

Michael Schultz

Entwicklung eines individuenbasierten  
Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens  
von Passagieren im Flughafenterminal



Beiträge aus den Ingenieurwissenschaften

**Michael Schultz**

**Entwicklung eines individuenbasierten  
Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens  
von Passagieren im Flughafenterminal**

 VOGT

Dresden 2010

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen  
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;  
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2010

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation  
„Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des  
Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal“  
von Michael Schultz überein.

© Jörg Vogt Verlag 2010  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor  
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-41-0

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)

**Entwicklung eines individuenbasierten  
Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens  
von Passagieren im Flughafenterminal**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

der Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"

der Technischen Universität Dresden

von

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schultz**

Institut für Luftfahrt und Logistik  
Dresden 2010

*Gutachter:*

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dirk Helbing

*Eingereicht am:* 5. Februar 2010

*Verteidigt am:* 13. August 2010





# Inhaltsverzeichnis

## Inhaltsverzeichnis

### Kurzfassung

<b>1. Methodische Konzeption</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	3
1.2. Modell und Simulation . . . . .	5
1.2.1. Modellierung . . . . .	5
1.2.2. Computerbasierte Simulation . . . . .	10
1.3. Modellansätze zur Abbildung individueller Verhaltensweisen . . . . .	13
1.3.1. Kollektive Phänomene . . . . .	14
1.3.2. Modellierung individueller Verhaltensweisen . . . . .	17
1.3.3. Modell der sozialen Kräfte . . . . .	19
1.3.4. Modell unter Verwendung von zellularen Automaten . . . . .	23
1.3.5. Modell der diskreten Entscheidungen . . . . .	25
1.4. Passagierabfertigungsprozesse im Flughafenterminal . . . . .	29
1.5. Anforderungen an ein applikationsorientiertes Modell . . . . .	34
<b>2. Individuenbasiertes Bewegungsmodell</b>	<b>37</b>
2.1. Eindimensionale Modellansätze . . . . .	38
2.1.1. Random walk . . . . .	38
2.1.2. Asymmetric simple exclusion process (ASEP) . . . . .	41
2.2. Zweidimensionaler zellulärer Automat . . . . .	46
2.2.1. Gitterabhängigkeiten - Geschwindigkeit und Varianz . . . . .	51
2.2.2. Implementierung - Testumgebung . . . . .	56
2.2.3. Kalibrierung - Fundamentaldiagramm . . . . .	59
2.3. Umgebungsanalyse zur Richtungsbestimmung . . . . .	63
2.3.1. Geometrischer Ansatz . . . . .	64
2.3.2. Diskreter Ansatz unter Nutzung eines regulären Gitters . . . . .	69
2.4. Interaktionsmodellierung . . . . .	77

<b>3. Datenerhebung im Flughafenterminal</b>	<b>85</b>
3.1. Videogestützte Personenverfolgung . . . . .	86
3.1.1. Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	88
3.1.2. Methodische Umsetzung . . . . .	90
3.1.3. Datenerhebung im Terminal des Flughafens Dresden . . . . .	96
3.2. Erhebung passagierbezogener Daten . . . . .	98
3.2.1. Indirekte Geschwindigkeitsindikation - Altersstruktur . . . . .	100
3.2.2. Geschwindigkeitsverteilung - Geschlechtsspezifisch . . . . .	106
3.2.3. Geschwindigkeitsverteilung - Reisemotivation . . . . .	107
3.2.4. Geschwindigkeitsverteilung - Gruppengröße . . . . .	108
3.2.5. Geschwindigkeitsverteilung - Gepäckanzahl . . . . .	110
3.3. Allgemeines Bewegungsverhalten im Terminal . . . . .	116
3.4. Erhebung prozessbezogener Daten . . . . .	119
3.4.1. Ankunftsverteilung . . . . .	122
3.4.2. Check-In . . . . .	129
3.4.3. Sicherheitskontrolle . . . . .	134
3.4.4. Pass- und Bordkartenkontrolle . . . . .	136
<b>4. Anwendungen</b>	<b>139</b>
4.1. Entwicklung/Implementierung einer Anwendungsumgebung . . . . .	140
4.1.1. Entwicklung eines Software-Prototyps . . . . .	141
4.1.2. Modellimplementierung . . . . .	147
4.2. Eindimensionaler Simulationsansatz - Boarding eines Verkehrsflugzeuges . .	152
4.2.1. Modellbeschreibung . . . . .	154
4.2.2. Simulationsergebnisse . . . . .	159
4.3. Anwendungsgebiet Flughafenterminal . . . . .	168
4.3.1. Validierung der Passagierabfertigungsprozesse . . . . .	168
4.3.2. Passagierbezogene Prozessbewertung . . . . .	178
4.3.3. Abfertigungsprozesse am Flughafen Dresden (Abflug) . . . . .	189
<b>5. Schlussbetrachtungen</b>	<b>195</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>201</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>
<b>Danksagung</b>	<b>223</b>

## Kurzfassung

Mit der Entwicklung eines stochastischen Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren wird die Basis für eine virtuelle Anwendungsumgebung geschaffen, mit der die Passagierabfertigungsprozesse im Flughafenterminal und die hierfür notwendigen Infrastrukturen modelliert, implementiert, untersucht und gezielt optimiert werden können. Es werden vorhandene wissenschaftliche Modellansätze zur mikroskopischen Agentensimulation kritisch gewürdigt und Anforderungen an das zu entwickelnde Bewegungsmodell abgeleitet. Das eigens entwickelte stochastische Bewegungsmodell stellt die Erweiterung eines räumlich diskreten mikroskopischen Modells auf Basis eines zellularen Automaten dar, wobei Defizite aufgrund der verwendeten diskreten Gitterstruktur bereits auf Modellebene kompensiert werden. Zu den Erweiterungen zählen die autonome Umgebungsanalyse und die Routenplanung des Agenten, die Abbildung weitreichender Wechselwirkungen zwischen den Agenten und die Berücksichtigung von gruppendynamischen Entscheidungen. Durch die Validierung des stochastischen Bewegungsmodells anhand des Fundamentaldiagramms für Fußgänger kann gezeigt werden, dass das Modell in der Lage ist, den charakteristischen Verlauf der Geschwindigkeit in Relation zur Agentendichte quantitativ abzubilden. Auch typische, in der Realität beobachtbare Selbstorganisationseffekte können durch das Modell reproduziert werden.

Für die Anwendung des stochastischen Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal wird das Modell durch empirisch erhobene Passagierbewegungsdaten kalibriert. Die Datenerhebung erfolgt am Flughafen Dresden unter Verwendung eines entwickelten videogestützten Bewegungsverfolgungssystems und erlaubt eine gezielte Kalibrierung hinsichtlich der Passagierparameter: Geschlecht, Reismotivation (privat oder geschäftlich), Gruppengröße sowie Gepäckart und -anzahl. Für die Erstellung der virtuellen Terminalumgebung werden die Passagierabfertigungsprozesse eingehend analysiert und die Prozesszeiten der jeweiligen Abfertigungsstationen durch spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert. Hierfür stehen empirische Datenerhebungen am Flughafen Stuttgart zur Verfügung, die eine detaillierte Prozessanalyse hinsichtlich der Passagierparameter und der Prozessparameter (Erfahrung des Personals, Reaktionszeiten bei Störungen) erlauben.

Im Anschluss an die Kalibrierung des stochastischen Bewegungsmodells und die Modellierung der Passagierabfertigungsprozesse erfolgt die Entwicklung einer Anwendungsumgebung für die Implementierung des virtuellen Flughafens. Durch den modularen Aufbau

der Anwendungsumgebung ist eine effiziente Implementierung der Flughafenstrukturen (Grundriss, Flugplan, Personaleinsatz), der Abfertigungsprozesse und des stochastischen Bewegungsmodells möglich. Die Anwendungsumgebung stellt dabei einen übergeordneten Rahmen dar, durch den eine allgemeine Nutzerschnittstelle (Konfigurationsumgebung), eine grafische Ergebnisaufbereitung und die dreidimensionale Abbildung des Bewegungsverhaltens der Passagiere zur Verfügung steht.

Die Anwendung des entwickelten stochastischen Bewegungsmodells erfolgt für die Validierung der Passagierabfertigungsprozesse (Check-In und Sicherheitskontrolle), für die Entwicklung einer passagierbezogener Prozessbewertung und für die vollständige Abbildung der Terminalprozesse (Abflug) am Beispiel des Flughafens Dresden. Durch die Analyse des Einstiegsverhaltens der Passagiere in ein Verkehrsflugzeug werden die Notwendigkeit des Einsatzes stochastischer Bewegungsmodelle und das Potential mikroskopischer Modellierungsansätze verdeutlicht. Das entwickelte stochastische Bewegungsmodell kann das Passagierverhalten auch in komplexen Umgebungen umfänglich widerspiegeln und die entwickelte Anwendungsumgebung stellt einen idealen Rahmen für die Modellanwendung und -weiterentwicklung dar. Durch die anwendungsorientierten Implementierungen steht eine Vielzahl von geeigneten Detaillösungen zur Verfügung, um den zukünftigen wissenschaftlichen und praxisrelevanten Herausforderungen der Personendynamik zu begegnen.

## 1 | Methodische Konzeption

*Die Entwicklung von Modellen für die Abbildung individueller Personenbewegungen ist in den letzten 15 Jahren immer stärker in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses gerückt. Dabei reichen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Modelle von der Prognose innerstädtischer Verkehrsflüsse über Optimierungen von Wegführungen innerhalb von komplexen Gebäuden bis hin zur Abbildung spezifischer Verhaltensweisen in Notfallsituationen. Der Einsatz leistungsfähiger Rechnerarchitekturen verbunden mit der stetigen Zunahme von Geschwindigkeit und Speicherkapazität aktueller Rechner erweitert den Bereich potentieller, praktisch-relevanter Anwendungen stetig und somit auch die Nachfrage nach adäquaten Modellansätzen. Bei der Abbildung menschlicher Verhaltensweisen entstehen durch individuelle Wechselwirkungen gruppenspezifische Effekte, die entscheidende Auswirkungen auf den zeitlichen und räumlichen Verlauf der individuellen Bewegungen haben.*

Durch den Einsatz von Modellen zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Personen können bereits während der Planungs- und Auslegungsphase wesentliche Eigenschaften von Verkehrsanlagen überprüft und gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen angepasst werden. Die rechtlichen und sicherheitsrelevanten Randbedingungen finden dabei ebenso Berücksichtigung wie spezifische betriebliche Anforderungen der Anlagenbetreiber oder die unterschiedlichen Anforderungen heterogener Personengruppen. Dabei können zusätzlich die Interessen von Nutzern und Betreibern der Verkehrsanlage variieren. In Flughafenterminals können beispielsweise fünf primäre Interessensgruppen identifiziert werden: Passagiere (Begleiter, Besucher), Flughafenbetreiber, Luftfahrtgesellschaften, Konzessionäre und Aufsichtsbehörden. Die Passagiere fordern einen reibungslosen Ablauf aller notwendigen Prozeduren, der Flughafenbetreiber optimiert die verfügbaren Ressourcen und versucht seine Marktposition zu verbessern. Die Luftfahrtgesellschaften streben eine angemessene Repräsentation im Terminal an und stellen spezifische Anforderungen an die bereitgestellten Strukturen und an die Abfertigungsprozesse. Die Konzessionäre agieren gewinnorientiert wohingegen die Aufsichtsbehörden die Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen einfordern. Die Zusammenführung dieser unterschiedlichen und zum Teil sogar gegenläufigen Interessenslagen stellt eine große Herausforderung für den Flughafenbetreiber dar. Neben einem hinreichenden Verständnis über die Modellierung des Bewe-

gungsverhaltens von Personen unter Berücksichtigung von individuellen Verhaltensweisen ist somit auch eine genaue Kenntnis der prozessrelevanten Parameter notwendig.

Grundlegende Modellansätze für die Abbildung von Abläufen innerhalb von Flughafen terminals basieren auf der aggregierten Abbildung der für die Passagierabfertigung notwendigen Prozessstationen, ohne das individuelle Bewegungsverhalten der Passagiere zu berücksichtigen. Auf die Modellierung entscheidender gruppenspezifischer Effekte wird zumeist verzichtet, obwohl diese ausschlaggebend für eine nachhaltige und valide Ausgestaltung der Prozess- und Transfereinrichtungen sind. Durch die konsequente Weiterentwicklung methodischer Grundlagen, die Erhebung flughafenspezifischer Datensätze und die gezielte Kalibrierung von Modellparametern liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag, um die Defizite aggregierter Modellansätze zu kompensieren.

Da die Wechselwirkungen von Personen mit anderen Personen oder Objekten zu einer Änderung der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit führen können, müssen aus der Beobachtung der Verhaltensweisen von Personen Rückschlüsse auf geeignete Modellierungsparameter getroffen werden. Die Motivation für Richtungs- und Geschwindigkeitswahl von Personen kann jedoch nur bedingt identifiziert werden, da die zugrunde liegenden individuellen Entscheidungsfindungsprozesse zum Teil un-/unterbewusst ablaufen (*self-driven particles* [1, 2]). Interaktionen zwischen Personen treten jedoch in sehr großer Häufigkeit auf und können unter Verwendung videounterstützter Systeme analysiert werden. Durch eine statistische Datenanalyse ist somit die Überprüfung gewählter Modellannahmen möglich. Je nach Anforderung an das Verhaltensmodell besitzen die Modellparameter eine unterschiedliche Komplexität. So kann beispielsweise unter Verwendung der Warteschlangentheorie die Ausbildung von Warteschlangen bereits mit wenigen Parametern hinreichend genau beschrieben werden. Ist das Modell für den Einsatz von komplexen Entscheidungen bei der individuellen Richtungswahl unter psychischer Belastung ausgelegt, ist die Identifizierung von sensitiven und unabhängigen Parametern sehr aufwendig. Um die Ursachen individuell getroffener Bewegungsentscheidungen hinreichend genau bestimmen zu können, müssen bei komplexen Handlungsalternativen empirisch aufgezeichnete Bewegungsdaten (z. B. durch Videokameras) mit nachfolgenden Befragungen der Beteiligten zusammengeführt werden.

Neben den grundlegenden mathematischen und physikalischen Beschreibungen menschlicher Verhaltensweisen stehen die damit einhergehenden untrennbaren Effekte, die den Bereichen der Psychologie, Sozioökonomie, Verkehrswissenschaften und Sicherheitsforschung zuzuschreiben sind, im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Wesentliche Aspekte des ökonomischen und des öffentlichen Interesses sind vor allem die bedarfsgerechte Auslegung und nachhaltige Verbesserung der Verkehrsanlagen sowie die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Der Einsatz von validen (kalibrierten) Modellen zur Abbildung des individuellen Bewegungsverhaltens von Personen liefert bereits einen entscheidenden Beitrag zur angemessenen Gestaltung von Verkehrsanlagen [3]. Die Anpassung und Erwei-

terung der Modellparameter an die jeweilige Zielstellung sowie die Adaptierbarkeit der Modelle bezüglich der zu untersuchenden Szenarien stellen einen großen Vorteil modellgetriebener Untersuchungen gegenüber praktischen Versuchen dar.

## 1.1. Motivation

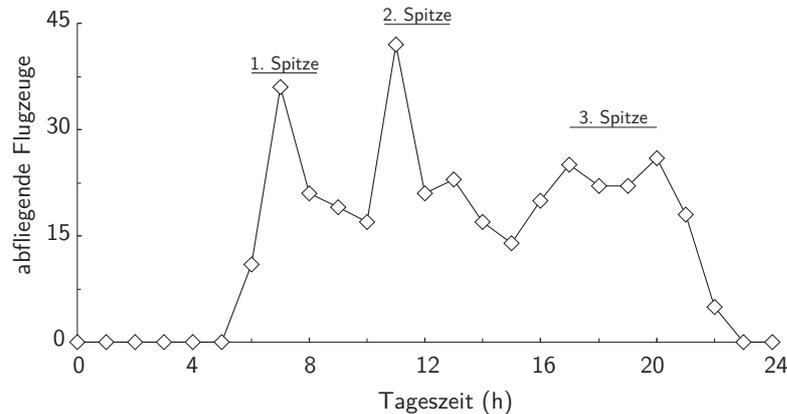
Bei der bedarfsgerechten Gestaltung von Einrichtungen innerhalb von Flughafenterminals finden zumeist prozessorientierte Modelle Anwendung, die aggregierte Aussagen über die jeweiligen Prozessstationen (z. B. Durchfluss oder Auslastung) liefern. Die Anforderungen des Passagiers als primärer Nutzer der jeweiligen Einrichtung sind hier zumeist von sekundärem Interesse. Die individuelle Wahrnehmung und Reaktion des Passagiers stellt jedoch ein entscheidendes Kriterium für die bedarfsgerechte Gestaltung dar und muss bei der Ausgestaltung der Prozessstationen zwingend berücksichtigt werden. Die Prozesseinrichtungen werden vom Passagier abhängig vom individuellen Kenntnisstand (z. B. über die Struktur des Gebäudes oder über den Ablauf der notwendigen Abfertigungsprozesse) und abhängig von der Reisemotivation (geschäftlich oder privat) unterschiedlich genutzt.

Dabei variieren die Verhaltensmuster der Passagiere beginnend mit unterschiedlichen Ankunftszeiten am Flughafen, über die Orientierung innerhalb der komplexen Terminalstrukturen bis hin zur Nutzung von Serviceeinrichtungen (z. B. Lounge oder Einkaufsmöglichkeiten). Neben den passagierseitigen Randbedingungen müssen auch struktur- und prozessbedingte Einflussgrößen berücksichtigt werden. Durch die flugplanorientierte Nutzung des Flughafenterminals werden die für die Abfertigung notwendigen Prozessstrukturen zeitlich ungleich ausgelastet (*peak hours*). Außerhalb dieser Spitzenzeiten werden die primär für die Abfertigung vorhandenen Terminalflächen jedoch nur unzureichend ausgenutzt. Der Flughafenbetreiber ist in seinem Geschäftsmodell somit angehalten, zusätzliche Nutzungskonzepte für das Terminal zu berücksichtigen (z. B. Gastronomie).

Die zeitlich ungleiche Belastung des Terminals ist immanent mit dem System Luftverkehr verknüpft. Anhand eines realen Flugplans des Flughafens Düsseldorf (359 Abflüge am 22. Oktober 2009) können hierfür mehrere signifikante Einflussfaktoren identifiziert werden. Die in Abbildung 1.1 dargestellten Abflüge je Stunde zeigen, dass zu Spitzenzeiten (11 Uhr) 42 Flugzeuge je Stunde abfliegen und sich dieser Wert um 15 Uhr bis auf 17 Flugzeuge reduziert.

Die erste Abflugspitze entsteht durch einschränkende gesetzliche Regularien zur Verminderung von nächtlichen Lärmemissionen (Nachtflugbeschränkung/-verbot). Dabei ergeben sich die Beschränkungen aus der Art des Verkehrs, der Lärmklassifizierung des Flugzeuges (nach ICAO Annex 16, Band 1) und des Flugzeugantriebes (Strahltriebwerk oder Propeller). Aus diesem Grund starten die meisten regulären Flüge frühestens ab 6 Uhr und spätestens 22 Uhr. Als Auswirkung dieser nächtlichen Verkehrseinschränkungen sind

am Flughafen Düsseldorf in einem Zeitraum von 10 Minuten (5:50-6:00 Uhr) 11 Starts mit einer maximalen Transportkapazität<sup>1</sup> von ungefähr 2300 Passagieren geplant. Wird der Zeitraum um 60 Minuten erweitert (5:50-7:00 Uhr) starten 47 Flüge mit einer maximal erreichbaren Transportkapazität von ungefähr 7000 Passagieren. Dabei werden zum großen Teil typische Urlaubsregionen wie Barcelona, Palma (Mallorca), Hurghada, Ibiza oder Rhodos angefliegen. Direkte Städteverbindungen (*point to point* Konzept) nach Wien, Birmingham, Amsterdam oder Kopenhagen finden in diesem Zeitraum ebenfalls statt, wie Zubringer-Flüge (*hub and spoke* Konzept) zu den deutschen zentralen Drehkreuzen Frankfurt und München. Aus Sicht des Passagiers bedeutet ein früher Start des Flugs die Möglichkeit seinen Zielort ebenfalls frühzeitig zu erreichen und den Reisetag effizient nutzen zu können. Auch die Airline kann von frühen Starts profitieren, da frühe Abflüge (4-6 Uhr) zwei komplette Umläufe zu den Kanaren oder sogar drei Umläufe zu den Balearen erlauben [4].



**Abbildung 1.1:** Stundenbasierte Zusammenfassung der Abflüge am Flughafen Düsseldorf, Flugplan vom 22.10.2009 .

Nach der Abflugspitze am frühen Morgen folgen weitere Abflugspitzen zwischen 11 - 13 Uhr und zwischen 17 - 20 Uhr. Die zweite Abflugspitze entsteht durch den transatlantischen Verkehr (z. B. nach Chicago, Miami oder New York), sowie durch den zweiten Umlauf zu den touristischen Destinationen. Der dritte Umlauf und Flüge zu östlich gelegenen Destinationen (z. B. Dubai) sind ursächlich für die Flüge in der dritten Spitze. Im Gegensatz zu kleinen und mittleren Verkehrsflughäfen sind die Ankunftsspitzen an den Drehkreuzen viel stärker ausgeprägt. Die Passagiere kommen nicht nur landseitig am Terminal an (Originärpassagiere), sondern sie erreichen den Hub durch Zubringerflüge (Transferpassagiere) auch luftseitig. Der Hub fungiert somit als ein zentraler Luftverkehrsknotenpunkt in dem der (interkontinentale) Verkehr gebündelt, koordiniert und verteilt wird. Der Anteil der Transferpassagiere liegt in München bei 37% [Flughafen München,

<sup>1</sup> Berücksichtigung einer durchschnittlichen Passagieranzahl auf Basis des eingesetzten Flugzeugtyps, z. B. Airbus A-320 mit 170 Passagieren

2009] und in Frankfurt bei 53% [Flughafen Frankfurt, 2007]. Die schrittweise und effiziente Zuführung sowie die Zusammenfassung der Passagiere in einem Flugzeug (bis zu 550 Passagiere im Airbus-A380) sind gerade bei Drehkreuzen von hoher Bedeutung.

Durch die grundsätzlich mit dem Luftverkehr verbundene ungleichmäßige Auslastung der passagierbezogenen Abfertigungskapazitäten im Terminal müssen für die spezifischen Auslastungssituationen angemessene Planungs- und Steuerungskonzepte für die Passagierabfertigung entwickelt werden. Bei der Konzeptentwicklung ist der Fokus sowohl auf die einzelnen Prozessstationen als auch auf die spezifischen Passagiermerkmale und -verhaltensweisen zu richten. Während die Abfertigungsprozesse hauptsächlich ökonomischen Randbedingungen folgen und durch betriebliche sowie rechtliche Vorgaben bestimmt sind, können die individuellen Verhaltensweisen der Passagiere auch von qualitativen Faktoren wie z. B. Komfort oder Serviceempfinden beeinflusst werden. Nicht zuletzt stellen die spezifischen Bedürfnisse des Passagiers auch vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft eine große Herausforderung an die Gestaltung adäquater Strukturen innerhalb des Flughafenterminals dar (z. B. Zufahrten für Rollstühle, erhöhter Platzbedarf, Gepäcktransport oder Ausgestaltung von Leitsystemen).

## 1.2. Modell und Simulation

Für die bedarfsgerechte Auslegung des Terminals müssen die individuell unterschiedlichen Anforderungen und das Bewegungsverhalten der Passagieren geeignet beschrieben und in ein (mathematisches) Modell überführt werden. Die Modellumsetzung (Implementierung) innerhalb einer Simulationsumgebung erlaubt dann die gezielte Untersuchung verschiedener Szenarien zur Identifikation von Optimierungspotentialen. In diesem Zusammenhang werden die Begriffe Modell und Simulation häufig synonym oder in Kombination als *Simulationsmodell* gebraucht. Die Simulation stellt jedoch nur eine Implementierung des Modells (ausführbares Modell) dar. In den nächsten beiden Abschnitten werden die allgemeinen Schritte bei der Modellierung beschrieben und diese eindeutig von der (computerbasierten) Simulation getrennt.

### 1.2.1. Modellierung

Der allgemeine Prozess der Modellierung beginnt mit der problemorientierten Herangehensweise. Das Modell erfüllt dabei keinen Selbstzweck, sondern wird für die Lösung eines (komplexen) Zusammenhangs herangezogen. Bei geänderter Zielstellung ist aus diesem Grund auch zu prüfen, ob die (einschränkenden) Modellparameter eine Übertragung des Modellansatzes erlauben. Der Begriff Modell ist dabei durch drei wesentliche Merkmale geprägt [5].

- **Abbildungsmerkmal:**

„Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale“.

- **Verkürzungsmerkmal:**

„Modelle erfassen im allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant erscheinen.“

- **Pragmatisches Merkmal:**

„Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion“ innerhalb bestimmter Zeitabstände und unter den vorgegebenen Modellrestriktionen.

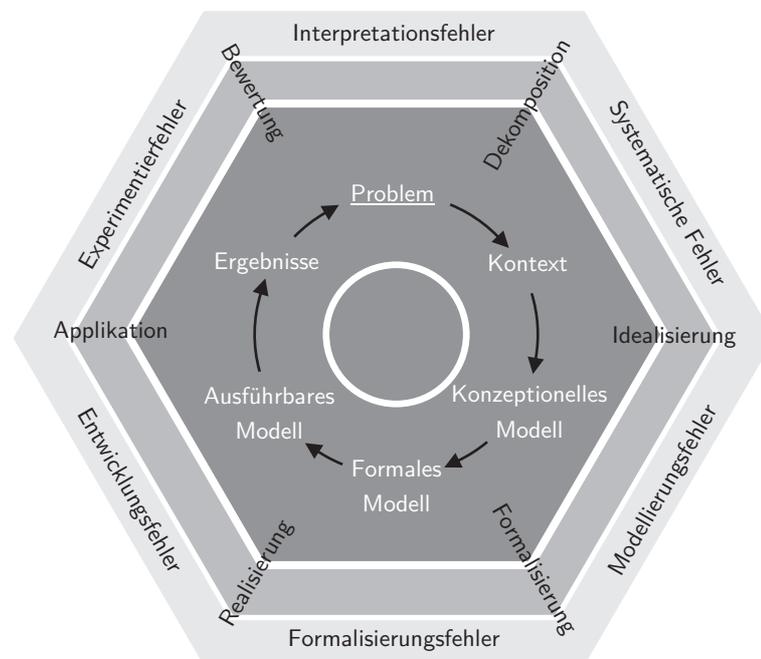
Modelle sind demzufolge selektiv, zweckorientiert und notwendigerweise approximativ. Folglich müssen die Modelle dem Referenzsystem auch nur bedingt vollständig entsprechen. Diese *schwache* Äquivalenz wird  $\epsilon$ -Morphismus genannt [6, 7]. Das Modell beschreibt demzufolge einen gewählten Ausschnitt der Realität unter Verwendung eines Abbildes, um Erkenntnisse bei der Modellanalyse auf die Wirklichkeit übertragen zu können. Bei der Erstellung eines wissenschaftlichen Modells steht die Reduktion der Komplexität im Vordergrund. Es erfolgt eine detaillierte, zweckbezogene Beschreibung des jeweiligen Ausschnitts, mit dem Ziel, neue Erkenntnisse bei der Modellanwendung zu generieren [8].

Bei den einzelnen Prozessen der Modellerstellung können Fehler und Störungen auftreten. Ein Fehler stellt die unzulässige Abweichung einer oder mehrerer Eigenschaften dar, welche die Unterscheidung und Beurteilung von Betrachtungseinheiten ermöglichen [9]. Während das Nichterfüllen einer funktionalen Forderung als Fehler zu bezeichnen ist, stellt eine Störung die fehlende, fehlerhafte oder unvollständige Erfüllung einer geforderten Funktion dar [10]. Im Kontext der Modellentwicklung können die Begriffe Fehler und Störung somit synonym verwendet werden. Es bleibt aber zu beachten, dass die gewählten Begriffe in anderen Zusammenhängen abweichenden Definitionen folgen können. So ist nach [11] eine Störung zwar durch die Nichterfüllung einer Funktion charakterisiert, welche das System zwar beeinträchtigt, das System aber „nach begrenzter Zeit wieder zum korrekten Wirken“ zurückkehrt.

Für die weitgehende Vermeidung von Fehlern und Störungen ist es notwendig, die jeweiligen Prozesse durch standardisierte Vorgehensweisen abzusichern. Auf der Ebene eines ausführbaren Modells (vgl. Abbildung 1.2) kann dies zum Beispiel durch eine automatische Syntax-Kontrolle oder die Verwendung von bereits getesteten Prozeduren (Bausteinen) erreicht werden. Auch die frühzeitige Integration der Modelle in eine Testumgebung, die grafische Aufarbeitung der Zwischenergebnisse (*face validation*) sowie die parallele Prototypenentwicklung sind geeignete Maßnahmen, um mögliche Fehler in ihrer Entstehungsphase einzugrenzen und zu korrigieren. Im Gegensatz zur frühzeitigen Fehlererkennung

ist der Aufwand für die Fehlerbehandlung am Ende des Modellentwicklungsprozesses wesentlich höher. Durch system- und modellbedingte Wechselwirkungen ist die nachträgliche Identifizierung des Fehlerursprungs innerhalb des Modellentwicklungsprozesses nur durch zeitintensive Rückverfolgungen möglich. Auch können Änderungen in einem vorgelagerten Prozess bereits bestehende, auf die jeweilige Modellkomponente aufbauende Annahmen und Umsetzungen nachhaltig beeinflussen.

Während des Prozesses der Dekomposition wird das reale System abstrahiert und durch ein generalisiertes Modell beschrieben. Alle Prozesse, die nicht im Problemkontext stehen, werden hierbei vernachlässigt. Ein System ist „als Menge von Elementen [...], die miteinander in wechselseitiger Beziehung stehen“ definiert [12]. Aus der funktionalen Sichtweise des Systembegriffes ergibt sich zusätzlich die Forderung, dass „eine Menge von Elementen, die miteinander durch Beziehungen verbunden sind [...] gemeinsam einen bestimmten Zweck zu erfüllen haben.“ [13]. Ein System besteht somit formal aus einer Menge von Elementen und Relationen [14], wobei die Elemente eines Systems die primären, zweckdienlichen Einzelobjekte darstellen [15]. Das für die Dekomposition benutzte System kann somit (in Übereinstimmung mit [5]) ebenfalls ein Modell sein, welches für eine detaillierte Untersuchung weiter abstrahiert werden muss. In Abbildung 1.2 ist die allgemeine Vorgehensweise bei der Erstellung eines Modells dargelegt. Die Entwicklung eines Modells erfolgt bedarfsgerecht, problem- und kontextorientiert.



**Abbildung 1.2:** Allgemeine Vorgehensweise bei der Modellerstellung. [vgl. 16, 17]

Eine fehlerhafte Kontextanalyse des Problems (systemanalytischer Fehler durch z. B. falsche Systemgrenzen) kann eine unzulängliche Problembeschreibung zur Folge haben. Der Übergang zum konzeptionellen Modell erfolgt durch den Prozess der Idealisierung, der Berücksichtigung der essentiellen Zusammenhänge innerhalb des gewählten Ausschnittes der Realität [18–20]. Das konzeptionelle Modell ist unter Umständen auch nur implizit („im Kopf des Modellierers“) vorhanden [21]. Bei der Idealisierung können Modellierungsfehler vermieden werden, wenn Fehlerabschätzungsmodelle die Auswirkung/Vernachlässigung von (scheinbar) nicht-relevanten Parametern eingrenzen können. Die Formalisierung erlaubt die Modellbeschreibung unter Verwendung von standardisierten (formalen) Elementen. Fehler treten auf, wenn der gewählte Formalismus nicht geeignet ist das Modell hinreichend zu beschreiben (z. B. unzureichende Syntax).

In der Realisierungsphase wird das formale Modell in ein ausführbares Modell (Implementierung, Software) transformiert, wobei eine Übertragung des formalen Modells in eine Programmiersprache erfolgt. Typischerweise treten hierbei Entwicklungsfehler in Form von Laufzeitfehlern oder Interoperationsproblemen auf. Mit Abschluss der Realisierung steht ein Prototyp (Applikation) zur Verfügung, durch den unter Verwendung zuvor festgelegte Testverfahren die korrekte Modellimplementierung nachgewiesen werden muss. Eine hinreichend genaue Beschreibung, der zur Problemlösung durchzuführenden Untersuchungen kann bereits im Vorfeld die Anzahl möglicher Experimentierfehler minimieren. Anhand von definierten Bewertungskriterien werden die Ergebnisse letztendlich kontextbezogen interpretiert. Aus der Identifikation von Optimierungspotentialen während der eingehenden Prozessanalyse werden effiziente Problemlösungen generiert und wesentliche Erkenntnisse kritisch bewertet. Auftretende Fehler können zu den nachfolgenden Ergebnissen führen:

- **Fehler 1. Art:**

Die richtigen und dem Problem angemessenen Ergebnisse des Modells werden irrtümlich als Lösung des Problems abgelehnt. Ein *echter* Effekt wird übersehen.

- **Fehler 2. Art:**

Die falschen oder nicht angemessenen Ergebnisse des Modells werden irrtümlich als Lösung des Problems angesehen.

Der beschriebene Prozess der Modellentwicklung ist nicht nur als Gesamttablauf zu verstehen, sondern es ist bereits in jedem Teilabschnitt eine Verifikation bezüglich des vorherigen Abschnittes durchzuführen (rückgekoppelter Prozess) [22]. Erst mit der korrekten Überführung der getroffenen Annahmen und Beschreibungsmerkmale in den jeweils nachfolgenden Modellierungsabschnitt schreitet der Modellierungsgrad voran. Durch die abschließende Validierung der erzielten Simulationsergebnisse und die Bewertung der Ergebnisse bezüglich der Lösung des gestellten Problems kann eine Aussage über die Qualität des gesamten Modellierungsprozesses getroffen werden.

Die Modellierung des individuellen Bewegungsverhaltens der Passagiere im Terminal kann durch eine abgestufte Detaillierung bei der Modellentwicklung erfolgen. Je nach Aufgabenstellung liefern die jeweilige Modelle Ergebnisse im geforderten Umfang und der zuvor vereinbarten Genauigkeit. Eine Klassifizierung der Modelle mit abnehmendem Detaillierungsgrad kann wie folgt geschehen [23, 24] :

- **mikroskopisch (hoher Detailgrad) :**

Berücksichtigung des zeitlichen und räumlichen Verhaltens aller Beteiligten und der individuellen Wechselwirkungen untereinander.

- **mesoskopisch (mittlerer Detailgrad) :**

Keine explizite Modellierung des zeitlichen und räumlichen Verhaltens der Beteiligten, es werden nur aggregierte Merkmale verwendet (z. B. stochastische Verteilungsannahmen). Die Darstellung der Beteiligten erfolgt durch repräsentative Gruppen.

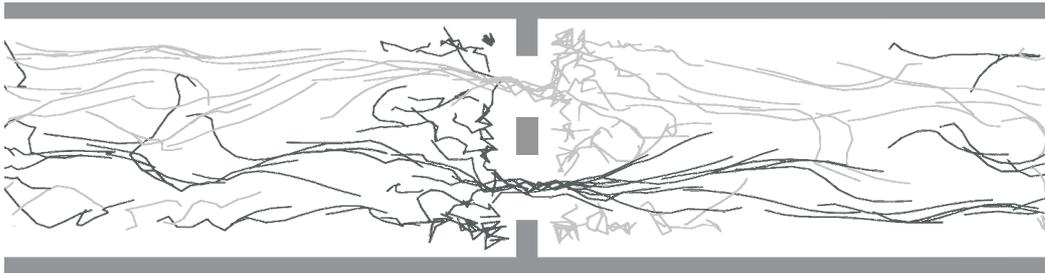
- **makroskopisch (geringer Detailgrad) :**

Alle Beteiligten werden durch eine Flussdarstellung zusammengefasst, ohne dass die einzelnen Beteiligten direkt beschrieben werden. Typische Beschreibungsparameter sind Volumenstrom, Dichte und Geschwindigkeit.

Wenn individuelle Funktionsmerkmale bei der Modellierung des Gesamtprozesses essentielle Bedeutung besitzen, ist eine mikroskopische Modelldifferenzierung notwendig. Hauptanwendungsgebiete für makroskopische Modelle sind Bereiche, in denen das Verhalten der Personen den übergeordneten aggregierten Modellannahmen entspricht (z. B. Warteschlangen oder gleichgerichtete Verkehrsströme) [25–27]. Die Entstehung von emergenten Effekten (Selbstorganisation, Kapitel 1.3.1 (S. 14ff)) können mit makroskopischen Ansätzen nicht erklärt werden, da die hierfür notwendigen Beschreibungen der Interaktionen von Individuen untereinander und der Interaktionen mit der Umgebung nicht Modellbestandteil sind. Die Effekte der Selbstorganisation stellen jedoch ein entscheidendes Kriterium für die Abbildung des individuellen Bewegungsverhaltens dar [vgl. 3, 28–32]. Für die detaillierte Beschreibung von individuellen Verhaltensweisen müssen somit mikroskopische Modelle verwendet werden, wobei jede Person als einzelnes Individuum abgebildet wird und unterschiedliche Eigenschaften besitzt. Diese individuellen Eigenschaften weisen eine große Bandbreite auf; beginnend bei der Abbildung von unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten (in Abhängigkeit von Alter, Gepäck oder Untergrundbeschaffenheit) und bis hin zu komplexen individuellen Strategieentscheidungen in potentiell gefährlichen Situationen. Der individuelle Handlungsspielraum reicht hierbei vom Verhindern unmittelbarer Kollisionen durch Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen, über mittelfristige Planungen zur Umgehung von Menschenansammlungen bis hin zur langfristigen Routenplanung unter nutzenoptimalem Ressourceneinsatz. Die Modellierung der Interaktionen erfolgt im Allgemeinen durch die Definition von Anziehungs- und Abstoßungspotentialen zwischen den Personen [2], wobei eine Person versucht, die Anzahl notwendiger Inter-

aktionen (Reibung) zu minimieren. Interaktionen resultieren zumeist in Umwegen und in Verspätungen (systematische Ineffizienz [33]). Eine analytische Lösung für die mikroskopische Modellierung des Bewegungsverhaltens wurde von Henderson [34] und Helbing [35] vorgestellt. Henderson beschreibt das Verhalten von Personen unter Verwendung von gaskinetischen und fluiddynamischen Zusammenhängen. Helbing griff diese Methodik auf, erweiterte sie und stellte erste Anwendungen in den Mittelpunkt der wissenschaftlichen Forschung.

Die sehr aufwendige analytische und numerische Behandlung von Modellen mit einem hohen Detaillierungsgrad erfordert und unterstützt die Entwicklung von effizienten Simulationsansätzen („Innovationsdruck“). Simulative Fallstudien unter Verwendung von mikroskopischen Modellen zeigen die Leistungsfähigkeit mikroskopischer Modellansätze auf [vgl. 36]. In der folgenden Abbildung 1.3 ist dargestellt, wie aus der einfachen Beschreibung des individuellen Bewegungsverhaltens plötzlich übergeordnete, selbstorganisierende Strukturen entstehen (z. B. Bahnbildung).



**Abbildung 1.3:** Die Verwendung von zwei Durchgängen führt zur (effizienten) Aufteilung von entgegen gerichteten Personenströmen [37].

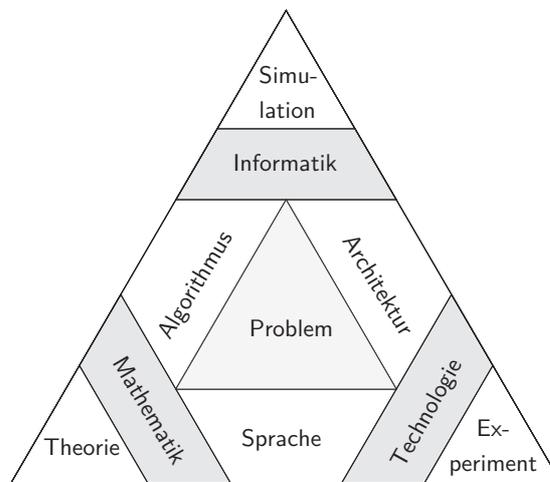
Beginnend mit ersten Ansätzen zur Modellierung menschlicher Verhaltensweisen durch [38] sind eine große Anzahl unterschiedlicher Modelle entwickelt worden. Übersichten zu den jeweiligen Modellen liefern beispielsweise [31] oder [39]. Für die Einordnung der Entwicklung eines Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren werden die Grundlagen von drei relevanten Modellansätzen im nachfolgenden Kapitel 1.3 (S. 13) eingehender vorgestellt (Modell der sozialen Kräfte, Modell auf Basis eines zellularen Automaten und Modell der diskreten Entscheidungen).

### 1.2.2. Computerbasierte Simulation

Die Analyse von komplexen dynamischen Systemen erfolgt durch den Einsatz von Simulationen, bei denen durch die Abbildung von Szenarien die Sensitivität und die Reichweite der Modellparameter validiert werden kann. Durch den Einsatz von computerbasierter Simulationsmethoden und der Analyse von verschiedenen Szenarien können Modelle besser

verstanden und die Wechselwirkungen der Modellparameter intensiver studiert werden. Gerade für dynamische Systeme, die sich zumeist einer analytischen Lösung entziehen, stellt die Simulation ein probates Werkzeug dar [40, 41]. Wie schon im vorangegangenen Kapitel erwähnt, sind die Begriffe Modell und Simulation klar von einander zu trennen. Das Modell stellt als zweckorientierte und approximative Abbildung einen Ausschnittes der Realität dar und die Simulation ist die Anwendung des Modells zum methodischen Erkenntnisgewinn [7, 42]. Kann ein bestimmtes diskretes System vollständig modelliert und simuliert werden, handelt es sich um eine Emulation und nicht mehr nur um eine Simulation.

Die zunehmende problemorientierte Herangehensweise in der (wissenschaftlichen) Forschung fördert den systematischen Einsatz von Computern als *problem solver* [43]. Die Simulation kann somit als eine zusätzliche und eigenständige wissenschaftliche Aktivität zwischen theoretischer und experimenteller Forschung angesehen werden<sup>2</sup>. Die Stellung als dritter wissenschaftlicher methodischer Ansatz<sup>3</sup> wird in Abbildung 1.4 deutlich. Aus mathematischer Modellierung, Computersimulation und Visualisierung ist somit eine strategische Schlüsseltechnologie entstanden: wissenschaftliches Rechnen (*Computational Science and Engineering* [vgl. 46]).



**Abbildung 1.4:** Dreieck der wissenschaftlichen Methoden [45].

Erst durch den Einsatz von Simulationen wird es möglich, Experimente und Testläufe

<sup>2</sup> „Computer simulation provides [...] a qualitatively new and different methodology for the physical sciences [...] This methodology lies somewhere intermediate between traditional theoretical physical science, and its empirical methods of experimentation and observation.“ [44]

<sup>3</sup> „During the past decades, modelling and computer simulation has grown and established itself as the third category of scientific methodology, more comprehensively identified as Computational Science and Engineering. This innovative discipline fundamentally supports and supplements theory and experiment, as the two traditional categories of scientific investigation, in a qualitative and quantitative manner with integrating these into the methodological tripod of science and engineering. Its main instrument is the supercomputer; its primary technique is computer simulation.“ [45]

durchzuführen, die entweder zu gefährlich, zu teuer, unwiederholbar oder praktisch unmöglich sind [47, 48]. Als weitere Gründe für die Verwendung von Simulationen gelten die Störungsfreiheit und die Beobachtbarkeit der experimentellen Abläufe [40]. Die Analyse und Optimierung von real existierenden Systemen kann dabei simulativ an einem geeigneten Modell erfolgen, ohne Eingriffe in den laufenden Betrieb vornehmen zu müssen. Durch die Validierung von Teilen des Systems werden die Ergebnisse sukzessive in das reale System übertragen. Reale Systeme können zum Teil nur bedingt beobachtet werden, da Abläufe z. B. einen zu kleinen/großen räumlichen oder zeitlichen Rahmen besitzen können. Diese Begrenzung spielt bei Einsatz von Simulationen zumeist keine Rolle. Jedoch muss die gewählte die Versuchskonstellation auch realen Randbedingungen folgen<sup>4</sup>.

Der Einsatz von Computern erlaubt die Verwendung einer großen Bandbreite von Eingangsparametern und die Analyse von umfangreichen und detaillierten Ergebnisdatsätzen<sup>5</sup>. Auf der Basis der Daten könnten dann (neue) Gesetzmäßigkeiten oder Verhaltensmuster abgeleitet werden. Die Bedeutung von hardwareseitigen Begrenzungen (z. B. Ausführungsgeschwindigkeit oder Speicherkapazität) nimmt durch die fortlaufende technische Entwicklung immer mehr ab. Wenn komplexe dynamische Systeme durch Modelle hinreichend genau beschrieben sind und durch den Einsatz von Simulationen die Validität der Modelle nachgewiesen wird, können fast beliebig genaue Parameterbestimmungen innerhalb der Simulationsumgebung stattfinden. Obwohl die Entwicklung von leistungsfähiger Hardware und effizienten Simulatoren beständig voranschreitet, ist die Qualität der erreichbaren Ergebnisse entscheidend von den zugrunde gelegten Theorien und Modellen abhängig. Gerade komplexe, dynamische (Natur-) Phänomene oder soziale Prozesse und Verhaltensweisen lassen sich nur bedingt formalisieren, simulieren, vorhersagen und somit kontrollieren [7, 51].

Der Aufbau einer Simulationsumgebung muss sicherstellen, dass alle Modellparameter und funktionalen Zusammenhänge in vollem Umfang abgebildet werden (Verifikation). Unter Verwendung der verifizierten Simulationsumgebung wird in einem nächsten Schritt die Kalibrierung der Modellparameter vorgenommen. Hierbei werden die Ergebnisse der simulierten Szenarien mit realen Beobachtungen verglichen und durch eine Anpassung der Modellparameter (Minimierung des Abbildungsfehlers) angeglichen (Validierung). Ebenfalls ist bei der Modellanalyse kritisch zu überprüfen, ob die gewählten Parameter tatsächlich verantwortlich für das beobachtete Verhalten sind. Modelle bei „denen Dutzende von Parametern abgestimmt werden, [können] fast jedes beliebige Verhalten hervorzu-

---

<sup>4</sup> „These experiments will of course be performed not with any physical apparatus, but theoretically.“ [49]

<sup>5</sup> „Variables such as temperature, pressure, humidity, and wind velocity are evaluated at thousands of points by the supercomputer as it simulates the development of a storm, for example. Such data, which far exceed anything that could be gained from launching a fleet of weather balloons, reveals intimate details of what is going on in the storm cloud.“ [50]

bern. Ihr wahrer Wert liegt darin, dass sie wertvolle Hinweise geben, in welche Richtung Wissenschaftler in der Natur weiterforschen sollen“ [52]. Die unreflektierte Nutzung von computerbasierten Simulationen führt ohne ein weitreichendes Modellverständnis oft zur Verwendung von so genannten Korrekturparametern, um eine synthetische Anpassung der simulativ erzielten Ergebnisse an reale Beobachtungen zu erreichen. Eine fundierte wissenschaftliche Begründung für diese Parameter erfolgt in vielen Fällen jedoch nicht.

### 1.3. Modellansätze zur Abbildung individueller Verhaltensweisen

Die Beschreibung menschlicher Verhaltensweisen durch mathematische Modelle erlaubt ein tiefergehendes Verständnis komplexer Zusammenhänge. Je nach Einsatzgebiet und Funktionsumfang der Anwendung stehen bei der Modellierung Aspekte der Physik, Soziologie, Ökonomie oder auch der Psychologie im Fokus. Dadurch begründet sich die Entwicklung unterschiedlicher Modelle primär in den zugrunde liegenden Modellanalogien. Hydrodynamische Modelle vergleichen das Verhalten von Personen mit der Bewegung von Fluiden, was unter bestimmten Bedingungen zu guten Übereinstimmungen mit beobachteten menschlichen Verhaltensweisen führt. Jedoch sind mit diesem aggregierten Modellansatz spezifische Personenverhaltensmuster (z. B. plötzliches Stehenbleiben oder Bewegungen entgegen dem allgemeinen Personenstrom) und die daraus resultierenden Selbstorganisationseffekte nicht zu erklären. Aber gerade die Selbstorganisation zwischen den Personen stellt die entscheidende Eigenschaft bei der Abbildung menschlichen Verhaltens dar [53]. Nicht übergeordnete Systemregeln, sondern die individuellen Wechselwirkungen der Personen untereinander führen zur Selbstorganisation (z. B. Bahnenbildung, Abbildung 1.5) und kennzeichnen somit das menschliche Bewegungsverhalten.

Das Bewegungsverhalten von Personen wurde zu Beginn der wissenschaftlichen Auseinandersetzung durch empirische Methoden vorangetrieben, wobei die Beobachtung der individuellen Bewegungen sowie die Analyse von Fotografien und Filmmaterial im Vordergrund standen [38, 54, 55]. Das Ziel der Analysen variiert dabei zwischen dem Entwurf von Service-Level Konzepten [25, 56, 57], der Erstellung von Design-Grundlagen und die Optimierung von Fußgängerverkehrsanlagen [3, 37, 58–60] sowie der Entwicklung von Planungs-/Gestaltungsrichtlinien [26, 61–64]. Während zu Beginn die wissenschaftlichen Methoden auf Regressionsanalysen basierten, nahm die Komplexität der Modellansätze kontinuierlich zu (z.B. Warteschlangen-, Übergangsmatrixmodelle oder stochastische Ansätze). Die im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Selbstorganisationseffekte können jedoch nicht mit diesen Modellen abgebildet werden. Erst die Modellierung des einzelnen Individuums und die Beschreibung seiner Interaktionen überwindet dieses signifikante Modelldefizit [2, 65–67]. Aktuelle empirische Studien liefern weitergehende Erkenntnisse [3, 30, 31, 68–70] und erlauben somit eine zielgerichtete Validierung sowie die Neu-

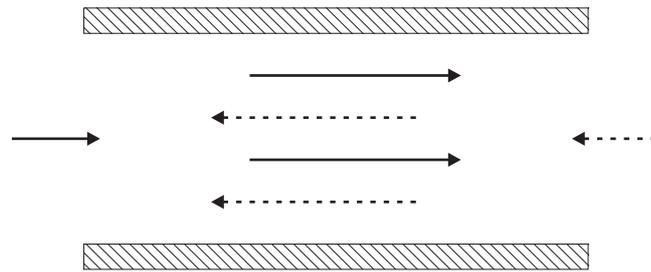
und Weiterentwicklung von Modellen zur Beschreibung des individuellen Bewegungsverhaltens.

### 1.3.1. Kollektive Phänomene

Das Verhalten von Personen folgt einer komplexen Dynamik, die durch individuelle Entscheidungen der teilnehmenden Akteure hervorgerufen wird. Die Entscheidungen reichen von operationalen (sehr kurzreichweitigen) Entscheidungen bis hin zu weit reichenden strategisch/taktischen Entscheidungen. Obwohl individuelle Entscheidungen sehr häufig nur auf grundlegenden Vermeidungsstrategien beruhen (z. B. Kollisions- und Reibungsminimierung oder Nutzenmaximierung), entstehen übergeordnete kollektive Strukturen. Das Auftreten kollektiver Verhaltensweisen kann allgemein als spontane Erhöhung der Ordnung eines Systems verstanden werden [71, 72]. *Spontan* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Erhöhung der Ordnung nicht auf einen externen Eingriff zurückzuführen ist, sondern dass Prozesse innerhalb des Systems ursächlich für das Verhalten sind [73]. Kollektive Phänomene bei der Betrachtung von menschlichen Verhaltensweisen werden auch als Selbstorganisationseffekte oder als Gruppenverhalten bezeichnet. Selbstorganisation ist ein irreversibler, nicht deterministischer Prozess, „der durch das kooperative Wirken von Teilsystemen zu komplexen Strukturen des Gesamtsystems führt“ [74], wobei die scheinbar global koordinierten Verhaltensweisen in der Regel durch einfache lokale Interaktionsregeln entstehen [75–78]. Die fehlende zentrale Steuerung wird hierbei nur durch individuelle Verhaltensregeln ersetzt, die die Reaktion des Individuums auf seine unmittelbare Umgebung beschreiben. Da die strukturbildenden Prozesse nur auf wenige wesentliche Merkmale der beteiligten Elemente zurückgeführt werden können [vgl. 79, 80], sind detaillierte Untersuchungen des Bewegungsverhaltens von einzelnen Personen notwendig.

Häufig beobachtete kollektive Phänomene sind Bahnenbildungen (Abbildung 1.5), die Oszillation an Engstellen (Abbildung 1.6), die Ausbildung von Kreisverkehren an Kreuzungen, die sogenannten *faster-is-slower* und *freezing-by-heating* Effekte [53, 81] sowie die Entstehung von streifenähnlichen Strukturen in Kreuzungsbereichen (Abbildung 1.7), bei denen lokal begrenzte Zonen durch die Ausprägung gleicher Bewegungsrichtungen gekennzeichnet sind [82]. Die Effekte können eine unterschiedliche zeitliche Stabilität aufweisen. Abhängig von Personenkonstellationen und räumlichen Ausprägungen können bereits kleine Störungen die Strukturen vollständig auflösen. Auf der anderen Seite werden gewünschte Effekte zumeist durch einfache bauliche Änderungen erst ermöglicht oder stabilisiert. Eine fundamentale Beobachtung kollektiver Verhaltensweisen stellt die Entstehung von Bahnen bei entgegenkommenden Personengruppen dar (Abbildung 1.5).

Durch lokale Kollisionsvermeidungsstrategien entwickelt sich eine für alle Personen verbesserte Situation. Es wirken dabei primär zwei lokale Effekte. Auf der einen Seite versucht eine Person durch gezieltes Ausweichen mögliche Zusammenstöße zu vermeiden, auf der



**Abbildung 1.5:** Bahnenbildung bei entgegengerichteten Personenströmen in einem Korridor [2].

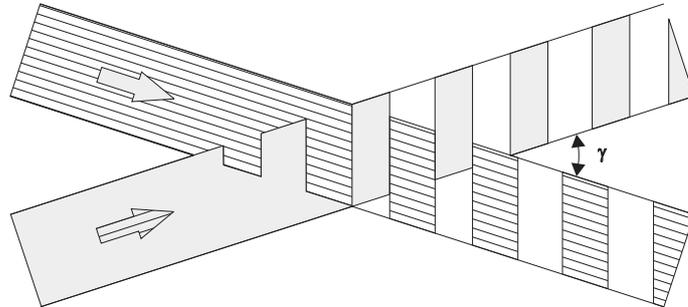
anderen Seite profitiert sie von vorangehenden Personen, da diese entgegenkommende Personen bereits verdrängt haben können. Folgt die Person dem Pfad der vorangehenden Person, reduzieren sich ihre Wechselwirkungen somit erheblich. Eine effiziente Stabilisierung der Bahnenbildung ist bereits durch eine einfache bauliche Trennung der unterschiedlichen Personenströme möglich (z. B. durch Bankreihen oder Blumenrabatten). In Abbildung 1.6 ist ein Oszillationseffekt dargestellt, der an Engstellen mit entgegenkommenden Personenströmen auftreten kann. Hierbei passieren kleinere Gruppen wechselseitig einen engen Durchgang.



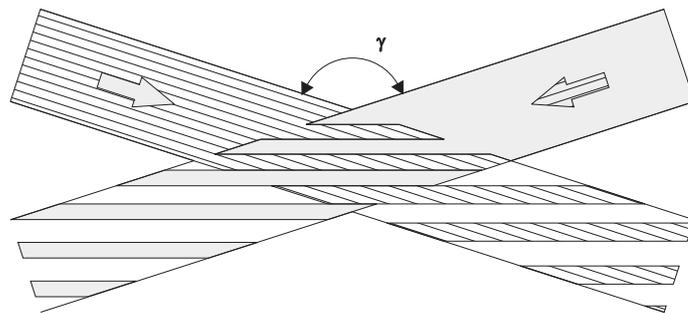
**Abbildung 1.6:** Wechselseitiger Durchlass an engen Durchgängen, Oszillation [2].

Typische Bereiche in denen dieser Effekt auftreten kann, sind die Ein-/Ausgänge von öffentlichen Verkehrsmitteln oder auch Ein-/Ausgänge von Betriebskantinen (Mensen), die innerhalb von kurzen Zeiträumen eine hohe Anzahl von entgegengerichteten Personenströmen aufweisen. In Kreuzungsbereichen können mehrere Selbstorganisationseffekte beobachtet werden. Zum einen die Ausbildung eines Kreisverkehrs, die Bevorzugung einer Ausweichrichtung und die Entstehung von Streifen. Die Ausrichtung der Streifen ist dabei abhängig von der Richtung der Personenströme und vom Winkel, mit dem sie aufeinander treffen. Dabei entstehen zwei unterschiedliche Strukturen: Quer- und Längsstreifen, dargestellt in den Abbildungen 1.7(a) und 1.7(b). Querstreifen entstehen, wenn die Personen aus entgegengesetzten Richtungen kommen. Das Aufeinandertreffen von nahezu gleichgerichteten Personenströmen kann zur Entstehung von Längsstreifen führen. Die Längsstreifen sind vergleichbar mit dem aus dem Straßenverkehr bekannten Reißverschlussartigen Einordnungsverfahren. Ähnlich der Oszillation setzt sich jeweils eine Gruppe von Personen

durch (hier über die Schnittstreifen visualisiert) und passiert den als Hindernis wahrgenommenen zweiten Personenstrom.



(a) Querausprägung bei spitzem Winkel  $\gamma$  und fast gleichgerichteten Personenströmen.



(b) Längsausprägung bei stumpfem Winkel  $\gamma$  und entgegengerichteten Personenströmen.

**Abbildung 1.7:** Ausbildung von streifenähnlichen Strukturen an Kreuzungsbereichen in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung und dem Auftreffwinkel der Personenströme [82].

Aber nicht nur durch zeitlich direkte Wechselwirkungen entstehen übergeordnete Strukturen. Bei Trampelpfaden erfolgt die Wechselwirkung nicht unmittelbar zeitlich direkt, sondern durch die auf dem Boden hinterlassenen Spuren (Trampelpfad als Kommunikationsmedium/Informationsspeicher [83, 84]). Aus der Motivation kürzere als die baulich vorgegebenen Wege zu wählen (Abkürzung), treten häufig benutzte Wege immer sichtbarer hervor. Nachfolgende Personen wählen die deutlich gekennzeichneten Pfade mit zunehmender Häufigkeit. Die zeitliche Stabilität des Trampelpfades ist von der Speicherefähigkeit des Informationsmediums Boden begrenzt. Pfade auf verschneitem Untergrund können bereits mit dem nächsten Neuschnee nicht mehr existieren, wo hingegen Trampelpfade auf Grünflächen eine sehr lange Lebensdauer aufweisen und teilweise nur mit baulichen Änderungen aufgehoben werden können (z. B. Neupflanzungen oder Barrieren).

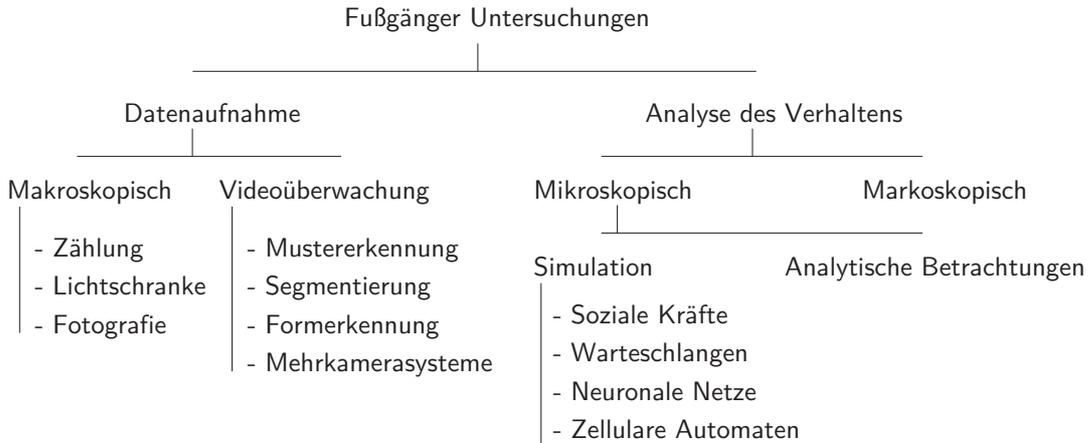
### 1.3.2. Modellierung individueller Verhaltensweisen

Die grundlegenden Bewegungsmuster von Personen lassen sich in drei für die Abbildung des (rationalen) Bewegungsverhaltens der Passagiere im Terminal notwendige Bereiche unterteilen.

- **Schlendern:**  
(nicht) zielgerichtete Bewegung mit wechselnden Geschwindigkeits- und Zielvorgaben
- **normales Gehen:**  
quasi unbegrenzt Zeitkontingent, energetisch optimale Geschwindigkeitswahl bei zumeist klarer Zielvorgabe
- **schnelles Gehen:**  
zielgerichtete Bewegung unter hoher Geschwindigkeitsvorgabe (Zeitknappheit) und klarer Zielvorgabe

Neben den zumeist ökonomisch rationalen Verhaltensweisen der Passagiere, können in besonderen (Not-) Situationen auch irrationale und zum Teil schwer nachvollziehbare individuelle Verhaltensmuster auftreten [31, 39, 85, 86]. In den nachfolgenden Betrachtungen werden diese irrationalen Verhaltensweisen nicht berücksichtigt, da hierfür erweiterte Modellierungsansätze notwendig sind und diese nicht im Fokus der Modellierung des Bewegungsverhaltens der Passagiere im Terminal stehen.

Mit zunehmender Bedeutung der Modellierung spezifischer Verhaltensweisen von Personen und der Entwicklung von immer effizienteren Rechnerarchitekturen rückt der individuenorientierte (mikroskopische) Modellansatz verstärkt in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Ein Überblick über die große Anzahl an unterschiedlichen Modellen und Implementierungen ist beispielsweise bei [31, 32, 37, 39, 84, 85, 87–100] zu finden. Die Entwicklung verschiedener Strategien bei der Untersuchung menschlicher Verhaltensweisen ist in Abbildung 1.8 zusammengestellt [92]. Prinzipiell unterscheiden sich die Herangehensweisen bei der Modellentwicklung zur Abbildung menschlicher Verhaltensweisen grundlegend. Auf der einen Seite ist die Datenaufnahme und Auswertung der Beobachtungen von zentralem Forschungsinteresse, um das Verhalten der Personen durch das Studium konkreter Fälle zu verstehen. Die Analysen einzelner grundlegender Verhaltensweisen, die modellhafte Beschreibung und die Analyse der Wechselwirkungen innerhalb der entwickelten Modelle stehen auf der anderen Seite. Während die Datenaufnahme ein wesentlicher Faktor bei der Kalibrierung der Modelle ist, erlaubt die konkrete Modellanwendung ein tiefergehendes Verständnis spezifischer Verhaltensweisen, welche durch die Wechselwirkungen der Personen untereinander entstehen. Für eine nachhaltige Modellentwicklung müssen die Erkenntnisse beider Forschungsrichtungen (Modellierung und Datenaufnahme) sukzessive zusammengeführt werden.



**Abbildung 1.8:** Übersicht über die Entwicklung von Modellen zur Abbildung menschlicher Verhaltensweisen (in Anlehnung an [92]).

Seit der Veröffentlichung der Arbeit von [92] ist die Liste an Arbeiten zu den jeweiligen Modellansätzen sehr stark angewachsen. Bei der Entwicklung der mikroskopischen Modelle haben sich zwei allgemeine Ansätze etabliert: Modelle basierend auf zellularen Automaten und Modelle unter Berücksichtigung von sozialen Kräften. In den letzten Jahren rücken aus Sicht der wissenschaftlichen Forschung auch Modelle in den Vordergrund, die auf künstlicher Intelligenz [101, 102], Nutzenmaximierung [100, 103] und neuronalen Netzen [104, 105] basieren. Existierende Modelle und Implementierungen können nach den folgenden Kriterien (Tabelle 1.1) klassifiziert werden.

Kriterien	mögliche Modellausprägungen
Modellierungsebene	mikroskopischer Ansatz (individuenbasiert) oder makroskopische, aggregierte Flussdarstellung
Modellierung	stochastisch oder deterministisch
Räumliche Abbildung	kontinuierlich, gitter- oder netzbasiert
Verhaltensweisen	funktional vs. implizit vs. regelbasiert vs. künstliche Intelligenz
Einsatzgebiet	spezielles oder generalisiertes Modell des menschlichen Bewegungsverhaltens
Verfügbarkeit	Open Source vs. kommerzielle Software vs. modellhafte, wissenschaftliche Implementierung

**Tabelle 1.1.:** Ansätze zur Modellklassifizierung [vgl. 31, 87]

Bei der mikroskopischen Modellierung wird das Verhalten jedes Individuums (Agent) separat abgebildet. Ein Agent entwickelt seine eigenen Verhaltensweisen, indem er Infor-

mationen aus der Umgebung aufnimmt und (regelbasiert) verarbeitet. Die Beschreibung des gesamten komplexen Systems erfolgt demnach durch die Modellierung des kleinsten Bestandteils. Die Verhaltensmuster der Agenten können differenziert beschrieben werden und erlauben somit eine hohe Modellflexibilität. Ein Agent besitzt (limitierte) Informationen und hat die Fähigkeit zur Problemlösung (z. B. Hindernissen auszuweichen). Je nach betrachtetem Modellierungsansatz können die allgemeinen operationalen Fähigkeiten (z. B. Fortbewegen, Ausweichen) und die speziellen strategisch/taktischen Fähigkeiten (z. B. Routenplanung, Nutzenmaximierung) unterschiedlich ausgeprägt sein.

Bei der Modellierung des Bewegungsverhaltens der Passagiere im Terminal (Kapitel 2, S. 37ff) wird hauptsächlich auf Modellannahmen und -grundlagen eingegangen, die auf den mikroskopischen Ansätzen des zellularen Automaten und den Grundideen des sozialen Kräfte Modells aufbauen. Während das Modell der sozialen Kräfte auf dem Ansatz von kontinuierlichen Anziehungs- und Abstoßungskräften zwischen den Individuen basiert [2, 81, 106–108], bildet das Modell des zellularen Automaten das Bewegungsverhalten auf einem diskreten regulärem Gitter ab [67, 84, 87, 109–111]. Für das Verständnis des mathematischen Hintergrundes wird in den folgenden Abschnitten ein allgemeiner Überblick über die grundsätzlichen Annahmen der beiden mikroskopischen Modelle gegeben. Des Weiteren wird auch ein hybrider mikroskopischer Modellansatz vorgestellt (*discrete choice* [112–114]), der einen eleganten Weg aufzeigt, Erkenntnisse der beiden Modellwelten zu verbinden.

### 1.3.3. Modell der sozialen Kräfte

Das Modell der sozialen Kräfte beruht auf der kontinuierlichen Beschreibung menschlicher Verhaltensweisen, unter der Annahme, dass das Verhalten von Personen durch Gleichungen der Newton'schen Mechanik beschrieben werden kann [2, 65, 115]. Die individuelle Wahl von Richtung und Geschwindigkeit ist dabei von der gewünschten Bewegungsrichtung (Ziel) sowie von Anziehungs- und Abstoßungskräften durch Objekte und andere Agenten beeinflusst. Im Gegensatz zu physikalischen Kräften gibt es bei den sozialen Kräften keine Austauschteilchen für den Impuls- und Energieaustausch. Die beteiligten Agenten tauschen lediglich Informationen aus. Der Grad des Informationsaustausches und die unmittelbare Bedeutung der Information für den jeweiligen Agenten kann eine Verhaltensänderung bewirken [37]. Das dynamische, individuelle Verhalten kann durch ein allgemeines, in der Zeit voranschreitendes System beschrieben werden. Für ein zeitlich diskretes System  $\vec{y}_t$  gilt allgemein (1.1), wobei die Änderung des Zustandsvektors  $\Delta\vec{y}$  auch von spezifischen Modellparametern  $\gamma$  abhängt.

$$\Delta\vec{y} = f(\vec{y}_{t+1}, \gamma) - f(\vec{y}_t, \gamma) \tag{1.1}$$

Schreitet das System nicht zeitlich diskret sondern kontinuierlich voran, erfolgt die Beschreibung anhand von Differentialgleichungen, in denen der Zustandsvektor  $\vec{y}(t)$  eine Funktion der Zeit  $t$  ist.

$$\frac{d\vec{y}(t)}{dt} = f(\vec{y}(t), \gamma) \quad (1.2)$$

Im Modell der sozialen Kräfte ist die Bewegungsgleichung (1.3) für einen Agenten  $\alpha$  durch den Ortsvektor  $\vec{x}$  ( $\mathbf{x}$ ) und Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  ( $\mathbf{v}$ ) beschrieben<sup>6</sup>. Unter der Annahme, dass jeder Agent eine individuelle Richtung und Geschwindigkeit anstrebt, stellt  $\mathbf{f}_\alpha$  in (1.3) die spezifische Antriebskraft des Agenten dar<sup>7</sup>. Die abstoßenden Kräfte sind bezogen auf die umgebenden Agenten  $\beta$  mit  $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$  definiert und mit  $\mathbf{f}_{\alpha i}$  auf die umgebenden Objekte  $i$  bezogen (z. B. Wände oder statische Hindernisse) [2].

$$\frac{d\mathbf{v}_\alpha(t)}{dt} = \mathbf{f}_\alpha(t) + \sum_{\beta \neq \alpha} \mathbf{f}_{\alpha\beta}(t) + \sum_i \mathbf{f}_{\alpha i}(t) \quad (1.3)$$

Die numerische Lösung dieser gekoppelten, nicht linearen, partiellen Differentialgleichung erfolgt durch den Einsatz des expliziten Euler-Verfahrens (1.4). Das Euler-Verfahren ist ein numerisches Näherungsverfahren erster Ordnung. Im Vergleich zur Taylor-Reihenentwicklung wird jedoch nur die erste Ableitung berücksichtigt, sodass der dominante Fehler je Schrittweite  $h$  proportional zu  $h^2$  ist. Somit kann der Fehler durch die Wahl kleiner Schrittweiten minimiert werden.

$$\mathbf{y}(t+h) \approx \mathbf{y}(t) + h \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Die Anwendung von der allgemeinen Darstellung aus (1.4) auf das Modell der sozialen Kräfte (1.3) führt zu (1.5). Basierend auf der aktuellen Position des Agenten  $\mathbf{x}_\alpha(t)$  wird die zukünftige Position  $\mathbf{x}_\alpha(t+\Delta t)$  durch den aktuellen Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}_\alpha(t)$  und die Zeitschrittweite  $\Delta t$  berechnet.

$$\mathbf{x}_\alpha(t+\Delta t) \approx \mathbf{x}_\alpha(t) + \Delta t \mathbf{v}_\alpha(t) \quad (1.5)$$

Für die Berechnung der zukünftigen Position gemäß (1.5) werden im Folgenden die einzelnen Bestandteile von (1.3) bestimmt. Abhängig von seiner gegenwärtigen Position  $\mathbf{x}_\alpha(t)$  versucht der Agent sein (unmittelbares) Ziel  $\mathbf{x}_{\text{Ziel},\alpha}$  zu erreichen. Die normierte Bewegungsrichtung  $\mathbf{e}_\alpha(t)$  ergibt sich aus (1.6).

---

<sup>6</sup> Nachfolgend wird für die Darstellung eines Vektors die Schreibweise  $\mathbf{y} = \vec{y}$  gewählt.

<sup>7</sup> Da in dem Modell keine Berücksichtigung der Masse erfolgt, ist eine Interpretation der spezifischen Kraft  $\mathbf{f} = \mathbf{F}/m$  im Sinne einer Beschleunigung zulässig.

$$\mathbf{e}_\alpha(t) = \frac{\mathbf{x}_{\text{Ziel},\alpha} - \mathbf{x}(t)}{|\mathbf{x}_{\text{Ziel},\alpha} - \mathbf{x}(t)|} \quad (1.6)$$

Um sein Ziel zu erreichen, wählt der Agent eine adäquate Geschwindigkeit  $v_\alpha$ . Durch potentielle Interaktionen entlang des Bewegungspfad es kann die aktuelle Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_\alpha(t)$  von der gewünschten Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_\alpha(t) = v_\alpha \mathbf{e}_\alpha(t)$  abweichen. Dieser Abweichung wirkt die rückstellende Kraft  $\mathbf{f}_\alpha(t)$  entgegen, mit der der Agent in der Zeit  $\tau$  (Relaxationszeit) versucht, seine gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen.

$$\mathbf{f}_\alpha(t) = \frac{1}{\tau} (v_\alpha \mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha) \quad (1.7)$$

Da der Agent bestrebt ist, eine minimale Distanz zu anderen Agenten nicht zu unterschreiten (territoriale Effekte [116]), ist die Abstoßungskraft  $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(t)$  der Agenten  $\alpha$  und  $\beta$  von der relativen Position der Agenten zueinander sowie von der jeweiligen Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit abhängig. Die Funktion  $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(t)$  (1.8) weist demzufolge eine vom Richtungswinkel abhängige (anisotrope) Komponente  $w(\varphi_{\alpha\beta}(t))$  (1.9) und eine Entfernungskomponente  $\mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t))$  (1.12) auf [53].

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta}(t) = w(\varphi_{\alpha\beta}(t)) \mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)) \quad (1.8)$$

Durch die winkelabhängige Komponente kann dem Effekt Rechnung getragen werden, dass die Agenten bei ihren Bewegungen hauptsächlich mit Agenten in dem vor ihnen befindlichen Bereich interagieren. Dieser Bereich entspricht ungefähr dem Bereich der horizontalen visuell-peripheren menschlichen Wahrnehmung<sup>8</sup>. Wenn sich der Agent  $\beta$  hinter  $\alpha$  befindet, hat dieser somit einen geringeren Einfluss auf die Bewegungsrichtung von  $\alpha$ , als wenn sich  $\beta$  vor  $\alpha$  befindet.

$$w(\varphi_{\alpha\beta}(t)) = \lambda + (1 - \lambda) \frac{1 + \cos(\varphi_{\alpha\beta})}{2} \quad (1.9)$$

Die winkelabhängige Funktionsapproximation  $w(\varphi_{\alpha\beta}(t))$  bildet den anisotropischen Effekt der individuellen Wahrnehmung angemessen ab [106, 107]. Die Validierungen unter Verwendung realer Bewegungstrajektorien von Personen zeigt eine starke Ausprägung des anisotropischen Effektes (Abbildung 1.9(a)). Der Grad des anisotropischen Effektes ist in (1.9) durch  $\lambda$  in den Grenzen  $[0, 1]$  definiert. Mit zunehmendem Einfluss der Agenten hinter  $\alpha$  nimmt auch die Größe von  $\lambda$  zu. Erreicht  $\lambda$  den Wert 1, haben alle umgebenen

---

<sup>8</sup>  $\pm 94^\circ$ , DIN 33414E Teil 1 und DIN 33402

Agenten den gleichen Einfluss auf  $\alpha$ . Gemäß (1.10) ist der Winkel  $\varphi_{\alpha\beta}$  zwischen der Bewegungsrichtung  $\mathbf{e}_\alpha(t)$  und der direkten Verbindungslinie zwischen den Agenten  $\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)$  (1.11) definiert.

$$\cos(\varphi_{\alpha\beta}) = \mathbf{e}_\alpha(t) \cdot \mathbf{d}_{\alpha\beta}(t) \quad (1.10)$$

$$\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t) = \mathbf{x}_\alpha(t) - \mathbf{x}_\beta(t) \quad (1.11)$$

Zur Bestimmung der Entfernungskomponente  $\mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t))$  gibt es verschiedene Ansätze [2, 53, 107, 117]. Diese Ansätze unterscheiden sich im Wesentlichen durch die geometrische Form des Interaktionsgebietes und durch die Berücksichtigung von geschwindigkeitsabhängigen Effekten. Nach der Definition durch (1.12) sind die Abstoßungskräfte von den räumlichen Ausdehnungen der Agenten  $R_\alpha$  und  $R_\beta$  abhängig (ein Agent wird durch eine kreisförmige Fläche mit dem Radius  $R$  repräsentiert). Ebenfalls wird  $\mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t))$  durch die Entfernung  $d_{\alpha\beta}(t)$  beeinflusst. Eine Parametrisierung von (1.12) erfolgt durch die maximale Amplitude  $A$  der abstoßenden Kraft und durch die Wechselwirkungsreichweite  $B$ .

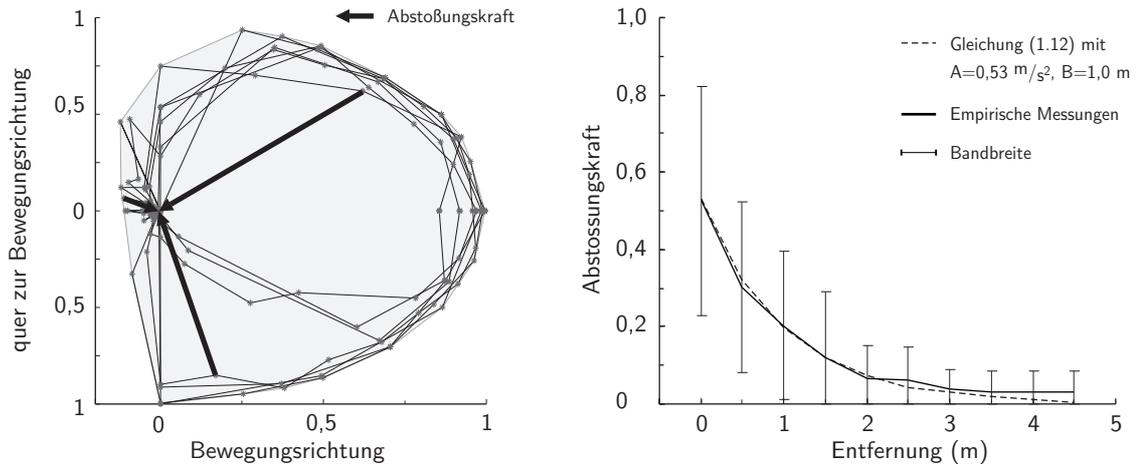
$$\mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)) = Ae^{(R_\alpha+R_\beta-d_{\alpha\beta}(t))/B} \hat{\mathbf{d}}_{\alpha\beta}(t) \quad (1.12)$$

$$d_{\alpha\beta}(t) = |\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)|$$

$$\hat{\mathbf{d}}_{\alpha\beta}(t) = \frac{\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)}{d_{\alpha\beta}(t)}$$

In Abbildung 1.9(b) ist der Verlauf der Abstoßungskräfte mit zunehmender Entfernung  $d_{\alpha\beta}$  dargestellt. Im Vergleich zu empirisch erhobenen Daten zeigt die Simulation unter Verwendung von (1.12) und den Parametern  $A = 0,42 \text{ m/s}^2$  und  $B = 1,62 \text{ m}$  eine sehr gute Übereinstimmung auf [117].

Als Ergebnis der empirischen Untersuchungen ist hervorzuheben, dass die Wechselwirkungsreichweite zwischen den Agenten eine Entfernung von ungefähr 5 m nicht überschreitet. Der Agent versucht nicht nur einen Mindestabstand zu anderen Agenten nicht zu unterschreiten, sondern auch zu statischen Objekten wie Wänden oder Hindernissen eine angemessene Entfernung einzuhalten. Die abstoßende Kraft  $\mathbf{f}_{\alpha i}$  von einem Objekt  $i$  geht von der kürzesten Distanz zwischen Agent und Objekt aus und weist einen mit der Entfernung abnehmenden Verlauf auf (ähnlich  $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$ ). Neben den beschriebenen Abstoßungskräften müssen bei hohen Agentendichten die physischen Kontaktkräfte ebenfalls berücksichtigt werden [53]. Auch Anziehungskräfte, die durch Gruppenzugehörigkeiten entstehen oder auf attraktiven Effekten entlang des Bewegungspfades basieren, könnten auf Basis des Gleichungssystems (1.3) im Modell der sozialen Kräfte abgebildet werden.



(a) Normierte Darstellung der winkelabhängigen Abstoßungskräfte (beispielhaft sind drei Kraftvektoren hervorgehoben). Die Abstoßungskräfte entstehen primär durch Interaktionen mit Agenten, die sich in positiver Bewegungsrichtung befinden (Sichtbereich).

(b) Exponentiell abnehmender Verlauf der Abstoßungskräfte mit zunehmender Entfernung  $d_{\alpha\beta}$  der Agenten untereinander. Die Bandbreite der empirischen Daten nimmt ebenfalls ab.

**Abbildung 1.9:** Spezifikation von Winkel- und Entfernungsabhängigkeiten im Modell der sozialen Kräfte [117].

### 1.3.4. Modell unter Verwendung von zellularen Automaten

Im Gegensatz zum Modell der sozialen Kräfte basiert das Modell des zellularen Automaten auf diskreten räumlichen Zuständen. Die zeitliche Entwicklung einer räumlich diskreten Position (Zelle) ist dabei von den Zuständen der umgebenden Zellen (Nachbarschaft) abhängig. Ein zellulärer Automat ist bestimmt durch die Definition eines regulären Zellgitters  $L$ , die Relationen  $N$  der Gitterzellen zueinander ( $N \subseteq L$ ), die Anzahl der Zellzustände  $S$  sowie durch lokale Regeln  $f$  (Beschreibung des Übergangs zwischen den jeweiligen Zellzuständen in Abhängigkeit der Nachbarschaftsrelation  $f : S^N \rightarrow S$ ) [118–123]. Für die Abbildung des Bewegungsverhaltens von Personen ist das Modell wie folgt definiert:

$L$  Ein zwei-dimensionales, reguläres Gitter bestehend aus  $n \times m$  quadratischen Zellen mit einer Kantenlänge von 0,4 m (basierend auf dem minimalen Platzbedarf einer Person [55]).

$$L := \{(i, j) \mid i, j \in N, 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\} \quad (1.13)$$

$N$  Nachbarschaftsrelation: es wird eine Moore-Nachbarschaft angenommen, in der eine Verbindung zu allen Zellen besteht, die mindestens einen gemeinsamen Eckpunkt mit der ursprünglichen Zelle besitzen.

$$N_{ij} := \{(k, l) \in L \mid |k - i| \leq 1, |l - j| \leq 1\} \quad (1.14)$$

$S$  Jede Zelle besitzt allgemein zwei Zustände: *frei* (0) oder *besetzt* (1).

$$S := \{0, 1\} \tag{1.15}$$

$f$  In jedem Zeitschritt( $t \rightarrow t + 1$ ) ändert sich der Zellzustand in Abhängigkeit vom Zustand der Zelle und dem Zustand aller Nachbarzellen.

$$S_{ij}^{t+1} := f(\{S_{ij}^t \mid i, j \in N\}) \tag{1.16}$$

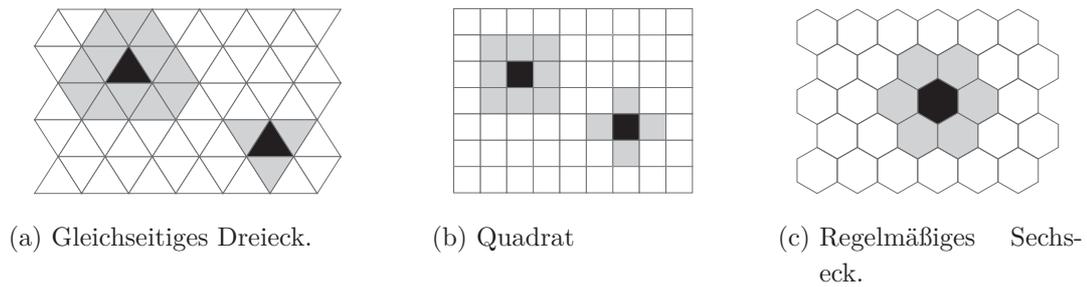
1. Wenn sich ein unüberwindbares Objekt (Person, Hindernis) auf einer Zelle befindet, wird diese als *besetzt* markiert (sonst ist sie *frei*).
2. Es können nur *freie* Zellen betreten werden.

Eine reguläre, zwei-dimensionale Gitterstruktur  $L$  kann nur aus drei geometrischen Grundelementen erstellt werden: gleichseitiges Dreieck, Quadrat oder regelmäßiges Sechseck (Abbildung 1.10). Je nach Verwendung weisen die daraus erstellten Gitter spezifische Charakteristika auf. Bei einer auf Dreiecken basierenden Struktur erfolgt der Übergang zwischen den Zellen auf einem *zick-zack* Pfad und die drei nebeneinander liegenden Zellmittelpunkte können nicht durch eine gerade Linie verbunden werden. Die Verwendung eines Gitters aus Quadraten führt zu einer Ungleichgewichtung des Abstandes von horizontalen/vertikalen und diagonalen Zellen. Wird das Gitter mit Sechsecken erstellt, haben die Mittelpunkte aller benachbarten Zellen zwar den gleichen Abstand zueinander, jedoch weisen Umgebungsgeometrien wie Innenräume oder Straßenzüge typischerweise Winkel von  $90^\circ$  und nicht von  $60^\circ$  auf. Für die Nachbarschaftsrelation  $N$  kann allgemein zwischen einer von-Neumann oder einer Moore-Nachbarschaft gewählt werden. Bei der von-Neumann-Nachbarschaft sind die angrenzenden Zellen nur über eine gemeinsame Seite mit der zentralen Zelle verbunden (1.17).

$$N_{ij} := \{(k, l) \in L \mid (|k - i| = 1 \Leftrightarrow l = j), (k = i \Leftrightarrow |l - j| = 1)\} \tag{1.17}$$

Die Moore-Nachbarschaft berücksichtigt zusätzlich noch Zellen, mit denen die zentrale Zelle nur über eine gemeinsame Ecke verbunden ist (1.14). Während sich die von-Neumann und die Moore-Nachbarschaft bei den Gittern aus Abbildung 1.10(a) und Abbildung 1.10(b) unterscheiden, sind sie bei Gittern auf der Basis von regelmäßigen Sechsecken identisch (Abbildung 1.10(c)).

Die Verwendung des regulären Gitters erlaubt eine effiziente Implementierung des zeitlich und räumlich diskreten Modells in eine rechnergestützte Simulationsumgebung. Der Erfolg des auf dem zellularen Automaten aufbauenden Nagel-Schreckenberg Verkehrsmodells zur Beschreibung des Straßenverkehrs [120] führte dazu, dass zelluläre Automaten



**Abbildung 1.10:** Reguläre Gitterstrukturen auf Basis von gleichseitigen Dreiecken, Quadraten und regelmäßigen Sechsecken mit Moore- (oben links) und von-Neumann-Nachbarschaftsrelationen (unten rechts).

auch verstärkt im Bereich der agentenbasierten Modellierung Anwendung finden. Als Beispiele für die vielfältigen Ausgestaltungsmöglichkeiten von zellularen Automaten dienen die Forschungsarbeiten von [31, 84, 87, 111, 124–126].

Für die (Weiter-) Entwicklung eines zellularen Automatenmodells für die Abbildung von Personenbewegungen ist zu beachten, dass ein Paradigmenwechsel bei der Interpretation des Zellzustandes erfolgt (Kapitel 2.2, S. 46ff). Nicht mehr die Gitterzelle und ihre Zustandsänderung stehen im Mittelpunkt. Vielmehr ist der autonom agierende Agent das zentrale Element bei der Modellierung. Er verlässt seine Position (Zelle) zielgerichtet und berücksichtigt dabei seine individuellen Möglichkeiten (Geschwindigkeit, Richtung) sowie die Anwesenheit von Agenten in den angrenzenden Zellen. Da sich die Interaktionen der Agenten innerhalb des Modells nur auf die unmittelbare Umgebung (Nachbarzellen) beschränken, müssen Erweiterungen entwickelt werden, die eine höhere Wechselwirkungsreichweite erlauben. In Analogie zu biologischen Systemen erfolgt der Transport der notwendigen Informationen durch ein geeignetes Medium [127, 128]. Wird das Gitter nicht nur als Positionsspeicher sondern auch als Informationsmedium genutzt, erfolgen die Wechselwirkungen zwischen den Agenten nicht mehr direkt. Es könnten jedoch erweiterte Interaktionsmöglichkeiten durch die indirekten Kommunikation wie bei einem Trampelpfad mit einem (dynamischen) *Bodenfeld* umgesetzt werden [84, 111, 124]. Dabei hinterlässt jeder Agent eine sich räumlich ausbreitende und zeitlich abklingende Informationsspur. Nachfolgende Agenten können diese Information individuell interpretieren und innerhalb ihrer strategisch/taktischen Entscheidungsprozesse verwerten (z. B. Ausweich- oder Personenfolgeverhalten).

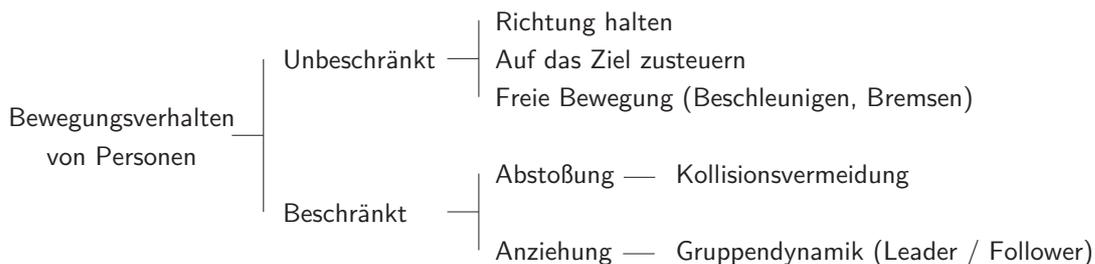
### 1.3.5. Modell der diskreten Entscheidungen

Unter der Annahme, dass die modellierten Personen ihre Entscheidungen auf rationaler Basis treffen, kann das Verhalten durch konsistente und transitive individuelle Präferenzen abgebildet werden [129]. Dabei wird unter Verwendung von Nutzenfunktionen zwischen Handlungsalternativen entschieden, in dem die Alternative mit dem höheren Nutzen be-

vorzugt wird. Ein Individuum entscheidet sich demzufolge unter gleichen Randbedingungen immer gleich (konsistent) und es sind eindeutige Rückschlüsse auf die Hierarchie der Handlungsalternativen vorhanden (transitiv:  $A > B$  und  $B > C$  dann  $A > C$ ). Nach Hoogendoorn [29] und Daamen [100] treffen Personen ihre Entscheidungen nach einem hierarchischem Prinzip auf strategischer, taktischer und operationaler Ebene. Die Ebenen enthalten dabei:

- **Strategische Ebene:**  
Zielwahl und Bestimmung notwendiger Aktivitäten zur Zielerreichung,
- **Taktische Ebene:**  
Reihenfolge der Aktivitäten, mittelbare Kollisionsvermeidung und Routenwahl,
- **Operationale Ebene:**  
unmittelbare Kollisionsvermeidung und Bewegungsausführung.

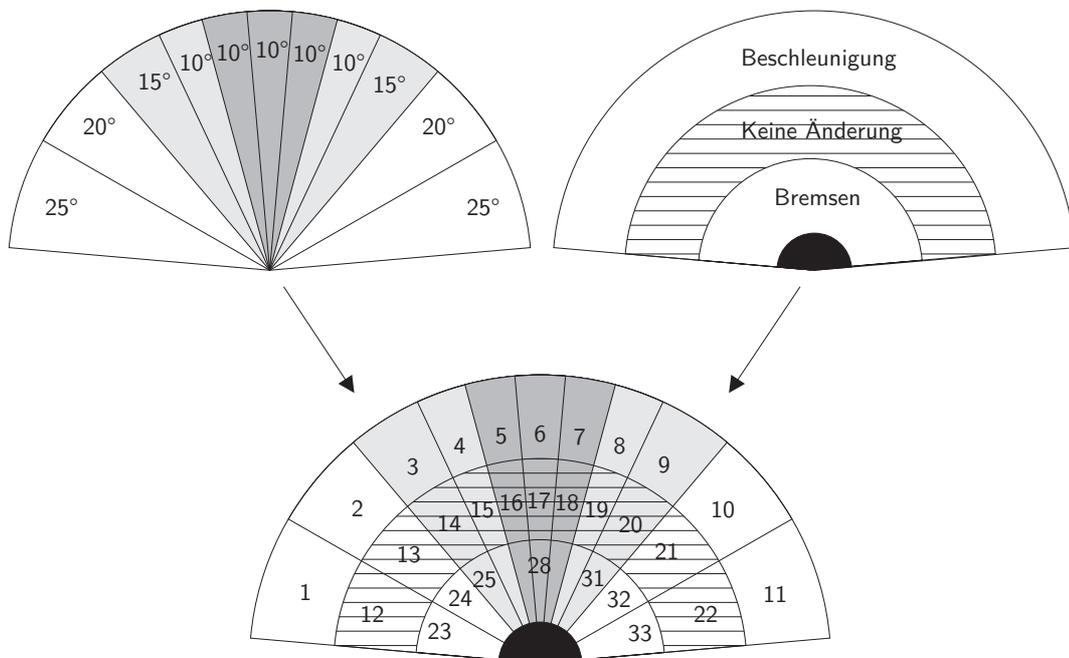
Die grundlegenden Annahmen des Modells der diskreten Entscheidungen (*discrete choice* Modell) sind in [99, 112–114, 130, 131] umfangreich dargelegt. Das Verhalten der Agenten wird dabei durch beschränkte und unbeschränkte Verhaltensweisen definiert. Wie aus Abbildung 1.11 zu erkennen ist, sind die unbeschränkten Verhaltensweisen nicht von der Anwesenheit anderer Agenten abhängig, sondern bestimmen sich anhand von individuellen Parametern. Die drei unbeschränkten Verhaltensweisen sind: die Neigung eine eingeschlagene Richtung beizubehalten (Richtungsträgheit), die Zielerreichung als eigentliche Bewegungsmotivation und die physische Fähigkeit eine Strecke mit der gewünschten Geschwindigkeit zurückzulegen.



**Abbildung 1.11:** Einteilung des individuellen Bewegungsverhaltens unter Verwendung des *discrete choice* Modells [99].

Bei den beschränkten Verhaltensweisen dominieren Abstoßungs- und Anziehungskräfte (ähnlich dem Modell der sozialen Kräfte definiert). Die Abstoßung dient dabei primär der Kollisionsvermeidung und die Anziehungskräfte werden zur Beschreibung gruppendynamischer Effekte (*leader-follower* Verhalten) genutzt. Die Bewegung eines Agenten wird beim *discrete choice* Modell durch die voneinander unabhängigen Parameter Richtung und Geschwindigkeit bestimmt. Im *discrete choice* Modell kann der Agent zwischen

elf Richtungsoptionen wählen, wobei die resultierenden Bewegungssektoren im Sichtbereich ( $\pm 85^\circ$ ) vor dem Agenten liegen (Abbildung 1.12, oben links). Die Annahme der adaptiven Aufteilung der Richtungswahloptionen erfolgt hierbei aufgrund der angenommenen Richtungsträgheit und in Übereinstimmung mit der menschlichen Wahrnehmung<sup>9</sup>, die Objekte in der Nähe der Sichtachse mit höherer Genauigkeit verarbeitet. Die Wahl der Geschwindigkeit erfolgt in drei Stufen, wobei der Agent auf das 1,5-fache seiner aktuellen Geschwindigkeit beschleunigen, die aktuelle Geschwindigkeit halten oder auf die Hälfte der aktuellen Geschwindigkeit abbremsen kann (Abbildung 1.12, oben rechts). Zusammen betrachtet entstehen 33 potentielle, zellbasierte Positionen, aus denen der Agent seine zukünftige Position wählt (Abbildung 1.12, unten). Da die aktuelle Geschwindigkeit als Referenz für die Ausdehnung der Geschwindigkeitszonen dient, weisen die Zellen personenspezifische Charakteristiken auf und ändern sich dynamisch in Zeitverlauf.



**Abbildung 1.12:** *discrete choice*: Richtungswahl (oben links), Geschwindigkeitsbestimmung (oben rechts) und aggregiertes Modell [114].

Im Vergleich zum Modell des zellularen Automaten erfolgt die räumliche Diskretisierung nicht durch ein globales reguläres Gitter. Es wird zwar ebenfalls auf Gitterzellen zurückgegriffen, jedoch ist deren Lage räumlich nicht fixiert, sondern sie weisen durch die agentenspezifischen Eigenschaften sowie durch die individuellen Wechselwirkungen adaptive Positionen und Ausdehnungen auf. Für jede dieser Zellen wird der Nutzen gemäß (1.18) bestimmt und der Agent wählt anschließend die Zelle mit dem größten Nutzen

<sup>9</sup> siehe DIN 33414E/Part 1 und DIN 33402

aus. Dabei ist die spezifische Nutzenfunktion  $U$  für das Bewegungsverhalten der Personen gemäß (1.18) definiert.

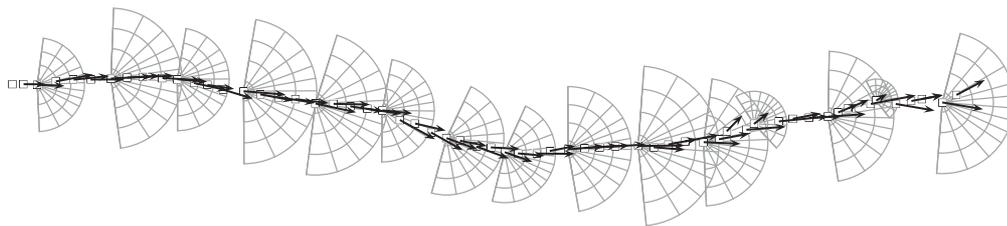
$$U = U_{\text{Richtung halten}} + U_{\text{Ziel verfolgen}} + U_{\text{Freie Bewegung}} + U_{\text{Ausweichen}} + U_{\text{Gruppendynamik}} \quad (1.18)$$

Durch die Tendenz von Personen, die Bewegungsrichtung nicht ständig zu ändern, wird bei der Richtungswahl zwischen drei Zonen unterschieden. Am Beispiel der äußeren Beschleunigungszonen (Abbildung 1.12) sind das: die zentralen Zellen (5, 6, 7), die seitlichen Zellen (3, 4, 8, 9) und die äußeren Zellen (1, 2, 10, 11). Für die Nutzenfunktion der Richtungsträgheit  $U_{\text{Richtung halten}}$  (1.19) sind die im *discrete choice* Modell definierten Parameter  $\beta$ , die Indikatoren  $I_d$  sowie die Winkel  $dir_{dn}$  zwischen den Verbindungslinien von Position zu Zellenmittelpunkten und der Bewegungsrichtung von Bedeutung. Der Modellparameter  $\beta$  stellt einen Gewichtungsfaktor dar, der den Einfluss des jeweiligen Zellzustandes auf die individuelle Bewegungsentscheidung abbildet. Der jeweilige Indikator  $I_d$  hat eine Schalterfunktion und weist den Wert 1 auf, wenn die Zelle innerhalb der dazugehörigen Zone (zentral, seitlich, außen) oder hat den Wert 0, wenn sich die Zelle außerhalb der Zone befindet (1.19).

$$U_{\text{Richtung halten}} = (\beta_{\text{zentral}} I_{d, \text{zentral}} + \beta_{\text{seitlich}} I_{d, \text{seitlich}} + \beta_{\text{außen}} I_{d, \text{außen}}) dir_{dn} \quad (1.19)$$

Die Nutzenfunktion  $U_{\text{Richtung halten}}$  dient nur zur exemplarischen Erklärung der allgemeinen Vorgehensweise beim *discrete choice* Modell. Eine umfangreichere Darstellung der Modellierungsansätze für die weiteren Nutzenfunktionen erfolgt in [130] oder [114]. Wie aus (1.19) hervorgeht, sind bei der Bestimmung des Nutzens jeder Zelle (bezogen auf die Beibehaltung der Richtung) drei Modellparameter  $\beta_{\text{zentral}}$ ,  $\beta_{\text{seitlich}}$  und  $\beta_{\text{außen}}$  zu kalibrieren. Unter Bestimmung der weiteren Nutzenwerte für die Funktionen  $U_{\text{Ziel verfolgen}}$ ,  $U_{\text{Freie Bewegung}}$ ,  $U_{\text{Ausweichen}}$  und  $U_{\text{Gruppendynamik}}$  erhöht sich die Anzahl der Modellparameter auf insgesamt 24. Durch die Verwendung von realen Messungen der Universität Delft [28, 68, 100] und im Vergleich zu Videosequenzen [92, 132] bestätigt sich die prinzipielle Anwendbarkeit des Modells [114]. Die Darstellung der Trajektorie eines Agenten erfolgt in Abbildung 1.13, wobei zu erkennen ist, dass abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit die Auswahl zwischen den alternativen Zellen auf einen spezifischen, räumlich-adaptiven Bereich beschränkt ist. Bei hohen Geschwindigkeiten umschließen die Zellen einen größeren Bereich und bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen die neuen potentiellen Positionen näher zusammen.

Die drei beschriebenen Modelle zur Abbildung des dynamischen Personenverhaltens (Modell der sozialen Kräfte, Modell auf Basis des zellularen Automaten und *discrete choice* Modell) besitzen sowohl Vor- als auch Nachteile. Eine pauschale Ablehnung oder Bevorzugung der unterstellten Modellierungsansätze ist nicht zielführend. Vielmehr ist zu prüfen, inwieweit die Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes mit den Modellannahmen vereinbar sind. Für die Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal ist neben dem



**Abbildung 1.13:** Trajektorie unter Verwendung des *discrete choice* Modells [114].

Verständnis von grundlegenden mathematischen Methoden zur Modellierung individueller Verhaltensweisen auch ein Verständnis des Anwendungsfelds Flughafenterminal und der Passagierabfertigungsprozesse notwendig. Aus diesem Grund erfolgen im nächsten Abschnitt eine prägnante Zusammenfassung der notwendigen Passagierabfertigungsprozesse im Terminal und die Ableitung von Anforderungen an das zu entwickelnde mikroskopische Bewegungsmodell.

## 1.4. Passagierabfertigungsprozesse im Flughafenterminal

Innerhalb von Flughafenterminals kann der Einsatz von virtuellen Simulationsumgebungen zur Analyse von Passagierbewegungen mit differenzierten Zielstellungen erfolgen. Typischerweise werden zur Abschätzung der dynamischen Terminalkapazität Passagiersimulationen erfolgreich eingesetzt, die auf makroskopischen Flussmodellen oder auf Modellen mit diskreten Ereignissen (*discrete event*) basieren. Wenn das individuelle Verhalten der Personen (Passagiere, Begleiter, Besucher, Personal) in den Vordergrund rückt, muss ein mikroskopischer Modellansatz Verwendung finden. Gerade in der Ausgestaltung von Terminalnutzungskonzepten, in der Entwicklung effizienter Wegführungssysteme oder für passagierorientierte Prozessoptimierung ist die Verwendung individuenorientierter Modelle unumgänglich. Da das allgemeine Bewegungsverhalten der Passagiere im Fokus steht, werden im folgenden Abschnitt die notwendigen Passagierabfertigungsprozesse im Terminal während des Abflugs, des Transfers und der Ankunft der Passagiere beschrieben sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen vorgestellt.

Der Luftverkehr nimmt mit seiner Infrastruktur eine besondere Stellung im Transportsystem ein. Das Terminal als Schnittstelle von Land- und Luftseite kann als Maßstab für die höchsten Sicherheitsanforderungen angesehen werden. Bei der Definition von Sicherheit im Luftverkehr erfolgt eine Unterscheidung zwischen Luftsicherheit (*security*, „die Kombination von Maßnahmen und personellen und materiellen Ressourcen, die dazu dienen, die Zivilluftfahrt vor unrechtmäßigen Eingriffen zu schützen, die die Sicherheit der Zivilluftfahrt gefährden“, VO (EG) 300/2008 Art. 3) und Luftverkehrssicherheit (*safety*, Abwehr betriebsbedingter oder technischer Gefahren<sup>10</sup>). Da für die regulären Passagier-

<sup>10</sup> „Freedom from unacceptable risk of harm.“, Eurocontrol Safety Regulatory Requirement (ESARR) 4

abfertigungsprozesse innerhalb des Terminals der Schutz gegen widerrechtliche Eingriffe im Vordergrund steht, bleiben im Folgenden die Luftverkehrssicherheitsaspekte unberücksichtigt.

Das Luftsicherheitsgesetz (LuftSiG) ist die Basis eines dreiteiligen Sicherheitskonzeptes, welches die behördlichen Sicherheitsmaßnahmen, die Maßnahmen der Flughafenbetreiber und die Verantwortlichkeiten der Luftfahrtunternehmen regelt. Aus dem Luftsicherheitsgesetz lässt sich die Teilung des Terminals in einen öffentlich zugänglichen und einen nicht-öffentlichen Bereich ableiten. Aus Sicht des Passagiers erfolgt der Übergang zwischen den Bereichen an der Sicherheitskontrolle, bei dem der Passagier und das mitgeführte Handgepäck durch die Bundespolizei oder durch von ihr beauftragtem Sicherheitspersonal überprüft wird (§5 LuftSiG). Das aufgegebene Reisegepäck wird zudem parallel unter Einsatz eines automatischen, mehrstufigen Gepäckkontrollsystems durchsucht.

Für die baulich-technische Gestaltung des Flughafengeländes und -einrichtungen sind aus Sicht des Flughafenbetreibers die Eigensicherungspflichten nach §8 LuftSiG maßgeblich. Die Sicherungsaufgaben umfassen dabei primär die Zutrittskontrollen zu den Sicherheitsbereichen. Die Eigensicherungspflichten der Fluggesellschaften leiten sich aus §9 LuftSiG ab und beinhalten Sicherheitsmaßnahmen bei der Passagier- und Frachtabfertigung. Sicherheitsmaßnahmen für überlassene Flughafenbereiche und die Zutrittskontrolle zu abgestellten Flugzeugen fallen ebenfalls unter diese Regelung. Die Luftsicherheitsbehörden führen eine (jährliche) Zuverlässigkeitsüberprüfung (§7 LuftSiG) des am Flughafen eingesetzten Personals durch, wobei sowohl Informationen von Polizeivollzugs-/Verfassungsschutzbehörden der Länder als auch (unbeschränkt) Auskünfte aus dem Bundeszentralregister eingeholt werden können.

Der Passagier nimmt die Sicherheitskontrolle als drei separate Einzelprozesse wahr: die Gepäck-, die Personen- und die optionale manuelle Nachkontrolle. Bei Betreten des Kontrollbereichs legt der Passagier sein Handgepäck auf ein Transportband und packt seine persönlichen Sachen und die Überbekleidung (z. B. Jacken oder Mäntel) in eine Transportbox. Sollte er ein Notebook mit sich führen, muss dieses in eine separate Transportbox gelegt werden. Flüssigkeiten müssen nach VO (EG) 1546/2006 in einem wiederverschließbaren, durchsichtigen Plastikbeutel transportiert und während der Kontrolle aus dem Handgepäck genommen werden<sup>11</sup>. Während alle Gegenstände auf dem Transportband

---

<sup>11</sup> Die Einführung der Flüssigkeitsbeschränkung führte dazu, dass die Anzahl der durchschnittlich abfertigten Personen an den Sicherheitskontrollen im europäischen Maßstab um bis zu 30 % zurückging (in Deutschland 20-30 %) [133, 134]. Als Folge der Regelung müssen ebenfalls mitgeführte Laptops und Jacken separat kontrolliert werden [135]. Der Mehrbedarf an Sicherheitspersonal durch die VO (EG) 1546/2006 weist eine Größenordnung von 10 % auf [136]. Hat der Passagier im Handgepäck unerlaubte Gegenstände bei sich oder muss er Gegenstände aufgrund der Flüssigkeitsbeschränkung an der Sicherheitskontrolle abgeben, kann er diese jedoch auch nachträglich als separates Reisegepäck aufgeben. In den meisten Fällen entscheidet sich der Passagier aber für die Entsorgung in einen vom Flughafenbetreiber bereitgestellten Behälter.

durchleuchtet werden, wird der Passagier vom Sicherheitspersonal aufgefordert eine metalldetektierende Torsonde zu passieren. Wenn diese Sonde einen Gegenstand detektiert oder ein gewollter Alarm ausgelöst wird (Quotenalarm), erfolgt durch das Sicherheitspersonal eine manuelle, geschlechtskonforme Nachkontrolle mit einer Handsonde. Auffälligkeiten bei den durchleuchteten Gegenständen werden ebenfalls vor Ort durch eine manuelle Inspektion aufgeklärt. Anschließend nimmt der Passagier alle Gegenstände wieder an sich und verlässt den Kontrollbereich.

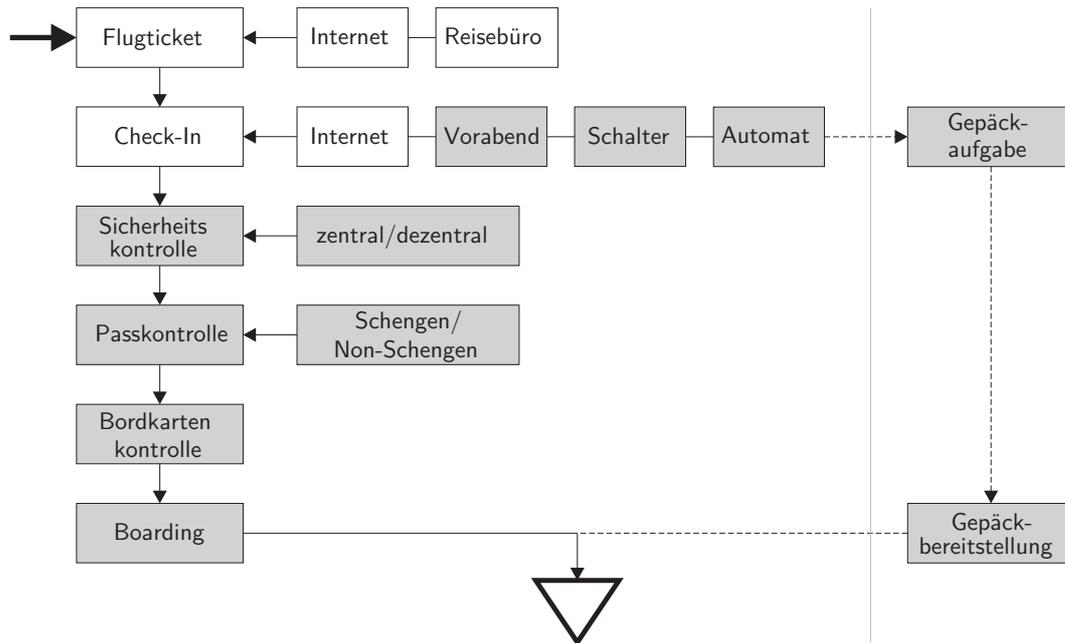
Ein Passagier kann innerhalb eines Flughafenterminals drei unterschiedliche Prozesse durchlaufen: Abflug, Transfer und Ankunft. Typischerweise sind Sicherheitskontrollen nur beim Wechsel vom öffentlich zugänglichen zum nicht-öffentlichen Bereich von Bedeutung. Jedoch können auch beim Transfer (luftseitige Ankunft und Abflug) Sicherheitskontrollen notwendig werden, wenn die Sicherheitsverfahren des zuletzt genutzten Flughafens nicht den nationalen Standards genügen.<sup>12</sup> Der Zugang zum nicht-öffentlichen Bereich darf nur durch Personen mit einer gültigen Bordkarte (Passagier) erfolgen. Bei den Personen im Terminal wird demzufolge zwischen Passagieren, Begleitern/Abholern und Besuchern unterschieden, wobei das Verhalten der Passagiere im Vordergrund der weiteren Betrachtungen liegt. Auf das allgemeine Verhalten der weiteren Personen im öffentlichen Bereich wird in Kapitel 3.3 (S. 116) detaillierter eingegangen. Beim Abflug durchläuft der Passagier die in Abbildung 1.14 dargestellten Prozesse. Für den Erwerb des Tickets hat der Passagier mehrere Möglichkeiten. Zumeist wird das Ticket bei einem Reisebüro oder direkt bei der Airline erworben. Ein Aufenthalt im Terminal ist hierzu nicht notwendig (in Abbildung 1.14 weiß hinterlegt), jedoch kann der Passagier auch die vorhandenen Serviceeinrichtungen des Flughafens nutzen (Ticketschalter).

Beim Check-In erhält der Passagier nach Vorlage des Tickets seine Bordkarte und kann sein Reisegepäck aufgeben, wobei er je nach Airline eine gewisse Anzahl an Handgepäckstücken begrenzter Dimension mit ins Flugzeug nehmen darf (siehe Kapitel 3.4.2, S. 129ff). Die Regelungen zum Handgepäck sind airlinespezifisch<sup>13</sup> und basieren auf den Empfehlungen der International Air Transport Association [137]. Der Check-In kann ebenfalls außerhalb des Terminals in Form eines sog. *Web-* oder *Internet Check-In* erfolgen. Der Passagier erhält seine Bordkarte auf elektronischem Weg und kann, wenn er kein Reisegepäck aufgeben muss, direkt die nächste Abfertigungsstation Sicherheitskontrolle anlaufen. Je nach Ausgestaltung des Check-In Bereichs kann der Passagier sein vorhandenes Reisegepäck an so genannten *Baggage-Drop-Off* Schaltern abgeben.

---

<sup>12</sup> Wenn die Passagiere „aus einem Drittland [kommen], dessen Sicherheitsstandards nach dem in Artikel 19 (2) genannten Regelungsverfahren als den gemeinsamen Grundstandards [als nicht] gleichwertig anerkannt worden sind.“, VO (EG) 300/2008 Artikel 4

<sup>13</sup> „Der Luftfahrtunternehmer hat Verfahren festzulegen, die sicherstellen, dass nur solches Handgepäck in den Fluggastraum mitgenommen wird, das ordnungsgemäß und sicher verstaut werden kann.“ , EU-OPS 1.270 a



**Abbildung 1.14:** Prozessstationen bei Abfertigung eines abfliegenden Passagiers (*departure*).

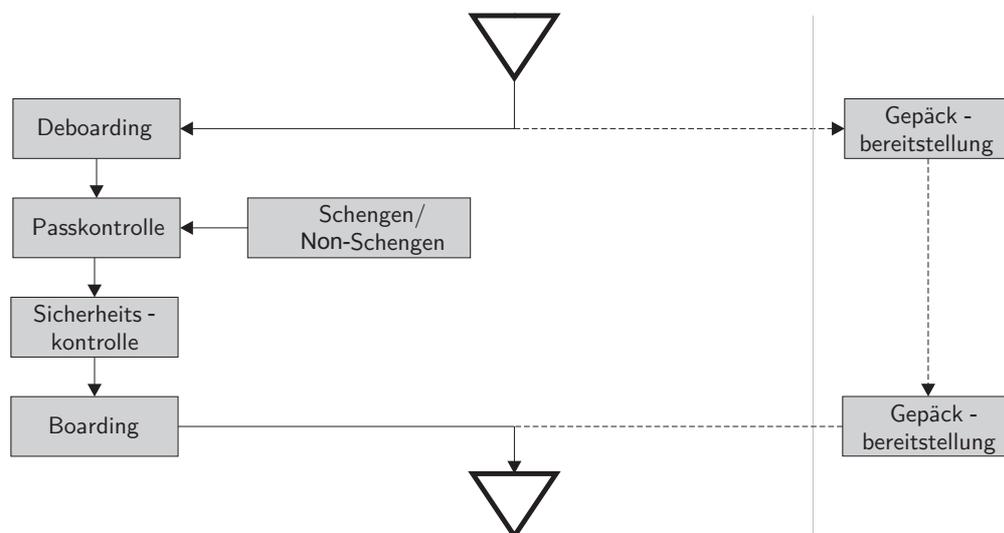
Durch den Check-In außerhalb des Terminals werden die Check-In Schalter innerhalb des Terminals entlastet, was zu einer effizienteren zeitlichen Ausgestaltung verbunden mit kürzeren Wartezeiten für den Passagier führen kann. Eine Entlastung der Check-In Schalter kann auch durch eine zeitliche Verschiebung erreicht werden, in dem Passagieren angeboten wird bereits am Vorabend einzuchecken. Neben dem klassischen Check-In am Schalter wird zunehmend auch der Check-In an Automaten angeboten, bei denen der Passagier die notwendigen Schritte (Identifikation, Eingabe der Reisegepäckart und -anzahl, Sitzplatzauswahl und Ausdruck der Bordkarte) selbständig durchführen kann. Das Reisegepäck muss anschließend ebenfalls zum Baggage-Drop-Off Bereich gebracht werden. Die Prozesse bei der Reisegepäckbearbeitung (Gepäcktransport, gestufte Sicherheitskontrolle, Gepäcksortierung und -bereitstellung) sollen hier nicht detaillierter betrachtet werden.

Ist der Passagier in Besitz einer Bordkarte muss er die Sicherheits- und gegebenenfalls die Passkontrolle<sup>14</sup> passieren. Bei der Sicherheitskontrolle ist es aus Sicht der Modellierung wichtig, zwischen einer dezentralen und einer zentralen Sicherheitskontrolle zu unterscheiden. Die dezentrale Sicherheitskontrolle erfolgt zumeist in relativer Nähe zum Gate und ist auf die jeweiligen Passagiere eines bestimmten Fluges beschränkt. Damit ist der nicht öffentlich zugängliche Bereich stark eingegrenzt. Im Gegensatz dazu erfolgt die zentrale Sicherheitskontrolle in relativer Nähe zu den Check-In Schaltern und ist für alle Passagiere

<sup>14</sup> siehe Schengener Abkommen - Übereinkommen zwischen den Regierungen der Staaten der Benelux-Wirtschaftsunion, der Bundesrepublik Deutschland und der Französischen Republik betreffend den schrittweisen Abbau der Kontrollen an den gemeinsamen Grenzen vom 14. Juni 1985 (GMBI. 1986, S. 79 ff.) oder auch Schengener Grenzkodex VO (EG) Nr. 562/2006

unabhängig von ihrem Flug zugänglich. Der sich an die Sicherheitskontrolle anschließende nicht öffentliche Bereich ist somit im Allgemeinen auch erheblich größer. Eine Passkontrolle ist nur für Passagiere mit einem Flugziel außerhalb des Schengener-Raumes notwendig. Der letzte Prozess beim Abflug ist das Betreten des Flugzeuges (*boarding*), bei dem der Passagier seine gültige Bordkarte und unter Umständen einen Identitätsnachweis vorzeigen muss. Das Gepäck wird zur gleichen Zeit parallel in den Flugzeugfrachtraum verladen.

Neben der Nutzung des Terminals als Schnittstelle von Land- und Luftseite, kann der Passagier das Terminal auch luftseitig betreten und wieder verlassen (Transfer, siehe Abbildung 1.15). Bei einem Transferflug erreicht der Passagier das Terminal als eine Zwischenstation auf seiner Reise und verlässt das Flugzeug für einen kurzen Aufenthalt oder wechselt das Flugzeug zur Weiterreise. Dieser Prozess ist typisch bei einer *hub and spoke* Struktur, bei dem Umsteigepassagiere von sekundären Flughäfen (*spokes*) einem zentralen Verkehrsknotenpunkt (*hub*) zugeführt werden.

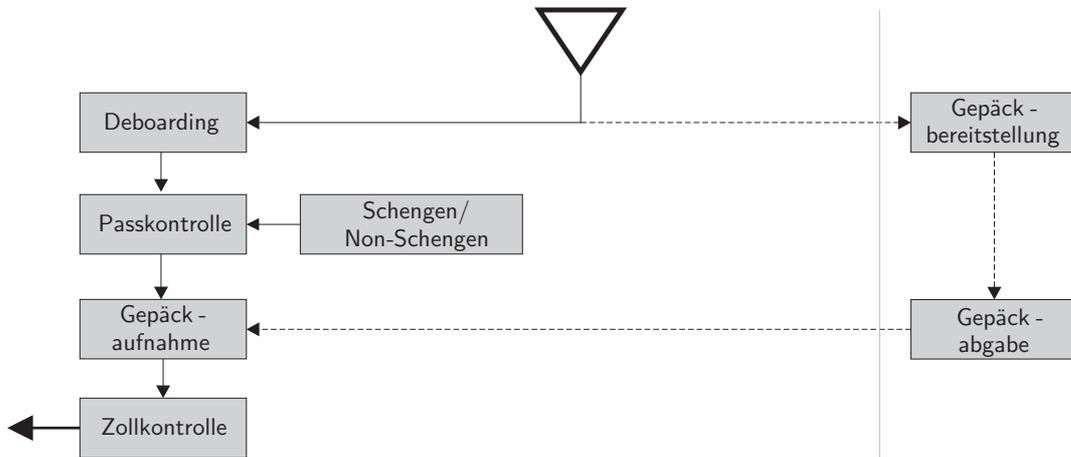


**Abbildung 1.15:** Prozessstationen bei der Abfertigung eines Transfer-Passagiers.

Das Gepäck wird beim Wechsel des Passagiers zumeist automatisch umgeladen. Es ist jedoch auch möglich, dass die Passagiere ihr Reisegepäck selbst wieder aufnehmen und für den Weiterflug erneut einchecken müssen. Notwendige Pass- und Sicherheitskontrollen erfolgen dann analog zum Abflug. Eine Sonderstellung im Sinne der Passagierabfertigung nehmen die Flüge ein, bei denen die Passagiere während einer Zwischenlandung das Flugzeug nicht verlassen, da keine terminalseitigen Abfertigungsprozesse notwendig sind.

Die Prozesse bei der Ankunft am Zielflughafen sind in Abbildung 1.16 dargestellt und beginnen mit dem Aussteigen des Passagiers aus dem Flugzeug (*deboarding*). Das Betreten und Verlassen des Flugzeuges kann direkt am Terminal (*terminal position*, Passagiere nutzen Fluggastbrücken) oder auch auf dem Vorfeld (*remote position*) stattfinden, wobei

der Transfer zwischen den Vorfeldpositionen und dem Terminal mit einem Bus-Shuttle durchgeführt wird.



**Abbildung 1.16:** Prozessstationen bei der Abfertigung eines ankommenden Passagiers (*arrival*).

Wenn der Passagier aus einem Non-Schengen Land einreist, findet zusätzlich nach dem Verlassen des Flugzeuges eine Einreisekontrolle (Passkontrolle) statt. Bei der Einreise von einem Mitgliedsstaat des Schengener Abkommens nach Deutschland ist keine Zollkontrolle notwendig, wenn die im Ausland erworbenen Waren für den privaten Gebrauch sind und die zulässigen Freimengen nicht übersteigen [138]. Wenn eine gewerbliche Verwendung gegeben ist oder die Freimengen überschritten werden, muss der Passagier diese grundsätzlich beim Zoll anmelden [139]. Nach dem der Passagier die Zollkontrolle passiert hat, befindet er sich im Allgemeinen wieder im öffentlichen Bereich des Terminals und kann die angebundenen Verkehrsstrukturen für seine Weiterreise nutzen.

Nach der Darlegung der grundlegenden Passagierabfertigungsprozesse im Terminal und den zuvor beschriebenen allgemeinen Modellierungsansätzen für die Abbildung des Passagierverhaltens stellen die Anforderung an das zu entwickelnde applikationsorientierte Modell die Grundlage für die weiteren Schritte dar.

## 1.5. Anforderungen an ein applikationsorientiertes Modell

Aus den bereits vorhandenen Erkenntnissen der mikroskopischen Ansätze zur Modellierung der Personendynamik können erste Anforderungen an das zu entwickelnde Modell für die Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren abgeleitet werden. Die Anforderungen sind im Einzelnen:

- Das Bewegungsverhalten der Passagiere muss auf Basis eines mikroskopischen Modellansatzes erfolgen, mit dem die wesentlichen Eigenschaften des Passagiers abgebildet werden können.
- Für die effiziente Abbildung aller im Flughafenterminal ablaufenden Passagierabfertigungsprozesse muss eine Trennung zwischen der Modellierung der Abfertigungsprozesse und der Bewegungsabbildung der Passagiere erfolgen.
- Alle spezifischen prozess- und passagierbezogenen Eigenschaften (Parameter) müssen durch zielgerichtete empirische Messungen erhoben und analysiert werden.
- Eine Validierung der entwickelten Modelle für die Abfertigungsprozesse und der Bewegungsabbildung der Passagiere stellt sicher, dass die Anwendung des Modells im praxisnahen Umfeld zu nachhaltigen und qualitativ hochwertigen Ergebnissen führt.

In einem ersten Schritt erfolgt die Entwicklung eines geeigneten Bewegungsmodells und es wird der Nachweis erbracht, dass das entwickelte Modell realitätskonforme Ergebnisse liefert. Im nächsten Schritt wird eine geeignete Datenbasis erhoben und ein stochastisches Modell ausgearbeitet, um die im Terminal ablaufenden Passagierabfertigungsprozesse adäquat abbilden zu können. Die Implementierung und Anwendung des Modells ist Bestandteil des darauf folgenden Kapitels. In einer Schlussbetrachtung werden abschließend die erreichten Ergebnisse kritisch gewürdigt und ein Ausblick auf weitere Entwicklungspotentiale gegeben.

In **Kapitel 2** erfolgt die schrittweise Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal. Als Basis dient das allgemeine Modell des zellularen Automaten (Kapitel 2.1, S. 38ff), das bereits bei einfachen Implementierungen gezielt zu wissenschaftlichen Untersuchungen herangezogen werden kann. Aufbauend auf vorhandenen Ansätzen wird das allgemeine Modell gezielt erweitert (Kapitel 2.2, S. 46ff), um den Anforderungen an die realitätsnahe Abbildung des Bewegungsverhaltens der Passagiere zu genügen. Die Herausforderung besteht in der methodischen Aufbereitung des von Burstedde et al. [67] vorgestellten stochastischen Modellansatzes und der Modellkalibrierung sowie in der Entwicklung geeigneter Erweiterungen zur Richtungswahlbestimmung (Kapitel 2.3, S. 63ff) und zur Interaktionsmodellierung (Kapitel 2.4, S. 77ff).

In **Kapitel 3** steht die Erhebung einer geeigneten Datenquelle und die Entwicklung eines stochastischen Modells zur Beschreibung der Passagierabfertigungsprozesse im Vordergrund. Hierfür erfolgt die methodische Entwicklung einer videogestützten Bewegungsverfolgung (Kapitel 3.1, S. 86ff) und die Auswertung realer Bewegungsspuren von Passagieren im Terminal (Kapitel 3.2, S. 98ff). Die gezielte Erhebung der Prozesszeiten aller relevanter Abfertigungsprozesse unter Variation von signifikanten Randbedingungen (z. B.

Gruppengröße, Passagierklientel oder Gepäckanzahl) ist Bestandteil des darauffolgenden Abschnittes (Kapitel 3.4, S. 119ff).

In **Kapitel 4** wird das Bewegungsmodell der Passagiere und das Modell zur Abbildung der Abfertigungsprozesse in eine Simulationsumgebung implementiert und auf flughafen-spezifische Fragestellungen angewendet. Während für grundlegende (eindimensionale) Bewegungsmodelle einfache Implementierungen ausreichen (Kapitel 4.2, S. 152ff), muss für den Anwendungsfall des Flughafenterminals eine komplexere Implementierungsstrategie auf der Grundlage eines Eclipse-basierten Frameworks<sup>15</sup> erfolgen (Kapitel 4.1, S. 140ff). Die entwickelte Anwendungsumgebung stellt eine geeignete Schnittstelle zur effizienten Einbindung des individuenbasierten Bewegungsmodells dar und ermöglicht die Validierung der Modellannahmen, die passagierbezogene Prozessbewertung und eine angemessene Repräsentation der Passagierabfertigungsprozesse innerhalb einer virtuellen Terminalumgebung (Kapitel 4.3, S. 168ff).

In **Kapitel 5** erfolgt eine kritische Bewertung der erreichten Ergebnisse bei der Modellierung, Datenerhebung und der Implementierung. Abschließend werden Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt und Impulse für weitergehende Forschungsarbeiten gegeben.

---

<sup>15</sup> Eclipse ist eine quelloffene Software-Plattform sowie eine integrierte Entwicklungsumgebung (siehe [www.eclipse.org](http://www.eclipse.org)).