

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

| | |
|---|-----------|
| 1. Methodische Konzeption | 1 |
| 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 |
| 2. Individuenbasiertes Bewegungsmodell | 37 |
| 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 |

| | |
|---|------------|
| 3. Datenerhebung im Flughafenterminal | 85 |
| 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 |
| | |
| 4. Anwendungen | 139 |
| 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 |
| | |
| 5. Schlussbetrachtungen | 195 |
| | |
| A. Anhang | 201 |
| | |
| Literaturverzeichnis | 205 |
| | |
| Danksagung | 223 |

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 Transportkapazität¹ 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].

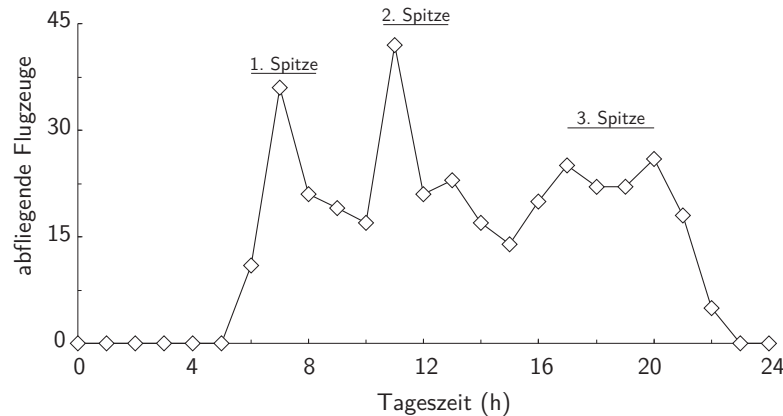


Abbildung 1.1: Stundenbasierte Zusammenfassung der Abflüge am Flughafen Düsseldorf, Flugplan vom 22.10.2009 .

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,

¹ 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 ϵ -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.

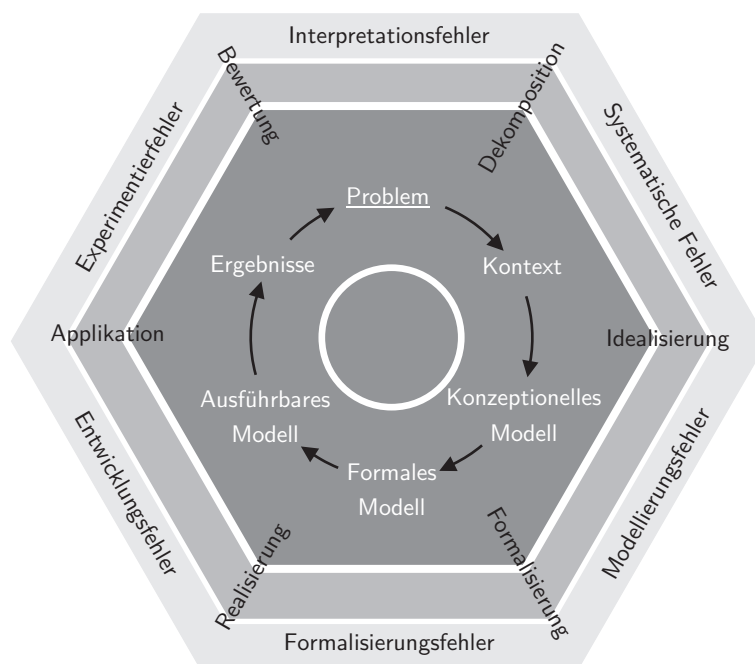


Abbildung 1.2: Allgemeine Vorgehensweise bei der Modellerstellung. [vgl. 16, 17]

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 Gesamt Ablauf 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).

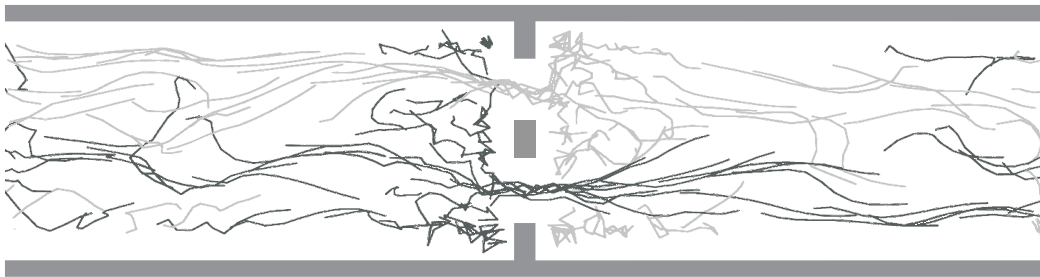


Abbildung 1.3: Die Verwendung von zwei Durchgängen führt zur (effizienten) Aufteilung von entgegen gerichteten Personenströmen [37].

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 werden². Die Stellung als dritter wissenschaftlicher methodischer Ansatz³ 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]).

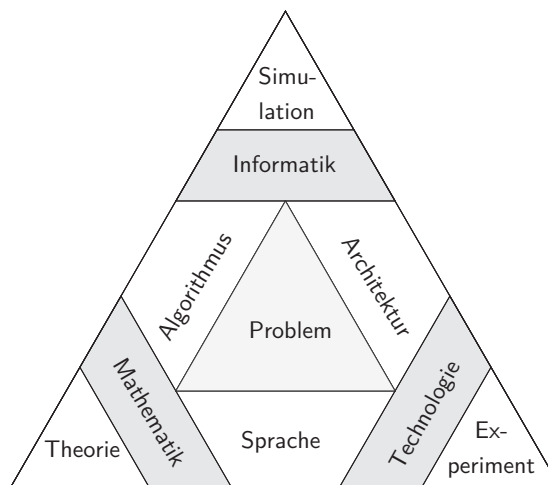


Abbildung 1.4: Dreieck der wissenschaftlichen Methoden [45].

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

² „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]

³ „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 folgen⁴.

Der Einsatz von Computern erlaubt die Verwendung einer großen Bandbreite von Eingangsparametern und die Analyse von umfangreichen und detaillierten Ergebnisdatsätzen⁵. 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 hervorzau-

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

⁵ „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

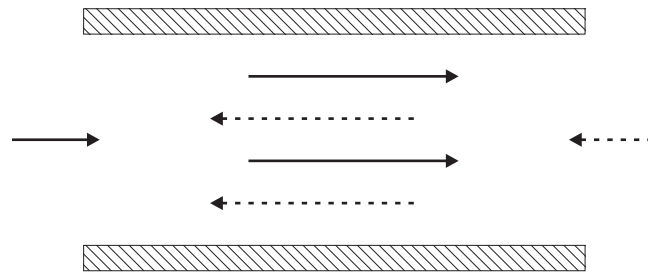


Abbildung 1.5: Bahnenbildung bei entgegengerichteten Personenströmen in einem Korridor [2].

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.

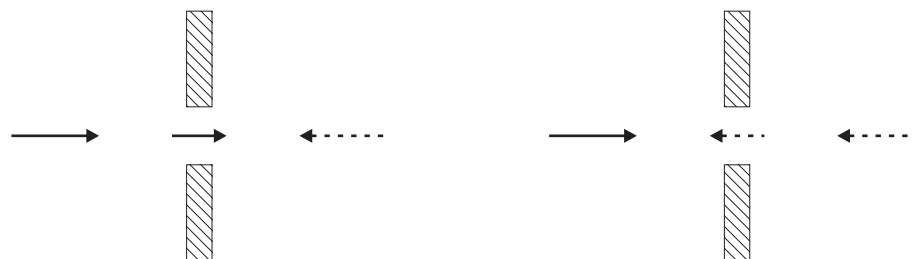
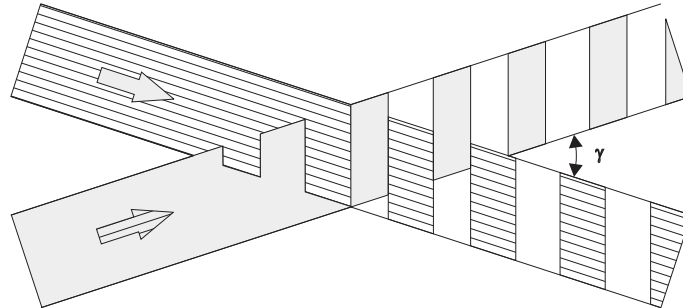


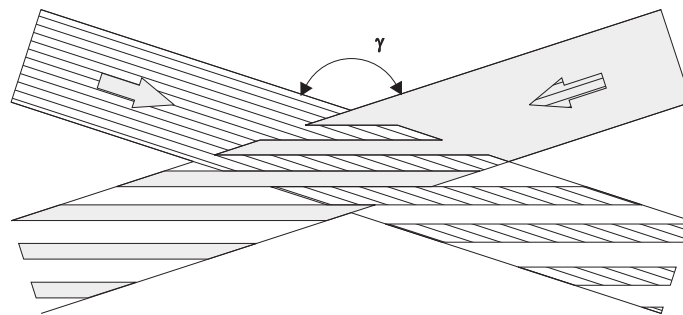
Abbildung 1.6: Wechselseitiger Durchlass an engen Durchgängen, Oszillation [2].

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 γ und fast gleichgerichteten Personenströmen.



(b) Längsausprägung bei stumpfem Winkel γ 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 unbegrenztes 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.

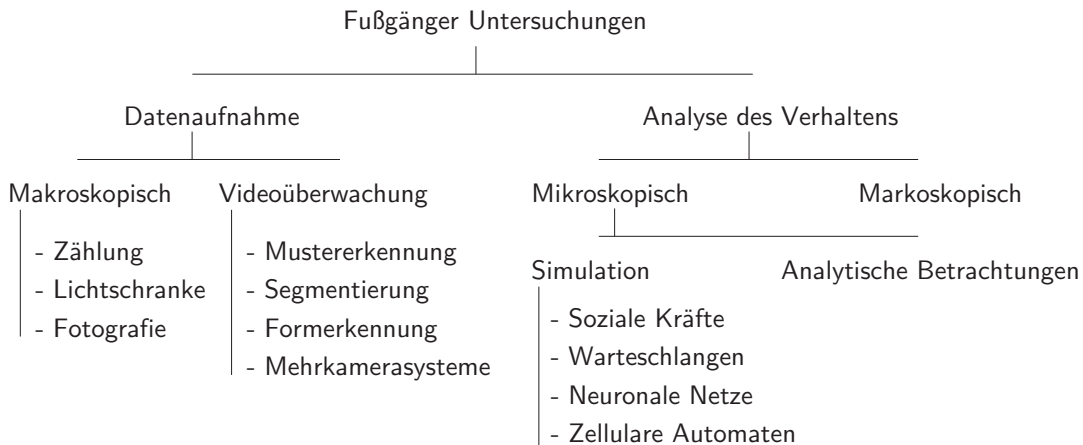


Abbildung 1.8: Übersicht über die Entwicklung von Modellen zur Abbildung menschlicher Verhaltensweisen (in Anlehnung an [92]).

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 γ 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 α durch den Ortsvektor \vec{x} (\mathbf{x}) und Geschwindigkeitsvektor \vec{v} (\mathbf{v}) beschrieben⁶. Unter der Annahme, dass jeder Agent eine individuelle Richtung und Geschwindigkeit anstrebt, stellt \mathbf{f}_α in (1.3) die spezifische Antriebskraft des Agenten dar⁷. Die abstoßenden Kräfte sind bezogen auf die umgebenden Agenten β 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 Δt 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).

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

⁷ 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_α . 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 τ (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 α und β 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 Wahrnehmung⁸. Wenn sich der Agent β hinter α befindet, hat dieser somit einen geringeren Einfluss auf die Bewegungsrichtung von α , als wenn sich β vor α 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 λ in den Grenzen $[0, 1]$ definiert. Mit zunehmendem Einfluss der Agenten hinter α nimmt auch die Größe von λ zu. Erreicht λ den Wert 1, haben alle umgebenen

⁸ $\pm 94^\circ$, DIN 33414E Teil 1 und DIN 33402

Agenten den gleichen Einfluss auf α . 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_α und R_β 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 .

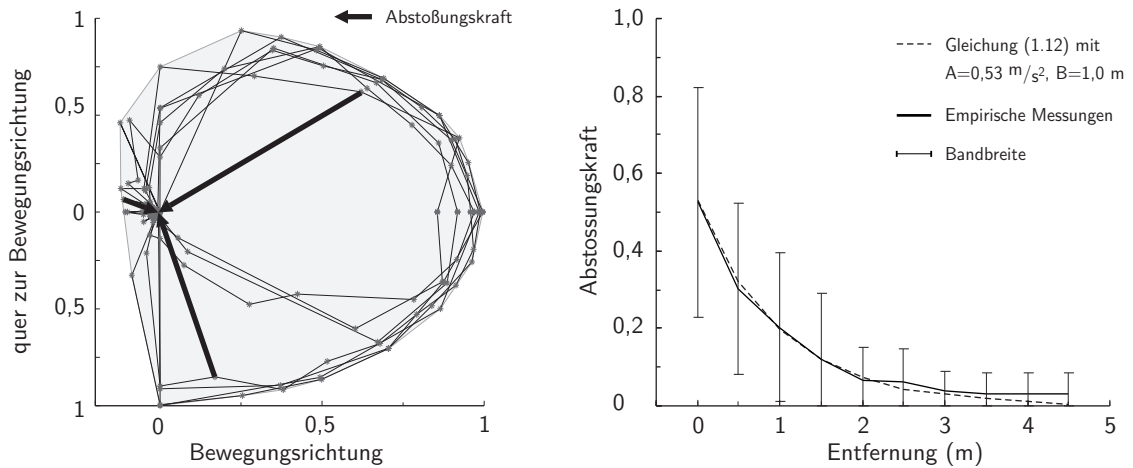
$$\mathbf{g}(\mathbf{d}_{\alpha\beta}(t)) = A e^{(R_\alpha + R_\beta - d_{\alpha\beta}(t))/B} \hat{\mathbf{d}}_{\alpha\beta}(t) \quad (1.12)$$

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

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

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° und nicht von 60° 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

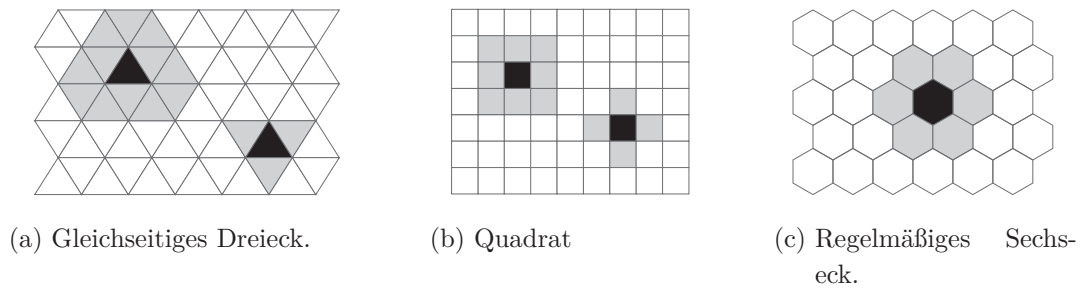


Abbildung 1.10: Reguläre Gitterstrukturen auf Basis von gleichseitigen Dreiecken, Quadraten und regelmäßigen Sechsecken mit Moore- (oben links) und von-Neumann-Nachbarschaftsrelationen (unten rechts).

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.

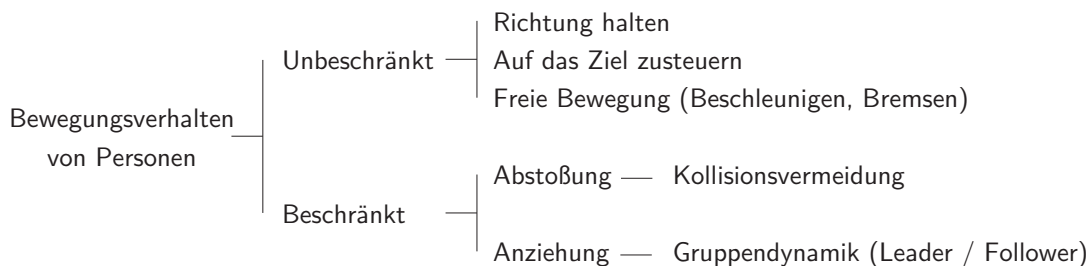


Abbildung 1.11: Einteilung des individuellen Bewegungsverhaltens unter Verwendung des *discrete choice* Modells [99].

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 Wahrnehmung⁹, 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.

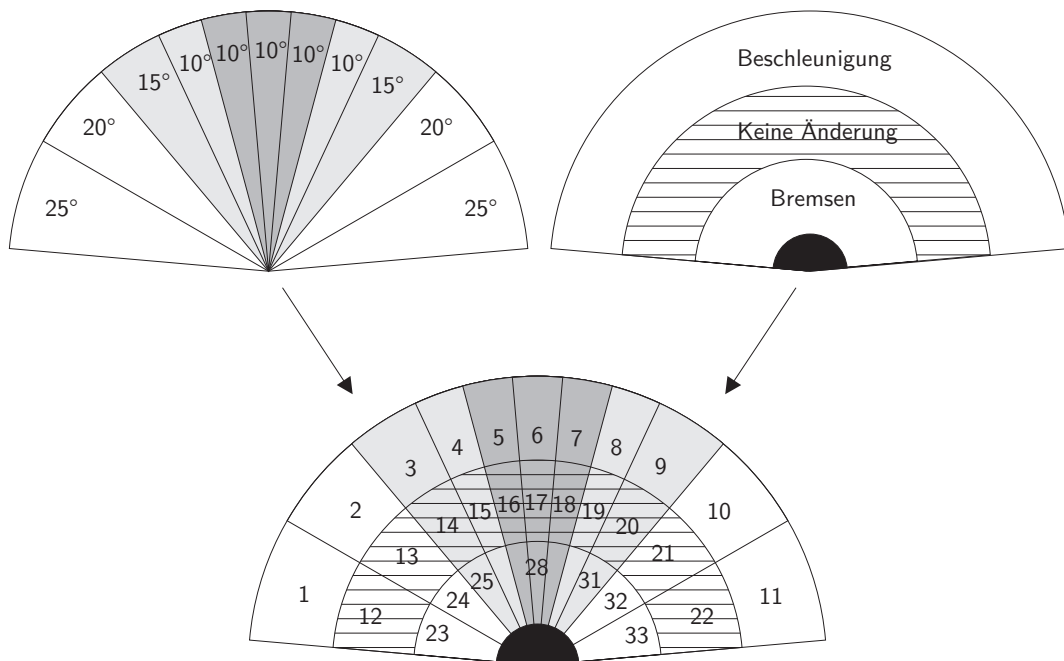


Abbildung 1.12: *discrete choice*: Richtungswahl (oben links), Geschwindigkeitsbestimmung (oben rechts) und aggregiertes Modell [114].

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

⁹ 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 β , die Indikatoren I_d sowie die Winkel dir_{dn} zwischen den Verbindungslinien von Position zu Zellenmittelpunkten und der Bewegungsrichtung von Bedeutung. Der Modellparameter β 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 β_{zentral} , β_{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

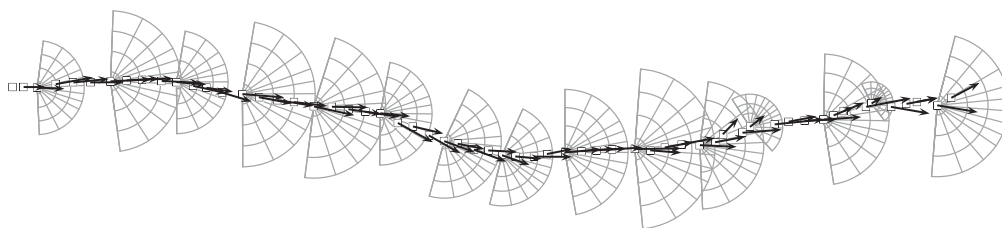


Abbildung 1.13: Trajektorie unter Verwendung des *discrete choice* Modells [114].

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 Gefahren¹⁰). Da für die regulären Passagier-

¹⁰ „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 werden¹¹. Während alle Gegenstände auf dem Transportband

¹¹ 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.¹² 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 airlinespezifisch¹³ 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.

¹² 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

¹³ „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

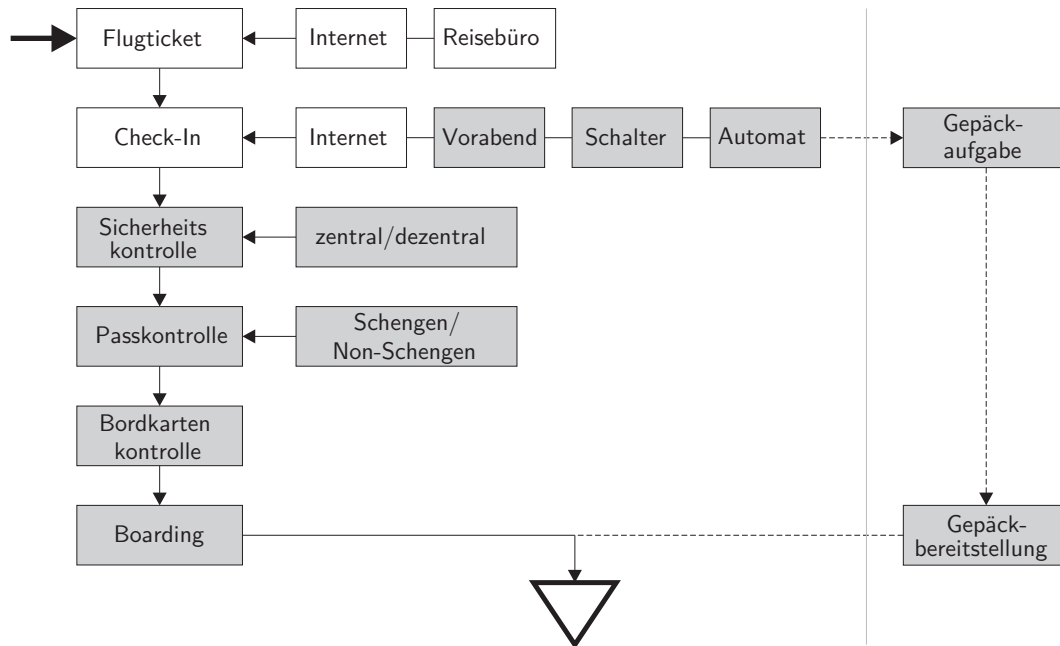


Abbildung 1.14: Prozessstationen bei Abfertigung eines abfliegenden Passagiers (*departure*).

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 Passkontrolle¹⁴ 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

¹⁴ 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.

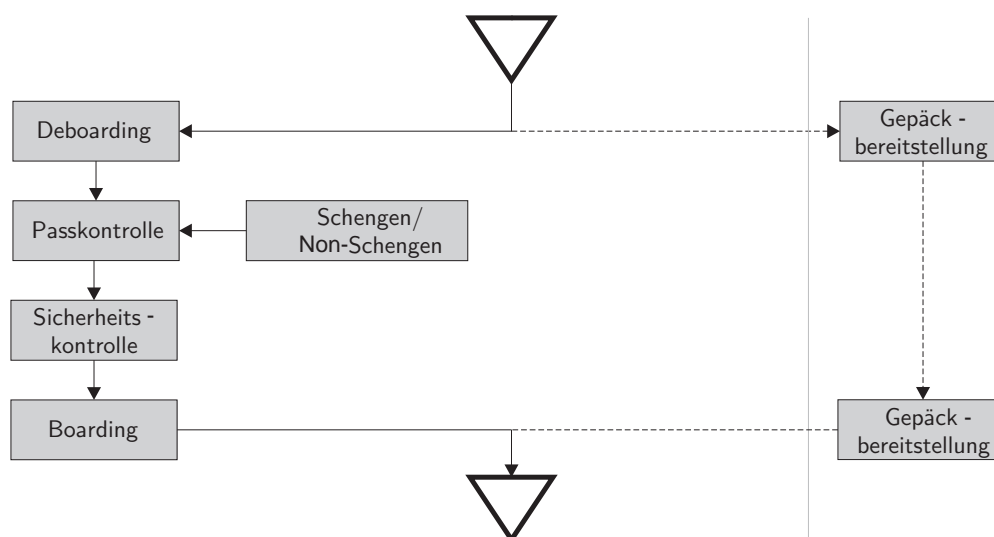


Abbildung 1.15: Prozessstationen bei der Abfertigung eines Transfer-Passagiers.

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. Der Passagier muss gegebenenfalls die Passkontrolle durchlaufen und kann anschließend sein aufgegebenes Reisegepäck am ausgewiesenen Gepäckbereich wieder entgegennehmen.

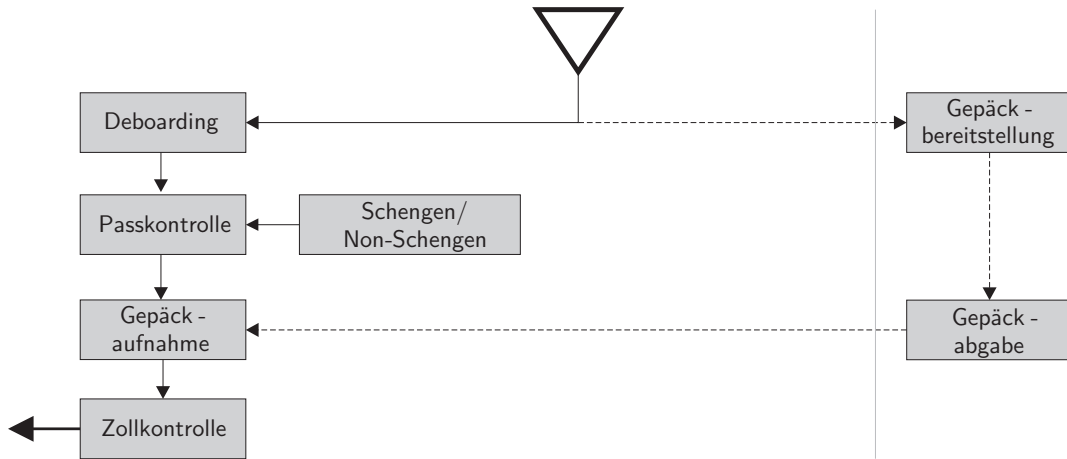


Abbildung 1.16: Prozessstationen bei der Abfertigung eines ankommenden Passagiers (*arrival*).

Wenn der Passagier aus einem Non-Schengen Land einreist, findet zusätzlich nach dem Verlassen des Flugzeuges die 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 Mo-

dellansatzes 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 [Burstvedde 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 Frameworks¹⁵ 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 Terminallumgebung (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.

¹⁵ Eclipse ist eine quelloffene Software-Plattform sowie eine integrierte Entwicklungsumgebung (siehe www.eclipse.org).

2 | Individuenbasiertes Bewegungsmodell

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Bewegungsmodell zur Abbildung menschlicher Verhaltensweisen sind während der vorangegangenen methodischen Konzeption erstellt worden. Im nachfolgenden Kapitel wird basierend auf diesen Anforderungen ein geeignetes mathematisches Modell entworfen. Der Modellentwurf wird schrittweise durchgeführt, so dass unter Verwendung erreichter Ergebnisse die nächsten Modellerweiterungen im folgerichtigen Kontext stehen. Der entwickelte stochastische Modellansatz bildet die variierenden individuellen Entscheidungsfindungen von Personen durch die Formulierung von Übergangswahrscheinlichkeiten ab, wobei die Entscheidungen für die Bewegungsrichtung der Personen aus individuellen strategisch/taktischen Abwägungen entstehen.

Mit dem Entwurf eines stochastischen Bewegungsmodells werden die Grundlagen für die Abbildung menschlicher Verhaltensweisen in komplexen Umgebungen gelegt (z. B. im Flughafenterminal, siehe Kapitel 4 (S. 139ff)). Der Entwurf baut hierarchisch auf den jeweils vorigen Entwicklungsstufen auf. Beginnend mit einem

- eindimensionalen Modell des zellularen Automaten (Kapitel 2.1, S. 38ff)
- wird das Modell um eine zweite räumliche Dimension erweitert (Kapitel 2.2, S. 46ff),
- dann durch eine Umgebungsanalyse ergänzt (Kapitel 2.3, S. 63ff)
- und abschließend durch die Modellierung der individuellen Interaktionen vervollständigt (Kapitel 2.4, S. 77ff).

Anhand eines eindimensionalen stochastischen Bewegungsmodells können bereits fundamentale Eigenschaften des Bewegungsverhaltens dargestellt werden, jedoch muss dieser grundlegende Ansatz erweitert werden, um das menschliche Bewegungsverhalten realitätsnah zu modellieren. Bei der Bewegung von Personen kann nicht grundlegend von einem deterministischen Verhalten ausgegangen werden. In fast identischen Situationen kann sich eine Person aufgrund von sehr geringen Änderungen der Umgebung oder der inneren Einstellung für eine andere Lösung der gestellten Bewegungsaufgabe entscheiden. Da der vorgestellte stochastische Ansatz auf den Prinzipien des zellularen Automaten aufbaut, bildet er die variierende Entscheidungsfindung durch die Definition von räumlich diskreten Übergangswahrscheinlichkeiten ab. Der dem Modell zugrunde liegende stochas-

tische Ansatz wird der in deterministischen Modellen häufig angewendeten Überlagerung der Bewegung mit einem künstlichen Rauschen vorgezogen. Die Verwendung eines zeit- und ortsdiskreten Automatenmodells besitzt jedoch modellbedingte Einschränkungen, die durch erweiterte Algorithmen kompensiert werden müssen (Kapitel 2.2.1, S. 51ff).

Die menschliche Bewegungsintention entsteht auf einer strategisch/taktischen Ebene, in der abhängig von der Umgebung (Geometrie oder Hindernisse) und individuellen Restriktionen (z. B. Zeitvorgaben, Zwischenziele oder individuelle Nutzendefinitionen) Richtungsvorgaben generiert werden. Um in komplexen Umgebungen navigieren zu können, müssen von Seiten des Modells geeignete Richtungsinformationen bereitgestellt werden. Mit Hilfe der Umgebungsanalyse und der Modellierung der Interaktionen zwischen den Individuen werden die virtuellen Personen in die Lage versetzt, operational auf kleinere Hindernisse (z. B. Gepäckwagen oder Menschenansammlungen) mit einer angepassten Bewegungsrichtung zu reagieren. Die Wahl von Bewegungsrouten unter Verwendung von vorhandenem Wissen über die umgebenen Strukturen sowie die Bewertung von zukünftigen Entwicklungen (z. B. Stau an potentiellen Engstellen oder Warteschlangen an den Prozessstationen) würden neben den operationalen Verhaltensweisen auch eine strategisch/taktische Ausrichtung der Bewegung erlauben.

2.1. Eindimensionale Modellansätze

Das menschliche Verhalten lässt sich in zeitliche, räumliche und strategisch/taktische Komponenten aufteilen. Eindimensionale Modellansätze beschreiben unter Verwendung von einfachen Regelsätzen den zeitlich voranschreitenden, räumlichen Zustandsübergang. Für die stochastische Beschreibung der Zustandsübergänge wird im Folgenden näher auf den *random walk* und den *asymmetric simple exclusion process* (ASEP) eingegangen. Während der *random walk* eine ungerichtete Bewegung darstellt, beschreibt der ASEP einen räumlich gerichteten Prozess. Das in Verbindung mit dem ASEP vorgestellte Nagel-Schreckenberg-Verkehrsmodell zeigt, dass bereits elementare Regeln für die realitätsnahe Abbildung von Verkehrsprozessen ausreichen [120].

2.1.1. Random walk

Das einfachste Modell eines zufälligen, ungerichteten Bewegungsablaufs stellt die eindimensionale Bewegung dar, mit der Möglichkeit, die eigene Position nach vorne oder nach hinten zu verändern (die Möglichkeit des Stehenbleibens findet in den folgenden Ausführungen keine Berücksichtigung). Wenn die jeweiligen Schritte von einander unabhängig sind und somit der nächste Schritt nur von der aktuellen Position abhängig ist, handelt es sich bei diesem Prozess um einen *random walk* [140]. Die Wahrscheinlichkeit $P(x, t)$, dass eine Position x zur Zeit t besetzt ist (Aufenthaltswahrscheinlichkeit), ergibt sich aus

den Übergangsmöglichkeiten die Position x zu verlassen ($P'(x \rightarrow x')$) oder von außen zu betreten ($P'(x' \rightarrow x)$). Im Folgenden wird ein vorwärts gerichteter Übergang mit der Wahrscheinlichkeit p^+ (2.1) und ein rückwärts gerichteter Übergang mit der Wahrscheinlichkeit p^- (2.2) definiert.

$$p^+ = P'(x \rightarrow x + 1) = P'(x - 1 \rightarrow x) \quad (2.1)$$

$$p^- = P'(x + 1 \rightarrow x) = P'(x \rightarrow x - 1) \quad (2.2)$$

Werden die Übergangswahrscheinlichkeiten mit den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten¹ gewichtet, ergibt sich die Besetzungswahrscheinlichkeit $P(x, t)$ von Position x zum Zeitpunkt t gemäß (2.3).

$$P(x, t) = p^+ [P(x - 1, t - 1) - P(x, t - 1)] + p^- [P(x + 1, t - 1) - P(x, t - 1)] \quad (2.3)$$

Zur räumlichen Abbildung des *random walk* wird von einer festen Position $x_{t=0}$ ausgehend die nächste Position x_{t+1} durch die Addition einer Zufallsgröße ϵ_x bestimmt.

$$x_{t+1} = x_t + \epsilon_x \quad (2.4)$$

Für die nachfolgende Darstellung des zeitlichen Verlaufes des *random walk* wird die Zufallsgröße ϵ_x gleichverteilt in den Intervallgrenzen $[0, 1]$ definiert. Die mittlere Schrittweite $\bar{\epsilon}_x$ beträgt somit 0,5. Mit der Wahrscheinlichkeit p^+ erfolgt ein Schritt vorwärts ($x_{t+1} = x_t + \epsilon_x$) und mit der Wahrscheinlichkeit p^- erfolgt ein Schritt rückwärts ($x_{t+1} = x_t - \epsilon_x$). Da ein Stehenbleiben ausgeschlossen wurde, gilt ferner:

$$p^+ + p^- = 1 \quad (2.5)$$

Um keine bevorzugte Bewegungsrichtung festzulegen, sind im folgenden Beispiel die Wahrscheinlichkeiten mit $p^+ = p^- = 0,5$ definiert. Daraus ergibt sich ein Erwartungswert der Position von $\bar{x} = 0$. Da zu jedem Zeitschritt t die gleiche unabhängige diskrete Entscheidung zu treffen ist, kann die Wahrscheinlichkeit P_N , nach N Schritten einen Punkt $x \leq N$ zu erreichen, auch direkt durch die Binomialverteilung (2.6) bestimmt werden.

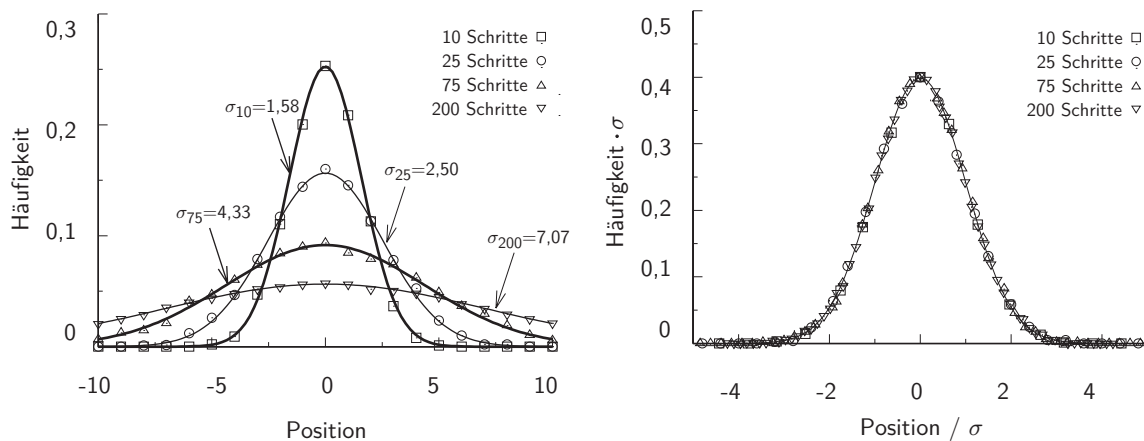
¹ Die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten $P(x, t - 1)$ und $P(x', t - 1)$ geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die jeweiligen Positionen zum vorangegangenen Zeitpunkt besetzt sind.

$$P_N(x) = \binom{N}{x} p^x q^{N-x} \tag{2.6}$$

Die Standardabweichung σ wächst allgemein mit der Anzahl der zurückgelegten Schritte N nach dem folgenden Verhältnis:

$$\sigma = \bar{\epsilon}_x \sqrt{N} \quad . \tag{2.7}$$

Gemäß (2.7) führt die Wahl einer größeren mittleren Schrittweite $\bar{\epsilon}$ erwartungsgemäß zu einer höheren Standardabweichung bei der Positionsveränderung. Die Erhöhung der Schrittzahl führt ebenfalls zur Erhöhung der Standardabweichung (siehe Abbildung 2.1(a)). Im Grenzfalle $N \rightarrow \infty$ strebt die Binomialverteilung gegen eine Normalverteilung. Der Übergang der Binomialverteilung zur Standard-Normalverteilung erfolgt durch die Skalierung der Messwerte mit der entsprechenden Standardabweichung σ_N in Abbildung 2.1(b) gut zuerkennen.



(a) Erhöhung der Standardabweichung σ_N durch Variation der Schrittzahl $N = 10, 25, 75, 200$.
 (b) Normierte Darstellung durch Gewichtung von Abszisse und Ordinate mit der spezifischen Standardabweichung σ_N .

Abbildung 2.1: Variation der Schrittzahl und Normierung der Bewegungsverläufe.

Für eine zweidimensionale Bewegung kann die zusätzliche unabhängigen Bewegungskomponente y in Analogie zu (2.4) definiert werden.

$$y_{t+1} = y_t + \epsilon_y \tag{2.8}$$

Der *random walk* stellt in der vorgestellten Ausprägung lediglich eine ungerichtete, diffuse Bewegung dar. Dieses grundlegende Modell zur Bewegungsabbildung kann jedoch als

Basis für die Beschreibung von komplexen menschlichen Verhaltensmustern dienen, wenn weitere Faktoren berücksichtigt werden. Neben der zufälligen Bewegungskomponente sind zur Abbildung des menschlichen Bewegungsverhaltens ebenfalls Faktoren wie beispielsweise geometrische Randbedingungen (z. B. Position und Dimension von Hindernissen), soziale Interaktionen (anziehende oder abstoßende Wirkung der Personen untereinander) oder auch die Bewegungsintention entscheidende Modellmerkmale [vgl. 141].

2.1.2. Asymmetric simple exclusion process (ASEP)

Der *asymmetric simple exclusion process* (ASEP) beschreibt einen gerichteten Teilchenhüpfprozess auf einem eindimensionalen, regelmäßigen Gitter und kann als eine Erweiterung des *random walk* verstanden werden. Unter Verwendung von stochastischen Bewegungsabläufen und einfachen (lokalen) Bewegungsregeln können bereits komplexe Verhaltensmuster modelliert werden [120, 121, 142, 143]. Um erste grundlegende Erkenntnisse für die nachfolgende Entwicklung eines zweidimensionalen Bewegungsmodells zu erlangen, wird der ASEP kurz vorgestellt, implementiert und analysiert. Im Fokus der Analyse steht das Aktualisierungsverfahren, durch welches die Reihenfolge der Positionsaktualisierungen bestimmt wird, und die Auswirkungen unterschiedlicher Aktualisierungsstrategien.

Beim ASEP nimmt ein Teilchen exakt eine Gitterzelle ein. Der Übergang eines Teilchens erfolgt von seiner Position auf die angrenzende (rechte) Gitterzelle (probabilistischer Zellularautomat nach [119]). Mit voranschreitender Zeit betreten die Teilchen eine Reihe von aufeinanderfolgenden Positionen (Abbildung 2.2). Dabei stellt α die Eintrittswahrscheinlichkeit in das System dar. Mit der Austrittswahrscheinlichkeit β verlassen die Teilchen das System, wenn sie bei der letzten Position angekommen sind. Der Übergang auf eine benachbarte Position erfolgt mit der Übergangswahrscheinlichkeit p (*asymmetric*). Das Ausschlusskriterium (*simple exclusion*) besagt, dass ein Übergang nur möglich ist ($p > 0$), wenn sich kein anderes Teilchen auf der gewählten benachbarten Position aufhält. Der Ablauf ist vergleichbar mit der Bewegung von Personen in einem engen Gang, in dem kein gegenseitiges Überholen möglich ist.

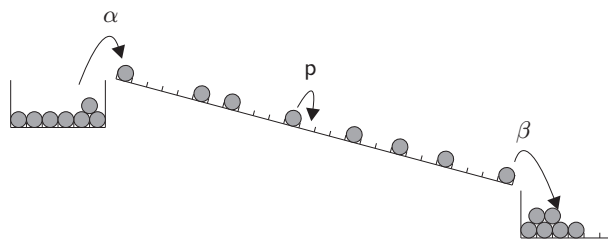


Abbildung 2.2: Allgemeine Darstellung des ASEP [142].

Eine erfolgreiche Anwendung des Modells im Bereich des Straßenverkehrs ist bereits durch die Verwendung von einfachen Regeln umgesetzt (spontane Staubildung im Nagel-Schreckenberg-Verkehrsmodell [120]). Die für den Straßenverkehr geltenden Regeln werden für alle vorhandenen Teilchen (Fahrzeuge) gleichzeitig (parallel) ausgeführt. Die Regeln umfassen die Beschleunigung, die Geschwindigkeitsanpassung, das Trödeln und das Fahren.

- **Beschleunigung:**

Ein Fahrzeug beschleunigt um einen definierten Geschwindigkeitsbetrag Δv in jedem Zeitschritt t_n , wenn es langsamer als seine maximale Geschwindigkeit v_{\max} fährt.

- **Geschwindigkeitsanpassung:**

Das Fahrzeug passt seine Geschwindigkeit dem zum Vordermann vorhandenen Platz an.

- **Trödeln:**

Die Geschwindigkeit reduziert sich um einen definierten Geschwindigkeitsbetrag Δv mit der Wahrscheinlichkeit r .

- **Fahren:**

Jedes Fahrzeug nimmt gemäß seiner aktuellen Geschwindigkeit seinen neuen Platz ein.

Erst die Implementierung des Trödelns erlaubt dem Modell die dynamische Abbildung der Übergangsprozesse. Um die Gegebenheiten des Straßenverkehrs realitätsnah abzubilden, wird angenommen, dass eine Zelle eine Länge von 7,5 m aufweist und ein Fahrzeug pro Zeitabschnitt (Runde) bis zu 5 Zellen zurücklegen kann. Bei einem Zeitschrittweite von $\Delta t = 1 \text{ s}$ entspricht das einer maximalen Geschwindigkeit von $v_{\max} = 135 \text{ km/h}$ mit $\Delta v = 27 \text{ km/h}$ [120]. Aus empirischen Untersuchungen ist bekannt, dass mit zunehmender Verkehrsdichte die Wahrscheinlichkeit eines Staus steigt und dass die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge charakteristisch abnehmen [54]. Bis zu einer bestimmten Verkehrsdichte ($\rho \approx 10\text{-}20\%$) nimmt der spezifische Verkehrsfluss² J_s mit steigender Fahrzeuganzahl zu, da es kaum Interaktionen zwischen den beteiligten Fahrzeugen gibt. Mit stetig zunehmender Fahrzeugdichte erhöht sich die Anzahl der Interaktion zwischen den Fahrzeugen und die unterschiedlichen individuellen Reaktionen können somit auch weitreichende Konsequenzen auf das gesamte Verkehrsgeschehen haben. Die Einteilung des Verkehrsflusses erfolgt bezogen auf die Fahrzeugdichte in vier allgemeine Kategorien [144].

- **Freier Verkehr:**

Bei (sehr) geringer Verkehrsdichte wird die individuelle Wunschgeschwindigkeit gewählt.

² Der spezifische Verkehrsfluss ist definiert durch die Anzahl der Fahrzeuge je Zeitintervall, die eine festgelegte Markierung passieren.

- **Teilgebundener Verkehr:**

Die Kategorie ist gekennzeichnet durch wechselseitige Interaktionen und die Entstehung von Fahrzeuggruppen mit gleicher Geschwindigkeit.

- **Gebundener Verkehr:**

Die stetige Zunahme der Verkehrsdichte schränkt Überholmöglichkeiten immer stärker ein und es können größere Fahrzeugkolonnen entstehen, die sich mit angepasster (niedriger) Geschwindigkeit fortbewegen.

- **Stau/stop and go:**

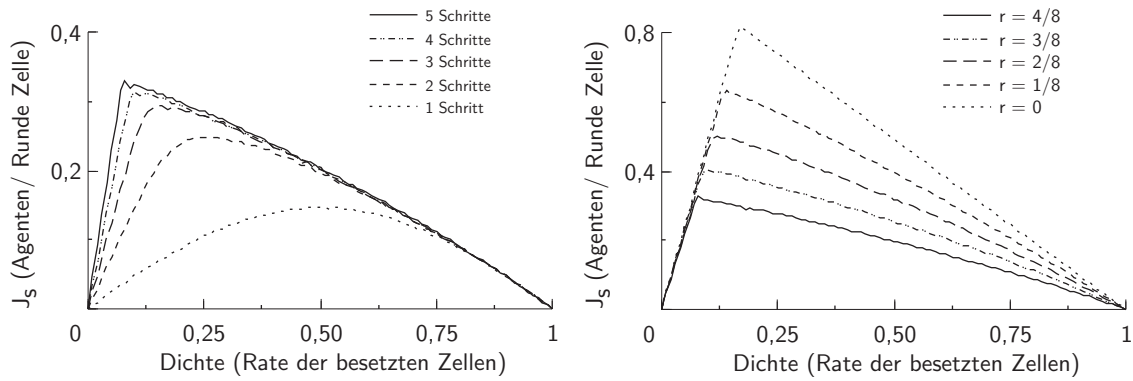
Ein fließender Verkehr ist nicht mehr möglich. Bereits geringe Störungen können das gesamte System so stark beeinflussen, dass es zum Stillstand kommt.

Für die parametrische Anpassung des Nagel-Schreckenberg Verkehrsmodells können die maximal erreichbare Geschwindigkeit v_{\max} und die Wahrscheinlichkeit des Trödelns r variiert werden. Die Änderung von v_{\max} ist gleichbedeutend mit der Änderung der Interaktionsreichweite, da ein Fahrzeug mit höherer maximaler Geschwindigkeit auch eine höhere Anzahl an Zellen je Runde überwinden kann. Um die Wirkung der Parametervariationen auf die Modellergebnisse zu verdeutlichen, wurde das ASEP Modell implementiert und die Änderung von v_{\max} und r mit zunehmender Verkehrsdichte ρ analysiert. Für die Implementierung gelten die folgenden Randbedingungen:

- parallele Aktualisierung, reguläres Gitter mit 100 Zellen,
- periodische Randbedingungen (geschlossenes System, siehe Kapitel 2.2.2 (S. 56)),
- Dichte (Rate der besetzten Zellen) $\rho \in [0, 1]$ mit einer Dichtevariation von $\Delta\rho = 0,01$ je Schritt,
- Geschwindigkeit v in fünf Stufen: $v \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$,
- jeweils 10^5 Zeitschritte (Runden) und
- mit den Standardwerten $\tilde{v}_{\max} = 5$ Schritte pro Runde und $\tilde{r} = 0,5$.

Wie aus Abbildung 2.3(a) ersichtlich ist, steigert sich mit zunehmender maximalen Geschwindigkeit der Verkehrsfluss ebenfalls und das Maximum von J_s verlagert sich hin zu geringeren Dichten. Mit steigender Trödel-Wahrscheinlichkeit sinkt J_s signifikant, wobei sich das Maximum von J_s wesentlich schwächer in Richtung geringerer Dichten verlagert (Abbildung 2.3(b)).

Die parallele Aktualisierung der Fahrzeugpositionen ist nach Schreckenberg et al. [125] ein entscheidendes Modellmerkmal. Die Aktualisierung läuft dabei in zwei getrennten Schritten ab. Im ersten Schritt werden für alle Fahrzeuge die zukünftigen Positionen auf Basis des aktuellen Zustandes bestimmt. Da erst im Anschluss alle zukünftigen Fahrzeugpositionen realisiert werden, ist die Reihenfolge der Fahrzeugauswahl irrelevant. Für die



(a) Veränderung von v_{\max} im Intervall von 1 bis 5 Schritten je Runde bei einer Trödel-Wahrscheinlichkeit $\tilde{r} = 0,5$.

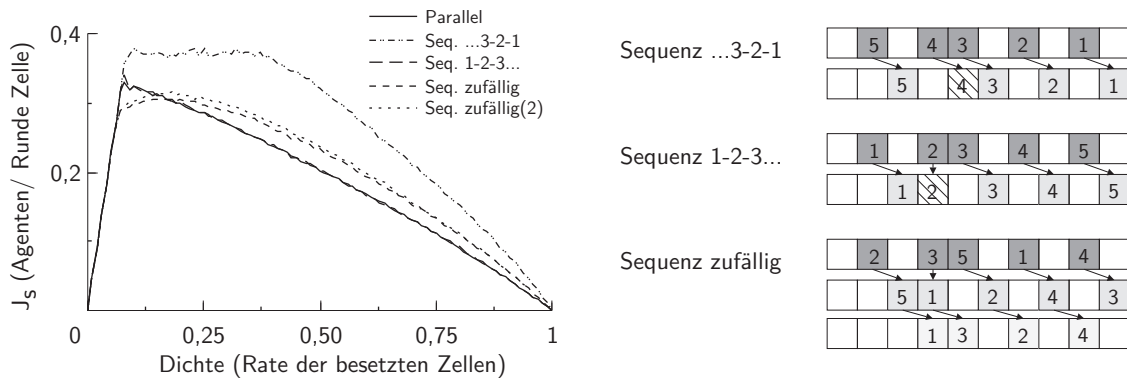
(b) Veränderung der Trödel-Wahrscheinlichkeit r im Intervall von 0 bis 0,5 bei einer maximalen Geschwindigkeit von $\tilde{v}_{\max} = 5$ Schritten je Runde.

Abbildung 2.3: Fundamentaldiagramme des Nagel-Schreckenberg Verkehrsmodells mit Variation der Parameter Schrittweite und Trödel-Wahrscheinlichkeit.

Zwischenspeicherung der zukünftigen Position muss jedoch eine zusätzliche, temporäre Datenstruktur zur Verfügung stehen.

Das vom parallelen Verfahren abweichende sequentielle Verfahren stellt eine zweite Möglichkeit dar, die Positionen zu aktualisieren. Beim sequentiellen Verfahren wird aus der Menge noch nicht positionierter Fahrzeuge zufällig eines ausgewählt und die neue Position ebenfalls unter Verwendung der geltenden Modellregeln bestimmt. Das Fahrzeug verlässt die alte Position jedoch sofort, um die neue Position einzunehmen. Nachfolgend ausgewählte Fahrzeuge berücksichtigen dementsprechend alle bereits ausgeführten Positionswechsel. Der Vorteil des sequentiellen Verfahrens liegt im Verzicht auf zusätzliche Datenstrukturen, allerdings ist das Simulationsergebnis bei dieser Methode von der gewählten Aktualisierungssequenz abhängig (Abbildung 2.4).

Es ist zu erkennen, dass der Verlauf des Flusses bei aufsteigender Sequenz (1-2-3,..., von links nach rechts, siehe Abbildung 2.4(b)) dem parallelen Aktualisierungsverfahren vollständig entspricht (Abbildung 2.4(a)). Im Gegensatz dazu führt eine absteigende Aktualisierung von rechts nach links (entgegen der Fahrtrichtung, ...,3-2-1) zu einem wesentlich höheren Verkehrsfluss, da alle voran fahrenden Fahrzeuge ihre Position bereits verändert haben (Abbildung 2.4(b)) und so die Interaktionswahrscheinlichkeit reduziert wurde. Um die Unabhängigkeit der Simulationsergebnisse von der gewählten Aktualisierungssequenz sicherzustellen, bietet sich die Möglichkeit der permanenten und zufälligen Sequenzänderung (*random shuffled update*) an. Der Verlauf von J_s ist hierbei prinzipiell mit der parallelen Aktualisierung vergleichbar, jedoch wird keine temporäre Datenstruktur benötigt. Allerdings wird im Mittel ein geringfügig höherer Verkehrsfluss ausgewiesen



(a) Fundamentaldiagramm bei unterschiedlichen Aktualisierungsverfahren, wobei das parallele Verfahren den Referenzverlauf darstellt.

(b) Unterschiedliche Sequenzen können bei gleicher Ausgangslage zu abweichenden Positionen führen.

Abbildung 2.4: Aktualisierungsverfahren im Nagel-Schreckenberg-Verkehrsmodell.

(Abbildung 2.4(a)). Auch erfordert die kontinuierliche Erstellung einer zufälligen Sequenz einen zusätzlichen Berechnungsaufwand innerhalb der Simulation (Tabelle 2.1). Wird die Sequenz nur jede zweite Runde geändert, ist der Zeitbedarf annähernd unverändert zum Zeitbedarf der parallelen Aktualisierung und gleichzeitig ändert sich der Verlauf von J_s kaum.

| Aktualisierungsverfahren | Zeit (s) | Änderung (%) |
|--|-------------|--------------|
| parallel | 88,1 | 0 |
| sequentiell, ohne Sequenzänderung | 72,3 | - 18 |
| sequentiell, <i>random shuffled update</i> | 104,7 | +18 |
| sequentiell, <i>random shuffled update</i> alle 2 Runden | 88,5 | +1 |

Tabelle 2.1.: Zeitbedarf eines Durchlaufes mit unterschiedlichen Aktualisierungsverfahren, wobei je Verfahren 10^5 Runden berechnet wurden.

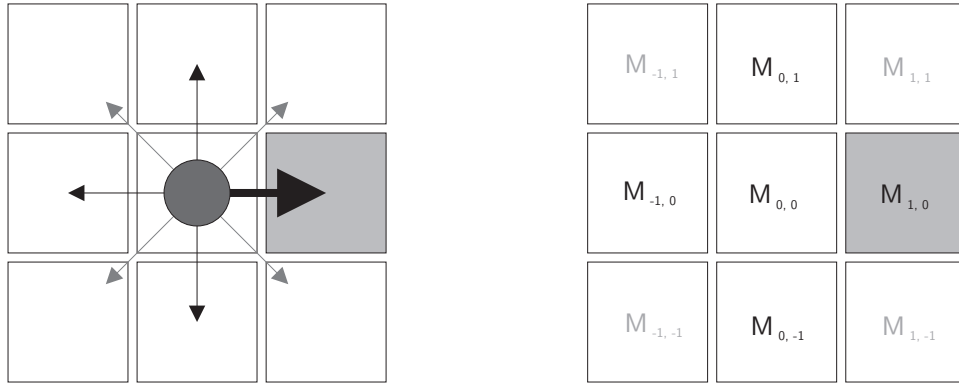
Für die Abbildung menschlicher Bewegungsverhalten stellt die Annahme eines eindimensionalen Bewegungsablaufes eine starke Einschränkung dar. Es lassen sich jedoch auch Abläufe identifizieren, bei denen das Bewegungsverhalten als eindimensionaler Prozess modelliert werden kann. Das Verhalten von Passagieren während des Besteigen eines Flugzeuges (*boarding*) wird im Kapitel 4.2 (S. 152) als ein klassisches Beispiel vorgestellt. Für die Erstellung eines komplexen zweidimensionalen Modells zur Beschreibung von Personenverhalten stellen die Verwendung eines angemessenen Aktualisierungsverfahrens und die Bestimmung der Wechselwirkungsreichweite zwischen den Personen ein entscheidendes Qualitätsmerkmal dar [vgl. 87, 145]. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass

die sequentielle Positionsaktualisierung eine geeignete Alternative zur parallelen Aktualisierung darstellt, wenn das *random shuffled update* Verfahren verwendet wird [85, 146].

2.2. Zweidimensionaler zellularer Automat

Die konsequente Weiterführung des bereits vorgestellten eindimensionalen Modellierungsansatzes (ASEP als probabilistischer zellularer Automat) führt zu der Entwicklung eines komplexeren zweidimensionalen Automatenmodells. Da die grundlegenden Modellannahmen des zweidimensionalen zellularen Automaten bereits in Kapitel 1.3.4 (S. 23ff) dargelegt sind, wird im Folgenden speziell auf den stochastischen Ansatz von [124] näher eingegangen und durch notwendige Modellerweiterungen vervollständigt. Bei der Verwendung des zellularen Automatenmodells für die Beschreibung des Personenverhaltens erfolgt ein Paradigmenwechsel von einem zellbasierten Zustandsautomaten (eine auf das Gitter bezogene Sichtweise) hin zu einer individuenorientierten Sichtweise. Die Bewegung der eigenständig agierenden Individuen (Agenten) erfolgt auf einer diskreten Struktur (reguläres Gitter) und stellt nur noch in nachrangiger Bedeutung den Wechsel von Zellzuständen dar. Ein Agent kann innerhalb des Gitters nur freie Zellen besetzen, wobei die Annahme, dass jede Zelle nur maximal einen Agenten aufnehmen kann, weiterhin Bestand hat. Der Übergang in die angrenzenden Nachbarzellen erfolgt durch die Definition einer Wahrscheinlichkeitsmatrix M . Die spezifischen Übergangswahrscheinlichkeiten M_{ij} sind dabei abhängig von der individuellen Bewegungsrichtung, wobei Zellen in Bewegungsrichtung eine höhere Übergangswahrscheinlichkeit aufweisen (Abbildung 2.5). Die in Abbildung 2.5(b) dargestellte Wahrscheinlichkeitsmatrix M enthält zellbezogene normierte Wahrscheinlichkeiten für den Übergang eines Agenten von seiner aktuellen Zelle in die angrenzenden Zellen (Moore Nachbarschaft).

Für die Erstellung von M wird zwischen dem Übergang in horizontal/vertikal und diagonal angrenzende Zelle unterschieden und die Wahrscheinlichkeitsmatrix in zwei Bestandteile aufgeteilt. Die Wahrscheinlichkeitsmatrix \hat{M} enthält die Übergangswahrscheinlichkeiten für horizontale/vertikale Zellübergänge ($|i| \neq |j|$) und die Wahrscheinlichkeitsmatrix \tilde{M} enthält die Übergangswahrscheinlichkeiten für diagonale Zellübergänge ($|i| = |j| = 1$). Die Herleitung der Wahrscheinlichkeitsmatrizen erfolgt analog zu [124] exemplarisch am Übergang in horizontaler Bewegungsrichtung auf Zelle $Z_{1,0}$ (grau hinterlegte Zelle in Abbildung 2.5(b)). Die Berechnung der korrespondierenden Übergangswahrscheinlichkeit $\hat{M}_{1,0}$ erfolgt durch die Annahme zweier, voneinander unabhängiger Wahrscheinlichkeitskomponenten: einer longitudinalen Komponente p (in Bewegungsrichtung) und einer transversalen (normal zur Bewegungsrichtung) Komponente q . Die multiplikative Verknüpfung der Wahrscheinlichkeitskomponenten p_i und q_j führt zur Übergangswahrscheinlichkeit \hat{M}_{ij} .



(a) Moore-Nachbarschaft im regulären quadratischen Gitter. Bewegungsrichtung nach rechts.

(b) Spezifische Übergangswahrscheinlichkeiten $M_{i,j}$, wobei die Zelle in direkter Bewegungsrichtung die höchste Wahrscheinlichkeit aufweist.

Abbildung 2.5: Nachbarschaftsrelation (Moore-Nachbarschaft) und Übergangswahrscheinlichkeiten im gewählten stochastischen Modellansatz [124].

$$\hat{M}_{ij} = p_i \cdot q_j \quad i, j \in I\{-1, 0, 1\} \quad (2.9)$$

Die Herleitung des longitudinalen und des transversalen Anteils erfolgt über die ersatzweise Formulierung einer allgemeinen und diskreten Wahrscheinlichkeit h , welche durch den Erwartungswert μ (2.10), die Varianz σ^2 (2.11) sowie durch die Normierungsrandbedingung (2.12) definiert ist.

$$\mu = \sum_{k \in I} k h_k \quad (2.10)$$

$$\sigma^2 = \sum_{k \in I} (k - \mu)^2 h_k \quad (2.11)$$

$$\sum_{k \in I} h_k = 1 \quad (2.12)$$

Da innerhalb des gewählten Ansatzes nur drei räumliche Positionen ($k \in I\{-1, 0, 1\}$) existieren, kann aus der impliziten Darstellung (2.10 - 2.12) eine explizite Darstellung der Übergangswahrscheinlichkeiten h_{-1} , h_0 und h_{+1} abgeleitet werden.

$$h_{-1} = \frac{1}{2} (\sigma^2 + \mu^2 - \mu) \quad (2.13)$$

$$h_0 = 1 - (\sigma^2 + \mu^2) \quad (2.14)$$

$$h_{+1} = \frac{1}{2} (\sigma^2 + \mu^2 + \mu) \quad (2.15)$$

Für die Berechnung der spezifischen Übergangswahrscheinlichkeit h_k ist somit die Kenntnis des Parametersatzes aus Erwartungswert μ und Varianz σ^2 notwendig. Der Parametersatz für die Wahrscheinlichkeiten der transversalen Bewegungskomponente q mit μ_q , σ_q^2 definiert. Da q als gleichmäßig symmetrische Querfluktuation um die eigentliche Bewegungsrichtung zu verstehen ist, ergibt sich der korrespondierende Erwartungswert zu $\mu_q = 0$. Die Anzahl der Parameter zur Beschreibung des Übergangs auf eine horizontale Nachbarzelle reduziert sich somit auf drei relevante Parameter $\{\mu_p, \sigma_p^2, \sigma_q^2\}$. Einschränkend bei der Wahl geeigneter Parameterkonstellationen ist die Definition einer oberen und unteren Grenze für den Wertebereich von σ_p^2 (2.16), da Varianz und Erwartungswert gemäß (2.11) funktional verbunden sind. Die obere Grenze der Varianz ergibt sich, wenn ein Übergang in eine horizontale Nachbarzelle erfolgen muss (kein Stehenbleiben, $p_0 = 0$). Die untere Grenze ist durch eine nur vorwärts gerichtete Bewegung ($\mu_p \geq 0 \Leftrightarrow p_{-1} = 0$) definiert. Für μ_p und σ_q^2 gilt ein Wertebereich von $[0, 1]$.

$$\left(|\mu_p| - \mu_p^2 \right) \leq \sigma_p^2 \leq \left(1 - \mu_p^2 \right) \quad (2.16)$$

Die Wahrscheinlichkeitsmatrix für den Übergang auf eine horizontale Nachbarzelle ist durch die Wertebereiche und (2.13 - 2.15) vollständig bestimmt. Aufgrund der vorhandenen Gittersymmetrie kann die Beschreibung des Übergangs auf eine vertikale Nachbarzelle analog erfolgen. Der Übergang auf eine diagonale Nachbarzelle bedarf jedoch der Anpassung der Modellannahmen. Die Rotation der angrenzenden Zellen um eine Position (Drehwinkel $\alpha = 45^\circ$, mathematisch positiv) führt zu der Wahrscheinlichkeitsmatrix \tilde{M} für den diagonalen Fall (Abbildung 2.6). Durch die Neuindizierung der Wahrscheinlichkeitsmatrix deformiert sich die resultierende Wahrscheinlichkeitsmatrix \tilde{M} gegenüber \hat{M} und es ergeben sich $\tilde{\mu}_p \neq \sqrt{2} \mu_p$, $\tilde{\sigma}_p \neq 2 \sigma_p$ und $\tilde{\sigma}_q \neq 2 \sigma_q$. Trotz dieser Einschränkungen wird der Ansatz in der weiteren Modellentwicklung genutzt und durch geeignete Modellanpassungen kompensiert.

Die endgültige Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsmatrix M erfolgt durch die gewichtete Überlagerung von \hat{M} und \tilde{M} gemäß (2.17) mit dem Gewicht $\lambda = \tan \alpha$. Der Winkel $\alpha = 0$ entspricht dem Wunsch, die Zelle $Z_{1,0}$ (rechte horizontale Nachbarzelle) zu erreichen, wobei α mathematisch positiv aufgetragen ist (vgl. Abbildung 2.6(b)).

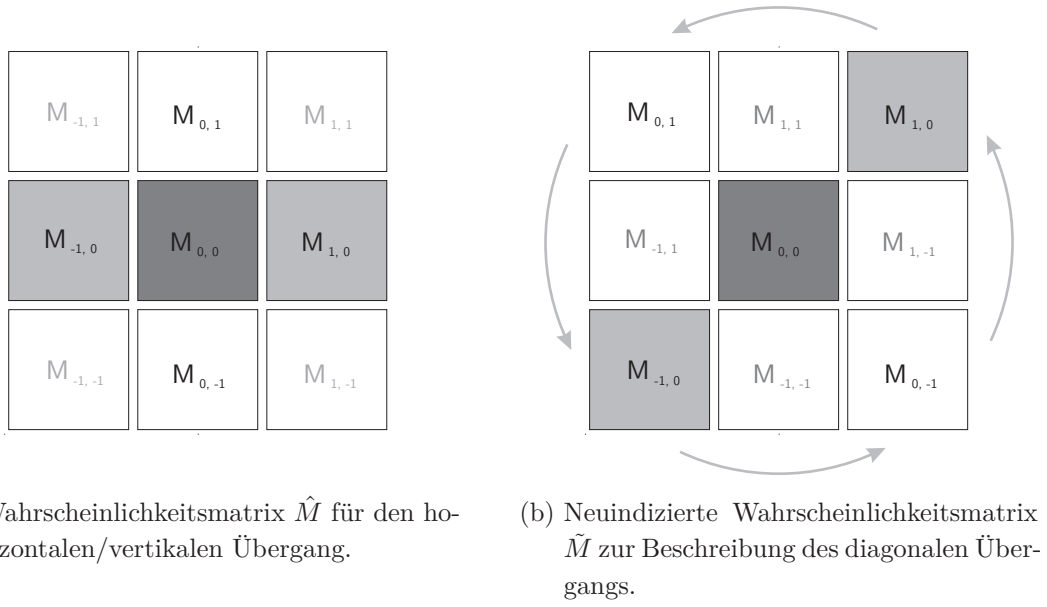


Abbildung 2.6: Wahrscheinlichkeitsmatrizen \hat{M} und \tilde{M} für den horizontalen/ vertikalen und diagonalen Übergang. Die grauen Zellen entsprechen der longitudinalen und die weißen Zellen der transversalen Bewegungskomponente.

$$M = \begin{cases} (1 - \lambda) \hat{M} + \lambda \tilde{M} & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{4} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (1 - \lambda) \hat{M} + \sqrt{2} \lambda \tilde{M} & \frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \lambda = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \end{cases} \quad (2.17)$$

Zu beachten ist, dass die Wahrscheinlichkeitsmatrix eine vierzählige Symmetrie (Rotationssymmetrie) aufweist. Erst mit einer Drehung um $\pi/2$ wird die Wahrscheinlichkeitsmatrix wieder auf sich selbst abgebildet. Für die vollständige Beschreibung des ersten Quadranten ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) wird dieser durch Spiegelung von (2.17, $0 \leq \alpha < \pi/4$) an der Diagonalen $f(x) = x$ vervollständigt ($\lambda = \pi/2 - \alpha$). Die resultierende Matrix M (2.17) ermöglicht die Abbildung von α im Bereich $[0, \pi/2]$. Durch die Verwendung der Rotationsmatrix R (2.18) kann die gemäß (2.17) definierte Wahrscheinlichkeitsmatrix auf die anderen n Quadranten ausgedehnt und der gesamte Winkelbereich $[0, 2\pi]$ abgebildet werden (2.19).

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad \phi \in (n-1) \frac{\pi}{2}, n \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (2.18)$$

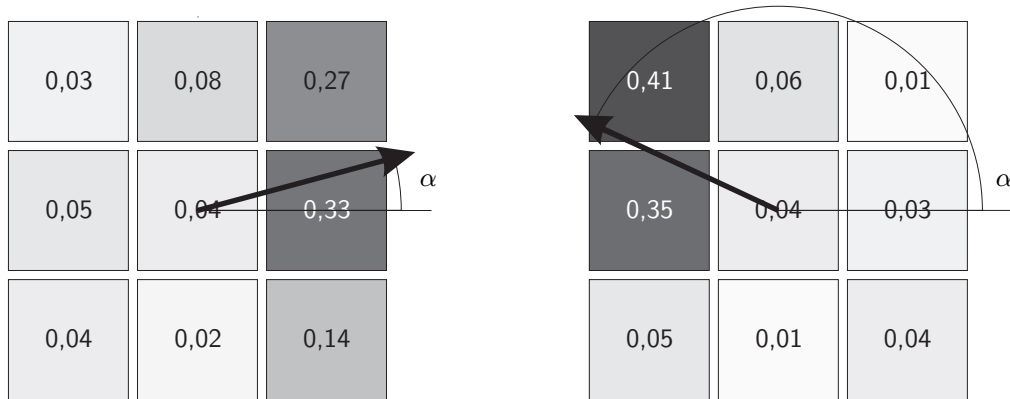
Eine Drehung in den zweiten Quadranten ($n=2$ mit $\phi = \pi/2$) ist beispielhaft in (2.20) dargestellt.

$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} R = \begin{pmatrix} i_R \\ j_R \end{pmatrix} \tag{2.19}$$

$$\begin{pmatrix} M_{-1,1} & M_{0,1} & M_{1,1} \\ M_{-1,0} & M_{0,0} & M_{1,0} \\ M_{-1,-1} & M_{0,-1} & M_{1,-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{0,1} & M_{1,1} & M_{1,0} \\ M_{-1,1} & M_{0,0} & M_{1,-1} \\ M_{-1,0} & M_{-1,-1} & M_{0,-1} \end{pmatrix} \tag{2.20}$$

Durch die Definition des Richtungswinkels α als vierten relevanten Parameter ist das stochastische Bewegungsmodell vollständig. Zur Erstellung der Wahrscheinlichkeitsmatrix M sind die folgenden Parameter notwendig: Erwartungswert μ_p und Varianz σ_p^2 der longitudinalen Wahrscheinlichkeitskomponente, transversale Varianz σ_q^2 sowie der Richtungswinkel α .

In Abbildung 2.7 sind zwei exemplarische Parameterkonfigurationen dargestellt, wobei die Parameter in Tabelle 2.2 definiert sind.



(a) Wahrscheinlichkeitsmatrix nach Parameterkonfiguration A.

(b) Wahrscheinlichkeitsmatrix nach Parameterkonfiguration B.

Abbildung 2.7: Darstellung unterschiedlicher Parameterkonfigurationen gemäß Tabelle 2.2. Die Übergangswahrscheinlichkeiten $M_{i,j}$ sind sowohl farblich hervorgehoben (weiß $\hat{=}$ 0 und schwarz $\hat{=}$ 1) als auch durch spezifische Wahrscheinlichkeiten hinterlegt.

In der Konfiguration A ist $\alpha_A < \pi/2$, sodass die M nicht gedreht werden muss. Die zweite Konfiguration B weist mit $\alpha_B = 155^\circ$ einen Richtungswinkel größer als $\pi/2$ auf. In diesem Fall wird die Matrix für $\alpha'_B = \alpha_B - \pi/2 = 65^\circ$ berechnet und dann durch R gemäß (2.19) transformiert (Abbildung 2.7).

| Konfiguration | Modellparameter | | | |
|---------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| | μ_p | σ_p^2 | σ_q^2 | α (°) |
| A | 0,67 | 0,47 | 0,50 | 15 |
| B | 0,80 | 0,31 | 0,25 | 155 |

Tabelle 2.2.: Beispielkonfigurationen für das stochastische Bewegungsmodell.

Das entwickelte Bewegungsmodell ermöglicht den ortsdiskreten und stochastischen Übergang eines Agenten auf die angrenzenden Zellen des regulären Gitters. Im folgenden Abschnitt werden die Einschränkungen aufgrund der modellbedingten Ortsdiskretisierung eingehend analysiert und durch geeignete Algorithmen kompensiert.

2.2.1. Gitterabhängigkeiten - Geschwindigkeit und Varianz

Beim Einsatz eines regulären Gitters aus quadratischen Zellen und der Verwendung der Moore-Nachbarschaft kann in einem Schritt jede angrenzende Zelle betreten werden, wobei sich jedoch die zurückgelegten Strecken je nach Position der Zelle unterscheiden. Der Übergang in eine diagonale Zelle ist um den Faktor $\sqrt{2}$ länger, was bei konstanten Zeitschritten einer um den gleichen Faktor erhöhten Geschwindigkeit entspricht. Durch das zugrunde liegende Gitter ist die Geschwindigkeit somit von der gewählten Bewegungsrichtung abhängig. Finden in einem Modell mehrere Zellübergänge pro Zeitschritt statt (siehe [84, 87, 124]), kann die richtungsabhängige Geschwindigkeit innerhalb des Simulationsschrittes abhängig von der Bewegungsrichtung kalibriert werden, in dem innerhalb des Zeitschrittes gezielt auf Zellübergänge verzichtet wird [147]. Erfolgt nur ein Zellübergang pro Zeitschritt bietet ein übergeordnetes Bewegungsregime eine weitere Möglichkeit zur Modellkalibrierung [148].

Die mit dem Modellansatz verknüpfte Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix M erlaubt eine direkte Beeinflussung der richtungsabhängigen Geschwindigkeit durch eine gezielte Reduktion der Übergangswahrscheinlichkeit μ_p in diagonal positionierte Zellen. Aus den Modellparametern μ_p und α sowie durch die Kenntnis von Zellgröße s und Zeitschrittweite t kann die Geschwindigkeit \mathbf{v} (2.21) des Agenten aus dem resultierenden Erwartungswert $\boldsymbol{\mu}$ (2.22) bestimmt werden.

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\mu} \frac{s}{t} \quad (2.21)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \mu_p \quad (2.22)$$

Als Bedingung für eine korrekte Modellkalibrierung muss $\boldsymbol{\mu}$ dem Erwartungswert der Übergangsmatrix $\boldsymbol{\mu}_M$ entsprechen, der sich gemäß (2.23) aus den relativen Ortsvektoren $\mathbf{e}_{ij} = \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix}$ und den jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeiten M_{ij} ergibt.

$$\boldsymbol{\mu}_M = \sum_i \sum_j \mathbf{e}_{ij} M_{ij} \quad (2.23)$$

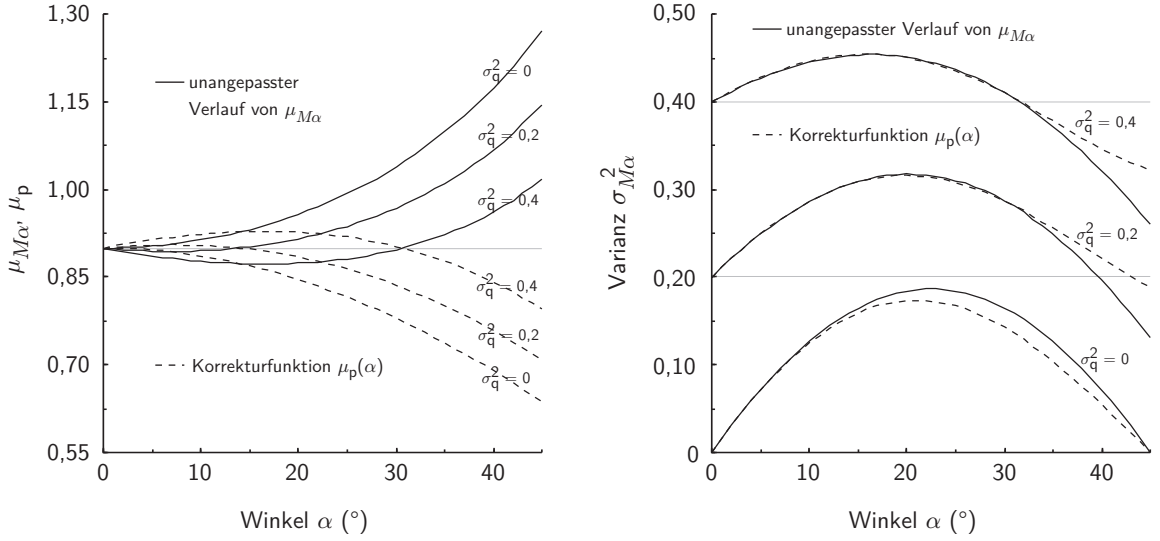
Unter der Annahme, dass ein Übergang nur in Zellen in Bewegungsrichtung möglich ist ($\mu_p = 1$, $\sigma_q^2 = 0$ und $\alpha = 0$ führt zu $M_{1,0} = 1$), ergibt sich gemäß (2.13) eine Übergangswahrscheinlichkeit entgegen der Bewegungsrichtung von $p_{-1} = 0$ und es folgt eine direkte Kopplung von σ_p^2 und μ_p (2.24). Der Parametersatz für die Bestimmung von M reduziert sich somit auf die verbliebenen Modellparameter α , μ_p und σ_q^2 .

$$\sigma_p^2 = \mu_p (1 - \mu_p) \quad (2.24)$$

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird die Bewegung in eine longitudinale (μ_M) und eine transversale Komponente (σ_M^2) aufgeteilt. Da beide Komponenten eine Abhängigkeit vom Richtungswinkel aufweisen (Abbildung 2.8), werden sie zusätzlich mit dem Index α gekennzeichnet. Die longitudinale Komponente $\mu_{M\alpha}$ wird primär durch μ_p beeinflusst (2.25) und die transversale Komponente $\sigma_{M\alpha}^2$ hauptsächlich durch σ_q^2 bestimmt (2.26). Durch die Bestimmung des longitudinalen Bewegungsanteils jeder Zelle und die Gewichtung mit den korrespondierenden Übergangswahrscheinlichkeiten (siehe Tabelle A.1, Seite 201) ergibt sich $\mu_{M\alpha}$ wie folgt:

$$\mu_{M\alpha} = \sum_i \sum_j M_{ij} \frac{\mathbf{e}_{ij} \cdot \boldsymbol{\mu}}{|\boldsymbol{\mu}|} = \frac{1}{2} \mu_p \left[\sigma_q^2 (\cos \alpha - \sin \alpha) - \frac{\sigma_q^2 - 2}{\cos \alpha} \right]. \quad (2.25)$$

Erfolgt eine Kalibrierung von $\mu_{M\alpha}$ durch $\mu_p(\alpha)$, wobei $\mu_p(\alpha)$ einen umgekehrt proportionalen Verlauf zu $\mu_{M\alpha}$ aufweisen muss (Abbildung 2.8(a)), kann die Winkelabhängigkeit vollständig aufgehoben werden. Zwei wesentliche Erkenntnisse folgen aus der Kalibrierung von $\mu_{M\alpha}$. Zum einen reduziert sich mit zunehmender Varianz σ_q^2 die Richtungsabhängigkeit von $\mu_{M\alpha}$ und zum anderen übersteigt die Korrekturfunktion $\mu_p(\alpha)$ bereichsweise den initialen Wert $\mu_p = \mu_p(\alpha = 0)$. Das Übersteigen von μ_p hat in dem gewählten Beispiel mit $\mu_p = 0,9$ (Abbildung 2.8(a)) keine Auswirkung, da der maximale Erwartungswert von 1 nicht erreicht wird. Im Umkehrschluss kann somit eine Wahl von $\mu_p = 1$ nicht zu einer vollständigen Entkopplung von α führen. Die Korrekturfunktion ist hierbei bereichsweise unzulässig definiert ($\mu_p(\alpha) > 1$) und muss auf $\mu_p(\alpha)_{\max} = 1$ begrenzt werden. Wie aus (2.25) hervorgeht, ist $\mu_{M\alpha}$ zwar primär von μ_p abhängig aber auch σ_q^2 geht in die Berechnung ein. Für die Kalibrierung muss demzufolge auch eine richtungsabhängige Anpassung



(a) Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit vom Richtungswinkel α mit $\mu_p = 0,9$. Bei unangepasstem Geschwindigkeitsverlauf steigt die Geschwindigkeit mit zunehmendem Richtungswinkel. Die Implementierung einer spezifischen Korrekturfunktion führt zu einem konstanten und unabhängigen Geschwindigkeitsverlauf (graue Linie).

(b) Korrespondierender Verlauf der Varianz $\sigma_{M\alpha}^2$ mit variierender Varianz σ_q^2 . Die Anpassung der Geschwindigkeit führt zu Veränderungen in den Funktionsverläufen, die allerdings immer noch einen ausgeprägten Zusammenhang zum Richtungswinkel α aufweisen.

Abbildung 2.8: Darstellung des richtungsabhängigen Zusammenhangs von $\mu_{M\alpha}$ und $\sigma_{M\alpha}^2$.

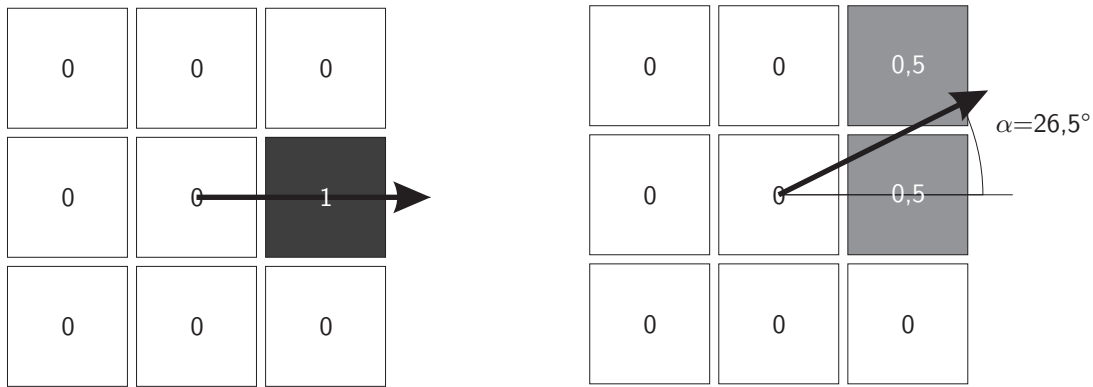
von $\sigma_q^2(\alpha)$ erfolgen. Diese Anpassung hat jedoch auch eine unmittelbare Auswirkung auf die $\sigma_{M\alpha}^2$, so dass sich die Parameter gegenseitig beeinflussen.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{M\alpha}^2 &= \sum_i \sum_j M_{ij} \left(\frac{|\mathbf{e}_{ij} \times \boldsymbol{\mu}|}{|\boldsymbol{\mu}|} \right)^2 & (2.26) \\
 &= \frac{1}{2} \sigma_q^2 (2 \tan \alpha - \sin 2\alpha - \cos 2\alpha + 3) \\
 &+ \frac{1}{2} \mu_p (\sin 2\alpha + \cos 2\alpha - 1) \\
 &- \frac{3}{2} \sigma_q^2 \mu_p \tan \alpha
 \end{aligned}$$

Die Varianz $\sigma_{M\alpha}^2$ kann in drei Bestandteile aufgeteilt werden, die primär durch σ_q^2 , μ_p und von einem Mischterm aus beiden bestimmt sind. Der Verlauf der Varianz ist in Abbildung 2.8(b) dargestellt, wobei zu erkennen ist, dass die Varianz ebenfalls durch den

Richtungswinkel beeinflusst wird. Während bei $\alpha = 0^\circ$ die Varianz $\sigma_{M\alpha}^2$ der Varianz σ_q^2 entspricht, erreicht sie abhängig von σ_q^2 bei $\alpha \approx 15 - 25^\circ$ ein Maximum, nimmt dann kontinuierlich ab und erreicht bei $\alpha = 45^\circ$ ein Minimum. Bei der Anpassung des Verlaufs der Varianz über dem gesamten Winkelbereich muss demzufolge das Maximum $\sigma_{M\alpha, \max}^2$ angestrebt werden, da es die kleinste Varianz darstellt, die über den gesamten Winkelbereich erreicht werden kann. Des Weiteren führt die Verwendung der Korrekturfunktion $\mu_p(\alpha)$ zu einem veränderten Verlauf der Varianz (gestrichelte Linie in Abbildung 2.8(b)).

Zur Verdeutlichung der richtungsabhängigen Varianz dient das folgende Beispiel mit den Modellparametern $\mu_p = 1$ und $\sigma_{p,q}^2 = 0$ (vorwärts gerichtete und ungestörte Bewegung). Wie in Abbildung 2.9(a) dargestellt, kann bei $\alpha = 0^\circ$ die Nachbarzelle in Bewegungsrichtung direkt betreten werden. Stellt der Richtungswinkel kein ganzzahliges Vielfaches von 45° dar, muss sich der Agent immer zwischen mindestens zwei Zellen entscheiden (Abbildung 2.9(b)).



(a) Quasi-deterministische Zellauswahl bei einem Richtungswinkel von $\alpha = 0^\circ$ ($\sigma_q^2 = 0$). Mit $\lambda = 0$ ist nur die Übergangsmatrix für den horizontalen Fall gültig ($M = \hat{M}$).

(b) Erzwungene stochastische Zellauswahl bei einem Richtungswinkel von $\alpha = 26,5^\circ$ ($\sigma_q^2 = 0$), gemäß (2.17) werden \hat{M} und \tilde{M} zu gleichen Anteilen überlagert ($\lambda = \tan \alpha = 0,5$).

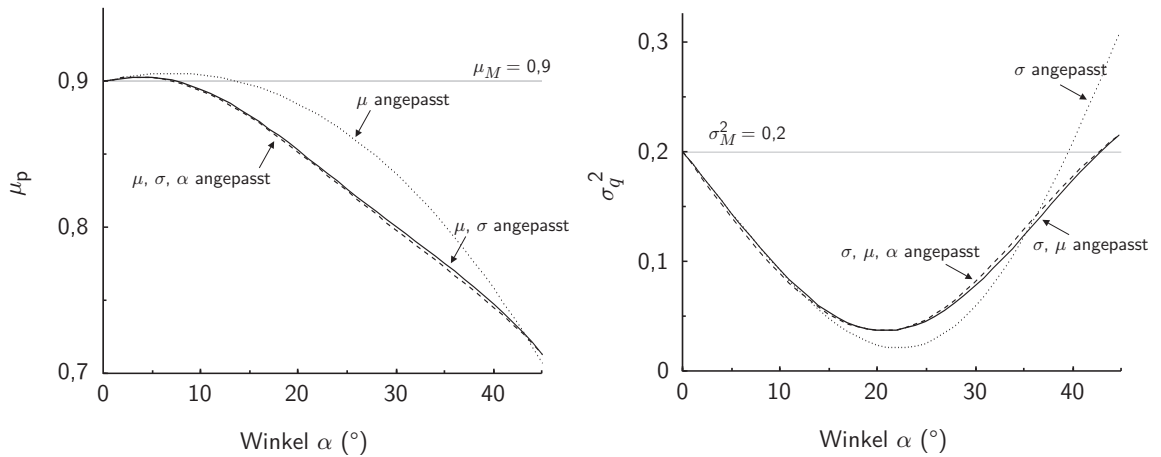
Abbildung 2.9: Richtungsabhängiger Verlauf der Varianz bei unveränderten Modellparametern $\mu_p = 1$ und $\sigma_q^2 = 0$.

Aus der *erzwungenen* Entscheidung zwischen mindestens zwei Zellen entscheiden zu müssen, folgen zwei Effekte:

1. Die notwendige stochastische Zellauswahl führt zu einer erzwungen transversalen Abweichung von der eigentlichen Bewegungsrichtung ($\sigma_q^2 \neq \sigma_{M\alpha}^2$). Die mit dem Modellansatz unmittelbar verbundene Varianz $\sigma_{M\alpha}^2$ steht somit der geforderten ungestörten Bewegung entgegen.
2. Durch die modellbedingte Varianz unterscheidet sich auch die Reaktion auf besetz-

te Zellen in Abhängigkeit von der gewählten Bewegungsrichtung. Im Gegensatz zur quasi-deterministischen Bewegung in horizontaler Richtung (Abbildung 2.9(a)) führt die stochastische Zellauswahl (Abbildung 2.9(b)) dazu, dass der Agent eine besetzte Zelle (in Bewegungsrichtung) passieren könnte, da benachbarte Zellen noch Übergangswahrscheinlichkeiten ausweisen würden.

Die modellbedingte Varianz $\sigma_{M\alpha}^2$ ist im bis jetzt entwickelten mathematischen Modell unberücksichtigt und führt zu Verzerrungen bei der Bewegungsabbildung der Agenten auf dem regulären Gitter. Effekte, die im Zusammenhang mit den individuell simulierten Bewegungsabläufen entstehen, könnten somit nur noch sehr schwer auf ihre eigentlichen Ursachen hin untersucht werden. Die in Abbildung 2.10 dargestellten Korrekturfunktionen für $\mu_p(\alpha)$ und $\sigma_q^2(\alpha)$ zeigen den charakteristischen, zu $\mu_{M\alpha}$ und $\sigma_{M\alpha}^2$ entgegengesetzten Verlauf. Werden die Parameter μ_M und σ_M^2 jeweils nur einzeln kalibriert weichen die resultierenden Korrekturfunktionen (schwarze Linien in Abbildung 2.10) signifikant von den Korrekturfunktionen ab, bei denen beide Parameter gleichzeitig berücksichtigt werden (graue Linien in Abbildung 2.10).

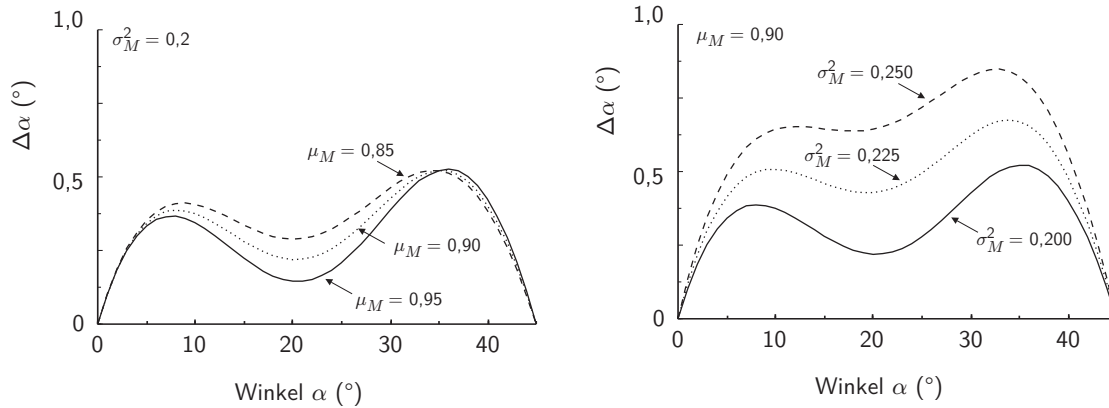


(a) Funktionsverlauf $\mu_p(\alpha)$ für $\mu_{M\alpha} = \mu_M$.

(b) Funktionsverlauf $\sigma_q^2(\alpha)$ für $\sigma_{M\alpha}^2 = \sigma_M^2$.

Abbildung 2.10: Wechselseitige Beeinflussung und angepasster Funktionsverlauf für $\mu_p(\alpha)$ und $\sigma_q^2(\alpha)$ mit den Zielwerten $\mu_M = 0,9$ und $\sigma_M^2 = 0,2$.

Erfolgt ein Vergleich von $\boldsymbol{\mu}$ (2.22) mit $\boldsymbol{\mu}_M$ (2.23) ist festzustellen, dass die Vektoren nicht identisch sind und sich um einen Winkel $\Delta\alpha \leq 1^\circ$ unterscheiden ($\alpha_M < \alpha$). Der Verlauf der notwendigen Korrekturfunktion $\Delta\alpha$ ist in Abbildung 2.11 unter Verwendung verschiedener Konfigurationen von μ_M und σ_M^2 dargestellt. Im Gegensatz zur starken wechselseitigen Beeinflussung von μ_p und σ_q^2 ist der Einfluss der Richtungswinkelkorrektur auf die bereits vorhandenen Korrekturfunktionen für $\mu_p(\alpha)$ und $\sigma_q^2(\alpha)$ sehr gering (gestrichelte Linien in Abbildung 2.11).



(a) Anpassung bei gleichbleibender Varianz σ_M und variierendem Erwartungswert μ_M .

(b) Anpassung bei gleichbleibendem Erwartungswert μ_M und variierender Varianz σ_M .

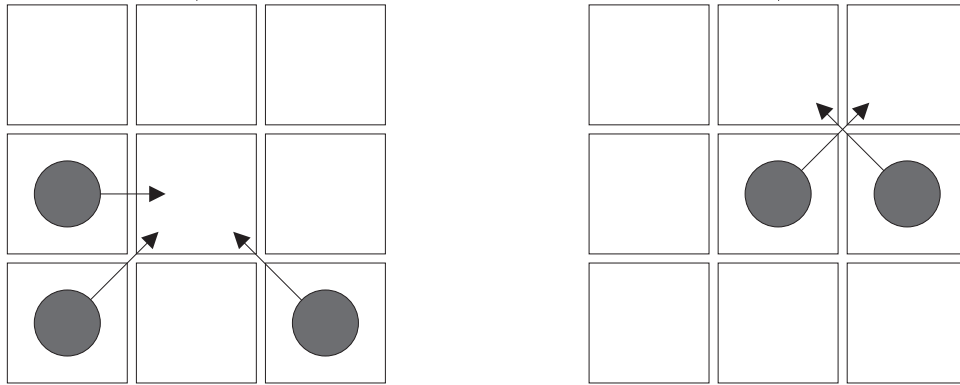
Abbildung 2.11: Richtungsspezifische Korrektur des Winkels α um den Betrag $\Delta\alpha$ zur Erfüllung der Randbedingung $\mu = \mu_M$.

Mit den methodisch entwickelten Korrekturfunktionen zur Kompensation der vorhandenen Modelldefizite ist die Modellierung des stochastisches Bewegungsmodells abgeschlossen. Unter Verwendung der anschließenden Modellimplementierung erfolgt im nächsten Abschnitt die Nachweisführung, dass das Bewegungsmodell in der Lage ist, das Bewegungsverhalten von Personen grundlegend wiederzugeben.

2.2.2. Implementierung - Testumgebung

Für die Schaffung eines geeigneten Testrahmens müssen zwei zusätzliche Annahmen getroffen werden. Bei der eindimensionalen Modellerstellung (Kapitel 2.1.2, S. 41) wurde die Kollisionsprüfung auf elementarer Ebene durchgeführt, indem durch den Agenten nur freie Zellen betreten werden dürfen. Im zweidimensionalen Modell gilt diese Regelung weiterhin, allerdings könnten jetzt mehrere Agenten gleichzeitig versuchen, eine freie Zelle zu betreten (Abbildung 2.12(a)). Aus diesem Grund muss bei der parallelen Positionsaktualisierung eine zusätzliche Kollisionsprüfung stattfinden. Das Problem des gleichzeitigen Betretens einer freien Zelle tritt bei der Verwendung des *random shuffled update* (Kapitel 2.1.2, S. 41) nicht auf, da die Agenten ihre Positionen nacheinander aktualisieren. Durch die permanente Sequenzänderung ist sichergestellt, dass kein Agent eine freie Zelle bevorzugt betritt.

In Abbildung 2.12(b) ist ein weiteres potentielles Kollisionsproblem dargestellt, wobei sich die Wege zweier Agenten kreuzen und sie sich gegenseitig blockieren müssten. Die Positionsänderung kann somit ebenfalls nur durch einen Agenten durchgeführt werden, während der andere Agent wartet. Innerhalb des Modells werden kreuzende Bewegungs-



(a) Mehrere Agenten versuchen eine freie Zelle zu betreten. (b) Kreuzende Bewegungspfade.

Abbildung 2.12: Potentielle Kollisionen im zweidimensionalen Bewegungsmodell.

pfade durch eine zusätzliche Abfrage verhindert: Wenn bei einem diagonalen Zellübergang die beiden angrenzenden Zellen blockiert sind (durch zwei Agenten oder durch den Pfad eines Agenten), wird für die diagonal positionierte Zielzelle keine Übergangswahrscheinlichkeit ausgewiesen.

Innerhalb der Modellimplementierung erfolgt zunächst keine Berücksichtigung von Hindernissen. Das Bewegungsverhalten der Agenten ist somit nur auf die Interaktionen der Agenten untereinander zurückzuführen, mit dem Ziel das individuelle Geschwindigkeitsverhalten der Agenten mit steigender Agentendichte zu untersuchen. Um die Wechselwirkungen mit dem Rand des Simulationsgebietes auszuschließen, werden periodische Randbedingungen angenommen (2.27). In Abbildung 2.13 ist zur Verdeutlichung ein Untersuchungsraum mit periodischen Randbedingungen dargestellt. Das zentrale Rechteck stellt den Untersuchungsraum mit allen beteiligten Agenten dar. Die umgebenden Rechtecke enthalten Kopien der Agenten, um die potentiellen Interaktionen über die Systemgrenzen hinaus korrekt abbilden zu können.

Wenn ein Agent den Untersuchungsraum auf einer Seite verlässt, betritt er den Untersuchungsraum zur selben Zeit auf der gegenüberliegenden Seite. Bewegungen an den Rändern müssen demzufolge auch den Zustand an der gegenüberliegenden Seite berücksichtigen.

$$f(x + a, y + b) = f(x, y) \tag{2.27}$$

Ein entscheidender Vorteil periodischer Randbedingungen liegt in der räumlichen Begrenzung des Simulationsgebietes. Da keine Systemaustritte und -eintritte zu berücksichtigen sind, kann die Dichte innerhalb des Systems eindeutig bestimmt werden. Aus Sicht

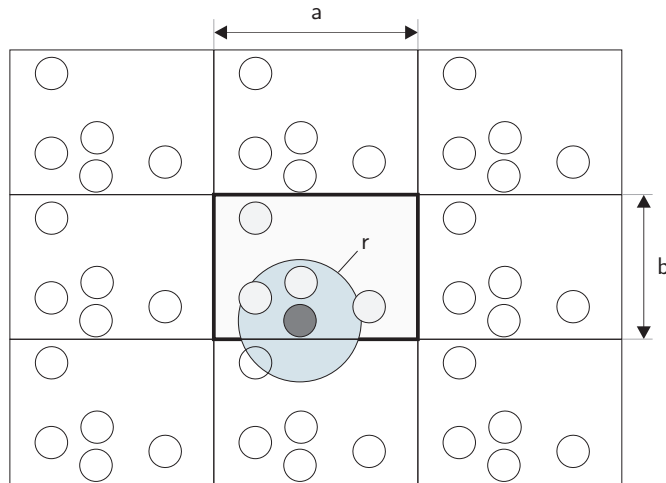


Abbildung 2.13: Periodische Randbedingungen. Der Untersuchungsraum hat die Dimensionen a und b . Jeder dargestellte Agent besitzt die Wechselwirkungsreichweite r .

der Implementierung erfolgt nur die Berechnung eines kleinen Untersuchungsraums, der aus Sicht des Agenten jedoch eine (quasi-)unendliche Größe aufweist. Die hinreichende Größe des Untersuchungsraums ergibt sich durch die Voraussetzung, dass die räumliche Ausdehnung größer sein muss als die maximale Wechselwirkungsreichweite der Agenten. Durch (2.28) ist sichergestellt, dass die Wechselwirkung zwischen zwei Agenten jeweils nur einmal berücksichtigt wird.

$$\min(a, b) > 2r \tag{2.28}$$

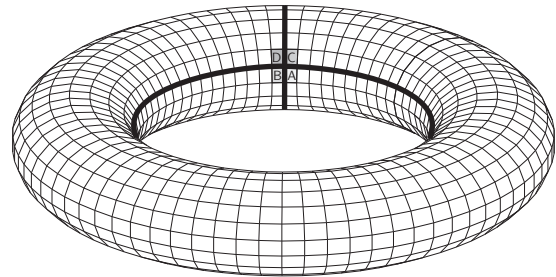
Die Anwendung der periodischen Randbedingung auf das Modell des zellularen Automaten gemäß (2.27) führt zu der in Abbildung 2.14(a) dargestellten Systembeschreibung. Wenn sich ein Agent in der oberen linken Ecke (Position A) befindet, betritt er beim Überschreiten der Systemgrenzen je nach gewählter Richtung die Positionen B, C oder D. Der Agent selbst nimmt das Überschreiten der Systemgrenzen nicht wahr, aus seiner Sicht stellt sich die Umgebung wie in Abbildung 2.14(b) dar. Eine minimale Simulationsumgebung muss dabei sicherstellen, dass $A \neq B \neq C \neq D$ gilt.

Unter Berücksichtigung einer maximalen Wechselwirkungsreichweite von $r= 5$ Zellen, besitzt nach (2.28) die Simulationsumgebung eine minimale Dimension von 11×11 Zellen, so dass für die Berücksichtigung der periodischen Randbedingung folgendes gilt:

$$\min(a, b) > 10 \tag{2.29}$$

Die Implementierung wird im Weiteren verwendet, um zu prüfen, inwieweit das stochastische Bewegungsmodell in der Lage ist das reale Bewegungsverhalten von Personen

| | | | | | | | |
|--|---|---|--|--|---|---|--|
| | | | | | | | |
| | D | C | | | D | C | |
| | B | A | | | B | A | |
| | | | | | | | |
| | D | C | | | D | C | |
| | B | A | | | B | A | |
| | | | | | | | |



(a) Beim Überschreiten einer Grenze des Untersuchungsraums wird die Geometrie durch die gegenüberliegende Seite erweitert.

(b) Darstellung der resultierenden *quasi* unendlichen Umgebung, erreicht durch das Verbinden der Systemgrenzen.

Abbildung 2.14: Implementierung der periodischen Randbedingungen am Beispiel eines zweidimensionalen, diskreten Modellansatzes.

abzubilden. Dafür wird das Verhalten der Agenten im Modell mit bekannten empirischen Untersuchungen verglichen, welche im Fundamentaldiagramm quantitativ zusammengefasst sind. Das Fundamentaldiagramm stellt somit ein wichtiges Kriterium für die Bewertung des Modellansatzes dar und erlaubt eine gezielte Kalibrierung der Modellparameter [vgl. 32, 149]. Für die Analyse des Modellansatzes wird eine Simulationsumgebung mit den folgenden Parametern initialisiert.

- Die Größe des Untersuchungsraum beträgt 51×51 Zellen.
- Es werden je Simulationslauf 10^5 Zeitschritte (Runden) berechnet und die mittlere Geschwindigkeit aller Agenten bestimmt.
- Die Dichte $\rho \in [0,1]$ wird in jedem Simulationslauf schrittweise um $\Delta\rho = 0,05$ erhöht.

2.2.3. Kalibrierung - Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm beschreibt die empirische Beziehung zwischen Dichte ρ und resultierendem spezifischem Fluss J_s (Anzahl von Personen, die eine definierte Messstrecke in einem gegebenen Zeitintervall passieren). Der spezifische Fluss ist gemäß (2.30) durch die Personendichte ρ und die mittlere Geschwindigkeit der Personen v definiert. Dieser Definition folgend, kann das Fundamentaldiagramm auch direkt als Relation von Geschwindigkeit (J_s/ρ) und Dichte dargestellt werden.

$$J_s = \rho v \tag{2.30}$$

Der Verlauf der Geschwindigkeit sinkt charakteristisch mit zunehmender Dichte (zunehmende Interaktionen) und verhält sich für den allgemeinen Fall (Referenzverlauf) nach (2.31) [55]. Hierbei ist die maximale Geschwindigkeit v_{\max} der Personen mit $1,34 \text{ m/s}$ festgelegt und ab einer maximalen Dichte ρ_{\max} von $6,25 \text{ Personen/m}^2$ ist keine Bewegung mehr möglich ($v = 0$). Für spezielle Anwendungsfälle kann das Fundamentaldiagramm veränderte Verläufe ausweisen (z. B. höhere maximale Dichten [vgl. 30, 69, 150]).

$$v = 1,34 \text{ [m/s]} \left(1 - e^{-1,913 \text{ [Personen/m}^2]} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{6,25 \text{ [Personen/m}^2]} \right) \right) \quad (2.31)$$

Im entwickelten Modellansatz kann ein Agent mit anderen Agenten nur unmittelbar interagieren, wenn der Agent versucht eine besetzte Zelle zu betreten. Trifft der Agent auf eine besetzte Zelle, stehen zwei unterschiedliche Interaktionsstrategien zur Disposition.

- **Warten:**

Wenn eine besetzte Zelle als nächste Position ausgewählt wird, behält der Agent seine Position bei.

- **Gehen:**

Jede besetzte Zelle erhält eine Übergangswahrscheinlichkeit von $M_{i,j} = 0$ und die Übergangswahrscheinlichkeiten der anderen Zellen erhöhen sich um $1/(1-M_{i,j})$.

Für die Kalibrierung des entwickelten Modellansatzes stehen somit zwei Interaktionsstrategien und die Variation der Aktionsreichweite (Schritte je Runde) zur Verfügung. In der folgenden Analyse werden je Strategie die Anzahl der Schritte, die ein Agent während eines Zeitschrittes direkt hintereinander ausführen kann, stufenweise von einem Schritt auf fünf Schritte erhöht. In Abbildung 2.15 ist zu erkennen, dass mit zunehmender maximaler Schrittzahl pro Runde der spezifische Einfluss der Interaktionen steigt (sinkende Geschwindigkeit) und sich stetig dem Referenzverlauf annähert. Bei der Verwendung des *Warten* Algorithmus (Abbildung 2.15(a)) verläuft die Geschwindigkeits-Dichte-Relation nahezu linear. Beim *Gehen* Algorithmus verringert sich die Geschwindigkeit ebenfalls mit zunehmender Dichte, allerdings werden im Vergleich mit dem *Gehen* Algorithmus signifikant höhere Geschwindigkeiten ausgewiesen (Abbildung 2.15(b)). Während der Referenzverlauf bereits bei einer Dichte von $\rho/\rho_{\max} = 0,35$ die Hälfte der maximalen Geschwindigkeit aufweist, tritt dies beim *Gehen* Algorithmus erst bei Dichten zwischen $\rho/\rho_{\max} = 0,8$ (1 Schritt) und $\rho/\rho_{\max} = 0,57$ (5 Schritte) auf. Im direkten Vergleich zum Referenzverlauf ist zu erkennen, dass der *Gehen* Algorithmus bei geringen Dichten ($\rho/\rho_{\max} < 0,15$) keine Auswirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten hat.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die Verwendung keiner der beiden Algorithmen zur Abbildung des charakteristischen Referenzverlaufs führt. Bei einer Schrittzahl größer

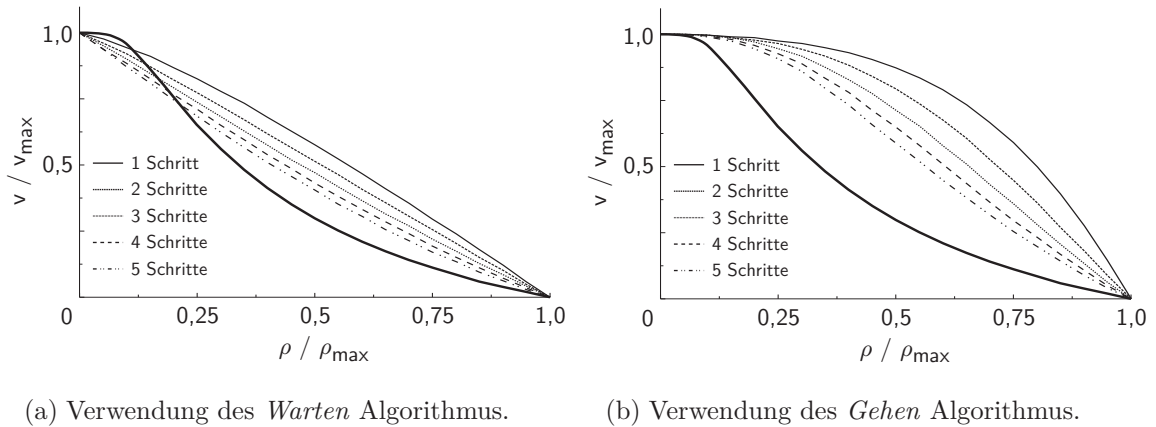


Abbildung 2.15: Fundamentaldiagramm des entwickelten Modellansatzes mit unterschiedlichen Interaktionsstrategien (*Warten*, *Gehen*). Die schwarz hervorgehobene Linie entspricht dem Referenzverlauf nach [55].

eins blieb bis jetzt unberücksichtigt, dass der Agent bei jedem Simulationsschritt temporäre Zellen betrat und diese somit kurzzeitig besetzt waren. Bei der Bewegungsdurchführung wird von den Agenten somit nur die aktuelle Position und nicht der gewählte Pfad berücksichtigt (Problem der kreuzenden Bewegungspfade, siehe Abbildung 2.12(a), S. 57). Erfolgt die Kennzeichnung aller Zwischenpositionen der Agentenbewegung (markieren des Bewegungspfades durch Änderung des Zellzustandes von *frei* zu *besetzt*), so ändert sich der Verlauf der Geschwindigkeits-Dichte-Relation nachhaltig (Abbildung 2.16).

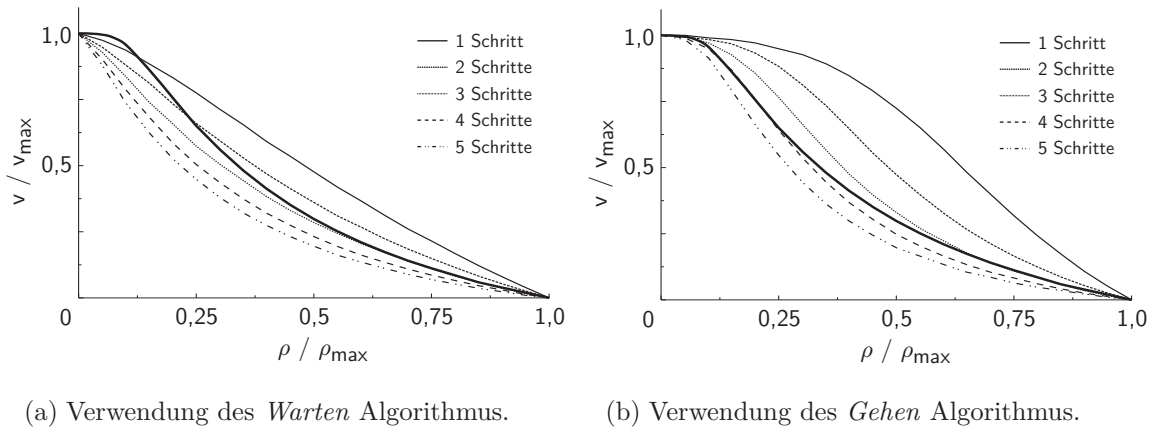


Abbildung 2.16: Fundamentaldiagramm des entwickelten Modellansatzes mit unterschiedlichen Interaktionsstrategien (*Warten*, *Gehen*) unter Berücksichtigung aller Zellen, die durch die Agenten während eines Simulationsschrittes betreten wurden (Bewegungspfad). Die schwarz hervorgehobene Linie entspricht dem Referenzverlauf nach [55].

Die Berücksichtigung der Bewegungspfad der Agenten führt bei der Verwendung des *Gehen* Algorithmus zu einem vergleichbaren Charakteristik von v/v_{\max} und dem exponentiell

fallenden Referenzverlauf. Während der *Warten* Algorithmus die Geschwindigkeit gerade bei geringen Dichten deutlich unterschätzt weist der *Gehen* Algorithmus hier eine gute Übereinstimmung auf (Verwendung von vier Schritten, Abbildung 2.16(b)). Im weiteren Verlauf ($\rho/\rho_{\max} > 0,3$) führt die Verwendung von vier Schritten zu geringeren Geschwindigkeiten gegenüber dem Referenzverlauf (maximal $-0,08 \text{ m/s}$ bei $\rho/\rho_{\max} = 0,55$). Trotzdem wird in den folgenden Anwendungen die Schrittzahl vier verwendet, da die relative Dichte von $\rho/\rho_{\max} = 0,3$ einer absoluten Dichte von ungefähr 2 Passagieren je m^2 entspricht und diese Größenordnung eine obere Grenze für die Auslegung von Bewegungsflächen im Flughafenterminal darstellt (*level of service C*, siehe Kapitel 4.3.2 (S. 178)). In einer erweiterten Implementierung könnte bei hohen (lokalen) Dichten ($\rho/\rho_{\max} \geq 0,6$) ein Übergang zur Verwendung von drei Schritten erfolgen, da in diesem Bereich der Referenzverlauf fast identisch reproduziert werden kann (Abbildung 2.17).

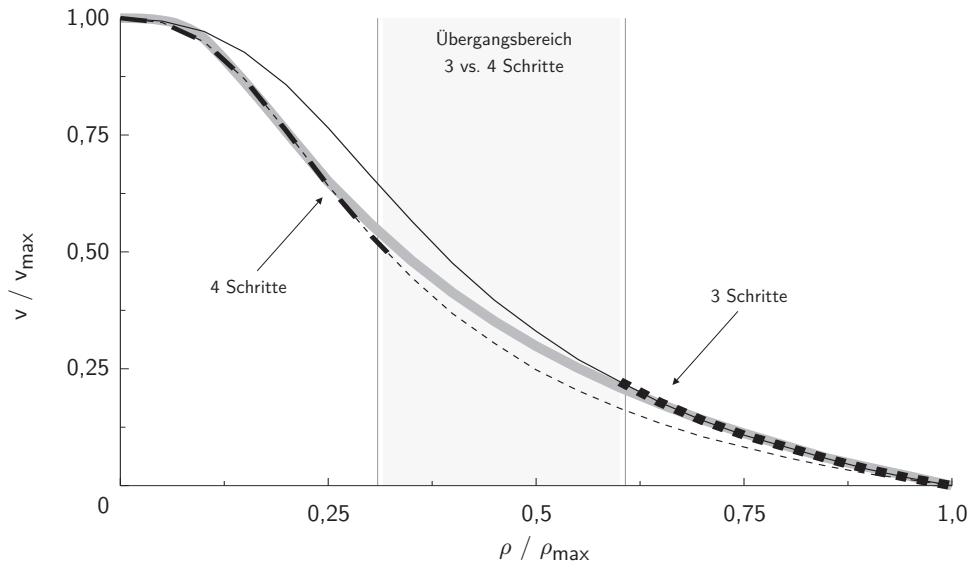


Abbildung 2.17: Fundamentaldiagramm unter Verwendung des *Gehen* Algorithmus und die Berücksichtigung von 3 und 4 Schritten je Simulationslauf. Die grau hervorgehobene Linie entspricht dem Referenzverlauf nach [55].

Die Verwendung eines regulären Gitters führt bei dem entwickelten stochastischen Modell zu signifikanten Einschränkungen. Aufgrund des diskreten Modellierungsansatzes entspricht der Erwartungswert μ (2.22) aus den Modellparametern α und μ_p dem Erwartungswert der Übergangsmatrix μ_M (2.23) nur in den Fällen $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$. Die im Modell vorgegebene Varianz σ_q^2 ist von der Varianz der resultierenden Übergangsmatrix σ_M^2 (2.26) ebenfalls verschieden und weist wie auch μ_M eine hohe Richtungsabhängigkeit auf. Zur Kompensation der Richtungsabhängigkeit wurden geeignete Korrekturfunktionen für die Entkopplung der Modellparameter entwickelt und somit die Bewegungen der

Agenten auf dem regulären Gitter harmonisiert. Eine Kalibrierung des Modells erfolgte durch die Entwicklung einer geeigneten Konfliktlösungsstrategie (*Gehen* Algorithmus und Berücksichtigung des Bewegungspfades) und die Nutzung einer Aktionsreichweite von vier Schritten je Simulationsschritt. Ein Agent wird durch das entwickelte und kalibrierte stochastische Bewegungsmodell in die Lage versetzt, unter Vorgabe einer individuellen Bewegungsrichtung und unter Berücksichtigung der umgebenden Agenten ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Wie der Agent aus einer räumlichen Zielvorgabe die notwendige Richtungsinformation erstellt, ist Bestandteil des nächsten Kapitels.

2.3. Umgebungsanalyse zur Richtungsbestimmung

Das entwickelte stochastisches Modell benötigt für die zielgerichtete Bewegung Informationen sowohl über die Beschaffenheit der jeweiligen Umgebung (z. B. Hindernisse) als auch über den Bewegungspfad zum gewünschten Ziel. Die Richtungsbestimmung ist nicht mehr Kernbestandteil des stochastischen Bewegungsmodells, sondern stellt vielmehr eine Erweiterung im Sinne einer strategisch/taktischen Routenplanung dar [vgl. 151]. In einer Umgebung, in der sich keine Hindernisse zwischen dem Agenten und seinem Ziel befinden und sich der Agent frei bewegen kann, ist die Kenntnis über die Position des Zieles relativ zum Aufenthaltsort des Agenten ausreichend für die Richtungsbestimmung (Abbildung 2.18(a)). Der für das stochastische Bewegungsmodell notwendige Richtungswinkel α ergibt sich aus der Differenz der Ortsvektoren von Aufenthaltsort und Ziel. Befindet sich ein Hindernis auf dem direkten Weg zum Ziel (Abbildung 2.18(b)), ist die Bestimmung der Bewegungsrichtung über die Verbindungslinie zwischen der aktuellen Position und dem angestrebten Zielpunkt nicht möglich.

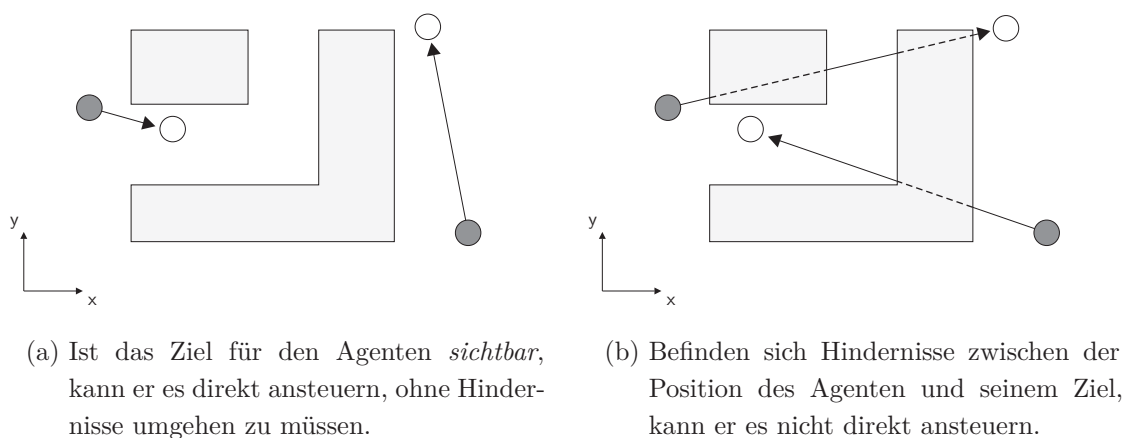


Abbildung 2.18: Sichtbarkeit als Voraussetzung, um ein Ziel auf direktem Weg (jeweils durch eine Verbindungslinie gekennzeichnet) erreichen zu können.

Für die Lösung des entstandenen Routenwahlproblems bei fehlendem Sichtkontakt können zwei Ansätze unterschieden werden. Auf der einen Seite können durch die Analyse aller geometrischen Objekte Zwischenziele definiert und anschließend zu einer Route verbunden werden. Auf der anderen Seite steht die Nutzung der diskreten Gitterstruktur, die bereits für das Modell des zellularen Automaten verwendet wird, um geeignete Richtungsinformationen für das Umgehen von Hindernissen zu erstellen.

2.3.1. Geometrischer Ansatz

Ist der direkte Weg zum Ziel durch Hindernisse versperrt, muss der Agent auf seinem Weg (sichtbare) Zwischenziele ansteuern. Für die Erstellung potentieller Zwischenziele werden markante Punkte der Umgebungsgeometrie (z. B. Ecken) genutzt. In Abbildung 2.19 sind potentielle Routen für das Umgehen der Hindernisse aus Abbildung 2.18(b) aufgezeigt, zwischen denen der Agent eigenständig entscheiden kann. Die Routenplanung erfolgt in drei Stufen. Zum ersten ist zu prüfen, ob überhaupt eine Verbindung von der Position zum gewählten Ziel besteht. Wenn eine Verbindung möglich ist, müssen alle Alternativen erstellt und gemäß den Präferenzen des Agenten bewertet werden. Im letzten Schritt wählt der Agent seine gewünschte Route aus den (verbliebenen) Alternativen aus.

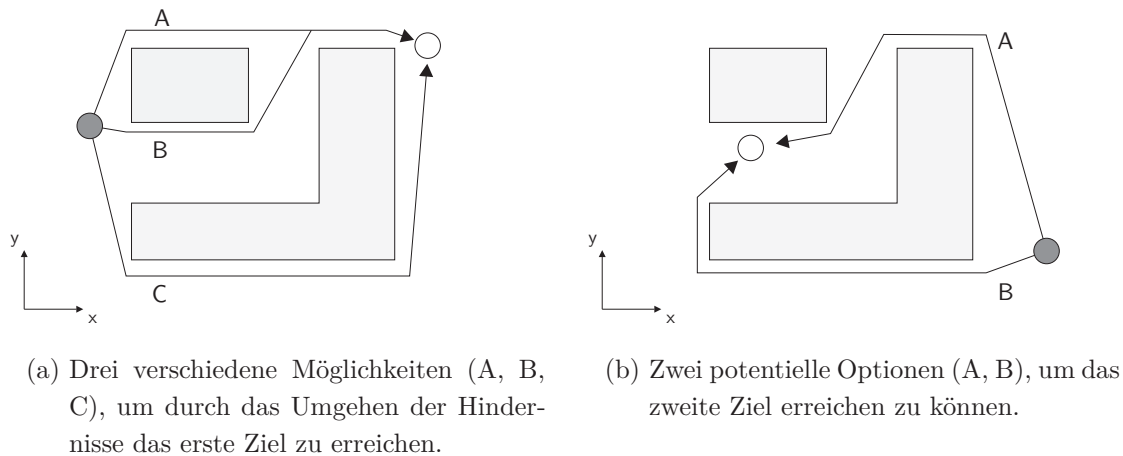
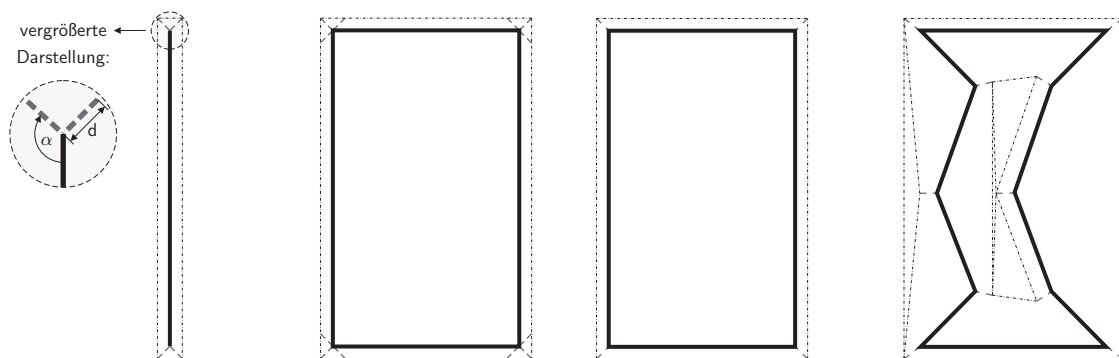


Abbildung 2.19: Abschnittsweise Richtungsfindung unter Berücksichtigung geeigneter Zwischenziele.

Zur Prüfung der Verbindung zwischen Position und Ziel müssen alle notwendigen Zwischenziele (Navigationspunkte) erzeugt werden. Für den hier verwendeten geometrische Ansatz wird eine Umgebungsgeometrie benötigt, die sich aus dem Grundelement *Strecke* (Verbindung zwischen zwei Punkten) zusammensetzt. An den Enden jeder Strecke werden Navigationspunkte in einem Abstand d und einem Winkel von $\alpha = 135^\circ$ erstellt (Abbildung 2.20(a), links, vergrößerte Darstellung). Die Verwendung von vier Navigationspunkten ist notwendig, damit eine Strecke von jeder Richtung aus umgangen werden

kann. Würden nur die Eckpunkte der Strecke genutzt, könnten diese nicht direkt verbunden werden, da die Eckpunkte sich gegenseitig nicht *sehen* können. Basierend auf dem Grundelement der Strecke können alle weiteren Objekte erstellt werden. Allerdings ist zu erkennen, dass bei der Verbindung von Strecken zu einem n-Eck redundante Navigationspunkte erzeugt werden (Abbildung 2.20(a), rechts). Da bei dem Rechteck von den 16 erstellten Navigationspunkten lediglich vier benötigt werden, wird auf der stumpfen Seite der Verbindungsstelle zwischen zwei Strecken ein gewichteter Navigationspunkt erzeugt (Abbildung 2.20(b), links). Das Rechteck benötigt demzufolge die gleiche Anzahl an Navigationspunkten wie eine Strecke. Stehen die Strecken in einem Winkel von 0° zueinander (eine Strecke verlängert die andere Strecke) ist eine Erzeugung von Navigationspunkten an der Verbindungsstelle nicht notwendig. Sind innerhalb des Untersuchungsgebietes komplexe Geometrien vorhanden, müssen sie zuerst durch eine hinreichende Anzahl an Strecken beschrieben und anschließend um die notwendigen Navigationspunkte erweitert werden (Abbildung 2.20(b), rechts).



- (a) Links : An jeder Ecke der Strecke werden jeweils zwei Navigationspunkte in einem Abstand d und einem Winkel α erstellt.
Rechts : Ein Rechteck besteht aus 4 Strecken und 16 Navigationspunkten, wobei 4 Navigationspunkte doppelt vorhanden sind.

- (b) Links : Reduktion der Navigationspunkte auf das notwendige Minimum (4).
Rechts : Komplexe Geometrien können im Inneren ebenfalls ein Netzwerk aus Navigationspunkten besitzen, die für die Navigation jedoch nicht notwendig sind.

Abbildung 2.20: Navigationspunkte an den Streckenenden als Zwischenziele für die Erstellung einer Route zum gewählten Bewegungsziel.

Durch eine Sichtbarkeitsprüfung³ unter allen Navigationspunkten wird die Vorstufe eines Navigationsnetzwerkes erzeugt (gestrichelte Linien in Abbildung 2.20). Bei geometrisch komplexen Strukturen können auch Navigationspunkte innerhalb der Geometrie erzeugt werden. Diese Punkte haben bei der nachfolgenden Routenfindung jedoch keine

³ Sichtbarkeit ist hergestellt, wenn eine Verbindungslinie von zwei Punkten keinen Schnittpunkt mit einer geometrie-beschreibenden Strecke aufweist.

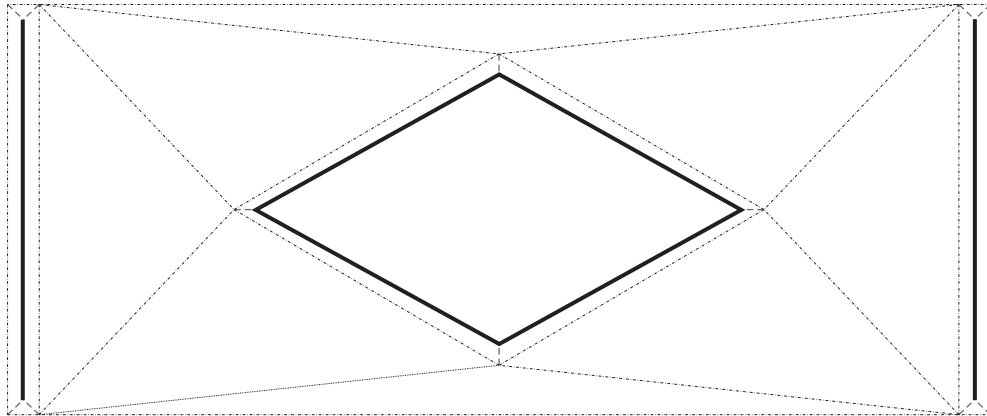
Bedeutung und werden deshalb durch das Erstellen einer transitiven Hülle⁴ eliminiert [152]. Da mit zunehmender geometrischer Komplexität auch die Anzahl der zu berücksichtigenden Navigationspunkte steigt (Abbildung 2.21), sollten aus Gründen der Effizienz des Navigationsnetzwerkes alle benötigten Geometrien nur mit einer Mindestanzahl von Grundelementen (Strecken) beschrieben werden.

Nachdem alle zueinander sichtbaren Navigationspunkte verbunden sind, werden die Verbindungslinien gemäß ihrem Nutzen bewertet. Der Nutzen kann sich dabei aus offensichtlichen Faktoren ergeben (z. B. Entfernung zwischen den Punkten), aber auch durch weitere Faktoren beeinflusst werden. Zum Beispiel ist es aus Sicht eines Agenten nicht unbedingt zielführend, eine Strecke nur nach ihrer Länge zu bewerten, da kurze Strecken auch von vielen weiteren Agenten genutzt werden könnten und demzufolge ein Absinken der Bewegungsgeschwindigkeit (Stau) zu erwarten ist. Aus diesem Grund könnte der Nutzen häufig genutzter Routen bereits im Vorfeld reduziert werden, was aus Sicht der Netzwerkauslastung im Mittel zu einer effizienteren Routennutzung führen würden.

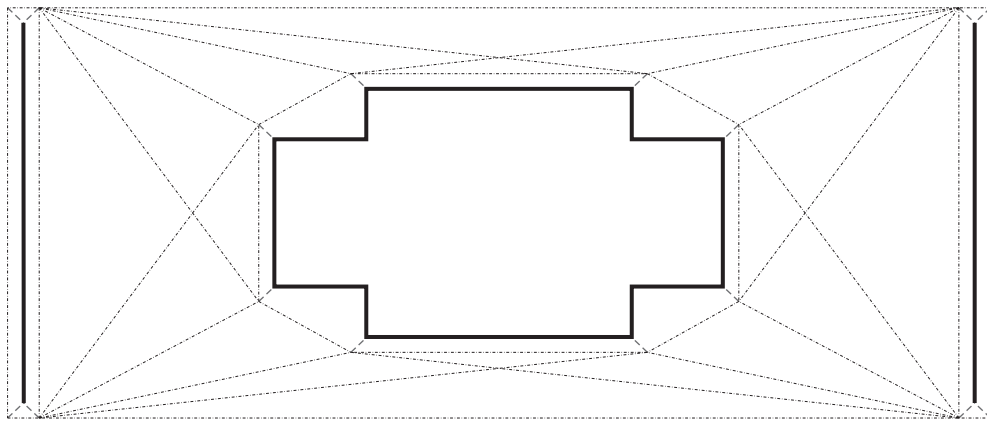
Wenn alle Strecken zwischen den Navigationspunkten bewertet sind, führt die Verwendung des Floyd-Algorithmus [153] zur Bestimmung der nutzenoptimalen Route. Um zum gewünschten Zielpunkt zu gelangen, wählt ein Agent den nächstgelegenen Navigationspunkt in Richtung des Bewegungsziels aus und folgt dann alle weiteren Navigationspunkten auf dem Weg zum Ziel. Der Floyd-Warshall-Algorithmus stellt die Lösung eines *all pairs shortest path* (APSP) Problems dar und weist eine Zeitkomplexität von $\Theta(n^3)$ auf (n = Anzahl der Knoten im Netz, hier Navigationspunkte). Zur Bestimmung nutzenoptimaler Wege kann auch der Algorithmus von [154] genutzt werden, wenn die Lösung auf ein *single source shortest path* (SSSP) Problem reduziert werden kann. Hierbei wird nicht nach einer beliebigen Punkt-zu-Punkt Verbindung gesucht, sondern nach einer Verbindung von einem einzigen Punkt zu einem vorgegebenen Ziel. Der Algorithmus von [154] besitzt aus diesem Grund auch eine geringere Zeitkomplexität von $\Theta(n^2)$. Durch die Verwendung von speziellen Datenstrukturen (Fibonacci-Heap) kann die Zeitkomplexität noch auf $\Theta(n \log n + m)$ reduziert werden (m = Anzahl der Kanten im Netzwerk, hier Verbindungslinien zwischen den Navigationspunkten) [155].

Bei der Anwendung des stochastischen Bewegungsmodells im Flughafenterminal wird in der Initialisierungsphase die Routenplanung als APSP Problem betrachtet. Die Agenten können von jedem Punkt zu jedem beliebigen Punkt laufen und die Routen durch die Nutzung der Navigationsmatrizen bestimmen (Ergebnis des Floyd-Warshall-Algorithmus, siehe Tabelle 2.3). An dem in Abbildung 2.22 dargestellten Beispiel soll die Verwendung von Distanz- und Vorgängermatrix kurz erläutert werden. Das abstrakte Netzwerk besteht aus $n = 6$ Navigationspunkten und den resultierenden $m = 8$ Verbindungslinien

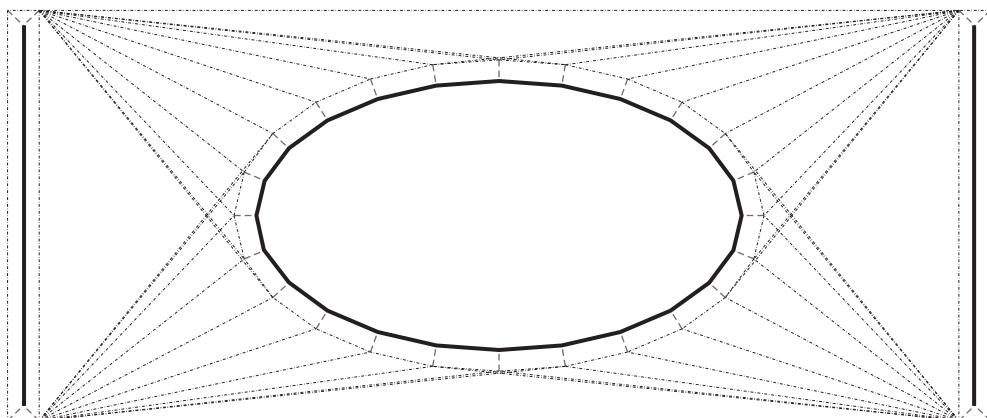
⁴ Für die Routenfindung werden nur Punkte berücksichtigt, die von einem als *außen* gekennzeichneten Navigationspunkt erreichbar sind.



(a) Einfache Geometrie bestehend aus zwei Strecken und einem Viereck in der Mitte.



(b) Höhere geometrische Komplexität mit einer überschaubaren Anzahl von Navigationspunkten. Das innere Navigationsnetz wurde algorithmisch entfernt.



(c) Mit zunehmender Anzahl der geometriebeschreibenden Eckpunkte steigt die Komplexität des Navigationsnetzwerkes überproportional.

Abbildung 2.21: Navigationspunkte als Zwischenziele bei der Routenfindung.

(Sichtverbindung). Die Entfernungen $d_{i,j}$ zwischen den Navigationspunkten sind ebenfalls dargestellt.

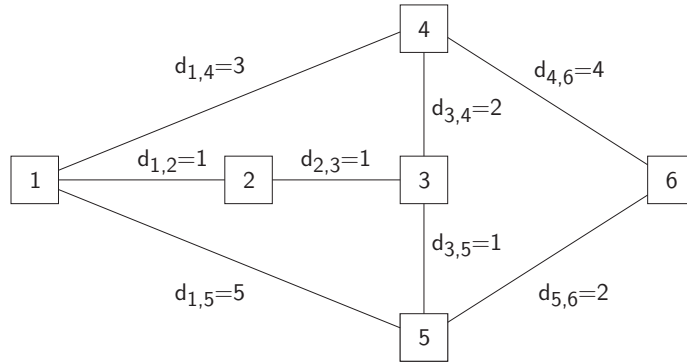


Abbildung 2.22: Einfaches Navigationsnetzwerk bestehend aus sechs Navigationspunkten (Knoten) und acht Verbindungslinien (ungerichtete Kanten mit $d_{i,j} = d_{j,i}$).

In einer initialen $n \times n$ Distanzmatrix wird an jeder Position (i, j) und (j, i) die Entfernung $d_{i,j}$ eingetragen. Wenn keine Verbindung zwischen den Navigationspunkten i und j besteht wird eine Entfernung von ∞ vermerkt⁵. Als Ergebnis des Floyd-Warshall-Algorithmus liegen die finale Distanzmatrix (Tabelle 2.3(a)) und die Vorgängermatrix (Tabelle 2.3(b)) vor. Durch die Verwendung der Distanzmatrix kann die Entfernung zwischen zwei Punkten direkt bestimmt werden ($D_{1,6} = D_{6,1} = 5$).

| (a) Distanzmatrix $D_{i,j}$ | | (b) Vorgängermatrix $P_{i,j}$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 5 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 |
| 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 |
| 4 | 3 | 3 | 2 | 0 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| 5 | 3 | 2 | 1 | 3 | 0 | 2 | 5 | 2 | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 |
| 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 | 0 | 6 | 2 | 3 | 5 | 6 | 6 | 6 |

Tabelle 2.3.: Distanz- und Vorgängermatrix als Ergebnis des Floyd-Warshall-Algorithmus

Um die notwendigen Zwischenziele auf dem Weg von Start zum Ziel zu erhalten, wird die Vorgängermatrix verwendet. Will der Agent von seinem Startpunkt $i = 1$ zum Ziel $j = 6$, muss er zuvor Punkt $P_{1,6} = 5$ passieren, dann $P_{1,5} = 3$ und $P_{1,3} = 2$. Wenn die schrittweise Verfolgung der Zwischenziele mit $P_{1,2} = i = 1$ endet, kann die Route rückwärts, als Verbindung der zuvor erreichten Zwischenziele erstellt werden: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6$.

⁵ Für ∞ wird bei einer Implementierung eine Zahl d_{\max} gewählt, für die gilt: $\max(d_{i,j}) \ll d_{\max}$.

Innerhalb des Flughafenterminals müssen die Agenten (Passagiere) festgelegte Abfertigungsstationen anlaufen (z. B. Check-In, Sicherheits- oder Bordkartenkontrolle). Wenn der Agent die Umgebung vollständig kennt, kann er unter Berücksichtigung seiner Position und aller sichtbaren Navigationspunkte die nutzenoptimale Route bestimmen⁶. Die Route besteht aus der Strecke zum ersten sichtbaren Navigationspunkt i , den Zwischenzielen gemäß $P_{i,j}$ und der Strecke vom letzten Navigationspunkt j zum Ziel (Abbildung 2.23(a)). Wenn aus Sicht des Agenten und aus Sicht des Zieles mehrere Navigationspunkte i_n und j_n als Alternativen zur Auswahl stehen, wird die optimale Route durch das Nutzenmaximum (2.32) bestimmt.

$$\max (d_{\text{Position},i_n} + D_{i_n,j_n} + d_{j_n,\text{Ziel}}) \quad (2.32)$$

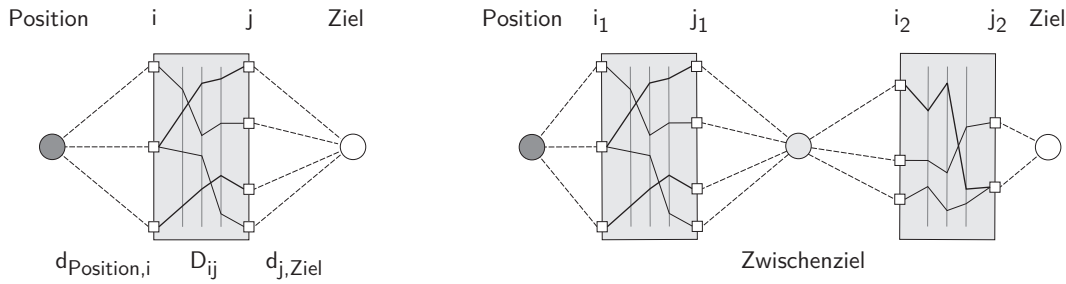
Neben der Möglichkeit, das gesamte Netz für die Navigation zu nutzen, können auch nur Teile des Navigationsnetzes berücksichtigt werden (Abbildung 2.23(b)). Gerade unerwartete Systemzustände können erst mit Kenntnisnahme in die eigene Planung einfließen und sind (noch) nicht im statischen Navigationsnetzwerk berücksichtigt. Da eine Änderung der statischen Matrizen D und P zeitaufwendig ist und die dynamischen Systemzustände eine ungewisse Dauer aufweisen, sollte die Aktualisierung die Matrizen nicht bei Effekten von geringer zeitlicher und räumlicher Ausdehnungen durchgeführt werden, sondern nur bei nachhaltigen Änderungen des Navigationsnetzwerkes (z. B. dauerhafte Sperrung von Wegen innerhalb der Umgebungsgeometrie). Dynamische Effekte können durch eine individuelle Neubewertung der freien Wegstrecken $d_{j_n,\text{Zwischenziel}}$ und $d_{\text{Zwischenziel},i_n}$ implementiert werden, wobei der Nutzen einer Route durch die Berücksichtigung von lokalen Effekte direkt an die jeweiligen Gegebenheiten individuell angepasst werden kann.

Die in Abbildung 2.23(b) dargestellte Nutzung von Teilnetzen dient nicht nur der potentiellen Neuausrichtung der Bewegungsrouten, sondern bildet auch sehr gut das Verhalten eines Agenten ab, der aufgrund seines eingeschränkten Sichtbereiches nur den aktuellen Zustand von einem Teil seiner Umgebung kennt. Werden durch einen ständig optimierenden Agenten alle Verbindungslinien fortlaufend neu bewertet (hohe Anzahl an Zwischenzielen, siehe Abbildung 2.23(b)), liegt ein SSSP Problem vor und es sollte aus Gründen der Effizienz auf den Dijkstra-Algorithmus für die individuelle Routenfindung zurückgegriffen werden.

2.3.2. Diskreter Ansatz unter Nutzung eines regulären Gitters

Im Sinne eines SSSP Problems stellt das Bewegungsziel des Agenten eine Senke dar. Für die Erstellung der Bewegungsrichtungen von jedem beliebigen Punkt zu diesem Ziel kann

⁶ Bei der einfachen, statischen Routenplanung bleiben Effekte zunächst unberücksichtigt, die aufgrund von dynamischen Interaktionen (Stau) entstehen können.



- (a) Das Netzwerk ist bekannt und kann vollständig zur Routenerstellung genutzt werden.
- (b) Nur ein Teil des Netzwerkes wird für die Routenerstellung genutzt. Nach Erreichen eines Zwischenziels erfolgt die erneute Routenbestimmung.

Abbildung 2.23: Nutzung des Routennetzwerkes zur Navigation.

das bereits vorhandene reguläre Gitter des zellularen Automatenmodells genutzt werden. Ausgehend von der Zielposition (Zielzelle L_Z) wird in jeder umgebenen Zelle die Entfernung zu L_Z ermittelt und in einer Entfernungsmatrix E gespeichert. Der nachfolgende Algorithmus beschreibt den wesentlichen Ablauf bei der Erstellung von E (*breadth first search*, in Anlehnung an [156], dort für von-Neumann-Nachbarschaft).

1. Die Zielzelle L_Z wird mit einer Entfernung $E_Z = 0$ und alle anderen Zellen mit $E_n = \infty$ initialisiert.
2. Lege L_Z in eine *first in first out* Datenstruktur (Queue) Q .
3. Solange Zellen in Q hinterlegt sind:
 - Entnehme die erste Zelle aus $Q \rightarrow L_Q$.
 - Für alle an L_Q angrenzenden Zellen L_{Qn} :
 - $E_{Qn} = \min(E_{Qn}, E_{L_Q} + \Delta E_{Qn})$.
 - Wenn E_n verändert wurde, lege L_{Qn} in Q .

Die Entfernung der Nachbarzellen ΔE_{Qn} untereinander ist abhängig von der relativen Position der Zellen zueinander (diagonal oder horizontal/vertikal gelegen). Wird eine Geometrie⁷ G bei der Erstellung der Entfernungsmatrix E ebenfalls berücksichtigt, dürfen die durch Hindernisse besetzten Zellen nicht in die Berechnung der Entfernung einbezogen werden ($E_G = \infty$). Für ΔE_{Qn} lassen sich drei unterschiedliche Fälle wie folgt klassifizieren:

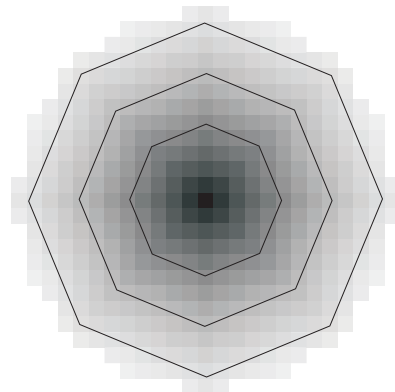
$$\infty, \text{ wenn } L_{Qn} \text{ eine Geometriezelle ist } (n = G),$$

⁷ Eine Geometrie ist in diesem Zusammenhang eine zum Untersuchungsraum korrespondierende Gitterstruktur, bei der durch Hindernisse blockierte Zellen den Zustand *besetzt* erhalten.

- $\sqrt{2}$, wenn L_{Q_n} sich diagonal zu L_Q befindet und
- 1 , wenn L_{Q_n} sich horizontal/vertikal zu L_Q befindet.

Die auf Basis des beschriebenen Algorithmus berechnete Entfernungsmatrix E ist in Abbildung 2.24(a) dargestellt. Die Zielzelle L_Z ist als Mittelpunkt der Matrix bestimmt und für ΔE_{Q_n} wurden für eine bessere Darstellung vereinfachend ganzzahlige Werte definiert ($\Delta E_{Q_n} = 14$ bei diagonalen Position und $\Delta E_{Q_n} = 10$ bei horizontaler/vertikaler Position).

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 70 | 66 | 62 | 58 | 54 | 50 | 54 | 58 | 62 | 66 | 70 |
| 66 | 56 | 52 | 48 | 44 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 66 |
| 62 | 52 | 42 | 38 | 34 | 30 | 34 | 38 | 42 | 52 | 62 |
| 58 | 48 | 38 | 28 | 24 | 20 | 24 | 28 | 38 | 48 | 58 |
| 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 10 | 14 | 24 | 34 | 44 | 54 |
| 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 10 | 14 | 24 | 34 | 44 | 54 |
| 58 | 48 | 38 | 28 | 24 | 20 | 24 | 28 | 38 | 48 | 58 |
| 62 | 52 | 42 | 38 | 34 | 30 | 34 | 38 | 42 | 52 | 62 |
| 66 | 56 | 52 | 48 | 44 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 66 |
| 70 | 66 | 62 | 58 | 54 | 50 | 54 | 58 | 62 | 66 | 70 |



- (a) Entfernungsmatrix E bezogen auf den Mittelpunkt als Zielzelle ($E_Z=0$).
- (b) Farblich hervorgehobene Entfernungsmatrix E mit drei äquidistanten Linien (schwarz $\hat{=}$ $E_Z=0$).

Abbildung 2.24: Ausbreitungsalgorithmus zur Bestimmung der Entfernungsmatrix E .

Innerhalb des zellularen Automaten könnte E auch als Richtungsmatrix genutzt werden, indem ein Agent von seiner Position ausgehend nur Zellen betritt, die eine kleinere Entfernung aufweisen als derzeitig besetzte Zelle. Bei eingehender Betrachtung von Abbildung 2.24 ist zu erkennen, dass E die Form eines Achtecks aufweist und nicht kreisförmig ist. Während die Zellen auf den Symmetrieachsen korrekt berechnet sind, wird die Entfernung der anderen Zellen zur Zielzelle überschätzt, da die Entfernung zwischen zwei Punkten abweichend zur Euklidischen Distanz bestimmt wird. Dem vorgestellten Algorithmus folgend, besitzt die Zelle $L_{1,2}$ (bezogen auf das Ziel mit $L_Z = L_{0,0}$) eine Entfernung von $d = 2,414$ (vgl. auch Abbildung 2.24(a), hier wird aufgrund der ganzzahligen Abstände ein Wert von 24 ausgewiesen). Bei der Verwendung der Euklidischen Entfernung ist $d = \sqrt{(1^2 + 2^2)} = \sqrt{5} = 2,236$. Die allgemeine Beschreibung der Abstandsfunktionen (Metriken) für n -dimensionale Räume erfolgt durch die p -Normen. Die p -Normen sind dabei nach (2.33) definiert.

$$d_p^n = \|x\|_p := \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \tag{2.33}$$

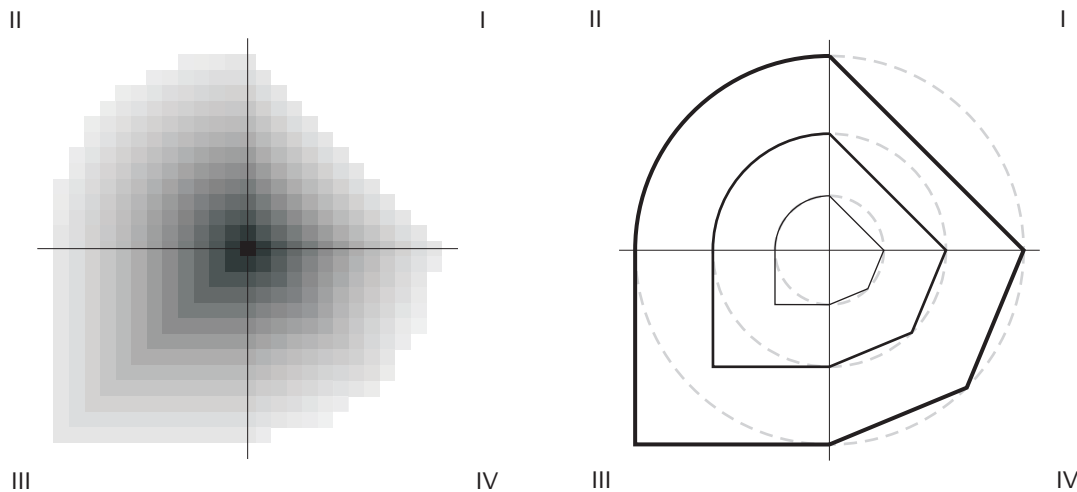
Im zweidimensionalen Raum ($n = 2$) ergeben sich die Lösungen für d_p^n unter Berücksichtigung von zwei Punkten P und R mit $\Delta x = P_x - R_x$ und $\Delta y = P_y - R_y$ für die Betragssummen-Norm ($p = 1$), die Euklidische-Norm ($p = 2$) und die Tschebyschew-Norm ($p = \infty$) nach den folgenden Gleichungen.

$$d_1^2(P, R) = |\Delta x| + |\Delta y| \tag{2.34}$$

$$d_2^2(P, R) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{2.35}$$

$$d_\infty^2(P, R) = \max(|\Delta x|, |\Delta y|) \tag{2.36}$$

Die Darstellung der Entfernungsmatrizen und die Äquidistanzlinien der jeweiligen p -Norm erfolgt in Abbildung 2.25.



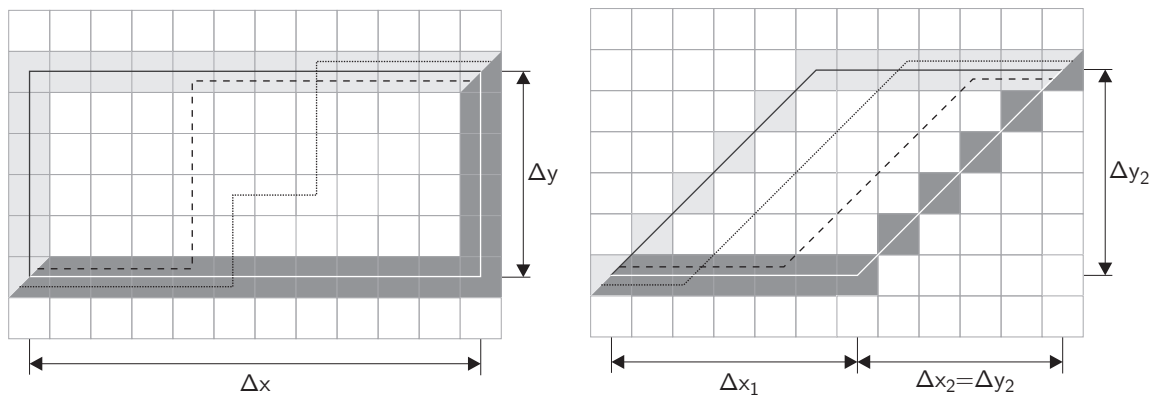
(a) Farblich hervorgehobene Entfernungsmatrix bei der Verwendung verschiedener p -Normen.

(b) Aus der Verwendung unterschiedlicher Metriken hervorgehende Äquidistanzlinien.

Abbildung 2.25: Entfernungsmatrizen basierend auf unterschiedlichen Normen: Betragssummen-Norm (Quadrant I), Euklidische-Norm (Quadrant II), Tschebyschew-Norm (Quadrant III) und die Norm des vorgestellten Algorithmus (Quadrant IV).

Im ersten Quadranten (I) ist die Betragssummen-Norm ($p = 1$) dargestellt und es ist zu erkennen, dass die Entfernung im Vergleich zur Euklidischen-Norm ($p = 2$, Quadrant II) überschätzt wird. Im Vergleich dazu unterschätzt die Tschebyschew-Norm ($p = \infty$, Quadrant III) die Entfernung. Das Ergebnis der Entfernungsbestimmung auf Basis des vorgestellten Algorithmus ist im vierten Quadranten (IV) abgebildet und stellt einen Kompromiss zwischen Betragssummen- und Tschebyschew-Norm dar.

Die formale Bestimmung der Norm im vierten Quadranten erfolgt durch eine Analogiebetrachtung zur Betragssummen-Norm. Die in (2.34) definierte Betragssummen-Norm⁸ stellt eine Verbindung zwischen zwei Punkten dar, die nur separate horizontale und vertikale Bestandteilen aufweist. Bei der grafischen Darstellung der Entfernung zwischen beiden Punkten in Abbildung 2.26(a) ist zu erkennen, dass mehrere kürzeste Pfade bei Anwendung der Betragssummen-Norm existieren. Diese Pfade befinden sich alle innerhalb eines begrenzenden Rechtecks. Jeder kürzeste Pfad setzt sich aus der gleichen Anzahl horizontaler (Δx) und vertikaler (Δy) Anteile zusammen (2.37), wobei das begrenzende Rechteck als kumulierte Darstellung der jeweiligen Anteile angesehen werden kann. In Abbildung 2.26(b) sind die kürzesten Pfade ebenfalls geometrisch begrenzt. Da der vorgestellte Algorithmus bei der Entfernungsbestimmung auch diagonale Ausbreitungen berücksichtigt, weist das begrenzende Viereck die Form eines Parallelogramms auf.



(a) Unter Verwendung der Betragssummen-Norm weisen alle aufgezeigten Pfade die gleiche Länge auf.

(b) Die dargestellten Pfade mit gleicher Länge basieren auf dem vorgestellten Algorithmus zur Bestimmung einer Entfernungsmatrix.

Abbildung 2.26: Entfernungsdarstellung bei Berücksichtigung eines regulären Gitters und bei Verwendung von Betragssummen-Norm sowie des vorgestellten Ausbreitungsalgorithmus.

Durch die Definition von Einheitsvektoren in horizontaler Richtung ($\mathbf{e}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$) und vertikaler Richtung ($\mathbf{e}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$) kann die Verbindungslinie zwischen zwei Punkten wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \Delta x \mathbf{e}_x + \Delta y \mathbf{e}_y. \quad (2.37)$$

⁸ Für die Betragssummen-Norm wird auch als Manhattan-Metrik bezeichnet, da aufgrund des streng geometrisch angeordneten Straßenstruktur in Manhattan nur horizontal/vertikal verlaufende Straßen als Verbindungslinien zwischen zwei Punkten genutzt werden können.

Da der vorgestellte Ausbreitungsalgorithmus auch das Betreten diagonal positionierter Zellen erlaubt, muss bei der Bestimmung der Verbindungslinie (2.38) somit ein horizontaler, ein vertikaler sowie ein (gekoppelter) diagonaler Anteil ($\mathbf{e}_{xy} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$) berücksichtigt werden (siehe Abbildung 2.26(b) mit $\Delta x_2 = \Delta y_2$).

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \Delta x_1 \mathbf{e}_x + \Delta y_1 \mathbf{e}_y + \left| \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix} \right| \mathbf{e}_{xy} \quad (2.38)$$

Unter Verwendung des Ausbreitungsalgorithmus ergibt sich die Entfernung $\hat{d}^2(P, R)$ zwischen den beiden Punkten gemäß (2.39)⁹.

$$\hat{d}^2(P, R) = |\Delta x - \Delta y| + \sqrt{2} \min(\Delta x, \Delta y) \quad (2.39)$$

Durch die zusätzliche diagonale Richtungskomponente \mathbf{e}_{xy} ist die Entfernung gegenüber der Betragssummen-Norm allgemein kleiner und befindet sich somit näher an der Euklidischen-Norm. Befinden sich die beiden Punkte auf einer horizontalen ($\Delta y = 0$) oder vertikalen ($\Delta x = 0$) Linie wird die Entfernung in allen Fällen korrekt bestimmt:

$$d_\infty^2 = d_2^2 = d_1^2 = \hat{d}^2. \quad (2.40)$$

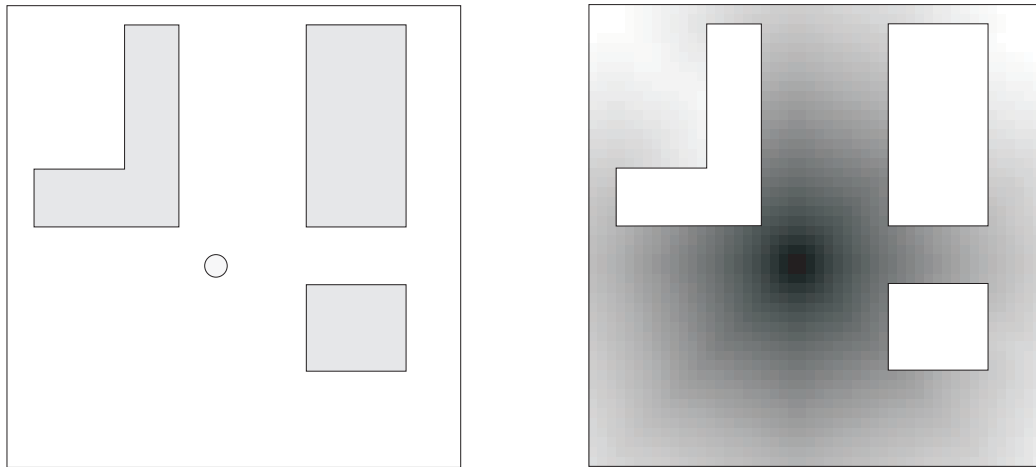
Wenn sich beide Punkte auf einer diagonalen Linie befinden ($|\Delta x| = |\Delta y|$), liefert nur noch \hat{d}^2 die exakte Lösung im Vergleich zur Euklidischen-Norm d_2^2 .

$$d_\infty^2 < d_2^2 = \hat{d}^2 < d_1^2 \quad (2.41)$$

Durch die Überschätzung der Entfernung von Zellen, die nicht auf den Symmetrieachsen des Gitters liegen, würde eine Implementierung des Ausbreitungsalgorithmus dazu führen, dass die Agenten die Symmetrieachsen als kürzere Wege bevorzugen. Auf der anderen Seite besteht der entscheidende Vorteil des Algorithmus darin, dass er unter Nutzung der bereits vorhandenen Gitterstruktur auf einfache Weise auch Hindernisse bei der Richtungswahl berücksichtigen kann. Die Entfernungsmatrix E wird dabei um die jeweiligen Hindernisse herum entwickelt (Abbildung 2.27).

Wird während der Anwendung des Algorithmus die relative Position der Vorgängerzelle von der aus die Entfernung bestimmt wurde gespeichert (L_Q), kann eine Richtungsmatrix

⁹ In diesem Zusammenhang könnte aufgrund der Nutzung der Moore-Nachbarschaftsrelation auch von einer Moore-Metrik gesprochen werden.



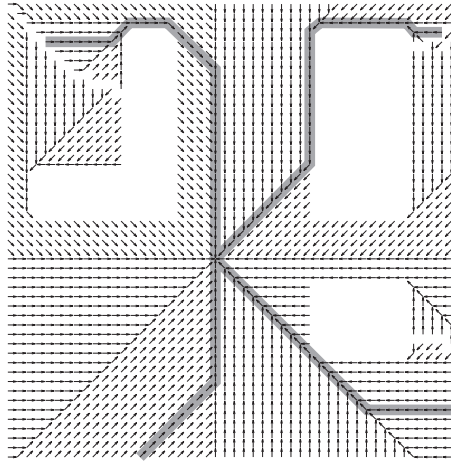
(a) Geometrie mit drei unterschiedlichen Hindernissen und dem zentral positionierten Ziel ($E_Z = 0$).
 (b) Korrespondierende Entfernungsmatrix E (farblich differenziert, $E_Z = 0 \hat{=} \text{schwarz}$).

Abbildung 2.27: Entwicklung von E unter Berücksichtigung von Hindernissen.

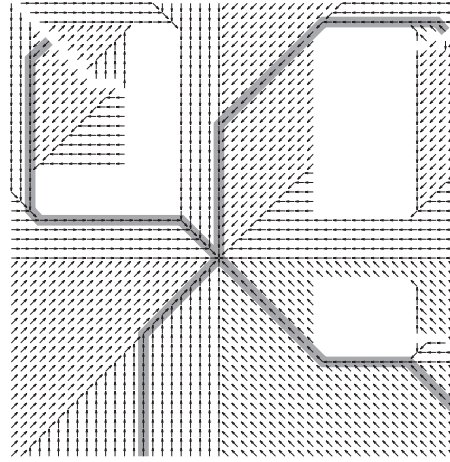
R erstellt werden. Statt der Entfernung zum Ziel ist in R der normierte Richtungsvektor zur Vorgängerzelle gespeichert. Bei der Bestimmung der Entfernung könnten die Nachbarzellen L_{nQ} willkürlich ausgewählt werden, jedoch werden die angrenzenden Nachbarzellen typischer Weise in einer festen Reihenfolge um L_Q abgearbeitet. Die Reihenfolge ergibt sich zumeist aus der mathematisch negativen (-) oder positiven Drehung (+) um L_Q . Die in Abbildung 2.28 dargestellten Bewegungspfade zeigen, wie die Hindernisse durch die Agenten umgangen werden können, wenn sie den (lokalen) Richtungsangaben folgen.

Die korrespondierenden Pfade von R^- (Abbildung 2.28(a)) und R^+ (Abbildung 2.28(b)) unterscheiden sich zwar im qualitativen Verlauf, sind aber nach (2.39) bezogen auf die zurückgelegten Entfernungen identisch. Die unterschiedlichen Auswirkungen durch die Verwendung von R^- und R^+ treten besonders deutlich beim Pfad im oberen linken Quadranten auf, wo das Hindernis auf unterschiedlichen Seiten passiert wird. Der Pfad im unteren linken Quadranten verläuft ungestört und wird nicht von Hindernissen beeinflusst.

Wie schon in Abbildung 2.26(b) dargestellt, setzt sich der Pfad aus einem diagonalen, einem horizontalen und einem vertikalen Anteil zusammen. Aus diesen separaten Anteilen kann die direkte, auf das Ziel verweisende Verbindungslinie durch vektorielle Addition bestimmt werden (Abbildung 2.29(a)). Dafür muss jedoch bei der Erstellung der spezifischen Richtungsinformation zusätzlich die Anzahl und die Ausprägung (diagonal, horizontal oder vertikal) der gleichgerichteten Vorgänger gespeichert werden. Die daraus resultierende Richtungsmatrix R ist in Abbildung 2.29(b) dargestellt, wobei die zellbasierten Richtungsvektoren normiert und für eine bessere Darstellung skaliert wurden.

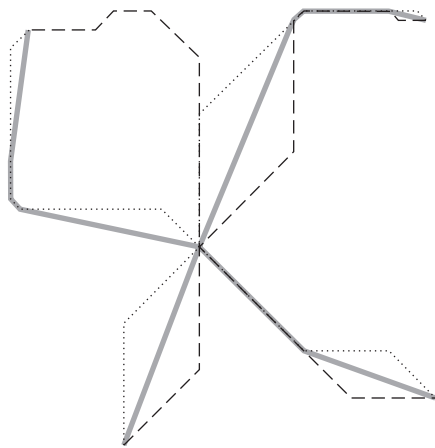


(a) Richtungsmatrix R^- bei Entwicklung der Entfernungsmatrix mit negativem Drehsinn.

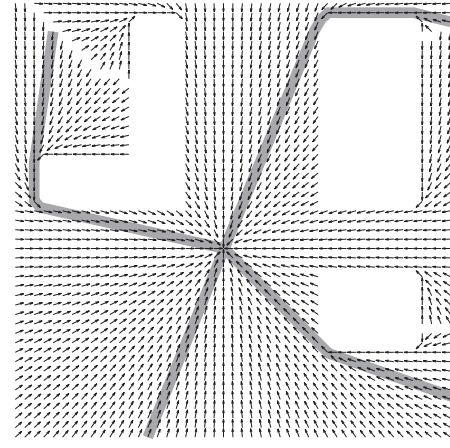


(b) Richtungsmatrix R^+ bei Entwicklung der Entfernungsmatrix mit positivem Drehsinn.

Abbildung 2.28: Darstellung der spezifischen Richtungsmatrizen R^- und R^+ basierend auf Entfernungsmatrix E und Kennzeichnung der Bewegungspfade basierend auf vier unterschiedlichen Startpositionen. Das zu erreichende Ziel ist in der Mitte der Geometrie angeordnet.



(a) Darstellung der Bewegungspfade von vier verschiedenen Startpositionen auf der Basis von R^- und R^+ . Die aus R^- und R^+ abgeleiteten aggregierten Richtungspfade sind separat gekennzeichnet.



(b) Durch die aggregierte Richtungsmatrix R können die Agenten ihr Ziel von jeder Position aus auf direktem Weg gemäß der Euklidischen-Norm zurücklegen.

Abbildung 2.29: Erstellung der finalen Richtungsmatrix R auf der Basis der spezifischen Richtungsmatrizen R^- und R^+ . R enthält keine Artefakte und entspricht einem von der Euklidischen-Norm abgeleitetem Richtungsfeld.

Durch die Weiterentwicklung des Ausbreitungsalgorithmus kann auf Basis der \hat{d}^2 Metrik (2.39) eine Richtungsmatrix R erzeugt werden, die keine modellbedingten Richtungsartefakte aufweist (siehe Abbildung 2.26). Der Richtungswinkel aus der Richtungsmatrix R dient dem stochastischen Bewegungsmodell als Eingangsgröße, sodass die Agenten ein vorgegebenes Ziel von jeder (diskreten) Position aus erreichen können (SSSP Problem). Da für jedes Ziel (oder Gruppe von Zielen) eine separate Richtungsmatrix erstellt werden muss, ist die vorgestellte Methode zur diskreten Richtungsbestimmung nur für eine geringe Zahl an Zielen effizient [vgl. 106]. Obwohl der zeitliche Vorteil durch den direkten Zugriff auf die Richtungsinformation gegeben ist (gespeichert in der Gitterzelle), steigt mit zunehmender Anzahl unterschiedlicher Ziele auch der notwendige Speicherbedarf, was besonders bei Geometrien mit großen Ausdehnungen stark ins Gewicht fällt.

Eine Lösung bei großen und komplexen Geometrien mit einer hohen Anzahl an potentiellen Zielen könnte die Differenzierung zwischen lokalen und globalen Geometrien darstellen. Während auf lokaler Ebene eine begrenzte Anzahl von Zielen als SSSP Problem behandelt werden, erfolgt auf globaler Ebene die Richtungsfindung als APSP Problem.

2.4. Interaktionsmodellierung

Mit der Erstellung der Richtungsinformation unter Berücksichtigung der Umgebungsgeometrie ist ein wesentlicher Bestandteil der Erweiterung des stochastischen Bewegungsmodells abgeschlossen. Mit der aus der Umgebungsanalyse abgeleiteten Bewegungsrichtung sind alle notwendigen Modellparameter bestimmt. Das stochastische Bewegungsmodell wurde bereits mit dem allgemeinen Fundamentaldiagramm kalibriert, wobei die Wechselwirkungsreichweite auf vier Bewegungsschritte je Zeitschritt festgelegt wurde. Bei einer Zellgröße von 0,4 m entspricht dies einer Reichweite von 1,6 m. Für die strategisch/taktische Routenplanung kann es notwendig sein, auch dynamische Hindernisse (z. B. Menschenansammlungen) zu umgehen. Hierfür bietet es sich an, den Kenntnisstand von vorangehenden Agenten zu nutzen, so dass die individuelle Informationsreichweite erhöht wird. Wenn ein vorangehender Agent aufgrund lokaler Wechselwirkungen einem Hindernis ausweicht und diese Information den nachfolgenden Agenten mitteilt, können diese schon frühzeitig ihre Bewegungsrichtung anpassen ohne in lokale Wechselwirkungen mit dem Hindernis treten zu müssen. Ähnlich dem Ansatz, dass der Agent innerhalb eines Zeitschrittes seine temporär besetzten Zelle als Bewegungspfad markiert, wird im Folgenden das reguläre Gitter genutzt, um Richtungsinformationen unter den Agenten auszutauschen.

Für die Implementierung der erweiterten Interaktionen zwischen den Agenten werden im Folgenden drei primäre Konstellationen berücksichtigt: Ausweichen, Folgen sowie die Gruppenbewegung. Im Rahmen der vorhandenen mikroskopischen Bewegungsmodelle gibt es zwei allgemeine Ansätze zur Umsetzung dieser erweiterten Interaktionen. Während

im Modell des zellularen Automaten ein separates Bodenfeld (*floor field*) zum Informationsaustausch dient [67, 111], wird beim Modell der sozialen Kräfte das individuelle Ausweichverhalten der Agenten direkt durch die modellbedingten (kontinuierlichen) Abstoßungskräfte erzeugt [2]. Durch individuell verschiedene Bewegungsgeschwindigkeiten und -richtungen ergeben sich beim Modell der sozialen Kräfte aus Sicht eines Agenten unterschiedliche Relativbewegungen zu den umgebenden Agenten. Bei divergierenden Bewegungspfaden treten keine oder nur geringe Abstoßungskräfte auf. Konvergieren die Pfade von zwei Agenten, steigen die gegenseitigen Abstoßungskräfte mit zunehmender Annäherung und bewirken Richtungs- und Geschwindigkeitsanpassungen.

Durch das Bodenfeld wird bei der Verwendung eines gitterbasierten Modells die aktuelle Bewegungsrichtung jedes Agenten in den von ihm betretenen Zellen gespeichert. Zwischen jedem Zeitschritt wird dann das Bodenfeld aktualisiert, in dem die gespeicherten Richtungsinformationen (Spuren) räumlich ausgedehnt und zeitlich gedämpft werden. Die nachfolgenden Agenten berücksichtigen dann neben ihren initialen Richtungsinformationen auch die Richtungsinformationen des Bodenfeldes. Innerhalb des entwickelten stochastischen Bewegungsmodells gibt es prinzipiell zwei Lösungsansätze für die Implementierung der zusätzlichen Informationsreichweite. Auf der einen Seite können je nach Situation die Übergangswahrscheinlichkeiten $M_{i,j}$ in den betreffenden Zellen angepasst werden und auf der anderen Seite ist die direkte Beeinflussung der Bewegungsrichtung α möglich. Da bereits eine Richtungsmatrix R existiert (vgl. Abbildung 2.29(b)), ist ein Anpassung von α naheliegend und wird der lokalen Änderung von $M_{i,j}$ vorgezogen.

Das Ausweichen stellt eine strategisch/taktische Verhaltensweise dar, bei der der Agent versucht, Bereiche mit hohem Wechselwirkungspotential zu meiden. Basierend auf den vorangegangenen Bewegungen der anderen Agenten versucht er abzuschätzen, welche Positionen diese im nächsten Zeitschritt einnehmen werden. Im vorgeschlagenen Ansatz werden hierfür die Bewegungstrajektorien der Agenten auf Basis der letzten Bewegungsschritte extrapoliert. Bei der Extrapolation wird die normierte Bewegungsrichtung in einer separaten Richtungsmatrix für die Ausweichreaktionen R^A gespeichert, wobei alle seitlich an die besetzten Zellen angrenzenden Zellen transversale Richtungszuweisungen erhalten (Abbildung 2.30). Ist die Berechnung eines Zeitschrittes abgeschlossen, wird R^A durch einen Filter geglättet. Der Filter glättet das Gitter durch die Verwendung einer gleichgewichteten 3×3 Matrix. Durch dreimalige Anwendung des Filters, wird die gewünschte isotrope und abklingende Wirkung auf R^A erzielt.

Das erstellte Richtungsfeld R^A ruft bei konvergierenden Bewegungspfaden eine Richtungsänderung hervor, da aufgrund der Extrapolation der Bewegungstrajektorien die Richtungsinformationen entgegenkommender Agenten bereits in R^A vorhanden sind. Nachfolgende Agenten erhalten die Richtungsinformationen zwar nur in abgeschwächter Form, können diese aber bei räumlicher Nähe zum vorausgehenden Agenten für mögliche Überholvorgänge nutzen. Neben der Berücksichtigung von Ausweichbewegungen gegenüber

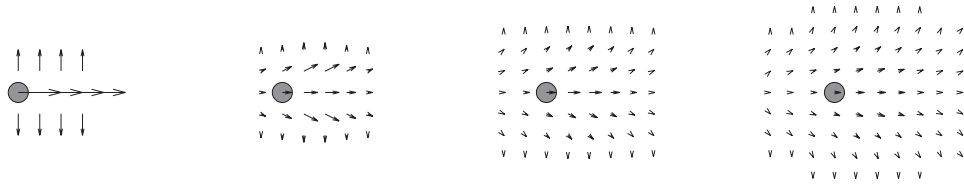


Abbildung 2.30: Entwicklung des Richtungsfeldes R^A für strategisch/taktische Ausweichbewegungen aufgrund der Bewegungsrichtung des Agenten. Durch die dreistufige Anwendung eines gleichgewichteten Filters erfolgt eine isotrope und abklingende Ausbreitung der Richtungsinformation (mehrfache Filteranwendung von links nach rechts).

entgegenkommenden Agenten durch R^A , erfolgt basierend auf der gleichen Methodik die Modellierung des Folgeverhaltens durch R^F . Während das Ausweichen auf einer Extrapolation der aktuellen Bewegungsrichtung basiert, ist für das Verfolgen die Berücksichtigung der tatsächlichen Trajektorie notwendig. Hinterlässt ein Agent auf jeder betretenen Zelle seine Bewegungsrichtung, entsteht ein an Abbildung 2.30 angelehntes Bild. Da jedoch keine transversalen Richtungszuweisungen erfolgen¹⁰, ist das resultierende Richtungsfeld R^F gleichgerichtet (Abbildung 2.31). Obwohl die Richtungsinformation nur auf betretene Zellen vorhanden ist, entsteht durch die Filterung von R^F ebenfalls eine extrapolierende Wirkung.

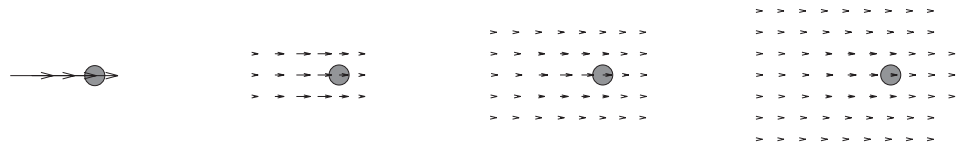


Abbildung 2.31: Darstellung der nachlaufenden Richtungsinformation R^F zur Modellierung des Folgeverhaltens von Agenten. Die Filterung der Richtungsinformation erfolgt stufenweise von links nach rechts.

Werden die Richtungsfelder für das Ausweichen R^A und das Folgen R^F kombiniert, ergibt sich das aggregierte Richtungsfeld $R^{A,F}$ (Abbildung 2.32). Wenn die umgebenden Agenten sich nicht bewegen oder wenn kleinere (dynamische) Hindernisse vorhanden sind (z. B. Koffer oder Gepäckwagen), wird ein ungerichtetes Richtungsfeld R^S angenommen. Die Abstoßung erfolgt dann in alle Richtungen gleichmäßig und ist somit nicht von der relativen Bewegungsrichtung zu den Agenten abhängig. Der stehende Agent ist dann mit einer Quelle in einem gerichteten Potentialfeld vergleichbar (Abbildung 2.33). Ähnliche

¹⁰ Auf die Trajektorie zeigende Richtungsvektoren in den neben liegenden Zellen würde nachfolgende Agenten direkt auf die Bewegungspur des Vorgängers lenken und könnte zu ungewollten Stauungen (Aufreihen der Agenten hintereinander) führen.

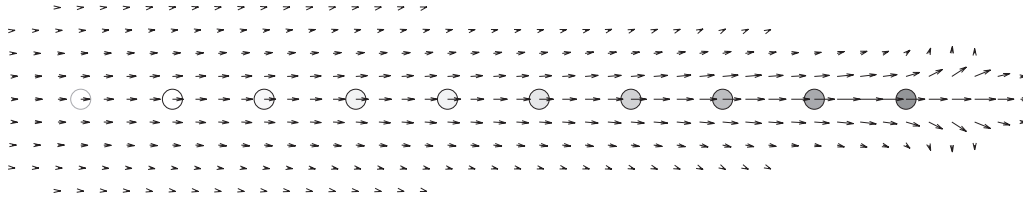
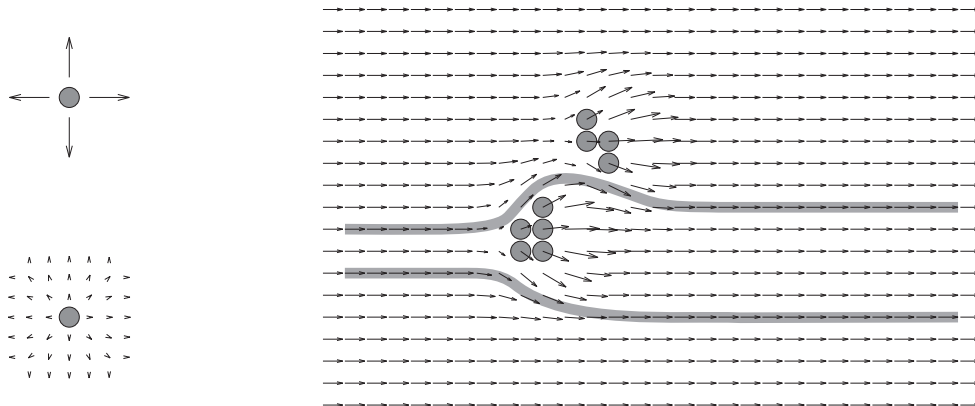


Abbildung 2.32: Aggregiertes Richtungsfeld $R^{A,F}$ erstellt aus der Modellierung des langreichweitigen Ausweich- und Folgeverhaltens der Agenten ($R^{A,F} = R^A + R^F$). Der Agent bewegt sich von links nach rechts und hinterlässt auf dem Richtungsgitter seine spezifischen Richtungsinformationen.

Verfahren werden auch bei der Berücksichtigung von dynamischen Positionsänderungen innerhalb von Computerspielen angewendet. Die spezifischen Potentiale aller dynamischen Agenten werden bei der Bewegungspfadgenerierung berücksichtigt und in *influence maps* hinterlegt [151, 157–159].



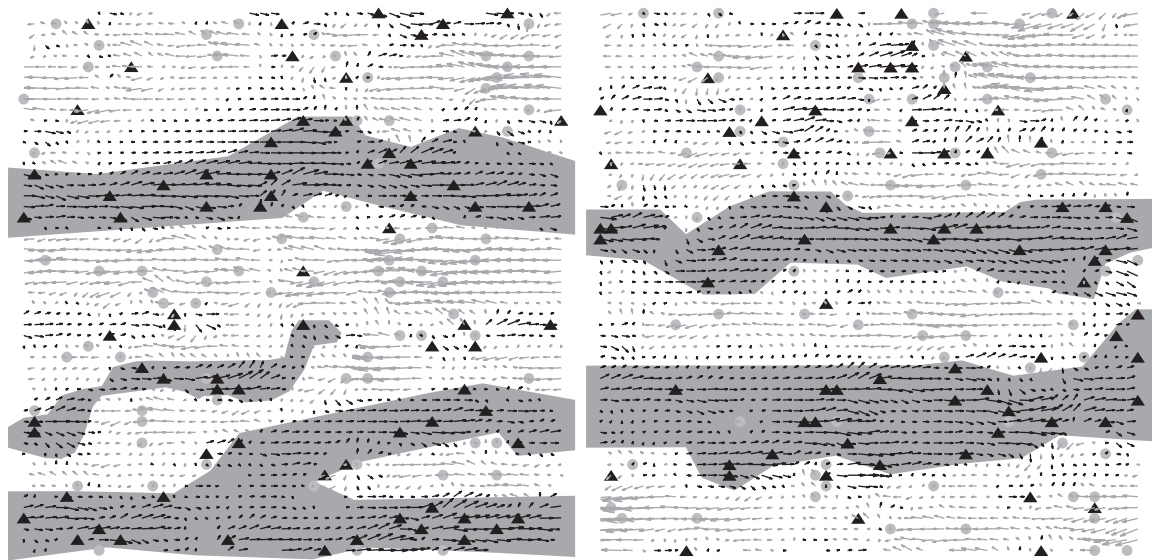
(a) Isotropes Abstoßungsfeld R^S (oben: ungefiltert, unten: zweifach gefiltert).

(b) Überlagerung von allgemeinen Richtungsinformationen R und den langreichweitigen Richtungsfeldern von neun Hindernissen (stehende Agenten).

Abbildung 2.33: Generierung eines statischen Abstoßungsfeldes zur Kollisionsvermeidung.

Durch die Kombination vom allgemeinen Richtungsfeld R mit dem Richtungsfeld für die langreichweitigen Interaktionen $R^I = R^{A,F} + R^S$ werden adaptive Richtungsinformationen generiert, mit denen dynamische Hindernisse umgangen werden können. In [Abbildung 2.33\(b\)](#) sind die adaptiven Richtungsinformationen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die ausgewiesenen Bewegungsrichtungen $R + R^I$ um die (quasi-statischen) Hindernisse herumführen. Befinden sich die Hindernisse in räumlicher Nähe zueinander, überlagern und verstärken sich die abstoßenden Richtungseffekte. Informationen über große Ansammlungen von Agenten werden so durch R^I an die umgebenden Agenten übermittelt, die bereits frühzeitig mit der Umgehung dieser Bereiche reagieren könnten.

Werden die allgemeinen Richtungsinformationen R und die langreichweitigen Richtungsfelder der Agenten R^I im stochastischen Bewegungsmodell berücksichtigt, ist das Modell auch in der Lage grundlegende selbstorganisierende Effekte abzubilden. In [Abbildung 2.34](#) ist das Ergebnis von zwei entgegengerichteten Agentenströmen dargestellt, wobei die räumliche Trennung der Ströme gut zu erkennen ist. Entgegenkommende Agenten weichen sich durch Berücksichtigung der abstoßenden Richtungsfelder aus und nachkommende Agenten folgen der Bewegungsspur der vorausgehenden Agenten, da die Abstoßungen geringer sind. Im zeitlichen Verlauf etablieren sich Reihen, in denen sich nur Agenten mit einer gemeinsamen Vorzugsrichtung bewegen. Aufgrund der dynamischen, stochastischen Agentenbewegungen sind die Reihen zeitlich und räumlich instationär.



(a) Bahnbildung, die auf die Implementierung der langreichweitigen Richtungsfelder R^I zurückzuführen ist.

(b) Durch lokale Wechselwirkungen können sich die Reihen verbreitern und die räumlichen Lagen verschieben.

Abbildung 2.34: Ansammlung von Agenten mit gleicher Bewegungsrichtung in unmittelbarer räumlicher Nähe mit klarer räumlicher Trennung von entgegen gesetzten Agentenströmen (Bahnbildung). Reihen mit einer eindeutigen Vorzugsrichtung sind in der Darstellung separat hervorgehoben.

Neben den selbstorganisierenden Effekten stehen für die nachfolgende Anwendung des Modells im Flughafenterminal ([Kapitel 1.4 \(S. 29\)](#)) auch Gruppenverhaltensweisen im Mittelpunkt der Modellierung. Um gruppendynamische Verhaltensweisen innerhalb des Modells darzustellen, werden drei primäre Bewegungsmuster innerhalb der Gruppe abgebildet: Separation, gemeinsame Richtungswahl und Kohäsion ([Abbildung 2.35](#) nach [\[160\]](#)). Die Separation ist bereits durch die vorgestellte Interaktionsmodellierung zugesichert und muss nicht erneut modelliert werden. Die in [Abbildung 2.35\(b\)](#) dargestellte gemeinsame Richtungswahl folgt der Definition von [\[160\]](#). Sie muss für den geplanten Anwendungsfall

jedoch erweitert werden, da sich das Verhalten von Agenten innerhalb einer Gruppe nicht zwangsläufig auf die Wahl einer gleichen Bewegungsrichtung reduzieren lässt.

Durch die individuelle Berücksichtigung von größeren Hindernissen kann die gewählte Bewegungsrichtung zwischen den Gruppenmitgliedern stark variieren. Je nach relativer Position zu einem potentiellen Hindernis können die Gruppenmitglieder abweichende Routen zum Passieren des Hindernisses wählen. Entscheidend ist demzufolge nicht die gemeinsame und zudem lokal begrenzte Richtungswahl, sondern vielmehr die Einigung innerhalb der Gruppe auf gemeinsame (Zwischen-) Ziele. Die Wahl eines adäquaten Ziels kann innerhalb der Gruppe durch unterschiedliche Entscheidungsfindungsprozesse stattfinden (z. B. mehrheitliche Abstimmungen oder Bestimmung der Zielvorgabe durch den Meinungsführer). Die Kohäsion (Abbildung 2.35(c)) als letztes verbleibendes Bewegungsmuster beschreibt eine gruppenbildende Anziehungskraft zwischen allen gruppenzugehörigen Agenten. Bezogen auf einen virtuellen Gruppenmittelpunkt versuchen alle Agenten eine gewisse Distanz nicht zu überschreiten.

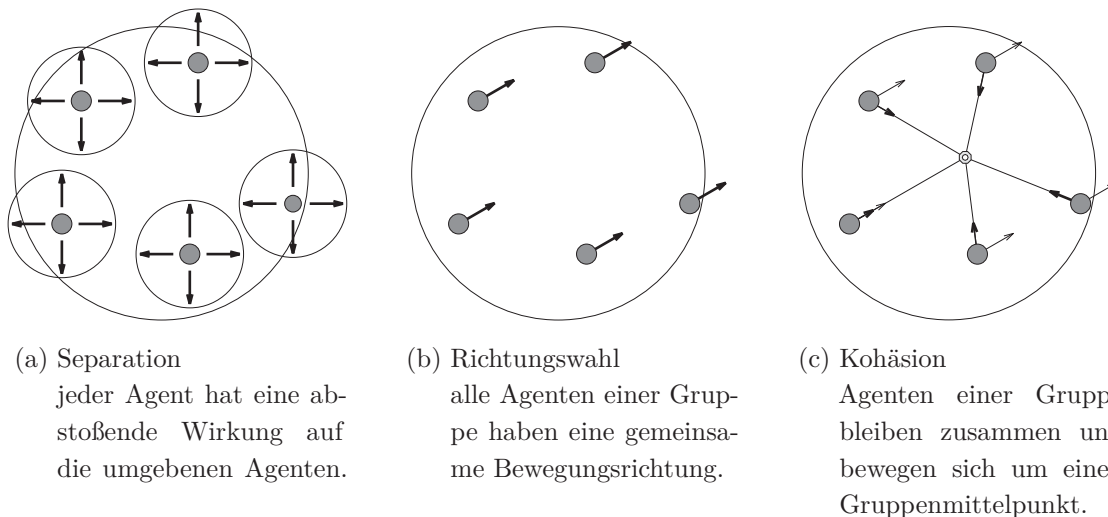


Abbildung 2.35: Primäre Ansätze zur Modellierung von Gruppenverhaltensweisen [160]: Separation, gemeinsame Richtungswahl und Kohäsion.

Die Festlegung des Gruppenmittelpunktes kann in Anlehnung an Entscheidungsfindungsprozess bei der Zielwahl erfolgen, sodass neben der gleichgewichteten Bestimmung des geometrischen Mittelpunktes (nur Berücksichtigung der Positionen der Agenten) auch die Verlagerung zugunsten eines oder mehrerer Agenten möglich ist, wenn diese eine zentrale Rolle innerhalb der Gruppen spielen (*leader*). Je nach Gruppe sind diese zentralen Agenten zumeist auch die Meinungsführer. Im speziellen Fall könnten das die Eltern in einer familiären Gruppe sein oder auch der Reiseleiter innerhalb einer Reisegruppe. Die gewünschte Nähe der Gruppenmitglieder zum *leader* ist somit leicht nachvollziehbar.

Im entwickelten Bewegungsmodell werden die Effekte der Richtungswahl und der Ko-

häsion nur bedingt vollständig umgesetzt. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Gruppenmitgliedern gegenüber dem *leader* werden die folgenden (vereinfachenden) Annahmen implementiert.

- Die Zielwahl ist ein gleichberechtigter Prozess unter allen Gruppenmitgliedern. Die Wahl des Ziels erfolgt durch einfache Mehrheit. Sollten mehrere Ziele die Mehrheit auf sich vereinen, wird aus diesen zufällig eines ausgewählt.
- In der Nähe von Zwischenzielen (Navigationspunkten) reduzieren die vorausgehenden Gruppenmitglieder ihre Geschwindigkeit, bis alle Gruppenmitglieder wieder einen angemessenen Abstand zum geometrischen Mittelpunkt haben.

Durch die Modellierung der Interaktionen ist die Entwicklung des stochastischen Bewegungsmodells abgeschlossen. Das Modell eines zweidimensionalen zellularen Automaten [124] wurde erweitert, um gitterabhängige Effekte zu kompensieren. Des Weiteren erfolgte eine Kalibrierung des Modells am allgemeinen Fundamentaldiagramm für Fußgänger [55]. Für die Erstellung der lokalen Richtungsinformationen unter Berücksichtigung der Geometrie des Untersuchungsraumes wurden zwei Ansätze entwickelt, die je nach Problemstellung (APSP oder SSSP) einen geeigneten Lösungsansatz bieten. Neben der operationalen Bewegungsdefinition auf Basis einer stochastischen Übergangsmatrix sind auch strategisch/taktische Ansätze durch die Berücksichtigung von langreichweitigen Richtungsfeldern in das Modell eingeflossen. Die Agenten können somit nicht nur auf Objekte in unmittelbarer Nähe reagieren, sondern auch spezifische Konstellationen in größeren Entfernungen (z. B. Hindernisse oder große Agentendichten) bei der Wahl der (Zwischen-) Ziele und der korrespondierenden Bewegungsrichtung berücksichtigen. Um eine Anwendung des stochastischen Bewegungsmodells im Flughafenterminal (Kapitel 1.4 (S. 29ff)) zu ermöglichen, müssen die notwendigen passagier- und prozessbezogenen Daten separat erhoben werden. Im nächsten Kapitel werden hierfür die notwendigen Grundlagen geschaffen (videogestützte Personenverfolgung, Kapitel 3.1.2 (S. 90ff)) und vorhandene Datensätze gezielt analysiert (Kapitel 3.2, S. 98ff). Für die Modellierung der Abfertigungsprozesse werden geeignete Verteilungsfunktionen evaluiert und anhand von realen Szenarien validiert (Kapitel 3.4, S. 119ff).

3 | Datenerhebung im Flughafenterminal

Bei der Entwicklung des stochastischen Modells zur Abbildung des individuellen Bewegungsverhaltens wurden die getroffenen Modellannahmen durch den Vergleich mit dem Fundamentaldiagramm für Fußgänger legitimiert. Für den Einsatz des Modells im Bereich des Flughafenterminals werden im folgenden Kapitel die notwendigen Daten und Randbedingungen zur Abbildung des Flughafenterminals (mit dem Fokus auf Passagierverhalten und -abfertigungsprozesse) in einer virtuellen Simulationsumgebung erarbeitet. Für die Analyse des Passagierverhaltens wurden Videoaufnahmen am Flughafen Dresden erstellt. Eine entwickelte softwaregestützte Datenauswertung erlaubt dabei eine effiziente Erfassung von passagierspezifischen Eigenschaften (z. B. Bewegungsgeschwindigkeit, Gruppengröße oder Gepäckanzahl). Die Abbildung der Passagierabfertigungsprozesse erfolgt durch die Modellierung von Verteilungsfunktionen (z. B. Ankunft der Passagiere im Terminal oder Prozesszeiten an den Abfertigungsstationen) auf Basis von empirischen Datenerhebungen am Flughafen Stuttgart.

Für die Untersuchung des allgemeinen Bewegungsverhaltens von Personen gibt es bereits eine breite Datenbasis. Als primäre Datenquelle stehen Aufzeichnungen (z. B. Foto oder Video) von Menschen (-ansammlungen) und ihren individuellen Verhaltensweisen zur Verfügung. Durch gezielte Beobachtungen und die Analyse von signifikanten Verhaltensmustern (z. B. Bahnbildung, spontane Staubildung oder Oszillation) konnten mathematische Modelle entwickelt werden, die die schrittweise Überführung des menschlichen Bewegungsverhaltens in synthetische Umgebungen erlauben. Innerhalb der synthetischen Umgebungen kann das Verhalten der virtuellen Personen durch verschiedenste Testszenarien eingehend analysiert werden. Zudem ist eine Abbildung von beliebigen Situationen/Zuständen und die Erprobung von entwickelten Optimierungskonzepten möglich, ohne den organisatorischen und logistischen Aufwand realer Experimente berücksichtigen zu müssen. Zusätzlich ist bei realen Experimenten auch der Einfluss von Probanden zu berücksichtigen, da sie sich immer besser auf die Testsituationen einstellen können und sich spezielles Testwissen aneignen. Auch benötigen praktische Testdurchführungen zuvor abgestimmte Zeitfenster, wohingegen der Zeitpunkt eines virtuellen Tests beliebig gewählt werden kann.

Für die allgemeine Modellentwicklung steht zumeist eine umfangreiche Anzahl an validen empirischen Datensätzen zur Verfügung. Jedoch liegen für Szenarien, die aus prakti-

schen und ethischen Gründen nicht getestet oder nur einmal durchgeführt werden können (z. B. Notfälle) nur unzureichende Informationen vor. Auch aus technischer Sicht kann die Verwendung vorhandener Datensätze eingeschränkt sein, da z. B. die Perspektive, aus denen die Datenaufnahme erfolgte nicht mehr geändert werden. Nicht vorhandene Daten können für eine Verlaufsabschätzung zwar rekonstruktiv angenähert werden, aber sie ersetzen eine detaillierte und kontextbasierte Datenaufnahme nur unzureichend. Bei der Verwendung von empirisch erhobenen Daten ist darauf zu achten, in welchem Kontext sie erhoben worden sind. Das Verhalten von Personen im Evakuierungsfall ist beispielsweise nur bedingt mit dem normalen Bewegungsverhalten von Passagieren innerhalb von Flughafenterminals oder dem Verhalten von Pilgerreisenden auf der Jamrat Brücke zu vergleichen. Eine Verwendung von erhobenen Datensätzen darf somit nicht losgelöst vom Kontext und vom Umfeld der Datenerhebung erfolgen. Für den Bereich von Flughafenterminals stehen keine öffentlich zugänglichen Datensätze zur Verfügung, die als Basis für eine detaillierte Analyse des Bewegungsverhaltens der Passagiere dienen könnten. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit Oreschko [161] umfangreiches Datenmaterial am Flughafen Dresden erhoben und das Bewegungsverhalten von Passagieren eingehend analysiert. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte durch ein videogestütztes System zur automatischen Bewegungsverfolgung [162] und wurde durch zusätzliche Informationen ergänzt (z. B. Identifizierung von Gepäckanzahl oder Gruppengröße). Die von Spranger [163, 164] am Flughafen Stuttgart erhobenen Daten dienen im Folgenden zur detaillierten Untersuchungen der terminalseitigen Passagierabfertigungsprozesse und der validen Modellierung der Prozesse innerhalb der virtuellen Simulationsumgebung.

3.1. Videogestützte Personenverfolgung

Viele Forschungsergebnisse im Bereich der Personendynamik basieren auf Analogiebeobachtungen und intensiven Beobachtungen realer Gegebenheiten [vgl. 69, 165–167]. Einen wesentlichen Bestandteil der Untersuchungen stellt die Analyse von Fotografien und Videoaufnahmen dar. Bei der Aufzeichnung von Personen existiert ein Spannungsfeld, welches durch die Erstellung eines wissenschaftlichen Parametersatzes für die Forschung und dem Recht auf informationelle Selbstbestimmung¹ entsteht. Das Recht auf informationelle Selbstbestimmung erlaubt die Aufzeichnung von Personen nur, wenn diese nachträglich nicht identifiziert werden können. Für die Analyse des Bewegungsverhaltens ist jedoch eine hohe Auflösung des aufgezeichneten Materials notwendig, um die Position der einzelnen Personen hinreichend genau bestimmen zu können. Die Verwendung eines Softwaresystems zur automatischen Positions- und Bewegungserkennung [162] könnte diese gegensätzlichen Forderungen überwinden. Um jedoch Erkenntnisse über grundlegende

¹ Bundesverfassungsgericht 65, 1 - Volkszählung, 1983.

Verhaltensweisen zu erhalten, müssten die aufgezeichneten Trajektorien² ebenfalls einer eindeutigen Personenkategorie (z. B. Geschlecht, Reisemotivation oder Gruppenkonstellation) zugeordnet werden. Die von [162] entwickelte Implementierung ist hierzu nicht in der Lage (selbst kommerzielle Systeme sind nur bedingt fähig diese Forderung zu erfüllen). Sie erlaubt aber eine effiziente Unterstützung bei der Erstellung der Trajektorien, wobei in komplexen Situationen die Qualität der automatischen Positionsbestimmung durch manuelle Nachbearbeitung der Positionsdaten erhöht werden kann.

Die Bewegungsdaten müssen für den Zeitraum der Auswertung gespeichert werden, da die Bearbeitung nicht in Echtzeit erfolgen kann. Zum einen ist die Anzahl der zu beobachtenden Personen zu groß, um eine gleichzeitige (Qualitäts-) Kontrolle durch einen Beobachter sicherzustellen. [168] zeigen, dass mit zunehmender Komplexität eines Szenarios die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Beobachter durch irrelevante Objekte abgelenkt wird und den Fokus auf die eigentliche Aufgabe verliert. Zum anderen beträgt die Aufmerksamkeitsspanne eines Beobachters zwischen 15 - 20 Minuten [169–171]. Nach diesem Zeitintervall lässt die Aufnahmefähigkeit rapide nach und eine Erholung des Beobachters ist notwendig. Zusätzlich zu diesem Intervalleffekt sinkt die Aufmerksamkeitsspanne auch im zeitlichen Verlauf. Im Rahmen der Datenerhebung am Flughafen stellt die Aufzeichnung und automatische Auswertung der Daten somit auch einen wichtigen Schritt zur Qualitätssicherung dar.

Aus Sicht der Grundlagenforschung ist es von großem Interesse, die aufgezeichneten Daten mit einer hohen Anzahl von individuellen Merkmalen zu erfassen. Aus den Videoaufzeichnungen im Flughafenterminal können Daten über das Geschlecht der Passagiere, die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit (Kapitel 3.2.2, S. 106ff), die Anzahl der Passagiere innerhalb einer Reisegruppe (Kapitel 3.2.4, S. 108ff) sowie die Anzahl der Gepäckstücke (Kapitel 3.2.5, S. 110ff) abgeleitet werden. Aussagen über die eigentliche Bewegungsmotivation, das aktuelle Ziel, das Alter oder ähnlichen passagierspezifischen Parametern können nicht getroffen werden. Die Ergebnisse der Datenanalyse können dementsprechend nur verwendet werden, wenn sichergestellt ist, dass der Einfluss der nicht visuell beobachtbaren Parameter gering ist. Die Anzahl der spezifischen Passagierparameter könnte erweitert werden, wenn durch Umfragen gezielt der relevante Personenkreis angesprochen würde, dessen Verhalten nachfolgend untersucht werden soll. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Personen nicht über den Inhalt der eigentlichen Untersuchung informiert werden dürfen, um das Verhalten während der Untersuchung nicht zu beeinflussen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aufgrund des hohen zeitlichen und organisatorischen Aufwandes keine Umfragen durchgeführt, jedoch wäre es aus Sicht der Grundlagenforschung durchaus von Interesse die Wissensbasis auf diesem Gebiet zu

² Eine Trajektorie ist eine Verbindungslinie zwischen zeitlich aufeinander folgenden räumlichen Positionen einer Person (Bewegungspfad).

erweitern. Notwendige individuelle Differenzierungen (z. B. Alter der Passagiere) können ersatzweise aus statistischen Datensätzen der jeweiligen Verkehrsflughäfen übernommen oder durch Daten aus externen Quellen unterstützt werden [55, 163, 172–174]. Die ersatzweise abgeleiteten Informationen sind zwar nicht direkt den aufgezeichneten Videodaten zuzuordnen, es ist jedoch zu erwarten, dass die kontextkonforme Verwendung der statistischen Datensätze zu keiner Modellverzerrung führen wird.

3.1.1. Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Überwachung des öffentlichen Raumes geschieht primär zur Verkehrsflussregulierung und zur situationsbezogenen Kriminalprävention [vgl. 175]. Mit zunehmender Vernetzung der Kamerasysteme spielt auch die automatische Zugangskontrolle zu gesicherten Bereichen eine immer größere Rolle (z. B. Überprüfung von Fahrzeugkennzeichen, Bewegungs- oder Gesichtserkennung). Die Einrichtung von stationären Kameras zur Beobachtung von Verkehrsschwerpunkten wurde bereits 1958 in München am Karlsplatz (Stachus) realisiert, dem damals verkehrsreichsten Platz Europas [176]. Ein nächster, technisch wichtiger Entwicklungsschritt erfolgte im Jahr 1976, als in Hannover 25 stationäre, ferngesteuert schwenkbare Zoom-Kameras für den Dauereinsatz installiert wurden. Spätestens ab diesem Zeitpunkt lag nicht mehr nur die reine Verkehrsüberwachung im Mittelpunkt des polizeilichen und öffentlichen Interesses [177].

Die komplette Überwachung von Städten ist in Großbritannien bereits Realität [vgl. 178]. In keinem anderen Land sind mehr Kameras installiert (ca. 20 % der weltweiten Überwachungsanlagen [179]). Die Dichte der Kamerastandorte ist dabei so hoch, dass durch einen flächendeckenden, geschlossenen Überwachungskreislauf Passanten spätestens alle drei Minuten erfasst werden können [vgl. 180, 181]. Neben der Überwachung von öffentlichen Plätzen finden Videosysteme auch in privaten Einrichtungen Anwendung, wie z. B. in Kaufhäusern, Tiefgaragen oder Banken. Auch der Einsatz innerhalb öffentlicher Verkehrsmittel nimmt stetig zu [182]. In diesem Zusammenhang wird von *pseudo-öffentlichen* Räumen gesprochen [180], in denen das Individuum durch den Konformationsdruck³ nicht frei und selbstbestimmt agieren kann oder will.

Die Videoüberwachung, sowie die Aufzeichnung und Speicherung der Daten berühren die Kernfragen des Persönlichkeitsrechtes [183]. Die umfangreichen öffentlichen, medialen und politischen Auseinandersetzungen zeigen das große Spannungspotential dieses

³ „Wer unsicher ist, ob abweichende Verhaltensweisen jederzeit notiert und als Information dauerhaft gespeichert, verwendet oder weitergegeben werden, wird versuchen, nicht durch solche Verhaltensweisen aufzufallen. Wer damit rechnet, dass etwa die Teilnahme an einer Versammlung oder einer Bürgerinitiative behördlich registriert wird und dass ihm dadurch Risiken entstehen können, wird möglicherweise auf eine Ausübung seiner entsprechenden Grundrechte (Art. 8, 9 GG) verzichten.“ (BVerfGE 65, 1 - Volkszählung)

Themas auf. Zum einen wird auf die sicherheitsgewährleistenden Aufgaben des Staates verwiesen, die nur durch den Einsatz neuester Technologien erreicht werden können, zum anderen stellt die Selbstbestimmung der Bürger einen unverzichtbaren Wert dar [vgl. 184]. Umstritten ist dabei besonders, inwieweit Überwachungstechniken einen Beitrag zur Sicherheitssteigerung leisten können. Der Einsatz der Videoüberwachung zielt vornehmlich auf die Abschreckungswirkung und die Förderung der Selbstkontrolle potentieller Täter ab [185], wobei die Effizienz der Strafverfolgung aufgrund verbesserter Beweislage ebenfalls als Legitimation für die umfassende Überwachung genutzt wird [186–189].

Die Aufzeichnung von Personen mittels Videokameras soll im Folgenden nicht als ein Element zur Sicherheitsgewährleistung instrumentalisiert werden, sondern im Rahmen der Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Passagieren im Terminal als objektive Datenaufnahmequelle dienen. Nach Bäumler [183] entsteht „bei so vielen Videobildern [...], wenn sie nicht Spielerei oder Selbstzweck bleiben sollen, naturgemäß der Zwang zur Auswertung.“ Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Videoüberwachung leiten sich zunächst aus dem europäischen Recht ab. Artikel 8 der Europäischen Menschenrechtskonvention (EMRK) des Europarates von 1950 garantiert jedem das Recht auf Achtung der Privatsphäre, wobei jeder Eingriff von Behörden in das Privatleben einer gesetzlichen Grundlage und konkreter Rechtfertigung bedarf [vgl. 190]. Die Präzisierung erfolgte durch die europäische Konvention über die automatische Verarbeitung von personenbezogenen Daten des Europarates von 1981 (SEV Nr. 108/81).

Aus Sicht des Verfassungsrechtes leitet sich vom allgemeinen Persönlichkeitsrecht das Grundrecht auf informationelle Selbstbestimmung ab, das jeder Person die Entscheidung zur Darlegung persönlicher Sachverhalte überlässt [191]. Das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) ist die Umsetzung der Europäischen Datenschutzrichtlinie (EU-DSRL) in nationales Recht. Die Videoüberwachung öffentlich zugänglicher Räume ist nach § 6b BDSG durch die Aufgabenerfüllung, durch das Hausrecht und zur Erfüllung eigener Geschäftszwecke zulässig. Wenn die Datenspeicherung zur Erreichung der genannten Zwecke notwendig ist, wird diese ebenfalls erlaubt [192]. Die Grundsätze des allgemeinen Polizeirechtes können bei Stierand [191], Töpfer [193] oder Glatzner [175] eingehender studiert werden.

Nach §100c Abs.1 Nr.1 Strafprozessordnung (StPO) können bei Bestehen des Verdachts einer erheblichen Straftat Videoaufnahmen genutzt werden. Für eine Videoaufzeichnung ohne Verdachtsmomente bietet dieses Gesetz keine Grundlage, sodass eine Konkretisierung in den jeweiligen Landespolizeigesetzen notwendig wäre. Im speziellen Fall des Flughafens ist neben dem Flughafenbetreiber auch die Bundespolizei für den Schutz des Flughafens gemäß § 5 des Luftsicherheitsgesetzes verantwortlich. Nach § 23 und § 27 des Bundespolizeigesetzes kann die Bundespolizei Bildaufnahmen- und Bildaufzeichnungsgeräte einsetzen, um Gefahren für die Einrichtungen eines Verkehrsflughafens oder für dort befindliche Personen oder Sachen zu erkennen [vgl. 161]. Als öffentliche Stelle des Bundes ist auch die Bundespolizei zur Einhaltung des BDSG und deren Vorgaben verpflichtet.

Die Aufzeichnung des Bewegungsverhaltens der Passagiere im Terminal im Rahmen der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung ist in Rücksprache mit den verantwortlichen Polizeistellen durch das Hausrecht des Flughafenbetreibers gedeckt. Alle Passagiere wurden im Eingangsbereich über die durchgeführten Aufzeichnungen und deren Zweck informiert. Nach der Auswertung des aufgezeichneten Datenmaterials wurde es nach den Anforderungen des BDSG gelöscht, sodass für die weitere Analyse des Bewegungsverhaltens nur noch anonymisierte Datensätze vorliegen, die keinem spezifischen Passagier mehr zugeordnet werden können.

3.1.2. Methodische Umsetzung

Im folgenden Abschnitt stehen die methodischen Grundlagen der rechnergestützten Verfolgung von Personenbewegungen im Mittelpunkt. Zur Auswertung des Bewegungsverhaltens von Personen müssen die Bewegungspfade aufgezeichnet und anschließend analysiert werden. Um die Analyse der Datenaufzeichnungen in einem zeitlich adäquaten Rahmen durchzuführen, muss sie aufgrund der hohen Datenmengen durch die Implementierung von geeigneten Algorithmen unterstützt werden. Die in Zusammenarbeit mit [162] erstellte Software erlaubt unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen das Erstellen der Bewegungstrajektorien einzelner Personen. Die Implementierung wurde so gestaltet, dass eine nachträgliche Funktionserweiterung (z. B. erweiterte Algorithmen oder interne Kalibrierungsmodelle) uneingeschränkt möglich ist. Der Fokus liegt auf der Entwicklung eines Rahmenwerks, das den Nutzer bei der Erstellung der Trajektorien effizient unterstützt und die manuelle Optimierung der Trajektorien erlaubt. Der notwendige technische und methodische Aufwand für eine vollständig automatische Trajektorienerstellung und -validierung wäre im Rahmen dieser Zusammenarbeit viel zu hoch gewesen und stellt eigentlich bereits einen eigenständigen Forschungszweig dar. Einen umfangreichen Überblick über existierende Modelle, Algorithmen und Implementierungsansätze bieten [194–203]. Ein System zur automatischen Verfolgung von Bewegungen (*tracking*) besitzt demnach die folgenden fünf Kernelemente.

- **Bildsegmentierung:**
Zuordnung eines Bildpunktes zu definierten Bildregionen.
- **Beleuchtungsadaption:**
Anpassung der Farbbeschreibung der Personen und des Bildhintergrundes.
- **Silhouettenrekonstruktion und Verdeckungsanalyse:**
Ergänzung von nicht sichtbaren Teilen von Personen zur Tiefenschätzung.
- **Positionsbestimmung und Trajektorienberechnung:**
Extraktion von relevanten Bildinformationen zur statistischen Bestimmung der Bodenkoordinaten.

- **Personenidentifikation:**

Farb- und Formbeschreibung der Personen für die eindeutige Identifikation.

Abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet und den dafür notwendigen Anforderungen können für jedes Kernelement Algorithmen mit unterschiedlicher Genauigkeit und Ausführungsgeschwindigkeit implementiert werden. Um die Wiederverwendung der entwickelten Implementierung sicherzustellen, wurden die für jedes Kernelement notwendigen Eingangsparameter und das Ergebnis des jeweiligen Kernelements in einer übergeordneten Interface-Beschreibung definiert. Ein effizientes algorithmisches Beispiel für die Bildsegmentierung ist die Trennung von Vorder- und Hintergrundinformationen (Abbildung 3.1). Der Hintergrund ist per Definition ein Bereich, der sich zeitlich nicht verändert. Wenn vom aktuellen Bild der zeitlich unveränderliche Hintergrund subtrahiert wird, stellt das entstehende Differenzbild den Vordergrund dar. Das Hintergrundbild wird dabei entweder aktiv während der Beobachtung erstellt oder liegt bereits bei Beginn der Beobachtung statisch vor.



Abbildung 3.1: Erstellung der Hintergrundinformationen durch adaptive Anpassung der zeitlich unveränderlichen Bildbereiche. Die Subtraktion der Hintergrundinformationen vom aktuellen Bild führt zur Segmentierung des Bildvordergrundes. Im Zeitverlauf nimmt die Abgrenzung der beiden Bereiche zu (v.l.n.r).

In Abbildung 3.1 (links) ist zu erkennen, dass noch keine Bereiche dem Vordergrund zugewiesen werden (Vordergrund ist weiß), da geeignete Hintergrundinformationen zur Trennung der beiden Ebenen fehlen (Hintergrund ist identisch mit dem aktuellen Bild). Im zeitlichen Verlauf (Abbildung 3.1, mittlere Bilder) liegen zunehmend mehr Informationen über den Hintergrund vor. Erst nach einer bestimmten Zeit ist der Hintergrund vollständig beschrieben und es liegen für die weiteren Bearbeitungsschritte relevante Vordergrundinformationen vor. Durch den Einsatz eines mehrstufigen Verfahrens bei der Erstellung des Hintergrundes können statische Hintergrundinformationen dynamisch aktualisiert werden [162]. Die dynamische Aktualisierung erlaubt die Verarbeitung von veränderlichen Beleuchtungsverhältnissen oder die Berücksichtigung von räumlichen Veränderungen. Unter

Verwendung der extrahierten Vordergrundinformationen können im nächsten Schritt einzelne Personen identifiziert werden.

In Abbildung 3.2 ist aus der Differenz zwischen den Farbwerten des originalen Bildes und des Hintergrundes der Vordergrund in Graustufen erstellt worden. Bei der anschließenden Filtererstellung (Binarisierung, siehe rechte schwarz/weiße Darstellungen) ist zu erkennen, dass bei niedrigen Schwellenwerten (Grenzwert für die Klassifizierung zwischen Vorder- und Hintergrund) die Personen fast vollständig erkannt, jedoch die diffusen Spiegelungen und die Schatten der Personen am Boden fälschlicherweise auch als relevante Vordergrundinformationen identifiziert werden. Wird der Schwellenwert zu hoch gewählt, fehlen wichtige Information für die spätere Personenidentifikation. Die Kalibrierung des Schwellenwertes erfolgt im Allgemeinen manuell anhand von Probeaufnahmen, wobei aktuelle Gegebenheiten (z. B. Beleuchtung) berücksichtigt werden müssen.



Abbildung 3.2: Extrahieren der Vordergrundinformationen aus der Differenz zwischen dem aktuellen Bild und bekannten Hintergrundinformationen. In der Reihenfolge (v.l.n.r): Original, invertierter Vordergrund in Graustufen, binarisierter Vordergrund mit niedrigem Schwellenwert sowie binarisierter Vordergrund mit hohem Schwellenwert [162]

Aus den gefilterten Vordergrundinformationen müssen dann die einzelnen Personen (bewegliche Objekte) extrahiert werden. Für die Identifikation von Personen gibt es eine Vielzahl von Algorithmen, die sich im zeitlichen Aufwand und in der Genauigkeit der Identifikation unterscheiden. Einzelne Personen können aufgrund ihrer Form und individuellen Farbgebung [204] von anderen Personen und Gegenständen unterschieden werden. Eine charakteristische Formeigenschaft ist die Proportion zwischen Kopf, Rumpf und Beinen und dient als Basis des *human appearance model* [205]. Weitere Verfahren sind das segmentbasierte Verfolgen [206], das Erkennen von menschlichen Silhouetten durch [207] und im *active shape tracker* [208] sowie die Kopfdetektion [199]. Die Kombination von mehreren Verfahren kann zur Verbesserung der Detektionsgenauigkeit genutzt werden [209]. In Abbildung 3.3 sind einige methodische Beispiele für die Identifikation von Personen dargestellt. Die Genauigkeit der Personendetektion ist maßgeblich von der relativen Ka-

meraposition abhängig. Je nach Position kann die Erscheinung von Personen (Silhouette) von denen in Abbildung 3.3 abweichen.

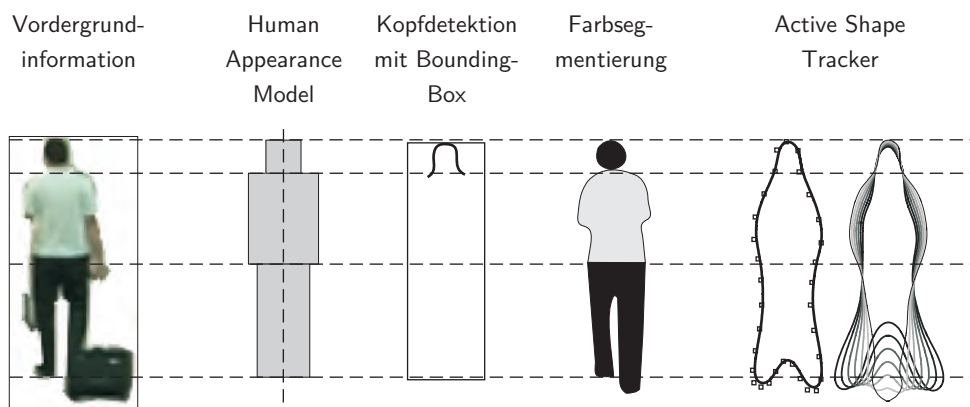


Abbildung 3.3: Identifikation von Personen aus extrahierten Vordergrundinformationen. Dargestellt sind der Vordergrund, das *human appearance model* [205], die Kopfdetektion [199] mit *bounding box*, die Farbsegmentierung [204] und der *active shape tracker* [208] (v.l.n.r)

Bei der Verwendung des Algorithmus zur Kopfdetektion [199] müssen zusätzliche Annahmen über die Körperdimension (*bounding box*, eine Person umgebendes Rechteck) getroffen werden. Der *active shape tracker* [208] beschreibt die menschlichen Konturen funktional (rechte Darstellung in Abbildung 3.3) und kann dabei auch mit verschiedenen Bewegungsarten und Blickwinkeln arbeiten. Wenn Personen sich einzeln im Bild bewegen, hinreichend groß sind und nicht durch andere Personen oder Gegenstände verdeckt werden, kann die Detektion mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden. Jedoch treten während der Bewegungsverfolgung Überlappungen relativ häufig auf, womit eine eindeutige Zuweisung der Bildbereiche zur jeweiligen Person nur eingeschränkt möglich ist (Abbildung 3.4). Durch eine mehrstufige Bildbearbeitung können notwendige Informationen jedoch teilweise rekonstruiert werden [195]. Dem menschlichen Betrachter fällt aufgrund seiner umfangreichen Erfahrungen über die Form von Personen die Trennung der in Abbildung 3.4 dargestellten Personen leicht. Aus algorithmischer Sicht ist die Separierung verdeckter Personen nur mit hohem Aufwand möglich.

Einen weiteren Ansatz zur Segmentierung bietet die Verwendung eines Systems aus mehreren Kameras, mit dem die Personen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden können [210]. Durch die Zusammenfassung von mehreren Kamerabildern kann die Präzision bei der Positionsbestimmung steigen (z. B. *synergy map* [211] oder *occupancy map* [212]). Nachdem die Position der Personen feststeht, wird für jede einzelne Person der zeitliche Verlauf der Positionsänderung zu einem Bewegungspfad (Trajektorie) zusammengefasst. Hierfür werden die Personen klassifiziert z. B. nach Größe, Bewegungsrichtung, Position oder Farbe und in jedem Bild einem Vordergrundobjekt zugeordnet.

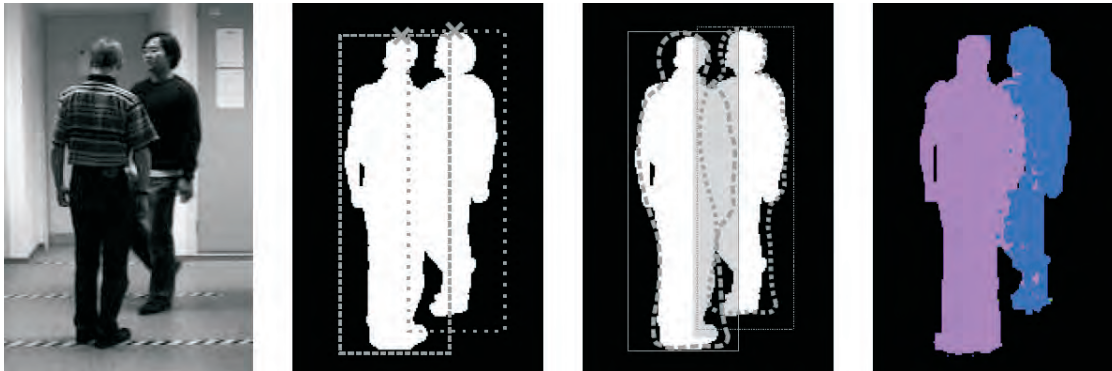


Abbildung 3.4: Separierung von überlappenden Personen. Beginnend mit dem Kamerabild, formbasierte Separierung durch Kopfdetektion, formbasierte Separierung durch Körpermodelle und farbbasierte Separierung durch getrennte Segmentierung [195].

Bei den vorgestellten Algorithmen findet die Verfolgung der Personenbewegungen im Kamerabild statt (Bildebene). Die Bestimmung der korrekten Position einer Person innerhalb des dreidimensionalen Raumes ist nur durch weitergehende Informationen über die Raumbeschaffenheit und -ausdehnung sowie durch Kennzahlen des Aufnahmesystems möglich (z. B. intrinsische Parameter, Betrachtungswinkel oder Position) [213]. In einer regulären Kamera entsteht durch die Linse eine intrinsische Verzerrung (Unterschied zwischen Kamera- und Bildkoordinatensystem), die durch Messungen an einem Referenzsystem kalibriert werden muss. Für die Kalibrierung der erzeugten Bilder wird typischerweise ein bekanntes reguläres Muster genutzt (z. B. Schachbrett aus Abbildung 3.5) [214–216].

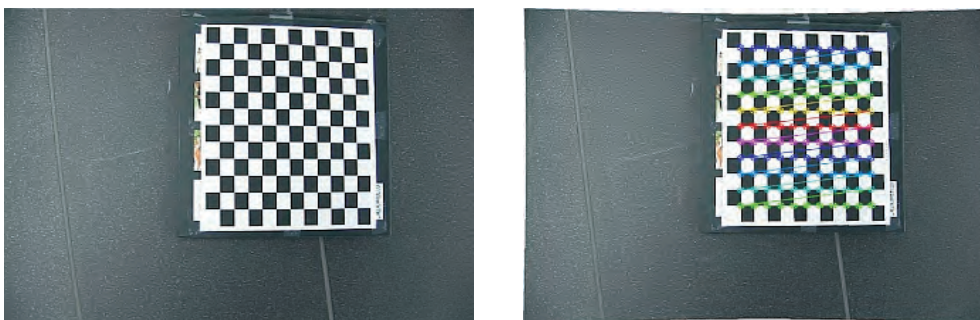


Abbildung 3.5: Kalibrierung der intrinsischen Verzerrung durch ein reguläres Muster (Schachbrett).

Aus den Unterschieden zwischen den bekannten Mustern und der aufgenommenen Abbildung werden die Differenzen bestimmt, um die jeweiligen Bildbereiche zu entzerren. Um die Genauigkeit der Entzerrung zu vergrößern, werden mehrere Aufnahmen verwendet, wobei das reguläre Muster verschiedene Bereiche des gesamten Aufnahmebereichs abdecken sollte. Neben den intrinsischen Parametern müssen auch extrinsische Faktoren (Blickrich-

tung und Position der Kamera) bei der Übertragung von der Bild- auf die Bodenebene berücksichtigt werden. Die Umrechnung der Bildkoordinaten in das globale Raumkoordinatensystem erfolgt durch eine Transformationsmatrix, wobei die Position der Kamera translatorisch übertragen und die Blickrichtung durch eine Rotation berücksichtigt wird. Abschließend liegt eine Kamera-Draufsicht der aufgezeichneten Bewegungsdaten vor (Bodenebene).

Aufgrund der Komplexität der Algorithmen bei der automatischen Verfolgung von Personen müssen einige Schritte bei der Erstellung der Trajektorien manuell ausgeführt werden⁴. Mit fortschreitender Entwicklung der Implementierung könnten die manuell auszuführenden Schritte dann stufenweise automatisiert werden. Aus den beschriebenen methodischen Grundlagen ergeben sich die folgenden funktionalen Anforderungen an die Implementierung:

- Abspielen und schnelle Navigation innerhalb der Videodateien,
- Kalibrierung der verwendeten Kamerasysteme,
- Hervorhebung von sich bewegenden Personen,
- Berücksichtigung von veränderten Lichtverhältnissen innerhalb einer Aufnahme,
- manuelle Bearbeitung erstellter Trajektorien (Trennen, Zusammenfügen, Editieren), um mögliche Detektionsfehler oder Personenzuordnungen zu korrigieren,
- Projektion der Trajektorien von der Bild- auf die Bodenebene,
- Erstellen, Laden/Speichern projektspezifischer Daten und Export der Trajektorien.

Für die Aufzeichnung der Passagierbewegung im Flughafenterminal wurden die funktionalen Anforderungen umgesetzt und die Implementierung *people tracker* [162] entwickelt. Die Oberfläche von *people tracker* ist in der nachfolgenden Abbildung 3.6 dargestellt.

Eine manuelle Bearbeitung der Positionsdaten kann in der *people tracker* Umgebung jederzeit erfolgen. Gerade bei verdeckten Personen oder Personen in großer Entfernung zur Kameraposition liegen zum Teil nur wenige Informationen vor, sodass bei der automatischen Positionsbestimmung die Lage im Raum nicht korrekt erkannt oder die Trajektorien nicht richtig fortgesetzt werden (Vertauschen von Personen). Durch den *people tracker* steht eine effiziente Softwareumgebung zur Verfügung, mit der im weiteren Verlauf das Bewegungsverhalten von Personen im Terminalgebäude des Flughafens Dresden aufgezeichnet und ausgewertet wird.

⁴ Auf die Verwendung eines Mehr-Kamera-Systems und die Zusammenführung von Bildinformationen aus verschiedenen Kameraperspektiven wird im Rahmen der folgenden Analysen verzichtet.

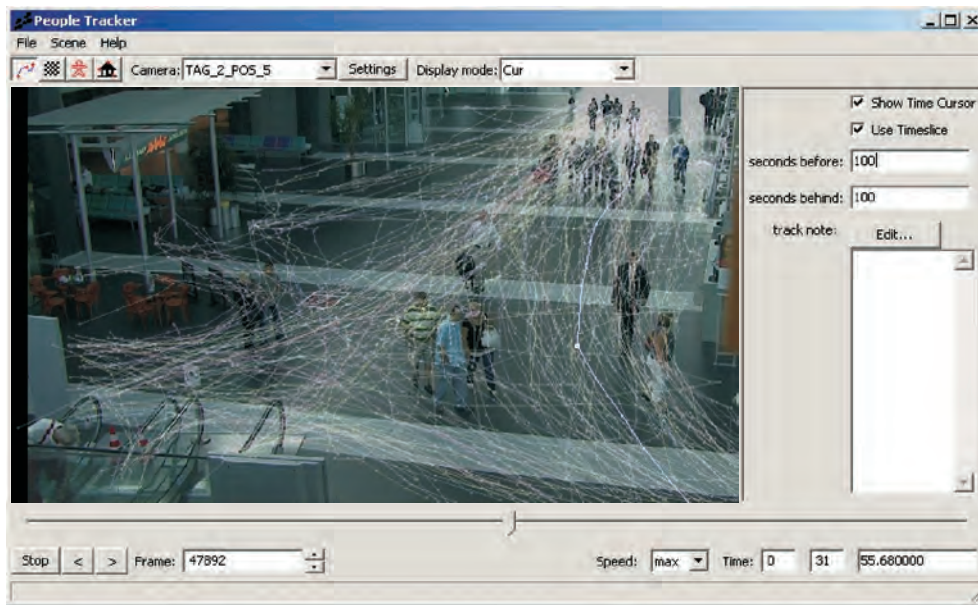


Abbildung 3.6: Implementierung *people tracker* [162]. Im unteren Bereich befinden sich die Steuerungselemente und im rechten Bereich können je nach gewählter Menüoption verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Im linken Hauptbereich wird die gewählte Aufzeichnung dargestellt und die Trajektorien der Personen bestimmt.

3.1.3. Datenerhebung im Terminal des Flughafens Dresden

Der Flughafen Dresden bietet mit seiner Terminalinfrastruktur eine ideale Umgebung für die Beobachtung des Passagierverhaltens. Das Terminal hat vier Ebenen (Abbildung 3.7), wobei sich in der untersten, nicht dargestellten Ebene der S-Bahnhof befindet (Ebene -1). Die weiteren Ebenen sind wie folgt gegliedert: Ankunftsebene (Ebene 0), Abflugebene (Ebene 1), Restaurant- und Konferenzebene (Ebene 2) sowie die Besucherterrasse (Ebene 3). Aufgrund der erhöhten Position der Ebenen 2 und 3 kann die gesamte Abflugebene fast vollständig eingesehen werden. Von mehreren potentiellen Kamerapositionen wurden die Positionen ausgewählt, die eine möglichst weite und ungestörte Einsichtnahme in das Terminal bieten.

Durch die große Entfernung der Kameras zu den jeweiligen überwachten Bereichen kann davon ausgegangen werden, dass das Bewegungsverhalten der Passagiere durch die Datenaufzeichnung nicht beeinflusst wird. Die Abflugebene des Terminals ist baulich in zwei Bereiche aufgeteilt, die durch die Check-In Schalter und Reisebüros getrennt sind. Aufgrund der Schalteraufteilung innerhalb des Terminals werden an den Check-In Schaltern des linken Bereiches Kurzstreckenflüge abgefertigt, die hauptsächlich durch Geschäfts- und Städtereisende genutzt werden. Flüge zu touristischen Reisezielen werden größtenteils im rechten Bereich des Terminals abgefertigt, sodass sich hier eine hohe Anzahl

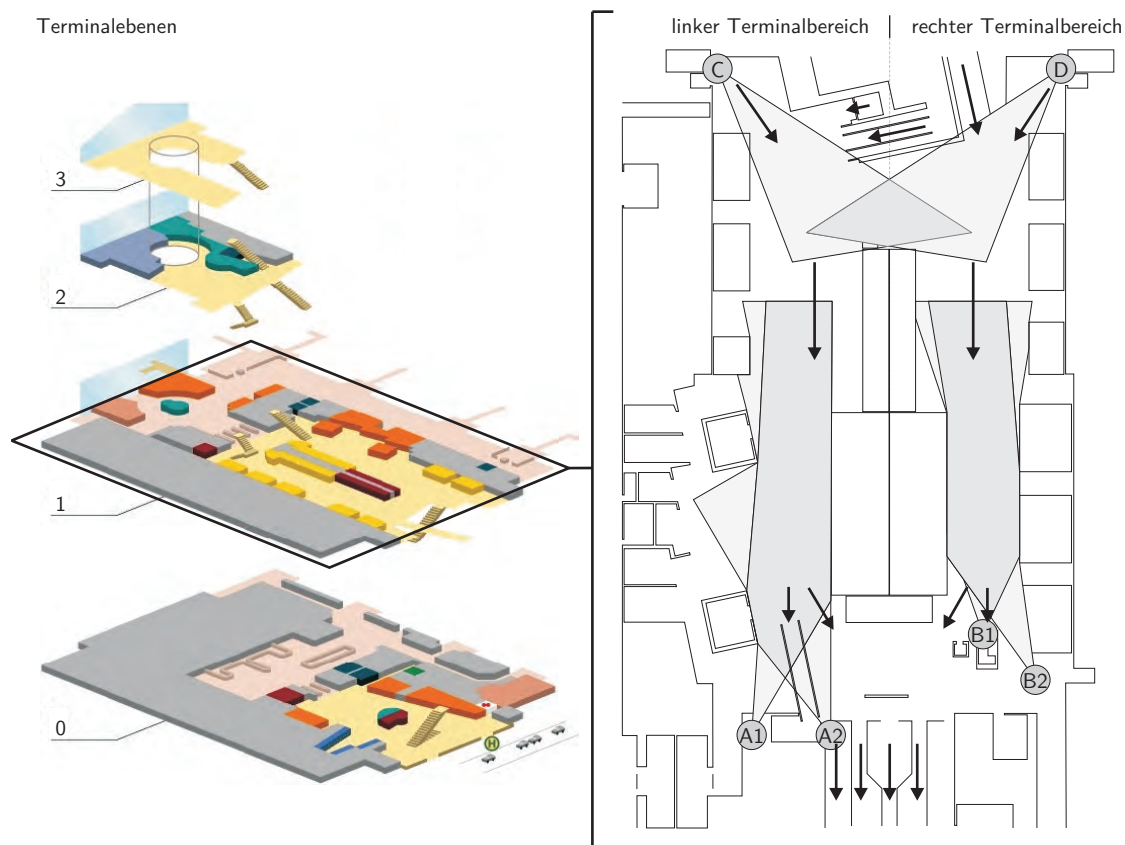


Abbildung 3.7: Aufteilung des Terminalgebäudes des Flughafens Dresden [217] und Positionierung der Videokameras innerhalb des öffentlichen Bereiches der Abflugebene und Kennzeichnung, der durch die Videokameras erfassten Bereiche.

von Touristen aufhalten⁵. Die genutzten Kamerapositionen sind in Abbildung 3.7 (rechts) dargestellt. Von Position A aus kann das Bewegungsverhalten der abfliegenden Geschäftsreisenden aufgezeichnet werden. Im durch Kameraposition B überwachten Bereich sind überwiegend Touristen anzutreffen, da diese im zugehörigen Check-In Bereich abgefertigt werden. Die Videokameras in den Bereichen C und D können den Ankunftsbereich der Abflugebene einsehen. Um möglichen Problemen bei der Erstellung der Trajektorien während der Auswertung entgegen zu können, erfolgt an den Positionen A und B die Aufnahme mit jeweils zwei Kameras die einen unterschiedlichen Blickwinkel auf den erfassten Bereich liefern (A1, A2 bzw. B1, B2). Zur Verdeutlichung des Blickwinkels der jeweiligen Kameraposition sind Fotos der Abflugebene im Anhang A (S. 202) aufgeführt.

In den folgenden Abschnitten werden die aufgezeichneten Bewegungsdaten ausgewertet und verschiedene Abhängigkeiten der individuellen Passagierbewegung untersucht. Die Datenaufzeichnung am Flughafen Dresden erlaubt eine eingehende Analyse von ge-

⁵ Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Passagierkategorien ist für die nachfolgende Analyse notwendig, da das Bewegungsverhalten der Passagiere signifikant von der Reisemotivation abhängig ist.

schlechtsspezifischen Unterschieden, die Auflösung von Zusammenhängen aufgrund der Größe der Reisegruppe, die Anzahl und Art des mitgeführten Handgepäckes sowie eine Untersuchung des Einflusses der Reisemotivation auf das Bewegungsverhalten der Passagiere.

3.2. Erhebung passagierbezogener Daten

Für die Implementierung des entwickelten stochastischen Bewegungsmodells zur Abbildung des Passagierverhaltens innerhalb einer virtuellen Flughafenumgebung sind erweiterte passagier- und prozessbezogene Datensätze notwendig, da die passagierbezogenen Daten einen maßgeblichen Einfluss auf das individuelle Verhalten haben. Hierbei sind die Kenntnis des Systems Flughafen und die damit verbundenen Abläufe als primäres Kriterium zu nennen. Wie bereits im einleitenden Kapitel 1.4 (S. 29) angemerkt, muss der Passagier mehrere Stufen der Abfertigung durchlaufen. Aufgrund der nur auf der Abflugebene aufgezeichneten Bewegungsdaten, beschränkt sich die Anwendung innerhalb des Flughafenterminals ebenfalls auf den Abflug (*departure*) und den hiermit verbundenen Passagierabfertigungsprozessen. Ob und inwieweit sich das Verhalten der ankommenden Passagiere (*arrival*) hiervon unterscheidet, könnte Gegenstand einer weiteren wissenschaftlichen Kooperation mit dem Flughafen Dresden sein.

Die Abfertigungsprozesse eines Passagiers beim Abflug sind der Check-In, die Sicherheits-, Pass- und die Bordkartenkontrolle. Der Passagier kann durch seine individuellen Eigenschaften diese Prozesse direkt beeinflussen (z. B. hohe durch Gepäckanzahl oder späte Ankunft an den Prozessstationen) [163, 164]. Aber auch individuelle Entscheidungen können einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf des Gesamtprozesses haben. Beispielsweise verlängert die Nutzung einer gastronomischen Einrichtung zwischen zwei Abfertigungsprozessen die Transferzeit, während die Wahl eines geeigneten Terminaleingangs die notwendigen Wegstrecken zu den Prozessstationen verkürzen kann. Für die Abbildung eines Passagiers innerhalb der Simulationsumgebung werden die in Tabelle 3.1 aufgezählten individuellen Parameter berücksichtigt und dem Einfluss auf den Abfertigungsprozess gegenübergestellt. Die Parameter sind insoweit vollständig, dass sie aus den nachfolgenden Datenaufnahmen direkt bestimmt oder zumindest indirekt abgeleitet werden können.

Neben der direkten Datenerhebung durch die Aufzeichnung der Bewegungstrajektorien kann ein Teil der benötigten Informationen auch aus allgemein zugänglichen Informationen abgeleitet werden. Bevor die Geschwindigkeit der Passagiere anhand der aufgezeichneten Daten im Terminal des Flughafens Dresden im Detail analysiert wird, erfolgt im nächsten Abschnitt die indirekte Bestimmung der Geschwindigkeit über die Auswertung der Altersstruktur der Passagiere am Flughafen und eine allgemeine Relation von Alter und Geschwindigkeit [174].

| Parameter | Einfluss auf den Abfertigungsprozess |
|--------------------------|---|
| Vorabend Check-In | Der Check-In erfolgt am Vortag des Abfluges. Es kann somit die Anzahl der Passagiere am Check-In am Abflugtag reduziert werden. Allerdings tritt somit auch eine Verlagerung der Passagierankünfte hin zur Sicherheitskontrolle auf. |
| Art der Reise | Bei geschäftlich motivierten Reisen kommen die Passagiere deutlich später im Terminal an als bei privat motivierten Reisen. |
| Gepäckstücke | Mit der Anzahl der Gepäckstücke steigt die Bearbeitungszeit am Check-In. |
| Gepäckwagen- nutzung | Der Gepäckwagen schränkt die Bewegungen des Passagiers ein, erhöht den spezifischen Platzbedarf innerhalb der Warteschlange und wird von anderen Passagieren als (dynamisches) Hindernis wahrgenommen. |
| Gruppengröße | Bei zunehmender Gruppengröße sinkt die relative, auf den einzelnen Passagier bezogene Bearbeitungszeit am Check-In [163]. Eine Gruppe bewegt sich auch räumlich geschlossener durch das Terminal, was einen wesentlichen Einfluss auf das Ausweichverhalten anderer Personen hat. |
| Anzahl von Begleitern | Die begleitenden Personen können während des Aufenthaltes im öffentlichen Bereich des Terminals (vor der Sicherheitskontrolle) den spezifischen Platzbedarf erhöhen. |
| Alter | Mit dem Alter der Passagiere kann eine allgemeine Geschwindigkeitsverteilung verknüpft werden, die Aussagen über die zu erwartenden Bewegungsgeschwindigkeiten ermöglicht. Besteht eine Gruppe aus Mitgliedern unterschiedlicher Altersgruppen, ist zu beachten, dass das langsamste Gruppenmitglied die Geschwindigkeit der gesamten Gruppe signifikant beeinflussen kann. |
| Kenntnisstand | Diese sehr schwer zu quantifizierende Größe erlaubt Aussagen über das zu erwartende strategisch/taktische Verhalten des Passagiers. Ein Passagier mit einem hohen Kenntnisstand über die Terminalstrukturen und die Abfertigungsprozesse kann seine Handlungen effizient optimieren und seinen Nutzen gezielt maximieren (im Sinne einer schnellen Abfertigung). |
| Schengen | Eine Passkontrolle ist nur notwendig, wenn der Passagier in ein Non-Schengen Land ein- oder ausreist. |

Tabelle 3.1.: Personenbezogene Parameter der Passagierabfertigung im Flughafenterminal.

3.2.1. Altersstruktur der Passagiere als indirekter Geschwindigkeitsindikator

Die Altersverteilung in einem Flughafenterminal ist nur sehr begrenzt mit der Alterspyramide der Gesamtbevölkerung vergleichbar. Zum einen sind (Klein-) Kinder nur in Begleitung von Erwachsenen im Terminal anzutreffen und zum anderen sind Passagiere mit einem Alter von mehr als 70 Jahren fast gar nicht vertreten. In der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen [174] wird für die Entfluchtung von Gebäuden die in Abbildung 3.8 dargestellte Altersverteilung genutzt. Sie ist durch eine Normalverteilung definiert, die einen Mittelwert $\mu = 50$ Jahre, eine Standardabweichung $\sigma = 20$ Jahre, ein Minimum von $x_{\min} = 10$ Jahren und ein Maximum von $x_{\max} = 85$ Jahren aufweist.

Bei einer Klassenbreite von 10 Jahren kann die Auftrittshäufigkeit der jeweiligen Altersklasse direkt aus Abbildung 3.8 entnommen werden. Die in Abbildung 3.8 dargestellten Häufigkeitswerte repräsentieren jedoch nur einen Anteil von 93,7 % aller Personen. Die Begrenzung der Altersverteilung berücksichtigt keine Personen die jünger als 10 Jahre (2,3 %) oder älter als 85 Jahre sind (4,0 %). In einem stochastischen Auswahlprozess muss diesem Umstand Rechnung getragen werden.

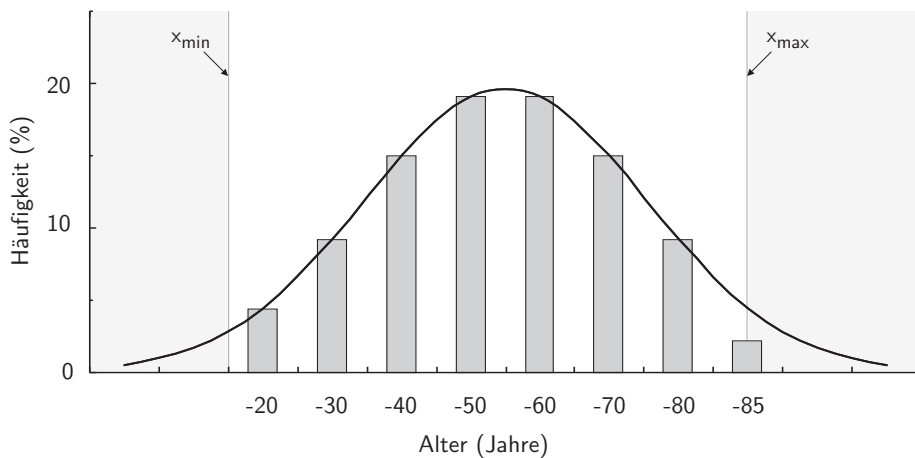


Abbildung 3.8: Altersverteilung bei einer Klassenbreite von 10 Jahren (gemäß [174]). Durch die Annahme eines Maximums von $x_{\max} = 85$ Jahren ist die ausgewiesene Häufigkeit der Altersklasse 80-90 Jahre gegenüber dem erwarteten Verlauf der Normalverteilung deutlich reduziert.

Die folgenden drei Varianten zeigen Lösungsansätze auf, um die notwendigen Grenzen bei der Altersbestimmung angemessen zu berücksichtigen.

- **Variante 1:** $\hat{x} = x/93,7 \%$

Es wird eine Zufallszahl mit den gegebenen Parametern (μ, σ) generiert. Liegt die Zahl außerhalb der gewählten Grenzen ($x < x_{\min}$ oder $x > x_{\max}$), wird eine neue Zufallszahl generiert.

- **Variante 2:** $\hat{x} = x + \Delta x$

Der fehlende Anteil von 6,3 % wird gleichmäßig auf alle vorhandenen Klassen verteilt.

- **Variante 3:** $\hat{x}_{\text{Klasse-20}} = x_{\text{Klasse-20}} + 2,3 \%$ sowie $\hat{x}_{\text{Klasse-85}} = x_{\text{Klasse-85}} + 4,0 \%$

Der kleinsten und der größten Klasse werden zusätzlich die Häufigkeiten für $x < x_{\min}$ (2,3 %) und für $x > x_{\max}$ (4,0 %) zugewiesen.

Die resultierenden Klassenhäufigkeiten für die verschiedenen Varianten sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Unterschiede in den Klassenhäufigkeiten betragen im Mittel ungefähr einen Prozentpunkt und sollten somit kaum ein unterschiedliches Systemverhalten hervorrufen. Allerdings erscheint Variante 3 ungeeignet, da sich in der jeweiligen Klasse die Häufigkeit überproportional steigert. Es wird in den nachfolgenden Anwendungen auf Variante 1 zurückgegriffen, da die Wertigkeit der Klassen zueinander kaum beeinträchtigt wird und eine Implementierung sehr einfach umzusetzen ist.

| Altersklasse (Jahre) | Varianten (Häufigkeiten in %) | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | Normalverteilung | 1 | 2 | 3 |
| -20 | 4,4 | 4,7 | 5,2 | 6,7 |
| -30 | 9,2 | 9,8 | 10,0 | 9,2 |
| -40 | 15,0 | 16,0 | 15,8 | 15,0 |
| -50 | 19,1 | 20,4 | 19,9 | 19,1 |
| -60 | 19,1 | 20,4 | 19,9 | 19,1 |
| -70 | 15,0 | 16,0 | 15,8 | 15,0 |
| -80 | 9,2 | 9,8 | 10,0 | 9,2 |
| -85 | 2,7 | 2,9 | 3,5 | 6,7 |
| Summe: | 93,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Tabelle 3.2.: Anpassung von kontinuierlichen Verteilungsannahmen

Um zu untersuchen, inwieweit die Altersverteilung aus Abbildung 3.8 auf das System Verkehrsflughafen übertragen werden kann, wurden Daten von verschiedenen Flughafenbetreibern, der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) und verschiedenen Airlines recherchiert. Direkte Anfragen an Verkehrsflughäfen blieben zumeist ergebnislos, jedoch konnte durch die Einsichtnahme der öffentlich zugänglichen Geschäftsberichte und *Investor Relations* Daten eine geeignete Übersicht erstellt werden. *Investor Relations* Daten müssen in diesem Zusammenhang durchaus kritisch betrachtet werden. Diese dienen primär der Außendarstellung des Unternehmens und sollen den Flughafen attraktiv für Konzessionäre machen und sind somit eher als zielgruppenorientierte Marketingaktivität

zu verstehen⁶. In Abbildung 3.9 ist die Altersverteilung auf Basis von passagierbezogenen Datenerhebungen durch einen Box-Whisker-Plot dargestellt.

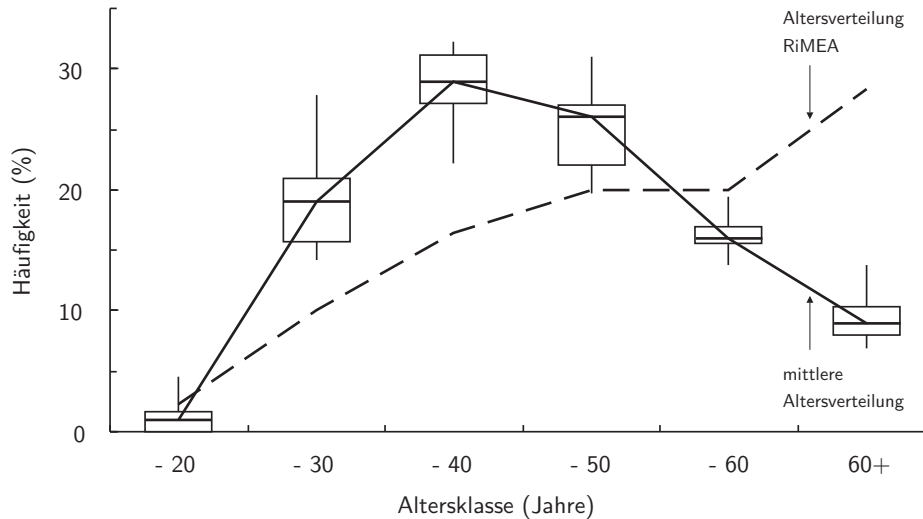


Abbildung 3.9: Allgemeine Altersverteilung von Passagieren unter Berücksichtigung von öffentlich zugänglichen Geschäftsberichten der Flughafenbetreiber und Verkehrsstatistiken [Wien (VIE, 2003), Frankfurt (FRA, 2005), Berlin Tegel (TXL, 2006), Berlin Schönefeld (SXF, 2006), Hamburg (HAM, 2006), München (MUC, 2007), Hannover (HAJ, 2007), Dresden (DRS, 2006), den Statistiken der ADV (2003), Swiss International Air Lines (SWISS, 2006)].

Im dargestellten Box-Whisker-Plot sind die Grenzen der Box durch das untere und obere Quantil ($Q_{.25}$ bzw. $Q_{.75}$) und die Enden der Whisker durch das Minimum und Maximum definiert. Während die beiden höchsten Altersklassen (bis 60 Jahre und ab 60 Jahre) eine geringe Streuung aufweisen, ist zu erkennen, dass die Altersklassen bis 30 Jahre und bis 50 Jahre durch eine hohe Streuung der Häufigkeiten gekennzeichnet sind. Im Vergleich zur vorgeschlagenen Altersstruktur auf Basis einer Normalverteilung (Abbildung 3.9, gestrichelte Linie) ist es offensichtlich, dass für die Altersstruktur der Passagiere abweichende Annahmen gelten müssen. Gerade die Altersklasse 30-40 Jahre wird um 12,3 % erheblich unterschätzt und die Altersklasse 60+ um 19,2 % deutlich überschätzt (Tabelle 3.3)⁷.

⁶ „Mit seinen 122 Citylightpostern an den Flughäfen Hamburg, Hannover, Frankfurt und München erreichen Sie jede Woche bis zu 1,5 Millionen Passagiere - und zugleich eine optimale Ergänzung deutschlandweiter Aktions- und Produktkampagnen. [...] Altersstruktur am Hamburg Airport: Rund die Hälfte der Passagiere am Hamburg Airport gehören zur konsumfreudigsten und kaufkräftigsten Altersgruppe: zwischen 30 und 49.“ [218]

⁷ Im Verlauf der nächsten Jahrzehnte ist zu erwarten, dass der Altersdurchschnitt am Flughafen ebenso ansteigt wie in der gesamten Bevölkerung. Durch das Anpassen der Altersstruktur innerhalb der simulationsgestützten Untersuchungen könnten die Alterungseffekte und ihre Auswirkungen auf die Abfertigungsprozesse bereits im Vorfeld eingehend analysiert werden.

| Altersklasse (Jahre) | mittlere Häufigkeit (%) | | | | | |
|----------------------|-------------------------|------|------|------|------|-------|
| | -20 | -30 | -40 | -50 | -60 | 60+ |
| RiMEA | 4,7 | 9,8 | 16,0 | 20,4 | 20,4 | 28,7 |
| Flughafen (Mittel) | 1,3 | 19,4 | 28,3 | 25,1 | 16,4 | 9,5 |
| Abweichung zu RiMEA | -3,4 | 9,6 | 12,3 | 4,7 | -4,0 | -19,2 |

Tabelle 3.3.: Vergleich von Altersverteilungsannahmen auf Basis der Annahmen von [174] und der allgemeinen Altersverteilung der Passagiere auf Basis von flughafenspezifischen Datensätzen.

Durch die Kategorisierung der Passagiere nach der Reisemotivation (überwiegend geschäftlich oder privat) ist zu erwarten, dass sich die korrespondierenden Altersverteilungen ebenfalls unterscheiden. Da in den vorhandenen Daten keine Unterscheidung der Altersklassen bezüglich der Passagierkategorien erfolgt, wird durch eine indirekte Auswertung versucht, diese Daten zu erstellen. Die Flughäfen DRS, HAM und SXF wurden für die indirekte Auswertung ausgewählt, da sie einen deutlich zu unterscheidenden Passagiermix (Verhältnis von Geschäfts- zu Privatreisenden) aufweisen. Während DRS ein Passagiermix von $^{32}/_{68}$ besitzt, weisen HAM und SXF Verhältnisse von $^{40}/_{60}$ und $^{21}/_{79}$ auf. Die unterschiedliche Aufteilung begründet sich beispielsweise durch die Größe des Flughafen-einzugsgebietes, die dort ansässigen Unternehmen, die Attraktivität des Umlandes als Reiseziel, den Flugplan oder die Funktion des Flughafens innerhalb des Streckennetzes (Drehkreuz, Zubringer, Direktverbindung). Aber auch die Anbindung des Flughafens in (über-) regionale Verkehrskonzepte (z. B. durch S-Bahn oder Fernbahnhof) kann einen entscheidenden Faktor darstellen.

Der Vergleich zwischen den gewählten Flughäfen in Abbildung 3.10 zeigt auf, dass die Altersverteilung nicht mit dem Passagiermix korreliert. Der Flughafen SXF hat mit 21 % einen sehr geringen Anteil an geschäftlich reisenden Passagieren und weist die Altersklasse 20-30 Jahre als häufigste Klasse aus. In DRS (32 % Geschäftsreisende) verschiebt sich die am häufigsten vertretene Altersklasse hin zur Altersklasse 40-50 Jahre. Da HAM mit 40 % einen noch höheren Anteil an Geschäftsreisenden ausweist, ist zu erwarten, dass sich die am häufigsten vertretene Altersklasse weiter in die gleiche Richtung verschiebt. Wie in Abbildung 3.10 dargestellt, tritt dieser Effekt jedoch nicht auf, da in HAM die Altersklasse 30-40 Jahre die größte Häufigkeit aufweist.

Die Altersverteilung kann somit nicht aus dem Passagiermix abgeleitet werden und es ist unumgänglich die Altersverteilung am jeweiligen Flughafen separat zu erheben. Wenn keine Daten über die Altersstruktur vorhanden sind, sollten die Daten der allgemeinen Altersverteilung (Abbildung 3.9) Verwendung finden. Aus der Altersstruktur kann im nächsten Schritt die Geschwindigkeit der Passagiere abgeleitet werden. Die altersdif-

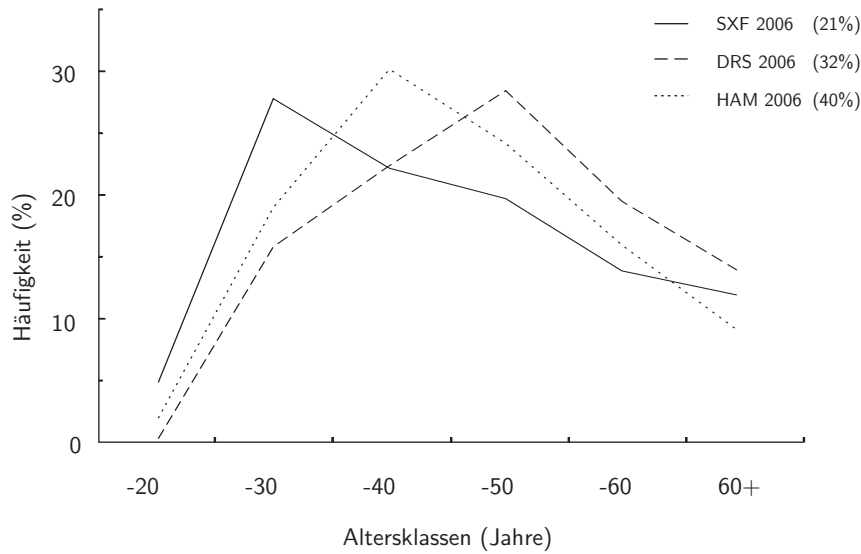


Abbildung 3.10: Altersverteilung an ausgewählten Verkehrsflughäfen (SXF, DRS und HAM) mit unterschiedlichem Anteil von Geschäftsreisenden

ferenzierte Betrachtung des Verlaufs der durchschnittlich erreichbaren Geschwindigkeit erfolgt in Abbildung 3.11. Die körperliche Leistungsfähigkeit und damit die erreichbare Geschwindigkeit erreicht mit 25 Jahren ein Maximum und nimmt mit zunehmendem Alter ab [219, 220]. Die mittlere Geschwindigkeit einer Person beträgt $v = 1,34 \text{ m/s}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,26 \text{ m/s}$ [55]. Unter Berücksichtigung der Altersstruktur der Passagiere in einem Flughafen (Abbildung 3.9) und dem in Abbildung 3.11 dargestellten Zusammenhang zwischen Alter und Geschwindigkeit, ist eine mittlere Geschwindigkeit der Passagiere in Höhe von $v_{\text{Passagier}} = 1,44 \text{ m/s}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma_{\text{Passagier}} = 0,16 \text{ m/s}$ zu erwarten.

Neben der Altersabhängigkeit der Geschwindigkeit können auch weitere Parameter Einfluss auf die Geschwindigkeit der Personen haben, wie beispielsweise Tageszeit, Witterungsbedingung, Beschaffenheit des Untergrundes, Länge des zurückzulegenden Weges, Anzahl der umgebenden Personen oder auch das Geschlecht der Person. Auch die gerade durchgeführte Tätigkeit (Motivation) ist von wesentlicher Bedeutung für die Bestimmung der Geschwindigkeit. Durch eine vierstufige Kategorisierung nach dem Verkehrszweck können die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Personen bestimmt werden (relativen Differenzen zur mittleren Geschwindigkeit von $1,34 \text{ m/s}$ hervorgehoben [vgl. 55]):

- Touristik und Freizeit $1,10 \text{ m/s}$ (- 18 %),
- Einkauf $1,16 \text{ m/s}$ (- 13 %),
- Pendler $1,49 \text{ m/s}$ (+18 %),
- Nutz- und Nahverkehr $1,61 \text{ m/s}$ (+20 %).

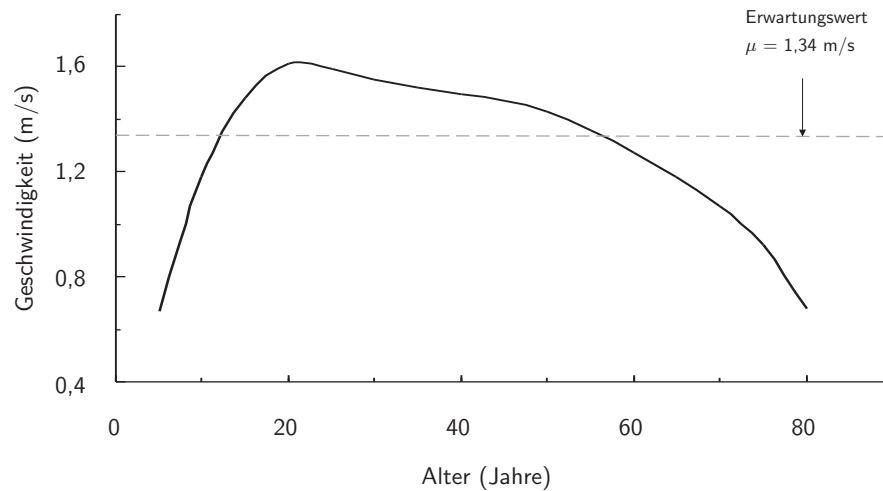


Abbildung 3.11: Verlauf der durchschnittlich erreichbaren Geschwindigkeit einer Person in Relation zum Alter (nach [55]).

Während die Kategorien Touristik und Einkauf eine geringere Geschwindigkeit gegenüber der mittleren Geschwindigkeit aufweisen, erreichen Pendler und Personen die sich berufsbedingt bewegen (z. B. im Nutz- und Nahverkehr) höhere Geschwindigkeiten. Zusätzliche Angaben über die Bewegungsgeschwindigkeiten unter eingeschränkter Mobilität $v_{\text{eingeschränkt}} = 0,46 - 0,76 \text{ m/s}$ werden von der [International Maritime Organisation \(IMO\)](#) [221] ausgewiesen. Die erwartete Bewegungsgeschwindigkeit der Passagiere im Flughafen-terminal wird sich mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen den Kategorien Touristik und Freizeit ($1,10 \text{ m/s}$) und Pendler ($1,49 \text{ m/s}$) befinden. Die Anwendung von Altersstruktur und Alters-Geschwindigkeits-Relation am Flughafen Dresden auf Basis einer Passagierbefragung [222] erlauben zu dem erste spezifische Rückschlüsse auf die zu erwartenden mittleren Geschwindigkeiten von Geschäftsreisenden $v_{\text{Geschäftlich}} = 1,44 \text{ m/s}$ ($\sigma_{\text{Geschäftlich}} = 0,09 \text{ m/s}$) und Touristen $v_{\text{Tourist}} = 1,39 \text{ m/s}$ ($\sigma_{\text{Tourist}} = 0,18 \text{ m/s}$). Die Geschwindigkeitsdifferenz von Geschäftsreisenden und Touristen ist nicht nur allein durch die unterschiedliche Altersstruktur zu erklären. Auch das individuelle Ankunftsverhalten (Kapitel 3.4.1, S. 122ff) hat einen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit. Durch die spätere Ankunft im Terminal nehmen Geschäftsreisende ein geringeres Zeitkontingent zwischen den jeweiligen Passagierabfertigungsprozessen in Kauf, was notwendigerweise die Wahl einer höheren Geschwindigkeit zur Folge hat.

Die aus der Altersverteilung abgeleiteten Geschwindigkeiten der Passagiere können nur als ein erster Indikator dienen. Um genauere Aussagen treffen zu können, müssen die Bewegungen der Passagier im Terminal gezielt untersucht werden. Hierfür kommt die entwickelte Software *people tracker* zum Einsatz (Kapitel 3.1, S. 86ff). Im Rahmen von zwei Messungen werden am Flughafen Dresden die Bewegungen der Passagiere aufgezeichnet und die mittlere Geschwindigkeit der Passagiere bestimmt. Neben der allgemeinen

Geschwindigkeitsbestimmung werden im nächsten auch die Auswirkungen von Reisemotivation, Geschlecht, Größe der Reisegruppe und der Einfluss der Gepäckstücke auf die Geschwindigkeit der Passagiere analysiert. Analog zu [55] werden die gemessenen Geschwindigkeiten funktional durch Normalverteilungen mit den Parametern mittlere Geschwindigkeit und Standardabweichungen approximiert.

3.2.2. Geschwindigkeitsverteilung - Geschlechtsspezifisch

Für die Bestimmung der Geschwindigkeit der Passagiere wird die Zeit gemessen, die ein Passagier zwischen zwei zuvor definierten Markierungen benötigt. Dabei werden nur Passagiere berücksichtigt, die sich gradlinig zwischen den Markierungen und ohne äußere Beeinflussungen bewegen. Passagiere, die plötzlich stehen bleiben oder unerwartete Reaktionen aufzeigen werden in den Messungen nicht betrachtet. Insgesamt wurden auf jeder Seite des Terminals vier virtuelle Markierungen eingefügt, um Strecken mit drei unterschiedlichen Längen zu kennzeichnen (7,5 m, 15 m und 22,5 m). Mit steigender Streckenlänge steigt die Wahrscheinlichkeit einer Störung (z. B. entgegenkommende Personen, Überholen von langsamen Personen) oder einer von der geradlinigen Verbindung abweichenden Wegewahl. Die jeweils längste Strecke, die ein Passagier störungsfrei zurückgelegt wird in der Datenanalyse berücksichtigt.

Während der Messungen am Flughafen Dresden wurde die Geschwindigkeit von $n = 595$ Passagieren bestimmt. Von diesen Passagieren sind 330 Passagiere überwiegend den Geschäftsreisenden und 265 Passagiere überwiegend den Touristen zuzuordnen. Bei der Analyse der aufgezeichneten Daten bestätigte sich diese Passagierkategorisierung aufgrund der Nutzung des linken und rechten Terminalbereiches (Kapitel 3.1.3, S. 96), da die Kleidung der Passagiere offensichtlich den jeweiligen Kategorien entsprach. Das innerhalb der betrachteten Personengruppe vorhandene Verhältnis von Mann/Frau/Kind bezogen auf die jeweilige Passagierkategorie ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Erwartungsgemäß ist der Anteil der Männer bei den Geschäftsreisenden signifikant höher, wohingegen bei den Touristen der Anteil von Männern und Frauen fast ausgeglichen ist.

| Kategorie | Gesamtanzahl | Häufigkeit (%) | | |
|--------------------|--------------|----------------|------|------|
| | | Mann | Frau | Kind |
| Geschäftsreisender | 330 | 59 | 39 | 2 |
| Tourist | 265 | 43 | 49 | 8 |
| Gesamt | 595 | 52 | 44 | 4 |

Tabelle 3.4.: Kategorisierung der erfassten Passagiereigenschaften bezogen auf das Geschlecht.

Für die spezifische Personenkategorisierung werden nur Passagiere berücksichtigt, die sich allein fortbewegen und keiner Gruppe angehören, die nicht äußerlich abgelenkt wer-

den (z. B. Stehenbleiben oder Ausweichen) und sich zielstrebig vorwärts bewegen. Der Umfang der Stichprobe beträgt $n=195$ mit 63 Frauen und 132 Männern, sodass sie als repräsentativ angesehen werden kann. Frauen bewegen sich im Mittel mit $v_F = 1,27$ m/s fort und Männer mit $v_M = 1,40$ m/s. Die Standardabweichung ist mit $\sigma_{F,M} = 0,22$ m/s bei beiden Gruppen gleich groß. Die Untersuchungen von [55] zeigen auf, dass die mittlere Geschwindigkeit von Frauen gegenüber Männern um 10 % geringer ist. Die gemessenen Geschwindigkeiten am Flughafen Dresden weisen mit der empirisch bestimmten Differenz von 9,3 % eine gute Übereinstimmung mit dieser Aussage auf. Der charakteristische Verlauf der Verteilungsfunktion und die Messwerte der Bewegungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 3.12 dargestellt.

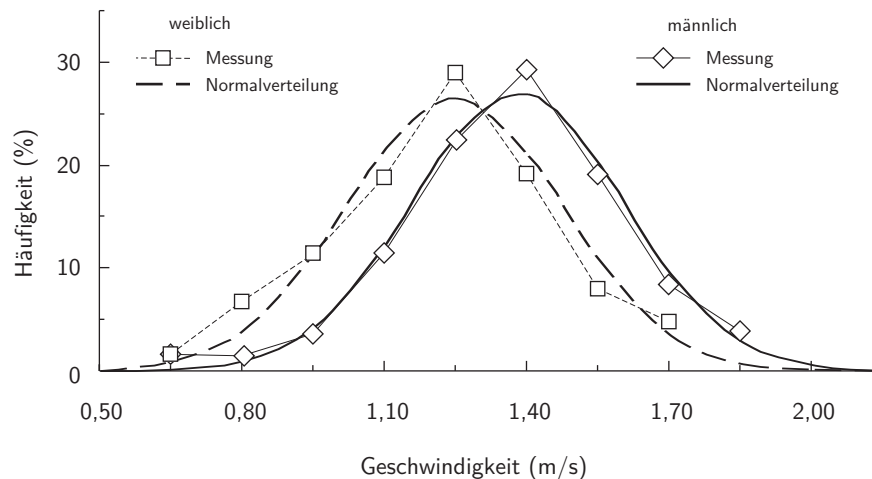


Abbildung 3.12: Darstellung der Differenzierung des Geschwindigkeitsprofils nach männlichen und weiblichen Passagieren. Die funktionale Anpassung der Messwerte erfolgt durch Normalverteilungen.

3.2.3. Geschwindigkeitsverteilung - Reisemotivation

Für Differenzierung des Geschwindigkeitsprofils bezüglich der Reisemotivation der Passagiere stehen 203 valide Datensätze zur Verfügung. Da die Geschwindigkeit auch von der Gruppengröße abhängig ist, werden in der Untersuchung nur Passagiere einbezogen, die kein Mitglied einer Reisegruppe sind. Die Gruppe der geschäftlich reisenden Passagiere ist mit 183 Passagieren vertreten und erlaubt somit eine sichere Aussage über die Verteilung der Geschwindigkeit. Allerdings konnten bei der Kategorie der Touristen nur 23 Passagiere berücksichtigt werden, da in dieser Kategorie hauptsächlich Gruppen mit zwei Mitgliedern existieren (Tabelle 3.5). Die Anzahl der Kinder in der Kategorie der Geschäftsreisenden fällt mit 2 % sehr gering aus und ist durch die Zuweisung der *überwiegend* geschäftlich reisenden Passagiere zu erklären. So nutzen auch Passagiere, deren Reise privat motiviert

ist die gleichen Flüge wie die Geschäftsreisenden (z. B. Städtereisende). Bei der direkten Unterscheidung von Touristen und Geschäftsreisenden (ohne Differenzierung nach der Gruppengröße) ist festzustellen, dass sich der Geschäftsreisende mit einer mittleren Geschwindigkeit von $v_B = 1,32 \text{ m/s}$ ($\sigma_B = 0,22 \text{ m/s}$) fortbewegt. Der Tourist ist ungefähr 24 % langsamer und hat eine mittlere Geschwindigkeit von $v_T = 1,00 \text{ m/s}$ bei einer vergleichbaren Standardabweichung von $\sigma_T = 0,23 \text{ m/s}$. Die gemessenen Häufigkeitsverteilungen sind Gegenstand von Abbildung 3.13. Die nach [55] für die Gruppe Touristik und Freizeit angenommene mittlere Geschwindigkeit ist mit $1,1 \text{ m/s}$ um 10 % größer. Ebenso ist die Geschwindigkeit der Gruppe der *Pendler* gegenüber den Geschäftsreisen mit $1,49 \text{ m/s}$ um 13 % größer.

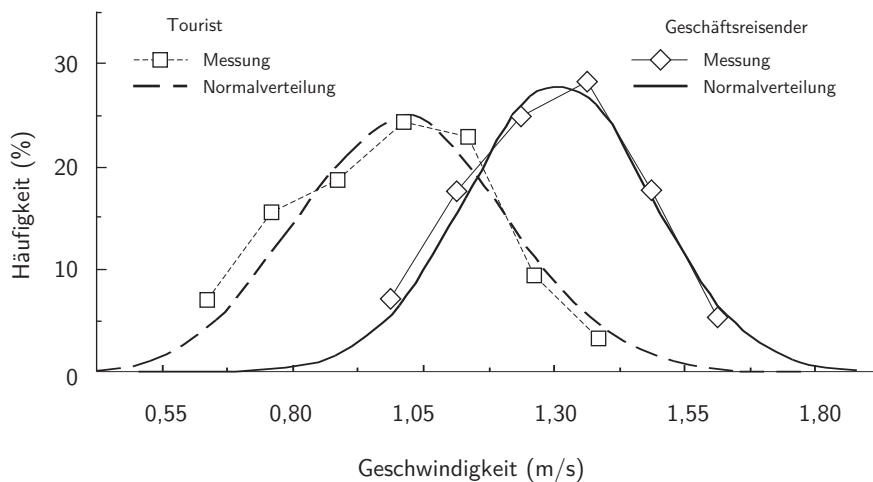


Abbildung 3.13: Unterscheidung des Passagiers nach Art des Fluges (Geschäftsreisenden und Touristen) ohne Berücksichtigung der Gruppenkonstellation. Die funktionale Anpassung der Messwerte erfolgt durch Normalverteilungen.

3.2.4. Geschwindigkeitsverteilung - Gruppengröße

Werden die Geschwindigkeitsverteilungen nach der Gruppengröße differenziert, ist zu erkennen, dass mit der Anzahl der Personen innerhalb der Gruppe die Geschwindigkeit abnimmt. Zu erklären ist dieser Effekt durch Abstimmungsprozesse innerhalb der Gruppe (z. B. Geschwindigkeitsanpassung an langsame Gruppenmitglieder). Auch kann die direkte Kommunikation der Gruppenmitglieder untereinander Einfluss auf die Geschwindigkeit der Gruppe haben. Die Beobachtungen am Flughafen Dresden zeigen, dass sich innerhalb großer Gruppen kleinere, eigenständig agierende Gruppen aus zumeist 2-3 Mitgliedern bilden. Die Gruppenzugehörigkeit zur großen, übergeordneten Gruppe ist von außen zumeist schwer zu erkennen. Nur durch die Beobachtung der Kommunikation unter den Gruppenmitgliedern konnte auf eine größere Gruppe geschlossen werden. Während des

gesamten Beobachtungszeitraumes traten nur fünf Gruppen mit vier Gruppenmitgliedern auf. Da ein Geschwindigkeitsunterschied im Vergleich zu den Dreier-Gruppen nicht nachgewiesen werden konnte, werden in den folgenden Auswertungen nur noch Gruppen mit maximal drei Mitgliedern berücksichtigt. Die während der Messung festgestellten Gruppenhäufigkeit sind Tabelle 3.5 zu entnehmen. Geschäftsreisende begeben sich mit hoher Wahrscheinlichkeit (73 %) zumeist allein in das Flughafenterminal, wohingegen Touristen am häufigsten zu zweit erscheinen (55 %).

| Gruppengröße n (Personen) | Häufigkeiten (absolut und prozentual) | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | Geschäftsreisende | | Touristen | | Gesamt | |
| 1 | 183 | (73 %) | 23 | (19 %) | 206 | (56 %) |
| 2 | 57 | (23 %) | 66 | (55 %) | 123 | (33 %) |
| 3 | 11 | (4 %) | 31 | (26 %) | 42 | (11 %) |

Tabelle 3.5.: Häufigkeiten der gemessenen Gruppengröße am Flughafen Dresden. Die fünf beobachteten Gruppen mit vier Mitgliedern wurde der Gruppe $n = 3$ zugeordnet.

Bei Touristen ist der Anteil von Dreier-Gruppen mit 26 % sogar wesentlich größer als der Anteil allein reisender Passagiere. Zum Vergleich der am Flughafen Dresden erhobenen Daten stehen Auswertungen vom Flughafen Stuttgart zur Verfügung, die jedoch nur Aussagen über die Gruppenverteilungen von zumeist privat reisenden Passagieren zulassen (Tabelle 3.6). Dafür erfolgte eine Analyse des Passagiermixes von zwei nicht näher ausgeführten Luftverkehrsgesellschaften (LVG), lediglich eine Unterscheidung in LVG A und LVG B wurde von [163] vorgenommen. Der Datensatz vom Flughafen Stuttgart beruht auf der Analyse von 937 Passagieren. Es ist zu erkennen, dass die Gruppe der Touristen in einer ähnliche Konstellation aufweist. Sowohl am Flughafen Dresden als auch am Flughafen Stuttgart tritt die Zweier-Gruppe mit Abstand am häufigsten auf.

| Gruppengröße n (Personen) | Häufigkeiten (%) | | |
|--------------------------------|------------------|-------|--------|
| | LVG A | LVG B | Gesamt |
| 1 | 24 | 21 | 22 |
| 2 | 64 | 65 | 65 |
| 3+ | 12 | 14 | 13 |

Tabelle 3.6.: Häufigkeiten der Gruppengrößen bezogen auf überwiegend privat Reisende (Touristen) am Flughafen Stuttgart [163]

Bei der Analyse des Einflusses der Gruppengröße auf die durchschnittliche Geschwindigkeit erfolge zusätzlich die Differenzierung zwischen Geschäftsreisenden und Touristen. Tabelle 3.7 lässt den Schluss zu, dass mit jeder Person, die der Gruppe beitrifft, die Geschwindigkeit der Gruppe sinkt und sich einer unteren Grenzgeschwindigkeit annähert.

Dabei gleichen sich auch die Geschwindigkeiten von Geschäftsreisenden und Touristen zunehmend an (Standardabweichung bleiben nahezu unverändert).

| Gruppengröße n (Personen) | Geschäftsreisende | | Tourist | | Gesamt | |
|--------------------------------|---|------------|---------|------------|--------|------------|
| | (mittlere Geschwindigkeit, Standardabweichung in m/s) | | | | | |
| | v_G | σ_G | v_T | σ_T | v_n | σ_n |
| 1 | 1,38 | 0,21 | 1,19 | 0,25 | 1,36 | 0,23 |
| 2 | 1,17 | 0,17 | 0,97 | 0,20 | 1,06 | 0,21 |
| 3 | 1,04 | 0,23 | 0,93 | 0,17 | 0,96 | 0,19 |

Tabelle 3.7.: Änderung der mittleren Geschwindigkeit und der Standardabweichung in Abhängigkeit der Gruppengröße

Der Vergleich zwischen einer Gruppe mit drei Passagieren und einem einzelnen Passagier ist in Abbildung 3.14 dargestellt, wobei keine weitere Unterscheidung der Passagiere erfolgt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit eines einzelnen Passagiers im Flughafenterminal beträgt $v_1 = 1,36 \text{ m/s}$ ($\sigma_1 = 0,23 \text{ m/s}$) und die Geschwindigkeit einer Gruppe aus drei Passagieren wurde durchschnittlich zu $v_3 = 0,96 \text{ m/s}$ ($\sigma_3 = 0,19 \text{ m/s}$) bestimmt.

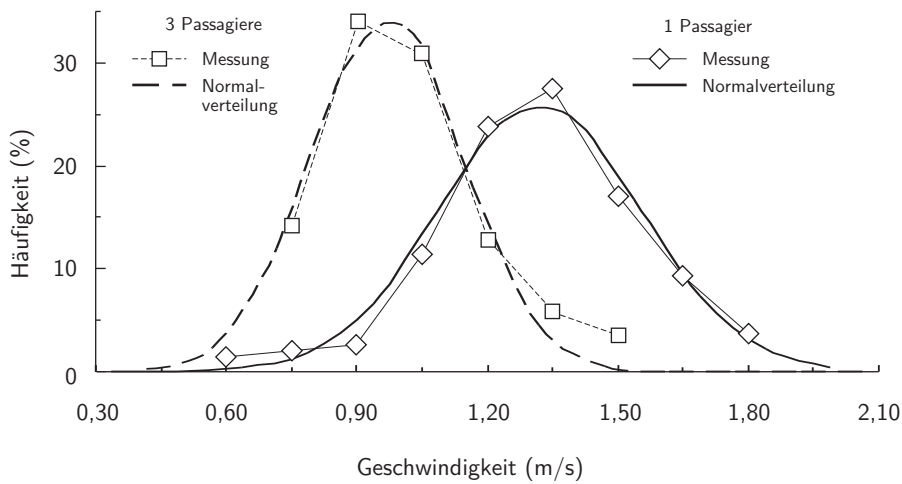


Abbildung 3.14: Geschwindigkeitsprofil mit unterschiedlicher Anzahl an Gruppenmitgliedern (ein einzelner Passagier gegenüber einer Gruppe aus drei Passagieren). Die funktionale Anpassung der Messwerte erfolgt durch Normalverteilungen.

3.2.5. Geschwindigkeitsverteilung - Gepäckanzahl

Die Anzahl und Art des mitgeführten Gepäcks hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegungsgeschwindigkeit der Passagiere. Bei der Zuordnung des Gepäcks gibt es eine

für die Abfertigung relevante Unterteilung in Reisegepäck und Handgepäck. Während das Reisegepäck zumeist größere Dimensionen aufweist und am Check-In abgegeben wird, besitzt das Handgepäck wesentlich kleinere Ausmaße und kann vom Passagier während der gesamten Reise mitgeführt werden. Je nach Airline weichen die gültigen Dimensionen für das normale Reisegepäck ab. Die mögliche Bandbreite der Dimensionen ist in Tabelle 3.8 aufgeführt.

| Dimension | Minimum | Maximum |
|-----------|---------|---------|
| Länge | 150 mm | 1200 mm |
| Breite | 75 mm | 750 mm |
| Höhe | 75 mm | 550 mm |
| Gewicht | 0.5 kg | 50 kg |

Tabelle 3.8.: Gängige Dimensionen für das Reisegepäck von Passagieren [vgl. 223].

Neben dem normalen Reisegepäck werden auch Gepäckstücke transportiert, die nicht den gängigen Dimensionen entsprechen. Das so genannte Sperrgepäck wird an separaten Schaltern entgegengenommen und nicht in der automatischen Gepäckanlage transportiert [vgl. 224].

Im Gegensatz zum Reisegepäck führt der Passagier das Handgepäck die ganze Zeit mit sich und kann es im Flugzeug separat verstauen. Seit November 2006 gilt die europäische Verordnung zur Flüssigkeitsbeschränkung (VO (EG) 1546/2006) in Erweiterung zur VO (EG) 622/2003, in der Gegenstände benannt sind, die der Passagier nicht im Sicherheitsbereich des Flughafenterminals und nicht im Flugzeug mitführen darf. Nach der Verordnung ist es dem Passagier nur noch erlaubt, Flüssigkeiten in kleinen Mengen im Handgepäck mitzuführen⁸.

Die Regeln für die Dimension und das Gewicht des Handgepäckes bestimmen die jeweiligen Luftverkehrsgesellschaften eigenständig. Ein Empfehlungsrahmen wird dabei von der [137] bereitgestellt. Im *Passenger Services Conference Resolutions Manual* (PSCRM) verweist die *Recommended Practice 1749* auf eine maximale Länge von 56 cm, eine Breite von 45 cm und eine Tiefe von 25 cm. Bei Abweichungen sollte dabei eine Gesamtlänge (Höhe + Breite + Tiefe) von 115 cm nicht überschritten werden. Die meisten Luftverkehrsgesellschaften erlauben zu dem noch ein zweites, kleineres Gepäckstück (Rucksack oder Hand-/Laptoptasche). Bei Lufthansa ist beispielsweise die Anzahl der Gepäckstücke von der Buchungsklasse abhängig. So sind in der First und der Business Klasse jeweils zwei Handgepäckstücke erlaubt. Jedoch darf in der Economy Klasse nur ein Handgepäck-

⁸ Im Handgepäck dürfen nach VO (EG) 1546/2006 Flüssigkeiten in einer Größenordnung von maximal 100 ml in einem wiederverschließbaren und transparenten Plastikbeutel mit einem Volumen von maximal einem Liter mitgeführt werden.

stück mitgeführt werden (Stand September 2009). Für die Kontrolle der Dimension des Handgepäcks sind im Check-In Bereich Boxen durch die Airlines aufgestellt. Wenn das Handgepäckstück in die Box passt, kann es vom Passagier mit in das Flugzeug genommen werden.

Entscheidend für die Bewegungsgeschwindigkeit des Passagiers ist der individuell verschiedene Transport des Gepäcks durch das Terminal. Der Passagier hat zumeist die freie Wahl, ob er dafür einen Gepäckwagen benutzen möchte. Die Nutzung des Gepäckwagens variiert mit Werten zwischen 19 % und 26 % [163]. Eine ausgeprägte Abhängigkeit der Gepäckwagnennutzung bezogen auf die Gruppengröße wurde bei der Datenanalyse nicht festgestellt. Es ist jedoch im Allgemeinen zu erwarten, dass mit einer steigenden Anzahl an Gepäckstücken die Wahrscheinlichkeit der Gepäckwagnennutzung steigt. Die Anzahl der Gepäckstücke in Bezug auf die Gruppengröße und Passagierkategorie ist in Tabelle 3.9 dargestellt.

| Gruppengröße n (Passagier) | durchschnittliche Gepäckanzahl | | Gepäck pro Passagier | |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | Tourist | Geschäftsreisender | Tourist | Geschäftsreisender |
| 1 | 1,29 | 0,56 | 1,29 | 0,56 |
| 2 | 1,98 | 1,29 | 0,99 | 0,64 |
| 3 | 2,59 | 2,33 | 0,86 | 0,78 |

Tabelle 3.9.: Anzahl der Reisegepäckstücke in Abhängigkeit von Passagierkategorie und Gruppengröße am Flughafen Stuttgart [163, 164]

Auf dem Weg zum Check-In benötigen die Passagiere durch den Transport des Reisegepäcks mehr Platz als in den Bereichen nach dem Check-In. Der spezifische Platzbedarf ist je nach Gepäckstück unterschiedlich, wobei der Platzbedarf eines Rucksacks oder einer kleinen Umhängetasche vernachlässigt werden kann. Im Folgenden wird zwischen fünf Gepäckkategorien unterschieden: Gepäckwagen, große Rollkoffer und Reisetaschen, kleine Rollkoffer (Handgepäckdimension), Rucksäcke sowie kleinen Handtaschen. Nicht aufgezählte Gepäckstücke werden einer geeigneten Gruppe zugeordnet. Während ein kleiner Rollkoffer relativ wenig Platz einnimmt und zumeist direkt neben (oder knapp hinter) dem Passagier positioniert ist, nimmt das Reisegepäck bedeutend mehr Platz ein. Der Gepäckwagen benötigt den meisten Platz und ist am unflexibelsten. Zudem wird er beim Abflug im Check-In Bereich oder spätestens vor der Sicherheitskontrolle zurückgelassen und kann für nachfolgende Passagiere ein Hindernis darstellen. Bei der Ankunft nutzt der Passagier den Gepäckwagen zumeist von der Gepäckaushabe bis zum Erreichen seines Transportmittels (Bahn, Parkhaus oder die Terminalvorfahrt) [225]. Der prozentuale Anteil der Gepäckwagnennutzung unterscheidet sich je nach Reiseziel. In Tabelle 3.10 ist der Anteil der Gepäckwagnennutzung an den verschiedenen Flughäfen aufgelistet. Die Daten der Flughäfen Leipzig/Halle (LEJ), Dresden, Stuttgart (STR), Frankfurt und München

besitzen dabei eine unterschiedliche Granularität. Lediglich die Daten aus MUC sind vollständig vorhanden.

| Reiseziel | Häufigkeit der Gepäckwagnutzung (%) | | | | |
|--------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Abflug | | | | Ankunft |
| | LEJ '01 | DRS '01 | STR '08 | FRA '99 | MUC '02 |
| Inland | 6 | 10 | - | 18 | 10 |
| EU | 58 | 51 | - | 42 | 13 |
| Non-EU | 62 | 51 | - | 52 | 30 |
| Schengen | - | - | - | 43 | 13 |
| Non-Schengen | - | - | - | 48 | 26 |
| Gesamt | - | 39 | 24 | - | 18 |

Tabelle 3.10.: Prozentuale Anteile der Gepäckwagnutzung bei Abflug und Ankunft (LEJ/DRS [226], STR [163], FRA [227], MUC [225])

Bei den von DRS und LEJ aus startenden Auslandsflügen wird ein Anteil von über 50 % bei der Nutzung von Gepäckwagen ausgewiesen. Dieser erscheint sowohl aus subjektiven als auch aus objektiven Gesichtspunkten (Anzahl der notwendigen Gepäckwagen) sehr hoch. Der hohe Anteil ist durch die Stichprobencharakteristik in der Studie von [226] begründet. Die meisten in der Stichprobe erfassten Passagiere traten ihre Reise mit einem Reiseveranstalter an und nutzen mit hoher Wahrscheinlichkeit die bereitgestellten Gepäckwagen. Wird die Auswertung um diesen verzerrenden Effekt bereinigt und die Gepäckwagnutzung nach privat und geschäftlich reisenden Passagieren differenziert, ergibt sich die in Tabelle 3.11 dargestellte Aufteilung.

| Passagierkategorie | Häufigkeit der Gepäckwagnutzung (%) | | | |
|--------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | LEJ '01 | DRS '01 | DRS '08 | STR '08 |
| Geschäftsreisender | 8 | 9 | 3 | 4 |
| Tourist | 37 | 31 | 6 | 24 |

Tabelle 3.11.: Prozentuale Anteile der Gepäckwagnutzung (Abflug), Unterscheidung nach Geschäftsreisenden und Touristen.

Die aktuell am Flughafen Dresden aufgenommenen Daten (DRS '08, Abbildung 3.16) zeigen eine Gepäckwagnutzung von 3 % für geschäftlich und 6 % für privat reisende Passagiere. Unter Berücksichtigung der am Flughafen Stuttgart aufgenommenen Datensätze erscheint ein Gepäckwagenanteil von durchschnittlich 5 % im geschäftlichen Bereich und 20 % bei Touristen angemessen. Wie in Abbildung 3.15 gut zu erkennen ist, haben die

Passagiere in der Check-In Schlange aufgrund des vorhandenen Gepäcks und der Gepäckwagen einen hohen Platzbedarf. Während das Reisegepäck zumeist links oder rechts vom Passagier abgestellt wird, steht der Gepäckwagen grundsätzlich vor dem Passagier und verlängert die Schlange. Gerade zu Spitzenzeiten kann es aus diesem Grund im Bereich des Check-In zu erheblichen Beeinträchtigungen kommen, da durch die langen Schlangen zum Teil ganze Terminalbereiche abgeschnitten werden.



Abbildung 3.15: Passagierschlange vor dem Check-In Schalter bei hoher Gepäckanzahl.

Um den Einfluss des Gepäcks auf die Geschwindigkeit des Passagiers zu bewerten, wurden die Aufnahmen aus den Kamerapositionen *A* und *B* zur Bestimmung der Geschwindigkeit mit Handgepäck genutzt. Die Kamerapositionen *C* und *D* dienten zur Bestimmung der Geschwindigkeit mit normalem Reisegepäck. Die Position der Kameras in Bezug zum Terminallayout ist in [Abbildung 3.7](#) (S. 97) dargestellt und die Abbildung der Sichtbereiche kann [Abbildung A.1](#) (S. 202) entnommen werden.

Nachdem die Passagiere ihr Reisegepäck am Check-In Schalter abgegeben haben, gehen sie nur noch mit dem Handgepäck zur nächsten Abfertigungseinrichtung (Sicherheitskontrolle). Aufgrund des am Check-In aufgegebenen Reisegepäcks verhält sich der Passagierstrom jetzt wesentlich agiler. Eine (potentielle) Warteschlange an der Sicherheitskontrolle benötigt demzufolge auch bei gleicher Personenanzahl bedeutend weniger Platz. Die Anzahl der Handgepäckstücke unterscheidet sich zwischen den beiden Passagierkategorien. Touristen nutzen zu 50 % kleinere Taschen und zu 36 % einen Rucksack ([Abbildung 3.16](#)). Im Vergleich dazu führen Geschäftsreisende zwar einen vergleichbaren Anteil an kleineren Taschen mit, jedoch ist mit 17 % der Rollkoffer wesentlich häufiger vertreten und ein Rucksack wird nur noch in 6 % aller Fälle genutzt.

Der hohe Anteil an Rollkoffern im geschäftlichen Bereich ist damit zu erklären, dass der Geschäftsreisende kaum Reisegepäck am Check-In Schalter aufgibt, sondern sein gesamtes Gepäck im Handgepäck verstaut. Aus seiner Sicht überwiegt der Zeitvorteil bei der Ankunft (kein Wartezeiten durch Gepäckaufnahme), gegenüber einem möglichen Zeitnachteil bei der (erweiterten) Sicherheitskontrolle. Aufgrund der an den meisten Koffern befestigten Rollen sind keine größeren Einschränkungen bei der Fortbewegung zu erwarten. Um diese These zu unterstützen, wurden die Aufnahmen im Terminal Dresden bezüglich

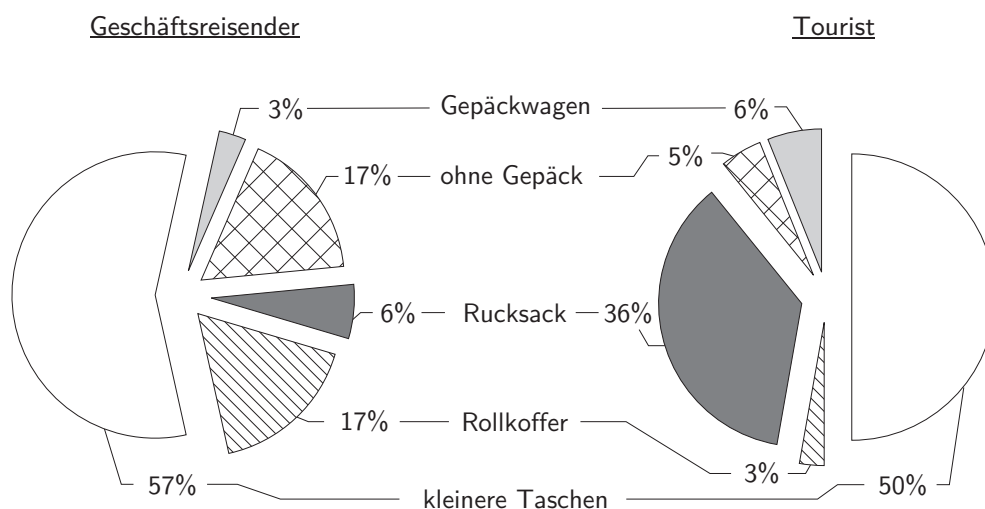


Abbildung 3.16: Gepäckverteilung nach Abgabe des Reisegepäcks am Check-In.

der Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Handgepäcks analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.12 dargestellt. Als Maßstab für die Berechnung von $\Delta v_{B,T}$ dient jeweils die Geschwindigkeit der Personen mit einem Rucksack, da davon ausgegangen werden kann, dass die Verwendung eines Rucksacks keine Einflüsse auf das Bewegungsverhalten hat.

| Gepäck | Geschäftsreisender | | | Tourist | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|
| | v_B (m/s) | σ_B (m/s) | Δv_B (%) | v_T (m/s) | σ_T (m/s) | Δv_T (%) |
| Rollkoffer, klein | 1,42 | 0,20 | 7,6 | 1,19 | 0,19 | 11,2 |
| Handtasche | 1,33 | 0,22 | 0,8 | 1,07 | 0,22 | 0,0 |
| Rucksack | 1,32 | 0,25 | 0,0 | 1,07 | 0,21 | 0,0 |
| Reisetaschen | 1,28 | 0,26 | -3,0 | 1,05 | 0,22 | -1,9 |
| Gepäckwagen | 1,27 | 0,24 | -3,8 | 1,04 | 0,20 | -2,8 |

Tabelle 3.12.: Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Gepäcks, wobei sich die relativen Geschwindigkeitsänderungen Δv auf die Nutzung eines Rucksacks beziehen.

Bei der Analyse sind nur die Personen berücksichtigt worden, die exakt ein Gepäckstück der jeweiligen Kategorie besitzen. So wird sichergestellt, dass gegenseitige Beeinflussungen bei der Verwendungen mehrerer Gepäckstücke die Ergebnisse nicht verzerren. Bei der Verwendung eines kleinen Rollkoffers weisen die Passagiere eine um 7,6 % (bzw. 11,2 %) höhere Geschwindigkeit auf. Es kann daraus jedoch nicht gefolgert werden, dass der kleine Rollkoffer für den Effekt ursächlich ist. Die höheren Geschwindigkeiten entstehen, da der Rollkoffer hauptsächlich von Personen verwendet wird, die bereits Erfahrungen mit dem Flughafen aufweisen und die Aufenthaltszeit im Terminal reduzieren wollen. Als Ergebnis der Analyse ist festzuhalten, dass der Rollkoffer das Bewegungsverhalten (im Sinne

einer Geschwindigkeitsreduktion) nicht negativ einschränkt. Im Gegensatz dazu führt die Verwendung eines Gepäckwagens erwartungsgemäß zu einer Reduktion der mittleren Geschwindigkeit, die jedoch mit Werten um 3-4 % eher gering ausfällt. Während der Auswertung der aufgezeichneten Daten kam es aufgrund geringer Passagierdichten kaum zu Interaktionen bei der Gepäckwagennutzung. Es ist zu erwarten, dass sich bei ansteigender Passagierdichte die eingeschränkte Manövrierfähigkeit des Gepäckwagens entscheidend auf das Passagierverhalten auswirken wird. Zum einen werden andere Passagiere den potentiellen Hindernissen frühzeitig ausweichen und zum anderen werden Passagiere mit Gepäckwagen ihren Weg vorausschauender planen müssen.

Nach Abschluss der Erhebung der passagierbezogenen Daten wird im nächsten Abschnitt das allgemeine Bewegungsverhalten der Passagiere im Terminal analysiert. Hierbei soll geklärt werden, welche relevanten Personengruppen das Terminal überhaupt betreten und wie der Passagier seine Zeit zwischen den Abfertigungsprozessen nutzt. Im Anschluss steht dann die Analyse der prozessbezogenen Daten im Mittelpunkt.

3.3. Allgemeines Bewegungsverhalten im Terminal

Nach der Ankunft im Terminal begibt sich der Passagier zum jeweiligen, seinem Flug zugewiesenen Check-In Bereich. In der Regel öffnen die Check-In Schalter für Langstreckenflüge drei Stunden vor Abflug und zwei Stunden vor Abflug für Kurz- und Mittelstreckenflüge. Im Mittel verbringen die Passagiere am Flughafen Frankfurt 149 Minuten, bevor sie abfliegen [218]. Diese Zeit teilt sich gemäß Abbildung 3.17 in drei Abschnitte auf. Der Passagier benötigt dabei durchschnittlich 38 Minuten von der Ankunft im Terminal bis zur Abfertigung am Check-In. Nach Verlassen des Check-In Bereichs vergehen weitere 38 Minuten bis der Passagier die Sicherheitskontrolle passiert. Die Zeit wird dabei zu großen Teilen genutzt, um die notwendigen Wegstrecken zurückzulegen und die Serviceeinrichtungen des Terminals zu nutzen. Im sicherheitskontrollierten Bereich steht durchschnittlich noch ein Zeitkontingent von 73 Minuten zur Verfügung, das die Passagiere unterschiedlich aufbrauchen, z. B. durch Besuche gastronomischer Einrichtungen oder die Nutzung von Einkaufsmöglichkeiten im Konzessionärbereich.

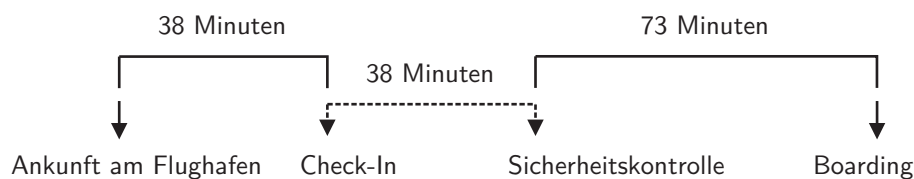


Abbildung 3.17: Durchschnittliche Verweildauer der Passagiere zwischen den Abflugprozessen am Flughafen Frankfurt (nach [218]).

Die Untersuchungen am Flughafen Dresden und Stuttgart zeigen, dass die Passagiere zumeist vor den Schaltern warten, wenn sie vor Öffnung der Check-In Schalter angekommen sind. Wenn bereits eine Schlange existiert, stellen sich die Passagiere an, wenn nicht, nutzen sie zumeist die Sitzgelegenheiten in unmittelbarer Nähe. Die Entscheidung im Anschluss an den Check-In direkt zur Sicherheitskontrolle zu gehen, hängt dabei zum großen Teil von der noch zur Verfügung stehenden Restzeit bis zum Abflug ab. Bis zu einer Stunde vor Abflug gehen ungefähr 25 % aller Passagiere direkt zur Sicherheitskontrolle weiter und etwa 60 % der Passagiere nutzen die Serviceeinrichtungen (Aufenthalt in Summe länger als 5 Minuten). Der verbleibende Teil der Passagiere (ca. 15 %) verstaут persönliche Sachen im Handgepäck, verabschiedet sich von den Begleitpersonen oder orientiert sich im Terminal auf dem Weg zur Sicherheitskontrolle (Zeitbedarf weniger als 5 Minuten) [163]. Der zeitliche Verlauf des Passagierverhaltens ist in Abbildung 3.18 dargestellt.

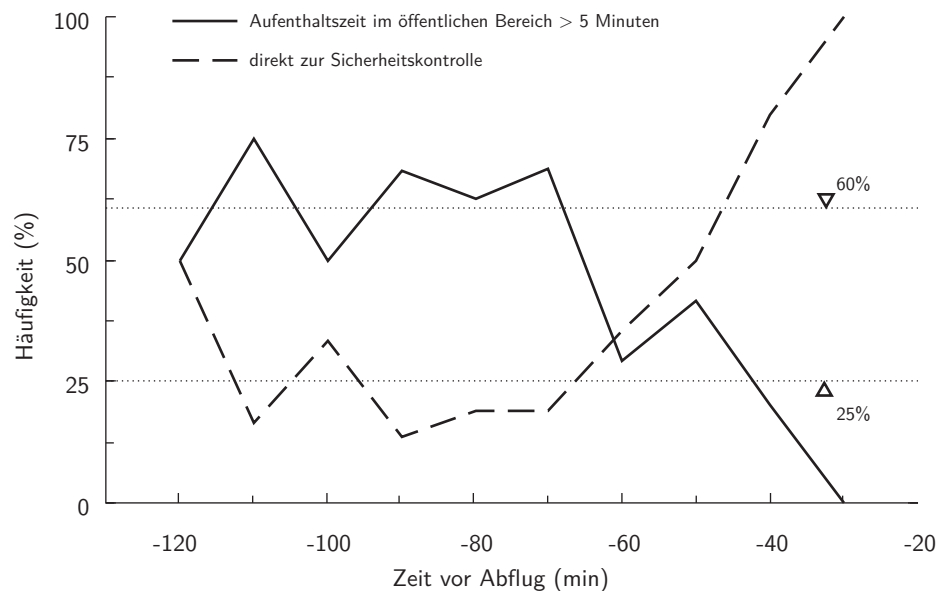


Abbildung 3.18: Anteil der Passagiere, die nach dem Check-In direkt zur Sicherheitskontrolle gehen, in Abhängigkeit zur verbleibenden Restzeit bis zum Abflug (nach [163]).

Da aus Sicht des Passagiers das Risiko den Flug zu verpassen mit abnehmender Restzeit bis zum Abflug stetig steigt, gehen alle Passagiere eine halbe Stunde vor Abflug direkt zur Sicherheitskontrolle [163]. Die Warte- und Abfertigungszeit an der Sicherheitskontrolle ist durch den Passagier nur schwer abzuschätzen. Viele Wartezeitfaktoren kann der Passagier nicht direkt beeinflussen (z. B. Anzahl der offenen Sicherheitschalter oder deren Auslastung). Zwischen der notwendigen Nutzung der Abfertigungsstationen, obliegt es in der freien Entscheidung des Passagiers die Serviceangebote des Flughafens wahrzunehmen. Die Serviceeinrichtungen innerhalb des Terminals lassen sich gemäß der folgenden Einteil-

lung allgemein kategorisieren: Wartezonen, Shops, Gastronomie, sanitäre Einrichtungen, Reisebüros und Infoschalter, Lounge sowie die Aussichtsplattform.

Der Grad der Nutzung der Serviceeinrichtungen variiert zwischen den Personenkategorien. Wenn sich die Einrichtungen im öffentlichen Bereich des Terminals befinden, zählen neben den Passagieren auch seine Begleiter/Abholer und die Besucher des Flughafens hinzu. Wie in [Abbildung 3.19](#) dargestellt, frequentiert der Besucher (erwartungsgemäß) mit hoher Wahrscheinlichkeit die Aussichtsplattform oder informiert sich in Reisebüros und Infoschaltern. Um den Vergleich der verschiedenen Personengruppen im Terminal zu vereinfachen, bezieht sich die in [Abbildung 3.19](#) dargestellte Häufigkeit auf einen durchschnittliche Vertreter aus den Geschäftsreisenden und Touristen, den Begleitern (bringen Passagiere in den Abflugbereich), Abholern (Warten auf Passagiere im Ankunftsbereich) und den Besuchern (Nutzung der Terminals ohne Verbindung zum Personentransport).

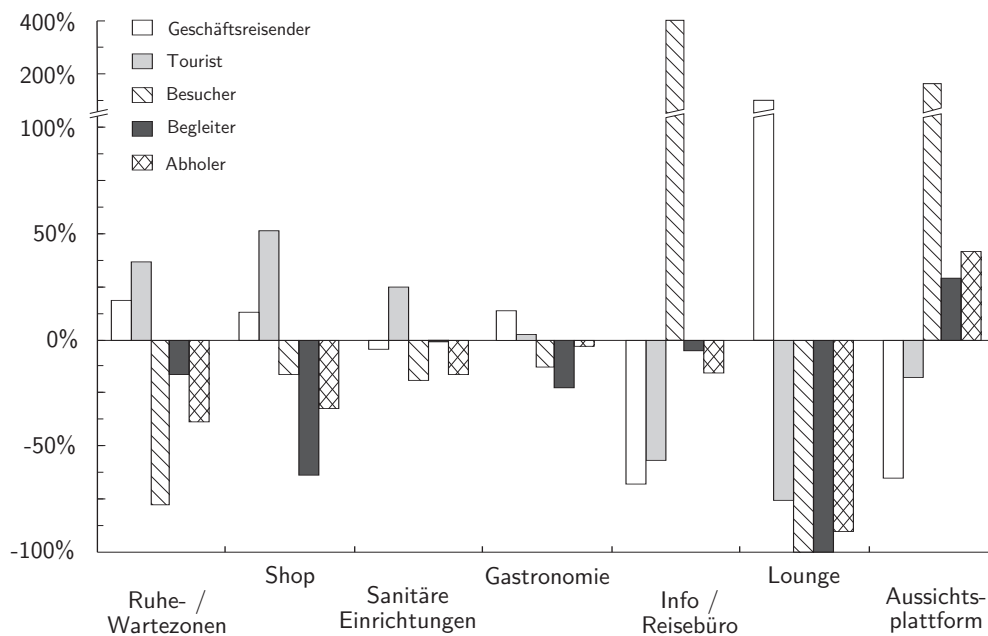


Abbildung 3.19: Nutzung der Serviceeinrichtungen am Flughafenterminal in Abhängigkeit zur Personenkategorie bezogen auf eine Durchschnittsperson (Daten von DRS/LEJ [226]).

Zwei Serviceeinrichtungen sind eindeutig einer Personenkategorie verknüpft: der Geschäftsreisende ist der primäre Nutzer der Lounge und der Besucher nutzt hauptsächlich die Informationsangebote des Flughafens sowie die Reisebüros. Die Aussichtsplattform ist durch ihre Lage im öffentlichen Bereich und als Bestandteil der „Erlebniswelt Flughafen“ zentraler Anlaufpunkt für die Besucher, die Begleiter und Abholer. Der Passagier im Allgemeinen nutzt die Angebote der Gastronomie, die Einkaufsmöglichkeiten und die sa-

nitären Einrichtungen. Dabei nimmt der Geschäftsreisende häufiger die gastronomischen Angebote wahr und der Tourist ist häufiger im Einkaufsbereich anzutreffen.

Während die Aufteilung von Geschäftsreisenden und Touristen zu den typischen Kennzahlen innerhalb der jährlichen Geschäftsberichte der Flughafenbetreiber zählen, ist der Anteil von Begleitern, Abholern und Besucher dort zumeist nicht verzeichnet. Zwar sind diese Personengruppen nicht ausschlaggebend für die Gestaltung der Passagierabfertigungsprozesse, jedoch ist eine Abschätzung der potentiellen Größenordnung notwendig, um die Auslastung der zur Verfügung stehenden Bewegungsflächen und der Serviceeinrichtung im öffentlichen Bereich korrekt widerspiegeln zu können. Am Flughafen Frankfurt beispielsweise ist die Aufteilung der Personengruppen mit einem Verhältnis von 6:3:1 gegeben, sodass jeder zweite Passagier einen Begleiter hat und für jeden sechsten Passagier ein Besucher berücksichtigt werden muss (Tabelle 3.13). Die tatsächlichen Relationen unter den Personengruppen variieren jedoch zwischen den verschiedenen Flughäfen und sind neben der Anbindung an den Personennahverkehr auch entscheidend vom Serviceangebot des Flughafens abhängig.

| Passagierkategorie | Häufigkeit je Passagier (%) | | |
|--------------------|-----------------------------|-----|-----|
| | HAM | FRA | HAJ |
| Begleiter | 34 | 57 | 58 |
| Besucher | 26 | 32 | 14 |

Tabelle 3.13.: Anteil an Begleitern und Besuchern bezogen auf einen Passagier am jeweiligen Flughafen (HAM, FRA und HAJ). Die Daten aus HAM und FRA entstammen veröffentlichten Flughafenstatistiken (2005/2006) und die Daten aus HAJ basieren auf einer Passagierumfrage [228].

Der Flughafenbetreiber ist bestrebt die Qualität und den Umfang des Serviceangebots auf die jeweiligen Personengruppen anzupassen, um einen hohen Nutzungsgrad seines Angebots zu erreichen und somit zusätzlichen Umsatz zu generieren. Da die Präferenzen der Personengruppen für eine flughafenspezifische Serviceeinrichtung nur bedingt generalisiert betrachtet werden können, müssen im Einzelfall durch separate Analysen geeignete Daten erhoben werden.

3.4. Erhebung prozessbezogener Daten

Um das Verhalten der Passagiere im Terminal hinreichend genau beschreiben zu können, wurden alle notwendigen Parameter in den vorangegangenen Abschnitten definiert und durch deren Kalibrierung durch Messungen an den Flughäfen Dresden und Stuttgart validiert. Aus Sicht der Modellierung des Passagierabfertigungsprozesses im Flughafen-terminal müssen im Weiteren auch die prozessbezogenen Parameter bestimmt werden.

Der Passagier durchläuft für den Abflug die Prozesse Check-In, Sicherheits-, Pass- und Bordkartenkontrolle (Kapitel 1.4, S. 29ff). Die Passkontrolle ist während des Abfluges nur notwendig, wenn der Passagier in ein Nicht-Schengen Land aus- oder weiterreist. Bei der Ankunft sind die Passkontrolle, die Gepäckaufnahme und eine mögliche Zollkontrolle zu passieren.

Als Grundlage für die Analysen der prozessbezogenen Daten stehen die am Flughafen Stuttgart durchgeführten Messungen der Prozesszeiten zur Verfügung [163, 164]. Für Modellierung der Prozessabläufe werden die gemessenen Prozesszeiten durch Normal- und Weibull-Verteilung funktional angepasst. Die Weibull-Verteilung wurde zusätzlich zur Normal-Verteilung gewählt, da sie eine hohe Variationsbreite im Funktionsverlauf aufweist und somit eine universelle Anwendbarkeit für verschiedenste Systemverhalten ermöglicht. Die Charakteristik der Weibull-Verteilung ist durch die Parametern α (einheitenloser *shape* Parameter) und β (*scale* Parameter mit Einheit der Messgröße x) bestimmt. Für die Weibull-Verteilung sind die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (3.1) und die Verteilungsfunktion (3.2) wie folgt definiert.

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad x \geq 0 \quad (3.1)$$

$$F(x, \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad x \geq 0 \quad (3.2)$$

Der Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ der Weibull-Verteilung werden durch (3.3) und (3.4) unter Verwendung der Gamma-Funktion (3.5) bestimmt.

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\beta^2}{\alpha} \left[2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left(\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right)^2 \right]} \quad (3.4)$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (3.5)$$

Für die Ermittlung der jeweiligen Verteilungsparameter werden n -gemessene Daten klassifiziert und nach (3.6) in k Klassen aufgeteilt. Die Klassenbreite b_k ergibt sich gemäß (3.7) durch die Anzahl der Klassen, das Minimum x_{\min} und das Maximum x_{\max} des Datensatzes. Für die Durchführung der Klassifizierung und für den anschließenden Verteilungstest zur Bestimmung der Qualität der funktionalen Anpassung ist eine Anzahl von $n \geq 40$ empfohlen. Weiterhin sollen mindestens fünf Messwerte je Klasse zur Verfügung stehen [229].

$$k = 5 \log n \quad (3.6)$$

$$b_k = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k - 1} \quad (3.7)$$

Für die Bestimmung von Schätzern der Verteilungsparameter α und β wird der Variationskoeffizient v (3.8) aus dem Mittelwert (\bar{x}) und der Standardabweichung (s) der Stichprobe berechnet.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3.8)$$

In Abhängigkeit vom Variationskoeffizient v erfolgt jetzt die Schätzung der Verteilungsparameter α (3.9)⁹ und β (3.10).

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1,25}{v} - 0,45 & v \leq 0,4651 \\ \frac{1}{7} \left(1,101 - \frac{1}{v}\right)^{2,5} + \frac{1}{v} & v > 0,9091 \\ \frac{1}{7} \left(\frac{1}{v} - 1,1\right)^{2,5} + \frac{1}{v} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (3.10)$$

Für die Überprüfung der Qualität der gewählten Verteilung dient der Chi-Quadrat-Anpassungstest. Durch den Test wird geprüft, ob das Merkmal x gemäß der gewählten Verteilung $F_o(x)$ ausgeprägt ist (Null-Hypothese H_o , (3.11)) oder die Verteilung $F_o(x)$ nicht für die Verteilung $F(x)$ der Stichprobe angenommen werden kann (Alternativ-Hypothese H_a , (3.12)). Im Folgenden wird bei der Verwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests ein Signifikanzniveau von $\alpha_s = 5\%$ angenommen (Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der die Null-Hypothese zu Unrecht abgelehnt wird).

⁹ Die dargestellte Schätzung des Verteilungsparameters α der Weibull-Verteilung basiert auf den Forschungsarbeiten von [230], wobei (3.9) aus [231] entnommen ist.

$$H_o : F(x) = F_o(x) \quad (3.11)$$

$$H_a : F(x) \neq F_o(x) \quad (3.12)$$

Die gewichtete quadratischen Abweichung von beobachtetem $n_{i, \text{beobachtet}}$ und erwartettem Auftreten $n_{i, \text{erwartet}}$ (3.13) der erstellten k Klassen wird zur Prüfgröße χ^2 gemäß (3.14) zusammengefasst.

$$n_{i, \text{erwartet}} = N \int_i^{i+1} f_o(x) dx \quad (3.13)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_{i, \text{beobachtet}} - n_{i, \text{erwartet}})^2}{n_{i, \text{erwartet}}} \quad (3.14)$$

Die ermittelte Prüfgröße χ^2 wird abschließend mit dem kritischen Wert der Chi-Quadrat-Verteilung $\chi_{\text{krit.}}^2$ verglichen. Für $\chi_{\text{krit.}}^2$ muss zusätzlich zu α_s die Anzahl der Freiheitsgrade ν (3.15) bestimmt werden. Bei der Bestimmung der Freiheitsgrade sind die Anzahl der Klassen (k) und die Anzahl der zu schätzenden Parameter (λ) zu berücksichtigen. Da die Weibull-Verteilung zwei Parameter α und β besitzt ist $\lambda = 2$.

$$\nu = k - \lambda - 1 \quad \Rightarrow \quad \nu = k - 3 \quad (3.15)$$

Ist $\chi^2 \leq \chi_{\text{krit.}}^2$ ist die H_o Hypothese nicht abzulehnen und die gemessenen Daten können entsprechend der gewählten Verteilung approximiert werden, ansonsten ist die H_o Hypothese zu verwerfen. Für die nachfolgende funktionale Anpassung der erhobenen Messdaten ist zu beachten, dass die Weibull-Verteilung bei $x = 0$ beginnt, für das Minimum der Messdaten aber typischer Weise $x_{\text{min}} > 0$ gilt. Bei Ablehnung der H_o Hypothese besteht demzufolge die Möglichkeit den Ursprung der Verteilung um Δx zu verschieben ($\Delta x \leq x_{\text{min}}$), sodass durch eine geeignete Wahl von Δx eine Minimierung von $\chi_{\text{krit.}}^2$ erreicht werden kann. Für die nachfolgenden funktionalen Anpassungen der Passagierabfertigungsprozesse wird (bis auf wenige begründete Ausnahmen) auf die Weibull-Verteilung zurückgegriffen. Die Bestimmung der Verteilungsparameter erfolgt dabei gemäß (3.9) und (3.10), wobei in einem iterativen Prozess durch die Anpassung von Δx der Wert für χ^2 minimiert wird.

3.4.1. Ankunftsverteilung

Die Ankünfte der Passagiere am Flughafenterminal haben einen weitreichenden Einfluss auf die nachfolgenden Passagierabfertigungsprozesse. Wenn die Ankünfte von verschiedenen Flügen zeitlich zusammenfallen, können gemeinsam genutzte Abfertigungsressourcen

(z. B. Sicherheitskontrolle) stark ausgelastet sein und die Prozesszeiten für jeden einzelnen Passagier erhöhen. Für die Modellierung ist es somit entscheidend, valide Ankunftsverteilungen aus den vorhandenen Datensätzen abzuleiten. Wenn die Passagiere noch nicht eingeecheckt haben (z. B. durch Vorabend- oder Web-Check-In), müssen sie je nach Flug und Luftverkehrsgesellschaft den Check-In spätestens 60 - 30 Minuten vor Abflug durchlaufen haben. In Abhängigkeit von der Erfahrung des Passagiers mit den Flughafenstrukturen und den Abfertigungsprozessen, der Reisemotivation, der notwendigen Anreisezeit (Verkehrsmittelwahl) und den zeitlichen Problemen während der Anreise (z. B. Stau) variiert die individuelle Ankunftszeit des Passagiers im Terminal. Für die Anreise können in der Regel verschiedene Verkehrsmittel gewählt werden (Modal Split). Eine Übersicht der Verkehrsmittelwahl für ausgewählte Flughäfen (Daten nach Angaben der Flughäfen) und der durchschnittlichen Nutzungsrate (nach ADV-Statistik [172]) ist in Tabelle 3.14 gegeben.

| Flughafen | Verkehrsmittelnutzung (%) | | | | | |
|------------|---------------------------|------|-----------|-----|--------|--------------|
| | PKW | Taxi | Mietwagen | Zug | S-Bahn | Bus/Sonstige |
| FRA (2007) | 40 | 19 | 5 | 19 | 10 | 7 |
| MUC (2007) | 45 | 11 | 6 | - | 31 | 7 |
| FMO (2007) | 88 | 6 | - | - | - | 6 |
| HAJ (2007) | 66 | 12 | 5 | - | 15 | 2 |
| DUS (2007) | 65 | 16 | - | 9 | 4 | 6 |
| STR (2008) | 59 | 11 | 4 | - | 22 | 4 |
| ADV (2003) | 52 | 19 | 4 | 5 | 11 | 9 |

Tabelle 3.14.: Verkehrsmittelwahl bei der Anreise zum Flughafenterminal.

Je nach verkehrstechnischer Anbindung des Flughafens wird die Anreise mit dem PKW durch (über-) regionale Angebote der Bahn und des öffentlichen Nahverkehrs erweitert. Als wesentliche Kriterien für die Nutzung des Individualverkehrs gelten die Schnelligkeit (48 %), Bequemlichkeit (48 %) und die Pünktlichkeit (25 %) [232]. Im Gegensatz dazu wählen Passagiere den öffentlichen Nahverkehr als primären Verkehrsträger für die Anreise, weil dieser preisgünstiger ist (56 %), sie keine Alternative haben (30 %) oder das Verkehrsmittel als bequemer wahrnehmen (29 %). Je nach gewähltem Verkehrsmittel ist der Passagier auf feste Zeitfenster angewiesen (z. B. Zug, S-Bahn oder Bus) oder kann die Anreise zeitlich individuell gestalten. Da die Vorfahrten zu den Flughafenterminals spezifisch geregelt sind (z. B. Parkhaus, Taxistände oder Bushaltestellen), ist demzufolge die Wahl eines Terminaleingangs zumeist direkt durch das genutzte Verkehrsmittel beeinflusst. Bei der Ankunftsverteilung der Passagiere im Terminal kann davon ausgegangen werden, dass Geschäftsreisende zu einem späteren Zeitpunkt im Terminal erscheinen als Touristen [vgl. 163]. In Tabelle 3.15 sind die prozentualen Anteile der Passagiere bezogen

auf ein dreistufiges Ankunftsintervall (> 2 Stunden, 1-2 Stunden und < 1 Stunde vor dem geplanten Abflug (*scheduled time of departure*, STD) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Tourist mit einer hohen Wahrscheinlichkeit bereits 2 Stunden vor Abflug das Terminal betritt.

| Flughafen | Passagierkategorie | Häufigkeiten der Ankunftszeiten (%) | | |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|--------------|
| | | > 2 Stunden | 1-2 Stunden | > 1 Stunde |
| Frankfurt | Gesamt | 32 | 59 | 9 |
| | Geschäftsreisender | 18 | 68 | 14 |
| | Tourist | 49 | 48 | 3 |
| Hamburg | Gesamt | 38 | 58 | 4 |
| Hahn | Gesamt | 54 | 42 | 4 |
| Stuttgart | Gesamt | 8 | 58 | 34 |
| | Geschäftsreisender | 2 | 50 | 48 |
| | Tourist | 15 | 68 | 17 |

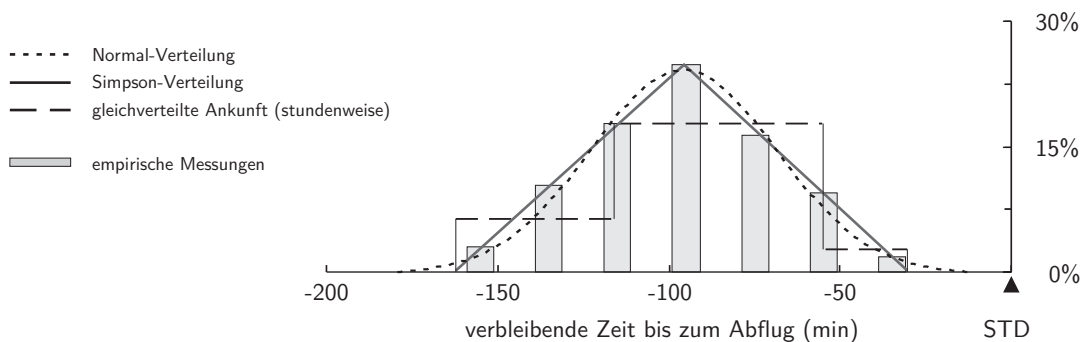
Tabelle 3.15.: Ankunftsverteilung der Passagiere im Terminal vor geplantem Abflug. Unterteilung nach Passagierkategorien Geschäftsreisende und Touristen sowie einer aggregierten Gesamtverteilung [163, 218, 233, 234].

Da für den Flughafen Stuttgart nur die Ankünfte der jeweiligen Passagierkategorien zur Verfügung standen, wurde für die Vergleichbarkeit mit den anderen Flughäfen die Gesamt-Aufteilung unter der Annahme erstellt, dass 37 % aller Passagiere geschäftlich reisen [vgl. 234]. Im Zusammenhang mit der Analyse der Ankunftszeiten im Terminal muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass viele Passagiere bereits im Besitz einer Bordkarte sind (Web-Check-In mit Handgepäck oder Vorabend-Check-In mit Reisegepäck). Diese Passagiere müssen somit am Reisetag den Check-In Bereich nicht mehr zu einem vorgegebenen Zeitpunkt passieren und es ist zu erwarten, dass sie das Terminal aus diesem Grund wesentlich später betreten. Der Anteil der am Vorabend eincheckenden Passagiere kann bei touristischen Flügen bis zu 25 % betragen, wobei der Anteil hohen Schwankungen unterliegt. Am Abreisetag betreten bereits eingeecheckte Passagiere im Gegensatz zu den anderen Passagieren frühestens etwa eine Stunde vor geplantem Abflug das Terminal [164]. Dem Vorteil, dass diese Passagiere den Check-In Bereich entlasten, steht der Nachteil gegenüber, dass die Luftverkehrsgesellschaft nicht mit Sicherheit weiß, ob der Passagier das Terminal am Abreisetag bereits betreten hat¹⁰. Im Bereich der geschäftlich reisenden Passagiere ist der Vorabend-Check-In fast nicht vertreten, da aufgrund der ho-

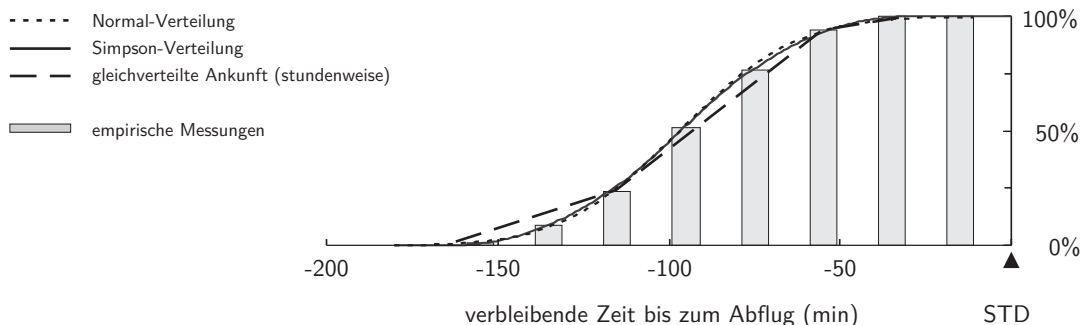
¹⁰ Verspätungen beim *boarding* werden zum Teil durch nicht rechtzeitig ankommende Passagiere verursacht, da die notwendige Zeit für die Sicherheitskontrolle, der Zeitbedarf für die Orientierung im Terminal und die Länge der Laufwege unterschätzt wird.

hen Handgepäckrate (Kapitel 3.2.5, S. 110) eine vorzeitige Gepäckaufgabe im Terminal nicht notwendig ist und der Web-Check-In somit die geeignete Wahl darstellt.

In Tabelle 3.15 sind die prozentualen Anteile der ankommenden Passagiere in einem Stundenraster beschrieben. Wann die Passagiere innerhalb der jeweiligen Stunde das Terminal betreten, ist aus den dargestellten und zu grob gerasterten Daten zunächst nicht abzuleiten. Aus diesem Grund wird für die Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs auf reale Messungen am Flughafen Stuttgart zurückgegriffen [163]. Der Verlauf der Verteilungs- und der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist in Abbildung 3.20 dargestellt.



(a) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Passagierankunft.



(b) Verteilungsfunktion der Passagierankunft.

Abbildung 3.20: Funktionale Anpassung der Ankunftsverteilung unter Verwendung von Normal- und Simpson-Verteilung sowie einer gleichverteilten Ankunft (mit Berücksichtigung von in drei Zeitintervallen).

Die aufgenommenen Messwerte zeigen, dass die Annahme einer gleichverteilten Ankunft der Passagiere innerhalb des gewählten Stundenrasters das reale Ankunftsverhalten nicht widerspiegelt. Stattdessen ist eine stetige Zunahme der Anzahl ankommender Passagiere bis zum Erreichen des Modalwertes zu verzeichnen. Mit dem Erreichen des Modalwertes nimmt die Wahrscheinlichkeit zusätzlich ankommender Passagiere wieder sukzessive ab. Die Zu-/Abnahme der Passagierankünfte im zeitlichen Verlauf können durch eine Simpson-Verteilung (Dreiecksverteilung) hinreichend genau abgebildet werden [163]. Bei

der Simpson-Verteilung sind für den charakteristischen Verlauf der Verteilungsfunktion (3.16) lediglich drei Parameter zu definieren (Modus t_{mod} , Minimum t_{min} und Maximum t_{max}). Diese Parameter können direkt aus den spezifischen Ankunftszeiten t des zugrunde liegenden Datensatzes abgeleitet werden.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(t - t_{\text{min}})}{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})(t_{\text{mod}} - t_{\text{min}})}, & \text{wenn } t_{\text{min}} \leq t \leq t_{\text{mod}} \\ \frac{2(t_{\text{max}} - t)}{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})(t_{\text{max}} - t_{\text{mod}})}, & \text{wenn } t_{\text{mod}} < t \leq t_{\text{max}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.16)$$

Die Bestimmung des Erwartungswerts μ und der Standardabweichung σ der Simpson-Verteilung erfolgt durch (3.17) und (3.18).

$$\mu = \frac{1}{3} (t_{\text{min}} + t_{\text{mod}} + t_{\text{max}}) \quad (3.17)$$

$$\sigma = \frac{1}{6} \sqrt{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})^2 + (t_{\text{max}} - t_{\text{mod}})^2 + (t_{\text{mod}} - t_{\text{min}})^2} \quad (3.18)$$

Das gewählte Beispiel einer Ankunftsverteilung am Flughafen Stuttgart weist einen Erwartungswert $\mu = 101,3$ min und eine Standardabweichung von $\sigma = 27,5$ min auf. Da die Verteilung der Ankunftszeiten fast symmetrisch um den Erwartungswert angeordnet ist, bietet sich die Verwendung einer Normalverteilung (3.19) zur Beschreibung der Ankunftsverteilung ebenfalls an. Gegen die Verwendung der Normalverteilung spricht ihre geringe funktionale Flexibilität, da sie bei schiefen Verteilungen nicht genutzt werden kann, was bei der Simpson-Verteilung jedoch problemlos möglich ist.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.19)$$

Bei der empirisch erhobenen Ankunftsverteilung ist den Messungen zufolge, zwischen der Ankunft von Geschäftsreisenden und der Ankunft von Touristen zu differenzieren. Der signifikante Unterschied der beiden Personenkategorien ist in Abbildung 3.21 gut zu erkennen. Die verwendeten Datensätze (grau hervorgehoben) basieren auf den Messungen am Flughafen Stuttgart, wobei hier die Bezeichnung *Business* für überwiegend geschäftlich reisende Passagiere gewählt wurde und *Tourist* für überwiegend private motivierte Flüge steht. Durch eine gleichgewichtete Mischung der beiden Passagierkategorien wird eine

virtuelle dritte Kategorie erstellt (*Mixed* in Abbildung 3.21). Die *Mixed* Kategorie wird verwendet, wenn in der späteren Implementierung der betrachtete Flug weder der Kategorie der Geschäftsreisenden noch der Kategorie der Touristen eindeutig zuzuordnen ist. Die Messwerte in Abbildung 3.21 zeigen, dass sich mit zunehmendem Anteil von Geschäftsreisenden der Erwartungswert in Richtung STD verschiebt. Während bei den Touristen die ersten 10 % bereits 140 min vor Abflug das Terminal betreten haben, wird dieser Anteil bei den Geschäftsreisenden erst bei 100 min erreicht. Die letzten 10 % der privat reisenden Passagiere kommen frühestens 65 min vor Abflug, bei den Geschäftsreisenden verschiebt sich dieser Zeitpunkt auf 53 min. Im Mittel erreicht der Geschäftsreisende das Terminal 27 min später als der Tourist.

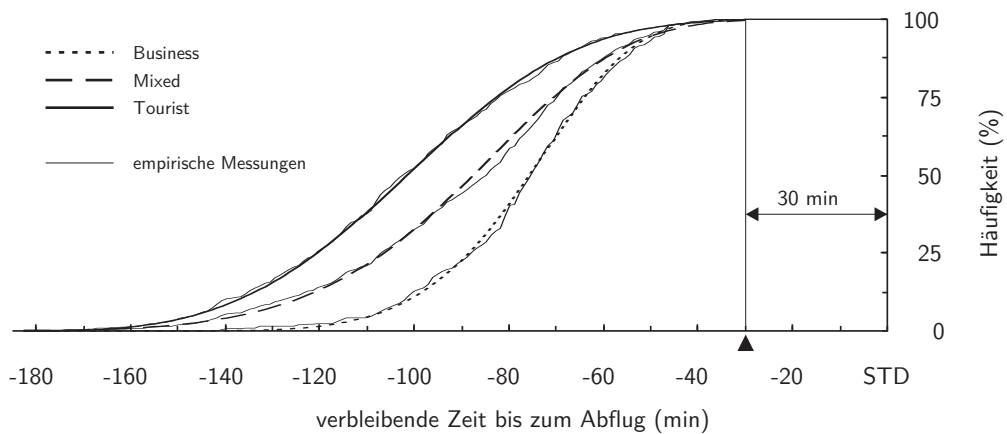


Abbildung 3.21: Vergleich von unterschiedlichen Ankunftsverteilungsfunktionen in Abhängigkeit von der Passagierkategorie sowie Darstellung der funktionalen Anpassung durch eine Weibull-Verteilung (Datenlage [163]).

Während nach [163] die Verwendung der Simpson-Verteilung eine gute Approximation der Ankunftsverteilung liefern kann, erfüllt sie jedoch nicht den Chi-Quadrat-Anpassungstest bei der funktionalen Anpassung der *Business* und der *Mixed* Kategorie. Da die Weibull-Verteilung für alle Passagierkategorien ein positives Chi-Quadrat-Testergebnis liefert, wird sie im Folgenden auf alle vorhandenen Eingangsdaten der Passagierankünfte angewendet. Die Funktionsparameter der Weibull-Verteilung sind nach Passagierkategorien unterteilt in Tabelle 3.16 hinterlegt. Bei der Anpassung der Weibull-Funktion an die aufgenommenen Messwerte ist es zielführend, die Funktionswerte beginnend mit dem der frühesten Ankunft (240 min vor Abflug) aufzutragen.

Die Kategorie der geschäftlich reisenden Passagiere weist mit $\mu_{\text{Business}} = 76$ min vor Abflug einen um 24 min geringeren Erwartungswert als die Kategorie der Touristen $\mu_{\text{Tourist}} = 100$ min bei der Ankunft im Terminal auf. Auch ist die korrespondierende Standardabweichung mit $\sigma_{\text{Business}} = 18$ min um ein Drittel kleiner als $\sigma_{\text{Tourist}} = 27$ min. In

| Passagierkategorie | Verteilungsparameter | | | | |
|--------------------|----------------------|---------------|------------------|-------------|----------------|
| | α | β (min) | Δt (min) | μ (min) | σ (min) |
| Business | 6,0 | 99 | 72 | 76 | 18 |
| Tourist | 3,5 | 94 | 55 | 100 | 27 |
| Mixed | 6,2 | 150 | 12 | 89 | 26 |

Tabelle 3.16.: Parameter der Weibull-verteilten Passagierankunft mit $f(t+240 \text{ min}, \alpha, \beta, \Delta t)$ sowie $t_{\min} = -240 \text{ min}$ und $t_{\max} = -30 \text{ min}$

der Darstellung der resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Abbildung 3.22) sind die Unterschiede zwischen den beiden Passagierkategorien deutlich zu erkennen.

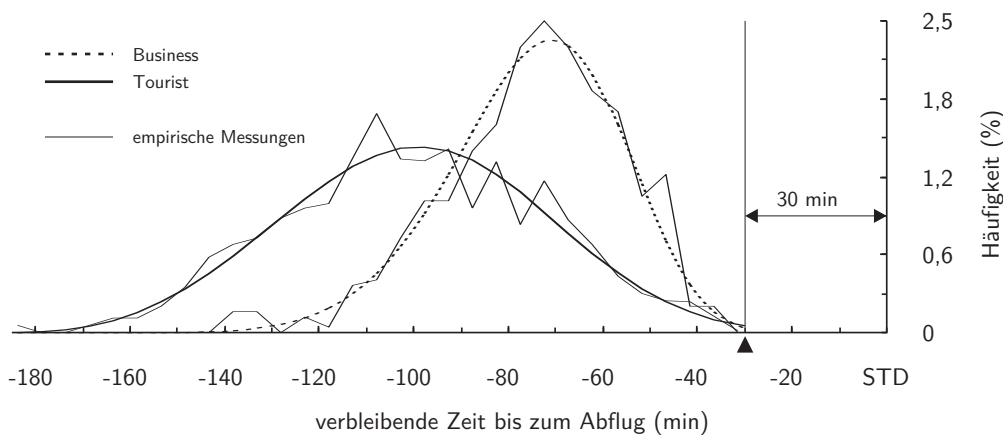


Abbildung 3.22: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Ankunftsverteilungen von Geschäftsreisenden und Touristen (5 min Intervall, Datenlage [163]).

Die Analyse der erstellten Ankunftsverteilungen liefert einen weiteren interessanten Aspekt: durch die Verwendung der Ankunftsverteilungen kann die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden, wie viele Passagiere den Check-In nicht rechtzeitig 30 min vor Abflug erreichen und somit ihren Flug verpassen [vgl. 62]. Bei Verwendung der in Tabelle 3.16 ausgewiesenen Verteilungsparameter ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, den Check-In nicht rechtzeitig zu erreichen, von 0,04 % für Geschäftsreisende und von 0,02 % für Touristen. Nach [164] kommt bei etwa 10 % aller Flüge mindestens ein Passagier zu spät (Zeit bis zum Abflug $< 30 \text{ min}$), was bei 100 Passagieren je Flug einer Größenordnung von 0,1 % entspricht.

Prinzipiell ist jedoch zwischen der Ankunft im Terminal und dem Erhalt der Bordkarte am Check-In zu unterscheiden, da zusätzliche Wartezeiten durch die Abfertigung (z. B. durch Passagierschlangen) zu berücksichtigen sind. Auch existiert ein Anteil an ankommenden Passagieren, die bereits im Besitz einer Bordkarte sind (z. B. Web- oder Vorabend-Check-In), und somit aus der Verspätungsdefinition (Erreichen des Check-In Be-

reiches 30 min vor Abflug) herausfallen. Aus diesem Grund kann die Ankunftsverteilung nur als ein erstes Indiz für die Anzahl verspätet eintreffender Passagiere gelten.

3.4.2. Check-In

Nach gebuchter Reise muss der Passagier als ersten Abfertigungsprozess den Check-In durchlaufen. Er hat die Möglichkeit, bereits im Vorfeld der Reise zuhause durch Web-Check-In oder am Vorabend im Terminal einzuchecken. Eine Anmeldung beim Web-Check-In ist in den meisten Fällen ab 24 Stunden vor dem Abflug möglich und endet 2-3 Stunden vor dem Abflug. Der Vorabend Check-In bewirkt eine Entlastung des Check-In Bereiches, da Passagiere in einem Zeitbereich abgefertigt werden, in dem erwartungsgemäß weniger Abflüge durch die betreffende Luftverkehrsgesellschaft erfolgen. Ohne sich am Reisetag in die Passagierschlangen vor dem Check-In einreihen zu müssen, nutzt der Passagier den Komfort, mit der bereits vorhandenen Bordkarte direkt zur Sicherheitskontrolle gehen zu können. Die Abfertigung am Schalter kann durch die Verwendung eines *per-flight* oder eines *common* Verfahrens erfolgen. Im Unterschied zum *per-flight* Verfahren, bei dem für jeden Flug separate Schalter geöffnet sind, stehen beim *common* Verfahren alle Schalter der Luftverkehrsgesellschaft für den Check-In zur Verfügung. Als Serviceangebot an den *Premium* Kunden (First/Business Klasse oder Mitglied im Vielfliegerprogramm der Luftverkehrsgesellschaft) wird für diesen Personenkreis häufig ein gesonderter Check-In Bereich ausgewiesen. Neben den normalen Check-In Schaltern kann der Passagier auch einen Automaten nutzen. Moderne Automatenysteme sind dabei in der Lage, Buchungssysteme verschiedener Fluggesellschaften zu verwalten (*common use self service*, CUSS). Das Papierticket wurde daher in den letzten Jahren schrittweise durch sein elektronisches Pendant ersetzt, wobei ab dem 1. Juni 2008 das elektronische Ticket (*eTix*) Standard für alle Luftverkehrsgesellschaften der *International Air Transport Association* (IATA) ist. Die Vorteile des CUSS Systems bestehen in der permanenten Verfügbarkeit und den eingesparten variablen Betriebskosten (z. B. Personalkosten). Durch die Umstellung auf elektronisch erstellte Tickets kann der Passagier sich sehr einfach an diesen Automaten registrieren. Eine langfristige Etablierung als Standard Check-In Verfahren kann jedoch nur gelingen, wenn die Prozesszeiten am CUSS Automaten vergleichbar mit den Bearbeitungszeiten durch geschultes Personal sind. Mit der am Automaten erhaltenen Bordkarte muss der Passagier sein Reisegepäck dann separat an einem *baggage drop* Schalter aufgeben.

Am Check-In Schalter legt der Passagier seine Buchungsbestätigung zusammen mit einem Identitätsnachweis vor und erhält nach Abgabe des Reisegepäcks (Kapitel 3.2.5, S. 110) seine Bordkarte. Gibt der Passagier kein Gepäck auf, wird er beim Check-In nur im System registriert und ihm ein Sitzplatz im Flugzeug zugewiesen. Bei der Aufgabe von Reisegepäck werden die Gepäckstücke einzeln gewogen und mit einer Markierung (*baggage tag*) versehen. Der Passagier erhält dann zusammen mit seiner Bordkarte die

dazugehörigen Gepäckabschnitte, den er bei Vorhandensein einer Sicherheitsvorkontrolle vorzeigen muss (in Deutschland uneinheitlich geregelt). Wenn der Passagier kein *normales* Reisegepäck sondern Sperrgepäck mit sich führt, muss er dafür einen separaten Sperrgepäckschalter aufsuchen. Da das Sperrgepäck nicht wie das normale Reisegepäck in der Gepäckanlage des Flughafens automatisch überprüft und sortiert werden kann, muss es manuell bearbeitet werden. Ist ein Gepäckstück bei der automatischen, mehrstufigen Kontrolle (Luftsicherheitsüberprüfung) des Gepäcks auffällig geworden, gelangt es zur manuellen Nachkontrolle. Ist das Gepäckstück in der automatischen Sicherheitskontrolle durchgefallen, wird der Passagier im Terminal ausgerufen und zur Gepäcknachkontrolle gebeten.

Die Abfertigungszeiten an den Sperrgepäckschaltern variieren sehr stark, da zum einen die Gepäckstücke nicht standardisiert sind und zum anderen die Sicherheitskontrolle gleich vor Ort (manuell) durchgeführt wird. Der Sperrgepäckschalter dient im Allgemeinen nur zur Annahme des Sperrgepäcks unter der Voraussetzung, dass der Passagier bereits im Besitz seiner Bordkarte ist. Die Zeit zur Abfertigung eines Passagiers mit Sperrgepäck ergibt sich demzufolge aus der Zeit des regulären Check-In mit den zugehörigen Reisegepäckstücken und der zusätzlich am Sperrgepäckschalter entstehenden Warte- und Bearbeitungszeit. In Bezug auf die von [164] durchgeführten Auswertungen erfolgt die Anpassung der Bearbeitungszeit durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 2$, $\beta = 45$ s und $\Delta t = 10$ s, was einem Erwartungswert von $\mu = 50$ s und einer Standardabweichung von $\sigma = 20$ s entspricht.

Die Datenaufnahmen am Flughafen Stuttgart ermöglichen für die nachfolgenden Untersuchungen der Prozesszeiten am Check-In die Analyse von drei separaten Abfertigungsszenarien. Das erste Szenario bildet einen allein reisenden Passagier ab, der kein Reisegepäck mit sich führt. Nachfolgend ist dieser Fall (1 Passagier, 0 Koffer) mit der Notation (1-0) versehen. Das zweite Szenario repräsentiert einen Passagier mit einem Reisegepäckstück (1-1). Im dritten Szenario reisen zwei Passagiere zusammen und müssen jeweils ein Reisegepäckstück aufgeben (zwei Passagiere, zwei Koffer: (2-2)). Mit den drei beschriebenen Szenarien können 70 % der aufgetretenen Passagier/Reisegepäck-Konfigurationen abgebildet werden. Eine von den vorgestellten Szenarien abweichende Konfiguration (andere Gruppengröße oder Gepäckanzahl) wird anschließend gesondert behandelt. Aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen des Flughafens Stuttgart können die in [Abbildung 3.23](#) dargestellten Verteilungen ermittelt werden. Beim ersten Szenario (1-0) erfolgt die Abfertigung durchschnittlich mit $\mu_{(1-0)} = 34$ s und $\sigma_{(1-0)} = 9$ s.

Die Verteilung für die Check-In Zeit für einen Passagier mit einem Koffer (1-1) weist die Werte $\mu_{(1-1)} = 58$ s und $\sigma_{(1-1)} = 25$ s auf. Werden zwei Personen mit je einem Koffer abgefertigt (2-2), ergeben sich die Parameter zu $\mu_{(2-2)} = 94$ s und $\sigma_{(2-2)} = 32$ s. Bei der Abfertigung einer Gruppe sinkt die Abfertigungszeit je Passagier signifikant ($\Delta\mu = 11$ s). Ein Grund dafür ist, dass bei Buchung der Reise durch eine Person alle Mitreisenden mit

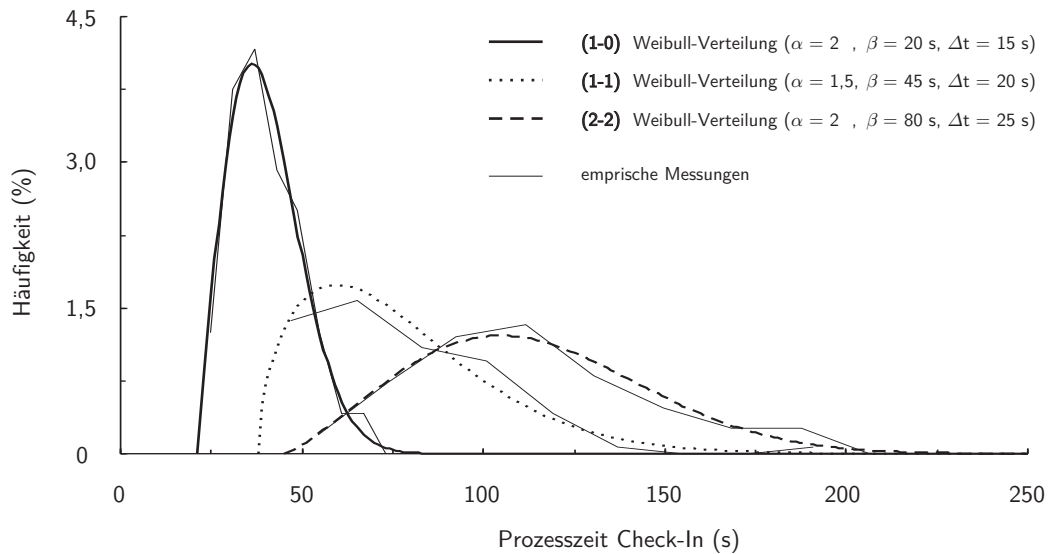
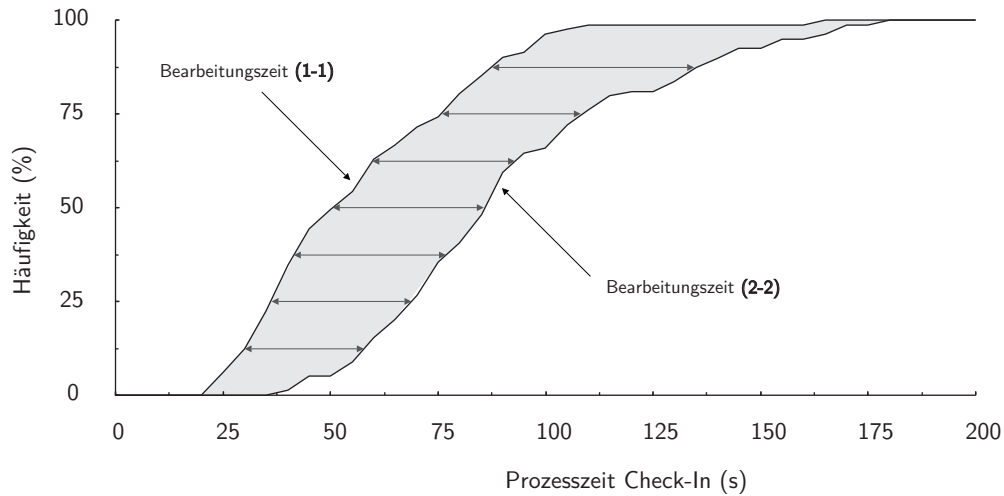


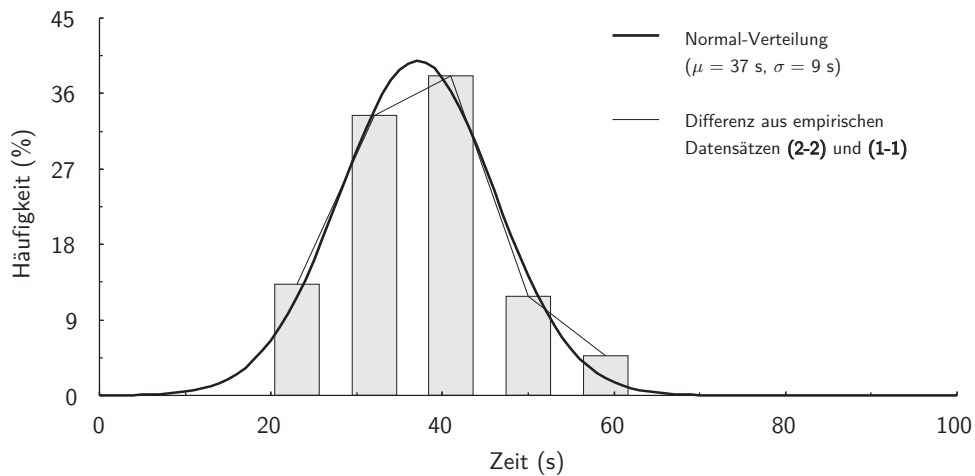
Abbildung 3.23: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Prozesszeiten am Check-In. Gegenüberstellung von empirischen Häufigkeiten und funktionaler Anpassung durch eine Weibull-Verteilung (Datenlage nach [163, 164]).

angegeben werden und diese bei Aufruf der Buchung bereits auf dem Display des Buchungssystems erscheinen. Eine Überprüfung der Reisenden durch das Schalterpersonal erfolgt somit wesentlich effizienter. Es verkürzt sich ebenfalls die Reaktionszeit der Passagiere, die zusätzlich bei der Abfertigung von zwei separaten Passagieren entsteht. Ist der erste Passagier abgefertigt, nimmt dieser seine Reiseunterlagen entgegen und verstaut sie, bevor er den Check-In Bereich verlässt. Der nachfolgende Passagier wartet das Verlassen des Schalters ab und tritt erst dann (nach Aufforderung) an den Check-In Schalter heran. Neben den drei betrachteten Szenarien treten auch weitere Kombinationen von Passagier- und Gepäckstückanzahl auf. Für die Bestimmung der Prozesszeiten am Check-In bei größeren Gruppen stehen allerdings nur wenige Datensätze zur Verfügung. Eine funktionale Anpassung ist somit nicht verlässlich möglich. Aus diesem Grund werden die Datensätze für die Standardfälle (1-0), (1-1) und (2-2) als Referenzkonfiguration genutzt, um den Zeitbedarf für ein zusätzliches Gepäckstück (0+1) oder für einen zusätzlichen Passagier mit einem Gepäckstück (1+1) abzuschätzen. In [Abbildung 3.24](#) ist dargestellt, wie die zeitliche Differenz zwischen den gemessenen Werten der (1-1) und (2-2) Konfiguration zur Bestimmung der (1+1) Verteilung genutzt wird. Aufgrund der symmetrischen Datenausprägung erfolgt die funktionale Anpassung der empirischen Daten durch eine Normal-Verteilung.

Der Mittelwert der zeitlichen Differenz zwischen (1-1) und (2-2) beträgt $\mu = 37$ s bei einer Standardabweichung von $\sigma = 9$ s. Mit der (1+1) Verteilung können jetzt unter der Verwendung der (2-2) Verteilung die Check-In Abfertigungszeiten für größere Gruppen



(a) Empirische Verteilungsfunktionen der Bearbeitungszeiten beim Check-In. Gegenüberstellung von (1-1) und (2-2) Konfiguration und Bestimmung der zeitlichen Differenzen.



(b) Klassifizierung der zeitlichen Differenzen zur Bestimmung einer geeigneten funktionalen Anpassung unter Verwendung einer Normalverteilung (Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion).

Abbildung 3.24: Funktionale Anpassung der zeitlichen Differenzen zwischen zwei empirischen Datensätzen durch eine Normal-Verteilung (Datenlage nach [163]).

abgeleitet werden, wenn je Passagier ein Gepäckstück vorhanden ist. Da die Anzahl der Reisegepäckstücke mit zunehmender Gruppengröße sinkt, muss bei einer von der Passagieranzahl (n_{pax}) abweichenden Anzahl von Reisegepäckstücken (n_{bag}) die notwendige Bearbeitungszeit t für ein Reisegepäckstück (0+1) bestimmt werden. Das erfolgt analog zu (1+1) durch die zeitliche Differenz aus (1-0) und (1-1). Die Verteilung für eine beliebige, von den drei beschriebenen Szenarien abweichenden Kombination von Passagieranzahl

und der Anzahl von Reisegepäckstücken ($n_{\text{pax}} + n_{\text{bag}}$) erfolgt für $n_{\text{pax}} = 1$ nach (3.20) und für $n_{\text{pax}} > 1$ nach (3.21).

$$t_{(1+n_{\text{bag}})} = t_{(1-1)} + [n_{\text{bag}} - 1] t_{(0+1)} \quad (3.20)$$

$$t_{(n_{\text{pax}}+n_{\text{bag}})} = t_{(2-2)} + [n_{\text{pax}} - 2] t_{(1+1)} + [n_{\text{bag}} - n_{\text{pax}}] t_{(0+1)} \quad (3.21)$$

Die für den Check-In Prozess definierten Verteilungsannahmen (Weibull- oder Normal-Verteilung) sind mit den notwendigen Modellparametern in Tabelle 3.17 zusammenfassend dargestellt. Die Weibull-Verteilung ist durch die Verteilungsparameter α , β und Δt definiert und die Normal-Verteilung durch μ und σ . Zusätzlich zu den unterschiedlichen Passagier/Reisegepäck-Konfigurationen müssen weitere Faktoren bei der Bestimmung der individuellen Bearbeitungszeit am Check-In berücksichtigt werden. Zu diesen Faktoren zählen der Einsatz von ungeübtem Personal, mögliche Störung des Check-In Systems (Gepäckband oder Buchungssystem) und das Vorhandensein von Sperrgepäck. Beim Einsatz von ungeübtem Personal erfolgt ein Aufschlag zur regulären Bearbeitungszeit. Liegt eine Störung des Check-In Systems vor, wird das Maximum von tatsächlicher Bearbeitungszeit und Dauer der Störung genommen. Führt der Passagier Sperrgepäck mit sich, muss dieses separat am Sperrgepäckschalter kontrolliert werden, was durch eine zusätzliche Bearbeitungszeit berücksichtigt wird. In der folgenden Tabelle sind die hierfür notwendigen Verteilungsannahmen und -parameter zusammengefasst.

| Prozess | Verteilung | α | $\beta(s)$ | $\Delta t (s)$ | $\mu (s)$ | $\sigma (s)$ |
|--------------------|------------|----------|------------|----------------|-----------|--------------|
| (1-0) | Weibull | 2 | 20 | 15 | 34 | 9 |
| (1-1) | Weibull | 1,5 | 45 | 20 | 58 | 25 |
| (2-2) | Weibull | 2 | 80 | 25 | 94 | 32 |
| (0+1) | Normal | | | | 15 | 2 |
| (1+1) | Normal | | | | 37 | 9 |
| ungeübtes Personal | Normal | | | | 35 | 20 |
| Sperrgepäck | Weibull | 2 | 45 | 10 | 50 | 20 |
| Störung | Weibull | 1,3 | 200 | 40 | 200 | 150 |

Tabelle 3.17.: Bearbeitungszeiten am Check-In basierend auf Abfertigungsverteilungen und -parametern in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen [vgl. 164].

Die Benutzung des Check-In Automaten stellt für den Passagier eine zusätzliche Option dar. Sie steht in der nachfolgenden Implementierung nicht im Vordergrund, soll aber aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls erwähnt werden. Für die Bearbeitungszeit findet

eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 2$, $\beta = 85$ s und $\Delta t = 7$ s Anwendung [164]. Der resultierende Erwartungswert $\mu = 85$ s ($\sigma = 35$ s) ist signifikant größer als bei der Abfertigung am Check-In Schalter. Führt der Passagier noch Reisegepäck mit, muss er es separat am *baggage drop* Schalter abgeben. Je Gepäckstück wird demzufolge eine Bearbeitungszeit basierend auf der (0+1) Verteilung generiert. Für eine Verwendung der Verteilungsannahmen sind notwendiger Weise noch der prozentuale Anteil des ungeübten Personals, die Wahrscheinlichkeit von Sperrgepäck und eine Abschätzung der Häufigkeit von Systemstörungen festzulegen.

3.4.3. Sicherheitskontrolle

Auf den Check-In folgt die Sicherheitskontrolle als nächster Passagierabfertigungsprozess (Kapitel 1.4, S. 29). Die Sicherheitskontrolle besteht aus drei einzelnen Prozessen: der Gepäck-, der Personen- und einer optionalen Nachkontrolle. In Abbildung 3.25 sind die einzelnen Prozessabläufe während der Sicherheitskontrolle dargestellt. Nach Ablage des Handgepäcks und der persönlichen Gegenstände in eine Transportbox auf dem Transportband (ein mitgeführter Laptop muss in eine separate Box gelegt werden) (1) wartet der Passagier (2) auf die Aufforderung durch das Sicherheitspersonal, die metalldetektierende Torsonde zu passieren (3). Wenn von der Torsonde ein Alarm ausgelöst wird, erfolgt eine Nachkontrolle durch das Sicherheitspersonal mit einer Handsonde (4), wobei die Kontrolle geschlechtsspezifisch erfolgt (Mann (4A), Frau (4B)). Verläuft die Prüfung des Handgepäcks und der persönlichen Gegenstände ohne Beanstandungen, nimmt der Passagier seine Sachen wieder auf und verlässt den Bereich der Sicherheitskontrolle (5). Ansonsten wird der Passagier zur manuellen Nachkontrolle durch das Sicherheitspersonal aufgefordert (6).

Um unnötige Verzögerungen bei der Sicherheitskontrolle zu vermeiden, sind bereits im Vorfeld Hinweise auf den Verlauf der Kontrolle gegeben (z. B. Hinweis auf Flüssigkeitsbeschränkung nach VO (EG) 1546/2006). Während das Handgepäck und die mitgeführten technischen Systeme (z. B. Laptop) bei der manuellen Nachkontrolle durch das Sicherheitspersonal direkt in Augenschein genommen werden, wird bei der allgemeinen Gepäckdurchleuchtung auf ein Röntgenbild zurückgegriffen¹¹. Entscheidend für die Bearbeitungszeit ist hierbei die Erfahrung des Kontrollpersonals beim Erkennen von gefährlichen Gegenständen.

¹¹ Gemäß Verordnung (EG) Nr. 272/2009 zulässige Kontrollmethoden bei der Sicherheitskontrolle: Durchsuchung von Hand, Metalldetektorschleusen und -handgeräte, Sichtkontrolle, Röntgengeräte, Sprengstoff-Detektionsgeräte, -Spürhunde und -Spurendetektoren. Weiterhin gilt: „Um die Beurteilung auf neuen Technologien beruhenden und beim Erlass dieser Verordnung noch nicht vorgesehenen Kontrollmethoden zu ermöglichen, kann aufgrund der nach Artikel 4 Absatz 3 der Verordnung (EG) Nr. 300/2008 zu erlassenden Durchführungsvorschriften versuchsweise und befristet die Anwendung anderer Methoden gestattet werden, sofern das Gesamtsicherheitsniveau durch diese Versuche nicht beeinträchtigt wird.“

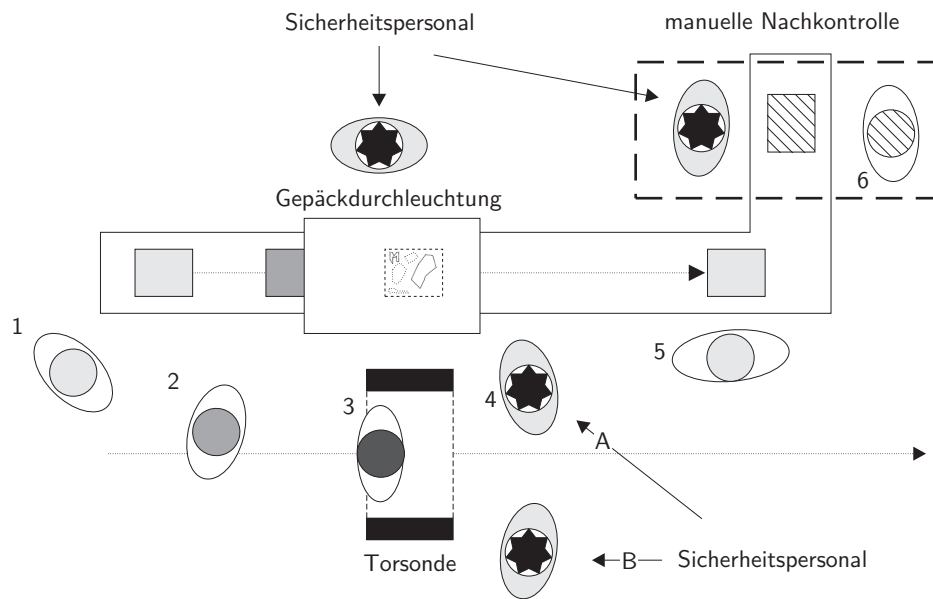


Abbildung 3.25: Allgemeiner Prozessablauf bei der Sicherheitskontrolle (eine Kontrollspur). Je nach spezifischer Ausgestaltung variiert die Anzahl des eingesetzten Sicherheitspersonals und die Ausgestaltung der einzelnen Stationen (z. B. Nutzung einer Torsonde durch zwei Kontrollspuren oder längere Transportbänder zur Gepäckaufnahme).

den. Die Identifikation von potentiell gefährlichen Gegenständen wird zusätzlich durch die zweidimensionale Betrachtungsperspektive erschwert [235, 236].

Klassifiziert der Kontrolleur am Röntgengerät fälschlicher Weise einen ungefährlichen Gegenstand als potentiell gefährlich (*false rejection*), erfolgt zwar eine manuelle Nachkontrolle jedoch ist dieser Vorgang nicht sicherheitsrelevant. Im Falle einer falschen Klassifizierung entstehen prozesseitig nur zusätzliche Wartezeiten für die Passagiere. Wird im Gegensatz dazu ein potentiell gefährlicher Gegenstand nicht erkannt (*false acceptance*), bleiben die Prozesszeiten beeinflusst, jedoch kann dieser Fall negative Auswirkungen auf die Sicherheit des Flughafenterminals nach sich ziehen. Es gilt somit abzuwägen, welches Maß an potentiell gefährlichen Gegenständen im sicherheitskontrollierten Terminalbereich toleriert werden muss, damit die Prozesszeiten bei der Sicherheitskontrolle einen angemessenen Rahmen nicht überschreiten. Für die Modellierung der Sicherheitskontrolle stehen empirische Prozesszeiten für die vier relevanten Prozessbereiche (Gepäckabgabe, Passagier-, Gepäcknachkontrolle und Gepäckaufnahme) zur Verfügung. Die funktionale Anpassung der Prozesszeiten erfolgt mit den in Tabelle 3.18 definierten Verteilungsparametern.

Im Vergleich zu den Verteilungen aus Tabelle 3.18 ([164]), zeigen die von der [237] erhobenen Messwerte eine andere Qualität und Ausprägung auf (Tabelle 3.19). Da keine weiteren empirischen Referenzen vorhanden sind und die Untersuchungen der [237] keine

| Prozess | Verteilung | α | β (s) | Δt (s) | μ (s) | σ (s) |
|------------------------|------------|----------|-------------|----------------|-----------|--------------|
| Gepäckabgabe | Weibull | 1,3 | 20 | 3 | 20 | 15 |
| Passagiernachkontrolle | Weibull | 1 | 25 | 20 | 45 | 15 |
| Gepäcknachkontrolle | Weibull | 3 | 40 | 10 | 45 | 15 |
| Gepäckaufnahme | Weibull | 2 | 40 | 0 | 40 | 25 |

Tabelle 3.18.: Verteilungsparameter der relevanten Prozessbereiche der Sicherheitskontrolle (nach [164]).

wissenschaftlich relevanten Analysen der verwendeten Datensätze enthalten (z. B. statistische Größen: Quantile, Standardabweichung oder Funktionsverläufe), wird im weiteren Vorgehen auf die Daten aus Tabelle 3.18 zurückgegriffen.

| Prozess | Minimum (s) | Mittelwert (s) | Maximum (s) |
|------------------------|-------------|----------------|-------------|
| Gepäckabgabe | 20,6 | 30 | 35,5 |
| Passagiernachkontrolle | 16,0 | 18 | 25,2 |
| Gepäcknachkontrolle | 10,0 | 17 | 22,4 |
| Gepäckaufnahme | 26,2 | 30 | 50,5 |

Tabelle 3.19.: Verteilungsparameter der relevanten Prozessbereiche der Sicherheitskontrolle (nach [237]).

Als letzte Kennzahlen für die Modellierung der Sicherheitskontrolle müssen die Alarmquote der Torsonde und die Quote der manuellen Nachkontrolle definiert werden. Der Alarm kann aufgrund einer erfolgreichen Detektion oder wegen einem im System vorgegebenen Quotenalarm erfolgen. Der Quotenalarm kann die Aufmerksamkeit des Sicherheitspersonals erhöhen und trägt durch die verdachtsunabhängige Auslösung auch zur Erhöhung der Sicherheit bei. Eine erfolgreiche Detektion erfolgt bei 12-25 % aller Fälle und der Quotenalarm hat eine Größenordnung von 10-12 % [237].

3.4.4. Pass- und Bordkartenkontrolle

Im Gegensatz zu den umfangreichen Datensätzen beim Check-In, stehen für den Bereich der Pass- und Bordkartenkontrolle keine empirischen Daten vom Flughafen Stuttgart für eine detaillierte Auswertung zur Verfügung. Bei der Ausreisekontrolle wurden von der Bundespolizei lediglich durchschnittliche Bearbeitungszeiten von 20 s bei der Ausreise in ein EU Land und 45 s bei der Ausreise in nicht-europäische Staaten ermittelt [238]. Die Bestimmung der Abfertigungszeiten bei der Bordkartenkontrolle erfolgt indirekt über die Angaben der Flugzeughersteller [239] und [240], die für das Boarding an jeder Tür

einen spezifischen Fluss ($\text{Passagiere}/\text{min}$) voraussetzen. Aus den durchschnittlich ausgewiesenen Ankunftsraten ($10\text{-}15 \text{ Passagiere}/\text{min}$) kann eine normalverteilte Abfertigungszeit je Passagier mit einem Erwartungswert von $\mu = 5 \text{ s}$ und einer Standardabweichung von $\sigma = 2 \text{ s}$ abgeleitet werden [vgl. 241]. Für die Vollständigkeit der allgemeinen Passagierabfertigungsprozesse im Terminal stehen noch die Prozesse der Gepäckaufnahme und der Zollkontrolle aus. Da die Abfertigungsprozesse bei luftseitiger Ankunft im Terminal in der folgenden Anwendung keine Rolle spielen und sich die Modellierung des Passagierverhaltens auf den Abflug beschränkt, erfolgt keine weitere Auseinandersetzung mit diesen Prozessen. Jedoch stellt der Bereich der luftseitigen Ankunft ein interessantes Forschungsfeld dar, das im Rahmen weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen eingehender analysiert werden sollte.

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine umfangreiche Datengrundlage für die praxisrelevante Implementierung des stochastischen Bewegungsmodells in eine virtuelle Flughafen-terminalumgebung erstellt. Neben den passagierbezogenen Daten (Geschwindigkeitsverteilung, Gruppengröße und Gepäckanzahl) stehen für alle Passagierabfertigungsprozesse während des Abfluges (Check-In, Sicherheits-, Pass- und Bordkartenkontrolle) geeignete Verteilungsfunktionen zur Verfügung.

4 | Anwendungen

Die methodischen Grundlagen zur Abbildung des Bewegungsverhaltens der Passagiere werden im folgenden Kapitel angewendet. Bevor jedoch eine Modellanwendung stattfinden kann, müssen die entwickelten methodischen Grundlagen in ein ausführbares Modell übertragen werden. Hierfür erfolgt die Entwicklung einer Simulationsumgebung, die einen geeigneten Rahmen für die Implementierung bietet (z. B. Erstellung von Grundrissen, Einstellung von Modellparametern über eine Nutzerschnittstelle oder grafische Ergebnisdarstellung). Zum einen soll das Einstiegsverhalten von Passagieren in ein Verkehrsflugzeug im Fokus stehen, das unter Verwendung eines eindimensionalen asymmetric simple exclusion process (ASEP) modelliert wird. Zum anderen wird das Verhalten der Passagiere in einem Flughafenterminal durch das entwickelte Bewegungsmodell abgebildet und sowohl für die Modellvalidierung der Abfertigungsprozesse als auch für die Entwicklung einer quantitativen, passagierbezogenen Prozessbewertungsmethodik genutzt.

Die entwickelten methodischen Grundlagen zur Abbildung menschlicher Verhaltensweisen können je nach Anwendungsgebiet und Zielstellung unterschiedlich genutzt werden. Dabei ist es nicht für jeden zu untersuchenden Prozess zielführend, alle Facetten des menschlichen Verhaltens abzubilden. Wie in Kapitel 2.1.2 (S. 41) gezeigt, können bereits durch wenige Annahmen individuelle Verhaltensmuster abgebildet werden. Aufgrund der geringen Komplexität einfacher Modelle ist eine Überführung in ein ausführbares Modell zumeist problemlos möglich. Mit steigender Modellkomplexität steigt zumeist auch der notwendige Implementierungsaufwand, sodass in einigen Fällen das Modell aufgrund von Implementierungsbeschränkungen (z. B. Ausführungsgeschwindigkeiten, notwendige Speichergröße oder unzureichende Anbindung an externe Systeme) zusätzlichen Einschränkungen unterliegen kann. Um keine Verzerrungen in den Berechnungsergebnissen zu erhalten, sollten Anpassungen der methodischen Grundlagen aufgrund von Implementierungsbeschränkungen verhindert werden. Die entwickelte Simulationsumgebung bietet mit ihrem modularen Aufbau und der umfangreichen Schnittstellenbereitstellung eine ideale Umgebung, die nicht nur eine effiziente Implementierung des stochastischen Bewegungsmodells erlaubt, sondern auch zukünftige nutzer- und modellspezifische Anpassungen erlaubt.

Bevor die Implementierung des in Kapitel 2.2 (S. 46ff) entwickelten stochastischen Bewegungsmodells am Beispiel des Passagierverhaltens in einem Flughafenterminal angewendet wird, zeigt das weniger komplexen Beispiel des Einsteigens von Passagieren in ein

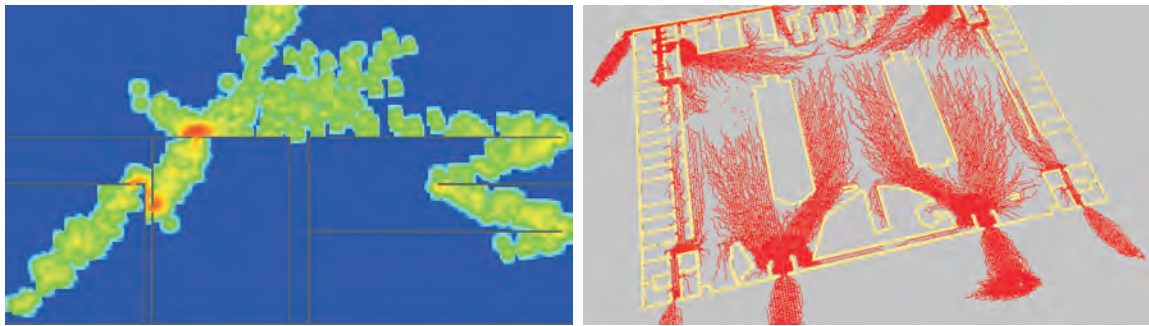
Verkehrsflugzeug, dass der Einsatz von mikroskopischen Bewegungsmodellen entscheidend die Qualität der erzielbaren Aussagen verbessert. Durch die problemorientierte Modellreduktion (ASEP, Annahme eines eindimensionalen Bewegungsansatzes) kann innerhalb eines zeitlich begrenzten Rahmens eine Vielzahl von Szenarien untersucht und dabei die Sensitivität der Modellparameter eingehend analysiert werden. Der Vorteil einer einfachen und robusten Implementierung des reduzierten Modellansatzes muss jedoch immer gegen die damit potentiell verbundenen qualitativen und quantitativen Ergebniseinschränkungen abgewogen werden.

4.1. Entwicklung/Implementierung einer Anwendungsumgebung

Bei der angestrebten Erstellung einer geeigneten Anwendungsumgebung steht nicht primär die Ausführungsgeschwindigkeit der Implementierung im Vordergrund, sondern die Erweiterbarkeit (Modularität) des resultierenden Quellcodes. Je nach Implementierungslevel (z. B. ein- oder zweidimensionale Umgebung, diskretisierte oder kontinuierliche Geometriedarstellung) können dann aus allgemeinen mathematischen Modellansätzen spezielle, für den jeweiligen Einsatz (geschwindigkeits-) optimierte Module Anwendung finden. Da diese Optimierungstechniken nur auf der Implementierungsebene ansetzen (z. B. *look-up-tables*, indizierter Zugriff auf im Vorfeld erstellte Datenstrukturen), können sie adäquate Algorithmen auf Modellebene nur bedingt ersetzen. Für die Implementierung ist ein Softwaredesign gewählt worden, das es ermöglicht, die entwickelten Bewegungs- und Entscheidungsalgorithmen mit Visualisierungs- und Auswertungskomponenten über Schnittstellen zusammenzuführen. Die zu entwickelnde Simulationsumgebung soll jedoch nicht nur ein Rahmen zur Durchführung von Modellberechnungen sein, sondern auch eine Testumgebung, in der Modellerweiterungen gezielt durchgeführt und erprobt werden können.

Erste problemorientierte Implementierungen von denen in Kapitel 2 (S. 37ff) vorgestellten Ansätzen zeigen, dass neben der statistischen Auswertung der Daten in Form von Diagrammen und Kennzahlen die grafische Darstellung der Ergebnisse ein entscheidendes Kriterium für das Verständnis und die Interpretation der Ergebnisse darstellen kann. Eine grafische Repräsentation sozialer und physikalischer Wechselwirkungen an Engstellen, die zu steigendem physikalischen Druck führen können, ist in Abbildung 4.1(a) aufgezeigt. Durch die gewählte grafische Ergebnisdarstellung ist es offensichtlich, in welchen Bereichen der Personenfluss optimiert werden sollte. In der gegenüberliegenden Abbildung 4.1(b) ist das Ergebnis eines Simulationslaufes dargestellt, in dem alle Individuen das Gebäude auf dem kürzesten Weg verlassen und sich zu definierten Sammelpunkten begeben. Durch die übersichtliche Darstellung der Simulationsergebnisse können bereits zu einer frühen Phase der Auswertung qualitative Aussagen über den Verlauf der Simulation getroffen werden.

Im Rahmen wissenschaftlicher Forschungen sind zwei allgemeine Herangehensweisen für die Darstellung des realistischen Bewegungsverhaltens vorhanden. Auf der einen Seite



- (a) Darstellung des Druckverlaufs durch soziale und physikalische Interaktionen. Die roten Areale kennzeichnen Gebiete mit (sehr) hohen Interaktionspotentialen.
- (b) Bewegungspfade von Passagieren bei der Entfluchtung eines Flughafenterminals unter der Nutzung der kürzesten Wege (Euklidische Distanz) [242].

Abbildung 4.1: Grafische Ergebnisdarstellung auf rudimentärer Ebene.

sollen komplexe Verhaltensmodelle für die Analyse grafisch aufbereitet werden und auf der anderen Seite steht die effiziente grafische Abbildung virtueller Menschenmengen, mit der überhaupt erst die Darstellung von Szenen mit einer Vielzahl Akteuren ermöglicht wird [243]. Im Vordergrund steht hierbei nicht die komplexe Modellierung menschlicher Verhaltensweisen, sondern die *Glaubwürdigkeit* der dargestellten Personenbewegungen. Im Anwendungsbereich der Computerspiele wird auch die realitätsnahe Abbildung der Personenbewegungen (Animation) fokussiert, allerdings ist das Verhalten der so genannten *Non Player Characters* (NPC) dynamisch an die jeweiligen Entscheidungen des Spielers gekoppelt. Zusätzlich müssen demzufolge von Seiten des Entwicklers auch Methoden implementiert werden, die eine große Nähe zu den wissenschaftlichen Bewegungsmodellen aufweisen. Typische algorithmische Herausforderungen bestehen in der Routenfindung (unter Nutzung von Wegpunkten), dem individuellen Ausweichverhalten oder die Modellierung von spezifischen Handlungs-/Entscheidungsmöglichkeiten. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Rechnerarchitekturen konvergieren die unterschiedlichen Herangehensweisen zunehmend. Bei der Erstellung der Anwendungsumgebung für das stochastische Bewegungsmodell wird aus diesem Grund neben der modulbasierten Entwicklung auch gezielt auf die Erkenntnisse bei der Entwicklung von Animationssystemen zugegriffen [244].

4.1.1. Entwicklung eines Software-Prototyps

Das stochastische Bewegungsmodell ist bereits in Kapitel 2 (S. 37ff) umfangreich beschrieben. Für die Entwicklung eines Software-Prototyps werden in folgenden Abschnitten die allgemeinen methodischen Grundlagen, die Vorgehensweise bei der Animationserstellung und die Implementierung des Bewegungsmodells vorgestellt. Beginnend mit den ersten Teimplementierungen der Algorithmen erfolgt parallel die statistische Auswertung und die

rudimentäre grafische Repräsentation der Simulationsergebnisse (siehe Abbildung 4.1(a)). Der Fokus der ersten Implementierungsstufe liegt auf der Überprüfung der Effizienz gewählter Algorithmen, wobei keine vollständige Trennung zwischen grafischen und modellbasierten Modulen erfolgt. Jedoch müssen mit zunehmender Komplexität der geplanten Anwendungsumgebung geeignete Strukturen geschaffen werden, sodass die Entwicklung des stochastischen Bewegungsmodells getrennt von der Entwicklung der grafischen Repräsentation verläuft (z. B. Nutzeroberfläche oder Animation [vgl. 245]). Über definierte Schnittstellen kommunizieren die einzelnen Komponenten der Anwendungsumgebung dann untereinander. Der Vorteil dieser Trennung liegt ganz klar in der Unabhängigkeit der jeweiligen Modulimplementierung (z. B. von Programmiersprachen, Rechnersystemen oder proprietären Programmstrukturen). In Abbildung 4.2 sind Ergebnisse der entkoppelten Visualisierungsentwicklung aufgezeigt. Die Personen sind als räumlich orientierte Quader dargestellt und können durch zusätzliche grafische Merkmale (z. B. Größe, Farbe oder Symbole) Informationen über ihren derzeitigen Zustand vermitteln.

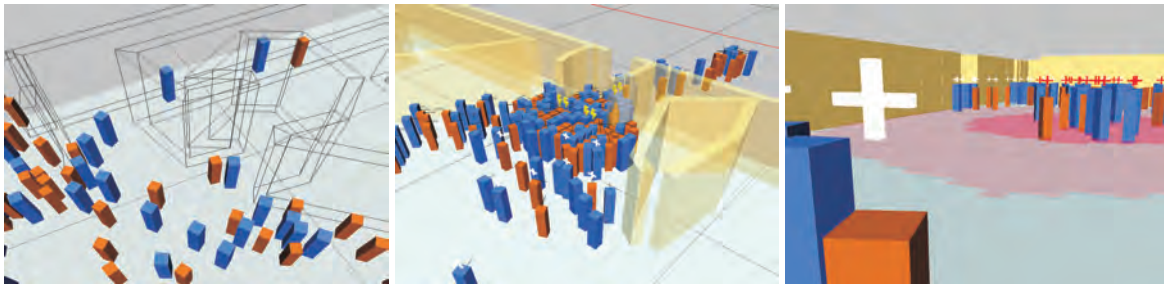


Abbildung 4.2: Darstellung einzelner Szenen während der Entflucht aus einem Flughafen-terrminal: Wände als Gitterstruktur um verdeckte Personen zu erkennen, Übersicht eines stark frequentierten Ausgangs und Betrachtung des Simulationsverlaufes aus Sicht eines ausgewählten Individuums (v.l.n.r).

Existierende Simulationssysteme besitzen zumeist nicht die notwendige Flexibilität Modellweiterentwicklungen effizient einzubinden. Da der Entwicklungsaufwand bei der Anwendungsumgebung mit zunehmender Modellkomplexität ebenfalls steigt, ist ein unterstützender und standardisierter Softwarerahmen notwendig [vgl. 244]. Als Basis für die weiteren Entwicklungen dient die Eclipse IDE (*Integrated Development Environment*). Die Eclipse Umgebung stellt eine Open-Source Entwicklung dar und hat sich auch als IDE Framework etabliert. Durch das vorhandene Plugin-Prinzip innerhalb von Eclipse können Werkzeuge beliebig kombiniert und nach Bedarf integriert werden. So kann ein übergeordnetes Produkt entstehen, welches grundsätzlich über eine standardisierte und konsistente Benutzerschnittstelle verfügt. Seit 2004 (Version 3.0) stellt Eclipse ein generelles und umfassendes *Application Framework* dar. Die *Rich Client Platform* (RCP) erlaubt die Entwicklung von Anwendungen, die im Gegensatz zu web-basierten Entwicklungen auch komplexe Benutzerschnittstellen anbieten können. Eine RCP-Applikation ist wie Eclipse selbst eine Sammlung von Plugins und einer Laufzeitumgebung (*runtime environment*).

Die Eclipse RCP stellt somit eine Infrastruktur (*middleware*) für die selbstentwickelten Komponenten dar. Um die effiziente Einbindung visueller Kapazitäten (Animation und grafische Nutzerschnittstelle) in den Software-Prototypen¹ zu ermöglichen, wird das System unter Verwendung von Java, Eclipse, Collada (*Collaborative Design Activity*, XML-basiertes, nicht-proprietäres 3D-Datenaustauschformat), OpenGL (*Open Graphics Library*, Spezifikation einer plattformunabhängigen Programmierschnittstelle zum funktionalen Zugriff auf die Grafikhardware) und der quelloffenen Java3D-Mathematik-Bibliothek `javax.vecmath` implementiert.

Der allgemeine Aufbau der Implementierung der Anwendungsumgebung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Es erfolgt dabei eine Unterteilung in *Integration*, *Animation* und *Representation*. Die Integration enthält die zwei Abschnitte Environment (virtuelle Umwelt) und Controller (Abbildung des Bewegungsmodells). Durch die Trennung von Integration und Animation fällt die Kollisionserkennung in den Bereich des räumlich zweidimensionalen Verhaltensmodells. Da der Fokus auf einem effizienten Simulationsrahmen liegt, soll auf mögliche Probleme dieser Vereinfachung bei der dreidimensionalen Animation im Weiteren nicht eingegangen werden. Der spezifische Controller bestimmt selbst, welche Aspekte der Umgebung wahrgenommen werden, und wie diese Aspekte das Verhalten der durch den Controller gesteuerten Personen beeinflussen.

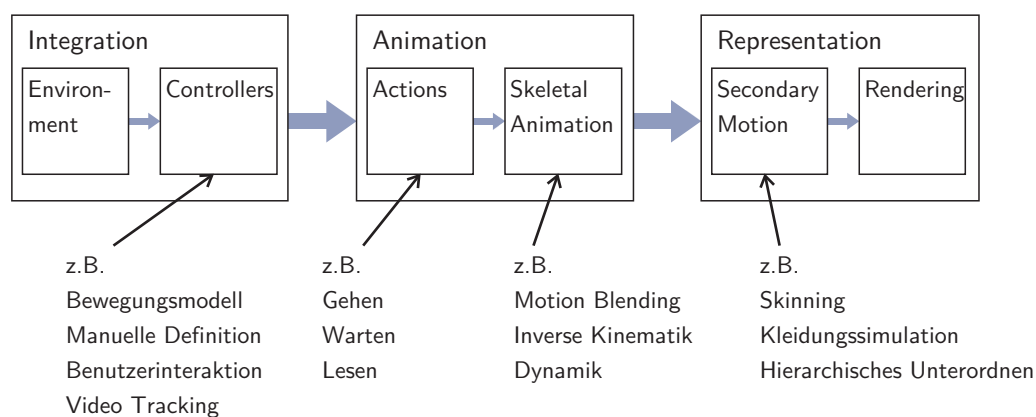


Abbildung 4.3: Gekapselte Verarbeitungsschritte innerhalb der Implementierung, wobei zwischen Integration, Animation und Repräsentation unterschieden wird [244].

Im Controller wird das entwickelte stochastische Bewegungsmodell implementiert. Auch die Umsetzung spezifischer Konzepte wie beispielsweise die Modellierung der Abfertigungsprozesse im Terminal oder die Verwendung externen Datenquellen (z. B. Wiedergabe der Personenbewegung anhand von aufgezeichnete Trajektorien) kann effizient innerhalb der

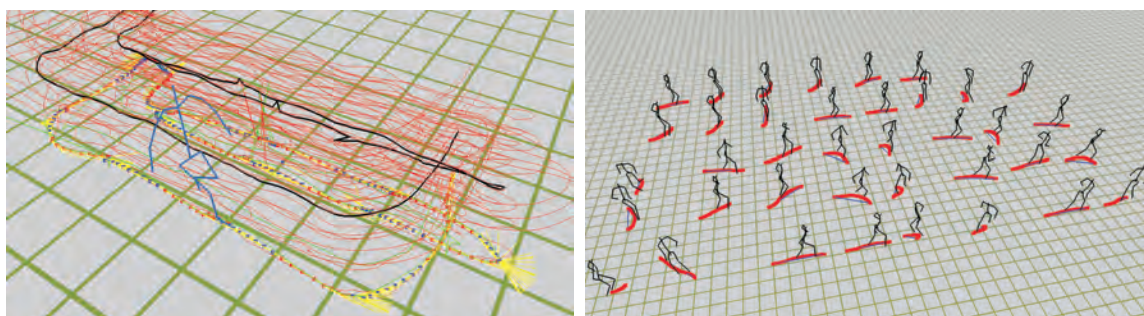
¹ Bei einer Anwendungsentwicklung soll „der Fokus auf der eigenen Problemdomäne liegen und nicht auf generischen Komponenten, die immer wieder in Applikationen benötigt werden und deren Neuentwicklung höchstwahrscheinlich auch nicht das Niveau und die Vielseitigkeit der Komponenten wie denen von Eclipse erreichen“. [244]

Controller-Implementierung berücksichtigt werden. Bei näherer Betrachtung ist in Abbildung 4.3 zu erkennen, dass durch die Controller das Verhalten der Personen für die nachfolgende Animation bestimmt wird. Ein Feedback der Animation zurück zur Integration ist in der Anwendungsumgebung nicht vorgesehen. Es muss für die Animation vom Controller zusätzlich eine Verhaltensbeschreibung erzeugt werden. Wartet beispielsweise eine Person auf eine andere Person, ändert sich aus Sicht des Bewegungsmodells die Ortskoordinate nicht, aber die Animation wird informiert, dass die Handlung *Warten* ausgeführt wird. Je nach gewählter Implementierung führen dann separate, von Integration unabhängige Prozesse eine Animation durch, die dem *Warten* entspricht.

Die von [244] entwickelte *visual computing tools platform* (VCTP) geht mit dem darauf aufbauenden *Animations-Werkzeug für virtuelle Menschengruppen* noch einen entscheidenden Schritt weiter. Nicht nur die Unabhängigkeit in der beschriebenen Richtung (von Integration zu Animation), sondern auch die Unabhängigkeit der Animation von der Integration ist sichergestellt. Im Kontext von wissenschaftlichen Modellen zur Abbildung menschlichen Bewegungsverhaltens wäre es nicht zielführend, wenn mit Verwendung eines anderen Bewegungsmodells das Ergebnis der Animation ebenfalls variiert. Nach dem die Stufen der Integration und der Animation beendet sind, erfolgt abschließend die Repräsentation, wobei je nach Zustand des zugrunde liegenden Skelettes die korrekte Visualisierung durchgeführt wird.

Bei der Animation wird die virtuelle Person durch eine festgelegte Anzahl von Knochen (Skelett) beschrieben, die in einer Baumstruktur zueinander angeordnet sind. Je nach Orientierung und Verknüpfung einzelner Knochen wird die Bewegung der Baumwurzel durch Translation und Rotation individuell abgebildet. Die Verknüpfung der Knochen untereinander ist durch die biomechanischen Eigenschaften des menschlichen Körpers bestimmt. Da unnatürliche Bewegungsmuster von der menschlichen Wahrnehmung sehr schnell erkannt werden, müsste für eine realistische Animation eine große Anzahl der biomechanischen Zusammenhänge algorithmisch nachgebildet werden. Ein wesentlich effizienterer Ansatz besteht in der Verwendung von sogenannten *motion capture* Daten. Um diese Daten zu erheben, werden Versuchspersonen mit Sensoren ausgestattet und ihre Bewegungen in einer speziellen Umgebung aufgezeichnet. Aus der Lage der Sensoren zueinander, können in einem zweiten Schritt die Positionen der jeweiligen Knochen abgeleitet werden (Abbildung 4.4(a)). Ein eleganter Weg zur Abbildung von individuellen Bewegungen besteht darin, die aufgezeichnete Bewegung in einzelne Zyklen zu zerteilen (Abbildung 4.4(b)) und zu neuen Bewegungssequenzen zusammenzufügen [246, 247]. Bei der Verwendung von *motion capture* Daten erscheinen die einzelnen Bewegungen der virtuellen Personen vollkommen natürlich. Allerdings muss eine ausreichende Menge von aufgezeichneten Daten vorliegen, um alle gewünschten Bewegungen durchführen zu können.

Aus den vom Controller übermittelten (diskreten) Positionsdaten, wird zur Laufzeit der Simulation ein kontinuierlicher Bewegungsablauf abgeleitet. Für die Auswahl rele-



- (a) Ausschnitt von aufgezeichneten *motion capture* Daten. Darstellung des abstrahierten Skelettes (blau) durch die hervorgehobene Bewegung der Hüfte (schwarze Linie) und der beteiligten Sensoren (rote Linien).
- (b) Aufteilung des Ausschnittes in separate Gehzyklen, die während der Animation zu einem neuen Pfad zusammengefügt werden.

Abbildung 4.4: Verwendung von *motion capture* Daten als Basis für die Erstellung einzelner Gehzyklen [244].

vanter Zyklen und die Modellierung eines adäquaten Übergangs zwischen den einzelnen Gehzyklen (*motion blending*) kommen sogenannte *motion graphs* zum Einsatz [248]. Ein Gehzyklus stellt die kleinste Animationseinheit dar und ist durch die folgenden Parameter charakterisiert: Richtung (-swechsel), Zeitdauer, Pfadlänge und Geschwindigkeit [249]. In Abhängigkeit von dem vorangegangenen Animationszyklus und der neuen Position, werden die idealen Parameter für den neuen Zyklus bestimmt. Im Vergleich zwischen den idealen Parametern und den vorhandenen Animationszyklen wird ein geeigneter Kandidat ausgewählt, global transformiert und zeitlich skaliert. Aber nicht nur aktuelle Daten sind Eingangsgrößen bei der Bestimmung des neuen Zyklus, sondern auch Prädiktionen der zukünftigen Position gehen in die Berechnung ein. In Abbildung 4.5 ist die animierte Trajektorie einer virtuellen Person dargestellt. Um den Wechsel zwischen den einzelnen Animationszyklen hervorzuheben, sind diese alternierend mit roten und blauen Linien gekennzeichnet. Die tatsächliche, von der Integration vorgegebene Trajektorie ist grün/gelb markiert und die Positionsprädiktionen sind schwarz gekennzeichnet. Die Animation stellt somit eine grafisch optimierte Aufbereitung der berechneten Simulationsergebnisse dar.

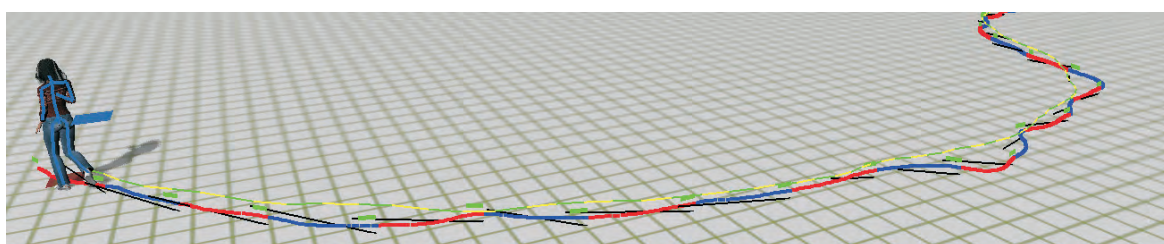
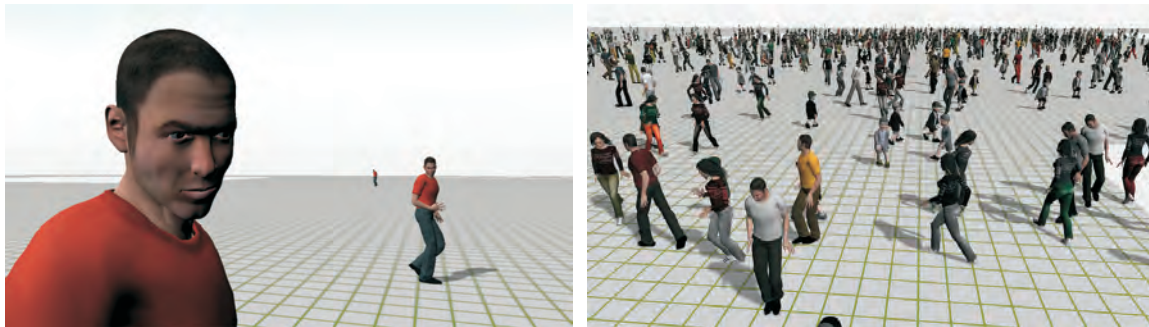


Abbildung 4.5: Darstellung einer animierten Trajektorie (rot-blau) im Vergleich zu den berechneten Positionsvorgaben (grün gestrichelt) [249].

Mit steigender Anzahl der virtuellen Personen steigt der Berechnungsaufwand ebenfalls. Um die Komplexität der Repräsentation gering zu halten (Rendering, siehe Abbildung 4.3), wird mit zunehmender Entfernung der Person von der Betrachtungsebene ein *level of detail* Verfahren (LOD) angewandt [250, 251]. Ein dargestelltes Objekt wird dabei schrittweise soweit geometrisch vereinfacht (diskret, kontinuierlich, blickwinkelabhängig oder hierarchisch), dass der Detaillierungsgrad der aktuellen Betrachtungsposition angepasst ist und Veränderungen im Detail kaum wahrzunehmen sind. Durch die begrenzte Kapazität der menschlich-visuellen Wahrnehmung fallen die entfernten Details immer weniger ins Gewicht, sodass diese ab einer bestimmten Entfernung überhaupt nicht mehr wahrgenommen werden. Durch das LOD Verfahren stehen je nach Entfernung der Person vereinfachte Versionen des animierten Modells zur Verfügung.



(a) Mit zunehmender Entfernung wird die Anzahl der dargestellten Details kontinuierlich reduziert (*level of detail* Verfahren).

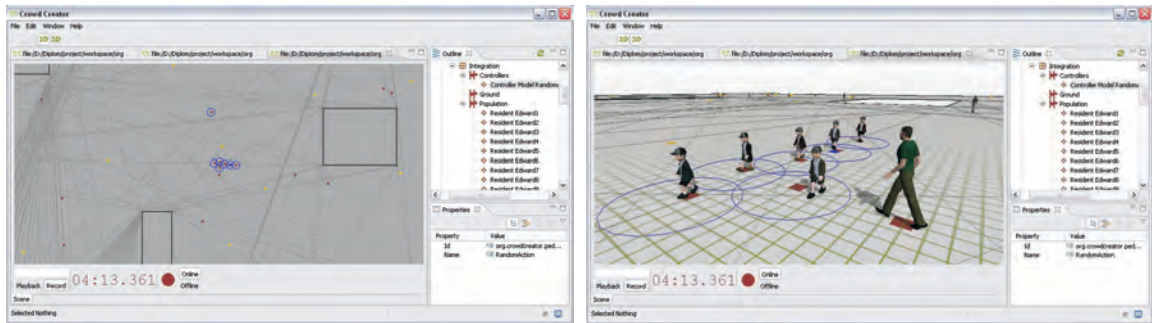
(b) Farbliche Differenzierung bei der Darstellung einer großen Anzahl virtueller Personen.

Abbildung 4.6: Darstellung des *level of detail* Verfahrens und der farblichen Personendifferenzierung [244].

Der entwickelte Prototyp bietet neben den beschriebenen Animationsmöglichkeiten auch eine grafische Benutzerschnittstelle (*graphical user interface*, GUI) und eine Programmierschnittstelle (*application programming interface*, API). Die GUI erfüllt dabei primär Aufgaben der Simulationskontrolle und der Parameterdefinition, während die API die Verbindung zu den Bewegungsmodellen herstellt und erlaubt, neue Handlungen (z. B. *Gehen*, *Warten* oder *Sitzen*) zu erstellen oder alternative Algorithmen zu implementieren. Prinzipiell stehen innerhalb des Prototypen zwei voneinander unabhängige Bereiche zur Verfügung: das Verhaltensmodell und die Darstellung (Animation). Diese Teilung ist nicht nur aus Sicht von heterogenen Entwicklungsvoraussetzungen zweckmäßig, sondern reflektiert auch die unterschiedlichen Leistungsanforderungen (differenzierter Zeit- und Berechnungsbedarf) der beiden Bereiche.

Die GUI bietet eine adäquate Umgebung zur Steuerung der Simulation und zur Darstellung des aktuellen Simulationszustandes. Als Ansichten stehen eine 2D-Ansicht und eine

3D-Ansicht zur Verfügung (Abbildung 4.7). In der 2D-Ansicht (Abbildung 4.7(a)) wird das Simulationsgebiet als Übersicht dargestellt (Draufsicht) und die Animation gezielt ausgeblendet, während die 3D-Ansicht (Abbildung 4.7(b)) eine natürliche Perspektive des Simulationsgeschehens erlaubt.



(a) 2D-Ansicht: Übersicht über das Simulationsgebiet.

(b) Animierte 3D-Ansicht: natürliche Perspektive des Simulationsgeschehens.

Abbildung 4.7: Unterschiedliche Ansichten des Simulationsgebietes innerhalb der entwickelten GUI [244]: Hindernisse sind durch dunkle Linien begrenzt, graue Linien bilden das virtuelle Navigationsnetz ab, die Position der Personen sind durch dunkle Quadrate die individuellen Ziele sind durch helle Quadrate gekennzeichnet, die Personen einer Gruppe sind durch einen Kreis markiert.

Im unteren Bereich der GUI sind die zeitlichen Steuerungsmöglichkeiten der Simulation angeordnet. Die im rechten Bereich befindlichen *Outline* und *Property* Anzeigen ermöglichen den Zugriff auf Objekte innerhalb des Bewegungsmodells und der Animation. Durch Änderungen vorhandener Modellparameter seitens des Anwenders kann das Verhalten der Personen gezielt beeinflusst werden (z. B. Zielvorgabe, Gruppenzugehörigkeit oder mathematisches Bewegungsmodell).

4.1.2. Modellimplementierung

Für die Integration des Bewegungsmodells ist in VCTP die Controller-Schnittstelle vorgesehen (siehe Abbildung 4.3). Je nach Anwendungsgebiet kann der Controller angemessen spezifiziert werden. Bei der Spezifikation eines Controllers für die im nächsten Abschnitt folgende Modellierung eines Flughafenterminals werden sowohl modell- und prozesseitige als auch hardwareseitige Randbedingungen berücksichtigt. Der spezifische Controller für die Anwendung im Terminal erhält die Notation (*TerminalController*). Während die Modellrandbedingungen aus Kapitel 2.2 (S. 46ff) abgeleitet werden können, ergeben sich die prozesseitigen Randbedingungen aus den im Terminal stattfindenden Prozessabläufen (Kapitel 1.4, S. 29ff). Die hardwareseitigen Randbedingungen sind primär durch die Anzahl der verfügbaren Prozessoren und die Größe des nutzbaren Arbeitsspeichers

beschrieben. Die modellseitigen Randbedingungen erfordern die Abbildung geometrischer Objekte und die Ableitung von geeigneten Richtungsinformationen zur gezielten Fortbewegung (Kapitel 2.3, S. 63ff). Für die Erstellung der räumlichen Geometrie werden vorhandene Grundrisse und Gebäudepläne in das *scalable vector graphics* (SVG) Format übertragen. Das SVG Format stellt einen Standard für die Beschreibung zweidimensionaler Vektorgrafiken dar [252], wobei die Daten in einer *extensible markup language* (XML) Struktur repräsentiert werden [253]. Dadurch können im SVG Format nicht nur grafische Primitive (z. B. Linien, Kreise oder Polygone) gespeichert sondern diese auch mit einem Bezeichner (ID) versehen und hierarchisch geordnet werden. In Abbildung 4.8 sind die in VCTP importierten geometrischen Begrenzungsdaten (Linien) des Flughafenterminals Dresden (Abflugebene) dargestellt. Eine Begrenzung ist in diesem Zusammenhang ein Objekt, das von einem Agenten umgangen werden muss (z. B. Wände, Werbeaufsteller oder Hinweisschilder).

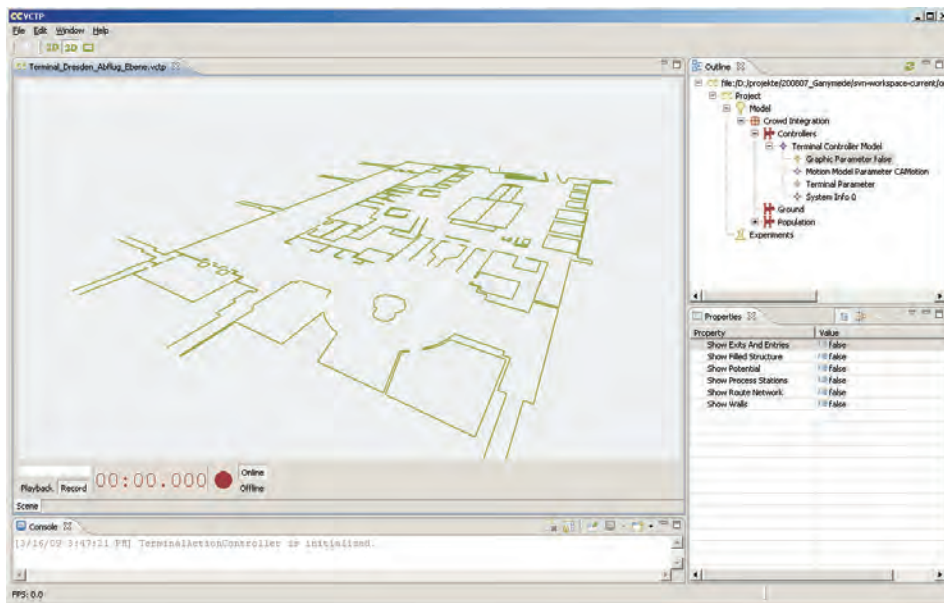
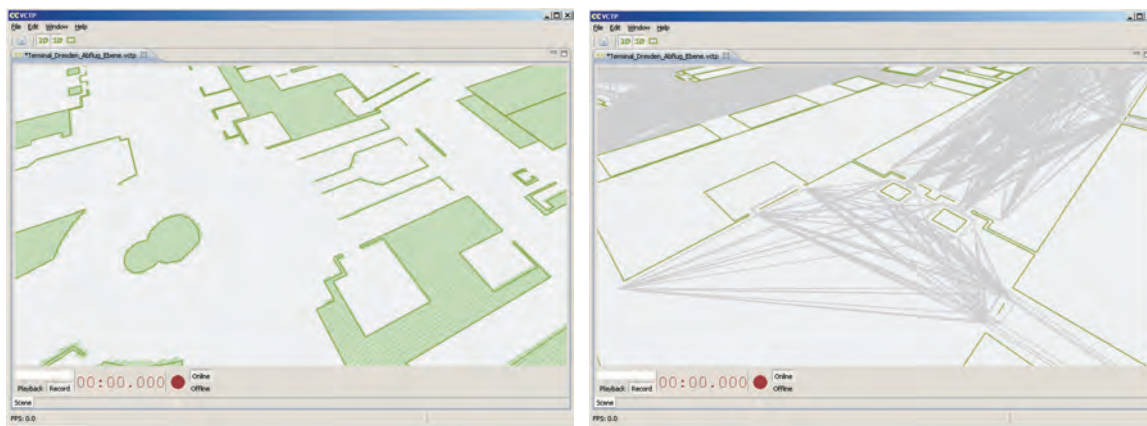


Abbildung 4.8: Grundrissdarstellung der Abflugebene des Flughafens Dresden in der VCTP Umgebung. Für die Einstellung der Modellparameter können diese im rechten Bereich ausgewählt und modifiziert werden.

Für die Initialisierung des entwickelten stochastischen Bewegungsmodells wird die importierte Geometrie durch ein reguläres Gitter mit einer Ortsschrittweite von 0,4 m gerastert. Im Anschluss werden alle Bereiche als nicht betretbar markiert, die die Agenten aufgrund der räumlichen Begrenzungen nicht betreten können (Verwendung eines *flood fill* Algorithmus). Die Rasterung erfolgt unter Einsatz des Bresenham-Algorithmus [254], der zusätzlich erweitert wurde, um alle Zellen in die Rasterung einzubeziehen, die durch die geometrischen Begrenzungslinien überstrichen werden (geschlossene Rasterung). Das Ergebnis der Diskretisierung ist in Abbildung 4.9(a) dargestellt. Alle Zellen in den farblich

hervorgehobenen Bereichen sind *besetzt* und erhalten eine Übergangswahrscheinlichkeit $M = 0$ (siehe Kapitel 1.3.4 (S. 23) und Kapitel 2.2 (S. 46)). Die diskretisierte Geometrie ist eine effiziente Datenstruktur für die Kollisionsüberprüfung mit statisch geometrischen Objekten und kann auch unabhängig vom spezifischen Bewegungsmodell eingesetzt werden.



(a) Diskretisierte Umgebungsgeometrie auf Basis von Bresenham-Algorithmus und *flood fill* Algorithmus.

(b) Aus der Geometrie abgeleitetes Routennetzwerk zur Navigation innerhalb der Umgebung.

Abbildung 4.9: Aufbereitung der geometrischen Eingangsdaten für die Kollisionsprüfung mit der Umgebungsgeometrie und zur Routenerstellung.

Aus den vektoriell vorhandenen Begrenzungsdaten wird ein Routennetzwerk abgeleitet, das der Agent zur Navigation innerhalb der Geometrie nutzen kann (Abbildung 4.9(b)). Mit der Diskretisierung und dem Routennetzwerk sind die primären Eingangsdaten für eine Modellimplementierung vorhanden. Innerhalb der Implementierung wird für die Geometrie ein `WallDataManager` und für das Routennetzwerk ein `RoutePlanner` etabliert. Für die Verwaltung der Personen steht ein `PersonManager` zur Verfügung. Die Struktur innerhalb der Controller Implementierung ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

Der `TerminalController` kann durch ein Konfigurationsobjekt (`TerminalConfiguration`) eingerichtet werden. Für die Darstellung der Prozesse innerhalb des Flughafenterminals ist die `TerminalSimulation` vorhanden. In jedem Simulationsschritt werden durch die `TerminalSimulation` alle im `PersonManager` verwalteten Agenten gesteuert (Setzen der Zielinformationen) und zur Aktualisierung ihrer Position in die Struktur `MotionQueue` mit `pushAgent()` übergeben. Anschließend werden die Agenten aus dieser Struktur mit `pollAgent()` entnommen und durch einen `MotionThread` bearbeitet. Der `MotionThread` greift für die Positionsaktualisierung auf den `WallDataManager` zur Kollisionsprüfung und den `RoutePlanner` für die Zielrichtung zurück.

Da das entwickelte Bewegungsmodell auf einem stochastischen Ansatz basiert, ist für die Ableitung von validen Simulationsergebnissen eine hohe Anzahl an Durchläufen notwendig.

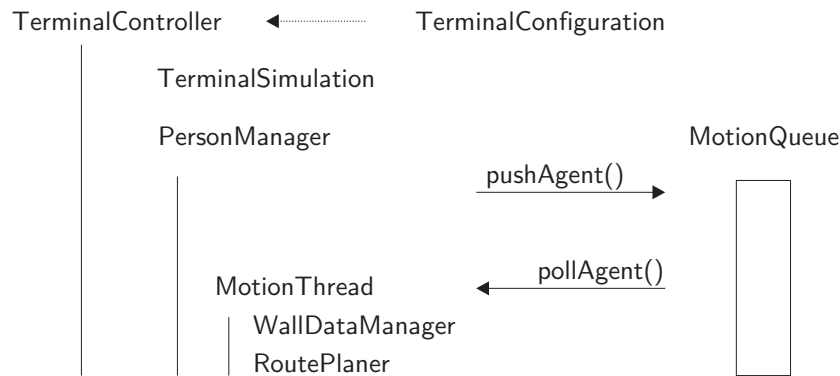


Abbildung 4.10: Struktur und Ablauffolge innerhalb des `TerminalController`.

Durch die gewählte Struktur von `MotionQueue` und `MotionThread` ist eine Überführung des Ablaufes in eine parallele Bearbeitungsumgebung unter Verwendung von Mehrkernprozessorsystemen ohne größeren Aufwand zu realisieren. Dabei wird für jeden Prozessor eine separate Berechnungseinheit (`MotionThread`) zur Verfügung gestellt, die auf autonome Instanzen von `WallDataManager` und `RoutePlanner` zurückgreifen kann. Während des Simulationsablaufes muss sichergestellt werden, dass parallel verwendete Objekte eine Zugriffsteuerung implementieren (synchronisierter Ablauf). Die Zugriffsteuerung ist ein zeitintensiver Prozess und führt bei der Verwendung von mehreren Prozessoren nicht zwangsläufig zu einer Beschleunigung der Ausführungsgeschwindigkeit (Skalierungseffekte). Für die parallele Bearbeitung wird die Simulationsumgebung in einzelne Berechnungsabschnitte aufgeteilt, die voneinander unabhängig berechnet werden können. Die an eine Berechnungszelle angrenzenden Zellen werden zu einem Cluster zusammengefasst (3×3 Berechnungszellen, [Abbildung 4.11](#)). Alle Positionsaktualisierungen der Agenten aus einer spezifischen Berechnungszelle des jeweiligen Clusters werden parallel durchgeführt (alle schwarz gekennzeichneten Zellen in [Abbildung 4.11\(a\)](#)). Erst wenn die Positionen aller Agenten der aktuellen Berechnungszelle bestimmt wurden, wird die nächste Berechnungszelle gewählt. In jedem Durchlauf werden die Reihenfolge der Berechnungszellen und die Sequenz der Agenten innerhalb einer Berechnungszelle variiert.

Unter Berücksichtigung der empirisch belegten Wechselwirkungsreichweite der Agenten (siehe [Abbildung 1.9](#), S. 23) wird die Größe einer Berechnungszelle innerhalb des `TerminalController` auf 5×5 m festgelegt. Um für die entwickelte Implementierung zu prüfen, in welchem Verhältnis die Geschwindigkeit der Simulationsläufe mit zunehmender Rechenleistung steigt, werden 2250 Agenten unter Verwendung eines Mehr-Kern-Rechnersystems² simuliert. Wie in [Abbildung 4.12](#) dargestellt ist, skaliert der Leistungszuwachs nicht vollständig mit der Anzahl der Prozessoren. Ein Teil der Leistung wird für zusätzliche Koordinationsprozesse bei der Datenzusammenführung benötigt und ein

² Als Prozessor wird ein Intel Q9550 mit 2,83 GHz verwendet.

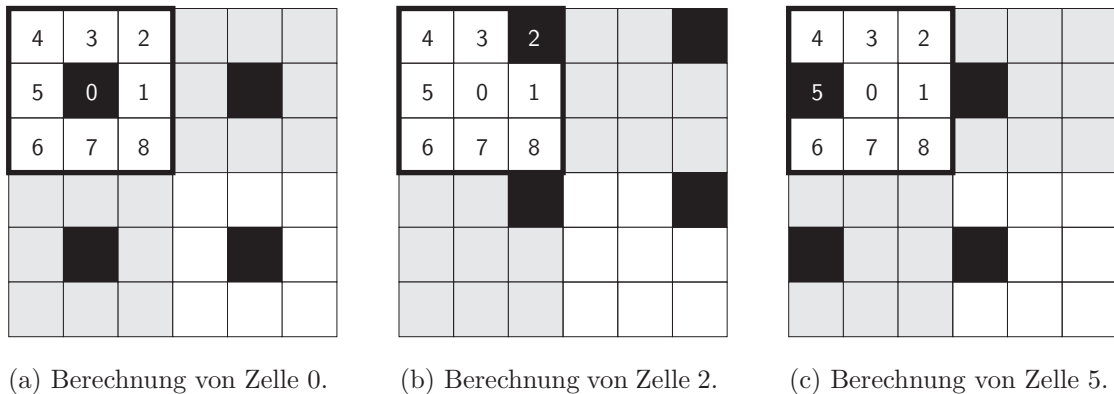


Abbildung 4.11: Aufteilung der Simulationsumgebung in unabhängige Berechnungsgebiete, wobei diese in jeweils neun Unterabschnitte (0-8) aufgeteilt sind. In jedem Berechnungsschritt werden durch parallel laufende Prozesse die aktuellen Unterabschnitte der Berechnungsgebiete aktualisiert. Eine gleichzeitige Berechnung (Veränderung) der direkt benachbarten Zellen wird somit ausgeschlossen.

anderer Teil kann aufgrund der notwendigen synchronisierten Abläufe nicht vollständig parallelisiert werden. Das entwickelte stochastische Bewegungsmodell profitiert zwar von einem zusätzlichen Prozessor (Wechselwirkungsreichweite von 5 m), jedoch kann die Leistung bei der Verwendung von 3 bzw. 4 Prozessoren nicht wesentlich gesteigert werden. Erst die Vergrößerung der zu berechnenden Zellen auf eine Größe von 20×20 m verbessert die Skalierung.

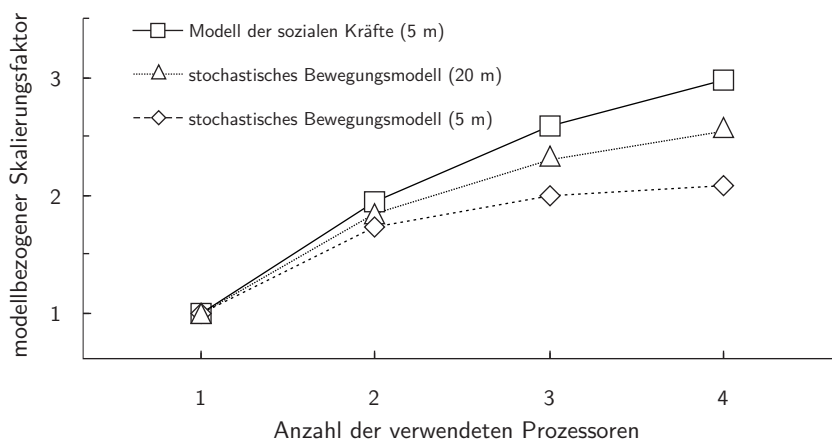


Abbildung 4.12: Skalierung der Berechnungszeit bezogen auf die Anzahl verwendeter Prozessoren.

Der Grund für die verbesserte Skalierung liegt in der hohen Ausführungsgeschwindigkeit des Bewegungsmodells. Beim entwickelten stochastischen Bewegungsmodell erfolgt die Berechnung auf einem Prozessor mit 70facher Geschwindigkeit gegenüber der realen Zeit (600 s reale Zeit werden in 8,5 s berechnet). Die Engstelle besteht somit hauptsächlich

aus unvermeidbaren Wartezeiten in den synchronisierten Abläufen, bei denen die Berechnungsergebnisse zusammengeführt und neue Aufgaben verteilt werden. Bei einer Wechselwirkungsreichweite von 20 m steigt der Berechnungsaufwand jedes Prozessors, was zu einer Entlastung der synchronisierten Abläufe führt und die Skalierung verbessert. Am besten skaliert das Modell der sozialen Kräfte mit zunehmender Anzahl an Prozessoren. Während mit einem Prozessor die Modellimplementierung 600 s reale Zeit in 405 s berechnet, führt die Verwendung von vier Prozessoren zu einer Verdreifachung der Rechenleistung. Es bleibt anzumerken, dass es sich bei den Untersuchungen zur Parallelisierbarkeit um reine synthetische Tests handelt, die nur das Potential von Implementierungsverbesserungen aufzeigen sollen. Es ist zu erwarten, dass durch die Einführung komplexer Routenwahlmodelle oder die Implementierung umfangreiche Auswertungs- und Analyseschnittstellen die vorgestellten Testergebnisse nachhaltig beeinflusst werden.

Aber auch modellseitig könnten zielgerichtete Anpassungen zur Verbesserung der Ausführungsgeschwindigkeit führen. In Fällen geringer Personendichte und der daraus resultierenden geringen Anzahl an Interaktionen könnte eine lokale Vereinfachung des Bewegungsmodells nach sich ziehen, sodass beispielsweise nur noch die Kollisionsfreiheit mit statischen Objekten sichergestellt wird. Auch die Verwendung von größeren Zeitschritten könnte das Modell in diesen Bereichen adäquat vereinfachen. Das Simulationssystem würde somit adaptiv Bereiche mit hohem Wechselwirkungspotential mit hoher Genauigkeit berechnen und Bereiche mit geringem Wechselwirkungspotential mit angemessener Genauigkeit. In Anlehnung an das in der Computergrafik angewandte LOD-Verfahren, könnte hier von einem *level of model detail* (LOMD) Verfahren gesprochen werden.

Mit Abschluss der Entwicklung der Anwendungsumgebung und Implementierung des stochastischen Bewegungsmodells sind die notwendigen Grundlagen für die Simulation der Passagierbewegungen im Terminal geschaffen. Bevor auf diese komplexe Problemstellung näher eingegangen wird, erfolgt die Simulation des Boarding eines Verkehrsflugzeuges, um die Notwendigkeit stochastisch mikroskopischer Modellierungsansätze zu verdeutlichen.

4.2. Eindimensionaler Simulationsansatz - Boarding eines Verkehrsflugzeuges

Für eine erste Modellanwendung werden Untersuchung zum Besteigen (*boarding*) eines Verkehrsflugzeuges durchgeführt. Das Boarding ist Bestandteil des Passagierabfertigungsprozesses. Die Abfertigungsprozesse eines Verkehrsflugzeuges unterliegen einem spezifischen Ablauf, wobei je nach Abhängigkeiten der Prozesse untereinander die Prozesse dabei sowohl parallel als auch sequentiell ablaufen können. Aber nicht nur verfahrenstechnische Randbedingungen bestimmen den Prozessablauf. Auch gesetzliche Anforderungen (z. B. an das Tanken während des Boardings) haben einen signifikanten Einfluss auf die

Abläufe der Abfertigungsprozesse. In Abbildung 4.13 sind die einzelnen Prozesse und ihr zeitlicher Verlauf dargestellt. Die Durchführung notwendiger Abfertigungsprozesse für die Wiederbereitstellung des Flugzeuges für den nächsten Flug (Umlauf) in einem bestimmten Zeitfenster (Ankunft bis Abflug) werden allgemein als *turnaround* bezeichnet [255]. Die Dauer des Turnarounds bestimmt sich durch die Prozesse, die auf dem kritischen Pfad liegen. Ein Prozess liegt auf dem kritischen Pfad, wenn die Veränderung der spezifischen Prozesszeit zu einer Änderung der gesamten Prozesszeit führt.

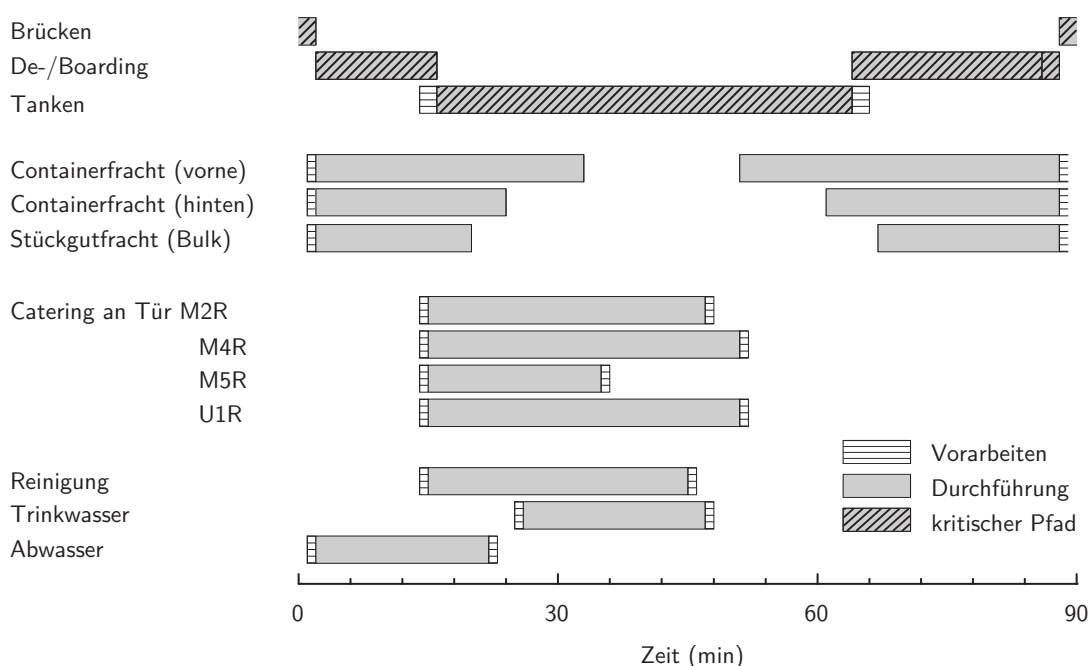


Abbildung 4.13: Bodenabfertigungsprozesse beim A380 mit einer geplanten Zeit für den Turnaround von 90 min (nach [239]).

Wie Abbildung 4.13 zu entnehmen ist, sind im gewählten Beispiel die kritischen Prozesse Deboarding/Boarding, Tanken und das Heran-/Wegfahren der Fahrgastbrücken. Alle weiteren Prozesse (Frachtladung/-beladung, Catering, Reinigung, Trink- und Abwasser) verlaufen parallel und können die Gesamtprozesszeit nur beeinflussen, wenn Prozessstörungen sequentiell folgende Prozesse verzögern. Das Verbesserungspotential liegt im gewählten Beispiel somit offensichtlich in der (technologischen) Reduktion des Tankvorganges und der logistischen Optimierung des Ein- und Aussteigens der Passagiere. Für die Optimierung der Prozesse ist es wichtig nicht nur den zeitlichen Aufwand zu minimieren (im Sinne eines geringeren Erwartungswertes der Prozesszeit), sondern auch die Varianz der Abfertigungsprozesse durch die Einführung standardisierter Abläufe zu verringern [256]. Mit zunehmender Optimierung der Prozesse bleibt zu beachten, dass mögliche Störungen einen größeren Einfluss haben könnten, da die zeitlichen Puffer durch die Optimierungen zumeist auf ein Minimum reduziert sind. Da der Turnaround immer mit dem

abgeschlossenen Boarding endet, das somit immer zeitkritisch ist, liegt der Fokus der folgenden Untersuchungen auf der Optimierung der Einstiegsreihenfolge der Passagiere [126].

4.2.1. Modellbeschreibung

Zur Evaluierung von Boardingverfahren wurden bereits verschiedene Studien durchgeführt [126, 257–263]. Dabei wurde als typisches *single aisle* Referenzflugzeug (ein Gang für zwei getrennte Sitzgruppen, siehe Abbildung 4.14) der Airbus A320 gewählt. Die beiden Flugzeughersteller Airbus und Boeing erwarten eine hohe Marktrelevanz für *single aisle* Flugzeuge [264, 265] und die Optimierung der Boardingverfahren könnte einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor darstellen. Der A320 besitzt eine typische Sitzplatzkapazität von 150-180 Sitzen, von denen jeweils drei links und rechts vom Gang angeordnet sind. Als Referenz für die folgenden Analysen steht das Design eines A320-200 von Air Berlin zur Verfügung (174 Economy-Sitze in 29 Reihen).

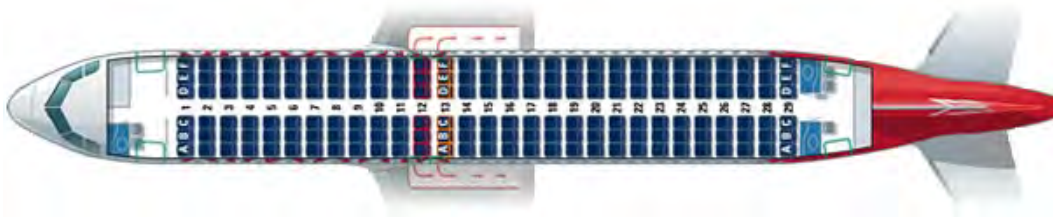


Abbildung 4.14: Layout eines Airbus A320-200 [266].

Das Flugzeug kann von den Passagieren an der vorderen und hinteren linken Tür betreten werden. Das Boarding durch die vordere linke Tür erfolgt vorrangig durch terminaleseitige Randbedingungen, weil bei den meisten Verkehrsflughäfen bei Gate-Positionen für Kurzstreckenflugzeuge nur eine Fluggastbrücke zur Verfügung steht³. Je nach Größe des Verkehrsflugzeuges und der Ausgestaltung des Gate-Bereiches können auch mehrere Brücken von Seiten des Flughafens bereitgestellt werden. Großraumflugzeuge wie der Airbus A380 können durch bis zu drei nutzbare Türen im vorderen Bereich bestiegen werden. Bei Verwendung von Türen, die sich hinter dem Flügel befinden, ist der notwendige technische Aufwand bedeutend größer. In Abbildung 4.15 ist eine *over-the-wing* Brücke dargestellt, die auch bei kleineren Verkehrsflugzeugen die Nutzung der hinteren Tür bei einer Gate-Position ermöglicht.

Die technischen Risiken durch eine potentielle Kollision der Brücke mit dem Flugzeug und der finanzielle Aufwand für Beschaffung und Betrieb einer *over-the-wing* Brücke müssen den erwarteten Gewinnen aus kürzeren, zuverlässigeren Prozesszeiten gegenüberge-

³ Im Gegensatz dazu können auf Vorfeldpositionen problemlos zwei Türen verwendet werden, da hier mobile Passagiertreppen zum Einsatz kommen.



Abbildung 4.15: *Over-the-Wing* Brücke an einer Boeing B737 am Vancouver International Airport [267].

stellt werden. Um die Möglichkeiten einer Prozessoptimierung zu bewerten, muss ein geeignetes Modell vorhanden und implementiert werden. Anschließend sind unterschiedliche Boardingverfahren gezielt auf die Auswirkungen bei der Nutzung von einer Tür und von zwei Türen zu analysieren.

Das gewählte A320 Layout ermöglicht die Modellierung des Boardingprozesses unter Verwendung des ASEP Ansatzes (siehe Kapitel 2.1.2, S. 41). Dafür wird das Layout in ein reguläres Gitter übertragen, mit einer Zelldimension von 0,4 m x 0,4 m (Abbildung 4.16). Jede Zelle besitzt zwei Zustände: sie ist leer oder ein Passagier befindet sich innerhalb der Zelle.

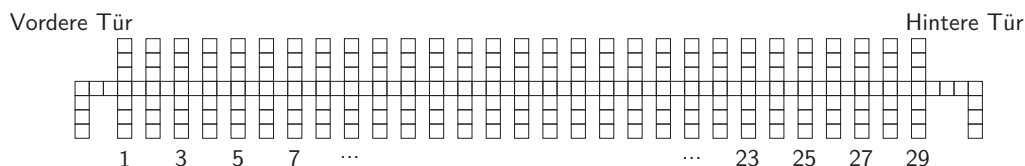


Abbildung 4.16: Reguläres Gitter basierend auf dem A320-200 Layout.

Der Passagier kann sich innerhalb des Gitters fortbewegen, indem er in jedem Zeitschritt eine angrenzende freie Zelle betreten kann. Wenn die Zelle durch einen anderen Passagier besetzt ist, muss er warten. Da keine Untersuchungen über die Häufigkeit und

den Ablauf von Überholvorgängen vorliegen, wird ein Überholen innerhalb des Gangs für die folgenden Untersuchungen ausgeschlossen. Als zeitliche Diskretisierung wird eine Zeitschrittweite von $\Delta t = 0,5$ s angenommen. In Kombination mit der gewählten Zeldimension resultiert eine maximal erreichbare Geschwindigkeit von $v_{max} = 0,8$ m/s [262]. Während des Simulationslaufes werden die Positionen der Passagiere sequentiell gemischt aktualisiert (*random shuffled update*, Kapitel 2.1.2 (S. 41ff)).

Die Passagiere betreten das Flugzeug an der jeweiligen Tür und bewegen sich den Gang entlang (über das Gitter), bis sie die ihrem Sitzplatz zugewiesene Reihe erreichen. Die Ankunftsrate der Passagiere an der Flugzeugeingangstür ist als ein konstanter Faktor definiert (identische Zwischenankunftszeiten). Die Implementierung sieht vor, dass der Passagier mit Ankunft am Flugzeug zuerst die Eingangswarteschlange betritt. Wenn diese Warteschlange leer ist, kann er direkt das Flugzeug betreten, ansonsten muss er so lange warten, bis alle vorher angekommenen Passagiere die Warteschlange verlassen haben. Wenn die vordere und hintere Tür genutzt werden, betreten Passagiere der Reihen 1-15 die vordere und Passagiere der Reihen 16-29 die hintere Tür⁴. Zusätzlich zum allgemeinen ASEP Modell wird in der vorgestellten Implementierung das eindimensionale Voranschreiten innerhalb des Gangs gestoppt, wenn der Passagier seine Sitzreihe erreicht. Solange er seinen Sitz nicht einnimmt, blockiert er den Gang und nachfolgende Passagiere müssen hinter ihm warten. Die Zeit t , die der Passagier zum Setzen benötigt, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen von der Zeit, die er zum Gepäckverstauen benötigt (t_G , abhängig von der Anzahl der Gepäckstücke⁵ (n_G)) und zum anderen von der Zeit, die er bis zum Sitz benötigt (t_I , Interaktion durch besetzte Sitze), sowie von der Reaktionszeit (t_R) der beteiligten Personen. Für alle zeitlichen Abhängigkeiten werden statistische Wahrscheinlichkeiten durch eine Simpson-Verteilung abgebildet (siehe S. 126 [vgl. 259, 261, 262]). Die jeweiligen Verteilungsparameter sind in Tabelle 4.1 spezifiziert, dabei bezieht sich t_G auf ein Gepäckstück und t_I auf eine notwendige Interaktion. Die Bestimmung der Reaktionszeit erfolgt einmalig, wenn mindestens eine Interaktion mit

| Prozess | t_{\min} | t_{modus} | t_{\max} | μ (s) | σ (s) |
|---------|------------|--------------------|------------|-----------|--------------|
| t_G | 5,0 | 10,0 | 20,0 | 11,67 | 3,12 |
| t_I | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 2,40 | 0,24 |
| t_R | 6,0 | 9,0 | 20,0 | 11,67 | 3,01 |

Tabelle 4.1.: Parameter der Simpson-Verteilung für den Zeitbedarf notwendiger Prozesse bei Erreichen des Sitzplatzes: Gepäckverstauen t_G (ein Gepäckstück), Interaktionszeit t_I (eine Interaktion) und Reaktionszeit t_R (notwendig bei Interaktionen).

⁴ Diese Randbedingung ergibt sich aus der Forderung, dass keine Überholvorgänge modelliert werden.

⁵ Gepäckstück sind in diesem Zusammenhang sowohl das eigentliche Handgepäck, als auch Bekleidung oder separate kleinere Taschen/Rucksäcke.

anderen Passagieren bei der Einnahme des Sitzplatzes notwendig ist. Für die Bestimmung der individuellen Zeit für das Verstauen des Gepäcks wird jeder Passagier im Vorfeld zufällig mit einer bestimmten Anzahl von Gepäckstücken ausgestattet. Die Verteilung erfolgt dabei dem in Tabelle 4.2 dargelegten Schlüssel.

| | Anzahl der Gepäckstücke | | | |
|--------------------|-------------------------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Wahrscheinlichkeit | 0 % | 60 % | 30 % | 10 % |

Tabelle 4.2.: Häufigkeitsverteilung für die Anzahl der Gepäckstücke, die von jedem Passagier verstaut werden müssen [vgl. 262].

Im Gegensatz zur der im Vorfeld definierten Gepäckanzahl wird die Interaktionszeit t_I dynamisch bestimmt und ergibt sich durch die Anzahl der besetzte Sitze, wenn der Passagier seine zugewiesene Sitzreihe erreicht. Das Layout des A320 weist Sitzgruppen von je drei zusammenhängenden Sitzen auf. Es sind demzufolge vier unterschiedliche Besetzungszustände einer Sitzgruppe möglich:

- **Zustand A:** kein Sitz ist besetzt,
- **Zustand B:** der Gangsitz ist besetzt,
- **Zustand C:** der Mittelsitz ist besetzt, der Passagier will den Fensterplatz erreichen,
- **Zustand D:** Gang-/Mittelsitz sind besetzt und der Passagier will den Fensterplatz erreichen.

Die Zustände sind entsprechend ihrer Komplexität im Sinne der unumgänglichen Interaktionen (Zeitbedarf) geordnet. Am Beispiel des besetzten Mittelsitzes (Zustand C) müssen sieben Bewegungsschritte durchgeführt werden, wenn der ankommende Passagier den Fensterplatz einnehmen will: Der Passagier auf dem Mittelsitz muss aufstehen und auf den Gang hinaustreten (zwei Schritte), dann kann der angekommene Passagier den Fensterplatz (drei Schritte) besetzen. Zuletzt wird der mittlere Sitzplatz wieder eingenommen (zwei Schritte). Während des gesamten Prozessverlaufs ist der Gang für die anderen Passagiere blockiert. Die Blockade des Gangs ist aber schon nach fünf Schritten wieder aufgehoben. Der zuvor auf dem Mittelsitz sitzende Passagier kann den Gang bereits räumen, wenn der neu angekommene Passagier den mittleren Sitz erreicht hat. Im einfachsten Fall (Zustand A) kann der Passagier seinen Sitzplatz ohne Interaktionen mit einem anderen Passagier einnehmen. Der Zustand B erfordert vier, Zustand C fünf und Zustand D insgesamt neun Schritte.

Bei der Optimierung der Boardingzeiten ist es offensichtlich, dass Zustände mit hohen Interaktionszeiten weitgehend vermieden werden müssen. Die Reihenfolge der Passagiere beim Betreten des Flugzeuges hat einen entscheidenden Einfluss auf die Häufigkeit der

jeweiligen Besetzungszustände. Für die folgenden Analysen finden vier unterschiedliche Boardingverfahren Anwendung.

- **random**: Die Passagiere erreichen das Flugzeug ohne eine bestimmte Reihenfolge.
- **outside-in**: Die Passagiere mit einem Fensterplatz steigen zuerst ein, gefolgt von den Passagieren mit einem mittleren Sitz und Passagieren mit einem Gangplatz.
- **back-to-front**: Die Passagiere steigen mit abnehmenden Sitzreihennummerierung in das Flugzeug (von hinten nach vorne, Abbildung 4.16), wobei auch Sitzreihen zu einem Block zusammengefasst werden können.
- **block**: Es werden Sitzreihen zu Blöcken zusammengefasst und es wird die Reihenfolge der Blöcke vorgegeben. Das *back-to-front* Verfahren ist somit eine Teilmenge des *block* Verfahrens.

Gekoppelte Boardingverfahren (z. B. das *reverse-pyramid* Verfahren aus *back-to-front* und *outside-in* Verfahren [258]) oder individuenbasierte Verfahren (jede Person einzeln) sind aufgrund der zu großen Komplexität oder ihrer praktischen Bedeutungslosigkeit nicht Bestandteil der weiteren Analysen. Das *random* Verfahren dient als Maßstab, um einen Vergleich alternativer Verfahren zu ermöglichen. Da beim *outside-in* Verfahren die gegenseitige Blockade der Passagiere bei der Sitzplatzeinnahme verhindert wird, ist es eines der schnellsten Boardingverfahren [258]. Für die Verfahren *back-to-front* und *block* werden die Sitzreihen zu geeigneten Blöcken zusammengefasst (Abbildung 4.17). Beim *back-to-front* Verfahren werden die Blöcke mit zunehmender Nummerierung abgearbeitet, während beim *block* Verfahren die Reihenfolge bei der Abarbeitung der Blöcke nicht vorgegeben ist.

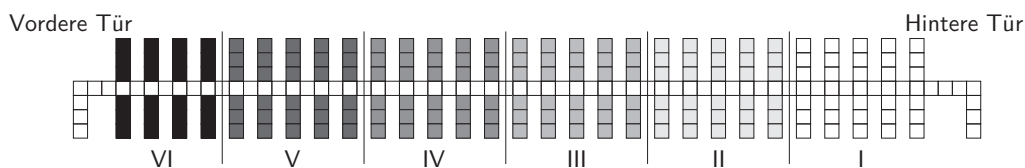


Abbildung 4.17: Einteilung der Sitzreihen in sechs Blöcke (I-VI).

Untersuchungen von [259] und [261] lassen vermuten, dass sich *block* Verfahren bei der Boardingzeit nicht signifikant von *random* Verfahren unterscheiden. Um zusätzliche Aussagen über die Bandbreite (Standardabweichung) der Boardingzeiten zu erhalten, werden die *block* Verfahren im Folgenden eingehender untersucht. Aus betrieblicher Sicht haben sie gegenüber dem *outside-in* Verfahren einen entscheidenden Vorteil: Zusammenreisende Passagiere sitzen typischer Weise nebeneinander und müssten nicht wie beim *outside-in* Verfahren getrennt einsteigen. Es ist zu erwarten, dass Passagiere aus diesem Grund den Anweisungen zum *outside-in* Verfahren nur bedingt folgen würden.

4.2.2. Simulationsergebnisse

Für die Bestimmung der relativen Vorteilhaftigkeit (Effizienz) der jeweiligen Boardingverfahren gegenüber einem Referenzverfahren werden diese hinsichtlich ihrer Sensitivität bezüglich der Parameter Sitzladefaktor (SLF, Auslastung der Sitzkapazität), Ankunftsrate (AKR) der Passagiere am Flugzeug und Akzeptanzrate (AZR) des Boardingverfahrens analysiert. Eine AZR von 1 bedeutet, dass alle Passagiere der durch das Boardingverfahren bestimmten Reihenfolge beim Einsteigen in das Flugzeug vollständig folgen. Bei $AZR = 0,9$ nehmen 10 % der Passagiere eine willkürliche (andere) Position innerhalb der vorgegebenen Boardingreihenfolge ein. Hierbei könnte es sich um verspätet ankommende Passagiere oder um eine Gruppe handeln, die sich nicht trennen will. Die Simulationsszenarien werden durch die Kombination von den folgenden vier Parametern bestimmt. Jedes Szenario ist derart gestaltet, dass ein Parameter variiert wird, während die anderen drei Parameter ihre Standardwerte besitzen. Um die statistische Signifikanz der Ergebnisse zu gewährleisten, wird für jedes Szenario eine hohe Anzahl Simulationsläufe (10^4) durchgeführt.

- AKR in den Grenzen von 1-40 $\text{Passagiere}/\text{min}$ (PPM), $AKR_{\text{Standard}} = 14 \text{ PPM}$
- SLF und AZR in den Grenzen von 20-100 %, $SLF_{\text{Standard}} = AZR_{\text{Standard}} = 85 \%$
- vier unterschiedliche Boardingverfahren, Standardverfahren: *random*
- Nutzung von einer oder zwei Türen

Die Ankunftsraten der Passagiere am Flugzeug variiert zwischen 12 und 25 Passagieren je Minute ([239, 240]). Sie sind im entscheidenden Maße von der Anzahl und den Abfertigungszeiten der vorgelagerten Bordkartenkontrolle abhängig. In Übereinstimmung mit [241] und [262] wird AKR_{Standard} auf 14 PPM festgelegt. Bei der Nutzung von zwei Türen halbiert sich die spezifische Ankunftszeit pro Tür. Der Sitzladefaktor ist aus Sicht des Boardingverfahrens von entscheidender Bedeutung. Der SLF hängt vom Reiseziel ab und variiert weiterhin zwischen Lang- und Kurz-/Mittelstrecken-Flügen. Die Deutsche Lufthansa AG [268] weist einen durchschnittlichen SLF von 77,4 % aus. Gemäß den jährlichen Geschäftsberichten für das Jahr 2007 hatte Air France/KLM einen durchschnittlichen SLF von 82,7 %, British Airways von 76,1 % und Emirates von 79,8 %, was die konservative Annahme eines Standard SLF von 85 % bestätigt.

Wartezeiten während des Boardingverfahrens entstehen zum größten Teil durch suboptimale Sitzbesetzungen (Zustände B, C, D). Beim *random* Verfahren tritt Zustand A (keine Sitzinteraktionen) nur in $\approx 66 \%$ aller Fälle auf (Tabelle 4.3). Im Gegensatz dazu erhöht sich beim *outside-in* Verfahren die Wahrscheinlichkeit auf 91 % (mit $AZR = 0,85$) und auf 100 %, wenn alle Passagiere den Boardinganweisungen folgen. Bereits bei einer Akzeptanzrate von $AZR = 0,85$ reduziert sich das Auftreten der zeitintensiven Zustände C, B und D signifikant, so dass eine nachhaltige Reduzierung der Einstiegszeit zu erwarten

| Strategie | Wahrscheinlichkeit der Besetzungszustände (%) | | | |
|--------------------------------|--|------|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| <i>random</i> | 65,6 | 20,3 | 6,1 | 8,0 |
| <i>outside-in</i> (AZR = 0,85) | 90,8 | 5,2 | 2,9 | 1,1 |
| <i>outside-in</i> (AZR = 1,0) | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Tabelle 4.3.: Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Besetzungszustände in Abhängigkeit vom Boardingverfahren.

ten ist. Der Einfluss der Störungen aufgrund besetzter Sitze ist jedoch nicht nur auf die lokale Sitzreihe beschränkt. In Abhängigkeit der Anzahl der Passagiere, die durch die Sitzplatzeinnahme am Weitergehen gehindert werden, dehnt sich die Störung räumlich aus und kann den gesamten Boardingprozess negativ beeinflussen. Aus Sicht des Passagiers laufen drei Prozesse während des Boardings ab:

- er muss sich bis zu seiner Reihe bewegen und die nicht durch ihn verursachten (externen) Wartezeiten in Kauf nehmen,
- dann verstaut er sein Gepäck und blockiert dabei selbst den Gang
- und zuletzt nimmt er seinen Platz ein (Gangblockade, wenn Interaktionen mit bereits sitzenden Passagieren notwendig sind).

In Abbildung 4.18 ist die absolute Wartezeit bezogen auf eine Gangposition dargestellt. Wenn sich ein Passagier aufgrund eines vor ihm stehenden Passagiers nicht fortbewegen kann, wird die Wartezeit seiner aktuellen Position (Zelle) zugeschrieben. Nach Abschluss eines Simulationslaufs werden alle Wartezeiten gespeichert und nach dem Ende der Simulation zu einem Mittelwert zusammengefasst⁶. Im Ergebnis zeigt sich, dass mit zunehmender zurückgelegter Strecke innerhalb des Korridors die Wartezeit sinkt und auch eine Abhängigkeit von der Ankunftsrate der Passagiere aufweist.

In der Nähe der Eingangstüren ist die Wartezeit wesentlich höher, da alle zuvor eingestiegenen Passagiere zusätzliche Wartezeiten erzeugen. Bei der Verwendung von zwei Türen (Abbildung 4.18(b)) ist diese Wartezeit wesentlich geringer (z. B. Eingang vordere Tür, AKR = 28 PPM: 790 s bei einer Tür und 475 s bei zwei Türen). Die Unterschiede zwischen den Wartezeitverläufen an der vorderen und der hinteren Tür begründen sich durch die modellbedingte unterschiedliche Anzahl von zugewiesenen Sitzreihen je Tür (vorne 15 Sitzreihen, hinten 14 Sitzreihen). Mit steigender Ankunftsrate der Passagiere ändert sich der qualitative Verlauf der Wartezeiten. Ein fast linearer Verlauf der Wartezeit wird beim

⁶ Aufgrund der stochastischen Bestimmung der Prozess- und Wartezeiten handelt es sich immer um Erwartungswerte, die eine Standardabweichung besitzen. Vereinfachend wird im Folgenden nur von Prozess-/Wartezeiten gesprochen.

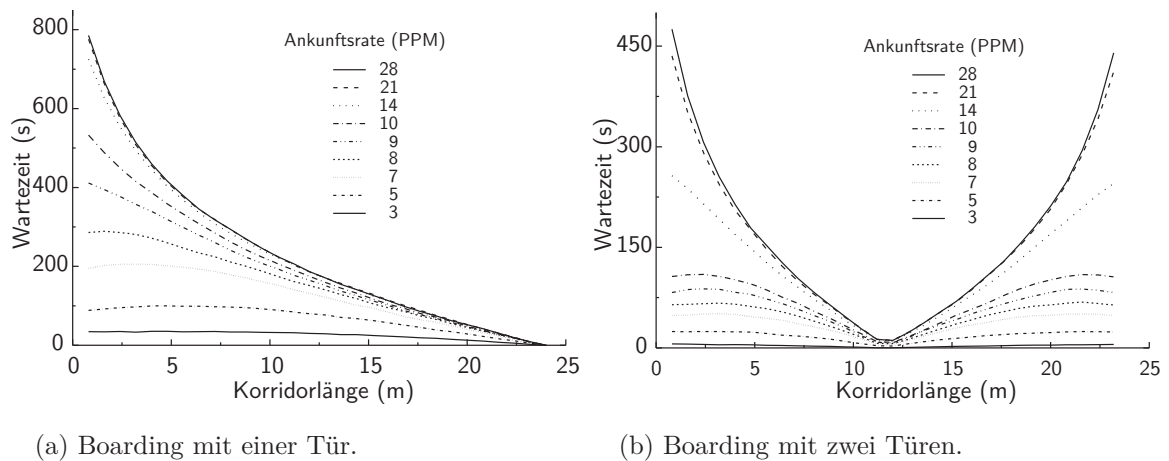


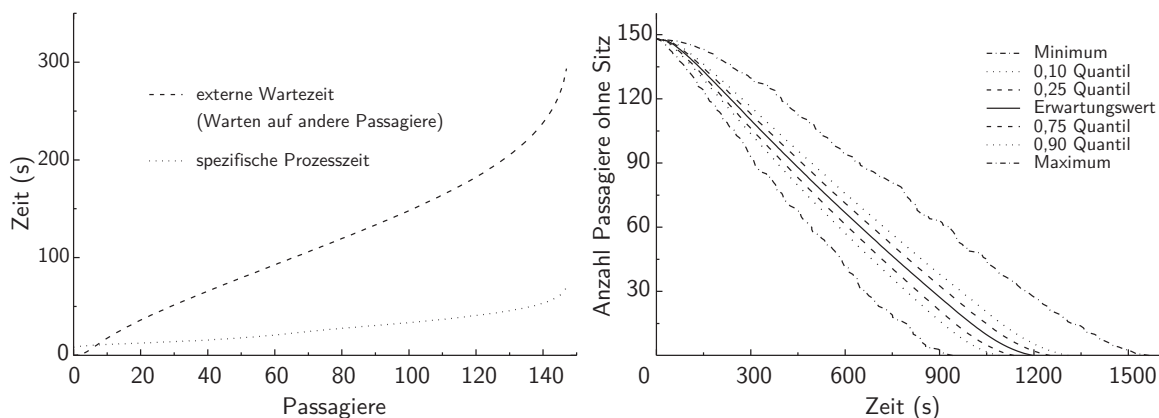
Abbildung 4.18: Auslastung des Gangs gemessen an der auf der jeweiligen Position verbrachten Wartezeit. Die Simulation erfolgte mit: *random* Boarding sowie $SLF = 0,85$ und $AZR = 0,85$.

Szenario mit $AKR_{\text{eine Tür}} = 9$ PPM ($AKR_{\text{zwei Türen}} = 14$ PPM) erreicht. Da die Wartezeit nach diesen Ankunftsraten stark ansteigt, ist zu erwarten, dass mit Überschreitung der Ankunftsraten die Boardingzeit nur noch bedingt verkürzt werden kann.

Die Höhe der externen Wartezeiten ist im Vergleich zur spezifischen Prozesszeit (Dauer des Gepäckverstauens und Interaktionszeit während der Einnahme des Sitzes) in Abbildung 4.19(a) dargestellt. Aufgrund der großen Reichweite der gegenseitigen Beeinflussungen weist die passagierspezifische Prozesszeit nur einen geringen Betrag gegenüber der resultierenden externen Wartezeit aus. Die zusammengefasste Zeitdarstellung ist wie folgt zu interpretieren: 50 Passagiere haben eine externe Wartezeit von höchstens 80 s und dabei eine spezifische Prozesszeit von höchstens 18 s.

Im Verlauf des Boardings nehmen alle Passagiere ihre Plätze ein. Die ersten Passagiere können ihre Plätze ungestört einnehmen und benötigen demzufolge einen sehr geringen Zeitbedarf. Der zeitliche Verlauf ist in Abbildung 4.19(b) dargestellt. Der Zeitbedarf ändert sich anfangs nur leicht und fällt dann aber fast linear. Zwischen 100 s und 900 s nimmt durchschnittlich alle 7,2 s ein Passagier seinen Sitz ein. Die mittlere Linie stellt den Erwartungswert dar, der von den Quantilen (0,10-/0,25-/0,75-/0,90-Quantil) sowie dem Minimum und Maximum umgeben ist. In Abhängigkeit von den Standardmodellannahmen variiert die Boardingzeit zwischen 925 s und 1550 s. Die Verteilung der Boardingzeiten entspricht einer Normalverteilung mit einem Erwartungswert $\mu = 1191$ s bei einer Standardabweichung von $\sigma = 83,8$ s.

Die dargestellten Verläufe von den Wartezeiten und dem Prozessverlauf (Abbildungen 4.18 und 4.19) gelten qualitativ für jedes Boardingverfahren. Um die Effizienz der einzelnen Szenarien gegenüber dem *random* Verfahren aufzuzeigen, muss zuerst das *block* Boarding eingehender spezifiziert werden. Dazu sind zwei Parameter zu bestimmen: zum



(a) Zusammengefasste Darstellung der externen Wartezeit und der passagierbezogenen Prozesszeit (Gepäckverstauen, Hinsetzen) während des Boardings. (b) Verlauf der Belegung aller Sitzplätze unter Berücksichtigung von Erwartungswert, Extremwerten und Quantilen (0,10-/0,25-/0,75-/0,90-Quantil).

Abbildung 4.19: Verlauf von Wartezeiten, Prozesszeiten und Sitzplatzbelegung während des Boardings. Simulationslauf mit dem *random* Verfahren, $SLF = 0,85$ und $AZR = 0,85$.

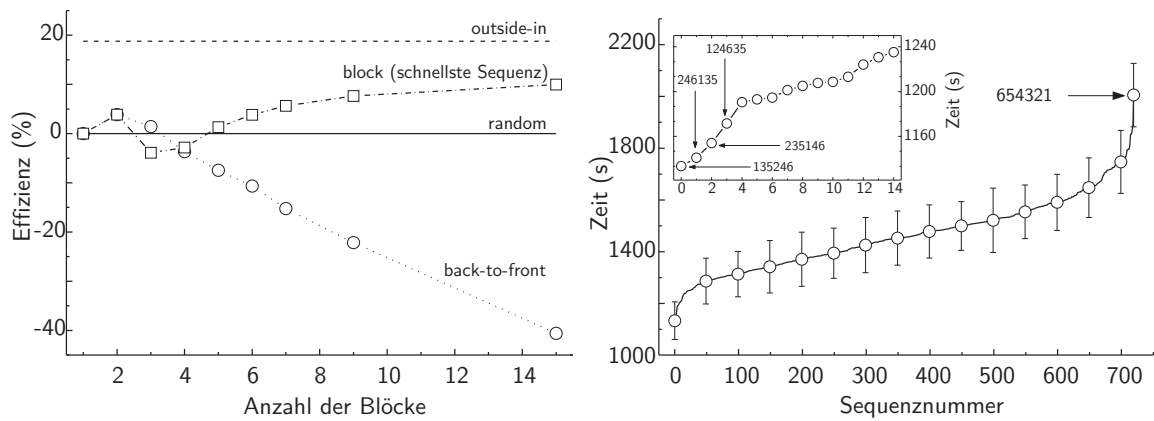
einen die Blockgröße (Anzahl der Sitzreihen je Block) und zum anderen die Reihenfolge der Blöcke beim Boarding. In einem vereinfachenden, exemplarischen Ansatz soll jeder Block die gleiche Anzahl an Sitzreihen aufweisen. Es ergeben sich unter Berücksichtigung des gewählten Layout mit 29 Sitzreihen folgende Möglichkeiten bei der Anzahl von Blöcken: $n_{\text{Block}} \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 15\}$. Unter der Verwendung von drei Blöcken ($n_{\text{Block}} = 3$) enthalten die ersten beiden Blöcke 10 Reihen und der letzte Block 9 Reihen. Die Blocknummerierung beginnt dabei an der hinteren Tür (Abbildung 4.17). Bei drei Blöcken ergeben sich 6 mögliche Blocksequenzen: 1-2-3, 2-1-3, 1-3-2, 3-1-2, 2-3-1 und 3-2-1. Da die kontinuierlich aufsteigenden Blocksequenzen (hier 1-2-3) das *back-to-front* Verfahren abbilden, werden diese Sequenzen nachfolgend als separate Verfahren betrachtet. In Tabelle 4.4 ist zu erkennen, dass alle Sequenzen des *block* Verfahrens im Vergleich zum *random* Verfahren schlechter abschneiden ($\mu_{\text{block}} > \mu_{\text{random}}$ und $\sigma_{\text{block}} > \sigma_{\text{random}}$). Einzig das *back-to-front* Verfahren weist einen geringeren Erwartungswert der Prozessdauer und eine geringere Standardabweichung gegenüber dem *random* Verfahren auf. Ein Verfahren gilt gegenüber dem *random* Verfahren als effizient, wenn der Erwartungswert geringer ist oder das Verfahren bei gleichem Erwartungswert eine geringere Varianz aufweist.

Es wird vermutet, dass sich je nach Anzahl der Blöcke die Effizienz des *block* Verfahrens signifikant ändert. Dieser Zusammenhang zwischen Blockgröße und Effizienz wurde im nachfolgenden Schritt untersucht und die Ergebnisse sind in Abbildung 4.20(a) dargelegt. Das *block* Verfahren wird in dieser Abbildung jeweils durch die Sequenz mit der geringsten Prozesszeit abgebildet. Werden die Sitzreihen auf zwei Blöcke aufgeteilt, sinkt die Boar-

| Sequenz | Erwartungswert μ (s) | Standardabweichung σ (s) | Effizienz (Δ %) |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| random | 1191,0 | 83,8 | 0 |
| <i>back-to-front</i> (1-2-3) | 1173,9 | 81,9 | + 1,4 |
| 2-1-3 | 1246,5 | 89,5 | - 4,6 |
| 1-3-2 | 1332,4 | 96,4 | - 11,8 |
| 3-1-2 | 1378,8 | 100,6 | - 15,7 |
| 2-3-1 | 1419,8 | 96,0 | - 19,1 |
| 3-2-1 | 1612,6 | 103,3 | - 35,4 |

Tabelle 4.4.: Boardingzeiten unterschiedlicher Blocksequenzen mit einer Blockgröße von $n_{\text{Block}} = 3$.

dingzeit (Effizienzsteigerung) um 3,9 %, während die Verwendung von drei Blöcken nur zu einem Effizienzverlust von 4,6 % führt. Das *back-to-front* Verfahren kann bei drei Blöcken die Effizienz um 1,4 % verbessern. Bei der Aufteilung in 6 Blöcke (durchschnittlich 5 Reihen mit 30 Sitzplätzen je Block) sinkt die Effizienz des *back-to-front* Verfahren jedoch deutlich um 10,7 %, wobei das *block* Verfahren die eine Effizienzsteigerung von 3,9 % erreicht. Eine weitergehende Einteilung in 15 Blöcke führt letztendlich zu Effizienzwerten von -40,6 % beim *back-to-front* und +10 % bei *block* Verfahren.



(a) Effizienz von Boardingverfahren bei unterschiedlicher Blockanzahl. Das *random* und das *outside-in* Verfahren sind als Bezugspunkte ebenfalls dargestellt.

(b) Darstellung aller 720 Sequenzen bei der Verwendung von sechs Blöcken ($n_{\text{Block}} = 6$). Die Sequenzen sind mit aufsteigendem Erwartungswert sortiert. Im eingefügten Diagramm sind die schnellsten Sequenzen detaillierter hervorgehoben.

Abbildung 4.20: Einfluss der Blockanzahl und Blocksequenz auf den Verlauf des Boardings.

Beim Blockverfahren wird die Sequenz mit der schnellsten Boardingzeit gewählt. Die Bestimmung der schnellsten Sequenz erfolgt beispielhaft unter der Verwendung von sechs Blöcken ($n_{\text{Block}} = 6$), woraus 720 mögliche Sequenzen resultieren. Abbildung 4.20(b) enthält die erwartete Boardingzeit jeder Sequenz. Die Standardabweichung ist als Fehlerbalken ($\mu \pm \sigma$) hervorgehoben. Die schnellste Sequenz weist dabei die kleinste Standardabweichung auf: Sequenz 2-4-6-1-3-5 ist mit $\mu = 1134$ s ($\sigma = 73$ s) signifikant schneller als alle anderen Sequenzen. Mit $\mu = 2005$ s ($\sigma = 122$ s) benötigt die langsamste Sequenz fast die doppelte Zeit bei ebenfalls fast doppelter Standardabweichung. Dass die zu 2-4-6-1-3-5 fast identische Sequenz 1-3-5-2-4-6 ($\mu = 1141$ s, $\sigma = 78$ s) etwas mehr Zeit benötigt, lässt sich durch die reduzierte Reihenanzahl im letzten Block erklären (nur 4 anstatt 5 Reihen). Ein Grund für die Effizienz der geraden/ungeraden Sequenzen 2-4-6 oder 1-3-5 liegt in der Aufteilung des notwendigen Warteraumes im Gang. Während die Passagiere des Block 2 diesen betreten wollen, stauen sich die wartenden Passagiere aus Block 2 im Gang und blockieren den nachgelagerten Block 3. Relativ ungehindert können jedoch zur selben Zeit die Passagiere den übernächsten Block 4 und ebenso den Block 6 betreten. Bei allen analysierten Blockgrößen besitzt die schnellste Sequenz ebenfalls die erkannte Struktur der aufsteigenden Blocknummerierung, wobei alle Blöcke mit geraden Nummern den Blöcken mit den ungeraden Nummern vorangestellt sind.

In den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen werden für das *block* Verfahren immer sechs Blöcke verwendet, so dass das *back-to-front* Verfahren der Sequenz 1-2-3-4-5-6 und das *block* Verfahren der Sequenz 2-4-6-1-3-5 entspricht. Bei der Verwendung von zwei Türen wird diese Nomenklatur ebenfalls übernommen. Die Blöcke 4-5-6 werden ausschließlich durch die vordere Tür und die Blöcke 1-2-3 durch die hintere Tür bedient und beeinflussen sich somit nicht gegeneinander. Die effektive Blockanzahl je Tür hat sich somit auf drei reduziert. Da die Blöcke 1/6, 2/5 und 3/4 zueinander äquivalent sind, entspricht die Sequenz 3-4-2-5-1-6 dem *back-to-front* Verfahren und die Sequenz 2-5-3-4-1-6 dem *block* Verfahren. Bei der Analyse unterschiedlicher Boardingverfahren wird jeweils nur ein Parameter variiert (SLF, AZR und AKR) während die anderen Parameter den definierten Standardwert aufweisen (siehe S. 159). Das Referenzszenario (AKR, AZR, SLF mit Standardwerten und *random* Verfahren) ist in den nachfolgenden Abbildungen 4.21, 4.22 und 4.23 als durchgehende schwarze Linie gekennzeichnet und dient zum direkten Vergleich der Ergebnisse. Die jeweils innerhalb der Abbildungen eingefügten Diagramme zeigen den Verlauf der Standardabweichung der Boardingzeit. In Abbildung 4.21 ist die Boardingzeit bezogen auf die Akzeptanzrate und das Boardingverfahren dargestellt. Mit steigender Akzeptanzrate (0,2 - 1) verringert sich die Boardingzeit beim *outside-in* Verfahren im Durchschnitt um 44,8 s je 10 % AZR-Steigerung bei einer Tür und um 23,4 s bei der Verwendung von zwei Türen. Ab AZR ≈ 32 % ist das *outside-in* Verfahren effizienter als das *random* Verfahren. Wie erwartet, hat die Änderung der AZR keinen Einfluss auf das Referenzverfahren.

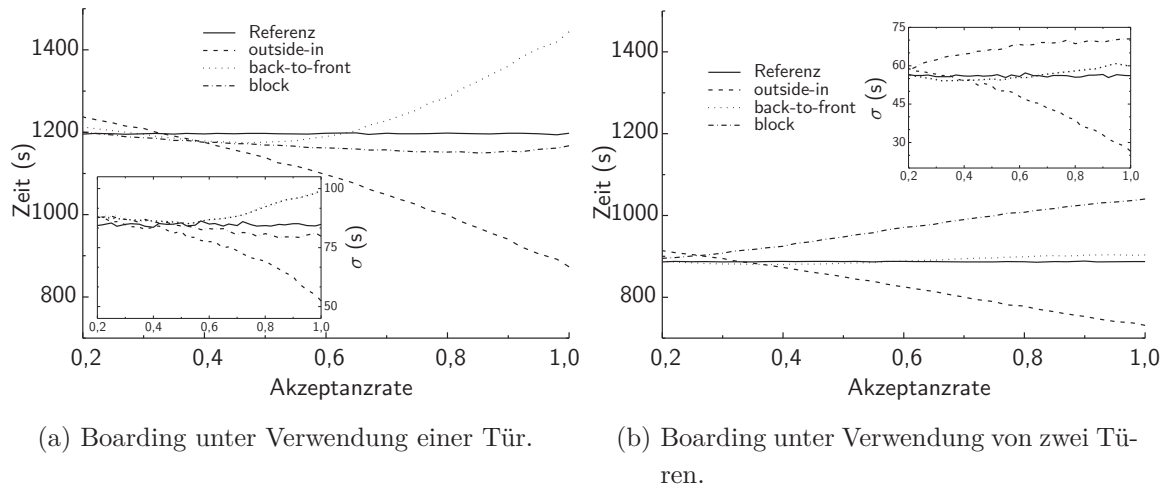


Abbildung 4.21: Zeitlicher Verlauf des Boardings bei unterschiedlicher Akzeptanzrate (AZR) des Boardingverfahrens seitens der einsteigenden Passagiere.

Die Verwendung von zwei Türen führt im direkten Vergleich der Referenzszenarien zu einer Verkürzung des Erwartungswertes um 25,5 % bei einer um 33,6 % reduzierten Standardabweichung. Das *block* Verfahren erreicht unter Verwendung einer Tür zum Boarding eine maximale Effizienz von 3,9 % bei $AZR = 0,85$. Bei der Verwendung von zwei Türen dauert das *block* Verfahren jedoch signifikant länger und weist eine höhere Standardabweichung im Vergleich zum Referenzverfahren auf. Das *back-to-front* Verfahren ist bei der Verwendung einer Tür ab $AZR = 0,62$ ineffizient und hat bei der Verwendung von zwei Türen keine ausgeprägten Vorteile gegenüber dem *random* Verfahren. Die Analyse der Abhängigkeit der Boardingverfahren vom Sitzladefaktor zeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen SLF und Boardingzeit vorhanden ist (Abbildung 4.22).

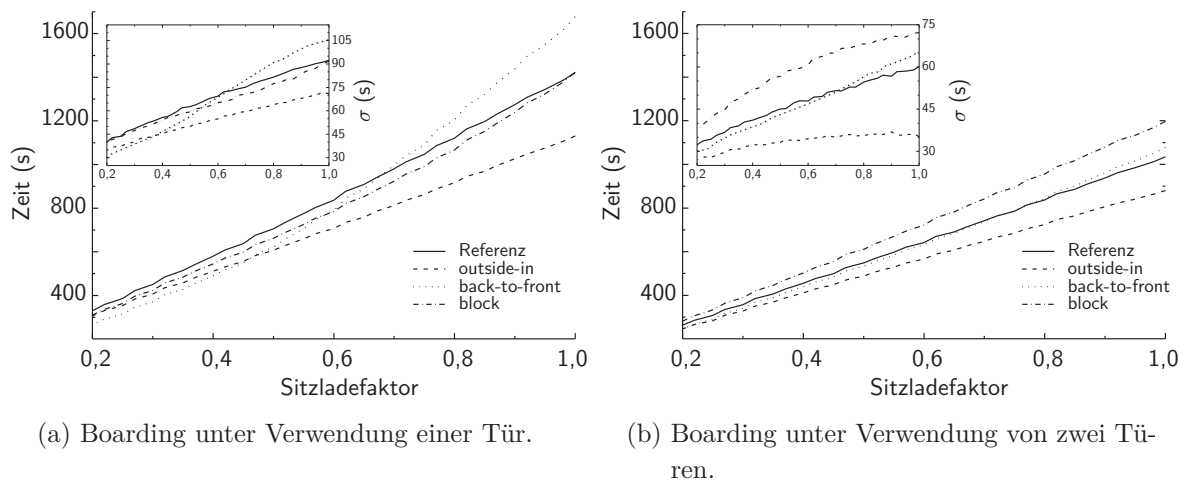
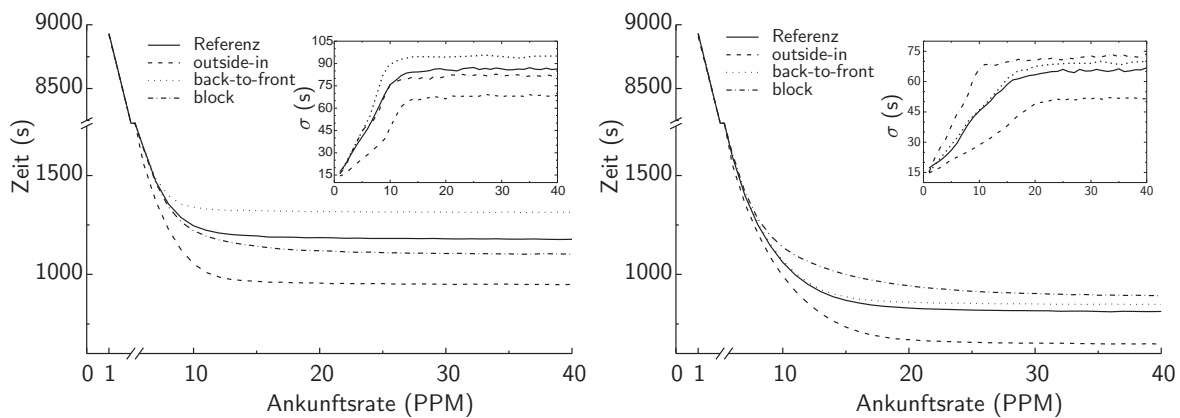


Abbildung 4.22: Bewertung der Boardingverfahren bei unterschiedlichen Sitzladefaktoren.

Beim *random* Verfahren beträgt der durchschnittliche Anstieg der Boardingzeit ≈ 140 s je 10 % SLF-Steigerung bei einer Tür und ≈ 100 s bei zwei Türen. Einzige Ausnahme ist das *back-to-front* Verfahren bei der Verwendung von einer Tür, da hier der Anstieg der Boardingzeit nicht linear verläuft. Ab $SLF = 0,68$ ist das Verfahren nicht mehr effizient, was bereits frühzeitig durch die ansteigende Standardabweichung signalisiert wird.

Die Auswertung unterschiedlicher Ankunftsraten (AKR) liefert keine zusätzlichen Erkenntnisse für den Vergleich der unterschiedlichen Boardingverfahren (Abbildung 4.23). Der direkte Vergleich des Boardingverlaufs unter Verwendung von einer und von zwei Türen zeigt, dass bei $AKR \approx 11$ PPM (eine Tür) und bei $AKR \approx 18$ PPM (zwei Türen) eine zeitliche Untergrenze der Boardingzeit erreicht wird. Indikatoren sind dabei die nicht fallende Boardingzeit und die stagnierende Standardabweichung. Eine über diese Werte weiterhin ansteigende Ankunftsrate hat nur einen marginalen Einfluss auf Boardingzeit und Standardabweichung.



(a) Boarding unter Verwendung einer Tür.

(b) Boarding unter Verwendung von zwei Türen.

Abbildung 4.23: Bewertung der Boardingverfahren bei unterschiedlichen Ankunftsraten.

Die Verläufe der jeweiligen Verfahren sind qualitativ vergleichbar. Das *outside-in* Verfahren ist aus Effizienzgesichtspunkten dem *random*, *back-to-front* und *block* Verfahren klar überlegen. Wie schon bei der Variation von Akzeptanzrate und Sitzladefaktor weist das *block* Verfahren eine geringe Effizienzsteigerung bei der Verwendung einer Tür auf und führt jedoch bei der Verwendung von zwei Türen zu keiner signifikanten Effizienzsteigerung.

Nachfolgend sind in Tabelle 4.5 alle berechneten Boardingverfahren mit den Erwartungswerten der Boardingzeit und den dazugehörigen Standardabweichungen gegenübergestellt. Alle dargestellten Effizienzwerte beziehen sich auf das Referenzverfahren bei der Verwendung einer Tür. Bereits die Benutzung der zweiten Tür, wie sie in Abbildung bereits an einigen Flughäfen auch bei Gate-Positionen erfolgt, führt zu einer Effizienzsteigerung

von 25,5 %. Der Boardingprozess ist jedoch nicht nur schneller, sondern auch signifikant zuverlässiger, da die Standardabweichung von 83,8 s auf 55,6 s (33,6 %) sinkt.

| Anzahl Türen | Bordingverfahren | mittlere Boardingzeit μ (s) | Standardabweichung σ (s) | Effizienz (%) |
|--------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 1 | Referenzverfahren | 1191,0 | 83,8 | 0,0 |
| | <i>outside-in</i> | 968,3 | 65,8 | 18,7 |
| | <i>back-to-front</i> | 1324,3 | 94,8 | -11,2 |
| | <i>block</i> | 1151,7 | 80,8 | 3,3 |
| 2 | Referenzverfahren | 886,8 | 55,6 | 25,5 |
| | <i>outside-in</i> | 764,3 | 35,8 | 35,8 |
| | <i>back-to-front</i> | 901,2 | 57,7 | 24,3 |
| | <i>block</i> | 1018,8 | 69,2 | 14,5 |

Tabelle 4.5.: Gegenüberstellung verschiedener Boardingverfahren. Die Effizienz des jeweiligen Verfahrens bezieht sich auf das hervorgehobene Referenzverfahren unter Verwendung einer Tür ($AKR_{\text{Standard}} = 14 \text{ PPM}$, $SLF_{\text{Standard}} = AZR_{\text{Standard}} = 85 \%$, *random* Verfahren).

Abschließend zeigen die Ergebnisse, dass die *block* und *back-to-front* Verfahren keine hohe praktische Relevanz besitzen. Eine nur marginale Verbesserung der Boardingzeit und Standardabweichung steht in keinem Verhältnis zum notwendigen organisatorischen Aufwand (z. B. Personal muss eingewiesen und Einhaltung überprüft werden) und der möglicherweise sinkenden Servicewahrnehmung der Passagiere (z. B. Trennung von Gruppen oder Zurechtweisung durch das Personal). Wenn eine Fluggesellschaft die nachhaltige Verkürzung der Boardingzeiten anstrebt, dann sollte das in den Analysen nachgewiesene Optimierungspotential des *outside-in* Verfahrens (18,7 % bzw. 35,8 %) durch empirische Untersuchungen eingehender bezüglich der praktischen Realisierbarkeit untersucht werden. Eine Nutzung von zwei Türen für das Boarding führt in jedem Fall zu einer Effizienzsteigerung (abhängig vom Boardingverfahren zwischen 11,2 % (*block*) und 35,5 % (*back-to-front*)), die ohne zusätzliche organisatorische und verfahrenstechnische Veränderungen erzielt werden könnte.

Das Bewegungsverhalten der Passagiere während des Boardings eines Verkehrsflugzeuges ist aufgrund der räumlich beengten Gegebenheiten in guter Näherung (unter Vernachlässigung von Überholvorgängen) durch einen eindimensionalen stochastischen Übergangsprozess (ASEP, Kapitel 2.1 (S. 38ff)) beschrieben. Für eine Anwendung innerhalb des Flughafenterminals ist dieses Bewegungsmodell jedoch nicht hinreichend, da neben der komplexeren Routenwahl das Bewegungsverhalten im Terminal im Wesentlichen durch gegenseitiges Ausweichen und durch Überholvorgänge der Passagiere geprägt ist. Für die

Anwendung des in Kapitel 2.2 (S. 46ff) erstellten stochastischen Bewegungsmodells wurde insofern mit der Entwicklung und Implementierung einer Anwendungsumgebung die geeignete Grundlage geschaffen, um auch komplexe Verhaltensweisen zu implementieren und zu untersuchen.

4.3. Anwendungsgebiet Flughafenterminal

Unter der Verwendung der entwickelten Anwendungsumgebung wird das stochastische Bewegungsmodell auf Passagiere in einem Flughafenterminal angewandt. Neben der Abbildung der Agentenbewegungen steht auch die Implementierung der Abfertigungsprozesse im Vordergrund. Für die stochastische Simulation der Terminalprozesse werden die Bewegungs- und Prozesssimulationen separat ausgeführt. Erreicht ein Agent seinen geplanten Abfertigungsprozess (z. B. Check-In oder Sicherheitskontrolle), wird er aus der stochastischen Bewegungssimulation entnommen und an die Prozesssimulation übergeben. Nach der Abfertigung des Agenten innerhalb des Terminalprozesses wird er mit einem neuen Bewegungsziel wieder an die Bewegungssimulation zurückgegeben. Der Vorteil dieser getrennten Bewegungs- und Prozessimplementierung liegt in der hohen Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation. Die Nutzung der Simulationsumgebung erfolgt für drei verschiedene Anwendungsfälle im Flughafenterminal. Zuerst wird der Passagierabfertigungsprozess implementiert und validiert (Kapitel 4.3.1, S. 168ff), anschließend erfolgt die Entwicklung einer passagierbezogenen Prozessbewertung (Kapitel 4.3.2, S. 178ff) und zum Schluss wird die Abfertigung der Passagiere exemplarisch am Flughafen Dresden (Kapitel 4.3.3, S. 189ff) analysiert.

4.3.1. Validierung der Passagierabfertigungsprozesse

Während das entwickelte stochastische Bewegungsmodell bereits in Kapitel 2.2.3 (S. 59ff) durch den Vergleich zum Fundamentaldiagramm kalibriert wurde, steht die Validierung der Passagierabfertigungsprozesse im Terminal noch aus. Die Validierung der Abfertigungsprozesse erfolgt durch die Gegenüberstellung von empirisch am Flughafen Stuttgart erhobenen Daten (Check-In und Sicherheitskontrolle [164]) mit den Simulationsergebnissen. In der Anwendungsumgebung stehen die Flughafengrundrisse (Abbildung 4.24) sowie die Ergebnisse der passagier- (Kapitel 3.2, S. 98ff) und der prozessbezogenen Datenerhebung (Kapitel 3.4, S. 119ff) zur Verfügung. Da der Aufwand für eine störungsfreie Datenaufnahme während des regulären Terminalbetriebes sehr hoch ist, steht für die Validierung der Abfertigungsprozesse jeweils eine Messung zur Verfügung, die 100 Simulationsläufen gegenübergestellt wird.

Die Messungen zur Validierung des Check-In erfolgen durch die Beobachtungen eines Fluges (gemischte Passagierkategorie), der sowohl am 17.11. als auch am 18.11.2008 statt-

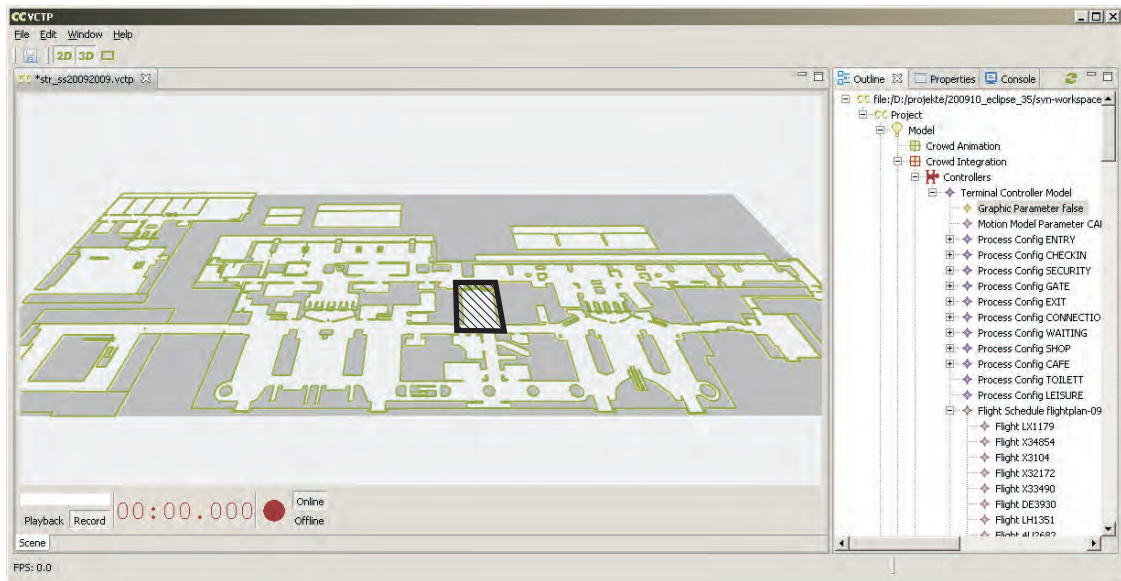


Abbildung 4.24: Terminalstruktur des Flughafens Stuttgart innerhalb der Simulationsumgebung. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die für die Validierung notwendigen Terminalstrukturen.

fand. Am 17.11. wurden 146 Passagiere an drei Check-In Schaltern abgefertigt und am 18.11. standen für die Abfertigung von 158 Passagieren zwei Check-In Schalter zur Verfügung. Die Schalter öffneten jeweils zwei Stunden vor Abflug. Der Terminalbereich für die Abfertigung ist in [Abbildung 4.24](#) schraffiert gekennzeichnet. Die empirische Datenerhebung für die Validierung der Sicherheitskontrolle fand im selben Bereich am 18.11. und am 19.11.2008 statt, wobei am 18.11. eine Sicherheitskontrollspur für 160 Passagiere zur Verfügung stand und am 19.11. mit zwei Sicherheitskontrollspuren 240 Passagiere abgefertigt wurden. Die Reisenden konnten aufgrund der frühen Abflugzeit und des Reiseziels der Kategorie der überwiegend geschäftlich reisenden Passagiere zugeordnet werden.

Für die Implementierung des Flughafens wurden die strukturellen Merkmale (Wände und Hindernisse) und alle notwendigen Prozessstationen (z. B. Check-In Schalter, Sicherheitskontrolle, Wartebereiche oder Shops) übertragen. Da sich die Validierung im Wesentlichen auf die bei der Abfertigung entstehenden Prozess-/Wartezeiten und Warteschlangenlängen bezieht, wird die Nutzung von Serviceeinrichtungen jedoch für die Validierung ausgeschlossen. Sowohl für die Validierung des Check-In Prozesses als auch für die Validierung der Sicherheitskontrolle wurden aus diesem Grund die Ankunftsverteilungen an den Prozessstationen empirisch erhoben ([Abbildung 4.25](#) und [Abbildung 4.27](#)) [164].

Die Ankunftsverteilung am Check-In entspricht in wesentlichen Zügen der Ankunftsverteilung der Geschäftsreisenden (Kapitel [3.4.1](#), S. [122ff](#)), liegt aber bei den früh (bis 100 min vor Ankunft) und den spät ankommenden Passagieren (ab 50 min vor Ankunft)

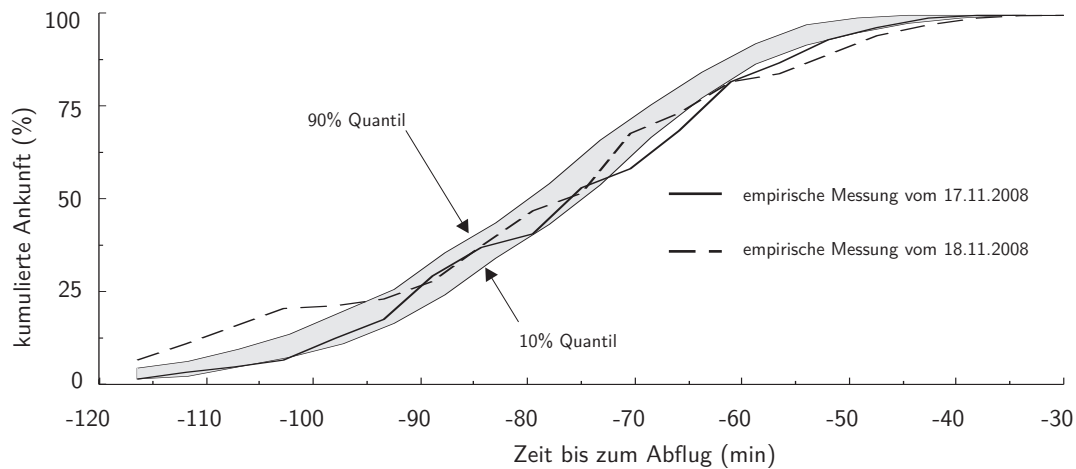


Abbildung 4.25: Ankunftsverteilung der Passagiere am Check-In am 17.11. und 18.11.2008 im Vergleich zur allgemeinen Ankunftsverteilung von überwiegend geschäftlich reisenden Passagieren (0,1- und 0,9-Quantil).

außerhalb der in [Abbildung 4.25](#) ausgewiesenen Quantile der Ankunftsverteilung. Neben der Ankunftsverteilung wurden für den Check-In auch die Dauer der Abfertigung, die Abfertigungsrate, die Gruppengröße, die Anzahl der Reisegepäckstücke und die zeitliche Entwicklung der Warteschlangenlänge bei der empirischen Datenerhebung aufgezeichnet und ausgewertet. In [Tabelle 4.6](#) sind die Erwartungswerte $\mu_{17.11.}$, $\mu_{18.11.}$ und ein gewichteter Erwartungswert μ der Prozessgrößen gegenübergestellt.

| Prozessgröße | Einheit | $\mu_{17.11.}$ | $\mu_{18.11.}$ | μ |
|------------------|------------------------|----------------|----------------|-------|
| Abfertigungszeit | s/Passagier | 66,34 | 53,74 | 60,04 |
| Abfertigungsrate | Passagier/Schalter min | 1,13 | 1,38 | 1,25 |
| Gruppengröße | Passagier/Gruppe | 1,25 | 1,23 | 1,24 |
| Gepäckanzahl | Koffer/Passagier | 0,76 | 0,73 | 0,74 |

Tabelle 4.6.: Empirischen Messwerte zur Validierung des Check-In [[164](#)].

Bei den Simulationsdaten stehen aufgrund von 100 Simulationsläufen zusätzlich noch die Standardabweichung und die 0,1-/0,9-Quantile für die Auswertung zur Verfügung. Für die Durchführung der Simulation gelten die folgenden erweiterten Annahmen.

- Die Verteilungsannahmen für Gruppengröße und Ankunft im Terminal basieren auf den Verteilungsparametern der geschäftlich reisenden Passagiere ([Tabelle 3.5](#) (S. [109](#)) und [Tabelle 3.16](#) (S. [128](#))).
- Eine spezifische Berücksichtigung des Alters erfolgt nicht. Die individuelle maximale Bewegungsgeschwindigkeit leitet sich aus der Gruppengröße ab ([Tabelle 3.7](#), S. [110](#)).
- Die in [Tabelle 3.9](#) (S. [112](#)) ausgewiesene spezifische Gepäckanzahl weicht signifikant

von den empirisch erhobenen Daten ab. Um eine negative Beeinflussung der Prozesszeiten innerhalb der Simulation zu verhindern, erfolgt eine Angleichung an die empirischen Daten durch die Erhöhung der spezifischen Gepäckanzahl um 30 %.

- Die Ankunft im Terminal erfolgt gleichverteilt an den Eingängen, da keine detaillierteren Informationen vorliegen. Zur Berücksichtigung der Laufwege wird die Ankunftsverteilung um 10 min vorverlegt, sodass die Passagiere früher am Terminal ankommen.
- Alle Passagiere gehen direkt zum Check-In. (Im Allgemeinen gehen 95 % der Passagiere direkt zum Check-In [163].)
- Die Schalter öffnen zwei Stunden vor Abflug. Wenn die Passagiere vorher ankommen, warten sie vor den Schaltern.
- Das Schalterpersonal besteht aus erfahrenen Mitarbeitern und es wird kein Sperrgepäck berücksichtigt. Auch Störungen des Abfertigungsprozesses bleiben unberücksichtigt.

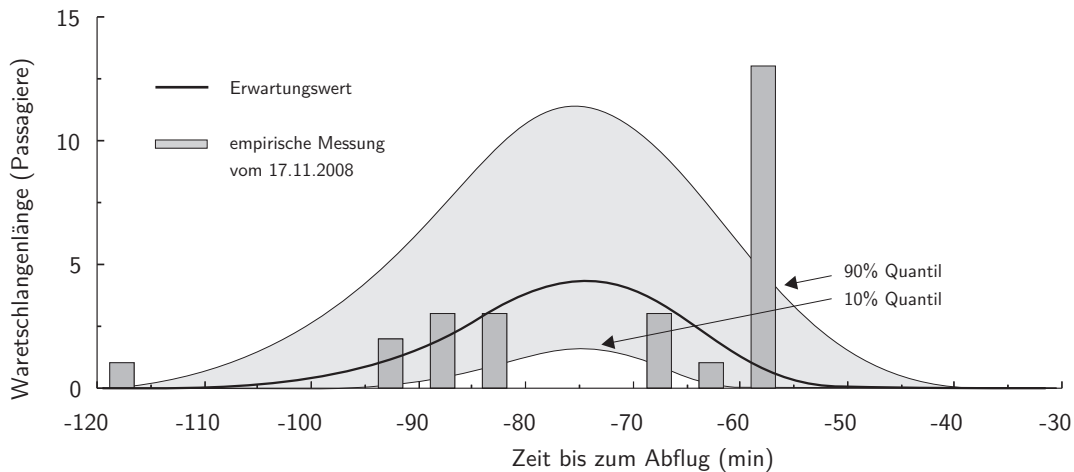
Die Simulation des Check-In spiegelt die empirischen Daten gut wider. Die durchschnittliche Abfertigungsdauer von $\mu = 60,04$ s/Passagier liegt in der Bandbreite der Simulationsergebnisse ($Q_{0,1} = 59,49$ s/Passagier und $Q_{0,9} = 65,02$ s/Passagier, siehe Tabelle 4.7). Die Gruppengröße fällt mit 1,27 Passagieren je Gruppe etwas höher aus. Die durchschnittliche Abfertigungsrate ist mit 1,26 Passagieren je Minute und Schalter sehr nahe an der empirischen Messung, allerdings liegen die jeweiligen empirischen Messwerte vom 17.11. und 18.11. außerhalb der simulativ bestimmten Quantile. Die im Vorfeld der Simulation angepasste Gepäckanzahl weist erwartungsgemäß eine vergleichbare Größenordnung auf.

| Prozessgröße | Einheit | $\mu_{17.11.}$ | $\mu_{18.11.}$ | μ | σ | $Q_{0,1}$ | $Q_{0,9}$ |
|------------------|------------------------|----------------|----------------|-------|----------|-----------|-----------|
| Abfertigungszeit | s/Passagier | 62,40 | 62,30 | 62,37 | 2,30 | 59,49 | 65,02 |
| Abfertigungsrate | Passagier/Schalter min | 1,25 | 1,27 | 1,26 | 0,05 | 1,19 | 1,33 |
| Gruppengröße | Passagier/Gruppe | 1,26 | 1,28 | 1,27 | 0,04 | 1,16 | 1,33 |
| Gepäckanzahl | Koffer/Passagier | 0,76 | 0,75 | 0,76 | 0,03 | 0,72 | 0,80 |

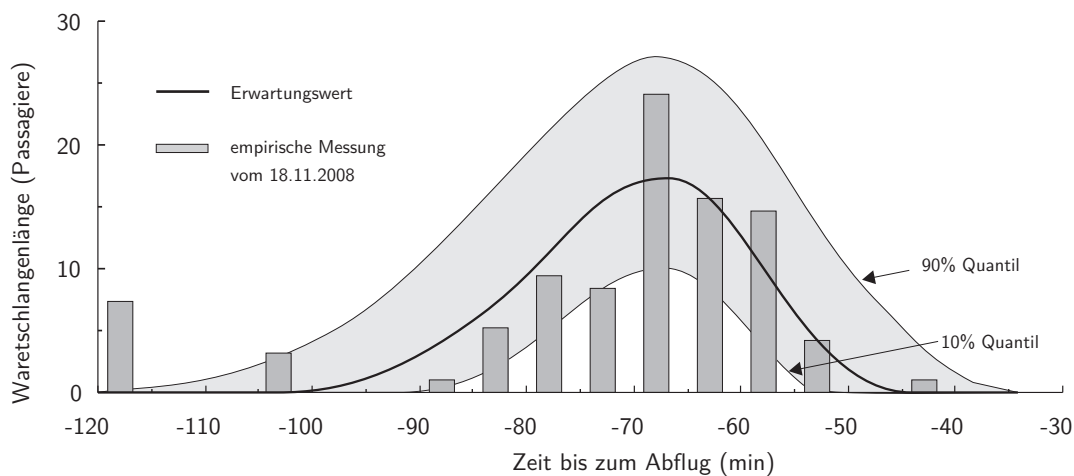
Tabelle 4.7.: Simulationsergebnisse zur Validierung des Check-In.

In der Darstellung der zeitlichen Entwicklung ist zu erkennen, dass die Warteschlangen sowohl am 17.11. (Abbildung 4.26(a)) als auch am 18.11. (Abbildung 4.26(b)) einmalig sprunghaft ansteigen. Am 17.11. fiel die Gepäckanlage zeitweise aus und am 18.11. traten kurzzeitig technische Probleme auf. Die empirischen Messwerte liegen trotzdem fast vollständig in der berechneten Bandbreite. Bei den empirischen Passagierankünften kommen Passagiere bereits von der Öffnung der Check-In Schalter an, sodass sich zu Beginn der Abfertigung bereits Warteschlangen bilden. Innerhalb der Simulation treten diese War-

teschlangen nicht auf, da die gewählte Ankunftsverteilung keine Ankünfte zwei Stunden vor Abflug ausweist. Durch die Abfertigung der Passagiere an drei Schaltern (17.11.) ist die Länge der Warteschlange um bis zu 75 % geringer als die Warteschlange bei der Abfertigung mit zwei Schaltern (18.11.).



(a) Validierung des Check-In-Prozess anhand von empirisch erhobenen Datensätzen. Warteschlangenlänge am 17.11.2008 mit 146 abgefertigten Passagieren und drei geöffneten Check-In Schaltern.



(b) Validierung des Check-In-Prozess anhand von empirisch erhobenen Datensätzen. Warteschlangenlänge am 18.11.2008 mit 158 abgefertigten Passagieren und zwei geöffneten Check-In Schaltern.

Abbildung 4.26: Validierung des Check-In-Prozess anhand von zwei empirisch erhobenen Datensätzen mit vergleichbarer Passagier- und abweichender Schalteranzahl.

Die Implementierung der Check-In Schalter in die Simulationsumgebung mit den verwendeten Verteilungsparametern liefert gute Ergebnisse für die Prozesszeiten und die daraus resultierenden Warteschlangenlängen (Abbildungen 4.26(a), 4.26(b) und Tabelle 4.7). Durch die geringe Anzahl an empirischen Messungen ist es nicht zu erwarten, dass

die Simulationen exakt den Verlauf der aufgezeichneten Werte widerspiegeln. Durch die Nutzung der 10% und 90% Quantile können 80% der auftretenden Ergebnisse beschrieben und die empirischen Werte fast vollständig abgebildet werden.

Nach dem Check-In ist die Sicherheitskontrolle der nächste Passagierabfertigungsprozess. Die Validierung der Sicherheitskontrolle erfolgt ebenfalls durch den Abgleich der Ankunftsverteilungen der Passagiere und der Prozesszeiten sowie mit durch den Vergleich der Warteschlangenlängen. Im Gegensatz zum Check-In ist eine Beschränkung auf die Passagiere eines Fluges nicht möglich. Die Sicherheitskontrolle kann prinzipiell von jedem Passagier genutzt werden, der im Besitz einer gültigen Bordkarte ist. Aus diesem Grund erfolgte die Erhebung von spezifischen Ankunftsverteilungen direkt an der Sicherheitskontrolle (Abbildung 4.27).

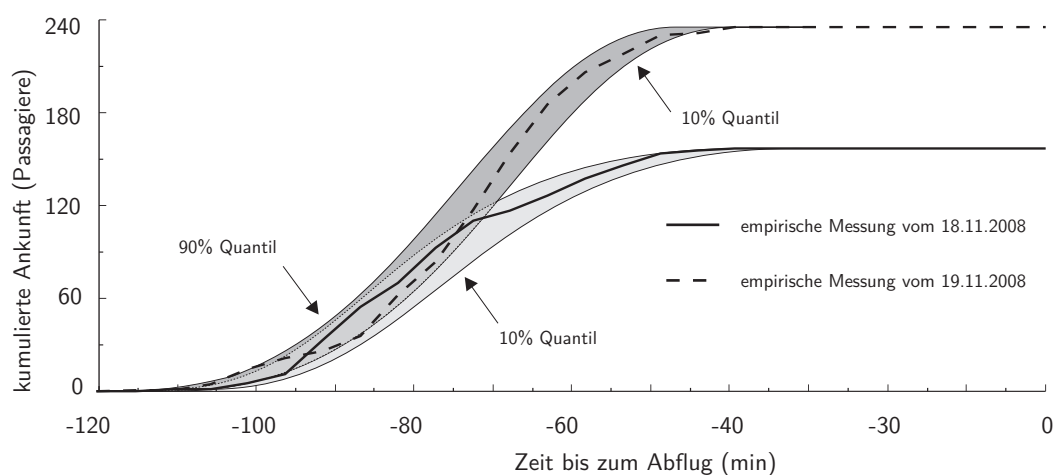


Abbildung 4.27: Ankunftsverteilung der Passagiere an der Sicherheitskontrolle. Die Ankunftsverteilung am 18.11. (160 Passagiere, 1 Kontrollspur) basiert auf einer Simpson-Verteilung ($t_{\min} = 35$ min, $t_{\text{modus}} = 80$ min, $t_{\max} = 110$ min). Die Ankunftsverteilung am 19.11. (240 Passagiere, 2 Kontrollspuren) basiert auch auf einer Simpson-Verteilung ($t_{\min} = 40$ min, $t_{\text{modus}} = 66$ min, $t_{\max} = 110$ min).

Der Aufbau der Sicherheitskontrolle am Flughafen Stuttgart weicht von der allgemeinen Prozessbeschreibung ab (siehe Abbildung 3.25, S. 135). Für die Validierung der Sicherheitskontrolle muss die Implementierung der vier relevanten Prozessbereiche (Gepäckabgabe, Passagier-, Gepäcknachkontrolle und Gepäckaufnahme) leicht angepasst werden. Erfahrungen aus dem täglichen Betrieb haben gezeigt, dass die Engpässe in der Sicherheitskontrolle nach der Torsonde und in der nachfolgenden Gepäckaufnahme bestehen. Die Torsonde selbst stellt demzufolge aus der Sicht der Passagierabfertigung keinen Engpass dar. Am Flughafen Stuttgart wird sie somit von zwei benachbarten Kontrollspuren gleichzeitig genutzt. Weitere Veränderungen gegenüber der allgemeinen Prozessbeschreibung bestehen durch:

- zwei zusätzliche Wartepositionen vor der Torsonde,
- drei Mitarbeiter des Sicherheitspersonals, die bei beiden Kontrollspuren zum Einsatz kommen können sowie
- zwei Positionen zur Gepäckaufnahme.

Die grafische Darstellung der Sicherheitskontrolle und der Passagierpositionen innerhalb der Abfertigung erfolgt in Abbildung 4.28. Wenn der Passagier die Sicherheitskontrolle erreicht, reiht er sich in eine vorhandene Warteschlange ein oder betritt die Sicherheitskontrolle direkt und legt seine persönlichen Gegenstände in eine Transportbox auf dem Transportband.

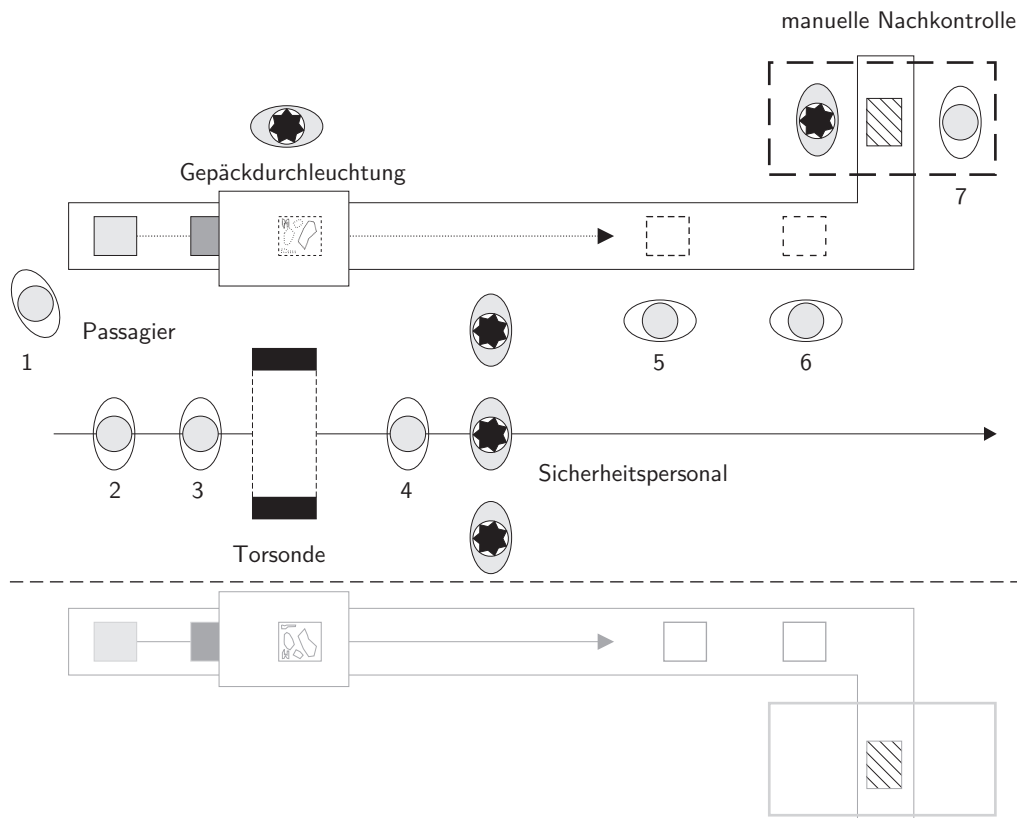


Abbildung 4.28: Aufbau der Sicherheitskontrolle am Flughafen Stuttgart: nach der Gepäckabgabe (1) nimmt der Passagier die Warteposition (2,3) vor der Torsonde ein. Nach einer möglichen Kontrolle durch das Sicherheitspersonal (4) stehen zwei Positionen zur Gepäckaufnahme (5,6) und eine Position zur Gepäcknachkontrolle (7) bereit.

Wenn das Sicherheitspersonal nicht mit einer Nachkontrolle beschäftigt ist, kann er nach Aufforderung die Torsonde passieren, ansonsten muss er warten. Hierfür stehen zwei Wartepositionen zur Verfügung. Sind diese besetzt, bleibt er am Gepäckband stehen und

nachfolgende Passagiere müssen warten. Wird beim Passieren der Torsonde kein Alarm ausgelöst, kann er seine persönlichen Gegenstände selbst wieder aufnehmen oder muss sie zuerst einer manuellen Nachkontrolle unterziehen lassen. Wartezeiten entstehen für die nachfolgenden Passagiere, wenn Prozesspunkte oder Wartepositionen besetzt sind. Für die Durchführung der Simulation der Sicherheitskontrolle gelten die gleichen Annahmen wie für den Check-In, jedoch sind die Sicherheitskontrollspuren permanent geöffnet. Obwohl die Abfertigung innerhalb der Sicherheitskontrolle von der Gruppenkonstellation unabhängig ist, erfolgt eine Gruppeneinteilung der Passagiere, um die gemeinsame Nutzung der Terminaleingänge und der Laufwege sicherzustellen. Die Prozesszeiten sind auf Basis der ausgewiesenen Parameter für Gepäckabgabe, Passagiernachkontrolle, Gepäckaufnahme und -nachkontrolle definiert (siehe Tabelle 3.18, S. 136). Für die Personennachkontrolle durch das Sicherheitspersonal ist eine konservativ geschätzte Quote von 45 % (22-37 % nach [237] und 50 % nach [164]) sowie für die manuelle Nachkontrolle eine Quote von 15 % definiert (Kapitel 3.4.3, S. 134).

Der Vergleich der Prozesszeiten zeigt, dass das implementierte Modell der Sicherheitskontrolle nur geringe Differenzen zu den empirisch erhobenen Daten aufweist (Tabelle 4.8). Während am 18.11. an einer Sicherheitskontrollspur 160 Passagiere abgefertigt wurden, sind am 19.11. aufgrund der zwei geöffneten Kontrollspuren durchschnittlich 120 Passagiere je Kontrollspur abgefertigt worden. Erwartungsgemäß reduziert sich somit sowohl die passagierbezogene mittlere Gesamtprozesszeit als auch die Wartezeit innerhalb der Sicherheitskontrolle. Dieser Trend ist auch in den Simulationsdaten zu erkennen, allerdings mit einer geringeren Ausprägung und Schwankungsbreite. Die Simulationsergebnisse vom 18.11. zeigen einen um 5 % kleineren Erwartungswert mit einer um 10 % verringerten Standardabweichung. Während der Erwartungswert am 19.11. um 3 % höher ist, tritt auch hier eine um 10 % verringerte Standardabweichung auf. Die Prozesszeit innerhalb der Sicherheitskontrolle setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen: der reinen Bearbeitungszeit und der Wartezeit, wenn der nächste Prozess der Sicherheitskontrolle durch einen anderen Passagier besetzt ist. Die Simulationsdaten weisen hierbei durchschnittlich einen um 5,8 s höheren Erwartungswert und eine um 2,7 s höhere Standardabweichung auf. Wie eingangs bereits erwähnt, ist bei der Validierung zu beachten, dass für die Auswertung der Simulation zwar Daten aus 100 Simulationsläufen zur Verfügung stehen, die empirischen Datensätze vom 18. und 19.11.2008 jedoch jeweils nur eine mögliche Entwicklung der Abfertigung widerspiegeln.

Der Vergleich der Warteschlangenlängen in den Abbildungen 4.29(a) und 4.29(b) zeigt, dass sich die empirisch erhobenen Daten gut in das simulierte Gesamtbild einfügen. Aus den Beobachtungen vom 18. und 19.11.2008 geht hervor, dass einige Passagiere die Warteschlange ab einer gewissen Länge verlassen, um eine Sicherheitskontrolle in einem anderen Terminalbereich aufzusuchen. Ebenfalls ist anzumerken, dass nach dem sprunghaften Anstieg der Warteschlange am 19.11. (bei 60 Minuten vor dem Abflug) eine aktive Steuerung

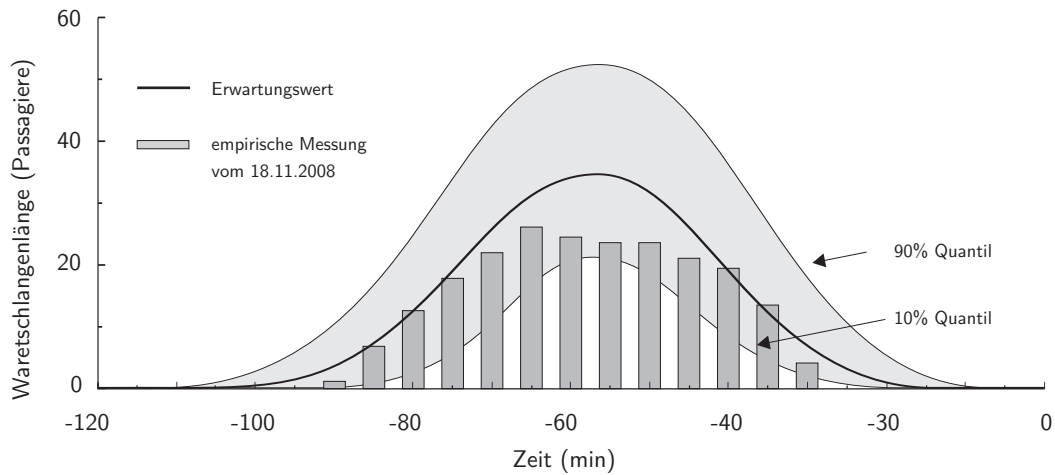
| Datum | Gesamtprozesszeit (s) | | | | Wartezeitzeit (s) | |
|--------------------------|-----------------------|----------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| | μ | σ | $Q_{0,1}$ | $Q_{0,9}$ | μ | σ |
| empirische Datenerhebung | | | | | | |
| 18.11. | 136,7 | 58,5 | 75,0 | 223,8 | 40,6 | 37,0 |
| 19.11. | 122,0 | 49,0 | 66,2 | 181,0 | 34,4 | 30,0 |
| \emptyset | 126,3 | 52,2 | 68,6 | 190,2 | 37,4 | 33,6 |
| Simulationsdaten | | | | | | |
| 18.11. | 129,2 | 52,4 | 75,3 | 194,7 | 45,7 | 36,2 |
| 19.11. | 125,5 | 43,9 | 72,8 | 172,3 | 41,7 | 36,5 |
| \emptyset | 126,8 | 47,1 | 74,4 | 184,2 | 43,2 | 36,3 |

Tabelle 4.8.: Gegenüberstellung von empirischen Messwerten und Simulationsergebnissen zur Validierung der Sicherheitskontrolle. Die Gesamtprozesszeit und die Wartezeit sind passagierbezogen ausgewertet.

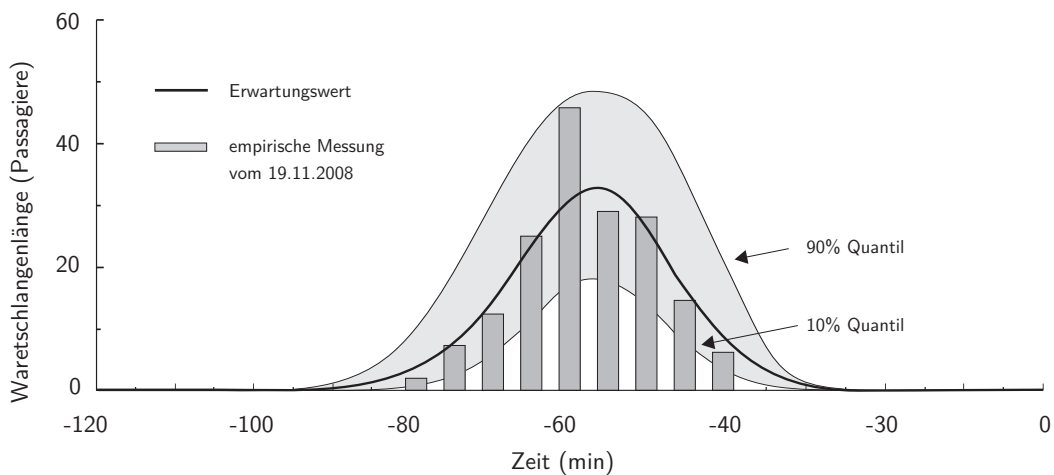
der Passagiere seitens des Flughafens Stuttgart erfolgte. Passagiere wurden von Mitarbeitern mit dem Verweis auf kurze Wartezeiten auf andere Sicherheitskontrollen im Terminal hingewiesen. Ein Teil der ankommenden Passagiere wurde aus diesem Grund nicht in den betrachteten Kontrollspuren abgefertigt. Genaue Informationen über die Dauer und den Umfang der aktiven Passagiersteuerung liegen nicht vor und können somit nicht in der Simulation abgebildet werden. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Randbedingungen ist zu erwarten, dass die empirisch aufgezeichnete Warteschlangenlängen tendenziell geringer ausfallen, sich aber mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der simulativ bestimmten Bandbreite (0,1- und 0,9-Quantil) befinden werden.

Der Aufbau der Sicherheitskontrolle am Flughafen Stuttgart weicht zwar vom allgemeinen Aufbau ab, jedoch konnte unter Verwendung der vier relevanten Prozessbereiche die Sicherheitskontrolle hinreichend genau abgebildet werden. Die Implementierung der Sicherheitskontrollspuren in die Simulationsumgebung mit den verwendeten Verteilungsparametern liefert valide Ergebnisse für die Warteschlangenlängen.

Aus Sicht der Prozessmodellierung ist mit der Validierung der beiden wesentlichen Abfertigungsprozesse (Check-In und Sicherheitskontrolle) die Voraussetzung geschaffen, die Terminalprozesse während des Abfluges abzubilden. Für die noch fehlenden Prozesse (Pass- und Bordkartenkontrolle) stehen keine empirischen Daten zum Vergleich zur Verfügung. Die Modellierung unterscheidet sich jedoch nicht entscheidend von den eingehend betrachteten Prozessen. Bei der Pass- und Bordkartenkontrolle werden die Passagiere einzeln abgefertigt, ohne dass passagierspezifische Parameter (z. B. Gruppengröße oder



(a) Validierung der Sicherheitskontrolle anhand von empirisch erhobenen Datensätzen. Warteschlangenlänge am 18.11.2008 mit 160 abgefertigten Passagieren und einer geöffneten Kontrollspur.



(b) Validierung der Sicherheitskontrolle anhand von empirisch erhobenen Datensätzen. Warteschlangenlänge am 19.11.2008 mit 240 abgefertigten Passagieren und zwei geöffneten Kontrollspuren.

Abbildung 4.29: Validierung der Sicherheitskontrolle anhand von empirisch erhobenen Datensätzen.

Passagierkategorie) die Abfertigung beeinflussen oder charakteristische Prozessmerkmale wie bei der Sicherheitskontrolle (mehrere Teilprozesse) bestehen.

Für die passagierbezogene Bewertung der Abfertigungsprozesse werden im folgenden Abschnitt allgemeine Empfehlungen zur Terminalgestaltung (*level of service*), die Bewertung passagierspezifischer Wahrnehmung (*analytical hierarchy process* [269]) sowie die Berücksichtigung der verfügbaren Restzeit bis zum Abflug als primäre Qualitätsmerkmale vorgestellt.

4.3.2. Passagierbezogene Prozessbewertung

Für die Auslegung von Fußgängerkehrsanlagen etablierte [25, 56] bereits sehr früh eine Bewertungsmethodik, die es erlaubte unterschiedliche Systemzustände hierarchisch zu bewerten. Im Wesentlichen wurden Kriterien der aggregierten Ergebnisdarstellung verwendet (Dichte, Fluss, Kapazität und durchschnittliche Geschwindigkeit) und der notwendige Platzbedarf bezogen auf den jeweiligen Personenzustand (z. B. Warten, Gehen oder Anstehen) als primäres Kriterium angesehen. Der entwickelte Bewertungsmaßstab bezog sich primär auf Terminals für Busse und wurde im Laufe der Zeit auch für andere Verkehrsanlagen adaptiert ([270], [271] oder auch [64]). Mit dem *Airport Development Reference Manual* stehen verschiedene Ansätze zur Definition des *level of service* (LOS) im Flughafen-terminal zur Verfügung [64]. Die LOS Kategorien reichen von Level A (reibungsfreier Ablauf) bis hin zu Level F (vollständiger Systemausfall) und weisen flächen-, auslastungs-, geschwindigkeits- und zeitbezogene Größenordnungen auf. Für die Auslegung von Terminalbereichen findet typischerweise ein Level C Anwendung [64]. Für den Check-In Bereich sind in Tabelle 4.9 Flächenstandards für die jeweiligen LOS Kategorien dargestellt. Die angegebenen Werte stellen die untere Grenze dar, bis zu der der ausgewiesene Level gilt. Level F wird demzufolge mit dem Unterschreiten des bei Level E angegebenen Wertes erreicht.

| Kriterium | LOS Kategorie (m ² /Passagier) | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D | E |
| Breite der Warteschlange 1,2 m | | | | | |
| Wenige Gepäckwagen und Passagiere mit Hand- und wenig Reisegepäck | 1,7 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,9 |
| Wenige Gepäckwagen und Passagiere mit je 1-2 Reisegepäckstücken | 1,8 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |
| Breite der Warteschlange 1,4 m | | | | | |
| Hoher Anteil an Gepäckwagen | 2,3 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 1,5 |
| Hoher Anteil an Gepäckwagen und mit 2 oder mehr Reisegepäckstücken | 2,6 | 2,3 | 2,0 | 1,9 | 1,8 |

Tabelle 4.9.: Flächenbezogener LOS für die Dimensionierung des Check-In Bereiches [64].

Neben dem flächenbezogenen LOS sind auch geschwindigkeitsbezogene Definitionen vorhanden. Für den Level C sind die folgenden Bewegungsgeschwindigkeiten der Passagiere festgelegt: 1,3 m/s (Luftseite, keine Gepäckwagen), 1,1 m/s (öffentlicher Bereich, wenige Gepäckwagen) und 0,9 m/s (vor dem Check-In Bereich). Die Abstufung der Geschwindigkeit ist im Gegensatz zum Flächenbezug nur bedingt als Qualitätskriterium geeignet. Wie die in Kapitel 3.2 (S. 98) erhobenen Daten zeigen, ist die Bewegungsgeschwindigkeit der

Passagiere neben den Wechselwirkungen untereinander primär von den individuellen Eigenschaften abhängig (z. B. Gruppengröße, Geschlecht oder Reisemotivation). Aus einer Kategorisierung unterschiedlicher Bewegungsgeschwindigkeiten kann somit keine Qualitätsaussage abgeleitet werden. Vielmehr müssten die durch die vorhandenen Terminalstrukturen und -prozesse verursachten negativen Effekte als prozentualer Faktor auf die Geschwindigkeitswahl (Richtungswahl) definiert werden.

Die Festlegung von prozentualen Auslastungen (bezogen auf die maximale Kapazität) ist wiederum gut geeignet im Terminal vorhandene (Warte-) Flächen zu bewerten. Wie in Tabelle 4.10 dargestellt, ist der Level B erreicht, wenn die Auslastung größer als 40 % ist aber einen Wert von 50 % nicht übersteigt.

| Kriterium | LOS Kategorie, Auslastung (%) | | | | | |
|-------------------|-------------------------------|----|----|----|----|-----|
| | A | B | C | D | E | F |
| Flächenauslastung | 40 | 50 | 65 | 80 | 95 | 100 |

Tabelle 4.10.: Prozentualer LOS bezogen auf die maximale Kapazität von Warteflächen [64].

Während der flächenbezogene LOS primär als Auslegungskriterium gilt, kann durch die Auslastung der zeitliche Verlauf des LOS bemessen werden. Im laufenden Betrieb kann es aufgrund der dynamischen Abfertigungs- und Passagierprozesse dazu kommen, dass der geplante Level C nicht durchgängig erreicht werden kann. Geschehen die Level-Überschreitungen nicht nur zu Spitzenstunden und überschreitet der Zeitraum eine angemessene Grenze, müssen aktive Steuerungsmaßnahmen angewendet und die Auslegung des betreffenden Terminalbereiches überdacht werden.

Für die maximale Wartezeit bei Abfertigungsprozessen steht nur eine zweistufige Einteilung zur Verfügung. Spezifische LOS Level sind nicht definiert, vielmehr dienen qualitative Größen zur Einteilung. Als Differenzierungsmerkmal dient eine *akzeptable* Grenze und die Festsetzung einer *langen* Wartezeit (Tabelle 4.11). Die Wartezeit stellt ebenfalls ein Qualitätskriterium zur Bewertung der zeitlich dynamischen Terminalprozesse dar.

Ein primärer Kritikpunkt an den obigen LOS Kennzahlen stellt die unberücksichtigte individuelle Passagierwahrnehmung dar [272–274]. Das Flughafenterminal muss von den Passagieren soweit erkundet werden, wie es für die essentiellen Prozesse notwendig ist. Je nach vorhandener Restzeit kann sich der erkundete Bereich noch vergrößern. In diesem Zusammenhang ist eine effiziente und *gebrauchsfähige* Ausschilderung notwendig [275]. Nicht nur eine klare Trennung von primären (für den Betrieb notwendigen) und sekundären Einrichtungen ist dabei erforderlich, sondern es müssen auch die menschliche Wahrnehmung und Aufnahmefähigkeit der Passagiere im Vordergrund der Gestaltung stehen. Wesentliche Einflussfaktoren für die Servicewahrnehmung der Passagiere sind die Hilfsbereitschaft der Angestellten gefolgt von der problemlosen und einfachen Nutzung des Leitsystems [276]. Weitergehende Untersuchungen von [272] zeigen, dass Information

| Abfertigungsprozess | Zeitraum (min) | |
|---------------------------|----------------|------|
| | Akzeptabel | Lang |
| Check-In (Economy) | 12 | 30 |
| Check-In (Business Class) | 3 | 5 |
| Passkontrolle (Ausreise) | 7 | 15 |
| Sicherheitskontrolle | 3 | 7 |
| Passkontrolle (Einreise) | 5 | 10 |
| Gepäckaufnahme | 12 | 18 |

Tabelle 4.11.: Empfehlungen für maximale Wartezeiten an den Abfertigungsprozessen [64].

(53 %) das wesentliche Qualitätskriterium darstellt, und erst an zweiter Stelle quantitative Größen folgen, wie die Entfernung zwischen den Prozesseinrichtungen (38 %) oder das verfügbare Platzangebot (6 %).

Unter Verwendung der Methodiken des *analytical hierarchy process* (AHP) (siehe [269, 277–279]) stellen [Bandeira et al. \[280\]](#) mit einer Passagierumfrage am São Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR) eine hierarchische Ordnung von Serviceindikatoren auf, mit der die unterschiedlichen Einrichtungen des Flughafens bewertet werden können. In der nachfolgenden Abbildung 4.30 sind die wesentlichen Ergebnisse der Umfrage zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass der Check-In Prozess mit 32 % die größte Bedeutung für die abfliegenden Passagiere aufweist. Innerhalb des Prozesses haben kurze Wartezeiten und der reibungslose Ablauf die höchste Priorität. In dieser Umfrage sind Sicherheit, Komfort und Orientierung ebenfalls entscheidende Indikatoren für die empfundene Servicequalität. Verständlicherweise spielt die Orientierung jedoch in den anderen Terminaleinrichtungen nur eine untergeordnete Rolle.

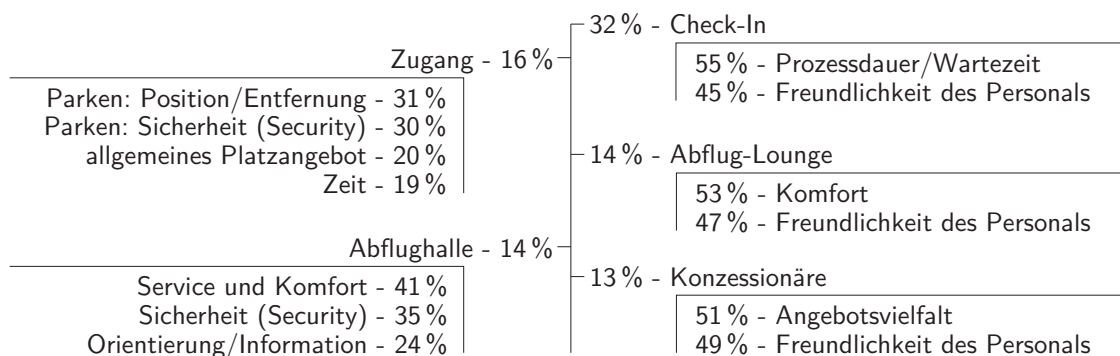


Abbildung 4.30: Gewichtung verschiedener Abfertigungs- und Serviceeinrichtungen innerhalb des Flughafenterminals und den darin aus Passagiersicht wesentlichen Qualitätskriterien [280].

In den dargestellten spezifischen Indikatoren und deren hierarchischen Ordnung ist der Bezug zu absoluten Messgrößen nicht vorhanden, sodass eine vollständige Ergebnisbewertung nicht durchgeführt werden kann. Für eine Implementierung der Passagierwahrnehmung müssen die qualitativen Indikatoren (z. B. Sicherheit, Service oder Komfort) in quantitative Größen überführt werden.

Ein wesentlicher Punkt bei der Berücksichtigung der Passagierwahrnehmung stellt die noch verfügbare Restzeit bis zum Abflug dar. Mit abnehmender Restzeit reagiert der Passagier zunehmend sensitiver auf (zusätzliche) Warte- und Prozesszeiten. Eine gemäß Tabelle 4.11 noch akzeptable Wartezeit von 12 Minuten beim Check-In (Economy) ist viel zu hoch, wenn der Check-In Schalter bereits in 10 Minuten schließt. Neben der absoluten Höhe der Wartezeit muss zusätzlich noch eine Relation zur verfügbaren Restzeit hergestellt werden. Der Einsatz der entwickelten Simulationsumgebung ermöglicht eine gezielte Auswertung von Szenarien unter Berücksichtigung der passagierspezifischen Warte-/Restzeit Verhältnisse an den jeweiligen Prozessstationen. Für die Berücksichtigung der Restzeit stehen die Berechnungsergebnisse von Flügen mit unterschiedlichen Passagierkategorien zur Verfügung (Geschäftsreisende, Touristen, gemischtes Klientel). Am Beispiel eines Fluges mit Touristen sind die Wartezeiten und die Relation von Warte- zu Restzeiten in den folgenden Abbildungen 4.31 und 4.32 dargestellt. Ein Flug besteht aus 150 Passagieren die an zwei Check-In Schaltern abgefertigt werden, wobei die Schalter zwei Stunden vor Abflug öffnen und 30 min vor Abflug schließen. Durch 60 durchgeführte Simulationsläufe stehen 9000 Datensätze für die Auswertung zur Verfügung. An den durchschnittlichen Wartezeiten (Tabelle 4.12) ist zu erkennen, dass die Touristen die höchste durchschnittliche Wartezeit in Kauf nehmen müssen und dass die Mischung beider Passagierkategorien zu geringeren Wartezeiten der Passagiere führt.

| Passagierkategorie | Wartezeit (min) | |
|---------------------|-----------------|----------|
| | μ | σ |
| Geschäftsreisende | 8,4 | 5,9 |
| Touristen | 15,9 | 7,2 |
| Gemischtes Klientel | 5,8 | 3,6 |

Tabelle 4.12.: Durchschnittliche Wartezeiten und Standardabweichung bei der Abfertigung von 150 Passagieren an zwei geöffneten Check-In Schaltern (Auswertung auf der Basis simulierter Daten).

Der in Abbildung 4.31 dargestellte Verlauf der Wartezeiten zeigt auf, wie lange ein Passagier warten muss, wenn er zu einem gegebenen Zeitpunkt die Check-In Schalter erreicht. Im Gegensatz zur durchschnittlichen Wartezeit aus Tabelle 4.12 ist der zeitliche Verlauf wesentlich aufschlussreicher. Passagiere, die sich in den ersten 30 min nach der

Schalteröffnung anstellen, weisen die höchsten Wartezeiten auf, während Passagiere in den letzten 30 min vor der Schalterschließung nur geringe Wartezeiten haben.

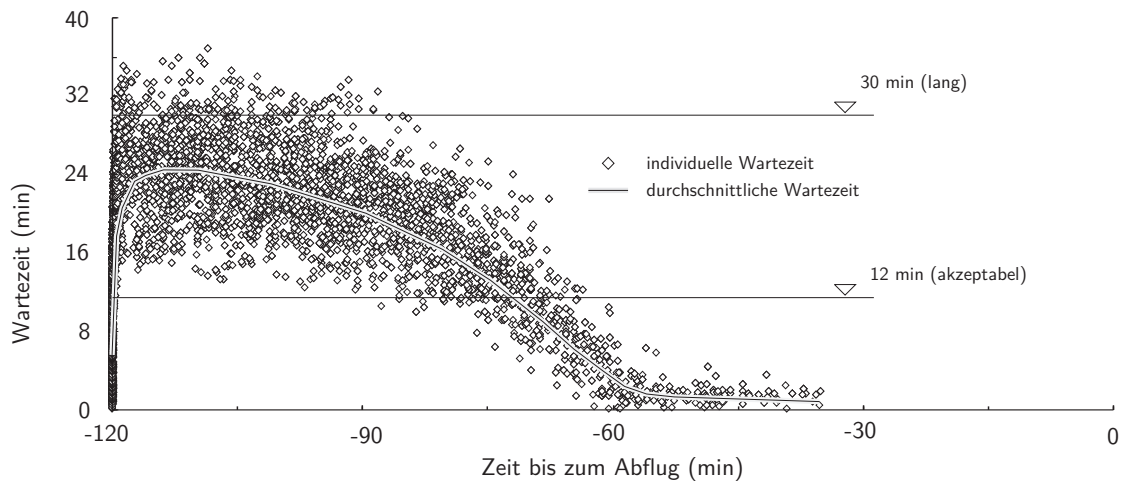


Abbildung 4.31: Wartezeit der Passagiere bei einem touristischen Flug mit zwei geöffneten Check-In Schaltern. Simulation der Abfertigung von jeweils 150 Passagieren in 60 Simulationsläufen.

Während die Wartezeit der neu ankommenden Passagiere beständig abnimmt, steigt der Verlauf der mit der Restzeit gewichteten Wartezeit aufgrund der abnehmenden Restzeit bis zum Schließen der Check-In Schalter anfangs leicht an (Abbildung 4.32). Über den Zeitverlauf ist zu erkennen, dass sich die Relation von Warte- zu Restzeit zu einem großen Teil in einem Korridor zwischen 0,2 und 0,4 bewegt.

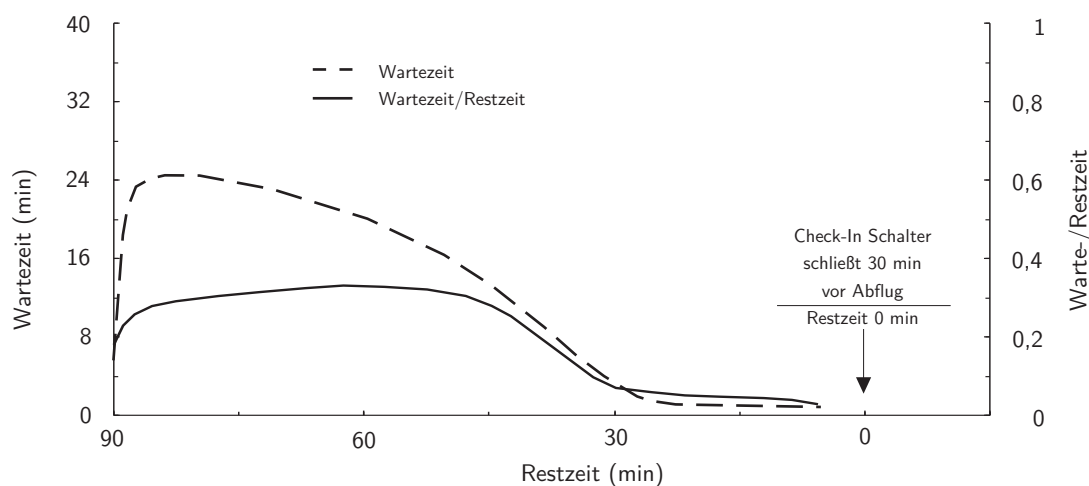


Abbildung 4.32: Die individuelle Wartezeit der Passagiere gewichtet mit der zur Verfügung stehenden Restzeit bei Erreichen der Warteschlange vor dem Check-In. Das Warte-/Restzeit Verhältnis weist im Gegensatz zur Wartezeit zwei ausgeprägte Plateaus auf.

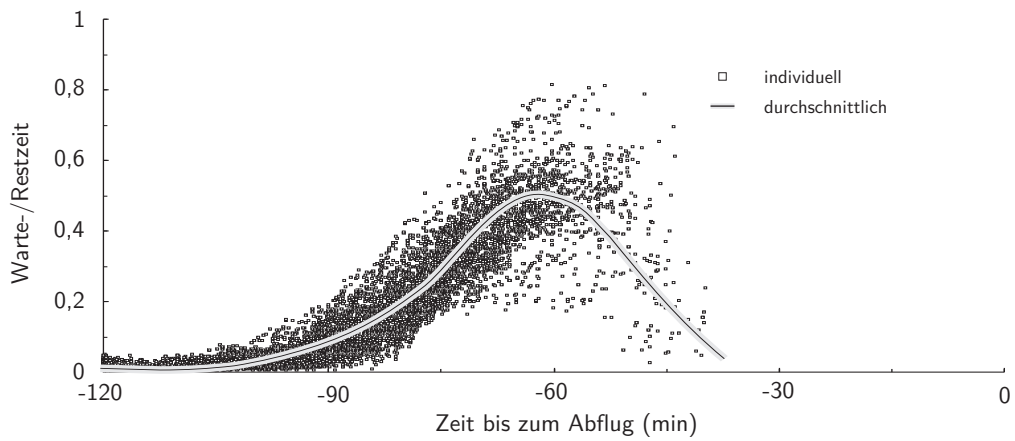
Wenn die Wartezeit gerade der verfügbaren Restzeit entspricht, weist die Relation einen Wert von 1 auf und der Passagier würde den Check-In gerade noch rechtzeitig erreichen. Der dargestellte Verlauf ist typisch für die Abfertigung eines Fluges mit überwiegend touristischer Klientel. Bereits 30 min vor dem Schließen der Check-In Schalter sind aufgrund des frühzeitigen Ankommens im Terminal kaum noch Warteschlangen zu verzeichnen. Mit Änderungen der Passagierkategorien geht auch eine signifikante Änderung des Verlaufs von Warte- zu Restzeit einher (Abbildung 4.33). Die geschäftlich reisenden Passagiere kommen später im Terminal an als Passagiere mit touristischer Reisemotivation. Dadurch sind zu Beginn der Abfertigung nur geringe Wartezeiten zu verzeichnen. Allerdings steigt der Verlauf der Warte-/Restzeit Relation deutlich stärker an (Abbildung 4.33(a)).

Der Korridor zwischen 0,2 und 0,4 wird deutlich verlassen und es treten vereinzelt Werte von 0,8 auf, was 30 min vor dem Schließen der Check-In Schalter einer Wartezeit von 24 min entspricht. Sind die Passagiere eines Fluges nicht klar nach geschäftlich und privat Reisenden zu trennen, ist aufgrund der gemischten Ankunftsverteilung die Wartezeit an den Check-In Schaltern auf einem durchgehend niedrigen Niveau (Abbildung 4.33(c)). Die Werte der Warte-/Restzeit Relation überschreiten die Größenordnung von 0,2 nur selten. In Betrachtung der Ergebnisse aus Abbildung 4.33 kann die Relation von Warte- zu Restzeit aus Sicht des Passagiers als Komfortkriterium verstanden werden. Eine Unterteilung des Komforts in drei Kategorien erscheint in Anlehnung an Tabelle 4.11 sinnvoll.

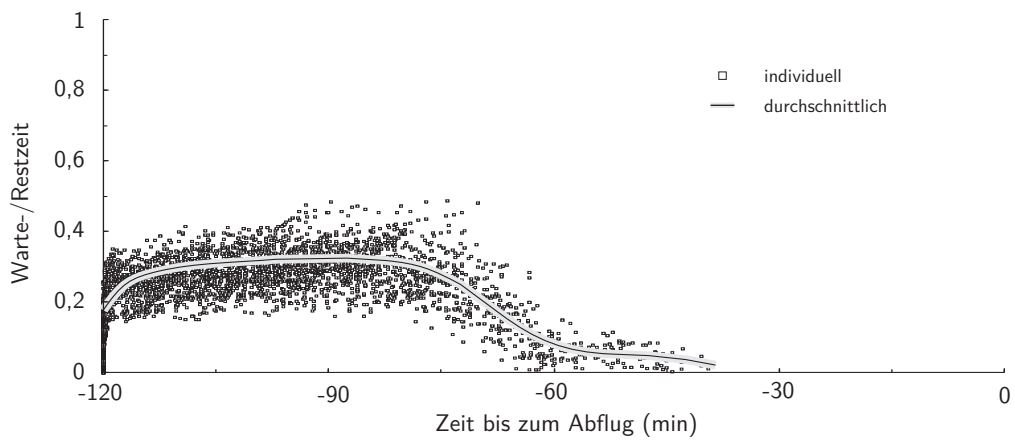
- Unter einem Wert von 0,2 ist der Komfort sehr gut. Bei einer hohen Restzeit ist zwar die absolute Wartezeit ebenfalls hoch, jedoch verbringt der Passagier nur einen geringen Anteil seiner verfügbaren Zeit mit dem Warten.
- Über einem Wert 0,4 ist der Komfort eingeschränkt. Bei Störungen in der Abfertigung könnten im weiteren Verlauf einige Passagiere den Check-In aufgrund zusätzlicher Wartezeiten nicht mehr rechtzeitig erreichen.
- Zwischen 0,2 und 0,4 ist der Komfort angemessen. Mögliche Störungen können kompensiert werden und lange Wartezeiten stehen einem ausreichenden Kontingent an Restzeit gegenüber.

Vom Standpunkt des Flughafenbetreibers ist somit kritisch zu hinterfragen, ob aus betriebswirtschaftlicher Sicht das Angebot eines sehr guten Komforts eine kosteneffiziente Maßnahme darstellt. Eine Neuausrichtung von Schalteranzahl und -öffnungszeiten könnte eine bessere Komfortausgestaltung des Abfertigungsprozesses nach sich ziehen. Ein Vorschlag für angepasste Schalteröffnungszeiten ist in Abbildung 4.34 dargestellt.

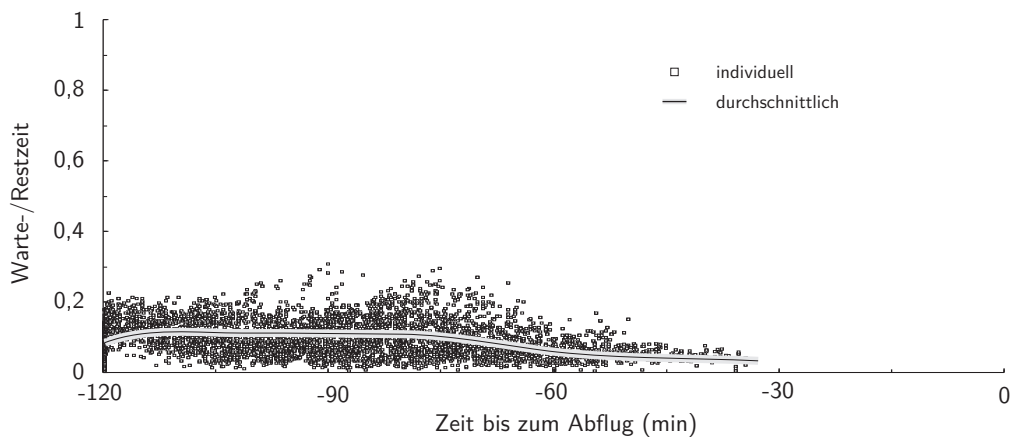
Für die Abfertigung der Geschäftsreisenden steht zu Beginn nur ein Schalter zur Verfügung und es werden 90 min vor Abflug zwei weitere Schalter geöffnet, die nach 30 min und 45 min wieder geschlossen werden. Bei der Abfertigung von Touristen und gemischter Klientel wird kein dritter Schalter benötigt. Es kann aber bei einem Flug mit überwiegend touristisch reisenden Passagieren der zweite Schalter bereits 30 min früher schließen oder



(a) Geschäftsreisende, 2 Check-In Schalter.



(b) Touristen, 2 Check-In Schalter.



(c) Geschäftsreisende und Touristen (Mix), 2 Check-In Schalter.

Abbildung 4.33: Verlauf von Warte- zu Restzeit am Check-In Schalter

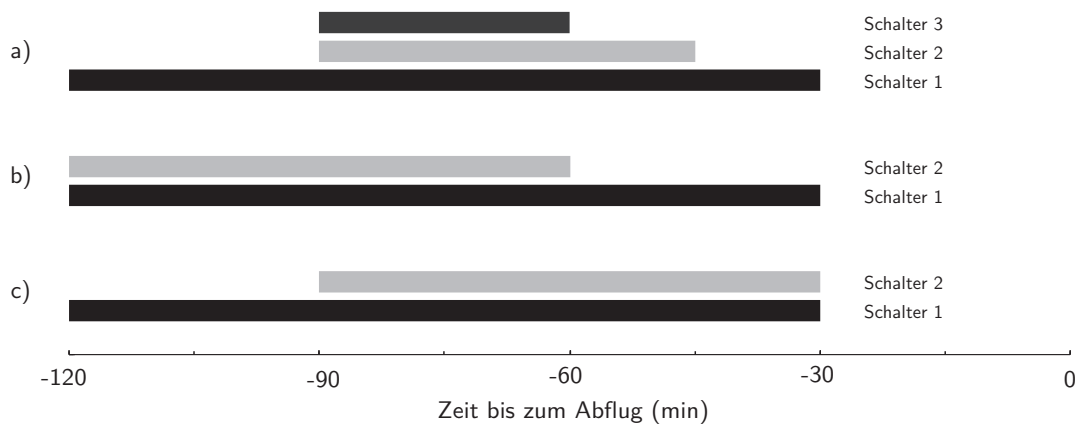
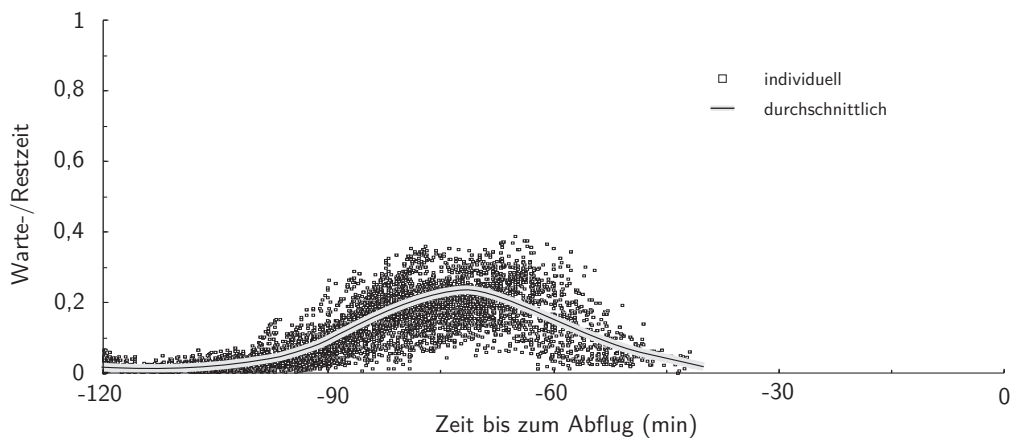


Abbildung 4.34: Schalteröffnungszeiten bei unterschiedlichen Passagierkategorien: Geschäftsreisende (a), Touristen (b) und gemischtes Klientel (c).

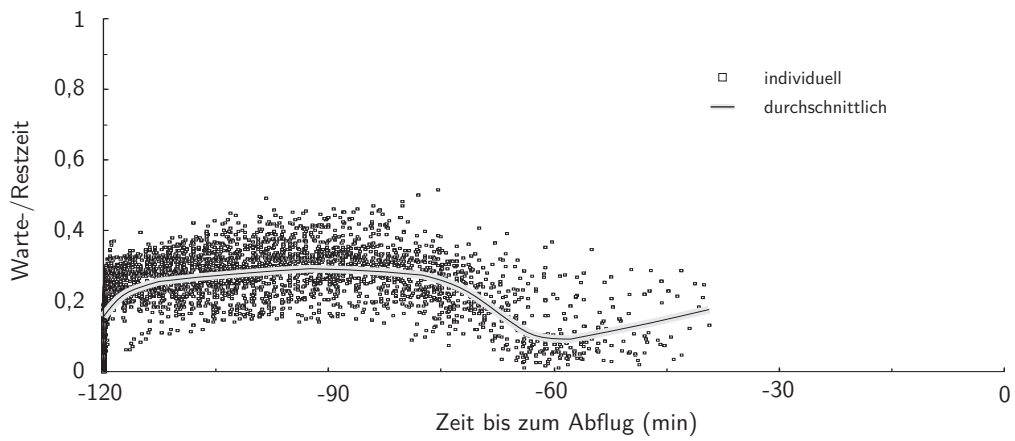
im Fall der gemischten Klientel 30 min später öffnen. In der nachfolgenden Abbildung 4.35 ist das harmonisierte Warte-/Restzeit Verhältnis dargestellt, welches unter Verwendung der spezifisch angepassten Schalteröffnungszeiten entsteht.

Für die Passagierabfertigung an der Sicherheitskontrolle kann die Warte-/Restzeit Relation ebenfalls als ein passagierbezogenes Qualitätskriterium genutzt werden (Abbildung 4.36). Als zeitlicher Bezugspunkt für die Definition der Restzeit ist 15 min vor Abflug gewählt. Je nach Flughafengröße und Lagekonstellation von Sicherheitskontrolle und Abfluggate kann die Wahl des Bezugspunktes unterschiedlich ausfallen. In der gewählten Beispielkonfiguration des Flughafens Dresden ist es für den Passagier problemlos möglich das betreffende Abfluggate rechtzeitig zu erreichen, wenn er die Sicherheitskontrolle 15 min vor Abflug passiert. Die an der Sicherheitskontrolle abgefertigten Passagiere entscheiden sich mit der in Abbildung 3.18 (S. 117) ausgewiesenen Wahrscheinlichkeit nach dem Check-In direkt zur Sicherheitskontrolle zu gehen oder eine Serviceeinrichtung des Flughafens aufzusuchen. Innerhalb der Simulationsumgebung entscheiden sich die Passagiere alle 10 min erneut, ob sie zur Sicherheitskontrolle gehen wollen.

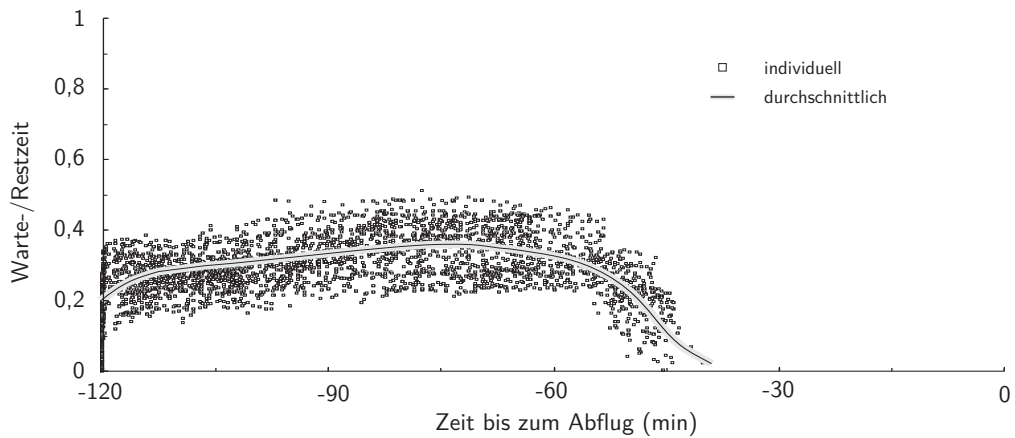
Die Auswirkungen der stetig abnehmenden Restzeit und die individuelle Entscheidung, die Sicherheitskontrolle erst zu einem späteren Zeitpunkt passieren zu wollen, hat einen großen Einfluss auf den gesamten Abfertigungsprozess und somit auch auf die Qualitätswahrnehmung des Passagiers. Da für Ankunft der Passagiere an der Sicherheitskontrolle ein geringeres Zeitfenster im Vergleich zum Check-In zur Verfügung steht, ist es zu erwarten, dass die Warte-/Restzeit Relation auch signifikant höhere Werte ausweisen wird. Für die Untersuchungen erfolgt die Abfertigung von 150 Passagieren an zwei Check-In Schaltern (zwei Stunden vor Abflug geöffnet) unter der Berücksichtigung der bereits beschriebenen Passagierkategorien. Für die Abfertigung der Passagiere steht je Flug eine



(a) Geschäftsreisende, angepasste Schalteröffnungszeiten.



(b) Touristen, angepasste Schalteröffnungszeiten.



(c) Geschäftsreisende und Touristen (Mix), angepasste Schalteröffnungszeiten.

Abbildung 4.35: Harmonisierung der Warte-/Restzeit Relation durch eine angepasste Schalteröffnungsstrategie.

Sicherheitskontrollspur zur Verfügung. Analog zum Check-In werden ebenfalls 60 Simulationsläufe durchgeführt. Als Grundlage für die Simulation wird die in Abbildung 4.36 dargestellte Terminalkonfiguration des Flughafens Dresden genutzt.

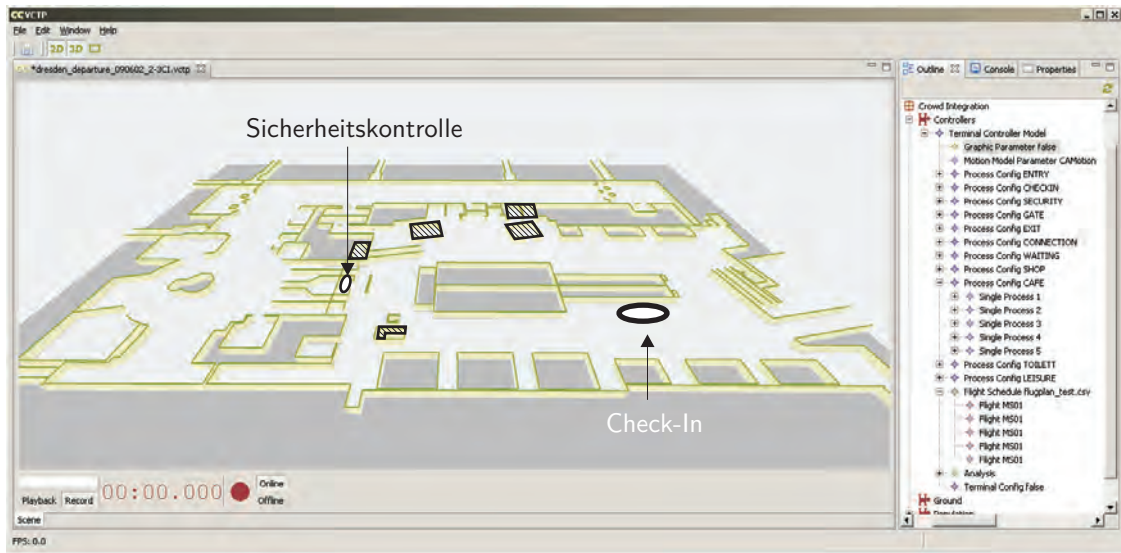
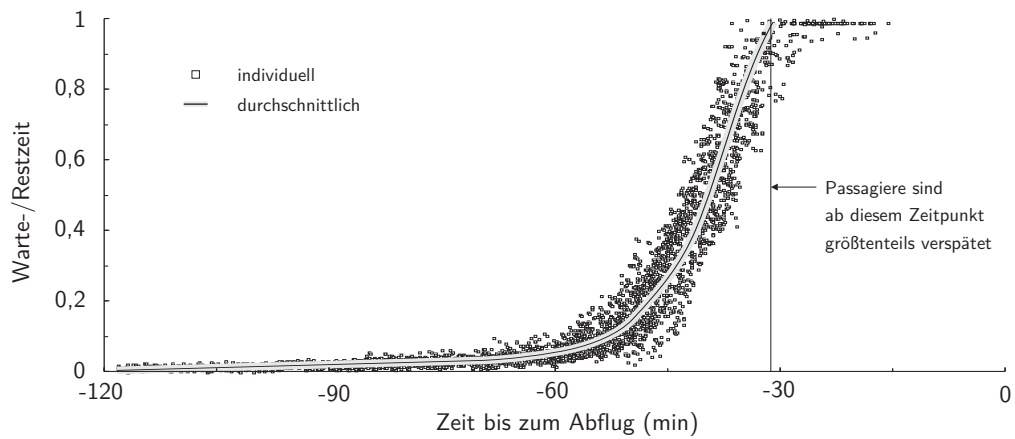


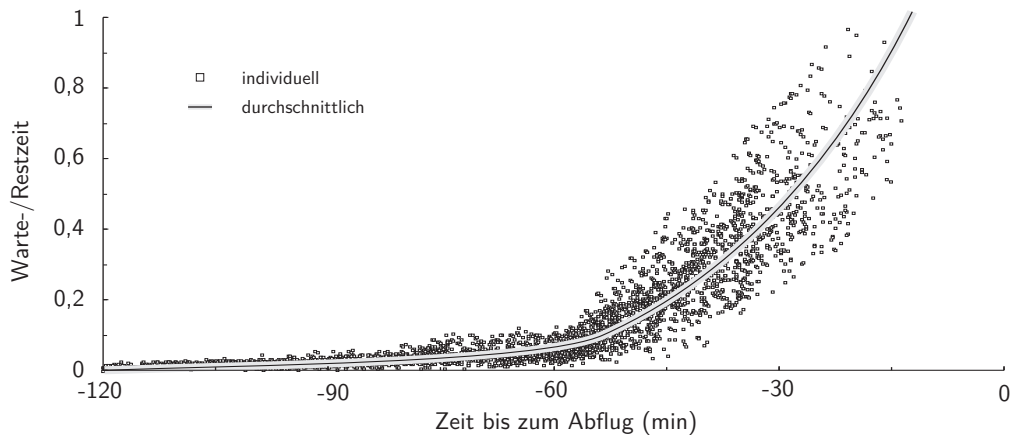
Abbildung 4.36: Terminalstruktur des Flughafens Dresden zur Analyse der Warte-/Restzeit Relation an der Sicherheitskontrolle. Die schraffierten Bereiche kennzeichnen die Serviceeinrichtungen des Flughafens (Cafe, Shops sowie Aussichtsplattform).

Für die Geschäftsreisenden ergeben sich mit hoher Wahrscheinlichkeit bei etwa 30 min vor Abflug bereits so lange Wartezeiten, dass sie ihren Flug nicht mehr rechtzeitig erreichen können (Abbildung 4.37(a)). Bei den Touristen tritt dieser Fall auch auf, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit aufgrund der höheren Ergebnisbandbreite wesentlich geringer (Abbildung 4.37(b)). Ähnlich zum Check-In geht die Abfertigung der gemischten Passagierklientel mit geringen Werten der Warte-/Restzeit Relation und somit einem höheren Komfort einher (Abbildung 4.37(c)). Für die Sicherheitskontrolle müssen aufgrund der geringeren Restzeit die Grenzen für eine angemessenen Warte-/Restzeitwert nach oben verschoben werden. Der angestrebte Komfortkorridor sollte sich zwischen 0,3 und 0,6 bewegen.

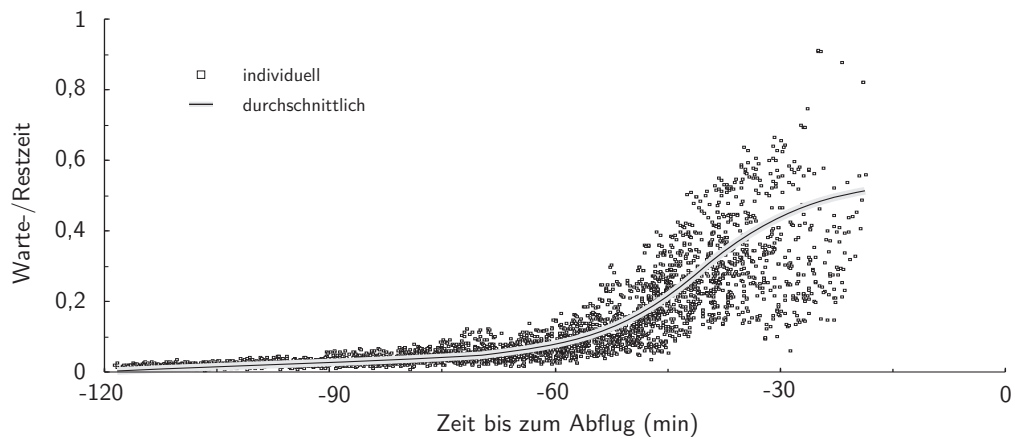
Inwieweit die vorgeschlagene Methodik der Warte-/Restzeit Relation Anwendung im operationellen Betrieb finden kann, soll exemplarisch durch die Simulation eines Beispieltages am Flughafen Dresden gezeigt werden. Für eine problemorientierte und praxisrelevante Auswertung müssten die nachfolgend geschätzten Parameter gezielt erhoben und validiert werden.



(a) Geschäftsreisende



(b) Touristen



(c) Gemischte Klientel

Abbildung 4.37: Verlauf der Warte-/Restzeit Relation an der Sicherheitskontrolle.

4.3.3. Abfertigungsprozesse am Flughafen Dresden (Abflug)

Für die Simulation der Terminalprozesse steht der Flugplan des Flughafens Dresden vom 24.09.2009 zur Verfügung (Tabelle 4.13, der vollständige Flugplan ist in Tabelle A.2 im Anhang auf Seite 203f hinterlegt). Da keine realen Daten für die tatsächliche Passagieranzahl und -kategorien vorliegen, werden die fehlenden Informationen geschätzt. Die mittlere Passagieranzahl je Flugzeugtyp multipliziert mit einem Sitzladefaktor ergibt dabei die Passagieranzahl. Der Sitzladefaktor wird abhängig von der Passagierkategorie definiert: 0,85 für touristische Flüge, für Flüge mit Geschäftsreisenden 0,75 und für gemischte Passagierklientel 0,7.

| Flugnummer | Ziel | Abflugzeit (min) | Airline | Schalter | Abfluggate | Flugzeugtyp |
|------------|---------------|------------------|-------------------|----------|------------|-------------|
| AB 9186 | Mallorca | 330 | Air Berlin | 7-9 | 4 | B7378 |
| AB 3296 | Mallorca | 330 | Air Berlin | 7-9 | 2 | B7378 |
| LH 1067 | München | 365 | Lufthansa | 23-25 | 8 | RJ85 |
| O2 538 | Warschau | 395 | Jet Air | 23-25 | 3 | JS32 |
| C9 1680 | Zürich | 415 | Cirrus Airlines | 23-25 | 5 | DO328 |
| LH 1063 | Frankfurt | 435 | Lufthansa | 23-25 | 9 | B7373 |
| AB 6803 | Düsseldorf | 480 | Air Berlin | 3-5 | 4 | A3191 |
| 4U 2025 | Stuttgart | 485 | Germanwings | 29-30 | 2 | A3191 |
| OS 218 | Wien | 485 | Austrian Airlines | 23-25 | 5 | DHC83 |
| C9 1651 | Hamburg | 490 | Cirrus Airlines | 23-25 | 7 | DO328 |
| 4U 027 | Köln-Bonn | 505 | Germanwings | 29-30 | 9 | A3191 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 4U 029 | Köln-Bonn | 1195 | Germanwings | 29-30 | 4 | A3191 |
| AB 6813 | Düsseldorf | 1220 | Air Berlin | 3-5 | 8 | B7377 |
| LH 867 | Düsseldorf | 1250 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ900 |
| OS 217 | Leipzig-Halle | 1315 | Austrian Airlines | 23-25 | 11 | DHC84 |

Tabelle 4.13.: Flugplan des Flughafens Dresden vom 24.09.2009.

Für jeden Flug wird eine angemessene Passagierkategorie bestimmt, wobei vereinfachend die folgenden Einteilung gilt: geschäftlich, wenn es sich um einen innerdeutschen Flüge mit einer geplanten Abflugzeit vor 10 Uhr (600 min) handelt, touristisch bei allen Flügen nach Kos, Mallorca, Monastir, Antalya, Las Palmas und Varna. Alle verbleibenden Flüge werden der gemischten Passagierkategorie zugeordnet. Die passagierbezogenen Parameter sind gemäß Kapitel 3.2 (S. 98ff) implementiert und die prozessbezogenen Verteilungen ergeben sich aus den in Kapitel 3.4 (S. 119ff) erhobenen Messdaten. Innerhalb

der Simulation werden nur Passagiere und keine Besucher abgebildet, da sich die Auswertungen primär auf die Abfertigungseinrichtungen des Terminals beziehen. Ohnehin sind aufgrund des Flugplans und der gegenwärtigen Abfertigungskapazität des Flughafenterminals von 3,5 Millionen Passagieren ([217]) keine Engpässe durch eine zu hohe Auslastung der Bewegungsflächen zu erwarten. Für die Modellierung der Terminalstrukturen steht ein Grundrissplan der Abflugebene zur Verfügung. Neben den Einrichtungen zur Passagierabfertigung (Check-In Schalter, Sicherheits- und Passkontrolle) gehen aus diesem Plan auch die Positionen der Serviceeinrichtungen (Gastronomie, Einkaufsmöglichkeiten, Toiletten und Warteflächen) hervor. Für jeden Flug stehen drei Check-In Schalter zur Verfügung, die zwei Stunden vor Abflug öffnen und 30 min vor Abflug schließen. Für die Sicherheitskontrollen stehen drei permanent geöffnete Kontrollspuren zur Verfügung. Die Passkontrollen öffnen 90 min vor und schließen mit Erreichen der Abflugzeit. Die Bordkartenkontrolle beginnt 30 min vor und endet ebenfalls zum Zeitpunkt des Abfluges. Alle Serviceeinrichtungen des Terminals unterliegen keiner zeitlichen Beschränkung und stehen dem Passagier jederzeit zur Verfügung.

Der Passagier durchläuft im Terminal alle notwendigen Abfertigungsprozesse (*departure*). Wenn er das Terminal betritt, geht er direkt zum Check-In, wenn er nicht bereits im Besitz einer Bordkarte ist. Pauschal ist ein Anteil von 10 % bereits eingechekter Passagiere festgelegt. Mit vorhandener Bordkarte hält sich der Passagier frei im öffentlichen Bereich auf und entscheidet nach der noch bis zum Abflug vorhandenen Zeit, ob er die Sicherheitskontrolle aufsucht. Die Wahrscheinlichkeit, dass er die Sicherheitskontrolle aufsucht ergibt sich aus Abbildung 3.18 (S. 117). Er hat die Wahl zwischen allen im öffentlichen Bereich vorhandenen Serviceeinrichtungen. Der Passagier überprüft seine Entscheidung für eine Serviceeinrichtung alle 10 min. Passagiere, die Mitglied einer Gruppe sind, entscheiden sich gemeinsam für ein Ziel. Jeder Passagier der Gruppe wählt eine Serviceeinrichtung aus und die Serviceeinrichtung mit der größten Häufigkeit wird von allen Gruppenmitgliedern angesteuert (bei Gleichheit wird aus den häufigsten Zielen eines zufällig ausgewählt). Wenn ein Passagier die Serviceeinrichtung erreicht hat, hält er sich dort 10 min auf (Erwartungswert einer Normalverteilung, Standardabweichung beträgt 2 min). Nach dem Passieren der Sicherheitskontrolle kann der Passagier alle weiteren Abfertigungsprozesse durchlaufen und Serviceeinrichtungen im nicht-öffentlichen Bereich nutzen. Für die Flüge nach Monastir (Tunesien), Antalya (Türkei) und Varna (Bulgarien) erfolgt vor dem Betreten des Wartebereichs eine Passkontrolle (siehe Kapitel 1.4, S. 29ff). Wenn die Passagiere den Warteraum nach der Passkontrolle betreten, verlassen sie diesen bis zum Abflug nicht mehr. Passagiere, die das Gate nicht vor der Abflugzeit oder den Check-In nicht innerhalb der Öffnungszeiten erreichen, gelten als verspätet und werden aus der Simulation entfernt.

Für die nachfolgende Auswertung werden 60 Simulationsläufe durchgeführt, Messdaten an jeder Abfertigungseinrichtung erhoben (5 min Takt), die Warte- und verfügbare Rest-

zeit jedes Passagiers aufgezeichnet und abschließend über alle Simulationsläufe gemittelt. Während bei den ersten Testuntersuchungen mit einer Sicherheitskontrollspur (Abbildung 4.37) das Warte-/Restzeit Verhältnis den kritischen Wert von 1 erreicht hat, ist bei der Betrachtung des Verlaufes während der Simulation kein kritischer Zustand zu erkennen (Abbildung 4.38). Zu Beginn des Tages erreicht der Verlauf das Maximum bei ungefähr 0,3 (verursacht durch zwei frühe und zeitgleich stattfindenden Abflüge) und pegelt sich dann ungefähr bei 0,04 ein.

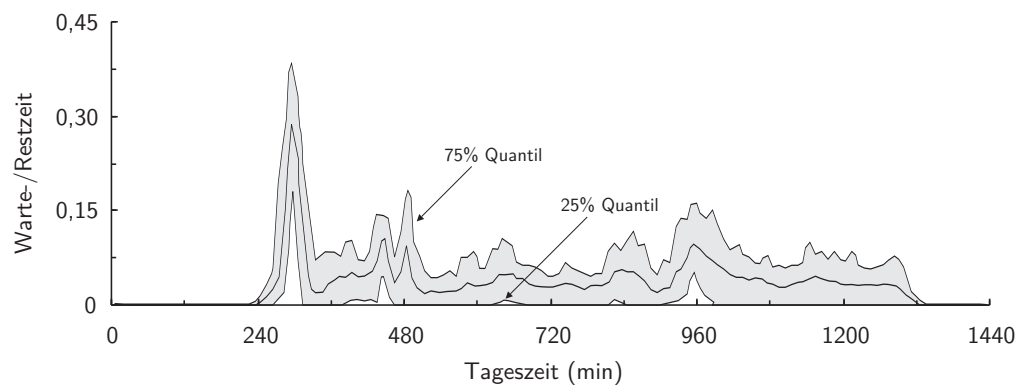


Abbildung 4.38: Verlauf des Warte-/Restzeit Verhältnisses über den Tag mit drei offenen Sicherheitskontrollspuren. Die schwarze Linie bildet den Mittelwert ab und der grau hervorgehobene Bereich ist von den Quantilen $Q_{0.25}$ und $Q_{0.75}$ eingegrenzt.

Kleinere, durch den Flugplan bedingte Abflugspitzen treten zwischen 7-8 Uhr (420-480 min) und gegen 16 Uhr (960 min) auf und verursachen erwartungsgemäß einen Anstieg des Warte-/Restzeit Verhältnisses auf etwa 0,1. Durch die permanente Öffnung der Sicherheitskontrollen und die Möglichkeit, dass der Passagier alle Serviceeinrichtungen im öffentlichen Bereich des Terminals beliebig nutzen kann, werden die Passagierströme räumlich entzerrt, was somit direkt zu einer Steigerung des Komforts führt. Der Passagier verbringt demzufolge nur noch einen geringen Teil seiner verfügbaren Restzeit mit dem Warten vor den Sicherheitskontrollen. Im Gegensatz dazu, geht der Passagier nach dem Betreten des Terminals ohne Umwege zum Check-In Schalter (wenn nicht bereits im Besitz seiner Bordkarte) und wartet hier auf den Erhalt seiner Bordkarte. Je nach Check-In Schalter und den dort abgefertigten Flügen variieren die Werte für Warte-/Restzeit. Die Schalter 3-5 sowie 7-9 fertigen Touristenflüge ab, was in Abbildung 4.39 aufgrund der hohen Werte klar zu erkennen ist.

Gerade die Abfertigung der Flüge AB 9186 und AB 3296 führt unter Berücksichtigung der Warte-/Restzeit Relation mit Werten von 0,5 definitionsgemäß zu einer Komforteinschränkung der Passagiere. Die weiteren über den Tag verteilten Abfertigungen sind qualitativ in ihrem Verlauf vergleichbar und erreichen maximale Werte von ungefähr

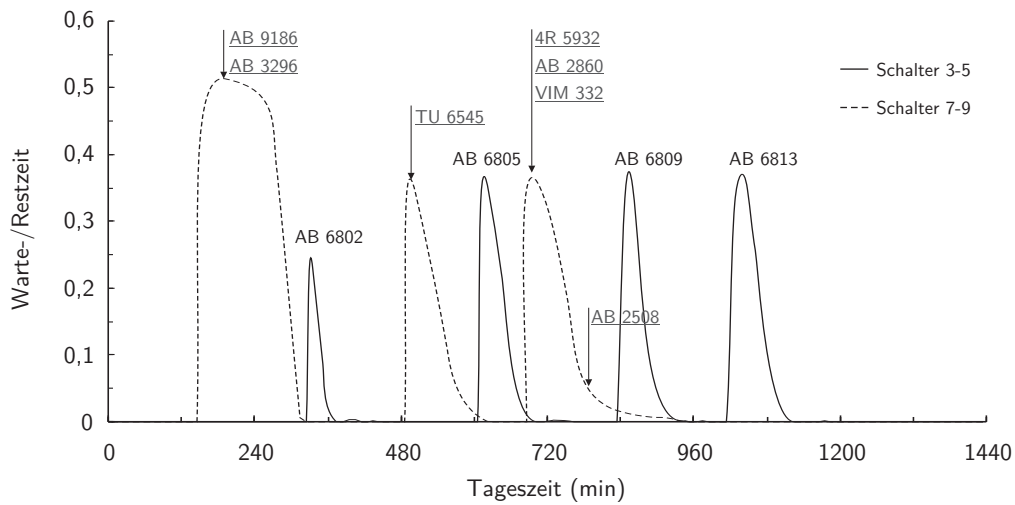


Abbildung 4.39: Verlauf der Warte-/Restzeit Relation an Check-In Schaltern mit typisch touristischer Klientel. Die Flugnummern sind separat hervorgehoben, um eine leichtere Zuordnung zu ermöglichen.

0,38. Die Flüge an den Schalter 29-30 werden ebenfalls hauptsächlich durch Touristen genutzt (Abbildung 4.40) und zeigen somit einen vergleichbaren qualitativen Verlauf. An den Schaltern 23-25 erfolgt zum größten Teil die Abfertigung von überwiegend geschäftlich reisenden Passagieren. Aufgrund der zahlreich zur Verfügung stehenden Schalter kommt es im Rahmen der Simulationsläufe zu keinen wesentlichen Einschränkungen. Das Verhältnis von Warte-/Restzeit überschreitet nur zweimal den Wert von 0,1 und weist im sonstigen Tagesverlauf einen Mittelwert von etwa 0,04 auf.

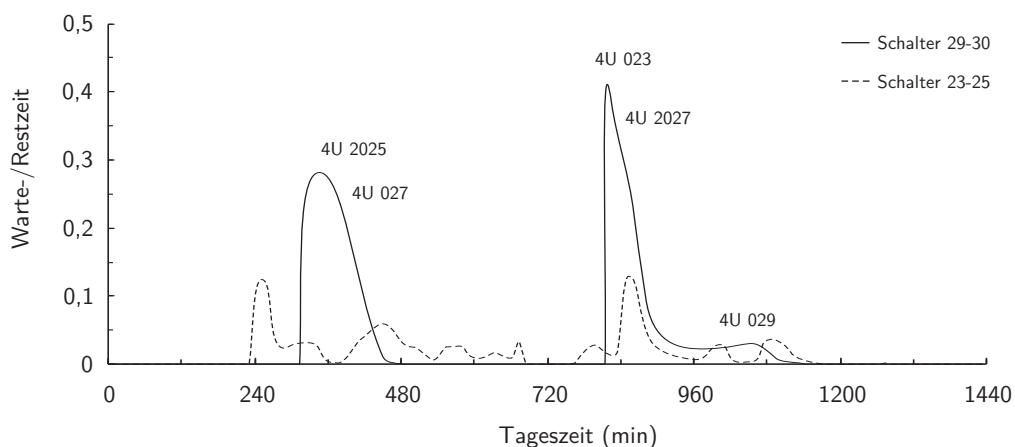


Abbildung 4.40: Verlauf der Warte-/Restzeit Relation an Check-In Schaltern mit überwiegend geschäftlich Reisenden. Die Flugnummern sind separat hervorgehoben, um eine leichtere Zuordnung zu ermöglichen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die zahlreichen Flüge an den Schaltern 23-25 nicht dargestellt.

Neben den analytischen Auswertungsmethoden bietet die entwickelte Anwendungsumgebung auch die Möglichkeit, den Verlauf der Simulation visuell aufbereitet zu betrachten. Dabei ist sowohl eine zweidimensionale Übersichtsdarstellung als auch die Einblendung der (dreidimensional) animierten Passagiere möglich, um den Effekt einer wirklichkeitsnahen Passagierabfertigung zu verstärken (Abbildung 4.41).

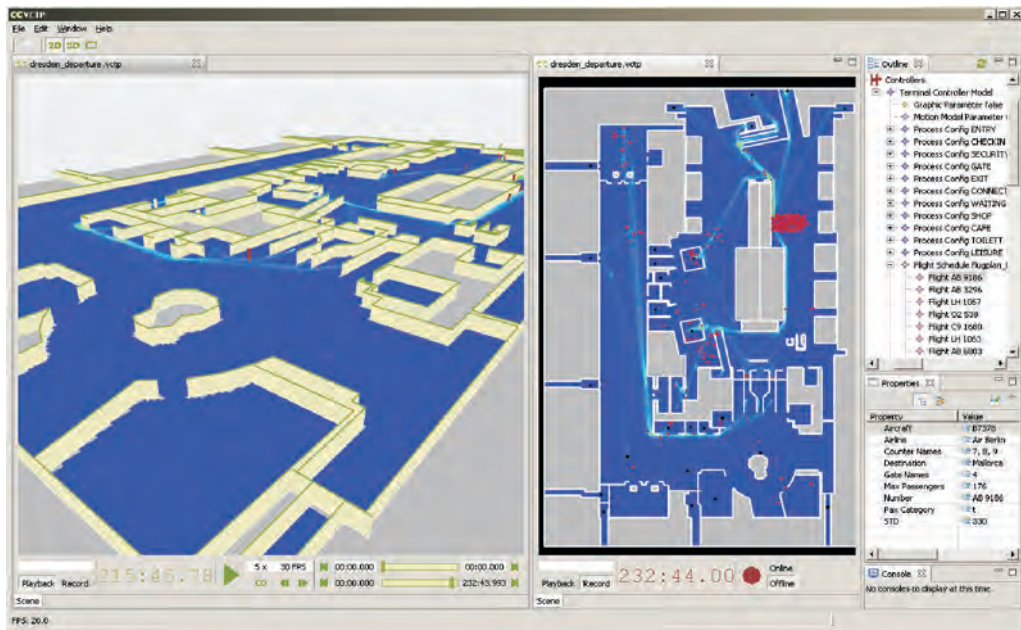


Abbildung 4.41: Anwendungsumgebung mit unterschiedlichen Darstellungsformen.

Während das Einstiegsverhalten der Passagiere noch als eindimensionaler Prozess hinreichend genau beschrieben werden kann, muss die zeitliche und räumliche Dynamik des Passagierverhaltens im Terminal mit einem weitaus komplexeren Modellansatz abgebildet werden. Auch die für die Implementierung notwendigen Eingangsdaten weisen einen wesentlich größeren Umfang auf (z. B. Terminalgeometrie, Festlegung aller Prozessstationen, Beschreibung der Passagierabfertigung bei jedem Prozess, Öffnungszeiten oder Flugplan). Die in den vorangegangenen Kapiteln erstellten Grundlagen zur Prozess- und Bewegungsbeschreibung stellen die Basis für die erfolgreiche Implementierung dar. Die Simulation der Passagierabfertigung am Beispiel des Flughafens Dresden zeigt, dass die entwickelte Anwendungsumgebung ein geeignetes Werkzeug für die Optimierung der Abfertigungsprozesse innerhalb des Terminals darstellt. Durch die mikroskopische Modellierung des Bewegungsverhaltens ist der Passagier in der Lage, sich eigenständig in komplexen Strukturen zu bewegen und Hindernissen auszuweichen.

Das gewählte Beispiel der Analyse des Warte-/Restzeit Verhältnisses stellt nur eine exemplarische Anwendung dar. Für detailliertere Auswertungen müssen konkrete Problemstellungen und Optimierungsansätze vorliegen, die dann durch den Einsatz der entwickelten stochastischen Modelle und der modulbasierten Implementierung validiert werden

können. Auch ist es notwendig, die Eingangsparameter weiter zu konkretisieren und unzureichende Beschreibungen zu vervollständigen (z. B. Öffnungszeiten der Check-In Schalter und der Sicherheitskontrolle oder die flugbezogene Passagierzahl). Die zukünftigen Herausforderungen bestehen in der konsequenten Nutzung des Potenzials der entwickelten Anwendungsumgebung für die Beantwortung praktisch relevanter Fragestellungen und der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der implementierten Modellansätze bezüglich der Beschreibung von passagier- und gruppenspezifischen Verhaltens- und Entscheidungsregeln.

5 | Schlussbetrachtungen

Mit der Entwicklung eines stochastischen Bewegungsmodells basierend auf den allgemeinen Annahmen des zellularen Automaten wurden die Grundlagen für die Modellierung des Passagierverhaltens im Terminal geschaffen. Vorhandene Defizite aufgrund der verwendeten diskreten Gitterstruktur wurden effizient bereits auf Modellebene kompensiert. Durch die agentenorientierte Umgebungsanalyse und Routenplanung sowie die Abbildung langreichweitiger Interaktionen unter den Agenten wurde die Entwicklung des stochastischen Bewegungsmodells vervollständigt. Validierungen anhand des Fundamentaldiagramms für Fußgänger zeigen, dass das entwickelte Modell in der Lage ist, das erwartete Geschwindigkeitsverhalten mit steigender Personendichte quantitativ abzubilden. Weiterhin konnten auch grundlegende Selbstorganisationseffekte (z. B. Bahnbildung) reproduziert werden.

Für die Anwendung des stochastischen Modells zur Abbildung des Passagierverhaltens wurde das Bewegungsverhalten der Passagiere am Flughafen Dresden detailliert analysiert. Die Verwendung eines videogestützten Personenfolgesystems erlaubt dabei eine effiziente Kategorisierung der Passagiere und Auswertung des Bewegungsverhaltens hinsichtlich des Geschlechts, der Reisemotivation (privat oder geschäftlich), der Gruppengröße sowie nach Gepäckart und -anzahl. Neben den passagierbezogenen Analysen wurden am Flughafen Stuttgart prozessbezogene Datenerhebungen durchgeführt [163, 164]. Diese Erhebungen stellen eine valide Basis für die Modellierung der Abfertigungsprozesse dar und erlauben die Ableitung von spezifischen Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Prozessbeschreibung.

Nach der Entwicklung des stochastischen Bewegungsmodells und der gezielten Datenerhebung zur Modellkalibrierung sowie der Validierung der Abfertigungsprozesse im Terminal (Check-In und Sicherheitskontrolle) wurde eine effiziente Anwendungsumgebung erstellt. Für die Abbildung von Terminalstrukturen, Abfertigungsprozessen und Bewegungsmodellen wurden allgemeine Schnittstellen definiert und spezifische Schnittstellen zur Kopplung von Modell, Benutzeroberfläche und Animation bereitgestellt. Der modulare Aufbau der Anwendungsumgebung bietet den Vorteil, einzelne Module nicht statisch verknüpfen zu müssen sondern durch Schnittstellen eine hohe Anwendungsflexibilität zu gewährleisten. So können beispielsweise beliebige mathematische Ansätze zur Bewegungsmodellierung unter Einhaltung der Schnittstellenanforderungen implementiert werden, ohne die angrenzenden Module auf die jeweilige Implementierung anzupassen. Aus Sicht der wissenschaftlichen Weiterentwicklung erscheint es sinnvoll, mehrere Modelle zur Abbildung des Bewegungsverhaltens innerhalb der Anwendungsumgebung zu koppeln und somit einen adaptiven, problemorientierten Modelleinsatz zu ermöglichen.

Am Beispiel der passagierbezogenen Prozessbewertung und der Simulation der Abfertigungsprozesse am Flughafen Dresden ist zu erkennen, dass das entwickelte stochastische Bewegungsmodell das Verhalten des Passagiers angemessen bilden kann. Durch die anwendungsorientierte Implementierung steht eine Vielzahl von geeigneten Detaillösungen zur Verfügung, um den zukünftigen wissenschaftlichen und praxisrelevanten Herausforderungen der Passagierdynamik zu begegnen. Als Ausblick auf mögliche Entwicklungstendenzen sollen kurz potentielle Forschungs- und Anwendungsfelder skizziert werden:

- Entwicklungsumgebung für die Kalibrierung von Bewegungsverfolgungssystemen,
- Untersuchungen des gruppenspezifischen Bewegungsverhaltens,
- Optimierung der Passagierabfertigungsprozesse (zeitlicher Verlauf und räumliche Anordnung) und Verbesserung des Situationsbewusstseins,
- Gestaltung des Non-Aviation Bereichs an Verkehrsflughäfen,
- Passagierwegführung im Terminal für Regelbetrieb und Notfall.

Entwicklungsumgebung für die Kalibrierung von Bewegungsverfolgungssystemen

Die Entwicklung von videogestützten Systemen zur Bewegungsverfolgung stellt gerade innerhalb von Gebäuden und unter erschwerten Randbedingungen (z. B. Personenansammlungen oder wechselnde Lichtverhältnisse) eine große Herausforderung dar. Die entwickelten Algorithmen müssen in der Lage sein, die Position der Personen im Raum exakt wiederzugeben. Eine Validierung wird dabei insoweit erschwert, dass die reale Position zu jedem Zeitpunkt bekannt sein muss. Durch die Verwendung der virtuellen Terminalumgebung könnten die animierten Simulationsläufe einem Bewegungsverfolgungssystem zur Verfügung gestellt werden (Abbildung 5.1). Im direkten Vergleich zwischen den in der Simulation exakt bekannten Passagierpositionen und den Trajektorien des Bewegungsverfolgungssystems kann dann eine Aussage zur Qualität der Algorithmen getroffen werden.

Untersuchungen des gruppenspezifischen Bewegungsverhaltens

Eine wesentliche Eigenschaft des individuellen Bewegungsverhaltens ist durch zwischenmenschliche und gruppenspezifische Interaktionen begründet. Innerhalb der Aufzeichnungen am Flughafen Dresden konnte bereits festgestellt werden, dass sich größere Gruppen offensichtlich aus strategisch/taktischen Erwägungen in kleinere Gruppen aufteilen, um Hindernisse schneller umgehen zu können. Dieser Effekt ist durch das vereinfachte Modell der Gruppendynamik unter Verwendung von *boids* nicht erfasst [160]. Im Rahmen von wissenschaftlichen Datenaufnahmen sollte das Bewegungsverhalten von Personen innerhalb einer Gruppe detailliert untersucht und anschließend in ein geeignetes Modell überführt werden.

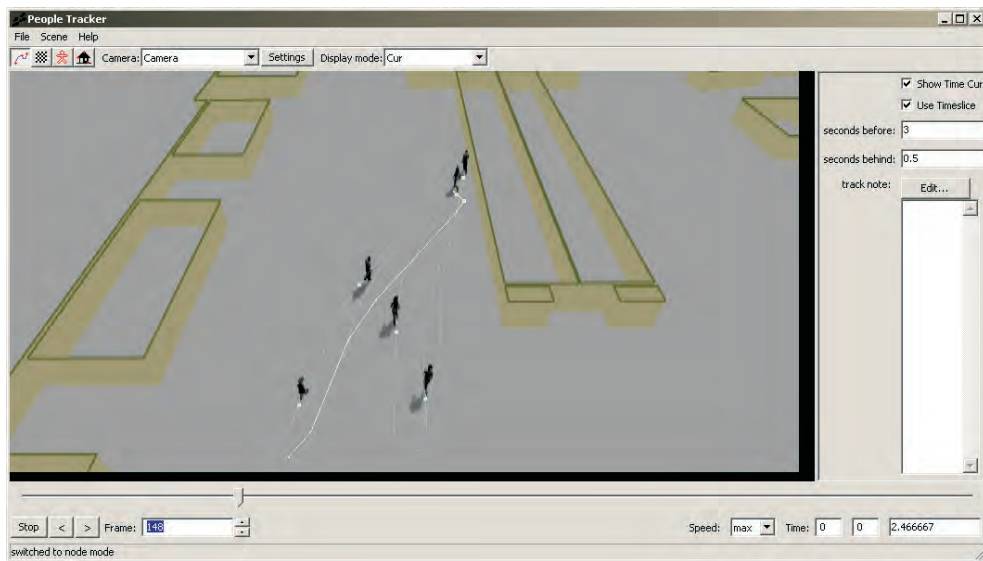


Abbildung 5.1: Durch die Nutzung der entwickelten Anwendungsumgebung könnten spezifische Szenarien mit großen Menschenansammlungen oder auch unterschiedlichen Lichtverhältnissen simuliert werden, um videogestützte Personenverfolgungssysteme zu kalibrieren.

Optimierung von Abfertigungsprozessen und Verbesserung des Situationsbewusstseins

Durch die zunehmend auch von den Airlines fokussierte Entwicklung zur Nutzung von automatischen Systemen zum Check-In ist zu erwarten, dass die damit verbundenen Konsequenzen bezüglich der Ankunftszeit im Terminal die nachgelagerte Sicherheitskontrolle wesentlich beeinflussen. Durch den Einsatz des entwickelten stochastischen Bewegungsmodells in einer virtuellen Terminalumgebung könnten dabei relevante Entwicklungstendenzen detailliert untersucht und bewertet werden, mit dem Ziel optimierte Prozessabläufe zu erstellen. Auch der Einsatz neuer Technologien zur Sicherheitssteigerung (z. B. erweiterte Detektionssysteme oder Körperscanner) kann eine andere Auslegung von Warte- und Prozessflächen nach sich ziehen. Des Weiteren kann die virtuelle Terminalumgebung dazu beitragen, das Situationsbewusstsein des Personals bereits im Vorfeld zu schulen, indem die positiven und negativen Auswirkungen konkreter Handlungen direkt nachvollzogen werden können. In diesem Zusammenhang ist auch eine Weiterentwicklung der Personanimation (Abbildung 5.2) vorstellbar, um innerhalb der virtuellen Umgebung mit den Agenten direkt interagieren zu können.

Gestaltung des Non-Aviation Bereichs an Verkehrsflughäfen

Unter Berücksichtigung der ständigen Weiterentwicklung der Flughäfen ist zu erkennen, dass der Non-Aviation Bereich zunehmend an Bedeutung gewinnt [281]. Nach einer Studie

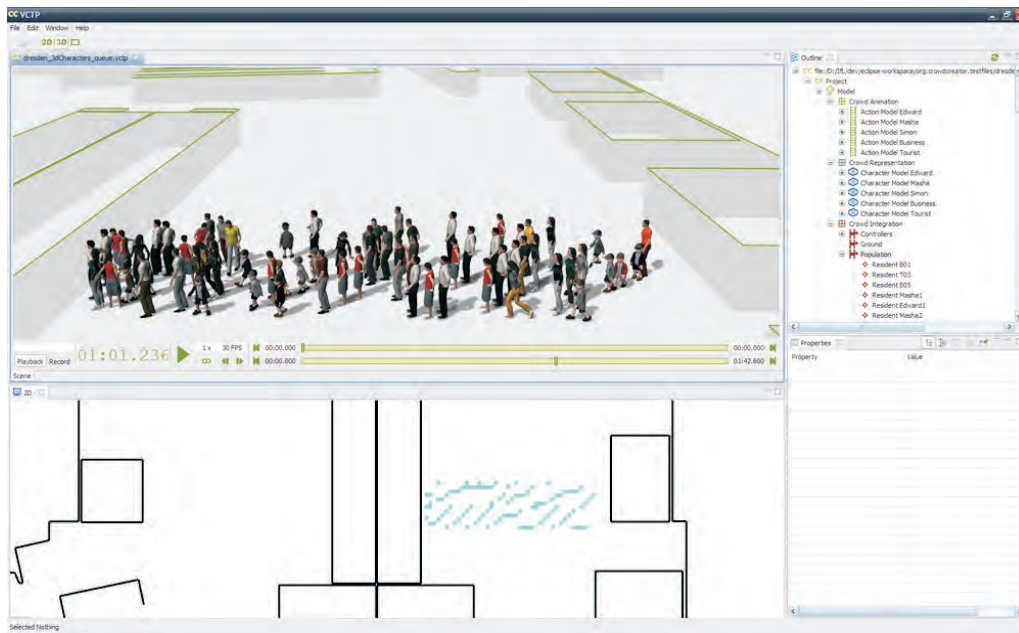


Abbildung 5.2: Virtuelle Umgebung mit animierter Passagierdarstellung.

am Hamburger Flughafen [282] nutzen die Besucher des Flughafens das gastronomische Serviceangebot zu 37,6 % und kaufen mit 35,2 % Wahrscheinlichkeit ein. Der Non-Aviation Bereich des Flughafens Frankfurt weist Größenordnung von 151,6 Mio. Euro auf (Umsatzerlös gemäß Geschäftsbericht Fraport AG, 2008). In Tabelle 5.1 ist die Entwicklung der verschiedenen Non-Aviation Bereiche am Flughafen Frankfurt separat ausgewiesen (Shopping, Werbung und Services). In den Bereich Services fallen neben der Gastronomie beispielsweise auch die Einnahmen aus der Fahrzeugvermietung. Bei einem Netto-Erlös von 2,84 Euro je Passagier erscheint es aus Sicht des Flughafenbetreibers ökonomisch sinnvoll, die Strukturen innerhalb des Terminals anzupassen und die Serviceangebote für die Passagier angemessen und bedarfsgerecht zu gestalten. In enger Kopplung mit der Entwicklung von effizienten Passagierleitsystemen können durch den Einsatz passagierorientierter Bewegungsmodelle effiziente Strategien entwickelt und auf ihre ökonomische Nachhaltigkeit hin untersucht werden.

Passagierwegeführung im Terminal für Regelbetrieb und Notfall

Neben den naheliegenden Untersuchungen im Terminalbereich bezüglich der Passagierabfertigungsstrategien oder der Auslegung des Non-Aviation Bereichs rücken auch Überlegungen zur aktiven Steuerung von Personen immer stärker in den Fokus des ökonomischen und wissenschaftlichen Interesses. Gerade Verkehrsflughäfen bieten aufgrund des hohen Passagieraufkommens und des begrenzt vorhandenen Zeitbudgets der Passagiere ein großes Optimierungspotential. Erste Untersuchungen zeigen, dass durch die Erweiterung des stochastischen Bewegungsmodells um eine visuelle Wahrnehmungsebene, die

| Bereiche | | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Shopping | Mio. Euro | 69,9 | 68,8 | 70,9 | 76,8 | 85,1 | 85,3 |
| Werbung | Mio. Euro | 17,1 | 20,4 | 20,6 | 31,0 | 25,5 | 26,8 |
| Services | Mio. Euro | 20,5 | 24,1 | 26,4 | 27,3 | 35,2 | 39,5 |
| Summe | Mio. Euro | 107,5 | 113,3 | 117,9 | 135,1 | 145,8 | 151,6 |
| Netto-Erlös | | | | | | | |
| je Passagier | Euro | 2,22 | 2,22 | 2,26 | 2,56 | 2,69 | 2,84 |

Tabelle 5.1.: Entwicklung des Non-Aviation Bereiches am Flughafen Frankfurt. Für das Jahr 2012 wird von Seiten des Flughafenbetreibers ein passagierbezogener Netto-Erlös von 4 Euro angestrebt (Geschäftsberichte 2003-2008 Fraport AG).

Entwicklung eines Leitkonzeptes unter Berücksichtigung passagierspezifischer Wahrnehmungseigenschaften möglich ist [283].

In Abbildung 5.3(a) sind drei Wahrnehmungsbereiche dargestellt. Im mittleren ovalen Bereich werden die vorhandenen Informationen aufgenommen und können verarbeitet werden. Informationen in den angrenzenden Bereichen können (mit abnehmender Wahrscheinlichkeit) die Aufmerksamkeit des Passagiers auf sich ziehen, allerdings muss der Passagier sich zunächst den Informationen zuwenden. Für die Modellierung des Leitsystems sind nicht nur die individuellen Wahrnehmungsbereiche der Passagiere zu berücksichtigen, sondern auch die spezifische Ausgestaltung der notwendigen Beschilderung (z. B. Schriftgröße, Kontraste oder Positionierung) aus der sich die Reichweite der Information ableiten lässt (Abbildung 5.3(b)).



(a) Darstellung der Informationsaufnahme des Passagiers durch drei individuelle Wahrnehmungsbereiche.



(b) Reichweite einer dargebotenen Information in Relation zum Informationsträger (Schild).

Abbildung 5.3: Nutzung der entwickelten Implementierung für die Abbildung von Leitsystemen und den daraus entstehenden Konsequenzen für die Passagierbewegung.

Des Weiteren wäre es wünschenswert die Entwicklung eines Leitsystems nicht nur unter der Prämisse, einer durch die Flughafenbetreiber gewollten Passagierführung voranzutreiben, sondern auch das Einsatzpotenzial bei Notfällen detailliert zu untersuchen. In den vorliegenden Untersuchungen steht zwar der reguläre Betrieb des Flughafenterminals im Vordergrund, jedoch können sich aus Sicht der Notfallplanung weitere Anforderungen an die räumliche Gestaltung und die notwendigen Prozessabläufe ergeben. Das entwickelte stochastische Bewegungsmodell ist prinzipiell auch in der Lage, individuelle menschliche Verhaltensweisen in (geregelten) Notfallsituationen zu beschreiben. Für eine valide Abbildung von Notfallszenarien ist es jedoch unumgänglich die Eingangsgrößen für das Bewegungsmodell durch geeignete Datenerhebungen zu kalibrieren. Um die Wirksamkeit von Rettungsmaßnahmen bewerten zu können, müssen in jedem Fall vorhandene Notfallkonzepte eingebunden und die Ergebnisse von praktischen Tests berücksichtigt werden.

Übergangsmatrix

| Zelle | Übergangswahrscheinlichkeit | Entfernung zur Trajektorie $\frac{ \mathbf{e}_{ij} \times \boldsymbol{\mu}_M }{ \boldsymbol{\mu}_M }$ | Anteil zum Erwartungswert μ_α $\frac{\mathbf{e}_{ij} \cdot \boldsymbol{\mu}_M}{ \boldsymbol{\mu}_M }$ |
|-------------|--|---|---|
| $M_{1,0}$ | $\left[\frac{1}{2} \sigma_q^2 (3\lambda - 2) + 1 - \lambda \right] \mu_p$ | $\sin \alpha$ | $\cos \alpha$ |
| $M_{1,1}$ | $\left[\frac{1}{2} \sigma_q^2 (1 - 3\lambda) + \lambda \right] \mu_p$ | $\cos \alpha - \sin \alpha$ | $\cos \alpha + \sin \alpha$ |
| $M_{0,1}$ | $\frac{1}{2} \sigma_q^2 [(1 - \lambda) (\mu_p - 1) + \lambda \mu_p]$ | $\cos \alpha$ | $\sin \alpha$ |
| $M_{-1,1}$ | $\frac{1}{2} \sigma_q^2 \lambda (1 - \mu_p)$ | $\cos \alpha + \sin \alpha$ | $\sin \alpha - \cos \alpha$ |
| $M_{-1,0}$ | 0 | $\sin \alpha$ | $-\cos \alpha$ |
| $M_{-1,-1}$ | 0 | $\cos \alpha - \sin \alpha$ | $-\cos \alpha - \sin \alpha$ |
| $M_{0,-1}$ | $\frac{1}{2} \sigma_q^2 [(1 - \mu_p) (1 - \lambda)]$ | $\cos \alpha$ | $-\sin \alpha$ |
| $M_{1,-1}$ | $\frac{1}{2} \sigma_q^2 [\mu_p (1 - 2\lambda) + \lambda]$ | $\cos \alpha + \sin \alpha$ | $\cos \alpha - \sin \alpha$ |
| $M_{0,0}$ | $(1 - \sigma_q^2) (1 - \mu_p)$ | 0 | 0 |

Tabelle A.1.: Übergangsmatrix: Wahrscheinlichkeiten, Entfernungs- und Geschwindigkeitsanteil unter der Annahme, dass der Agent keinen Schritt rückwärts durchführt. Dann gilt für $\sigma_p^2 = \mu_p - \mu_p^2$.

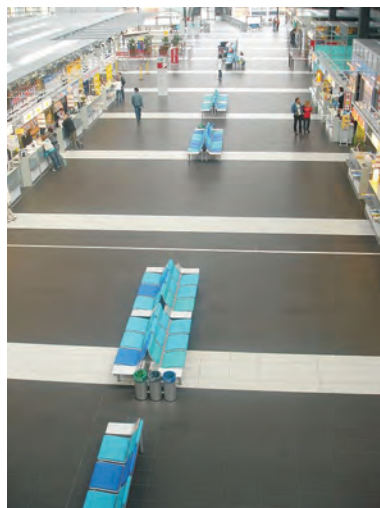
Kamerapositionen Flughafen Dresden

Kamera-
positionen

A1 und A2



B1 und B2



C und D



Abbildung A.1: Kamerabilder aus den in Abbildung 3.7 dargestellten Positionen

Flugplan Dresden

| Flug- nummer | Ziel | Abflug- zeit (min) | Airline | Schalter | Abflug- gate | Flugzeug- typ |
|-----------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------|-----------------|------------------|
| AB 9186 | Mallorca | 330 | Air Berlin | 7-9 | 4 | B7378 |
| AB 3296 | Mallorca | 330 | Air Berlin | 7-9 | 2 | B7378 |
| LH 1067 | München | 365 | Lufthansa | 23-25 | 8 | RJ85 |
| O2 538 | Warschau | 395 | Jet Air | 23-25 | 3 | JS32 |
| C9 1680 | Zürich | 415 | Cirrus Airlines | 23-25 | 5 | DO328 |
| LH 1063 | Frankfurt | 435 | Lufthansa | 23-25 | 9 | B7373 |
| AB 6803 | Düsseldorf | 480 | Air Berlin | 3-5 | 4 | A3191 |
| 4U 2025 | Stuttgart | 485 | Germanwings | 29-30 | 2 | A3191 |
| OS 218 | Wien | 485 | Austrian Airlines | 23-25 | 5 | DHC83 |
| C9 1651 | Hamburg | 490 | Cirrus Airlines | 23-25 | 7 | DO328 |
| 4U 027 | Köln-Bonn | 505 | Germanwings | 29-30 | 9 | A3191 |
| LH 1053 | Frankfurt | 525 | Lufthansa | 23-25 | 11 | CJ700 |
| LH 859 | Düsseldorf | 530 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ900 |
| OS 216 | Wien | 545 | Austrian Airlines | 23-25 | 7 | DHC83 |
| LH 1069 | München | 550 | Lufthansa | 23-25 | 8 | RJ85 |
| LH 1071 | München | 615 | Lufthansa | 23-25 | 4 | RJ85 |
| C9 1684 | Zürich | 660 | Cirrus Airlines | 23-25 | 3 | DO328 |
| LH 1055 | Frankfurt | 665 | Lufthansa | 23-25 | 10 | A3202 |
| TU 6545 | Monastir | 670 | Tunis Air | 7-9 | 8 | B7376 |
| LH 861 | Düsseldorf | 725 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ900 |
| 3L 363 | Friedrichshafen | 740 | InterSky | 23-25 | 11 | DHC83 |
| LH 1073 | München | 775 | Lufthansa | 23-25 | 5 | CJ200 |
| AB 6805 | Düsseldorf | 790 | Air Berlin | 3-5 | 4 | B7378 |
| LH 863 | Düsseldorf | 855 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ200 |
| 4R 5932 | Antalya | 865 | Hamburg int'l. | 7-9 | 9 | B7377 |
| LH 1057 | Frankfurt | 875 | Lufthansa | 23-25 | 10 | B7373 |
| AB 2860 | Las Palmas | 910 | Air Berlin | 7-9 | 4 | B7378 |
| VIM 332 | Varna | 960 | Air Via Airways | 7-9 | 8 | A3202 |
| C9 1655 | Hamburg | 985 | Cirrus Airlines | 23-25 | 7 | DO328 |
| 4U 023 | Köln-Bonn | 1000 | Germanwings | 29-30 | 4 | A3191 |
| LH 1075 | München | 1000 | Lufthansa | 23-25 | 6 | RJ85 |
| AB 6809 | Düsseldorf | 1020 | Air Berlin | 3-5 | 9 | B7377 |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Flug- nummer | Ziel | Abflug- zeit (min) | Airline | Schalter | Abflug- gate | Flugzeug- typ |
|-----------------|---------------|-----------------------|-------------------|----------|-----------------|------------------|
| AB 2508 | Kos | 1025 | Air Berlin | 7-9 | 2 | B7378 |
| LH 865 | Düsseldorf | 1055 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ900 |
| LH 1059 | Frankfurt | 1075 | Lufthansa | 23-25 | 9 | B7373 |
| 4U 2027 | Stuttgart | 1095 | Germanwings | 29-30 | 8 | A3191 |
| C9 1686 | Zürich | 1095 | Cirrus Airlines | 23-25 | 3 | DO328 |
| LH 1077 | München | 1155 | Lufthansa | 23-25 | 5 | DHC84 |
| OS 214 | Wien | 1165 | Austrian Airlines | 23-25 | 11 | DHC83 |
| LH 1061 | Frankfurt | 1185 | Lufthansa | 23-25 | 9 | B7373 |
| C9 1657 | Hamburg | 1185 | Cirrus Airlines | 23-25 | 7 | DO328 |
| 4U 029 | Köln-Bonn | 1195 | Germanwings | 29-30 | 4 | A3191 |
| AB 6813 | Düsseldorf | 1220 | Air Berlin | 3-5 | 8 | B7377 |
| LH 867 | Düsseldorf | 1250 | Lufthansa | 23-25 | 3 | CJ900 |
| OS 217 | Leipzig-Halle | 1315 | Austrian Airlines | 23-25 | 11 | DHC84 |

Tabelle A.2.: Flugplan des Flughafens Dresden vom 24.09.2009

Literaturverzeichnis

- [1] Helbing, D. (2001). Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. *Reviews of Modern Physics*, 73, Seiten 1067–1141.
- [2] Helbing, D. und Molnár, P. (1995). Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 51, Seiten 4282–4286.
- [3] Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A. und Werner, T. (2005). Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics and Design Solutions. *Transportation Science*, 39(1), Seiten 1–24.
- [4] Behnen, T. (2001). Nachtflugverkehr in Deutschland zwischen ökonomischen und umweltmedizinischen Erfordernissen.
- [5] Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien.
- [6] Ulam, S. (1967). *Prospects for Simulation and Simulators of Dynamic Systems*, Beitrag: On General Formulations of Simulation and Model Construction, Seiten 3–8. Shapiro, G., Rogers, M. (Hrsg.), New York, London.
- [7] Schröter, J. (2004). *OriginalKopie. Praktiken des Sekundären*, Beitrag: Computer/Simulation. Kopie ohne Original oder das Original kontrollierende Kopie. Fehrmann, G., Linz, E., Schumacher, E. and Weingart, B. (Hrsg.), Köln.
- [8] Klüpfel, H. und Meyer-König, T. (2005). *VdS Fachtagung: Evakuierung und Räumung von Gebäuden*, Beitrag: Modelle für die Berechnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen, Seiten 11–42. VdS.
- [9] VDI/VDE 3542 (2000). *Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme*. Beuth Verlag, Berlin.
- [10] DIN 40041 (1990). *Zuverlässigkeit - Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin.
- [11] Werthschützky, R. und Müller, R. (2007). Selbstüberwachung und Störungstoleranz von autarken Sensoren. *tm - Technisches Messen*, 74(4), Seiten 176–184.
- [12] Kirsch, W. (1972). *Wissenschaftstheorie und Betriebswirtschaftslehre*, Beitrag: Die entscheidungs- und systemorientierte Betriebswirtschaftslehre. Dlugos, D., Eberlein, G., Steinmann, H. (Hrsg.), Düsseldorf.
- [13] Müller, J.-A. (2001). *Systems Engineering*. Fortis, Wien.
- [14] Klaus, G. (1968). *Wörterbuch der Kybernetik*. Dietz, Berlin.

- [15] Gordon, G. (1972). *Systemsimulation*. Oldenbourg, München.
- [16] Bub, W. und Lugner, P. (1990). *Simulationstechnik, 6. Symposium in Wien*, Beitrag: Modellbildung und Modellreduktion - Systematik der konzeptionellen Modellbildung, Seiten 62–66. Breitenecker, F., Troch, I. and Kopack P. (Hrsg.), Braunschweig.
- [17] Balci, O. (1997). Principles of Simulation Model Validation, Verification, and Testing. *Transactions of the SCS International*, 4(1), Seiten 3–12.
- [18] Norman, D. (1983). *Mental Models*, Beitrag: Some Observations on mental models, Seiten 7–14. In [19].
- [19] Gentner, D. und Stevens, A. (1983). *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- [20] Schwamb, K. (2004). *Mental Models: A Survey*. *unpublished*.
- [21] Kindsmüller, M., Leuchter, S., Schulze-Kissing, D. und Urbas, L. (2004). Modellierung und Simulation menschlichen Verhaltens als Methode der Mensch-Maschine-System-Forschung. *MMI-Interaktiv*, (7), Seiten 4–16.
- [22] Balci, O. und Nance, R. (1987). Simulation Model Development Environments: A Research Prototype. *Journal of the Operational Research Society*, 38(8), Seiten 753–763.
- [23] Hoogendoorn, S. und Bovy, P. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(21), Seiten 283–303.
- [24] May, A. (1990). *Traffic flow fundamentals*. Prentice Hall, New York.
- [25] Fruin, J. (1971). Designing for Pedestrian: a level of service concept. *Highway Research Record*, (355), Seiten 1–15.
- [26] Transportation Research Board (1985). Highway capacity manual. *Special report 204*.
- [27] Institute of Transportation Engineers (ITE) (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Prentice Hall, New Jersey.
- [28] Daamen, W. und Hoogendoorn, S. (2003). Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Record 1828*, Seiten 20–30.
- [29] Hoogendoorn, S. (2003). Pedestrian travel behavior modeling. *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behavior Research*.
- [30] Johansson, A. (2009). *Data-Driven Modeling of Pedestrian Crowds*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- [31] Kretz, T. (2006). *Pedestrian Traffic, Simulation and Experiments*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [32] Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C. und Seyfried, A.

- (2009). *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Beitrag: Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, Seiten 3142–3176. Springer.
- [33] Teknomo, A. (2006). Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F*, 9, Seiten 15–27.
- [34] Henderson, L. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motions. *Transportation Research*, 8, Seiten 509–515.
- [35] Helbing, D. (1992). A fluid dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6, Seiten 391.
- [36] Helbing, D. und Molnár, P. (1997). *Self-Organization of Complex Structures. From Individual to Collective Dynamics*, Beitrag: Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds, Seiten 569–577. F. Schweitzer (Hrsg.), London.
- [37] Helbing, D. (1997). *Verkehrsdynamik neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, Berlin.
- [38] Hankin, B. und Wright, R. (1958). Passenger flow in subways. *Operational Research Quarterly*, (9), Seiten 81–88.
- [39] Helbing, D. (2004). *Sicherheit in Tourismus und Verkehr*, Beitrag: Sicherheit in Fußgängergruppen bei Massenveranstaltungen, Seiten 253–288. W. Freyer, S. Groß (Hrsg.), Dresden.
- [40] Müller, J.-A. (1998). *Simulation ökonomischer Prozesse*. Fortis, Wien.
- [41] Neunzert, H. (1995). *Simulation. Computer zwischen Experiment und Theorie*, Beitrag: Mathematik und Computersimulation. Modelle, Algorithmen, Bilder, Seiten 44–55. Braitenberg, V., Hosp, I. (Hrsg.), Reinbek.
- [42] Herrmann, H.-J. (1987). *Wirtschafts-, berufs- und sozialpädagogische Texte, Bd. 12*, Beitrag: Simulationsspiele als Methode eines bankbetrieblichen Entscheidungstrainings. Twardy, M. (Hrsg.), Düsseldorf.
- [43] Gramelsberger, G. (1996). Theorie - Simulation - Experiment. Computergestützte Simulation als erkenntnistheoretische Erweiterung der Erklärungs- und Prognosemöglichkeiten in den Naturwissenschaften. Diplomarbeit, Universität Augsburg.
- [44] Rohrlich, F. (1990). Computer simulation in the physical sciences. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, Seiten 507–518.
- [45] Hoffeld, F. und Nagel, W. (1995). *Supercomputer 1995: Anwendungen, Architekturen, Trends, FOKUS Praxis Information und Kommunikation Bd. 13*, Beitrag: Per Aspera ad Astra: On the Way to Parallel Processing, Seiten 246–259. H.-W. Meuer (Hrsg.), München.
- [46] Hoffeld, F. (1999). Komplexität und Berechenbarkeit: Über die Möglichkeiten und Grenzen des Computers.

- [47] Galison, P. (1997). *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*. University of Chicago Press, Chicago, London.
- [48] Winsberg, E. (2003). Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World. *Philosophy of Science*, 70, Seiten 105–125.
- [49] Metropolis, N. und Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), Seiten 335–341.
- [50] Kaufmann, W. und Smarr, L. (1993). *Supercomputing and the Transformation of Science*. Scientific American Library, New York.
- [51] Conrad, M. (1995). *The Universal Turing Maschine. A Half-Century Survey*, Beitrag: The Price of Programmability, Seiten 261–282. Herken, R. (Hrsg.), Wien, New York.
- [52] Kunz, H. und Hemelrijk, C. K. (2003). Artificial Fish Schools: Collective Effects of School Size, Body Size, and Body Form. *Artificial Life*, 9(3), Seiten 237–253.
- [53] Helbing, D., Farkas, I. und Vicsek, T. (2000). Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, 407, Seiten 487.
- [54] Hall, F., Allen, B. und Gunter, M. A. (1986). Empirical analysis of freeway flow-density relationships. *Transportation Research A*, 20, Seiten 197ff.
- [55] Weidmann, U. (1992). Transporttechnik der Fußgänger. *Schriftenreihe des Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau*, 90.
- [56] Fruin, J. (1971). *Pedestrian planing and design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, Inc.
- [57] Ashford, N. (1988). Level of service design concept for airport passenger terminals: a European view. *Transportation Research Board*, (1199), Seiten 19–32.
- [58] Pauls, J. (1984). The movement of people in buildings and design solutions for means of egress. *Fire Technology*, 20(1), Seiten 27–47.
- [59] Whyte, W. (1988). *City: Rediscovering the Center*. Doubleday, New York.
- [60] Ashford, N., Hawkins, N., O’Leary, M., Bennetts, D. und Ginity, P. (1976). Passenger behaviour and the design of airport terminals. *Transportation Research Board*, (588), Seiten 19–26.
- [61] Predtetschenski, W. und Milinski, A. (1971). *Personenströme in Gebäuden*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld.
- [62] Ashford, N., Stanton, H. und Moore, C. (1997). *Airport Operations (second ed.)*. McGraw-Hill, New York.
- [63] Horonjeff, R. und McKelvey, F. (1993). *Planning and Design of Airports, Fourth Edition*. McGraw-Hill.
- [64] International Air Transport Association (2004). Airport Development Reference Ma-

- nual. 9.
- [65] Helbing, D. (1991). A mathematical model for the behavior of pedestrians. *Behavioral Science*, 36, Seiten 298–310.
- [66] Gipps, P. und Marksjö, B. (1985). A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27(2-3), Seiten 95–105.
- [67] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. und Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295, Seiten 507–525.
- [68] Daamen, W. und Hoogendoorn, S. (2003). Controlled experiments to derive walking behaviour. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3(1), Seiten 39–59.
- [69] Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W. und Boltes, M. (2005). The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited. *J.STAT.MECH.*, Seite P10002.
- [70] Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D. und Theraulaz, G. (2010). The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics. *PLoS ONE*, 5(4).
- [71] Paslack, R. (1991). *Urgeschichte der Selbstorganisation*. Vieweg, Braunschweig.
- [72] Fromm, J. (2004). *The Emergence of Complexity*. Universität Kassel.
- [73] Schaub, H. (1993). *Modellierung der Handlungsorganisation*. Huber, Bern.
- [74] Ebeling, W. und Feistel, R. (1982). *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Akademie-Verlag.
- [75] Feistel, R. und Ebeling, W. (1989). *Evolution of Complex Systems. Selforganisation, Entropy and Development*. Kluwer Academic Publishers.
- [76] Rojas, R. (1992). Chaos als neues naturwissenschaftliches Paradigma. *Prokla - Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft*, 88(3).
- [77] Ebeling, W., Engel, A. und Feistel, R. (1997). *Physik der Evolutionsprozesse*. Akademie-Verlag.
- [78] Nicolis, G. und Prigogine, I. (1987). *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*. Piper.
- [79] Küppers, G. (1998). *Computer Simulations in Science and Technology Studies*, Beitrag: The Selforganization of Social Systems - A Simulation of the Social Construction of Knowledge, Seiten 145–155. Springer.
- [80] Ahrweiler, P. und Gilbert, N. (1998). *Computer Simulations in Science and Technology Studies*. Springer, Bern.
- [81] Helbing, D., Farkás, I., Molnár, P. und Vicsek, T. (2002). *Pedestrian and Evacua-*

- tion Dynamics*, Beitrag: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations, Seiten 21–58. M. Schreckenberg, S.D. Sharma, (Hrsg.), Berlin.
- [82] Ando, K., Oto, H. und Aoki, T. (1988). Forecasting the flow of people in Japanese. *Railway Research Review*, 8(45), Seiten 8–13.
- [83] Helbing, D., Keltsch, J. und Molnár, P. (1997). Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*, 388, Seiten 47–50.
- [84] Kirchner, A. (2002). *Modellierung und statistische Physik biologischer und sozialer Systeme*. Dissertation, Universität zu Köln.
- [85] Rogsch, C. (2005). Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal.
- [86] Klüpfel, H., Meyer-König, T., Wahle, J. und Schreckenberg, M. (2000). Microscopic Simulation of Evacuation Processes on Passenger Ships. In Bandini, S. und Worsch, T., Hrsg., *ACRI 2000*, Seiten 63–71, London. Springer.
- [87] Klüpfel, H. (2003). *A cellular automaton model for crowd movement and egresssimulation*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [88] Klügl, F. (2000). *Aktivitätsbasierte Verhaltensmodellierung und ihre Unterstützung bei Multiagentensimulationen*. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- [89] Klüpfel, H. und Meyer-König, T. (2004). Models for crowd movement and egress simulation. In et. al., S. H., Hrsg., *Traffic and Granular Flow 2003*, Seiten 357–372, Berlin. Springer.
- [90] Molnar, P. (1995). *Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [91] Thompson, P. A. (1994). *Developing new techniques for modelling crowd movement*. Dissertation, University of Edinburgh.
- [92] Teknomo, K. (2002). *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Modell*. Dissertation, Tohoku University.
- [93] Still, K. (2000). *Crowd Dynamics*. Dissertation, University of Warwick.
- [94] Tjandra, S. (2003). *Dynamic Network Optimization with Application to the Evacuation Problem*. Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- [95] Pan, X. (2006). *Computational Modeling of Human and Social Behaviors for Emergency Egress Analysis*. Dissertation, Stanford University.
- [96] Stucki, P. (2003). Obstacles in Pedestrian Simulations. Diplomarbeit, ETH Zürich.
- [97] Feurtey, F. (2000). Simulating the Collision Avoidance Behavior of Pedestrians. Diplomarbeit, University of Tokyo.

- [98] Spassov, I. (2007). *Algorithms for Map-Aided Autonomous Indoor Pedestrian Positioning and Navigation*. Dissertation, Universität Lausanne.
- [99] Antonini, G. (2005). *A Discrete Choice Modeling Framework for Pedestrian Walking Behavior with Application to human Tracking in Video Sequences*. Dissertation, Universität Lausanne.
- [100] Daamen, W. (2004). *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. Dissertation, Universität Delft.
- [101] Ferber, J. (1998). *Multi-agent systems. Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Dissertation.
- [102] Botea, A. (2006). *Improving AI Planning and Search with Automatic Abstraction*. Dissertation, University of Alberta.
- [103] Hoogendoorn, S., Bovy, P. und Daamen, W. (2002). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling, Seiten 123–155. M. Schreckenberg, S.D. Sharma, (Hrsg.), Berlin.
- [104] Rodrigue, J.-P. (1997). Parallel Distributed Processing of Transportation / Land Use Systems: Theory and Modelling with Neural Networks. *Transportation Research C*, 5(5), Seiten 259–271.
- [105] Zampieri, F. und Rigatti, D. (2007). The Use of Artificial Neural Networks on the Creation and Implementation of a Predictive Model of the Pedestrian Flow. In *Proceedings 10th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*.
- [106] Johansson, A. (2004). Pedestrian Simulations with the Social Force Model. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [107] Shukla, P. (2005). Modeling and Simulation of Pedestrians. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Indian Institute of Technology Kanpur.
- [108] Lakoba, T., Kaup, D. und Finkelstein, N. (2005). Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution. *Simulation*, 81(5), Seiten 339–352.
- [109] Blue, V. und Adler, J. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research B*, 35, Seiten 293–312.
- [110] Schadschneider, A., Kirchner, A. und Nishinari, K. (2002). CA Approach to Collective Phenomena in Pedestrian Dynamics. In *ACRI '01: Proceedings of the 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, Seiten 239–248, London, UK. Springer-Verlag.
- [111] Schadschneider, A. (2002). Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Seiten 75–86. M. Schreckenberg, S.D.

Sharma, (Hrsg.).

- [112] Antonini, G., Bierlaire, M. und Weber, M. (2004). Capturing interactions in pedestrian walking behavior in a discrete choice framework. In *Proceedings of the 4th Swiss Transport Research Conference*.
- [113] Bierlaire, M., Antonini, G. und Weber, M. (2003). Behavioral dynamics for pedestrians. In *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behavior Research*, Lucerne.
- [114] Robin, T., Antonini, G., Bierlaire, M. und Cruz, J. (2008). Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43, Seiten 36–56.
- [115] Lewin, K. (1951). *Field Theory in Social Science*. Harper.
- [116] Schefflen, A. und Ashcraft, N. (1975). *Human Territories: How we Behave in Space-Time*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [117] Johansson, A., Helbing, D. und Shukla, P. (2007). Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data. *Advances in Complex Systems*, 10(4), Seiten 271–288.
- [118] Weimar, J. R. (1997). *Simulation with Cellular Automata*. Logos-Verlag, Berlin.
- [119] Wolfram, S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific, Singapore.
- [120] Nagel, K. und Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2, Seiten 2221–2229.
- [121] Schreckenberg, M., Schadschneider, A. und Nagel, K. (1996). Zellularautomaten simulieren Verkehr. *Physikalische Blätter*, 5, Seiten 460–462.
- [122] Ferber, R. (1989). *Räumliche und zeitliche Regelmäßigkeiten zellularer Automaten*. Dissertation, Universität Marburg.
- [123] Sipper und Moshe (1999). The Emergence of Cellular Computing. *IEEE Computer*, 32(7), Seiten 18–26.
- [124] Burstedde, C. (2001). Simulation von Fußgängerverhalten mittels zweidimensionaler zellulärer Automaten. Diplomarbeit, Universität zu Köln.
- [125] Schreckenberg, M., Schadschneider, A., Nagel, K. und Ito, N. (1995). Discrete stochastic models for the traffic flow. *Physical Review E*, 51, Seiten 2939ff.
- [126] Schultz, M., Schulz, C. und Fricke, H. (2008). Efficiency of Aircraft Boarding Procedures. *Proceedings of International Conference on Research in Air Transportation*.
- [127] Ben-Jacob, E., Schochet, O., Tenenbaum, A., Cohen, I., Czirók, A. und Vicsek, T. (1994). Generic Modelling of Cooperative Growth Patterns in Bacterial Colonies.

- Nature*, 368(6466), Seiten 46–49.
- [128] Ben-Jacob, E. (1997). From snowflake formation to growth of bacterial colonies. Part II: Cooperative formation of complex colonial patterns. *Contemporary Physics*, 38(3), Seiten 205–241.
- [129] Ben-Akiva, M. und Lerman, S. (1985). Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. *European Journal of Operational Research*.
- [130] Antonini, G. und Bierlaire, M. (2006). Simulation of Pedestrian Behaviour using a Discrete Choice Model Calibrated on Actual Motion Data. In *Proceedings of the 6th Swiss Transport Research Conference*.
- [131] Bierlaire, M. und Thémans, M. (2005). Algorithmic developments for the estimate of advanced discrete choice models. In *Proceedings of the 5th Swiss Transport Research Conference*.
- [132] Teknomo, K., Takeyama, Y. und Inamura, H. (2000). Review on microscopic pedestrian simulation model. *Proceedings Japan Society of Civil Engineering Conference*.
- [133] Airports Council International (2006). *Update on Regulation 1546/2006*.
- [134] Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2007). *Fact Sheet. EU-VO 1546/2006. Beschränkung von Flüssigkeiten im Handgepäck und Begrenzung der Größe des Handgepäcks*.
- [135] Herbelles, N. (2007). *The implementation of the restrictions on liquids. Challenges and consequences*.
- [136] Stockmann, U. und Maßling, S. (2007). *Sicherheit im Luftverkehr. Mehr Regulierung - weniger Risiko?*
- [137] International Air Transport Association (2008). *Passenger Services Conference Resolutions Manual (PSCRM)*.
- [138] Bundesministerium der Finanzen (2009). *Reisezeit - Ihr Weg durch den Zoll*.
- [139] Zoll (2009). http://www.zoll.de/c0_reise_und_post/a0_reiseverkehr, Stand 14.09.2009.
- [140] Spitzer, F. (1976). *Principles of Random Walk*. Springer, New York, Heidelberg, Berlin.
- [141] Batty, M. (2003). *Advanced Spatial Analysis: The Casa Book of GIS*, Beitrag: Agent-based Pedestrian Modelling. ESRI Press.
- [142] Schadschneider, A. (2000). Statistical physics of traffic flow. *Physica A*, 285, Seiten 101–120.
- [143] Derrida, B., Domany, E. und Mukamel, D. (1992). An exact solution of a one dimensional asymmetric exclusion model with open boundaries. *Journal of Statistical*

- Physics*, 69, Seiten 667–687.
- [144] Schnabel, W. und Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [145] Wölki, M., Schadschneider, A. und Schreckenberg, M. (2006). Asymmetric exclusion processes with shuffled dynamics. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 39, Seiten 33–44.
- [146] Portz, A. (2009). Eindimensionale Modellierung der Fußgängerdynamik - Quantitative Validierung und Aspekte der Rechenzeit. *Berichte des Forschungszentrums Jülich JUEL-4296*.
- [147] Kretz, T. und Schreckenberg, M. (2006). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: Moore and more and symmetry. M. Schreckenberg, S.D. Sharma, (Hrsg.), Berlin.
- [148] Schultz, M., Lehmann, S. und Fricke, H. (2005). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: A discrete microscopic model for pedestrian dynamics to manage emergency situations in airport terminals. Springer, Berlin.
- [149] Seyfried, A., Steffen, B. und Lippert, T. (2005). Basics of Modelling the Pedestrian Flow.
- [150] Meyer-König, T., Klüpfel, H. und Schreckenberg, M. (2002). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: Assessment and analysis of evacuation processes on passenger ships by microscopic simulation, Seiten 297–302. M. Schreckenberg, S.D. Sharma, (Hrsg.), Berlin.
- [151] Sweetser, P. (2004). *AI Programming Wisdom 2*, Beitrag: Strategic Decision-Making with Neural Networks and Influence Maps. Charles River Media.
- [152] Warshall, S. (1962). A Theorem on Boolean Matrices. *Journal of the ACM*, 9(1), Seiten 11–12.
- [153] Floyd, R. (1962). Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*, 5(6), Seiten 345.
- [154] Dijkstra, E. (1959). A Note on two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik 1*, Seiten 269–271.
- [155] Fredman, M. und Tarjan, R. (1987). Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *Journal of the ACM*, 34(3), Seiten 596–615.
- [156] Lee, C. Y. (1961). An Algorithm for Path Connection and its Application. *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-10(3), Seiten 346–365.
- [157] Tozour, P. (2001). *Game Programming Gems 2*, Beitrag: Influence Mapping. Charles River Media.
- [158] Tozour, P. (2004). *AI Programming Wisdom 2*, Beitrag: Using a Spatial Database

- for Runtime Spatial Analysis. Charles River Media.
- [159] Gallagher, M., Hogan, J. und Maire, F. (2005). *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2005*. Springer.
- [160] Reynolds, C. (1987). Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. In *Computer Graphics, SIGGRAPH '87 Conference Proceedings*, Seiten 25–34.
- [161] Oreschko, B. (2008). Erweiterte Videoüberwachung als Sicherheitsinstrument an Verkehrsflughäfen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [162] Blumhagen, T. (2008). Implementierung eines Systems zur videogestützten Personenverfolgung. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- [163] Spranger, S. (2008). Problemorientierte Analyse des Check-In-Prozesses am Beispiel des Flughafen Stuttgart. Studienarbeit, Technische Universität Dresden.
- [164] Spranger, S. (2009). Umsetzung eines Modells zur Abbildung des Passagierverhaltens am Beispiel des Flughafen Stuttgart. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [165] Johansson, A., Helbing, D., A-Abideen, H. Z. und Al-Bosta, S. (2008). From crowd dynamics to crowd safety: A video-based analysis. *Advances in Complex Systems*, 11(4), Seiten 497–527.
- [166] Schultz, M., Schulz, C. und Fricke, H. (2008). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: Passenger Dynamics at Airport Terminal Environment. Springer, Berlin.
- [167] Klüpfel, H. (2006). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Beitrag: The simulation of crowd dynamics at very large events - calibration, empirical data, and validation. M. Schreckenberg, S.D. Sharma, (Hrsg.), Berlin.
- [168] Eriksen, C. und Murphy, T. (1987). Movement of attentional focus across the visual field: A critical look at the evidence. *Perception and Psychophysics*, 42, Seiten 229–305.
- [169] Johnstone, A. und Percival, F. (1976). Attention breaks in lectures. *Education in Chemistry*, (13), Seiten 49–50.
- [170] Burns, R. (1985). Information impact and factors affecting recall. *Annual National Conference on Teaching Excellence and Conference of Administrators*.
- [171] Middendorf, J. und Kalish, A. (1996). The 'Change-up' in Lectures. *The National Teaching and Learning Forum*, 5(2).
- [172] Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2003). *Fluggastbefragung 2003*.
- [173] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2005). *Luftverkehrsbericht 2005*.
- [174] RiMEA (2008). Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen. *www.rimea.de*, (Ver 2.1).
- [175] Glatzner, F. (2006). Die staatliche Videoüberwachung des öffentlichen Raumes als

- Instrument der Kriminalitätsbekämpfung. Diplomarbeit, Universität Münster.
- [176] Reisch, M. (2008). *Die Verkehrszentrale München feiert Geburtstag*.
- [177] Weichert, T. (1998). Audio- und Videoüberwachung, Kontrolltechniken im öffentlichen Raum. *Bürgerrechte & Polizei/CILIP* 60, 2.
- [178] Gössner, R. (2000). *Big Brother & Co. Der moderne Überwachungsstaat in der Informationsgesellschaft*. Konkret Literatur Verlag, Hamburg.
- [179] Leitner, N. (2006). Videoüberwachung in Großbritannien. Diplomarbeit, Fachhochschule Salzburg.
- [180] Brendgens, G. (2005). Vom Verlust des öffentlichen Raums. *Interfaces*, (182), Seiten 1088–1097.
- [181] Fyfe, N. und Bannister, J. (1996). City Watching: closed circuit television surveillance in public spaces. *Area*, 1, Seiten 37–46.
- [182] Büllsfeld, D. (2002). *Polizeiliche Videoüberwachung öffentlicher Straßen und Plätze zur Kriminalitätsvorsorge*. Boorberg, Stuttgart.
- [183] Bäumler, H. (1999). Probleme der Videoaufzeichnung und -überwachung aus datenschutzrechtlicher Sicht. 8. *Wiesbadener Forum Datenschutz*.
- [184] Leopold, N. (2002). *Innere Sicherheit als Gefahr*, Beitrag: Videoüberwachung - Technologien der sozialen Kontrolle und Menschenrechte, Seiten 185–194. Humanistische Union e.V. (Hrsg.), Berlin.
- [185] Armitage, R. (2002). *Community Safety Briefing*, Beitrag: To CCTV or not to CCTV? A review of current research into the effectiveness of CCTV systems in reducing crime. National Association for the Care and Resettlement of Offenders (Hrsg.).
- [186] Lösel, F. (2004). *Angewandte Kriminologie zwischen Freiheit und Sicherheit*, Beitrag: Entwicklungsbezogene und technische Kriminalprävention: Konzeptuelle Grundlagen und Ergebnisse, Seiten 175–203. H. Schöch and J.-M. Jehle (Hrsg.), Mönchengladbach.
- [187] Veil, K. (2001). Raumkontrolle - Videokontrolle und Planung für den öffentlichen Raum. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin.
- [188] Brandt, D. (2004). Wirkungen situativer Kriminalprävention eine Evaluationsstudie zur Videoüberwachung in der Bundesrepublik Deutschland. Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [189] Brown, B. (1995). CCTV in Town Centres: Three Case Studies. *Crime Prevention and Detection series paper 68*.
- [190] Weichert, T. (2000). *Aktuelle Fragen zur Videoüberwachung. Beitrag zum SECURITY-Kongress, Essen*.
- [191] Stierand, P. (2000). Videoüberwachte Stadt? Sichere öffentliche Räume als Aufgabe

- der Stadtplanung. Diplomarbeit, Universität Dortmund.
- [192] Bäumlner, H. (2000). Datenschutzrechtliche Grenzen der Videoüberwachung. *Beitrag zur Fachkonferenz "Risiken und Grenzen der Videoüberwachung"*.
- [193] Töpfer, E. (2005). Die polizeiliche Videoüberwachung des öffentlichen Raums: Entwicklung und Perspektiven. *DANA. Datenschutznachrichten. Themenheft: Staatliche Überwachung*.
- [194] Fillbrandt, H. und Hähnel, M. (2006). *Advanced Man-Machine Interaction*, Beitrag: Person Recognition and Tracking, Seiten 191–262. Kraiss, K.F. (Hrsg.), Springer.
- [195] Fillbrandt, H. (2007). *Videobasiertes Multi-Personentracking in komplexen Innenräumen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [196] Dedeoglu, Y. (2004). Moving object detection, tracking and classification for smart video surveillance. Diplomarbeit, Bilkent University.
- [197] Siebel, N. (2003). *Design and implementation of people tracking algorithms for visual surveillance applications*. Dissertation, University of Reading.
- [198] Baumberg, A. (1995). *Learning Deformable Models for Tracking Human Motion*. Dissertation, University of Leeds.
- [199] MacCormick, J. (2000). *Probabilistic modelling and stochastic algorithms for visual localisation and tracking*. Dissertation, University of Oxford.
- [200] Spasic, N. (2007). *Anomaly detection and prediction of human actions in a video surveillance environment*. Dissertation, University of Cape Town.
- [201] Vezzani, R. (2007). *Computer Vision for People Video Surveillance*. Dissertation, University of Modena e Reggio Emilia.
- [202] Weser, M. (2006). Multimodales Tracking und Trajektorien Vorhersage. Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- [203] Forsyth, D., Arikan, O., Ikemoto, L., O'Brien, J. und Ramanan, D. (2005). Computational Studies of Human Motion: Part 1, Tracking and Motion Synthesis. *Foundations and Trends (R) in Computer Graphics and Vision*, 1(2), Seiten 77–254.
- [204] Kang, J., Cohen, I. und Medioni, G. (2004). Tracking people in crowded scenes across multiple cameras. *Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*.
- [205] Kim, K. und Davis, L. (2006). Multi-camera Tracking and Segmentation of Occluded People on Ground Plane Using Search-Guided Particle Filtering. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision 2006*, Seiten 98–109.
- [206] Andriluka, M., Roth, S. und Schiele, B. (2008). People-tracking-by-detection and people-detection-by-tracking. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seiten 1–8.

- [207] Haritaoglu, I., Cutler, R., Harwood, D. und Davis, L. (1999). Backpack: Detection of People Carrying Objects Using Silhouettes. In *Computer Vision and Image Understanding*, Seiten 102–107.
- [208] Baumberg, A. und Hogg, D. (1994). An efficient method for contour tracking using active shape models. In *Proceedings of the Workshop on Motion of Nonrigid and Articulated Objects. IEEE Computer Society*, Seiten 194–199.
- [209] Siebel, N. und Maybank, S. (2002). Fusion of multiple tracking algorithms for robust people tracking. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision 2002*, Seiten 373–387.
- [210] Batista, J. (2004). *Image Analysis and Recognition*, Beitrag: Tracking pedestrians under occlusion using multiple cameras, Seiten 552–562. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [211] Khan, S. M. und Shah, M. (2006). A Multiview Approach to Tracking People in Crowded Scenes using a Planar Homography. *9th European Conference on Computer Vision*.
- [212] Fleuret, F., Berclaz, J., Lengagne, R. und Fua, P. (2008). Multi-Camera People Tracking with a Probabilistic Occupancy Map. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), Seiten 267–282.
- [213] Tsai, R. (1986). An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seiten 364–374.
- [214] Debevec, P. (1996). *Modeling and Rendering Architecture from Photographs*. Dissertation, University of California at Berkeley.
- [215] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), Seiten 1330–1334.
- [216] Heikkila, J. und Silven, O. (1997). A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. In *Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, Seiten 1106–1112.
- [217] Flughafen Dresden (2009). <http://www.dresden-airport.de>, Stand 26.09.2009.
- [218] Fraport GmbH (2008). *Fact's 08*.
- [219] Stegemann, J. (1984). *Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- [220] Astrand, I. (1987). *Arbeitsphysiologie*. Schattauer Verlag, Stuttgart, New York.
- [221] International Maritime Organisation (IMO) (2002). *Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships: Maritime Safety Committee Circular 1033*. IMO, London.
- [222] Flughafen Dresden (2006). *Fluggastbefragung 2006*.

- [223] Richter, A. (2005). *Entwicklung von Gepäckförderkonzepten für kleine und mittlere Flughäfen, unter Berücksichtigung von Sortier- und Identifikationsverfahren*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [224] Klotsche, L. (2006). Identifizierung von Optimierungspotentialen bei der Gepäck- und Frachtabfertigung unter Verwendung von innovativen Technologien. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [225] Krause, A. (2002). Untersuchung zum Gepäckwagenmanagement auf Verkehrsflughäfen. Studienarbeit, Technische Universität Dresden.
- [226] Fiedler, D., Lux, R. und Redmann, K. (2002). *Untersuchung zu differenzierten Landeentgelten*.
- [227] Jahn, R. (1999). Passagierverhalten und Passagiergebühren auf Verkehrsflughäfen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [228] Bielinski, J. (2007). *Auswertungsergebnisse der Non Aviation Befragung am Flughafen Hannover-Langenhagen*.
- [229] Sachs, L. (1997). *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*. Springer, Berlin.
- [230] Gumbel, E. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York.
- [231] Weigel, E. (1998). *Skript zur Vorlesung Verkehrssystemtheorie*.
- [232] Flughafen Münster Osnabrück (2006). *Fluggastbefragung*.
- [233] Fraport GmbH (2007). *Werbemonitor 2007*.
- [234] Stonjeck, T. (2008). *Mehr als Fliegen: Die Erlebniswelt Flughafen Stuttgart*.
- [235] Poggio, T. und Edelman, S. (1990). A network that learns to recognize three-dimensional objects. *Nature*, 343, Seiten 263–266.
- [236] Kälin, S. und Odoni, M. (2004). *Objekterkennung und Signaldetektion. Proseminar: Praxisfelder der Wahrnehmungspsychologie*.
- [237] Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2008). *Airport Security*.
- [238] Bundespolizei (2006). *Data Pax Optimize*.
- [239] Airbus (2005). *A380-AC manual (Airplane Characteristics for Airport Planning), issue 03/2005*.
- [240] Boeing (2002). *B747-AC manual (Airplane Characteristics for Airport Planning), issue 12/2002 document D6-58326-1: Terminal Servicing*.
- [241] Clauß, S. (2007). Analyse von zukünftigen Herausforderungen und Optimierung von terminalseitigen Abfertigungsprozessen auf einem Verkehrsflughafen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [242] Schultz, M., Lehmann, S. und Fricke, H. (2006). Pedestrian Dynamics in Airport

- Terminals Considering Emergency Cases. *Proceedings of International Council of the Aeronautical Sciences*.
- [243] Doyle, A. (2003). The Two Towers. *Computer Graphics World*, 26(2).
- [244] Schulz, C. (2008). Entwicklung eines Eclipse-basierten Animations-Werkzeugs für virtuelle Menschengruppen. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- [245] Schäfer, N. (2006). Entwicklung einer Simulationsvisualisierung von Passagierströmen in einem Verkehrsflughafen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [246] Park, S., Shin, H., Kim, T. und Shin, S. (2004). On-line motion blending for real-time locomotion generation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 15(3), Seiten 125–138.
- [247] Kwon, T. und Shin, S. (2005). Motion modeling for on-line locomotion synthesis. *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*.
- [248] Kovar, L. (2004). *Automated methods for data-driven synthesis of realistic and controllable human motion*. Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- [249] Schulz, C., Schultz, M. und Fricke, H. (2008). A Real-Time Pedestrian Animation System. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*.
- [250] Clark, J. (1976). Hierarchical Geometric Models for Visible Surface Algorithms. *Communications of the ACM*, 19(10), Seiten 547–554.
- [251] Schmalstieg, D. und Schaufler, G. (1997). Smooth levels of detail. In *Proceedings of IEEE 1997 Virtual Reality Annual International Symposium*, Seiten 12–19.
- [252] W3C (2003). *Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification*.
- [253] W3C (2006). *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fourth Edition)*.
- [254] Bresenham, J. (1965). Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4(1), Seiten 25–30.
- [255] International Air Transport Association (2009). IATA Technical Reference Manual.
- [256] Schultz, M. und Fricke, H. (2008). Improving Aircraft Turn Around Reliability. *Proceedings of International Conference on Research in Air Transportation*.
- [257] Bazargan, M. (2006). A linear programming approach for aircraft boarding strategy. *European Journal of Operational Research*, 183, Seiten 394–411.
- [258] van den Briel, M., Villalobos, R., Hogg, G., Lindemann, T. und Mulé, A. (2005). American West Airlines develops efficient boarding strategies. *Interfaces*, 35(3), Seiten 191–201.
- [259] H. van Landeghem, A. B. (2002). Reducing passenger boarding time in airplanes -

- A simulation based approach. *European Journal of Operational Research*, 142, Seiten 294–308.
- [260] Bachmat, E., Berend, D., Sapir, L., Skiena, S. und Stolyarov, N. (2006). Analysis of aeroplane boarding via spacetime geometry and random matrix theory. *Journal of Physics A*, 39, Seiten 453–459.
- [261] Ferrari, P. und Nagel, K. (2005). Robustness of efficient passenger boarding in airplanes. *Transportation Research Board Annual Meeting*.
- [262] Urban, B. (2007). Untersuchungen zur Optimierung des Boarding-, Deboardingverhaltens von Passagieren unter Nutzung eines individuellen-basierten Simulationssystems. Studienarbeit, Technische Universität Dresden.
- [263] Kirchner, A., Klüpfel, H., Nishinari, K., Schadschneider, A. und Schreckenberg, M. (2003). Simulation of competitive egress behavior: comparison with aircraft evacuation data. *Physica A*, 324, Seiten 689–697.
- [264] Airbus (2007). *Global Market Forecast (GMF)*.
- [265] Boeing (2007). *Boeing Current Market Outlook (CMO)*.
- [266] Air Berlin (2007). *Timetable Winter 2007/2008*.
- [267] DEW Engineering and Development ULC (2002). *Over-the-Wing (OTW) Dew-bridge*.
- [268] Deutsche Lufthansa AG (2007). *Geschäftsbericht*.
- [269] Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.
- [270] Transportation Research Board (1987). Measuring airport landside capacity. *Special report 215*.
- [271] Airports Council International (2000). Quality of service at airports: standards and measurements. *European Journal of Operational Research*.
- [272] Martel, N. und Seneviratne, P. (1990). Analysis of factors influencing quality of service in passenger terminal buildings. *Transportation Research, Airport Terminal and Landside Design and Operation*, (1273).
- [273] Correia, A. und Wirasinghe, C. (2006). Development of level of service standards for airport facilities. *Journal of Air Transport Management*.
- [274] Schultz, M., Wachtel, A. und Fricke, H. (2007). Standardized concept for passenger guidance systems at aerodromes. *Council of European Aerospace Conference (CEAS)*.
- [275] Mijksenaar, P. (2003). Sign of the times. *Airport World*, 8(4).
- [276] International Air Transport Association (2003). Global airport monitor survey.
- [277] Meißner, M., Scholz, S. W. und Decker, R. (2008). *Data Analysis, Machine Learning*

- and Applications*, Beitrag: AHP versus ACA - An Empirical Comparison, Seiten 447–454. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [278] Forman, E. und Selly, M. (2001). *Decision by Objectives: How to Convince Others That You Are Right*. World Scientific Publishing.
- [279] Byun, D. (2001). The AHP approach for selecting an automobile purchase model. *Information and Management*, 38(5), Seiten 289–297.
- [280] Bandeira, M., Correia, A. und Wirasinghe, C. (2008). Degree of importance of airport passenger terminal components and their attributes references. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 4(1).
- [281] Warschun, M. (2007). *Verkehrsknotenpunkte - Handelsorte der Zukunft*.
- [282] Dr. Lademann & Partner GmbH (2006). *Befragung Hamburg Airport*.
- [283] Schultz, M., Schulz, C. und Fricke, H. (2007). Enhanced Information Flow and Guidance in Airport Terminals using best Passenger's Visual Perception. *Eurocontrol Innovative ATM Research Workshop*.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer Prof. Hartmut Fricke bedanken, der mir die Anfertigung dieser Arbeit erst ermöglichte. Ich bedanke mich für seine Unterstützung und für sein reges Interesse am Fortgang der Arbeit. Ebenfalls gilt mein Dank Prof. Dirk Helbing, der mich durch die vielen Gespräche nachhaltig für die Forschung auf dem Gebiet der Personendynamik inspiriert hat. Herrn Prof. Andreas Schadschneider danke ich für die wissenschaftlichen Hinweise und Anregungen zur Modellierung des stochastischen Bewegungsmodells ebenso wie für die fachliche Durchsicht der erstellten Modellerweiterungen.

Ohne die geduldige und verlässliche Hilfsbereitschaft von Herrn Christian Schulz bei der Lösung von vielfältigen Problemen der Programmierung und des Softwaredesigns wäre die Arbeit in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen. Dafür gebührt ihm mein besonderer Dank.

Der Erich-Becker Stiftung danke ich für das gewährte Stipendium.

Meine Mitstreiter an der Professur für Technologie und Logistik des Luftverkehrs haben mir durch ihre Hilfsbereitschaft und ihre freundliche Verbundenheit, aber auch durch anregende Diskussionen die Zeit zu einer angenehmen und wertvollen Erfahrung werden lassen.

Es ist nicht immer einfach, die Zeit zwischen wissenschaftlicher Tätigkeit und dem Familienleben mit drei wunderschönen Töchtern richtig aufzuteilen. Meine Frau Dr. Stefanie Hartmann half mir mit ihrer konstruktiven wissenschaftlichen Kritik ebenso wie mit ihrer bedingungslosen Liebe und ihrem organisatorischen Talent. Meinem Bruder und meinen Eltern danke ich für ihr Verständnis und ihre stets aufmunternde Unterstützung.

Zuletzt möchte ich mich bei allen Freunden bedanken, die mir immer zur Seite standen wenn ich sie brauchte, ohne je eine Gegenleistung zu fordern. Mein Dank gilt besonders Aimee Krause, Falk Otto und Thomas Albrecht.