	3,01	3,00	<b>2,95</b>
polyno- misch	Agenten	111	97	89	108	100	87	108	100	95	105	<b>1000</b>
	Mittelwerte	59,8	60,0	78,0	57,2	77,4	60,3	59,7	77,5	57,0	77,4	<b>66,4</b>
	Standardabweichungen	1,41	1,46	2,00	1,60	1,42	1,83	1,50	1,77	1,34	1,99	<b>1,63</b>
expo- nentiell	Agenten	108	91	105	91	110	110	87	103	95	100	<b>1000</b>
	Mittelwerte	57,8	58,0	73,2	52,5	72,8	57,9	57,7	72,8	52,4	72,8	<b>62,8</b>
	Standardabweichungen	0,68	0,77	1,45	0,96	1,11	1,13	0,74	1,38	0,97	1,66	<b>1,09</b>
kürzester Weg		52,7	52,7	70,4	49,6	70,4	52,7	52,7	70,4	49,6	70,4	<b>59,2</b>

Tab. 4-3: Statistische Auswertung der Wegelängen (in m) der letzten Zeile der in Abb. 4-31 dargestellten Simulationsergebnisse

Bei zu Grunde gelegtem linearem Bewegungsalgorithmus sind die von den Agenten zurückgelegten Wege im Mittel um 28 % länger als die kürzest mögliche Verbindung, die mittlere Standardabweichung über die einzelnen Quell- Zielbeziehungen beträgt 3,0 m. Beim polynomischen Bewegungsalgorithmus sind die Wege im Mittel nur noch um 12 % länger, beim exponentiellen Algorithmus sind es nur noch 6 %. Auch die mittleren Standardabweichungen sind mit 1,6 m beim polynomischen Algorithmus und 1,1 m beim exponentiellen Algorithmus mit zunehmender Glättung der Trajektorien erwartungsgemäß rückläufig.

Der exponentielle Algorithmus ermöglicht von allen untersuchten Varianten die beste Parametrierung. Zudem generiert das isotrope statische Grundfeld mit modifizierter Behandlung diagonalen Zellenachbarschaften Trajektorien, die der Ideallinie am nächsten kommen. Daher werden dem in dieser Arbeit implementierten Simulationsframework letztlich diejenigen Algorithmen zu Grunde gelegt, die zu einem in Abb. 4-31 rechts unten dargestellten Simulationsergebnis führen.



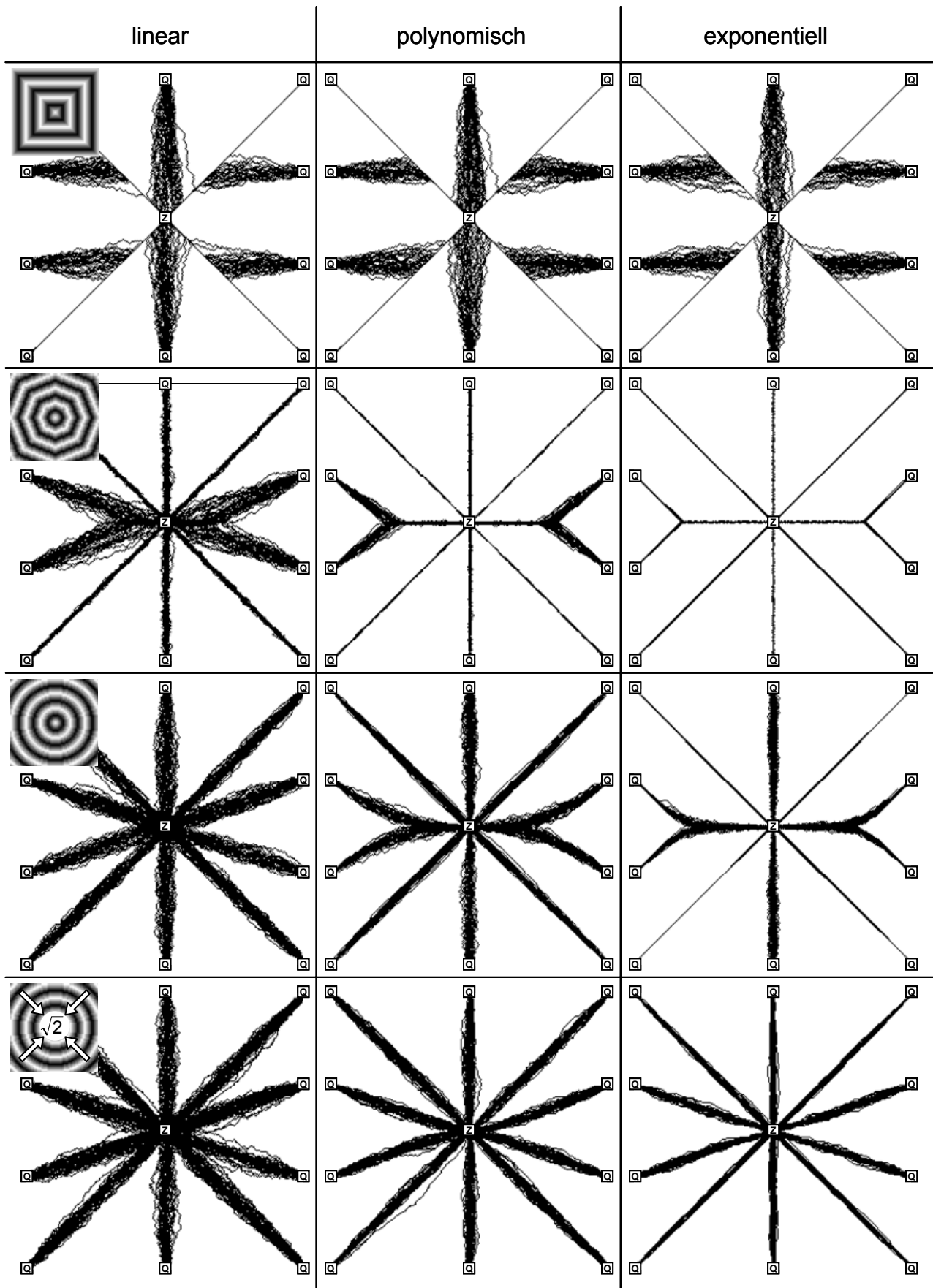


Abb. 4-31: Gegenüberstellung der Trajektorien von jeweils 1000 Agenten bei variierenden statischen Grundfeldern und Bewegungsalgorithmen

## **5 Referenzszenario Campus Vaihingen**

### **5.1 Auswahlkriterien**

Zum Zwecke der Validierung und Kalibrierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsumgebung war die Bestimmung eines Referenzszenarios erforderlich. Folgende Kriterien waren für die Auswahl relevant:

- Verfügbarkeit geometrischer Ausgangsdaten
- Hohes, regelmäßiges Fußgängeraufkommen
- Gute Datenlage zu Größe und Verteilung des Fußgängerverkehrs
- Gute Übersichtlichkeit für evtl. erforderliche Verkehrserhebung

Auch die räumliche Nähe zur Universität Stuttgart sowie die bereits vorhandenen Ortskenntnisse gaben letztlich den Ausschlag für den Campus Vaihingen der Universität Stuttgart. Im Vergleich zu anderen in Erwägung gezogenen Szenarien wie dem Terminal 1 des Flughafens Stuttgart, der Fußgängerebene der Arnulf-Klett-Passage am Hauptbahnhof Stuttgart, der unteren Königsstraße oder der Neuen Messe Stuttgart am Flughafen werden die vorgenannten Argumente hier am besten erfüllt.

### **5.2 Lage und verkehrliche Charakteristiken**

Das als Referenzszenario herangezogene Gebiet liegt bei 48°44'45" Nord und 9°06'20" Ost, was etwa den UTM-Koordinaten (easting, northing) 3.507.830, 5.400.930 entspricht. Für die plattformunabhängige Betrachtung eines georeferenzierten Orthobildes sowie einer kartesischen Vektordarstellung der Wegeinfrastruktur des Referenzszenarios empfiehlt sich die Verwendung der kostenlosen Applikation Google Earth. Über die Eingabe von geographischer Länge und Breite kann der Campus direkt angesteuert werden.



Abb. 5-1: Orthofoto Campus Vaihingen, Ausdehnung Referenzszenario

Das betrachtete Gebiet hat eine Ausdehnung von 200 Metern in West-Ost- und von 100 Metern in Nord-Süd-Richtung (vgl. weißes Rechteck in Abb. 5-1). Auf der West-, Nord- und Südseite wird der zentrale Platz von Einrichtungen und Institutsgebäuden der Universität Stuttgart begrenzt. Im Osten befindet sich ein Schulungszentrum der Deutschen Telekom. Ebenfalls im östlichen Bereich liegt eine Wendeschleife für den Linienbusverkehr.

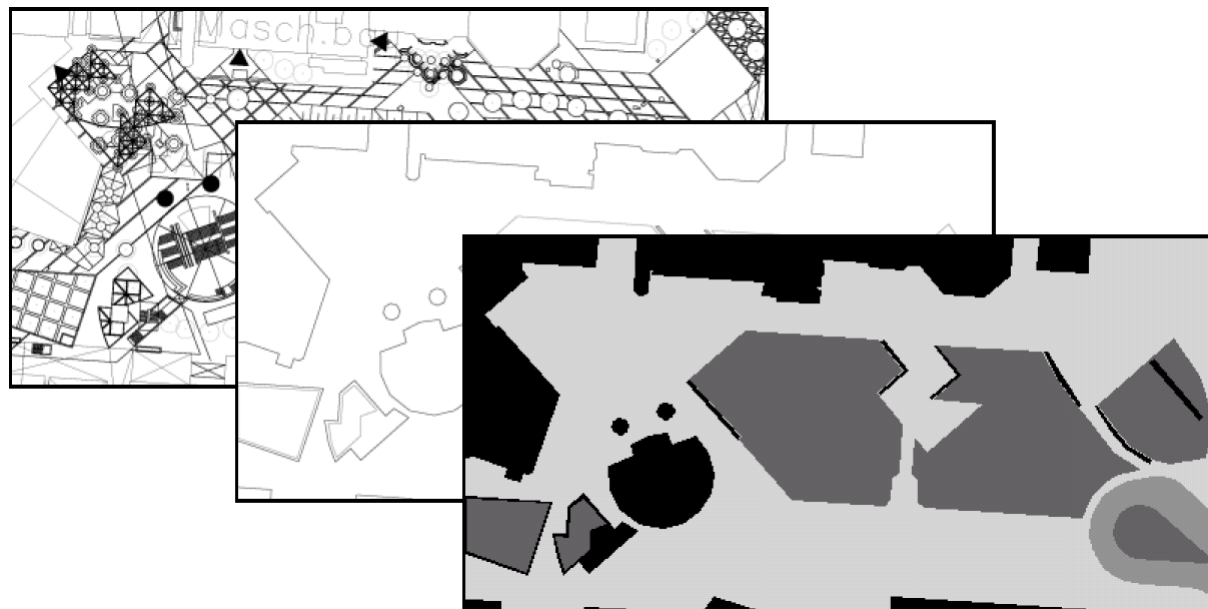
Als Teil des öffentlichen Straßenraumes wird diese auch vom Individualverkehr befahren. Die zentrale Erschließung des Campus erfolgt durch die unterirdische S-Bahn-Haltestelle Universität. Ein Aufgang der Haltestelle mit Fahrtreppen und Aufzügen zu beiden Richtungsgleisen zur Gewährleistung des barrierefreien Zugangs befindet sich in zentraler Lage auf dem Campus. Ein kegelförmiges Glasdach überdeckt den Aufgangsbereich. Schließlich weist der Campus eine zentrale Grünfläche sowie zahlreiche Bäume und Möblierungsgegenstände auf.

### 5.3 Quellen für Umgebungsgeometrie

Folgende Datenquellen wurden auf ihre Eignung als Grundlage für die Generierung der Umgebungsgeometrie der Fußgängersimulation hin untersucht:

- ESRI-Shapefiles der Universitätsgebäude (Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart)
- Digitaler Stadtplan und digitale Stadtkarte (Stadtmessungsamt, Landeshauptstadt Stuttgart)

- GDF-Datensatz für den Bereich S-Vaihingen (Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart)
- Digitaler Lageplan des Campus Vaihingen im DXF-Format (Bauamt der Universität Stuttgart).



*Abb. 5-2: Ausgangsplan, berücksichtigte Layer und aufbereitete Geometrie (v.l.n.r.) des Campus Vaihingen*

Den größten Detaillierungsgrad aller untersuchten Datensätze wies der digitale Lageplan des Bauamtes der Universität Stuttgart auf. Unter Berücksichtigung der Einsatzmöglichkeiten der Simulationsumgebung sowie der vielfältigen Vorteile des DXF-Formats (vgl. Abschnitte 1.1 und 3.2.2) wurde Letzteres als geometrische Datengrundlage ausgewählt.

Wie ebenfalls in Abschnitt 3.2.2 besprochen, mussten für die Fußwegegeometrie relevante Attribute den Zeichnungsobjekten durch Zuordnung zu spezifischen Zeichnungsebenen, den sog. Layern manuell zugewiesen werden. Als Bearbeitungsprogramm kam hierzu AutoCAD 2005 zum Einsatz. Über die Mehrfachauswahl von Zeichnungsobjekten lassen sich diese recht komfortabel und schnell den jeweiligen Layern zuweisen. Nach Umwandlung in das AWML-Format (Abschnitt 3.4), kann die Geometrie des Campus Vaihingen in die Simulationsumgebung importiert werden (Abschnitt 4.3). In Abb. 5-2 sind die Resultate der vorstehend beschriebenen Arbeitsschritte grafisch dargestellt.

## 5.4 Quellen für Verkehrsaufkommen

Neben dem zu Grunde liegenden Modell beeinflusst auch die angenommene räumliche und zeitliche Verteilung des Verkehrsaufkommens ganz maßgebend Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse von Verkehrssimulationen. Für die Quell-Ziel-Matrix einer mikroskopischen Verkehrssimulation werden in einem Maß räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Daten benötigt, wie sie bis dato im Regelfall nicht erfasst werden bzw. erfassbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sämtliche verfügbaren Datenquellen erfasst und auf ihre Eignung hin bewertet.

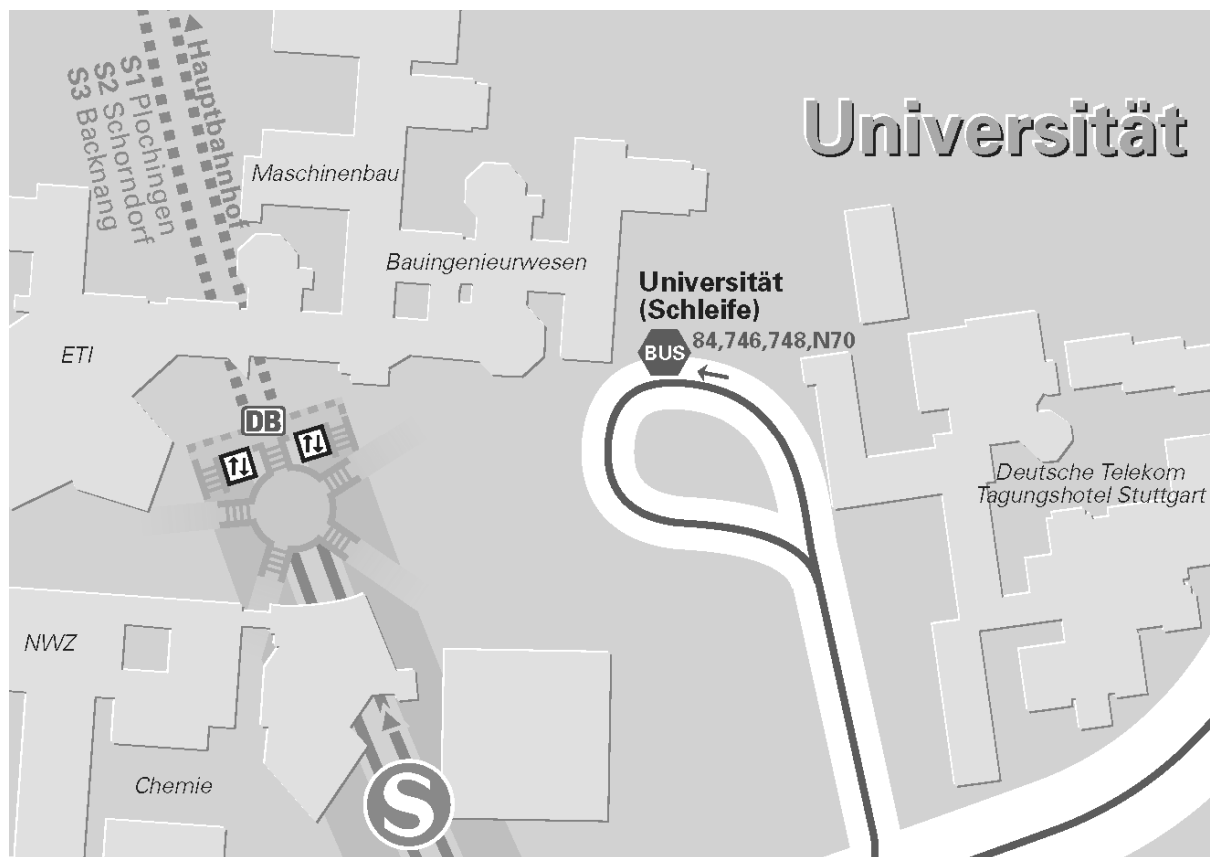


Abb. 5-3: S-Bahn und Bus am Campus Vaihingen [VVS 2007]

Aufgrund der optimalen Erschließung des Campus durch den Schienenpersonennahverkehr zeichnet sich die Haltestelle Universität der S-Bahn (Abb. 5-3) durch ein besonders hohes Quell- und Zielverkehrsaufkommen aus. Der Streckenast wird in beiden Richtungen von drei Linien bedient. Dadurch ergibt sich aus Richtung Stadtmitte bzw. aus Richtung Stuttgart-Vaihingen ganztägig jeweils ein 10-Minuten-Takt.

Von der Deutschen Bahn AG als Betreiberin der S-Bahn Region Stuttgart wurde die an einem durchschnittlichen Wochentag erhobenen zu- und ab-

gehenden Fahrgäste in einer stundenweise aggregierten Form zur Verfügung gestellt. In Abb. 5-4 ist die Asymmetrie der Tagesganglinien der zu- und der abgehenden Fahrgäste gut zu erkennen. Während in der Morgenspitze zwischen 7:00 Uhr und 8:00 Uhr aus beiden Richtungen kommend über 1500 Fahrgäste an der Haltestelle Universität aussteigen, steigen in beide Fahrrichtungen im gleichen Zeitraum nur etwas mehr als 700 Fahrgäste zu. Nachmittags überwiegt die Zahl der Zusteiger, wobei die Nachmittagsspitze flacher und breiter ist als die Morgenspitze.

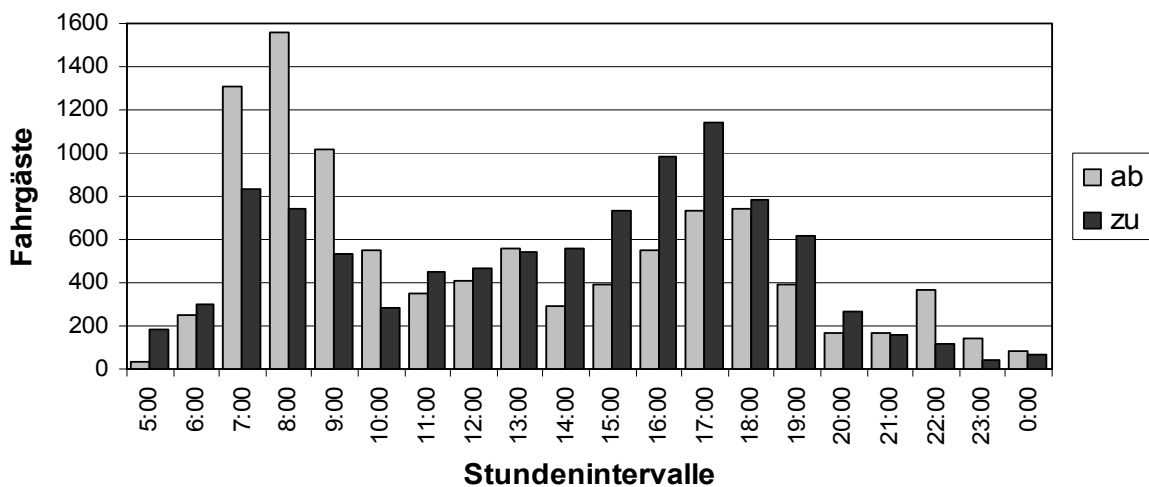


Abb. 5-4: Tagesganglinie Zu- und Abgänge S-Bahn, Haltestelle Universität

Hinsichtlich der an der Wendeschleife ankommenden und abfahrenden Buslinien 84, 746 und 748 (vgl. Abb. 5-3) wurden von der Stuttgarter Straßenbahnen AG kursscharf eigene Zählungen der zu- und abgehenden Fahrgäste zur Verfügung gestellt. In Abb. 5-5 sind die Tagesganglinien nach Zu- und Abgängen getrennt dargestellt. Auffällig ist um 7:31 Uhr ein Kurs mit 50 Zugängen sowie um 12:21 Uhr ein Kurs mit 41 Abgängen.

Diese extremen Ausprägungen konnten an keinem Wochentag durch eigene Beobachtungen verifiziert werden. Es handelt sich dabei offenbar um Einzelereignisse, möglicherweise ausgelöst durch Reisegruppen, Veranstaltungen oder Betriebsstörungen bei der S-Bahn, die genau zum Zeitpunkt der Erhebung zum Tragen kamen.

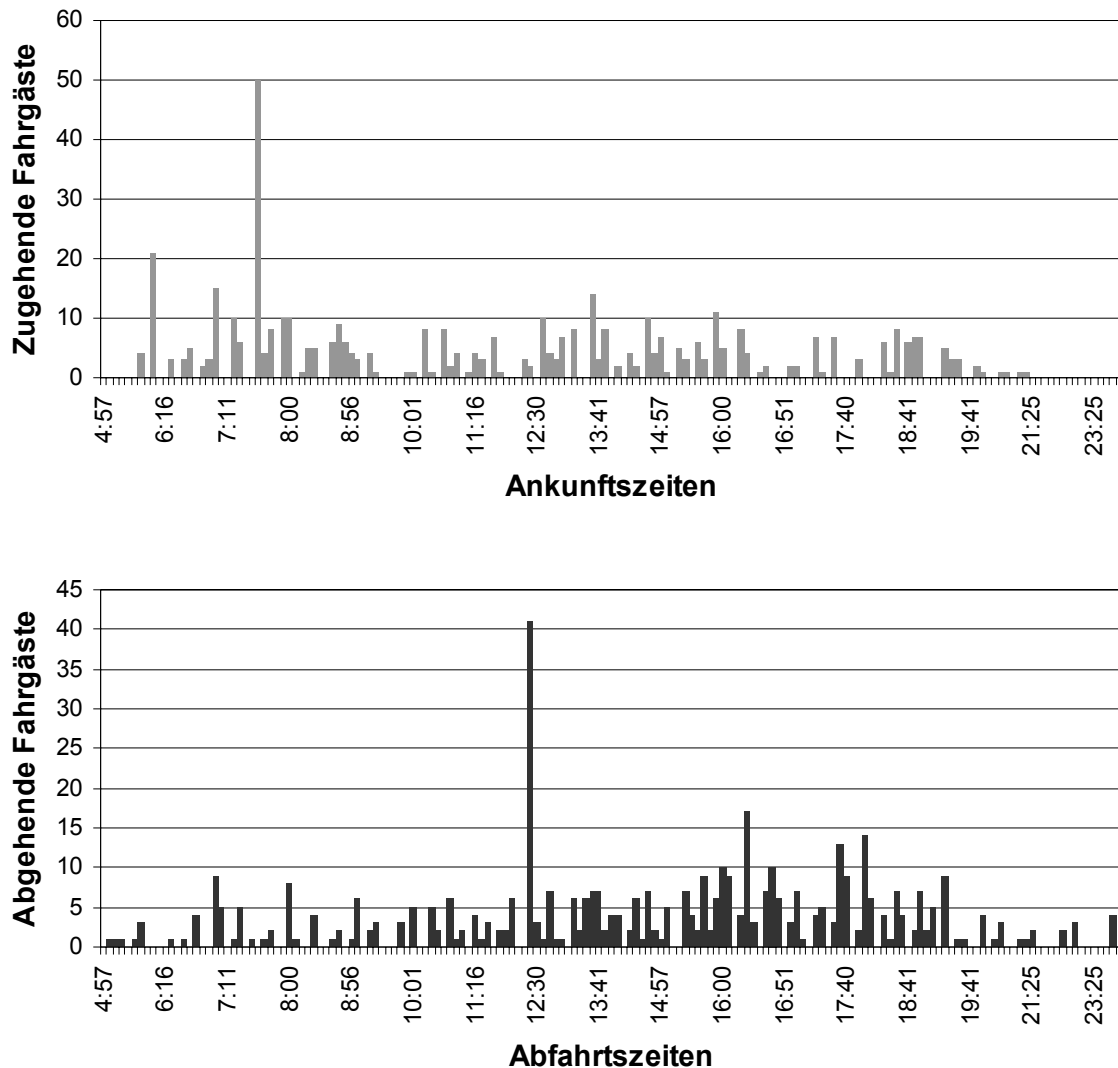


Abb. 5-5: An Bushaltestelle Universität (Schleife) zu- / abgehende Fahrgäste

Maßgebend für die Verkehrserzeugung in den Hochschulgebäuden sind die Zahl der Angestellten der Universität sowie vor allem die Zahl der sich dort aufhaltenden Studierenden. Im Gegensatz zu den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Hochschuleinrichtungen wechselt während des Vorlesungszeitraums eine große Zahl von Studierenden im Zeittakt des Vorlesungsplans den Aufenthaltsort und erzeugt damit ein Verkehrsaufkommen zwischen den Hörsälen sowie den Gebäuden des Hochschulstandorts.

Im Rahmen der einmal im Semester durchzuführenden Evaluation der Lehre haben alle Studierenden in jedem belegten Fach die Möglichkeit, mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens Fach und Dozenten zu bewerten. Die Zahl der eingereichten Fragebögen wird gemeinsam mit Fach und Veranstaltungsort von der Arbeitsstelle Lehrevaluation am Institut für Erziehungswis-

senschaft und Psychologie der Universität Stuttgart in einer zentralen Datenbank abgelegt.

Mit Hilfe des Vorlesungsverzeichnisses wurden im Rahmen dieser Arbeit Zahl der Hörer, Veranstaltungsort und Veranstaltungszeiten des Sommersemesters 2004 zusammengeführt. Für die Hochschulgebäude im Bereich des Referenzszenarios resultiert daraus das in Tab. 5-1 dargestellte Höreraufkommen.

Uhrzeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
8:00-9:30	762	762	557	625	600
9:45-11:15	544	937	627	1869	666
11:30-13:00	378	1439	200	664	990
14:00-15:30	287	170	177	135	117
15:45-17:15	94	160	140	20	12

Tab. 5-1: Hörerzahlen aus Lehrevaluation in Hörsälen V 7, 9, 38, 47 und 53

Die Wochentage mit dem höchsten Höreraufkommen sind Dienstag und Donnerstag, etwa gleichauf gefolgt von Montagen und Freitagen. Der Mittwoch ist der Wochentag mit den wenigsten Lehrveranstaltungen und folglich auch mit den geringsten Hörerzahlen. Die zweite Vorlesung des Tages von 9:45 Uhr bis 11:15 ist am stärksten frequentiert, gefolgt von der dritten und der ersten Vorlesung. Die Vorlesungen am Nachmittag fallen dahinter deutlich zurück. Insofern macht diese Datenbasis einen plausiblen und konsistenten Eindruck.

Es zeigt sich jedoch, dass selbst die vollständige Ausschöpfung aller verfügbaren Daten als verlässliche Ausgangsbasis für eine mikroskopische Verkehrssimulation letztlich nicht ausreicht. Auch in den erhobenen Daten selbst verbergen sich zahlreiche Unbekannte:

- Anteil und Varianz der an der Evaluation teilnehmenden Studierenden
- Zeitliche Entwicklung der Hörerzahlen während eines Semesters
- Örtliche Reihenfolge der individuell besuchten Lehrveranstaltungen

Während die kursscharfe Darstellung der Erhebung der Busfahrgäste für die Belange der mikroskopischen Simulation optimal ist, erzeugt die stunden- und richtungsweise Aggregation des Fahrgastaufkommens bei der S-Bahn weitere Unsicherheiten. Zudem muss die gesamte Verkehrsverteilung zwischen S-Bahn, Bus und Hochschuleinrichtungen auf Annahmen beruhen.



Schließlich sind für bedeutende verkehrserzeugende Stellen wie der Universitätsbibliothek oder der Mensa keine zeitdiskreten Nutzerzahlen verfügbar.

Die im Bereich des Referenzszenarios vergleichsweise gute Datenlage reicht mithin nicht aus, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte mikroskopische Fußgängerverkehrssimulation zum Zwecke der Validierung gegen die Wirklichkeit in hinreichender Qualität zu versorgen. Die für die Erzeugung einer Quell-Zielverteilung verfügbaren Ausgangsdaten liegen meist nur in makroskopischer, räumlich und/oder zeitlich aggregierter Form vor, weshalb eine nach den Gesetzen der Stochastik gültige Validierung mikroskopischer Fußgängerverkehrsmodelle bislang zumeist nicht möglich ist [Blue et al. 2000b].

Um die Möglichkeiten für Validierungen und Vergleichsbetrachtungen zu verbessern, wurden im Rahmen dieser Arbeit umfangreiche Anstrengungen zur Verbesserung der mikroskopischen Datenbasis unternommen. Im nachfolgenden Kapitel 6 werden die diesbezüglichen Überlegungen vorgestellt, Erhebungsalternativen aufgezeigt und das letztlich adaptierte Erhebungsszenario eingehender erläutert.

## 6 Fußgängerverkehrserhebung

### 6.1 Klassifizierung der Erhebungsmethoden

In den Verkehrswissenschaften kommt der Verkehrserhebung allgemein eine große Bedeutung zu. Die erhobenen Daten bilden die Grundlage von Analyse und Prognose der Nutzungsentwicklung verschiedener Verkehrssysteme. Die Erhebungsmethodik hat dabei vielfach großen Einfluss auf Qualität und Repräsentativität der Ergebnisse. Durch eine sorgfältige Entwicklung des Layouts einer Verkehrserhebung kann eine große Übereinstimmung zwischen realem und gemessenem Verkehrsgeschehen erreicht werden.

Für konventionelle Analyse- und Prognoseverfahren genügen vielfach makroskopische, d.h. zeitlich und örtlich aggregierte empirische Ausgangsdaten. Diesbezügliche Erhebungstechniken sind ausgereift, umfassend dokumentiert und wurden vielfach erfolgreich eingesetzt. Die Erhebung mikroskopischer Kenngrößen ist hingegen ungleich aufwändiger und technisch anspruchsvoller. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl verfügbare als auch potentiell mögliche Erhebungsmethoden umfassend auf ihre Eignung zur Gewinnung mikroskopischer Daten hin untersucht und bewertet. Einen Überblick bietet Tab. 6-1.

Methoden	Umfang	invasiv	Detaillierung
Befragung/Wegebuch	Stichprobe	ja	mesoskopisch
Querschnittszählung	Vollerhebung	nein	makroskopisch
Stromerhebung	Stichprobe	ja	makroskopisch
Kordonerhebung	Stichprobe/Vollerhebung	ja/nein	mesoskopisch
Video-/Bildanalyse	Vollerhebung	nein	mikroskopisch

Tab. 6-1: Klassifizierung der Erhebungsmethoden

Die dargestellten fünf methodischen Klassen decken das gesamte Spektrum möglicher Erhebungsszenarien ab. Die Spalte Umfang deutet an, ob mit vertretbarem wirtschaftlichem bzw. zeitlichem Aufwand nur eine Stichprobe oder eine Vollerhebung des beobachteten Verkehrsaufkommens möglich ist. Der aus der Medizin abgeleitete Begriff „invasiv“ charakterisiert, ob eine Erhebung die zu beobachtende Verkehrsmenge beeinflusst oder nicht.

Beim Detaillierungsgrad schließlich werden drei Stufen unterschieden:

- makroskopisch,
- mesoskopisch und
- mikroskopisch.

Makroskopische Daten sind zum Zeitpunkt ihrer Erhebung sowohl zeitlich als auch räumlich aggregiert. Hierunter fällt bspw. die Belastung an einem definierten Querschnitt eines Verkehrssystems. Bei mesoskopischen Daten ist jedem Zeit- ein Ortsdatum zugeordnet. Können einem Fußgänger zwei derartige Datenpaare zugeordnet werden, so ist eine Aussage zur Wegezeit zwischen den zwei Orten möglich, nicht jedoch zum Verlauf des zurückgelegten Weges. Aussagen zum Verlauf der Trajektorie eines Fußgängers sind erst bei der mikroskopischen Erhebung von Zeit- und zugeordneten Ortsdaten in definierten Zeitintervallen möglich.

Auf die technischen Möglichkeiten bei Anwendung der einzelnen Methoden wird nachfolgend näher eingegangen.

### 6.1.1 Befragung und Wegebücher

Befragungen und Wegebücher sind etablierte Erhebungsinstrumente der Verkehrsforschung [FGSV / Arbeitsausschuss Verkehrszählungen 1970], [FGSV / Arbeitsgruppe Verkehrsplanung 1991]. Bei Wegebüchern sind die Probanden angehalten ihr persönliches Mobilitätsverhalten sowie ggf. jenes der Mitbewohner desselben Haushalts möglichst exakt zu erfassen. Üblicherweise werden dabei Ankunfts- und Abfahrtszeit an den Stationen sowie die abschnittswise Streckenlängen der absolvierten Wegeketten abgefragt.

The image shows a detailed form for a 'Wegebuch' (travel diary). It includes sections for:
 

- Code (a):** Ort oder Einreisepunkt (Origin)
- Code (b):** Zweck des Weges (Purpose of trip)
- Code (c):** Code für Verkehrsmittel (Mode of transport)
- Code (d):** Code für den Einkauf (Shopping code)
- Code (e):** Code für die Art des Einkaufs (Type of shopping)
- Code (f):** Code für die Abwicklung des Einkaufs (Checkout code)

Below the form is a table with columns: Datum, Uhrzeit, Ausgangspunkt des 1. Weges, Ort/Ziel, Strecke des Weges, Ort/Ende des Weges, Zweck des Weges, Verkehrsmittel, Anzahl der Insassen, Länge des Weges, Ankunftszeit, Einkauf, and Was ist ein Weg?.

Datum	Uhrzeit	Ausgangspunkt des 1. Weges	Ort/Ziel	Strecke des Weges (km)	Ort/Ende des Weges	Zweck des Weges	Verkehrsmittel	Anzahl der Insassen	Länge des Weges (km)	Ankunftszeit	Einkauf	Was ist ein Weg?
22.09	17	W	1									
	9:00	A	1	11	3	1	5	8:10				
	12:00	A	1	71	1	1	92	12:05				
	12:40	A	1	1	1	1	92	12:45				
	17:00	Berliner U-Bahn, Markt S. Halleschen	1	3	1	2,5	17:10	11	23	31		
	19:00	A	1	3	1	4	19:10					
	19:05	W	1	91	3	1	3	19:15				

#### Kurzanleitung Wegebuch

- Jeder Tag: Neue Seite**  
Zuerst Datum, Wochentag und Ausgangspunkt des 1. Weges eintragen (evtl. Code **a** verwenden).
- Jeder Weg: Neue Zeile**  
  - Startzeit** Uhrzeit zu Beginn des Weges, z. B. beim Verlassen der Wohnung.
  - Zielort** So genau wie möglich angeben. Evtl. Code **a** verwenden.
  - Zweck des Weges** Bitte Code **b** verwenden!  
Warum unternehmen Sie den Weg? Was tun Sie am Ziel?
  - Verkehrsmittel** Bitte Code **c** verwenden! Bei Benützen mehrerer Verkehrsmittel: Bitte nur das Verkehrsmittel mit dem größten Streckenanteil eintragen.
  - Anzahl der Insassen** Bitte nur eintragen, falls Sie ihren Weg mit dem PKW zurücklegen!
  - Länge des Weges** Bitte über Tachostand (bei PKW-Fahrten) oder Schätzung ermitteln.
  - Ankunftszeit** Uhrzeit beim Erreichen des Zieles, z. B. am Arbeitsplatz.
  - Einkauf** Bitte für den Preis Code **d**, für die Art des Einkaufs Code **e** und für die Abwicklung des Einkaufs Code **f** verwenden.
  - Was ist ein Weg?** Als einzelner Weg zählt jede Ortsveränderung außerhalb eines Gebäudes, an deren Ende Sie etwas erledigen (z.B. einkaufen), ganz gleich ob Sie zu Fuß gehen oder ob Sie Verkehrsmittel benötigen. Auch ein Rundweg zählt als Weg.

Abb. 6-1: Beispiel und Ausfüllhilfe für ein Wegebuch [Vogt et al. 2004]

Gleiches gilt für Befragungen, bei denen über Befragungsort (bspw. Wohnung oder Arbeitsort) oder –methode (bspw. Vor-Ort- oder Telefoninterview) die mit der Stichprobe zu untersuchende Zielgruppe vorausgewählt werden kann. Im Idealfall können mit Befragungen und Wegebüchern mithin mesoskopische Mobilitätskenngrößen erhoben werden. Rückschlüsse auf den mikroskopischen Verlauf eines Weges sind abgesehen von ggf. abgefragten Unterwegspunkten jedoch nicht möglich.

Befragungen und Wegebücher müssen aufgrund des mit ihnen verbundenen Erhebungs- und Auswertungsaufwands in jedem Fall auf Stichproben bzw. Teilmengen der Grundgesamtheit begrenzt bleiben. Die größte Herausforderung ist dabei in der Erzielung einer für signifikante Aussagen repräsentativen Stichprobe begründet.

Repräsentativ wird eine Stichprobe durch eine vollkommen stochastische Auswahl einer hinreichend großen Teilmenge der zu untersuchenden Grundgesamtheit. Bei der Auswahl von Probanden für das Führen von Wegebüchern bzw. bei In-situ-Befragungen fällt es vielfach schwer, diese stochastische Auswahl zu gewährleisten. Im Gegensatz zu erfolglosen Kontaktaufnahmen mit Probanden der Zielgruppe stellt die in der Regel hohe Zahl der Verweigerer ein ernstes Problem dar, welches zu einer unbekanntem Verfälschung der Stichprobe führt.

Auch steigt die Zahl der Abbrecher und sinkt die Qualität der angegebenen Daten mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Fragestellung, ein Umstand, der einer Erhebung signifikanter Unterwegspunkte für die Annäherung an eine mikroskopische Datenlage entgegen steht. Auch ist eine verlässliche Angabe der zurückgelegten Wegelängen nicht zu erwarten, da diese ohne technische Hilfsmittel von einem Fußgänger kaum anzugeben sind. Wegebücher und Befragungen sind somit letztlich kein probates Mittel zur Erhebung mikroskopischer Fußgängerverkehrskenngrößen.

### **6.1.2 Querschnittszählung**

Eine Querschnittszählung ist per Definition eine Vollerhebung der betrachteten Grundgesamtheit der Verkehrsteilnehmer an einem bestimmten Ort über ein bestimmtes Zeitintervall. Im Gegensatz zu Befragungen und Wegebüchern besteht hierbei keine Abhängigkeit von der Bereitschaft zur Teilnahme durch die Probanden. Die Akzeptanz von Querschnittszählungen ist in der Regel hoch, da hierbei weder persönliche Merkmale der Verkehrsteilnehmer erhoben werden, noch der Verkehrsablauf gestört wird.

[FGSV / Arbeitsgruppe Verkehrsplanung 1991] empfiehlt eine Unterteilung stark frequentierter Fußwegequerschnitte in mehrere Teilabschnitte um eine

zuverlässige Erhebung des Verkehrsaufkommens zu gewährleisten. Sollen gleichzeitig auch mikroskopische Merkmale erhoben werden, so ist von der gezielten Aufstellung von Verkehrsteilern bei starken Fußgängerströmen jedoch unbedingt abzusehen, da Umleitungen und evtl. Rückstauungen zu einer Verfälschung der Erhebungsergebnisse führen.

Ohne begleitende Erhebungsinstrumente sind manuelle Querschnittszählungen zur Gewinnung einer mikroskopischen Datenlage ungeeignet, da selbst am betrachteten Querschnitt weder Ort noch Zeit auf mikroskopischer Ebene, sondern räumlich entlang einer Schnittachse und zeitlich in Intervallen deutlich größer als einer Sekunde erfasst werden.

### **6.1.3 Stromerhebung**

Im Gegensatz zu Querschnittszählungen stellen Stromerhebungen eine Verbindung von erhobenem Verkehrsteilnehmer und mindestens zwei Messquerschnitten her, in der Regel dem Quell und dem Zielquerschnitt. Damit kann die Verkehrsstärke auf bestimmten Verkehrsachsen in bestimmten Zeitintervallen erfasst werden.

Stromerhebungen basieren zum einen auf der Verfolgungsmethode [FGSV / Arbeitsausschuss Verkehrszählungen 1970], bei der der Weg eines zufällig ausgewählten Verkehrsteilnehmers ausgehend von einem Quellquerschnitt bis zu einem festgelegten Zielquerschnitt verfolgt wird. Zum anderen werden an Quellquerschnitten diesen zugeordnete Zählmarken an die Verkehrsteilnehmer ausgegeben und am jeweiligen Zielquerschnitt wieder eingesammelt.

Beide Methoden sind invasiv und lassen nur Stichproben zu. Im ersten Fall nimmt die Daten erfassende Person selbst am Verkehrsgeschehen teil. Je größer die Stichprobe sein soll, desto mehr Datenerfasser sind erforderlich und desto größer damit die Verfälschung der Stichprobe. Im zweiten Fall wird die Kooperationsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer vorausgesetzt, welche oftmals jedoch nicht gegeben ist. Zudem kann das Wissen um die Erhebung bzw. die Erfordernis der Rückgabe der Zählmarken zu einer anderen Wegewahl führen.

Über das betrachtete Zeitintervall hinaus spielt die zeitliche Dimension bei der Stromerhebung keine Rolle, da weder Ausgabe- noch Rückgabezeitpunkte der Zählmarken erfasst werden. Somit ist auch die Stromerhebung letztlich kein geeignetes Erhebungsinstrument zur Gewinnung mikroskopischer Fußgängerverkehrsdaten.

### 6.1.4 Kordonenerhebung

Kordonenerhebungen ergänzen die Stromerhebungen um die erhobenen Daten Erfassungszeit sowie Kennung (ID) der Verkehrsteilnehmer. Steht zur Erreichung des Ziels nur ein Weg zur Verfügung, so kann beim motorisierten Verkehr damit bereits von einer annähernd mikroskopischen Datenlage gesprochen werden. Nicht so beim Fußgängerverkehr, wo Breite und Geometrie des Weges selbst unzählige Alternativen zur Ausbildung einer Trajektorie ermöglichen.

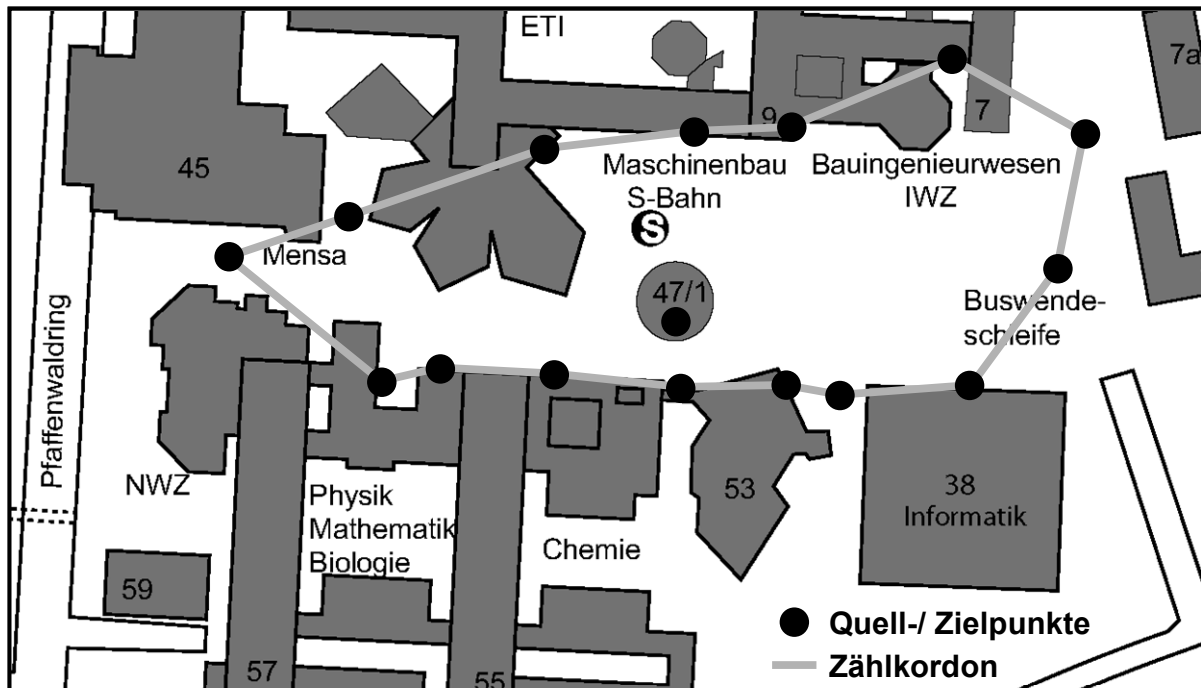


Abb. 6-2: Layout einer Kordonzählung am Beispiel des Campus Vaihingen

Mit genauer Erfassung von Quelle und Ziel sowie der benötigten individuellen Zeitintervalle für die Zurücklegung des Weges stehen nach obiger Definition beim Fußgängerverkehr makroskopische Datenpaare zur Verfügung, mit denen Mittelwert und Varianz der zurückgelegten Wegelängen zwischen zwei Punkten (unter Annahme gleicher Geschwindigkeiten) bzw. der individuellen Durchschnittsgeschwindigkeiten (unter Annahme gleicher Wegelängen) auf bestimmten Relationen ermittelt werden können. Damit können mikroskopische Verkehrssimulationen in wichtigen Teilen kalibriert bzw. validiert werden.

Die größte Herausforderung bei der Kordonenerhebung besteht in der störungsfreien oder zumindest störungsarmen (noninvasiven) Erhebung von ID sowie zugeordneter Quell- und Zielzeit. Denn kann auf die Notwendigkeit zur Mitarbeit der Verkehrsteilnehmer verzichtet oder diese zumindest minimiert werden, so senkt dies die Zahl der nicht erfassten Personen erheblich. Eine

zügige und störungsfreie Erhebung vermeidet zudem Verfälschungen des Verkehrsablaufs. Auf verschiedene für diese Arbeit hinsichtlich ihrer Eignung untersuchte Erhebungstechniken wird nachfolgend näher eingegangen.

#### **6.1.4.1 Barcode und RFID**

Mittels Laserscannung zu lesende Barcodes sind im Einzelhandel und in der Logistikbranche seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz. Statt Ausgabe einer Kennungsmarke des Startpunkts an die Verkehrsteilnehmer im Rahmen einer Stromerhebung kann hiermit bei einer Kordonerhebung ein auf einer Karte aufgedruckter Barcode am Quellzählquerschnitt zum Zeitpunkt der Ausgabe gescannt werden. Zum Zeitpunkt der Rückgabe am Zielquerschnitt wird der Barcode erneut gescannt. Nach Auswertung ergeben sich damit 3-Tupel aus ID, Quell-, und Zielzeit. Alternativ kann statt der Barcode- auch die RFID-Technik zum Einsatz kommen, bei ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen.

Bei konkreter Konzeption des Layouts einer Erhebung unter Einsatz der vorstehend beschriebenen Techniken zeigen sich allerdings rasch praxisfeindliche Nachteile. So müssen alle Zählquerschnitte zeitgleich mit Laser- oder RFID-Scannern ausgestattet sein. Da diese leihweise kaum erhältlich sind, müssen sie für vergleichsweise kurze Einsatzdauern in einer Größenordnung von 15 bis 20 Stück neu beschafft werden.

Noch gravierender ist indes der invasive Charakter von RFID- bzw. barcodebasierter Erhebung. Verkehrsteilnehmer müssen auf eine Teilnahme hin angesprochen und von der Mitführung einer ID-Marke überzeugt werden. Gleichzeitig müssen alle Teilnehmer die Aus- und Rückgabestationen passieren, was insbesondere bei Rückstauungen zu Abweichungen vom ungestörten Normalfall führt und zudem die Akzeptanz weiter senkt.

#### **6.1.4.2 Akustische Aufzeichnungsverfahren**

Einen noninvasiven Ansatz stellt das im Zusammenhang mit Erhebungen des motorisierten Verkehrs bekannte akustische Aufzeichnungsverfahren dar. Bis vor wenigen Jahren war die Möglichkeit der zuverlässigen elektronischen Erfassung von Kfz-Kennzeichen noch nicht gegeben. Das Aufsprechen von Kennzeichen auf ein Speichermedium sowie die nachgelagerte Auswertung von Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr im Zuge einer Kordonerhebung beim motorisierten Verkehr war daher ein eingeführtes und vielfach eingesetztes Verfahren [FGSV / Arbeitsausschuss Verkehrszählungen 1970], [FGSV / Arbeitsgruppe Verkehrsplanung 1991].

Eine Übertragung auf den Fußgängerverkehr ist allerdings schwierig und kaum praktikabel. Die äußeren Merkmale von Personen sind selbst bei Standardisierung nach einer Auswahlliste kaum eindeutig zu beschreiben. Hinzu kommt, dass die Zählquerschnitte von verschiedenen Zählern zu besetzt sind, die Beschreibungen entsprechend ihrer persönlichen Auffassung vornehmen.

Ein automatischer Abgleich der aus einer Vorauswahlliste zusammengestellten Attribute wäre somit stark fehlerbehaftet. Eine manuelle Erhebung anhand äußerer Attribute wurde daher bereits in einem frühen Überlegungsstadium verworfen. Der automatische elektronische Abgleich biometrischer Daten hat das Experimentalstadium indes noch nicht verlassen [Bauer 2004]. Zudem müssten in diesem Fall alle Zählquerschnitte zeitgleich mit Kameras und leistungsfähigen Aufzeichnungssystemen ausgestattet werden, was in der Praxis jedoch nicht darstellbar wäre.

### **6.1.4.3 MAC-Adressen mobiler Endgeräte**

Ein weiterer innovativer Ansatz ergibt sich aus der Einführung des Bluetooth-Kommunikationsstandards. Immer mehr elektronische Endgeräte wie Mobiltelefone, PDAs oder MP3-Player verfügen über eine solche Schnittstelle zur Drahtloskommunikation im Nahbereich bis zu zehn Metern (Klasse 3, Leistung 1 mW). Ist diese aktiviert, sendet das Gerät fortlaufend seine MAC-Adresse um mit anderen zum Datenaustausch bereiten Geräten in Verbindung zu treten.

Da MAC-Adressen weltweit jeweils nur einmalig vergeben werden und mobile Endgeräte üblicherweise von ihrem Besitzer mitgeführt werden, ist dieses Verfahren in hervorragender Weise geeignet eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit von Fußgängern zu erheben – sofern eine hinreichend große Anzahl aktivierter Bluetooth-Schnittstellen geortet werden kann.



Adresse	Startdatum	Startzeit	Stopdatum	Stopzeit
00:0F:DE:13:3C:BC	28.06.2005	07:46:15	28.06.2005	07:46:30
00:0F:DE:9F:B9:CE	28.06.2005	07:46:38	28.06.2005	07:46:45
00:0F:DE:9F:B9:CE	28.06.2005	07:46:53	28.06.2005	07:47:09
00:0F:DE:9F:B9:CE	28.06.2005	07:47:24	28.06.2005	07:47:32
00:12:47:3B:86:28	28.06.2005	08:01:07	28.06.2005	08:01:31
00:12:47:3B:86:28	28.06.2005	08:01:38	28.06.2005	08:02:01
00:60:57:3B:0B:F9	28.06.2005	08:02:17	28.06.2005	08:02:24
00:60:57:3B:0B:F9	28.06.2005	08:02:32	28.06.2005	08:02:40
00:60:57:3B:0B:F9	28.06.2005	08:03:03	28.06.2005	08:03:11
00:0E:07:8D:CD:3E	28.06.2005	08:07:17	28.06.2005	08:07:25
00:0E:07:8D:CD:3E	28.06.2005	08:07:32	28.06.2005	08:07:48
00:0E:07:41:FC:D9	28.06.2005	08:14:51	28.06.2005	08:15:06
00:12:47:3B:86:28	28.06.2005	08:22:17	28.06.2005	08:22:25
00:12:47:3B:86:28	28.06.2005	08:22:33	28.06.2005	08:22:40
00:0E:07:DF:A2:2B	28.06.2005	08:24:28	28.06.2005	08:24:51
00:0B:5D:13:58:63	28.06.2005	08:33:27	28.06.2005	08:33:58

Tab. 6-2: Mittels Bluetooth detektierte MAC-Adressen

Mit Hilfe eines von der Universität Rostock [Haase et al. 2005] zur Verfügung gestellten Tools installiert auf einem mit einer Bluetooth-Schnittstelle ausgestatteten Notebook wurden am Vormittag des 28. Juni 2005 am Campus-Aufgang der S-Bahn-Haltestelle Universität über eine Stunde versuchsweise alle aktiven Bluetooth-Schnittstellen geortet (vgl. Tab. 6-2). Zusätzlich wurde mit aktiven Bluetooth-Schnittstellen unterschiedlicher Endgeräte bei versuchsweise durchgeführten Wegen die zuverlässige Funktionalität der Ortung im gewünschten begrenzten Umkreis von einigen Metern bestätigt.

Insgesamt konnten 9 MAC-Adressen ermittelt werden. Bei im gleichen Zeitraum gezählten 2208 Fußgängern entspricht dies einem Anteil von 0,41 % an der Grundgesamtheit. Was in der Theorie große Aussichten auf Erfolg verspricht, erweist sich somit zunächst als wenig praxistauglich. Gleichwohl stellt diese Erhebungsmethode mit weiter zunehmender Verbreitung mobiler Endgeräte eine interessante Option dar, die in kommenden Jahren Konzeption einer Mobilitätsdatenerhebung regelmäßig auf ihre Einsatztauglichkeit hin überprüft werden sollte.

### 6.1.5 Video-/Bildanalyse

In [FGSV / Arbeitsgruppe Verkehrsplanung 1991] heißt es: „Als Alternative zu Querschnittszählungen kommt der Einsatz von Videogeräten in Betracht.“ Nach Ansicht des Verfassers steht dieser Satz exemplarisch für den

weit verbreiteten Irrglauben, dass mit Aufnahme und Aufzeichnung einer Bildsequenz bzw. eines Videosignals genügend getan sei, um das avisierte Ziel zu erreichen. Weder bei Anwendungen im Sicherheitsbereich, noch bei der Strafverfolgung noch bei der Verkehrsüberwachung und Verkehrserhebung ist dies allerdings der Fall. Vielmehr bedarf es immer einer fallspezifischen Nachbereitung der aufgezeichneten Bilddaten.

Die Videoerfassung wie fotografische Aufnahmeverfahren [FGSV / Arbeitsausschuss Verkehrszählungen 1970] stellen zunächst nur eine Methode zur Aufzeichnung einer realen (Verkehrs-)Situation dar. Geeignete Auswertungswerkzeuge müssen situations- und zielabhängig entwickelt werden. So können genauso wie in situ auch nachgelagert Dichten oder spezifische Verkehrsstärken bestimmt werden. Dies geschieht bislang i.d.R. manuell mit Unterstützung kleinerer Hilfsprogramme an einem entsprechend ausgerüsteten Video- bzw. Computerarbeitsplatz [Alrutz et al. 1999].

Oft lassen die Randbedingungen der Aufnahmen bis heute eine automatisierte Auswertung der Trajektorien nicht zu [Berrou et al. 2005]. Ideale Bedingungen bieten aus Experimenten resultierenden Videoaufnahmen. Hierbei können die Versuchspersonen geeignete Kennzeichen wie Nummern oder farbige Kopfbedeckungen mit sich führen, um die (automatisierte) Auswertung der Videoaufnahmen zu erleichtern [Hoogendoorn et al. 2003b].

In der Literatur dokumentiert sind auch umfassende Erfahrungen mit dem Einsatz von Infrarotsensoren [Kerridge et al. 2004], [Kerridge et al. 2005], bei denen aufgrund der Wärmebildaufnahme (relativ warme) Subjekte zuverlässig von (relativ kalten) Objekten sowie anderen Störeinflüssen unterschieden werden können. Bedingt durch die Auflösung der Infrarotsensoren ergibt sich allerdings eine Begrenzung auf relativ kleine Ausschnitte [Armitage et al. 2003a], [Armitage et al. 2003b]. So erfasst ein in drei Meter Höhe montierter Detektor zuverlässig lediglich eine Fläche von nur drei mal drei Meter.

Die vollautomatische Bild- bzw. Videoauswertung ist nach wie vor schwierig und stellt eine große Herausforderung dar [Teknomo 2002], nur kleine Ausschnitte wurden bisher mit vertretbarer Fehlertoleranz erfolgreich automatisch ausgewertet [Willis et al. 2002]. Das Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) besitzt umfangreiche Vorerfahrungen in der automatischen Videodetektion des motorisierten Verkehrs [Dalaff et al. 2003]. Das im Rahmen dieser Arbeit gemeinsam entwickelte Erhebungskonzept für eine Videoerfassung des Referenzszenarios Campus Vaihingen mit nachgelagerter vollautomatischer Bildauswertung wird nachfolgend eingehend beschrieben.

## 6.2 Layout der durchgeführten Erhebung

Die Qualität der aufgezeichneten Bildsequenzen trägt entscheidend zum Erfolg einer automatischen Bildauswertung bei. Sie wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst:

- Wahl des Kamerastandorts
- Georeferenzierung der Standorte und Blickwinkel
- Abbildungseigenschaften von Kamera / Objektiv und Bildverzerrung
- Bildauflösung und Ausdehnung des Aufnahmebereichs
- Lichtverhältnisse/Wetterbedingungen
- Abschattungen von Verkehrsflächen
- Form und Frequenz der Bildaufzeichnung

Auf wesentliche Aspekte sowie die im Rahmen der durchgeführten Erhebung getroffenen Festlegungen wird nachfolgend näher eingegangen.

### 6.2.1 Wahl des Kamerastandorts

Für die Gewinnung von Fußgängertrajektorien aus realen Verkehrssituationen ist eine möglichst orthogonale Kameraposition über dem zu beobachtenden Bereich von Vorteil. Hierzu wurde Anfangs die Verwendung von Trägersystemen in Erwägung gezogen.

So verfügt das Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) über ein Messfahrzeug zur Erfassung und Analyse des motorisierten Verkehrs (Abb. 6-3). Eine an einem 13 m hohen Teleskopmast befestigte Kamera ermöglicht die Beobachtung ganzer Knotenpunkte. Überschlägige Berechnungen zeigten jedoch, dass bei einer Aufnahmehöhe von lediglich 13 m mit einem Objektiv von entsprechend kleiner Brennweite sich zwar die verfügbare Kameraauflösung sinnvoll ausnutzen lässt, aber innerhalb weniger Meter Entfernung vom Fußpunkt der Orthogonalen der Kameraposition der Blickwinkel bereits erheblich von der Vertikalen abweicht.



*Abb. 6-3: Messfahrzeug des Instituts für Verkehrsforschung des DLR und Fesselballon des IVD der Universität Stuttgart*

Eine höhere statische Positionierung der Kamera wäre mit Hilfe des Fesselballons des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen der Universität Stuttgart möglich. Erste gemeinsame Erfahrungen von DLR und IVD lagen zum Zeitpunkt der Entwicklung des Erhebungslayouts bereits vor.

Bei einer (zuvor zu genehmigenden) Flughöhe von 40 bzw. 60 m ergäbe sich bei einer Kameraauflösung von 1024 x 768 Pixel und einer Objektivbrennweite von  $f = 8,5$  mm bei einer vertretbaren Bodenauflösung von 4 bzw. 6 cm ein Erfassungsbereich von 40 x 30, bzw. 61 x 46 m sowie. Schwierigkeiten bereitete jedoch noch die aufgrund der Eigenbewegung des Ballons erforderliche Stabilisierung des Bildes, zu der u. a. eine Ermittlung und bildweisen Zuordnung der Kameraposition in Echtzeit erforderlich ist.

Beide Kameraträgersysteme haben zudem einen stark invasiven Charakter. Die Wahrscheinlichkeit, dass Fußgänger stehen bleiben oder Ihren ursprünglich geplanten Weg verändern würden, um Messfahrzeug oder Ballon näher in Augenschein zu nehmen wäre groß. Um zumindest einen Gewöhnungseffekt zu erzielen müssten beide Systeme über einen Zeitraum von mehreren Tagen oder Wochen eingesetzt werden, was aus Kostengründen jedoch nicht darstellbar gewesen wäre.



*Abb. 6-4: Standort Kamera 1 mit GPS-Empfänger auf Gebäude Pfaffenwaldring 55, Blickrichtung der Aufnahme nach Osten*

Der Campus Vaihingen der Universität Stuttgart ist umgeben von vier bis zehn Stockwerken hohen Gebäuden. Diese bieten sich als natürlicher Kamerastandort an, ohne dass die Verkehrsteilnehmer hiervon Kenntnis nehmen und in ihrem Bewegungsverhalten beeinflusst werden. Ausdehnung des Untersuchungsbereichs, verfügbare Auflösung sowie der recht flache Blickwinkel machen den Einsatz mehrerer Kameras erforderlich. Während der Erhebung erfassten vier Kameras das Verkehrsgeschehen zeitgleich von folgenden Standorten aus:

- Kamera 1: Pfaffenwaldring 55, Fluchtbalkon im 9. Stock (Abb. 6-4)
- Kamera 2: Pfaffenwaldring 9, Flachdach 4. Stock
- Kamera 3 und 4: Pfaffenwaldring 7, Flachdach 4. Stock

Abb. 6-5 zeigt die Standorte der einzelnen Kameras sowie die Projektionen der Aufnahmebereichsgrenzen auf die Bodenebene.

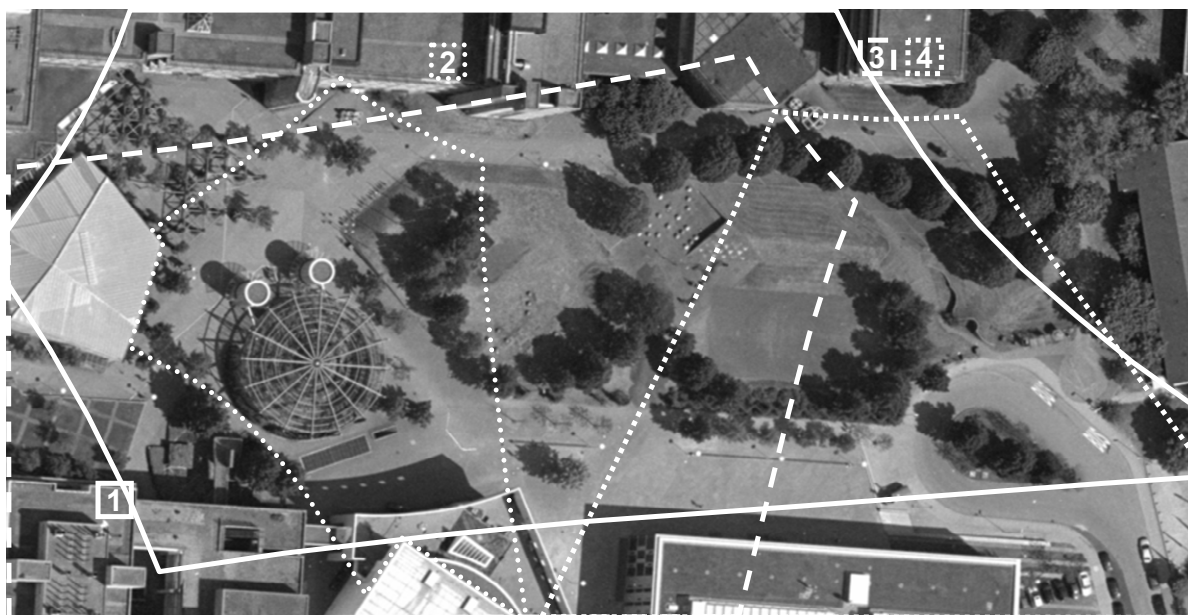


Abb. 6-5: Standorte, Überlappungsbereiche und Gesamtabdeckung der vier Kameras

### 6.2.2 Georeferenzierung der Standorte und Blickwinkel

Um die Verfolgung von Fußgängern mit mehreren Kameras zu ermöglichen ist es erforderlich, die genauen Standorte und Blickwinkel dieser Kameras in einem gemeinsamen Koordinatensystem (Weltkoordinaten) zu ermitteln. Ein Standardverfahren hierfür basiert auf sog. Passpunkten.

Dabei handelt es sich um markante Punkte im Erhebungsbereich deren Weltkoordinaten bekannt sind. Diese Passpunkte werden in den Bildern der Kameras lokalisiert und ermöglichen mit Hilfe des räumlichen Rückwärtschnitts über die Abbildungsgleichungen eine Berechnung von Position und Blickwinkel der jeweiligen Kamera.

Zur Gewinnung der Koordinaten der Passpunkte wurde eine von Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellte Stereoluftbildaufnahme genutzt. Die Georeferenzierung (Bestimmung der äußeren Orientierung) erfolgte während der Erhebung durch eine simultane GPS/INS-Messung.

Die Genauigkeit wurde anhand einiger gut vermessener Bodenpunkte kontrolliert. Auf diese Weise konnten für den Erhebungsbereich Passpunkte in Gauß-Krüger-Koordinaten mit einer Genauigkeit von etwa 10 cm für Rechtswert sowie Hochwert und etwa 20 cm für die jeweilige Höhe über dem Referenzellipsoiden ermittelt werden.



Abb. 6-6: Aufnahmebereiche der vier Kameras

Die Passpunkte wurden so gewählt, dass sie sowohl auf dem Luftbild als auch in den Kamerabildern möglichst genau zu lokalisieren sind. Es wurde außerdem darauf geachtet, dass sich eine möglichst hohe Anzahl der Punkte im Überlappungsbereich von mindestens zwei Kameras befindet. Pro Kamera wurden zirka 8 bis 10 Passpunkte verwendet.

Zur Abschätzung der Genauigkeit der berechneten Positionierung erfolgte für jede Kamera eine Projektion ausgewählter Passpunkte in das Weltkoordinatensystem. Ein Vergleich der so berechneten Weltkoordinaten mit den tatsächlichen Koordinaten der Passpunkte ergab Abweichungen von 10 bis 15 cm.

Besonders wichtig für eine genaue Lokalisierung der Fußgänger sind möglichst geringe Differenzen zwischen den Kameras in den relevanten Übergangsbereichen (zwischen Kamera 1-2, 2-3, 3-4 sowie 4-1). Es zeigte sich, dass diese Abweichung nur innerhalb der Überlappungsbereiche zwischen den Kameras 3-4 sowie 4-1 geringfügig erhöht ist. Aufgrund des großen Abstands der Kameras 1 und 4 ist dies vertretbar.

Durch Projektion der Bildränder der einzelnen Kameras (Abb. 6-6) auf die Bodenebene erhält man das in Abb. 6-5 dargestellte Überlappungsbild. In diesem ist das theoretische Sichtfeld jeder Kamera eingezeichnet. Im Einzelfall ist dieses durch Verdeckungen (z.B. Bäume) deutlich geringer. Weiterhin ist die Ortsauflösung (z.B. bei Kamera 1) umso schlechter, je weiter entfernt der Ort vom Kamerastandort ist. Das Überlappungsbild ermöglicht allerdings eine Einschätzung der Überlappungsbereiche und des gesamten durch die Kameras beobachteten Bereichs.

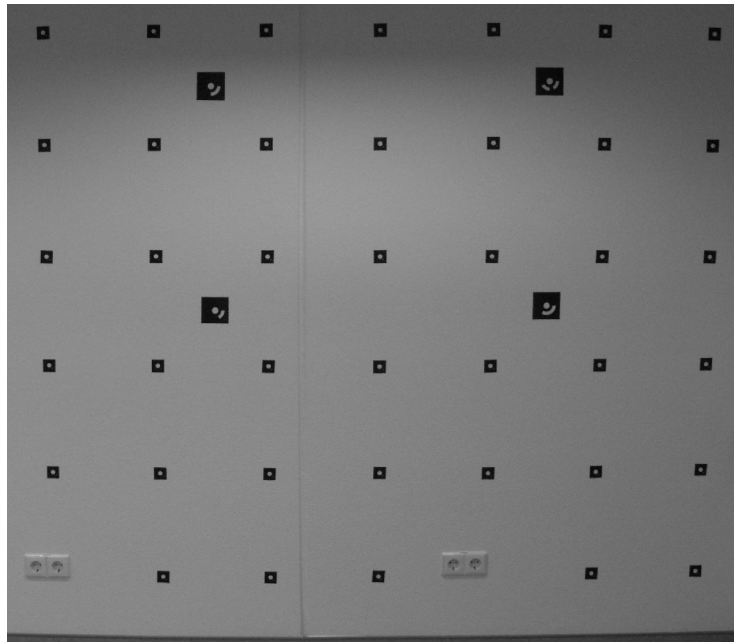
### **6.2.3 Abbildungseigenschaften von Kameras und Objektiven**

Die Messung wurde mit vier Kameras vom Typ MVCam3 der Fa. Matrix Vision durchgeführt, die mit 4,8 mm Objektiven und einem CCD-Chip von 1280 x 1024 Pixel ausgestattet sind. Sie wurden jedoch mit einer Auflösung von 1024 x 168 Pixel betrieben, um mindestens fünf Bilder pro Sekunde aufzuzeichnen. Zum Vergleich: Handelsübliche Videosysteme im Format 4:3 weisen heute lediglich eine Auflösung von 720 x 576 Pixel auf. Neben dem Kameramodul enthält die MVCam eine eigene Prozessoreinheit. Die Kommunikation mit der Kamera und der Datentransfer erfolgen über einen Ethernet-Anschluss.

Jede der Kameras wurde über ein Netzkabel an einen separaten PC angeschlossen, auf den die aufgenommenen Bilder der Kamera übertragen, visualisiert und auf der lokalen Festplatte im JPEG-Format abgespeichert wurden. Die Kompressionsrate wurde so gewählt, dass in den Bildern nur wenige kompressionsbedingte Bildfehler, sog. Artefakte auftraten.

Auf Grund der starken Verzeichnung der kurzbrennweitigen Objektivs ist eine Kalibration der Kameras (Bestimmung der inneren Orientierung) erforderlich. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden zudem die inneren Parameter (Brennweite, Bildhauptpunkt, Verzeichnung) jeder Kamera vor und nach der Messung mit Hilfe eines Messfeldes (Abb. 6-7) bestimmt, da diese nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind und Veränderungen unterliegen können.





*Abb. 6-7: Messfeld zur Bestimmung der inneren Kamerapunkte unter Laborbedingungen. Zur Orientierung im Bild: Vier Wandsteckdosen am unteren Bildrand*

Vor der Messkampagne in Stuttgart wurden alle Kameras (auch die Ersatzkameras) mit Objektiven versehen und im optischen Labor des DLR-Verkehrsinstituts in Berlin kalibriert. Nach der Messung wurden die Kameras erneut kalibriert um festzustellen, ob sich die Parameter der Kameras (z.B. durch Verschiebung des Objektivs während des Transports) geändert haben. Die Unterschiede der ermittelten Parameter vor und nach der Messung waren sehr gering und weisen nicht auf eine Verschiebung der Optik hin.

#### **6.2.4 Synchronisation der Zeitstempel**

Da der gesamte Erhebungsbereich unter Zuhilfenahme von vier einzelnen Kameras synchron erfasst wurde, war für die Zweisung der Zeitstempel der Einzelbilder ein exakter Abgleich des Systemzeiten erforderlich.

Jedes Aufnahmesystem, bestehend aus MVCam und PC, besitzt zwei unabhängige Systemuhren (die der MVCam und die des PCs). Vor Beginn jeder Serie wurde die Systemzeit der MVCam mit der des PCs synchronisiert. Dies geschieht, indem der PC seine Systemzeit ermittelt, sie über die Netzwerkverbindung an die MVCam sendet und die MVCam ihre Systemzeit auf die empfangene Zeit stellt.

Zur Genauigkeit dieser Synchronisierung stehen keine Testergebnisse zur Verfügung, doch ist davon auszugehen, dass die Systemzeit des PCs der Sys-

temzeit der Kamera um ca. 10 bis 200 ms vorauseilt. Dies entspricht den üblichen Verzögerungszeiten für TCP/IP-Pakete bei direkter Ethernet-Verbindung.

Die Systemzeiten der PCs der Standorte 1 und 2 wurden per GPS synchronisiert. Bei den PCs an den Standorten 3 und 4 wurde eine manuelle Synchronisation über Mobiltelefon durchgeführt. Erfahrungsgemäß ist mit dieser Methode eine Genauigkeit von  $\pm 500$  ms zu erreichen.

Die Sichtung des Bildmaterials und der Protokolle hat gezeigt, dass die Uhren der Kameras mit geringfügig differierenden Geschwindigkeiten laufen und deshalb die Zeiten der einzelnen Systeme während der Aufnahme längerer Serien auseinander driften. Um diesen Effekt gering zu halten, wurde an beiden Erhebungstagen die Messung jeweils einmal kurzzeitig unterbrochen um die Systemzeiten der Kameras neu zu synchronisieren.

In der Software zur Bildaufzeichnung der Humboldt-Universität zu Berlin befand sich ein zum Zeitpunkt der Messkampagne unentdeckter Fehler bei der Synchronisierung der Systemzeiten. Dieser Fehler hatte zur Folge, dass die übermittelte Systemzeit des PCs von der Kamera falsch interpretiert wurde. Dies führte zu einer zum Teil deutlichen Abweichung der gespeicherten Zeitstempel von den realen Aufnahmezeitpunkten.

Da dieser Fehler nur die absoluten Zeitstempel betrifft, diese innerhalb der aufgenommenen Serie relativ zueinander aber bis auf wenige Millisekunden genau sind, konnte der Gangunterschied zu den anderen Kameras durch eine nachträgliche, manuelle Analyse der Bildsequenzen korrigiert werden. Durch Beobachtung von sich bewegenden Objekten auf den Überlappungsbereichen der Kameras konnte für jede Serie ein Zeit-Offset bestimmt werden, der bei der automatischen Vorverarbeitung der Bilddaten Berücksichtigung fand.

### **6.2.5 Zeitpunkt und Rahmenbedingungen der Erhebung**

Die Erhebung des Fußgängerverkehrsaufkommens im Bereich des Referenzszenarios (vgl. Abb. 5-1) wurde in Zusammenarbeit mit dem Verkehrsinstitut des DLR durchgeführt. Erhebungstage waren Donnerstag, 10. November 2005 in der Zeit von 8:00 Uhr bis 16:00 Uhr sowie Freitag, 11. November 2005 von 8:00 Uhr bis 14:00 Uhr. Die Bäume im Erhebungsbereich hatten zu diesem Zeitpunkt ihr Laub größtenteils bereits verloren, so dass die durch die Vegetation gegebene Abschattung bereits deutlich vermindert war.

An beiden Erhebungstagen herrschte eine trockene Witterung vor. Insbesondere am ersten Erhebungstag sorgte eine weitgehend hochnebelartige Bewölkung mit den dadurch gegebenen diffusen Lichtverhältnissen für optima-

le Aufnahmebedingungen. Tab. 6-3 zeigt das Protokoll der aufnahmerelevanten Rahmenbedingungen und Ereignisse während des ersten Erhebungstages. Bei Abschluss der Erhebungskampagne wurden von den vier Kameras insgesamt 788.529 Einzelbilder in jpg-Format mit einem Gesamtvolumen von ca. 103 GB aufgezeichnet.

<b>Zeit</b>	<b>Anmerkung</b>	<b>Stundenplan</b>
08:00	Aufbau. <i>Hochnebel mit diffusen Lichtverhältnissen.</i>	1. Vorlesung
08:15	Aufnahmebeginn Kamera 1, Aufbauphase, Kameras an Standorten 1, 2 und 3 werden immer wieder bewegt.	
09:30	<i>Hochnebel mit schwacher direkter Sonneneinstrahlung.</i>	Pause
09:34	Alle Kameras laufen, alle Blenden sind auf 8 gestellt.	
09:44	Standort 3: Kamera wird leicht verdreht und neu synchronisiert.	
09:45		2. Vorlesung
10:00	<i>Wieder geschlossene Hochnebeldecke mit diffusen Lichtverhältnissen.</i>	
11:00	Kamera 2: Veränderung der Blende auf 1,8. Kurzer Stopp aller Aufnahmen, Synchronisation der Kameras und Start einer neuen Serie.	
11:15		Pause
11:30		3. Vorlesung
13:00		Mittagspause
14:00		4. Vorlesung
14:30	Kurzer Stopp aller Aufnahmen, Synchronisation der Kameras und Start einer neuen Serie.	
14:33	Kamera 1 wackelt leicht und wird neu justiert.	
14:50	Blenden der übrigen Kameras werden geändert: Kamera 1: Blende 2,8 Kamera 3: Blende 4 Kamera 4: Blende 2,8	
14:54	Kamera 4 wackelt leicht und wird neu justiert	
15:30		Pause
15:45		5. Vorlesung
16:00	Ende der Aufnahmen	

Tab. 6-3: Protokoll der Erhebung vom 10. November 2005

## **7 Auswertung und Ergebnisvalidierung**

Die größte Herausforderung bei der Auswertung sowohl von mikroskopischen Simulationen als auch von vorstehend skizzierten mikroskopischen Fußgängerverkehrserhebungen besteht in der großen Menge generierter Rohdaten. Diese in nicht aggregierter Form analytisch auszuwerten ist nach heutigem Stand der Forschung meist schwierig oder unmöglich. Oft erweist sich hier das geübte Auge als das erste und beste Instrument um die Realitätsnähe der Ergebnisse zu bestimmen [Wolfram 2002].

Mikroskopische Effekte sind schwer zu quantifizieren. Daher sind beobachtete Phänomene wie sie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben werden für die Validierung mikroskopischer Fußgängersimulationen von großer Bedeutung. Die grundsätzliche Fähigkeit zur Nachbildung typischer, empirisch belegter Situationen ist Ausgangspunkt für eine qualitative Bewertung der Implementierung eines mikroskopischen Modellansatzes.

Nachfolgend werden zunächst die Auswertung der erhobenen Daten sowie die dabei auftretenden Schwierigkeiten erläutert und Ergebnisse der Datenanalyse vorgestellt. Die Ergebnisse eines mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsframeworks durchgeführten Rechenlaufs werden sodann mit den Ergebnissen der Erhebung verglichen.

### **7.1 Auswertung der erhobenen Daten**

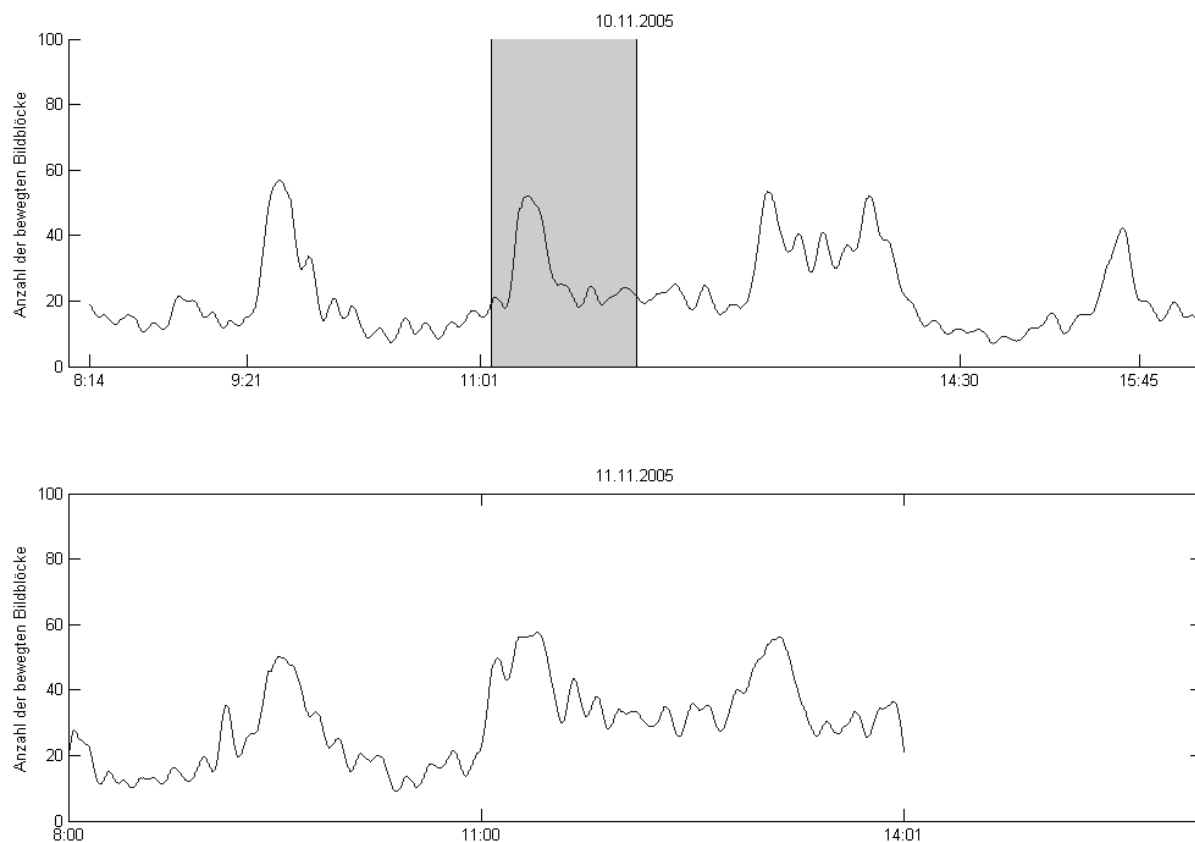
#### **7.1.1 Aufbereitung der Rohdaten**

Die Extraktion der Fußgängertrajektorien aus dem aufgezeichneten Bildmaterial erfolgte am Verkehrsinstitut des DLR in Berlin Adlershof. Geplant war eine vollautomatische Generierung der Pfade mit Hilfe der am Institut entwickelten Instrumente zur Bildanalyse. Hierzu wurde zunächst die Zahl der sich bewegenden Objekte über den Erhebungszeitraum bestimmt und in einem Diagramm aufgetragen (Abb. 7-1).

Gut erkennbar in Form von ausgeprägten Spitzen sind die Pausen zwischen den Vorlesungen von 09:30 bis 09:45 Uhr, 11:15 bis 11:30 Uhr und 15:30 bis 15:45 Uhr. Die Mittagspause von 13:00 Uhr bis 14:00 Uhr zeichnet sich durch ein durchweg erhöhtes Verkehrsaufkommen aus mit zusätzlichen Aufkommensspitzen zu ihrem Beginn und Ende.

Es muss allerdings betont werden, dass es sich bei Abb. 7-1 nur um eine Näherung der tatsächlichen Tagesganglinie des Fußgängerverkehrsaufkommens handelt. Die Maxima zu den Zeiten mit Spitzenverkehrsaufkommen sind zwar gut ausgeprägt, allerdings werden stillstehende, verdeckte und in

einer Gruppe laufende Personen nicht zuverlässig erfasst. Die später erfolgte manuelle Auswertung des in Abb. 7-1 grau hinterlegten Zeitintervalls offenbart eine mehr als doppelt so hohe Anzahl von Fußgängern (vgl. Abb. 7-2).



*Abb. 7-1: Anzahl von unterscheidbaren und dynamischen Objekten im Verlauf der Messkampagne (Kamera 1)*

Sämtliche verfügbaren Verfahren zur automatischen Verfolgung von Objekten wurden getestet. Keine der Anwendungen erreichte allerdings die erforderlichen Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten. Insbesondere konnten keine durchgehenden Trajektorien zwischen den relevanten Quell- und Zielquerschnitten bestimmt werden. Die wichtigsten Gründe hierfür sind:

- Verdeckungen durch Gebäude, insbesondere im Bereich des S-Bahnaufgangs sowie durch die verbliebene Belaubung der Bäume, die auch durch die Auswertung mehrerer Kameras nicht ausgeglichen werden können.
- Geringe Auflösung der sich bewegenden Fußgänger bedingt durch die Größe des Überwachungsbereichs.
- Verhaltensmuster von Fußgängern, die eine Verfolgung erschweren (Raucherpause, Fußballspiel, Warten in nicht einsehbaren Bereichen).

- Das hohe Fußgängerverkehrsaufkommen in Spitzenzeiten, welches zu gegenseitigen Verdeckungen, Ausweichsituationen und generell zu Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung führt.

Eine manuelle Auswertung des Datenmaterials war daher unvermeidbar. Mehrere Mitarbeiter des DLR sichteten unter erheblichem Zeitaufwand das Bildmaterial und bestimmten dabei Trajektorien für jeden einzelnen Fußgänger. Neben der Aufteilung nach Kameras erfolgte ebenfalls eine Aufteilung in Zeitabschnitte, um eine parallele Befundung durch mehrere Mitarbeiter zu erleichtern. Dadurch konnte zwar die Bearbeitungszeit insgesamt verkürzt werden, es entstand jedoch ein zusätzlicher Aufwand für die Fusion der unabhängig gewonnenen Daten.

Wegen des mit der manuellen Auswertung verbundenen Arbeitsaufwandes war eine Extraktion der Trajektorien über den gesamten Erhebungszeitraum ausgeschlossen. Als verkürztes Auswertungsintervall aus der Grundgesamtheit der Bilddaten wurde stattdessen 11:06 bis 13:30 Uhr des ersten der beiden Erhebungstage vereinbart. Dieses Zeitintervall umfasst die Pause zwischen der zweiten und der dritten Vorlesung sowie die erste Hälfte der Mittagspause.

Im Verlauf der Befundung zeigte sich jedoch, dass selbst dieses Zeitintervall wegen des enormen Arbeitsaufwandes auf letzten Endes nur noch eine Stunde verkürzt werden musste. Abb. 7-2 zeigt das Fußgängeraufkommen im durch Kamera 1 erfassten Bereich in der Zeit von 11:06 bis 12:08 Uhr.



Abb. 7-2: Fußgängeraufkommen im Beobachtungszeitraum für den Kamerastandort 1

Verbunden mit der manuellen Befundung kam es zu weiteren, die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigenden Einschränkungen. So wurde beispiels-

weise auf eine Auswertung von Kamera 4 aufgrund des flachen Blickwinkels sowie großer Überlappungen mit den Erfassungsbereichen der übrigen Kameras aus Gründen der Arbeitseffizienz gänzlich verzichtet. Im Einzelnen kam bei der Befundung folgende Methodik zum Einsatz:

- Pro Kamera wurde lediglich jedes fünfte Bild der Sequenz ausgewertet. Dies entspricht einer mittleren Zeitdifferenz von 1-1,5 Sekunden in Abhängigkeit von der Belichtungszeit. Diese Zeitdifferenz erlaubt ein zuverlässiges Verfolgen der für die Auswertung relevanten Objekte (Fußgänger, Radfahrer, etc.; keine Pkw) bei vertretbarem Arbeitsaufwand.
- Die Position jedes Fußgängers wurde im Bildkoordinatensystem der einzelnen Kameras bestimmt. Als Orientierung diente der Schnittpunkt der Beobachtungsebene mit einer gedachten vertikal durch den Fußgänger verlaufenden Achse (Fußpunkt).
- Zuerst wurde die aktuelle Position aller bereits bekannten Fußgänger fortgeschrieben, danach wurde mit Programmunterstützung nach neuen Fußgängern gesucht.
- Konnte die Position des Subjekts, z.B. durch Verdeckungen nicht bestimmt werden und war keine Vorhersage der Objektposition durch den Beobachter möglich, wurden die zuletzt bestimmten Koordinaten beibehalten.
- In Situationen, in denen nicht eindeutig entschieden werden konnte, ob der Fußgänger den überwachten Bereich verlassen hat, wurde die Verfolgung nach einer variablen Zeitdauer abgebrochen. Für diese Personen ist eine über einen längeren Zeitraum konstante Position am Ende der Trajektorie charakteristisch.

Für die Fusionierung von Daten der von verschiedenen Mitarbeitern ausgewerteten Zeitabschnitte einer Kamera wurde wie folgt vorgegangen:

- Für alle im letzten Einzelbild des vorhergehenden Abschnitts bekannten Fußgänger wurde automatisch eine Korrespondenz in den Daten zum ersten Bild des zweiten Abschnitts gesucht. Als effektiv hat sich dabei der minimale euklidische Abstand der Punkte erwiesen.
- Wurde für einen Fußgänger keine Korrespondenz gefunden, weil er sich beispielsweise unter einem Baum aufhält und für den zweiten Beobachter erst später sichtbar ist, wurde in den Bildern des zweiten Zeitabschnittes der Startpunkt einer Trajektorie mit minimalem Abstand gesucht.
- In allen anderen Fällen wurde die Verfolgung der entsprechenden Objekte eingestellt.



Die Fusion der Trajektorien aus den Kameraperspektiven 1, 2 und 3 wurde lediglich vorbereitet, jedoch nicht mehr abgeschlossen. Nach einer Zuordnung von 10 % der etwa 3600 Trajektorien zeigten sich zahlreiche Inkonsistenzen zwischen den Trajektorien in den Überlappungsbereichen der Kameras. Eine zuverlässige Fusion der befundeten Trajektoriensegmente war daher nicht möglich.

Das Ergebnis der Aufbereitung der Rohdaten wurde vom DLR für jede der drei Kameras in Form einer ASCII-Datei zur Verfügung gestellt. Sie erhalten je Zeile die ID des Fußgängers, die Zeitmarke in Millisekunden seit 11:00 Uhr sowie den Rechts- und Hochwert der aktuellen Position (Gauß-Krüger-Koordinaten). Allein für Kamera 1 wurden so für 3330 Trajektorien 160.793 Koordinaten manuell ermittelt. Letztlich kann die beachtliche Arbeitsleistung allerdings nicht über die große Divergenz zwischen Soll- und Ist-Ergebnis hinwegtrösten.

### 7.1.2 Analyse des Bewegungsverhaltens

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsframework steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem sowohl bereits simulierte Rechenläufe wie auch mikroskopisch in der vorstehenden Form erhobene Daten wiederholt visualisiert werden können. Dabei ist sowohl eine Animation der Bewegung zur Laufzeit wie auch eine Darstellung der Trajektorien möglich.

Zur Prüfung der Konsistenz der aus den Bilddateien extrahierten Trajektorien wurden die mit Hilfe der Kameras 1, 2 und 3 gewonnenen Daten in das Simulationsframework eingespeist. In der Animation zeigten sich verbreitet erhebliche Abweichungen zwischen den Positionierungen desselben Fußgängers basierend auf dem Ausgangsmaterial der unterschiedlichen Kameras.

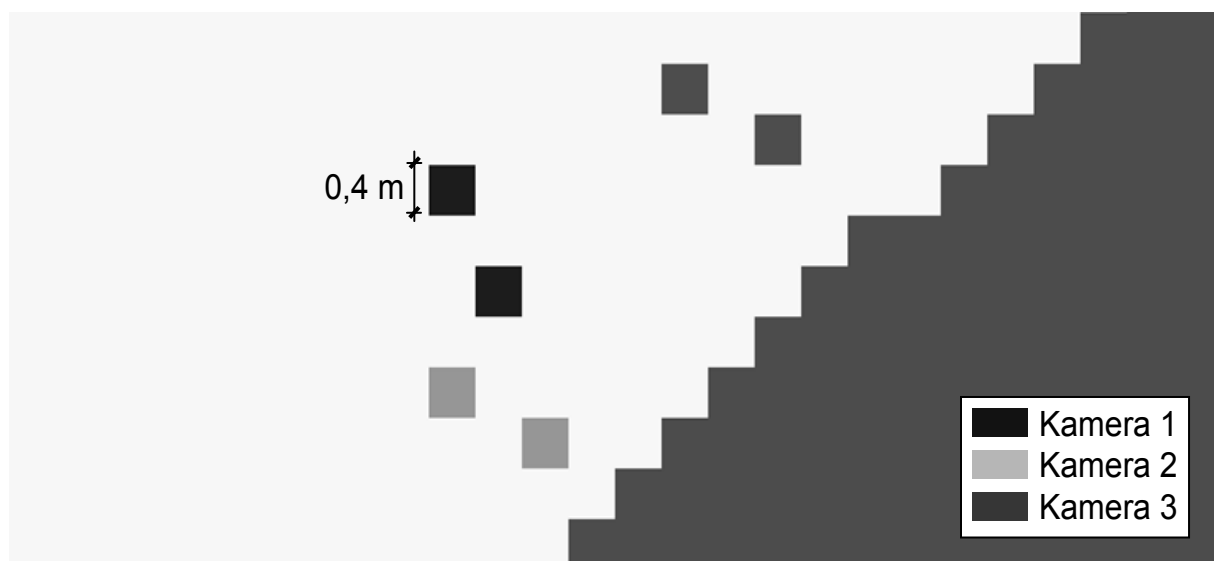


Abb. 7-3: Unschärfe der empirisch ermittelten Positionen

Abb. 7-3 zeigt einen Ausschnitt des Campus südlich von Gebäude Pfaffenwaldring 47, der von den Standorten der drei Kameras ähnlich gut eingesehen werden konnte. Zu sehen sind zwei Fußgänger, deren aktuelle Positionen je nach zu Grunde liegender Kamera um bis zu 3 m voneinander abweichen. Dass dieser systematische Fehler nicht nur auf eine Divergenz der Zeitstempel zurückzuführen ist zeigt Abb. 7-4, wo im Bereich des gestrichelten Ovals eine Lageabweichung aller mit Kamera 1 und 3 ermittelten Trajektorien von im Mittel etwa 5 m festzustellen ist.

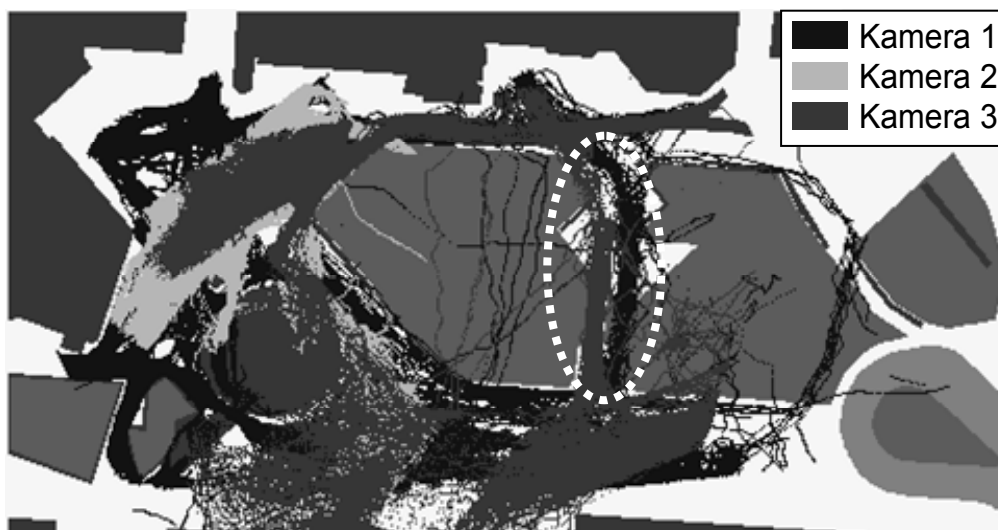


Abb. 7-4: Lageabweichung der empirisch ermittelten Trajektorien (gestricheltes Oval)

Die erneute Animation der empirisch ermittelten Fußgängerbewegung offenbart neben systematischen Fehlern auch die Gefahr punktueller Fehler, die eine manuelle Auswertung mit sich bringt. So „verharren“ einige Fußgänger bisweilen auf der Stelle, um ihre Bewegung sodann mit erhöhter Geschwindigkeit fortzusetzen. Ohne eine Referenz würde man an dieser Stelle möglicherweise eine kurze Pause unterstellen. Die Befundung des Bildmaterials einer anderen Kamera zeigt an gleicher Stelle jedoch vielfach eine gleichförmig fortgesetzte Bewegung: Der Fußgänger macht keine Pause, sondern die manuelle Fortschreibung der Position wurde über einen oder mehrere Zeitschritte lediglich vergessen.

Einige Subjekte bewegen sich mit auffallend hoher Geschwindigkeit durch das Erhebungsgebiet. Es liegt der Schluss nahe, dass es sich hierbei um Radfahrer handelt. Bei der Extraktion der Trajektorien unterblieb jedoch eine entsprechende Kennzeichnung, so dass im Zweifelsfall eine erneute Sichtung des Rohmaterials erforderlich wäre. Eine nachträgliche Kennzeichnung ausgehend vom Ergebnis der Befundung ist mit vertretbarer Zuverlässigkeit nicht möglich.

Abb. 7-4 zeigt weiterhin, dass die empirisch ermittelten Trajektorien nicht unmittelbar an den Türen der Gebäude beginnen, sondern aufgrund von Abschattungen und Begrenzungen des Sichtbereichs vielfach erst einige Meter davor. Statt klar definierter Quell- und Zielpunkte ergeben sich damit mehr oder weniger diffuse Quell- und Zielbereiche, was die Verwendung der Daten zur Validierung des Frameworks zusätzlich erschwert.

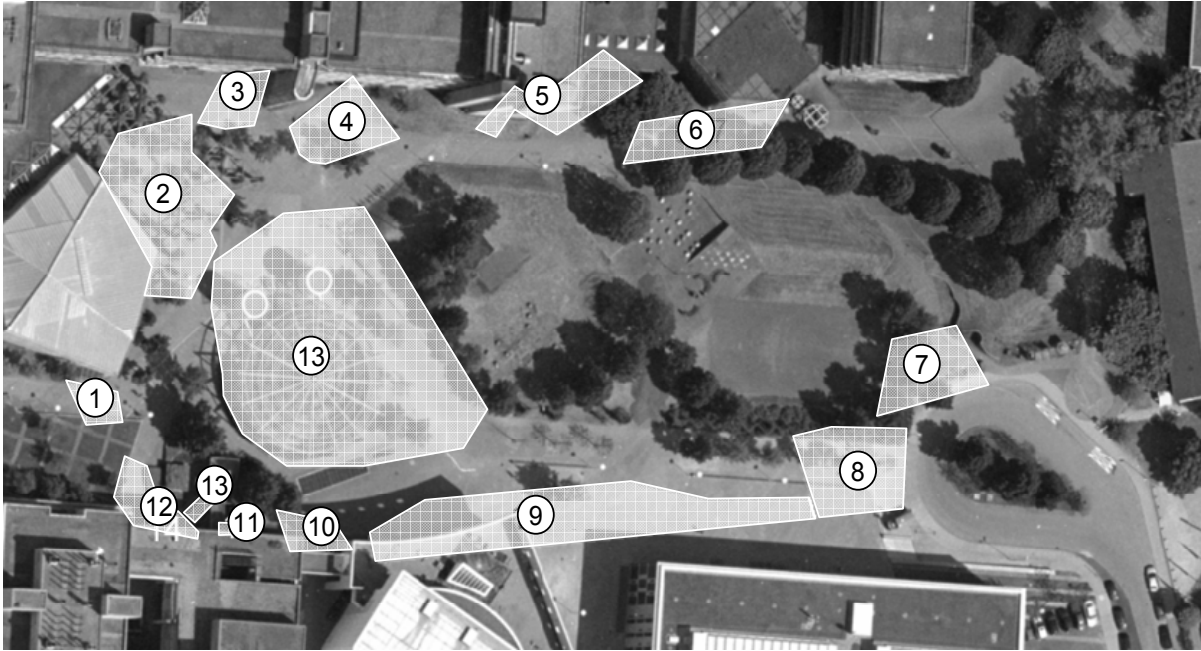


Abb. 7-5: Lage und Bezeichnung der Quell- und Zielbereiche im Orthofoto

Unter maximaler Ausnutzung des Erhebungsbereichs von Kamera 1 wurden gemäß Abb. 7-5 13 Quell- und Zielbereich definiert. Hierbei musste ein Kompromiss zwischen zwei Problemstellungen gefunden werden.

- Quell- und Zielbereiche zu klein gewählt: Nichtberücksichtigung zahlreicher Trajektorien.
- Quell- und Zielbereiche zu groß gewählt: Statistische Kenngrößen verlieren zunehmend an Aussagekraft.

Letztlich wurden die Bereiche so gewählt, dass lediglich 175 der 3330 Trajektorien keine Berücksichtigung fanden. Tab. 7-1 zeigt die Anzahl der Trajektorien zwischen den jeweiligen Quell- und Zielbereichen.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Σ
Z1	3	41	42	163	6	37	0	4	163	4	5	20	107	595
Z2	96	7	112	184	7	41	0	0	20	0	0	13	39	519
Z3	43	31	2	7	0	0	0	0	8	0	0	10	37	138
Z4	100	85	13	5	1	5	0	0	27	1	0	17	89	343
Z5	9	3	0	1	1	2	0	1	37	0	0	0	11	65
Z6	26	12	2	4	5	1	0	0	7	1	2	6	23	89
Z7	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Z8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2
Z9	114	52	9	57	52	7	0	2	32	8	0	3	113	449
Z10	0	2	0	1	1	1	0	0	38	2	0	0	3	48
Z11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Z12	5	12	18	79	0	6	0	0	8	0	0	1	198	327
Z13	174	73	36	81	5	15	0	4	41	4	2	136	5	576
Σ	570	318	234	582	79	116	1	12	382	20	9	206	626	3155

Tab. 7-1: Anzahl der Trajektorien zwischen den definierten Quell- und Zielbereichen

Aufgrund der vorstehend erläuterten Schwierigkeiten stellt sich bei den statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung von Wegelänge und Geschwindigkeit auf den einzelnen Quell- Zielbeziehungen eine hohe Schwankungsbreite ein. Hilfreich ist auch hier wiederum ein Blick auf das grafische Erscheinungsbild der Trajektoriengruppen.



Abb. 7-6: Empirisch ermittelte Trajektorien zwischen Quellbereich 1 und Zielbereich 6

Den örtlichen Gegebenheiten sowie bereits veröffentlichten Aussagen entsprechende Kenngrößen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1) ergeben sich zuverlässig dort, wo Quell- und Zielbereich jeweils eng eingegrenzt sind. Abb. 7-6 zeigt

eine solche Gruppe von Trajektorien zwischen den Quellbereich 1 und dem Zielbereich 6.

Bei einer Standardabweichung von etwa 2,9 m ergibt sich eine mittlere Weglänge von etwa 139 m. Die mittlere Geschwindigkeit von 1,6 m/s bei einer hohen Standardabweichung von 0,54 m/s liegt im oberen Bereich publizierter Werte. Der Blick auf die Animation offenbart über den Auswertungszeitraum unter 26 Subjekten jedoch vermutlich 2 Radfahrer. Nach aufwändiger Isolierung der beiden Trajektorien aus der Datengrundgesamtheit ergibt sich ein Mittelwert von 1,3 m/s bei einer Standardabweichung von 0,22 m/s.

## **7.2 Simulation Referenzszenario**

### **7.2.1 Angenommenes Verkehrsaufkommen**

In Ermangelung einer konsistenten Datenbasis wurden unter Berücksichtigung der verfügbaren Quellen zum Fußgängerverkehrsaufkommen (siehe Abschnitt 5.4) sowie der Ergebnisse der Fußgängerverkehrserhebung sinnvolle Annahmen für das der Simulation zu Grunde zu legende Verkehrsaufkommen getroffen. Eingedenk der Tatsache, dass der peripher gelegene Campus Vaihingen unter Studierenden wie Angestellten einen hohen Einpendleranteil aufweist, wurden drei Zeitintervalle eines typischen Wochentages separat betrachtet:

- Zeitintervall Morgen von 07:30 bis 09:30 Uhr
- Zeitintervall Mittag von 11:15 bis 13:15 Uhr
- Zeitintervall Abend von 15:30 bis 17:30 Uhr

Die drei jeweils zweistündigen Zeitintervalle decken exemplarisch den Zeitbereich mit dem stärksten Zielverkehr, dem stärksten Binnenverkehr sowie dem stärksten Quellverkehr im Campusbereich ab.

Die bedeutendsten externen Verkehrsquellen während der Morgenspitze sind S-Bahn, Linienbus, Pkw und Wohnheime. Zu dieser Zeit ist das Binnenverkehrsaufkommen zwischen den Hochschulgebäuden vernachlässigbar klein. Ein großes Verkehrsaufkommen ergibt sich aus Richtung der Wohnheime auch zur S-Bahn in Richtung Innenstadt.

Während der Mittagszeit ist das Binnenverkehrsaufkommen auf dem Campus dominant. Erzeugt wird dieses im Wesentlichen durch den Wechsel von Studierenden in einen anderen Hörsaal eines anderen Hochschulgebäudes. Hinzu kommt in der Mittagszeit der Fußweg von und zur Mensa. Auch nimmt die Nutzerzahl der Bibliothek über die Mittagszeit zu.

Der Abend stellt im Wesentlichen eine Richtungsumkehr der Verkehrssituation des Morgens dar. Studierende und Mitarbeiter verlassen die Hochschulgebäude in Richtung der Bus- und S-Bahn-Haltestellen, in Richtung des Parkplatzes oder der Wohnheime. Auch ergibt sich ein bedeutendes Verkehrsaufkommen von der S-Bahn direkt in Richtung der Wohnheime.

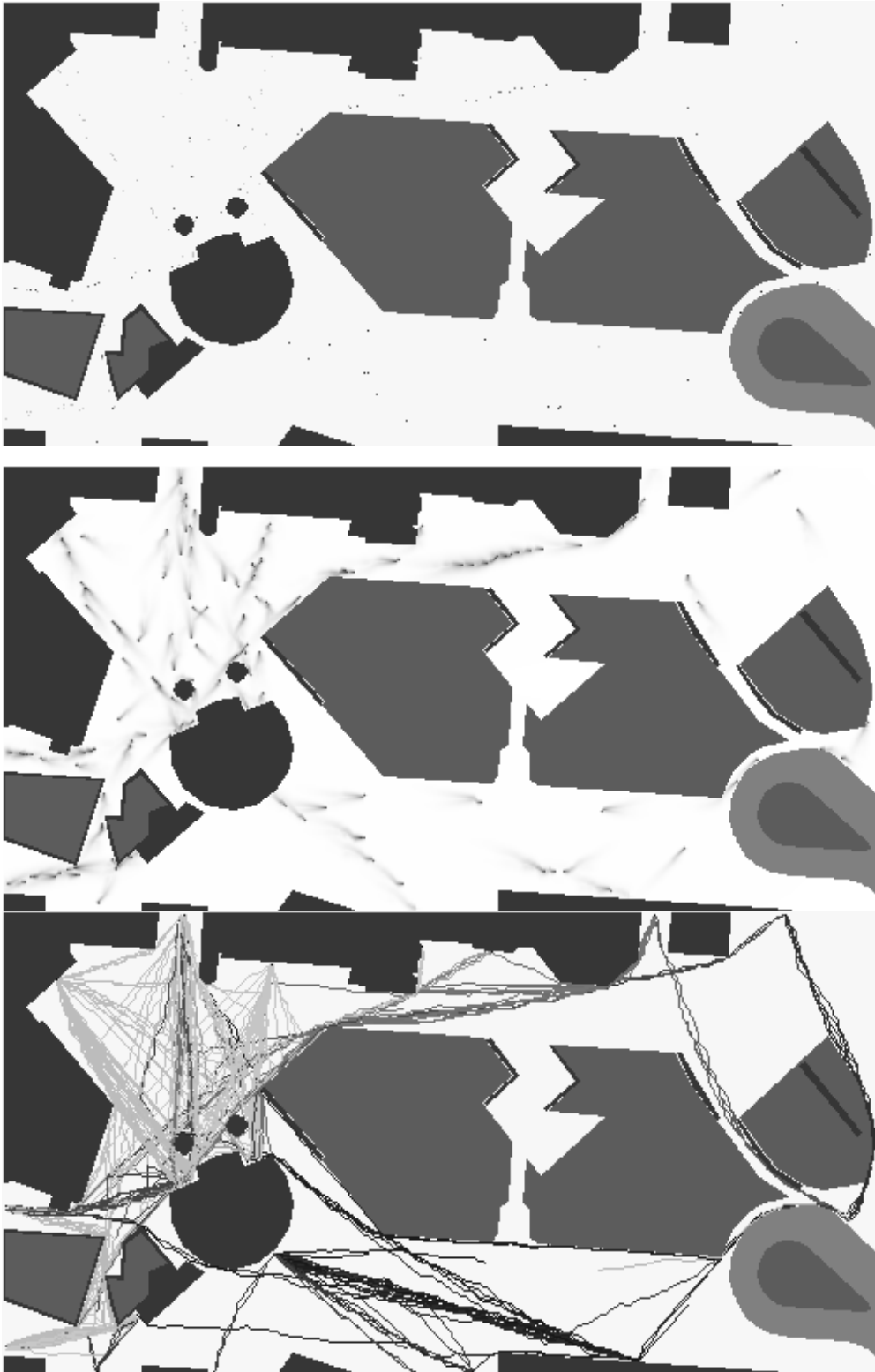
Die Matrizen des angenommenen und simulierten Quell-Ziel-Verkehrsaufkommens sind in den Anlagen zu dieser Arbeit wiedergegeben. Die geografische Zuordnung der Quell- und Zielbezeichnungen kann der jeweiligen Visualisierung der Trajektorien entnommen werden

### **7.2.2 Ergebnisse**

Zur Laufzeit der Simulation werden diverse Kontroll- und Auswertungsparameter aufgezeichnet. Dabei erfolgt zu jedem Zeitschritt zunächst eine Visualisierung der aktuellen Position der Agenten im Simulationsbereich. Die Agenten erhalten dabei wahlweise entweder eine einheitliche Farbgebung oder zur besseren Unterscheidung der einzelnen Relationen eine in Abhängigkeit der Quell-Zielbeziehung automatisch zugewiesene Farbe (Abb. 7-7 oben).

Bei Verwendung dynamischer Grundfelder (vgl. Abschnitt 4.4.2.5) erfolgt in Grauabstufungen zusätzlich eine Visualisierung der Feldstärken. Dabei wird der jeweils höchste Potentialwert von  $DFF_i$ ,  $i = \{0, 2, \dots, 7\}$  in eine gemeinsame Abbildung eingetragen (Abb. 7-7 Mitte).

Auch die simulierten Trajektorien der Agenten können in einem beliebigen Intervall zwischen Beginn und Ende des Simulationslaufs visualisiert werden. Abb. 7-7 unten zeigt exemplarisch die Summe aller zurückgelegten Trajektorien von Beginn des Simulationslaufs bis zum Zeitpunkt der Abbildung von Agentenposition und dynamischer Feldstärke in der Abbildung oben. Die Trajektorien können einzeln, gruppiert nach Quell-Zielrelationen oder wie hier gezeigt als Gesamtsumme visualisiert werden.



*Abb. 7-7: Exemplarische Darstellung der Visualisierung der Agenten (oben), der dynamischen Grundfelder (Mitte) sowie der zurückgelegten Trajektorien (unten) zum gleichen Zeitpunkt*

Zur Kontrolle der Rechenleistung im Verhältnis zur Anzahl zeitgleich aktiver Agenten wird die Anzahl generierter und abgeschlossener Agenten zu jedem Zeitschritt des Simulationslaufs in eine Tabelle ausgegeben. Zusätzlich ist im in Tab. 7-2 exemplarisch dargestellten Ausschnitt die Zeit seit Beginn der Simulation zu Beginn und Ende eines jeweiligen Simulationsschritts sowie die zugehörige Berechnungsdauer in Millisekunden aufgetragen.

In	Out	Active	Start	End	Duration
...					
198	59	139	33740	33756	16
199	59	140	34476	34490	14
200	59	141	35242	35258	16
201	59	142	35978	35993	15
202	60	142	36729	36745	16
203	61	142	37574	37590	16
...					

*Tab. 7-2: Anzahl aktiver Agenten, Berechnungszeit in Millisekunden*

Die Koordinaten der Trajektorie eines jeden Agenten sowie weitere agentenspezifische Parameter werden jeweils in einer ASCII-Datei abgelegt (Tab. 7-3). Unter Verwendung der Aufzeichnung der zurückgelegten Bewegungsrichtung in der Spalte „dir“ mit „o“ für orthogonal und „d“ für diagonal wird nach Abschluss des Simulationslaufs für jeden Agenten die Länge des zurückgelegten Weges ermittelt.

```
Projekt: campus
SFF: iso
Agent No.: 35
Quelle: 7
Ziel: 8
Anpassungsfaktor: 1
Dynamische Grundfelder: True
Maximales dynamisches Potential: 15
Streuung: 1,5
Zerfall: 0,9
Darstellungsfarbe RGB: 23 255 0
+++++
frame step posX posY dir
35 0 78 221 s
36 1 77 222 d
37 2 76 222 o
38 3 75 223 d
39 4 74 223 o
40 5 73 223 o
41 6 72 224 d
42 7 71 225 d
...
```

*Tab. 7-3: Header und Anfang einer Tabelle zur Aufzeichnung der Trajektorie eines Agenten*



Mit Hilfe der spezifischen Wegelängen werden die statistischen Kontrollgrößen Mittelwert und Standardabweichung der Wegelängen für jede Quell-Zielrelation ermittelt und in Matrizen der Dimension der Anzahl der Quellen und Ziele ausgegeben. In den Anlagen zu dieser Arbeit sind diese für das Referenzszenario Campus Vaihingen jeweils für die simulierten Zeitintervalle Morgen, Mittag und Abend dargestellt.

## 8 Fazit und Ausblick

Zentraler Gegenstand dieser Arbeit war die Entwicklung einer Simulationsumgebung zum Zweck der Generierung realitätsnaher Fußgängertrajektorien in beliebigen Umgebungsgeometrien unter alltäglichen Bedingungen. Auf einer heuristischen Betrachtungsebene wie auch bei Validierung mit Hilfe makroskopischer Kenngrößen wurde dieses Ziel voll erreicht.

Alle bis dato publizierten mikroskopischen Simulationsumgebungen wie auch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsframework eint jedoch die unbewältigte Herausforderung der Validierung und Kalibrierung mikroskopischer Grundannahmen anhand empirisch erhobener Daten. Die zu diesem Zwecke mit erheblichem Aufwand durchgeführte videogestützte Fußgängerkehrerhebung brachte letztlich keine Ergebnisse der erforderlichen Genauigkeit.

Das gemeinsam mit dem Verkehrsforschungsinstitut des DLR sowie dem Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelte Erhebungsszenario basierte auf der Annahme, dass eine vollautomatische Auswertung des Videomaterials möglich ist. Die vorherige Kenntnis der im Nachhinein aufgetretenen Schwierigkeiten hätte zu einem anderen Erhebungsszenario mit einer Konzentration auf ein kleineres Erhebungsgebiet geführt.

Der Fokus bei der Auswertung hätte auf der Klassifizierung und Analyse von Begegnungs-, Ausweich- und Fußgängerfolgesituationen gelegen. Auch die Analyse gruppenspezifischen Verhaltens wäre denkbar gewesen. So blieb letztlich die Möglichkeit, die Ergebnisse der manuellen Befundung des Videomaterials partiell zur Ableitung makroskopischer Kenngrößen einzusetzen. Die in der Literatur dokumentierte geringe Varianz der Fußgängergeschwindigkeiten konnte mit Hilfe der eigenen Daten jedoch nicht bestätigt werden, was nachweislich jedoch auch auf Qualitätsmängel zurückgeführt werden muss.

Maßgebende Entwicklungsarbeit wurde vor allem bei der Implementierung isotroper statischer Grundfelder geleistet. Die entwickelten Algorithmen ermöglichen die leistungsfähige Berechnung diskreter isodistanter Potentiale zur Zielführung der Agenten in beliebigen Umgebungsgeometrien. Auch wurde eine schlanke Implementierung dynamischer Grundfelder zur Berücksichtigung des Spurbildungs- und Ausweichverhaltens der Agenten vorgestellt. Bei letztere stehen Validierung und Kalibrierung unter Zuhilfenahme mikroskopischer empirischer Daten jedoch noch aus.

Für die Betrachtung größerer Simulationsräume sowie einer größeren Anzahl von Agenten unter Berücksichtigung dynamischen Verhaltens müsste der vorliegende Programmcode nun für die Möglichkeit des verteilten Rechnens auf Rechnerclustern erweitert werden. Ein weiterer Schritt hin zu einem universell einsetzbaren Werkzeug zur Fußgängermodellierung ist die Einbettung der mikroskopischen Fußgängersimulation in ein Framework zur umfassenden Mobilitätsmodellierung, siehe bspw. [Cavens et al. 2005].

Die Markteinführung eines solchen Frameworks steht unmittelbar bevor. Laut Selbstauskunft der PTV AG wird ab Sommer 2008 ein neues Erweiterungsmodul zum Softwarepaket VISSIM zur Verfügung stehen, welches die mikroskopische Fußgängersimulation sowohl zum Zweck der Führung von Leistungsfähigkeitsnachweisen für Fußwege und Flächen, als auch von Evakuierungsszenarien beinhaltet. Grundlage hierzu ist die Weiterentwicklung des auch in dieser Arbeit vorgestellten Social-Force Modells [Helbing et al. 1995].

Inwieweit und unter Verwendung welcher Daten hierbei ein Validierung der mikroskopischen Grundannahmen durchgeführt wurde ist an dieser Stelle nicht bekannt. Bisläng durchgeführte Vergleiche kommerzieller Programme offenbarten untereinander jedoch stets erhebliche Diskrepanzen hinsichtlich der Simulationsergebnisse [Rogsch et al. 2005]. Die größten Anstrengungen im Zuge der Weiterentwicklung mikroskopischer Fußgängersimulationsumgebungen sollten daher zunächst in die Erhebung und adäquate Analyse einer umfassenden mikroskopischen Datenbasis investiert werden.

## 9 Literatur

**AlGadhi, S.; Mahmassani, H.; Herman, R. (2001):** A Speed-Concentration Relation for Bi-Directional Crowd Movements with Strong Interaction, Berlin.

**Alrutz, D.; Bohle, W. (1999):** Flächenansprüche von Fußgängern, Bergisch Gladbach.

**Ando, K.; Ota, H.; Aoki, T. (1988):** Forecasting the flow of people; in: Railway Research Review, Nr. 8 (45. Jg.), S. 8-14.

**Antonini, G.; Bierlaire, M.; Weber, M. (2006):** Discrete choice models of pedestrian walking behavior; in: Transportation Research, Nr. 40 (Part B), S. 667-687.

**Antonini, G.; Bierlaire, M. (2005):** A Discrete Choice Framework for Acceleration and Direction Change Behaviors in Walking Pedestrians; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 155-166.

**Arbter, B.; Bitzer, F. et al. (2006):** Approaches for Modelling Mobility in Nexus, Stuttgart.

**Arbter, B.; Drosdol, T. et al. (2004):** Das Nexus Relationen- und Topologiekonzept, Stuttgart.

**Armitage, A.; Binnie, T. D. et al. (2003a):** Measuring pedestrian trajectories using a pyroelectric differential infrared detector, Limerick, Ireland.

**Armitage, A.; Binnie, T. et al. (2003b):** Measuring Pedestrian Trajectories with Low Cost Infrared Detectors: Preliminary Results; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, UK, S. 101-110.

**Batty, M. (1997):** Predicting where we walk; in: Nature, Vol. 338, S. 19-20.

**Bauer, M.; Dürr, F. et al. (2004):** Information Management and Exchange in the Nexus Platform, Stuttgart.

**Bauer, N. (Hrsg.) (2004):** Leitfaden zur Sicherheits- und Verkehrstechnik mit Bildverarbeitung, Erlangen.

**Berrou, J.; Beecham, J. et al. (2005):** Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 167-181.

**Bitzer, F.; Arbter, B.; Ressel, W. (2005):** Modeling and Simulation of Physical Mobility within the Nexus Framework, Bari, Italy.

**Blue, V.; Adler, J. (1998):** Emergent Fundamental Pedestrian Flows From Cellular Automata Microsimulation; in: Transportation Research Record, Nr. 1644 (Journal of the Transportation Research Board), S. 29-36.

**Blue, V.; Adler, J. (2000a):** Cellular Automata Model Of Emergent Collective Bi-Directional Pedestrian Dynamics, Portland Oregon.

**Blue, V.; Adler, J. (2000b):** Modeling Four-Directional Pedestrian Movements, Washington D.C.

**Blue, V.; Adler, J. (2000c):** Cellular Automata Microsimulation of Bi-Directional Pedestrian Flows; in: Transportation Research Record, Nr. 1678 (Journal of the Transportation Research Board), S. 135-141.

**Bohle, W.; Irzik, M.; Mennicken, C. (2004):** Traffic Flow and Quality of Pedestrian Traffic; in: Straßenverkehrstechnik, Nr. 11, S. 585-594.

**Breyer, T. (2003):** Modellierung der Bewegung und des Verhaltens von Dienstnutzern in mobilen Ad-hoc-Netzen, Karlsruhe.

**Brög, W.; Erl, E. (1999):** Kenngrößen für Fußgänger- und Fahrradverkehr, Bergisch Gladbach.

**Burstedde, C.; Klauck, K. et al. (2001):** Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton; in: Physica A, Nr. 295 S. 507-525.

**CROW; ASVV (1998):** Recommendations for Traffic Provisions in Built-up Areas, CROW.

**Cavens, D.; Gloor, C. et al. (2005):** Distributed intelligence in pedestrian simulations; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 201-212.

**Couzin, I. D.; Krause, J. et al. (2005):** Effective leadership and decision-making in animal groups on the move; in: Nature, Nr. 433 S. 513-516.

**Daamen, W. (2004):** Modelling passenger flows in public transport facilities, Delft.

**Dalaff, C.; Reulke, R. et al. (2003):** A Traffic Object Detection System for Road Traffic Measurement and Management, Massey University, Palmerston North, New Zealand.

**Daly, P.; McGrath, F.; Annesley, T. (1991):** Pedestrian Speed/Flow Relationships for Underground Stations; in: Traffic Engineering and Control, Nr. 2 (32. Jg.), S. 75-78.

**Dijkstra, J.; Timmermans, H.; Jessurun, A. (2001):** A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualising Simulated Pedestrian Activity, Berlin.

**Dzubiella, J.; Löwen, H. (2002):** Pattern formation in driven colloidal mixtures: tilted driving forces and re-entrant crystal freezing; in: Journal of Physics: Condensed Matter, Nr. 40 (14. Jg.), S. 9383-9395.

- Dürr, F.; Hönle, N. et al. (2005):** Navigation in NEXUS: Navigation Component Report, DFG SFB 627, Stuttgart.
- ERTICO - ITS Europe (2006):** GDF - Geographic Data Files.
- Ferber, J. (1999):** Multi-agent systems. An Introduction to distributed artificial intelligence, Boston.
- Follmer, R.; Kunert, U. et al. (2002):** Mobilität in Deutschland - Ergebnisbericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1970):** Richtlinien für Verkehrserhebungen, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1972):** Richtlinien für Anlagen des Fußgängerverkehrs, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1991):** Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE 91), Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1992):** Richtlinien für Anlagen des Fußgängerverkehrs, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001):** Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS, Ausg. 2001. Aufl., Köln.
- Frijters, J. (2004):** IKVM.NET.
- Fruin, J. J. (1971):** Pedestrian Planning and Design, New York.
- Galea, E. (2002):** Simulating Evacuation and Circulation in Planes, Trains, Buildings and Ships Using the EXODUS Software, Berlin.
- Gloor, C.; Cavens, D. et al. (2003b):** A pedestrian simulation for very large scale applications; in: Klagenfurter Geographische Schriften, Nr. 23 (Multi-Agenten-Systeme in der Geographie. Jg.).
- Gloor, C.; Mauron, L.; Nagel, K. (2003a):** A pedestrian simulation for hiking in the alps, Ascona.
- Gloor, C.; Stucki, P.; Nagel, K. (2004):** Hybrid techniques for pedestrian simulations, Ascona.
- Goffman, E. (1971):** Relations in Public: Microstudies in the Public Order, New York.
- Haase, M.; Handy, M. (2005):** BlueTrack – Imperceptible Tracking of Bluetooth Devices, Rostock, Germany.

- Haklay, M.; O'Sullivan, D. et al. (2001):** 'So go downtown': simulating pedestrian movement in town centres; in: Environment and Planning, volume 28 (B: Planning and Design), S. 343 - 359.
- Helbing, D.; Farkas, I. et al. (2002):** Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations, Berlin.
- Helbing, D.; Farkas, I.; Vicsek, T. (2000a):** Simulating dynamical features of escape panic; in: Nature, Nr. Vol 407 S. 487-490.
- Helbing, D.; Farkas, I.; Vicsek, T. (2000b):** Freezing by Heating in a Driven Mesoscopic System; in: PHYSICAL REVIEW LETTERS, Nr. 6 (84. Jg.), S. 1240 - 1243.
- Helbing, D.; Keltsch, J.; Molnár, P. (1997a):** Modelling the evolution of human trail systems; in: Nature, vol. 388, S. 47-50.
- Helbing, D.; Molnár, P. F. I. J.; Bolay, K. (2001):** Self-organizing pedestrian movement; in: Environment and Planning, Nr. volume 28 (B Planning and Design), S. 361 - 383.
- Helbing, D.; Molnár, P. (1995):** Social force model for pedestrian dynamics; in: Physical Review E, 51. Jg., S. 4282 - 4286.
- Helbing, D.; Schweitzer, F. et al. (1997b):** Active walker model for the formation of human and animal trail systems; in: Physical Review E, 56. Jg., S. 2527 - 2539.
- Helbing, D. (1992):** Stochastische Methoden, nichtlineare Dynamik und quantitative Modelle sozialer Prozesse.
- Helbing, D. (2001):** Traffic and related self-driven many-particle systems; in: Reviews of Modern Physics, 73. Jg., S. 1067-1141.
- Henderson, L. (1971):** The Statistics of Crowd Fluids; in: Nature, vol. 229, S. 381-383.
- Hoogendoorn, S. P.; Bovy, P. H. L. (2000a):** Pedestrian speed density functions using gas-kinetic modelling; in: Bovy, T. (Hrsg.); Estimators of travel time for road networks, Delft, S. 107-130.
- Hoogendoorn, S. P.; Bovy, P. H. L. (2000b):** Continuum modeling of multi-class traffic flow; in: Transportation Research Part B: Methodological, Nr. 2 (34. Jg.), S. 123-146.
- Hoogendoorn, S. P.; Bovy, P. H. L. (2004):** Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models; in: Transportation Research, Nr. 38, S. 169 - 190.

**Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.; Bovy, P. H. (2003b):** Extracting Microscopic Pedestrian Characteristics from Video Data.

**Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.; Bovy, P. (2003a):** Microscopic Pedestrian Traffic Data Collection and Analysis by Walking Experiments: Behaviour at Bottlenecks; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, UK, S. 89-100.

**Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W. (2005):** Pedestrian Behavior at Bottlenecks; in: Transportation Science, Nr. 2 (39. Jg.), S. 147 - 159.

**Hoogendoorn, S.; Bovy, P.; Daamen, W. (2002):** Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modelling, Berlin.

**Irzik, M. (2003):** Design of Pedestrian Facilities; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, UK, S. 111-119.

**Kerridge, J.; Armitage, A. et al. (2004):** Monitoring the Movement of Pedestrians Using Low-cost Infrared Detectors: Initial Findings; in: Transportation Research Record, S. 12.

**Kerridge, J.; Hine, J.; Wigan, M. (2001):** Agent-based modelling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered; in: Environment and Planning, Nr. volume 28(3) (B: Planning and Design), S. 327 - 341.

**Kerridge, J.; Keller, S. et al. (2005):** Collecting Pedestrian Trajectory Data in Real-time; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 27-39.

**Keßel, A.; Klüpfel, H. et al. (2002):** A Concept for Coupling Empirical Data and Microscopic Simulation of Pedestrian Flows, Wien, Österreich.

**Kirchner, A.; Namazi, A. et al. (2003a):** Role of Conflicts in the Floor Field Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, UK, S. 51-62.

**Kirchner, A.; Nishinari, K.; Schadschneider, A. (2003b):** Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics; in: Physical Review E, Nr. 56122 (67. Jg.), S. 10.

**Kirchner, A.; Schadschneider, A. (2002):** Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics; in: Physica A.

**Kirchner, A. (2002):** Modellierung und statistische Physik biologischer und sozialer Systeme, Köln.

**Klüpfel, H.; Meyer-König, T. et al. (2001):** Microscopic Simulation of Evacuation Processes on Passenger Ships, Berlin.



- Klüpfel, H. (2005):** The simulation of crowd dynamics at very large events - Calibration, empirical data and validation; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 285-296.
- Klüpfel, L. (2003):** A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation, Duisburg.
- Knoflacher, H. (1987):** Verkehrsplanung für den Menschen, Band 1: Grundstrukturen, Wien.
- Knoflacher, H. (1995):** Fußgeher und Radverkehr: Planungsprinzipien, Wien.
- Kukla, R.; Willis, A.; Kerridge, J. (2003):** Application of context-mediated behavior to a multi-agent pedestrian flow model (PEDFLOW).
- Kurose, S.; Borgers, A. W. J.; Timmermans, H. J. P. (2001):** Classifying pedestrian shopping behaviour according to implied heuristic choice rules; in: Environment and Planning, Nr. volume 28 (B: Planning and Design), S. 405 - 418.
- Løvas, G. G. (1994):** Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow; in: Transportation Research, Nr. 25, S. 429-443.
- Mattern, F. (2005):** Ubiquitous Computing: Scenarios for an informatized world; in: Zerdick, A.; Picot, A. et al. (Hrsg.); E-Merging Media - Communication and the Media Economy of the Future.
- Meyer-König, T.; Klüpfel, H.; Schreckenberg, M. (2001):** A microscopic model for simulating mustering and evacuation processes onboard passenger ships, Oslo.
- Millonig, A.; Schechtner, K. (2005):** Decision Loads and Route Qualities for Pedestrians - Key Requirements for the Design of Pedestrian Navigation Services; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 109-118.
- Molnár, P. (1996):** Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen, Aachen.
- Moore, G. E. (1965):** Cramming more components onto integrated circuits; in: Electronics, Nr. Vol. 38 (Vol. 38), S. pp. 114-117.
- Morall, J.; Ratnayake, L.; Seneviratne, P. (1991):** Comparison of Central Business District Pedestrian Characteristics in Canada and Sri Lanka; in: Transportation Research Record, vol. 1294, S. 57-61.
- Nagel, K.; Schreckenberg, M. (1992):** A cellular automaton model for free-way traffic; in: Journal de Physique I, Nr. 12 S. 2221-2229.

- Nakayama, A.; Sugiyama, Y.; Hasebe, K. (2005):** Instability of pedestrian flow in two-dimensional optimal velocity model; *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Berlin, S. 321-332.
- Navin, F.; Wheeler, R. (1969):** Pedestrian Flow Characteristics; in: *Traffic Engineering*, 39. Jg., S. 30-36.
- Nicklas, D.; Großmann, M. et al. (2001):** A Model-Based, Open Architecture for Mobile, Spatially Aware Applications; in: *Advances in Spatial and Temporal Databases: 7th International Symposium*, S. 117-135.
- O'Flaherty, C.; Parkinson, M. (1972):** Movement on a City Centre Footway; in: *Traffic Engineering and Control*, 13. Jg., S. 434-438.
- Ohi, N.; Ikai, M.; Nishinari, K. (2003):** Simulations of Evacuation Using Small World Network, Berlin.
- Okazaki, S.; Matsushita, S. (1993):** A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Evacuation and Queuing; *Proceedings of the International Conference on Engineering for crowd safety*, London.
- Older, S. (1968):** Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets; in: *Traffic Engineering and Control*, Nr. 4 (10. Jg.), S. 160-163.
- Open Geospatial Consortium (2006):** GML - the Geography Markup Language.
- Pauls, J. (1987):** Calculating Evacuation Times for tall Buildings; in: *Fire Safety Journal*, 12. Jg., S. 213-236.
- Quinn, M. J.; Metoyer, R. A.; Hunter-Zaworski, K. (2003):** Parallel Implementation of the Social Force Model; *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Greenwich, UK, S. 63-74.
- Rajewsky, N.; Santen, L. et al. (1998):** The asymmetric exclusion process: Comparison of update procedures; in: *Journal of Statistical Physics*, 92. Jg., S. 151.
- Rogsch, C.; Seyfried, A.; Klingsch, W. (2005):** Comparative Investigation of the Dynamic Simulation of Foot Traffic Flow; *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Berlin, S. 357-362.
- Sakar, A.; Janardhan, K. (1997):** A Study on Pedestrian Flow Characteristics, Washington.
- Schadschneider, A.; Kirchner, A.; Nishinari, K. (2002):** CA approach to collective phenomena in pedestrian dynamics; *Proceedings on the 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, Geneva, Switzerland, Berlin, S. 239-248.

- Schick, P. (2003):** Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses, Stuttgart.
- Schultz, M.; Lehmann, S.; Fricke, H. (2005):** A discrete microscopic model for pedestrian dynamics to manage emergency situations in airport terminals; Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin, S. 369-375.
- Sleight, R. (1972):** The Pedestrian: Human Factors in Highway Traffic Safety Research.
- Sugiyama, Y.; Nakayama, A.; Hasebe, K. (2002):** 2-Dimensional Optimal Velocity Models for Granular Flow and Pedestrian Dynamics, Berlin.
- Sugiyama, Y.; Nakayama, A.; Hasebe, K. (2003):** Modeling Pedestrians and Granular Flow in 2-Dimensional Optimal Velocity Models, Berlin.
- Tanariboon, Y.; Guyano, J. (1991):** Analysis of Pedestrian Movements in Bangkok; in: Transportation Research Record, vol. 1294, S. 52-56.
- Tanariboon, Y.; Hwa, S.; Chor, C. (1986):** Pedestrian Characteristics Study in Singapore; in: Journal of Transportation Engineering, Nr. 3 (vol. 112), S. 229-235.
- Teknomo, K. (2002):** Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model, Tohoku, Japan.
- Thompson, P. A.; Marchant, E. W. (1995):** A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations; in: Fire Safety Journal, Nr. 24 S. 131-148.
- Tregenza, P. (1976):** The Design of Interior Circulation, New York.
- VVS (2007):** Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart.
- Virkler, M.; Elayadath, S. (1994):** Pedestrian Speed-Flow-Relationships; in: Transportation Research Record, vol. 1438, S. 51-58.
- Vogt, W.; Grunwald, C. et al. (2004):** Fallstudien zu Wirkungen des eCommerce für Transportleistungen, Verkehrs- und Logistiksystemänderungen im Segment Business-to-Consumer. Projekt-Nr.: 96.0741/2002 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Stuttgart.
- Weidmann, U. (1993):** Transporttechnik der Fußgänger; in: Report Schriftenreihe IVT-Berichte, Nr. ETH Zürich (90. Jg.).
- Wiedemann, R. (1974):** Simulation des Straßenverkehrsflusses; in: Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Nr. Heft 8.

**Willis, A.; Kukla, R. et al. (2002):** Laying the Foundations: The Use of Video Footage to Explore Pedestrian Dynamics in PEDFLOW, Berlin.

**Wolff, M. (1973):** Notes on the behavior of pedestrians; Peoples in Places: The Sociology of the Familiar, New York, S. 35-48.

**Wolfram, S. (2002):** A New Kind of Science, Champaign, Illinois, USA.

**Young, S. (1999):** Evaluation of Pedestrian Walking Speeds in Airport Terminals; in: Transportation Research Record, 1674. Jg., S. 20-26.