

Ein Modell zur mikroskopischen Simulation interaktionsbasierter Verkehrsdynamik

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte

Dissertation

von Dipl.-Ing. Chris Patrick Timmermann

Referent: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

Tag der Promotion: 5. November 2021

Für Papa.

Abstract

Streetscape designs based on the *Shared Space* design principle, which deliberately mitigates the strict separation of traffic modes, have become increasingly important in urban transportation planning in recent years. Although the implementation of the Shared Space principle varies locally, designs according to this principle aim for one common goal: The deliberate reduction of road markings and regulations should encourage road users to solve conflicts through spontaneous non-verbal communication, which in turn is expected to induce a more considerate behavior and thus an increase of the attractiveness of an area, especially for non-motorized traffic.

Contrary to conventional design patterns, suitable traffic flow models for mixed traffic, which provide a useful tool for traffic planners to evaluate a design in advance based on simulation results, are currently still lacking. A simulation model suitable for this purpose should provide results that can be evaluated with respect to performance criteria as well as the specific objectives, especially increased traffic safety and quality of the sojourn.

With these requirements in mind, in this work a microscopic traffic flow model to represent the behavior of pedestrians, bicyclists and motorized vehicles sharing the same traffic area is developed. Based on the Social Force Model (SFM) and further derived from observed behaviors from three intersections in Braunschweig and Hamburg, the model consists of three main parts – namely models for movement, conflict detection and reactive behavior.

First, planning of free flow trajectories is modeled using clothoid curves. To be able to model the motion along a pre-planned trajectory, the SFM is modified accordingly. This trajectory-based motion serves as the foundation for subjective conflict detection. For this purpose, a motion prediction by trajectory extrapolation using Lagrange curves is developed, based on which a conflict detection is performed. In order to represent the behavior of road users in conflict situations, the SFM is extended by various reaction mechanisms. These mechanisms lead, either by newly formulated forces or by rerouting of the desired trajectory, to situation-dependent evasive movements and changes of velocity.

The developed model is verified by replicating observed situations in the simulation and qualitatively comparing the simulation results with the observations. First, individual situations are investigated to demonstrate the respective reaction mechanisms, followed

by simulating the recorded traffic demand of a 60-minute period to examine the model behavior in a more complex scenario. It is shown that the model is capable of plausibly reproducing individual reaction mechanisms as well as traffic dynamics over a longer investigation period.

Finally, a generalized approach for stochastic modeling of model parameters is developed. This approach is suitable for use in various traffic flow models and is demonstrated using stochastic modeling to represent disturbed perception by modifying the according parameters in three artificial case studies.

Keywords: Shared Space, traffic flow simulation, Social Force Model, conflict detection

Zusammenfassung

Straßenraumentwürfe nach dem *Mischungsprinzip*, das die strikte Trennung der Verkehrsarten gezielt aufweicht, haben in der urbanen Verkehrsplanung in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Unabhängig davon, ob die lokale Ausprägung als *Begegnungszone*, *deregulierter Abschnitt* oder *Shared Space* bezeichnet wird, verfolgen Entwürfe nach diesem Prinzip eine gemeinsame Motivation: Verkehrsteilnehmer sollen Konflikte situationsabhängig und durch spontane Verständigung lösen, wodurch eine größere gegenseitige Rücksichtnahme und eine Steigerung der Aufenthaltsqualität, insbesondere für den nicht-motorisierten Verkehr, erzielt werden sollen.

Im Gegensatz zu konventionellen Entwurfsmustern sind entsprechende Verkehrsflussmodelle, die es dem Verkehrsplaner ermöglichen, einen Entwurf bereits im Vorfeld anhand einer Simulation bewerten zu können, für derartige Mischverkehrsflächen noch wenig verbreitet. Ein zu diesem Zweck geeignetes Simulationsmodell sollte Ergebnisse liefern, die sowohl hinsichtlich Kriterien wie der Leistungsfähigkeit eines Knotenpunkts als auch der spezifischen Zielstellungen, insbesondere der gesteigerten Verkehrssicherheit und Aufenthaltsqualität, ausgewertet werden können.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit auf Basis des Soziale-Kräfte-Modells (SKM) ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell zur Abbildung des Verhaltens von Fußgängern, Radfahrern und Pkw bei gemeinsamer Nutzung von Mischverkehrsflächen entwickelt. Aufbauend auf beobachteten Verhaltensweisen von drei Knotenpunkten in Braunschweig und Hamburg erfolgt die Modellbildung in drei wesentlichen Schritten.

Zunächst wird die Generierung von realistischen Trajektorien aus zusammengesetzten Klothoidenabschnitten modelliert. Um die Bewegung entlang einer vorgeplanten Trajektorie abbilden zu können, wird das SKM entsprechend modifiziert. Diese trajektorienorientierte Bewegung ermöglicht die Modellierung einer subjektiven Konfliktdetektion. Zu diesem Zweck wird zunächst eine Bewegungsprädiktion durch Trajektorienextrapolation mittels Lagrange-Kurven entwickelt, die anschließend für die Konfliktdetektion verwendet wird. Um das Verhalten der Verkehrsteilnehmer im Konfliktfall abzubilden, wird das SKM um verschiedene Reaktionsmechanismen erweitert. Diese Mechanismen bewirken, entweder durch neu formulierte Kräfte oder durch Umplanen der Wunschtrajektorie, situationsabhängige Ausweichbewegungen und Geschwindigkeitsänderungen.

Das entwickelte Modell wird verifiziert, indem beobachtete Situationen in der Simulation nachgebildet werden und die Simulationsergebnisse qualitativ mit den Beobachtungen verglichen werden. Dabei werden zuerst einzelne Situationen zur Demonstration der Reaktionsmechanismen betrachtet. Im Anschluss wird das Zusammenspiel der Mechanismen durch Simulation der Verkehrsnachfrage eines 60-minütigen Zeitraums untersucht. Es wird gezeigt, dass das Modell in der Lage ist, sowohl einzelne Reaktionsmechanismen als auch die Verkehrsdynamik über einen längeren Betrachtungszeitraum plausibel wiederzugeben.

Abschließend erfolgt die Entwicklung eines weitergehenden Ansatzes für die stochastische Modellierung einzelner Modellgrößen. Dieser Ansatz eignet sich zur Verwendung in verschiedenen Verkehrsflussmodellen und wird anhand der stochastischen Modellierung von Wahrnehmungsparametern in drei künstlichen Fallstudien demonstriert.

Schlagerworte: Shared Space, Verkehrsflusssimulation, Soziale-Kräfte-Modell, Konfliktdetektion

Inhaltsverzeichnis

Glossar und Abkürzungsverzeichnis	17
Symbolverzeichnis	19
1. Einleitung und Motivation	23
1.1. Shared Spaces	24
1.2. Mikroskopische Verkehrssimulation	30
1.3. Stand der Forschung	32
1.3.1. Modellierung von Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsarten	32
1.3.2. Erweiterungen des Soziale-Kräfte-Modells für Shared Spaces	34
1.3.3. Weiterentwicklung des Soziale-Kräfte-Modells im Forschungsumfeld der TU BS und LUH	35
1.4. Zielstellung und Aufbau dieser Arbeit	37
2. Problemanalyse	39
2.1. Begriffsdefinitionen	39
2.2. Datenaufnahme	43
2.2.1. Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig	43
2.2.2. Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf	45
2.2.3. Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig	46
2.3. Beobachtetes Verhalten	48
2.3.1. Methodik	48
2.3.2. Bewegung	49
2.3.3. Reaktionsverhalten im Konfliktfall	50
2.4. Forschungszielsetzung	55
3. Modelltheoretische Grundlagen	59
3.1. Das Soziale-Kräfte-Modell	59
3.1.1. Bewegung	61
3.1.2. Navigation	61
3.1.3. Wahrnehmung	62

3.2. Fahrzeugfolgemodelle	63
3.2.1. Optimal Velocity Model	64
3.2.2. Intelligent Driver Model	65
4. Modellierung von Bewegungen und Interaktionen	67
4.1. Modellierung von Bewegungen	67
4.1.1. Aufbau eines Navigationsgraphen	68
4.1.2. Modellierung der Trajektorie mit Klothoiden	70
4.1.3. Ersetzen des Antriebsterms	72
4.2. Modellierung der Wahrnehmung	74
4.2.1. Wahrnehmungsbereich	74
4.2.2. Bewegungsprädiktion	75
4.2.3. Konflikterkennung	81
4.2.4. Konfliktklassifizierung	85
4.3. Übergang zum vorausschauenden Verhalten	87
5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten	89
5.1. Entscheidung	90
5.2. Reaktion	91
5.2.1. Strategien mit einmaliger Trajektorienumplanung	92
5.2.2. Kraftbasierte Strategien	97
5.3. Mehrfachkonflikte	105
6. Simulationen zur Modellvalidierung	109
6.1. Validierung der Reaktionsmechanismen	109
6.1.1. Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt	110
6.1.2. Anbremsen eines Wartepunkts	112
6.1.3. Safe Zone Force	116
6.1.4. Reaktionskraft für defensive Reaktion	118
6.1.5. Reaktionskraft für offensive Reaktion	120
6.1.6. Trajektorienbasierte Ausweichkraft	123
6.1.7. Mehrfachkonflikte	125
6.2. 60-minütiges Szenario	129
6.2.1. Szenariospezifische Modellierung	130
6.2.2. Ergebnisse	131

7. Stochastische Modellierung der Wahrnehmung	139
7.1. Methodik	140
7.1.1. Ornstein-Uhlenbeck-Prozess	140
7.1.2. Kopplung mit Verkehrsmodellen	142
7.2. Fallstudien	143
7.2.1. Szenario A: Störung der Konfliktdetektion	144
7.2.2. Szenario B: Fahrzeugfolgemodell	147
7.2.3. Szenario C: Kreuzung mit Rechts-vor-links-Vorfahrtsregelung . . .	150
7.3. Bewertung und Ausblick	154
8. Zusammenfassung und Ausblick	157
Literatur	163
A. Beispiele zur Distanzfunktion	169
B. Simulationsparameter	173

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Shared Space im EU-Förderprogramm „Interreg IIIB North Sea Region Programme“	25
1.2.	Kraftfahrzeugverkehr-Konzept der Stadt Hannover. Aus: Landeshauptstadt Hannover, Baudezernat (2011)	29
2.1.	Standbild aus den Videodaten am Knotenpunkt Pockelsstr. – Katharinenstr./Konstantin-Uhde-Str., Braunschweig	44
2.2.	Draufsichten am Knotenpunkt Pockelsstr. – Katharinenstr./Konstantin-Uhde-Str., Braunschweig	44
2.3.	Standbild aus den Videodaten des Bereichs Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf	45
2.4.	Draufsichten des Bereichs Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf	46
2.5.	Standbild aus den Videodaten an der Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig	47
2.6.	Draufsichten an der Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig	47
2.7.	Aufgezeichnete Trajektorien an der Kreuzung Pockelsstr./Katharinenstr. in Braunschweig. Grün: Ungestörte Bewegung, Rot: Bewegung beeinflusst durch andere Verkehrsteilnehmer. Aus: Pascucci u. a. (2015)	49
2.8.	Skvallertorget (Norrköping, Schweden) nach der Konversion in einen Shared Space. Aus: Axelsson und Nederman (2016)	51
2.9.	Gewählte Rangfolge der Verkehrsarten.	52
2.10.	Konflikt zwischen Fußgänger und Pkw.	53
2.11.	Abfolge der in den Kap. 4 und 5 entwickelten Modellkomponenten im Kontext einer zeitdiskreten mikroskopischen Simulation.	57
4.1.	Beispiel für die Routensuche durch ein Gebiet mit polygonal berandeten Hindernissen mittels Navigationsgraph.	69
4.2.	Beispiel für die Konstruktion einer klothoidförmigen Trajektorie aus einem Kantenzug.	71
4.3.	Übersicht der Parameter zur Beschreibung der Wahrnehmung.	74
4.4.	Lagrange-Polynome vierten Grades	76
4.5.	Lagrange-Kurve dritten Grades	77
4.6.	Zeitliche Extrapolation mittels Lagrange-Kurve	78

4.7.	Vorgehen bei der Trajektorienextrapolation mit Beschränkung des maximalen Krümmungsgrads.	80
4.8.	Berechnung des Abstands zweier Verkehrsteilnehmer.	81
4.9.	Typische Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ mit den relevanten Parametern zur Beschreibung einer Konfliktsituation	82
4.10.	Konstellation zweier Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der Konflikterkennung.	84
5.1.	Bestimmung möglicher Ausweichpunkte. Rückseitiger Konflikt analog zum frontalen Konflikt.	93
5.2.	Bestimmung des Wartepunkts \vec{x}_{stop} durch Trajektorienprädiktion.	95
5.3.	Berechnung der Safe Zone Force.	98
5.4.	Berechnung der defensiven Reaktionskraft.	100
5.5.	Berechnung der offensiven Reaktionskraft.	102
5.6.	Typische Distanzfunktion $d(t)$ mit den relevanten Größen für die trajektorienbasierte Ausweichkraft	103
5.7.	Bei der Berechnung der Reaktionskraft \vec{f}_{traj} verwendete Größen	103
5.8.	Wichtungsfunktion $w(d)$ für verschiedene Formparameter k_2	105
5.9.	Verwendung der Distanzfunktion zur Beschreibung einer Interaktion	106
6.1.	Überblick über die betrachtete Situation.	111
6.2.	Konfliktreaktion während und nach der Simulation.	113
6.3.	Überblick über die betrachtete Situation.	114
6.4.	Erstmalige Konflikterkennung und Beginn der Reaktion.	115
6.5.	Geschwindigkeitsverlauf von V_1 beim Anbremsen des Wartepunkts.	115
6.7.	Simulationsergebnisse für das Beispiel zur Safe Zone Force.	117
6.8.	Überblick über die betrachtete Situation.	118
6.9.	Beginn und Ende der Reaktion.	119
6.10.	Trajektorien am Ende der Simulation.	120
6.11.	Simulierter und beobachteter Geschwindigkeitsverlauf von V_0	120
6.12.	Überblick über die betrachtete Situation.	121
6.13.	Simulationsergebnisse für die offensive Reaktionskraft.	122
6.14.	Überblick über die betrachtete Situation.	123
6.15.	Reaktion durch trajektorienbasierte Ausweichkraft zu verschiedenen Simulationszeitpunkten	124
6.16.	Konstellation zu Beginn der Simulation.	126
6.17.	Situation zum Zeitpunkt $t = 0,9\text{s}$	127
6.18.	Situation zum Zeitpunkt $t = 2,6\text{s}$	128
6.19.	Manuelle Erweiterung des Navigationsgraphen durch Knoten und Kanten zur Modellierung von Fahrspuren.	130
6.20.	Verteilungen der beobachteten und simulierten zurückgelegten Wegstrecken.	134
6.21.	Beobachtete und simulierte Geschwindigkeitsverteilungen.	135

6.22. Beobachtete und simulierte Trajektorien der diagonal kreuzenden Fußgänger	136
6.23. Getrennte Betrachtung der zurückgelegten Wegstrecken für kreuzende und nicht kreuzende Fußgänger.	136
7.1. Simulierte Pfade eines Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses.	141
7.2. Überblick über Szenario A.	144
7.3. Über 10 000 Simulationsdurchläufe gemittelte Verkehrsflüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von σ mit $d_s^{ij} = 1,5$ m.	146
7.4. Flüsse und korrespondierende Unfallraten in Abhängigkeit von d_s^{ij}	147
7.5. Überblick über Szenario B.	148
7.6. Flüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von T für verschiedene Diffusionen σ	149
7.7. Flüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von σ für verschiedene Zeitlücken T	150
7.8. Überblick über Szenario C.	151
7.9. Unfallraten in Abhängigkeit von d_s und T	153
7.10. Flüsse in Abhängigkeit von d_s und T	153
7.11. Unfallraten und Flüsse in Abhängigkeit von d_s und T für verschiedene Durchdringungsraten ρ	154
A.1. Gleichförmige, geradlinige Bewegung.	170
A.2. Ungleichförmige, geradlinige Bewegung.	170
A.3. Gleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie.	171
A.4. Ungleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie.	171

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

CAR

Kurzform für die Verkehrsart Pkw. 41

CYC

Kurzform für die Verkehrsart Radfahrer. 41

Distanzfunktion

Die Distanzfunktion beschreibt den zeitabhängigen Abstand zweier Verkehrsteilnehmer. Als Formelzeichen wird $d_{ij}(t)$ verwendet. 81, 83

Intelligent Driver Model (IDM)

Ein Fahrzeugfolgemedell, das durch ein geschwindigkeits- und abstandsabhängiges Beschleunigungsverhalten eine intelligente Fahrstrategie abbildet. Siehe Abschnitt 3.2.2. 63, 65, 66, 133, 139, 144, 145, 147–150, 158

Konfliktlösungsstrategie

Die Konfliktlösungsstrategie ist das Resultat der Entscheidung, die auf der [strategischen Ebene](#) getroffen wird. 52, 89, 93

Konflikttyp

Der Konflikttyp dient als Beschreibung der aktuellen Situation aus der Sicht des jeweiligen Verkehrsteilnehmers. Er ist das Ergebnis der [Konfliktklassifizierung](#) und hängt unter anderem von der Anzahl und der [Verkehrsart](#) der involvierten Verkehrsteilnehmer ab. 85, 159

Motorisierter Individualverkehr (MIV)

Unter motorisiertem Individualverkehr werden alle Verkehrsarten zusammengefasst, die sich mithilfe eines Kraftfahrzeugs vollständig selbstbestimmt bewegen können. 40, 46

Multi-Modal Intersection Simulation (MODIS)

Bezeichnung für die Simulationsumgebung, die im Rahmen des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt 1.3.3) entwickelt wurde. Das in dieser Arbeit entwickelte Verkehrsflussmodell wurde in diesem Framework implementiert. 36, 56, 58, 109, 158

Optimal Velocity Model (OVM)

Ein Fahrzeugfolgemedell, das die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in Abhängigkeit des Abstands zum Vorausfahrenden bestimmt. Siehe Abschnitt 3.2.1. 63–65

PED

Kurzform für die Verkehrsart Fußgänger. [41](#)

Reaktionsmechanismus

Der Reaktionsmechanismus bezeichnet die Änderung gegenüber der ungestörten Bewegung und stellt die [Taktische Ebene](#) einer Konfliktsituation dar. [52, 89](#)

Soziale-Kräfte-Modell (SKM)

Ein zweidimensionales Bewegungsmodell zur Abbildung der Dynamik dichter Personenströme mittels anziehender und abstoßender Kräfte. Siehe Abschnitt [3.1.19, 20, 33–37, 55, 56, 59–62, 64, 65, 67, 70, 72, 87, 89–91, 131, 143, 157, 158, 160, 161](#)

Trajektorie

Räumlich-zeitlichen Beschreibung der Bewegung eines Verkehrsteilnehmers. Ausführlichere Definition siehe [Trajektorie](#). [32, 42](#)

Verkehrsart

Die Verkehrsart beschreibt, ob es sich bei einem Verkehrsteilnehmer um einen Fußgänger, Radfahrer oder Pkw handelt. Ausführlichere Definition siehe [Verkehrsteilnehmer und Verkehrsarten](#). [17, 39, 74, 85](#)

Symbolverzeichnis

Anmerkung: Im Folgenden beziehen sich, sofern nicht anders explizit angemerkt, Größen mit dem Index i auf den jeweils betrachteten Verkehrsteilnehmer, der Index j bezeichnet die Betrachtung anderer Verkehrsteilnehmer aus dessen Sichtweise.

M_i	Formelzeichen für die Verkehrsart des Verkehrsteilnehmers V_i . 41, 85, siehe Verkehrsart
V_i	Der aktuell betrachtete Verkehrsteilnehmer. In der englischsprachigen Literatur häufig als <i>ego user</i> bezeichnet. 19, 20, 41, 61, 70, 74, 75, 79–81, 83–85, 93, 95–98, 100–103, 105, 131, 151, 169, 170
V_j	Ein beliebiger anderer Verkehrsteilnehmer, der ungleich V_i ist. 19, 20, 41, 61, 74, 75, 79–81, 83–85, 93–98, 100, 102, 103, 105, 107, 108, 127, 128, 131, 151, 169–171
$\alpha_{iM_j}^{\text{frontal}}$	Grenzwert für den relativen Körperwinkel ϕ_{ij}^{rel} , oberhalb dessen ein Konflikt als frontaler Konflikt eingestuft wird. 85, 86, 112
$\alpha_{iM_j}^{\text{lateral}}$	Unterer Grenzwert für den relativen Körperwinkel ϕ_{ij}^{rel} , ab dessen ein Konflikt als lateraler Konflikt eingestuft wird. 85, 86, 112
$\hat{T}_j(t)$	Die antizipierte Trajektorie eines fremden Verkehrsteilnehmers V_j . 20, 57, 79–81, 83, 84, 93–96, 98, 100–103, 111, 145
ϕ_p	Blickfeldwinkel. 74
ϕ_{ij}^{conf}	Konfliktwinkel. Definition siehe Abschnitt 4.2.3. 84
ϕ_{ij}^{rel}	Der relative Winkel zwischen den Körperausrichtungen der Verkehrsteilnehmer V_i und V_j zum Konfliktzeitpunkt. Definition siehe Abschnitt 4.2.3. 19, 84–86, 111
$\vec{f}_{ib}(t)$	Abstoßungsterm des Soziale-Kräfte-Modell (SKM) , der durch ein Hindernis b verursacht wird. 61, 62
$\vec{f}_{ij}(t)$	Abstoßungsterm des SKM , der durch einen Verkehrsteilnehmer V_j verursacht wird. 61, 62
$\vec{T}_i(t)$	Wunschtrajektorie des Verkehrsteilnehmers V_i . 20, 57, 70, 72, 73, 81, 84, 93–95, 98–100, 102, 103, 114, 145
$\vec{e}_i^0(t)$	Wunschrichtung. Definition siehe Gl. 3.2 61, 62

\vec{f}_{SZ}	Safe Zone Force, eine ortsabhängige defensive Reaktionskraft. 92, 98, 99, 131, 132,
\vec{f}_{def}	Defensive Reaktionskraft. 92, 100, 131, 132,
\vec{f}_{off}	Offensive Reaktionskraft. 92
\vec{f}_{traj}	Trajektorienbasierte Ausweichkraft. 14, 92, 103, 104, 131, 132
$\vec{f}_i(t)$	Antriebsterm des SKM. 61, 62, 72, 73
$\vec{f}_i^{\parallel}(t)$	Anteil des Antriebsterms parallel zur Bewegungsrichtung, dient der Geschwindigkeitsregulierung. 73
$\vec{f}_i^{\perp}(t)$	Radialer Anteil des Antriebsterms, dient der Beibehaltung einer Trajektorie. 73
\vec{p}_c^{ij}	Von V_i erwarteter Konfliktpunkt mit V_j . 83, 93, 94, 111, 114
\vec{p}_p^i	Sichtpunkt. 74
\vec{p}_x^{ij}	Erwarteter Kreuzungspunkt der Trajektorien $\vec{T}_i(t)$ und $\hat{\vec{T}}_j(t)$. Definition siehe Abschnitt 4.2.3. 84
$\vec{x}_i(s)$	Zeitunabhängige geplante Bahnkurve des Verkehrsteilnehmers V_i . 72, 95, 96, 145
$\vec{x}_i(t)$	Zeitabhängige Position des Verkehrsteilnehmers V_i . 61
d_{SZ}^{\max}	Bei der Berechnung der Safe Zone Force verwendeter Abstand zum Rand der sicheren Zone, ab dem der Bremsanteil aktiv wird. 98, 99, 116, 117, 174, siehe \vec{f}_{SZ}
d_{SZ}^{\min}	Bei der Berechnung der Safe Zone Force verwendeter minimaler Abstand zum Rand der sicheren Zone. 98, 99, 116, 174, siehe \vec{f}_{SZ}
d_{def}^{\max}	Bei der Berechnung der defensiven Reaktionskraft verwendeter Abstand zur Trajektorie eines Konfliktgegners, ab dem der Bremsanteil aktiv wird. 100, 119, 174, siehe \vec{f}_{def}
d_{def}^{\min}	Minimaler Abstand zur Trajektorie eines Konfliktgegners, der mithilfe der defensiven Reaktionskraft eingehalten werden soll. 100, 119, 174, siehe \vec{f}_{def}
d_{int}	Interaktionsabstand. 106
d_{min}^j	Erwarteter minimaler Abstand zum Verkehrsteilnehmer V_j im Rahmen der Bewegungsprädiktion. 21, 82, 83, 90, 108, 127, 128
d_s^{ij}	Gewünschter Sicherheitsabstand des Verkehrsteilnehmers V_i zu V_j . Bei einer erwarteten Unterschreitung liegt ein Konflikt vor. 15, 21, 41, 82–84, 95, 96, 100, 103, 106, 112, 114, 129, 145–147, 152, 153
$d_{ij}(t)$	Distanzfunktion. 14, 17, 41, 81–83, 90, 103, 104, 106, 145, 170, 171, siehe Distanzfunktion

h_p	Sichthöhe. 74, 75, 174–176
n_{conf}	Anzahl gleichzeitig erkannter Konflikte. 85, 86, 107
r_p	Wahrnehmungsradius. 74
t_{LR}	Oberer Grenzwert für t_{conf}^{ij} für vorausschauendes Verhalten. 87, 112, 114, 131–134
t_{SR}	Unterer Grenzwert für t_{conf}^{ij} für vorausschauendes Verhalten. 85–87, 112
t_{conf}^{ij}	Konfliktzeitpunkt, die Zeitspanne vom aktuellen Zeitpunkt bis zum erstmaligen Unterschreiten des Sicherheitsabstands d_s^{ij} . 21, 82–87, 93, 94, 103, 114, 132–134
t_{hor}^c	Zeitlicher Horizont für die Konflikterkennung. 80, 82, 83, 106
$t_{\text{hor}}^{\text{int}}$	Zeitlicher Horizont, innerhalb dessen Interaktionen stattfinden. 106
$t_{d_{\text{min}}}^j$	Zeitpunkt, zu dem die Distanzfunktion den Wert d_{min}^j beträgt. 83, 84, 90
v_i^0	Wunschgeschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers als skalare Größe. 62, 64, 65, 72, 129, 148

1. Einleitung und Motivation

Eine „durch das Aufeinanderprallen widerstreitender Auffassungen, Interessen o. Ä. entstandene schwierige Situation, die zum Zerwürfnis führen kann“ – so lautet gemäß Duden (2019) die allgemeine Definition für den Begriff des *Konflikts*. Parker und Zegeer (1989) spezifizieren diese Auffassung in Bezug auf den Straßenverkehr und definieren einen Konflikt unter Verkehrsteilnehmern wie folgt:

“ An event involving two or more road users, in which the action of one user causes the other user to make an evasive maneuver to avoid a collision. ”

Eine Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern stellt sicherlich das schlimmstmögliche Szenario im Straßenverkehr dar. Eine komfortable Teilnahme am Straßenverkehr bedeutet jedoch nicht ausschließlich das Verhindern gegenseitiger Berührung. Bereits das Unterschreiten eines persönlichen Sicherheitsabstands sorgt für Unbehagen und wird in der Regel durch alle Verkehrsteilnehmer versucht zu vermeiden.

In Anlehnung an das obige Zitat kann unter diesem Gesichtspunkt eine Definition für den Konflikt zwischen zwei Verkehrsteilnehmern somit etwa „Eine Situation mit mehr als einem Verkehrsteilnehmer, deren unveränderte Fortsetzung zu einer Unterschreitung persönlicher Komfortabstände führt“ lauten. Derartige Situationen sind, mit Ausnahme weniger sehr verkehrsschwacher Zeiten, im Straßenverkehr allgegenwärtig, sodass der Umgang damit einen alltäglichen Bestandteil der individuellen Mobilität darstellt.

Verkehrsrechtliche Regularien wie die deutsche Straßenverkehrs-Ordnung haben unter anderem die Aufgabe, für die meisten Situationen eindeutige Verhaltensweisen zur Lösung des Konflikts und somit zum Verhindern einer Kollision zu schaffen. Demgegenüber hat bereits die bauliche Gestaltung von Verkehrsflächen, der sogenannte Straßenraumentwurf, einen großen Einfluss darauf, wo und welche Konflikte überhaupt entstehen können. In diesem Kontext wird beim Entwurf von Stadtstraßen zwischen dem Trennungs- und dem Mischungsprinzip unterschieden (RASt 2006).

In der vorliegenden Arbeit wird ein mikroskopisches Simulationsmodell für Mischverkehrsflächen nach dem Shared-Space-Prinzip entwickelt. Hinsichtlich obiger Einteilung

sieht dieses Entwurfsmuster eine vollständige Aufhebung der Trennung von Verkehrsarten vor. Die dabei unweigerlich entstehenden Konflikte sollen von den beteiligten Verkehrsteilnehmern eigenständig und spontan gelöst werden, was zu einem kooperativen Verhalten und größerer gegenseitiger Rücksichtnahme führen soll. Somit werden im Sinne des Shared-Space-Gedankens aus den sonst eher negativ konnotierten Konflikten vielmehr gemeinsame Interaktionen.

Im folgenden Abschnitt 1.1 wird zunächst der verkehrsplanerische Hintergrund zu Shared Spaces näher erläutert. In den Abschnitten 1.2 und 1.3 folgen eine kurze Motivation für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation derartiger Mischverkehrsflächen sowie ein Überblick über den Stand der Forschung in diesem Bereich. Abschnitt 1.4 definiert die Zielstellung dieser Arbeit und beschreibt ihre grobe Struktur.

1.1. Shared Spaces

Der Begriff *Shared Space* folgt, selbst bei einer Eingrenzung auf Verkehrsknotenpunkte, keiner eindeutigen Definition. Vielmehr hat sich Shared Space im Laufe der letzten Jahre zu einem Sammelbegriff für ein verkehrsplanerisches Entwurfsmuster entwickelt. Dieses Gestaltungsprinzip soll eine Erhöhung der Verkehrssicherheit und Aufenthaltsqualität für Fußgänger und Radfahrer erzielen, indem Verkehrsteilnehmer durch den gezielten Verzicht auf Verkehrsregeln, Markierungen und bauliche Trennungen zu erhöhter Aufmerksamkeit und gegenseitiger Rücksichtnahme angeregt werden sollen.

Historische Entwicklung

Der Ursprung des Shared-Space-Gedankens findet sich im niederländischen *Woonerf*-Prinzip, einem Konzept zur Verkehrsberuhigung in Wohngebieten, bei dem sich Fußgänger und Radfahrer einen Verkehrsraum mit dem motorisierten Verkehr teilen. Dieses Gestaltungskonzept ging aus Versuchen hervor, die in den 1960er Jahren in Delft (NL) mit dem Ziel begonnen wurden, die Dominanz von Kraftfahrzeugen zu verringern und so ein angenehmeres Umfeld für die Bewohner zu schaffen. Die Erkenntnisse dieser Versuche wurden 1976 in Gestaltungsrichtlinien überführt, welche in den darauffolgenden Jahren sowohl für die Entstehung zahlreicher *Woonerven* in den Niederlanden sorgten als auch europaweit als Vorbild für ähnliche Regularien zur Verkehrsberuhigung dienten.

Vor diesem Hintergrund erscheint es wenig überraschend, dass auch das heutige Verständnis von Shared Space gemeinhin auf den niederländischen Verkehrsplaner Hans Mondermann zurückgeführt wird. Mondermann begann bereits in den 1980er Jahren in der Provinz Friesland mit einer gezielten Reduktion trennender Elemente zu experimentieren und kam bald zu dem unerwarteten Ergebnis, dass sich die durchschnittlichen

Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs durch derartige Maßnahmen weit über das durch konventionelle Verkehrsberuhigungsmaßnahmen erzielbare Niveau hinaus reduzieren ließen (Hamilton-Baillie 2008).

Bedingt durch diese langjährigen praktischen Erfahrungen war Mondermann auch im „Interreg IIIB North Sea Region Programme“, einem Infrastrukturförderprogramm, in dessen Rahmen Modellprojekte in insgesamt sieben europäischen Städten umgesetzt wurden, beratend tätig. Die Tatsache, dass drei dieser sieben Projekte in niederländischen Städten umgesetzt wurden, verdeutlicht ein weiteres Mal die Vorreiterrolle der Niederlande in diesem Bereich. In Deutschland wurde im Rahmen des Programms der Umbau einer Ortsdurchfahrt in Bohmte gefördert. Durch den Einbezug der Anwohner bereits in frühen Planungsphasen und das damit verbundene große öffentliche und mediale Interesse stellt der Shared Space in Bohmte seitdem zwar nicht das älteste, aber vermutlich das bekannteste Beispiel eines Shared Space in Deutschland dar.



(a) Shared Space in Bohmte. Abgerufen von: Gemeinde Bohmte (2008)



(b) Hinweisschild an den Modellkreuzungen. Abgerufen von: „Netzwerk Shared Space“ (2016)

Abbildung 1.1.: Shared Space im EU-Förderprogramm „Interreg IIIB North Sea Region Programme“.

Einsatzmöglichkeiten und verkehrsrechtliche Einordnung

In der Verkehrsplanung ist es üblich, Straßenräume nach den drei sogenannten Straßenfunktionen der Verbindungs-, Erschließungs- oder Aufenthaltsfunktion zu kategorisieren (FGSV 2008). Während die Verbindungsfunktion hauptsächlich der funktionalen Gliederung des Straßennetzes dient und dafür hinsichtlich der Raumordnung der zu verbindenden Orte weiter abgestuft wird, beziehen sich die beiden anderen Straßenfunktionen eher auf die Gegebenheiten im nahen Umfeld des Straßenraums.

Straßenräume mit einer Erschließungsfunktion sind durch unmittelbar angrenzende Geschäfts- oder Wohnbereiche oder ähnliche Bebauung charakterisiert. Eine Aufenthaltsfunktion ist gegeben, wenn Verkehrsflächen auch nicht direkt verkehrsbezogenen Zwecken wie Begegnung, Kommunikation oder Kinderspiel dienen. Sie kann bewusst

durch die Platzierung von Verweilmöglichkeiten wie Sitzgelegenheiten oder Gastronomie erzeugt werden, oder, insbesondere bei dichter Wohnbebauung, auch durch einen Mangel an Freiflächen entstehen. Die drei Straßenfunktionen sind nicht scharf voneinander zu trennen, jeder Straßenraum kann mehr als eine dieser Funktionen gleichzeitig erfüllen. In Bezug auf die Straßenfunktionen ist der Einsatz des Shared-Space-Entwurfsmusters immer dann sinnvoll, wenn die örtlichen Gegebenheiten eine Erschließungs- und Aufenthaltsfunktion ermöglichen und diese hervorgehoben werden sollen. Die Beeinflussung der Verbindungsfunktion hängt dabei von der Gestaltung im Einzelfall ab.

Im Gegensatz zu verschiedenen internationalen Beispielen wie den bereits genannten *Woonerven* (NL), den *Begegnungszonen* (A, CH) bzw. *zones de rencontre* (B, CH, F) oder den *Shared Zones* (AUS, NZ) existieren in Deutschland bislang keine verkehrsrechtlichen Regularien mit explizitem Fokus auf Shared Spaces. Jedoch wurde von der FGSV (2014) die Richtlinie „Hinweise zu Straßenräumen mit besonderem Querungsbedarf“ verfasst, in der unter anderem Empfehlungen zu den Einsatzbereichen und -grenzen von Shared Spaces ausgesprochen und eine verkehrsrechtliche Einordnung geliefert werden. Von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurden Untersuchungen zu 17 bestehenden Umsetzungen in Deutschland und der Schweiz, darunter auch die eingangs erwähnte Ortsdurchfahrt in Bohmte, zusammengestellt, um aus den Erfahrungen zu den Fallbeispielen allgemeine Einsatzmöglichkeiten für Shared Spaces definieren zu können. Der zugehörige Bericht (Baier u. a. 2015), dessen Zielsetzung auch in der Aktualisierung der FGSV-Richtlinie bestand, kommt zu der Schlussfolgerung, dass „[d]ie in Deutschland bestehenden Möglichkeiten der straßenverkehrsrechtlichen Ausweisung gemäß der StVO [...] als ausreichend erachtet“ werden.

Ziele und Eigenschaften

In den vorherigen Abschnitten wurden einige Zielsetzungen des Entwurfs von Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Gedanken bereits angedeutet. Zusammengefasst werden häufig die folgenden, durchaus untereinander verknüpften, Zielsetzungen der Shared-Space-Gestaltungsphilosophie in der Literatur aufgeführt:

- Verringerung des Geschwindigkeitsniveaus;
- Erhöhung der Verkehrssicherheit;
- Verbesserung des subjektiven Empfindens, insbesondere des nichtmotorisierten Verkehrs;
- Verbesserung der Umfeld- und Lebensqualität;
- Verringerung von Lärm- und Schadstoffemissionen.

Die genannten Ziele weisen somit eine große Schnittmenge zu konventionellen Verkehrsberuhigungsmaßnahmen auf. Im Gegensatz zu diesen soll jedoch eine deutliche Verschlechterung der Verbindungsqualität für den motorisierten Verkehr vermieden

werden, da ansonsten negative Auswirkungen durch die Verlagerung des Verkehrs auf andere Routen zu erwarten sind.

Diese Ziele sollen erreicht werden, indem durch die bauliche und optische Gestaltung einer Verkehrsfläche bewusst ein gewisses Maß an Verunsicherung hervorgerufen wird. Voraussetzung hierfür ist die Annahme, dass sich die Gestaltung einer Verkehrsfläche stärker auf das menschliche Verhalten auswirkt als ein aus Ge- und Verboten bestehendes Regelwerk (Gerike 2017). Die so erzeugte Unsicherheit soll eine größere Rücksichtnahme aller Verkehrsteilnehmer hervorrufen, die zu einem sozialeren Verkehrsverhalten führt, bei dem Konflikte idealerweise durch ein höheres Maß an Aufmerksamkeit gar nicht erst entstehen oder im Falle unklarer Situationen letztlich durch Verständigung per Blickkontakt gelöst werden können.

Durch die beschriebenen vielfältigen Regularien und Gestaltungsrichtlinien ist es nicht möglich, die Gestaltungselemente von Shared Spaces vollumfänglich und allgemeingültig aufzulisten. Vielmehr besteht eine der höchsten Maßgaben beim Entwurf darin, „die jeweiligen Ziele, Nutzungsansprüche und Entwurfsvorgaben durch geeignete Auswahl und Kombination der Entwurfselemente“ (FGSV 2014) zu berücksichtigen und dadurch den Entwurf individuell an die örtlichen Randbedingungen wie Platzverhältnisse, Verkehrsstärken und Hauptverkehrsströme anzupassen.

Dennoch lassen sich in den meisten umgesetzten Beispielen häufig wiederkehrende Entwurfsmuster identifizieren. Auf den ersten Blick fällt zunächst das Fehlen einiger gewohnter Gestaltungselemente auf:

- Verzicht auf physische Trennung zwischen den Verkehrsarten, einschließlich Höhenunterschiede zwischen verschiedenen Verkehrsflächen;
- Vollständiger Verzicht auf Lichtsignalanlagen sowie Minimierung der Verkehrsregelung und -zeichen;
- Keinerlei Fahrbahnmarkierungen;
- Weitestgehender Verzicht auf Parkmöglichkeiten für Kfz, teilweise durch ausgewiesenes Parkverbot.

Je nach örtlichen Gegebenheiten ist oftmals die Schaffung von sicheren Zonen für Fußgänger, meist in den Seitenräumen, wünschenswert. Im Sinne des Shared-Space-Gedankens können derartige Trennungen mit den folgenden Maßnahmen erreicht werden:

- Optische Trennung einzelner Flächen, beispielsweise durch Farb- oder Oberflächenwechsel des verbauten Pflasters;
- Leicht zu überwindende Höhenunterschiede zwischen Flächen in der Größenordnung weniger Zentimeter;
- Platzierung von funktionalen Elementen (Poller, Fahrradstellplätze u. ä.);
- Platzierung von Bänken und anderen Möblierungselementen;
- Punktuelle oder linienförmige Bepflanzung.

Eine bemerkenswerte Gemeinsamkeit dieser optionalen Gestaltungselemente besteht darin, dass sie, im Gegensatz zu konventionellen Steuerungselementen wie Fußgängerüberwegen, keine verkehrsrechtlich bindenden Verhaltensweisen vorschreiben. Stattdessen sollen sie zu einem freiwilligen kooperativen und sozialen Verkehrsverhalten anregen. Demgegenüber muss die Platzierung derartiger Elemente wohlüberlegt sein, da durch eine übermäßige Verwendung beispielsweise Blinden die Orientierung erschwert wird und die Barrierefreiheit somit nicht mehr gewährleistet ist.

Bisherige Umsetzungen

Die Anwendung des Shared-Space-Gedankens geht, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, nicht zwingend mit einem vollständigen Verzicht auf sämtliche Verkehrsregeln einher. Tatsächlich sind derartige Entwürfe, wie sie teilweise auch in dem eingangs erwähnten EU-Projekt umgesetzt wurden, unter den bereits umgesetzten Projekten heute eher die Ausnahme als die Regel. Zur begrifflichen Abgrenzung von diesen, meist explizit als Shared Space ausgewiesenen, vollständig deregulierten Beispielen werden Verkehrsflächen, auf denen durch die Verwendung eines oder mehrerer der genannten Gestaltungsmerkmale ein sichtliches kooperatives Verhalten auszumachen ist, im Folgenden als „gemeinsam genutzte Verkehrsflächen“ bezeichnet. Diese Verkehrsflächen stellen auch den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit dar.

Die Initiative „Netzwerk Shared Space“ (2016) listet zum gegenwärtigen Zeitpunkt 33 Beispiele für erfolgreiche Umsetzungen des Shared-Space-Prinzips in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Es ist zu erwarten, dass diese Zahl in den nächsten Jahren noch deutlich ansteigen wird, da viele Städte in ihren Verkehrskonzepten die Schaffung von Mischverkehrsflächen, wenn auch unter verschiedenen Bezeichnungen, vorsehen. Exemplarisch für den norddeutschen Raum können hier beispielsweise die Städte Bremen und Hannover angeführt werden.

In der Stadt Bremen wurde der „Verkehrsentwicklungsplan 2025“ (VEP 2014) im Jahr 2014 beschlossen, anschließend umgesetzt und unter stetiger Bürgerbeteiligung weiterentwickelt. Während der Verkehrsentwicklungsplan explizit alle Verkehrsarten und -netze abdecken soll, besteht eines von sechs definierten Zielfeldern in der „Stärkung der Gleichberechtigung aller Verkehrsteilnehmer/innen“, was unter anderem die Aufwertung von Straßenräumen hinsichtlich einer höheren Aufenthaltsqualität beinhaltet. Dazu sind unter anderem die Schaffung von Begegnungszonen in Wohnquartieren und Nahversorgungszentren vorgesehen.

Die strategischen Ziele der zukünftigen Verkehrsplanung für die Stadt Hannover wurden 2011 im „Masterplan Mobilität 2025“ (Landeshauptstadt Hannover, Baudezernat 2011) beschrieben. Im Rahmen des Handlungsschwerpunkts „Verkehrskonzept Innenstadt“ werden verschiedene Bereiche der Innenstadt als mögliche „Einsatzbereiche für deregulierte Abschnitte“ ausgewiesen (siehe Abb. 1.2). Auffällig dabei ist, dass an

den markierten Stellen bereits zum jetzigen Zeitpunkt häufig ein kooperatives und nicht immer regelkonformes Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu beobachten ist. An einigen dieser Stellen sind durch die Modernisierungen der letzten 15 Jahre bereits Gestaltungsmerkmale wie höhengleich gepflasterte Oberflächen vorhanden.

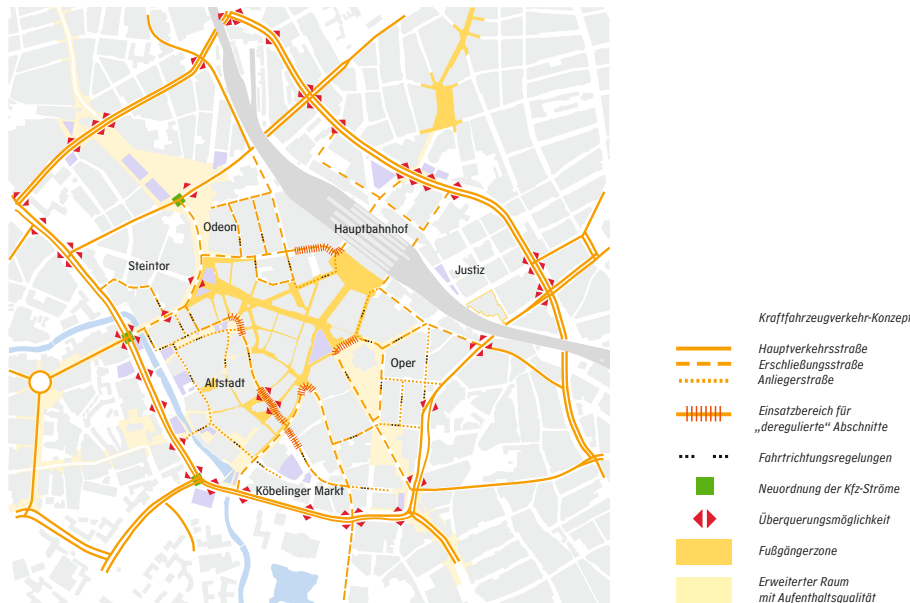


Abbildung 1.2.: Kraftfahrzeugverkehr-Konzept der Stadt Hannover. Aus: Landeshauptstadt Hannover, Baudezernat (2011)

Obwohl es sich beim Shared-Space-Prinzip noch immer um ein sehr junges Verkehrskonzept handelt, wurden in den letzten Jahren an verschiedenen fertiggestellten Umsetzungen gemeinsam genutzter Verkehrsflächen Untersuchungen durchgeführt, um zu evaluieren, ob die unterschiedlichen Zielsetzungen mit den praktischen Umsetzungen jeweils erreicht werden konnten. Die objektiven Ziele wie die Erhöhung der Verkehrssicherheit und Reduktion der Geschwindigkeiten können dafür mit Zählungen bzw. Messungen belegt werden. Demgegenüber sind zur Bewertung subjektiver Kriterien wie der Aufenthaltsqualität oder dem subjektiven Sicherheitsempfinden Befragungen der Verkehrsteilnehmer erforderlich. Im Falle von Umgestaltungen sollten sowohl Messungen als auch Befragungen zum jeweils gegenwärtigen Zustand idealerweise vor dem Umbau sowie nach einer gewissen Eingewöhnungsphase durchgeführt werden.

Den umfangreichsten Überblick über durchgeführte Untersuchungen im deutschsprachigen Raum enthält der bereits erwähnte Bericht der BAST (Baier u. a. 2015). In Bezug auf die Verkehrssicherheit wurden elf der 17 aufgeführten Fallbeispiele ausgewertet, da für diese die Unfalldaten vorlagen. Zusammengefasst wurde festgestellt, dass im untersuchten Zeitraum keine Unfälle mit Todesfolge zu verzeichnen waren. Die Anzahl schwerer Personen- und Sachschäden wird insgesamt als „äußerst gering“ bewertet, was auf die deutlich verringerten Geschwindigkeiten zurückgeführt wird.

Demgegenüber wird angemerkt, dass Untersuchungen zur subjektiven Bewertung nur in zwei Fällen durchgeführt wurden und somit zum Berichtszeitpunkt noch keine belastbaren allgemeingültigen Aussagen möglich waren. Weitet man die betrachteten Untersuchungen auf internationale Beispiele aus, zeigt sich ein ähnliches Bild, der Großteil der erhobenen Daten bezieht sich auch hier nur auf die Verkehrssicherheit. Beispielsweise wurden von Swinburne (2006) die Unfallzahlen vor und nach der Umgestaltung der Kensington High Street in London verglichen, wobei ein größerer Rückgang der Unfallzahlen als im stadtweiten Durchschnitt festgestellt werden konnte.

Von Karndacharuk u. a. (2015) wurde eine subjektive Bewertung durch Befragungen vor und nach der Konversion einer Einbahnstraße in einen Shared Space in Auckland, Neuseeland, durchgeführt. In dieser Befragung wurde die Umgestaltung aus der Sicht der befragten Fußgänger durchgehend positiv hinsichtlich der betrachteten Kriterien Sicherheit, Wohlbefinden und individuelle Bewertung der Aufenthaltsqualität beurteilt.

Einen übergreifenden Kritikpunkt an vielen bestehenden Umsetzungen des Shared-Space-Prinzips stellt die Barrierefreiheit dar. Während Gestaltungselemente wie die Höhengleichheit mobilitätseingeschränkter Verkehrsteilnehmern entgegenkommen, dienen konventionelle trennende Elemente Sehbehinderten und Blinden häufig zur Orientierung. Zwar stellt die Verwendung von entsprechend strukturierten Leitsystemen nicht zwingend einen Widerspruch zum Shared-Space-Prinzip dar, jedoch geht damit praktisch eine Einschränkung auf bestimmte Querungsstellen einher. Weiterhin wird bemängelt, dass vorhandene Leitsysteme durch Außengastronomie oder ähnliche Flächennutzung teilweise blockiert werden und somit nicht durchgängig als Führungslinie zur Verfügung stehen.

In Großbritannien war diese noch immer andauernde Diskussion zur Barrierefreiheit sogar der Auslöser, dass im Jahr 2018 bestehende Gestaltungshinweise zurückgezogen und Gemeinden vom Verkehrsministerium angewiesen wurden, sämtliche laufenden Projekte auf unbestimmte Zeit zurückzustellen. Eine derartige Abkehr vom Shared-Space-Prinzip ist allerdings bislang in dieser Form einmalig.

1.2. Mikroskopische Verkehrssimulation

Verkehrssimulation bezeichnet die computergestützte Auswertung mathematischer Modelle, die zur Abbildung zeitlich veränderlicher Verkehrsphänomene aufgestellt wurden. Daher stellt das verwendete mathematische Modell den Kern jeder Verkehrssimulation dar. Die Anforderungen an die Modellierung und die davon abhängige Wahl und Parametrisierung eines geeigneten mathematischen Modells hängen im Wesentlichen von den konkreten Fragestellungen ab. Einstufungen der verschiedenen verkehrstechnischen Fragestellungen und deren Implikationen auf die Wahl geeigneter Modellkategorien

wurden bereits ausführlich in der Literatur diskutiert. Einen umfangreichen Überblick geben hier beispielsweise Treiber und Kesting (2010). Auf die Unterschiede von mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodellen wird in dieser Arbeit in Abschnitt 3.1 näher eingegangen.

Bei der *Verkehrsflussmodellierung* soll das individuelle Bewegungsverhalten der Verkehrsteilnehmer abgebildet werden. Eine Verkehrsflusssimulation stellt ein hilfreiches Werkzeug dar, wenn beispielsweise die Auswirkungen von Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung, wie etwa Tempolimits, auf relevante verkehrliche Kenngrößen untersucht werden sollen. Die Ergebnisse einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation können hinsichtlich Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten, Reisezeiten und ähnlicher Größen ausgewertet werden.

Im Rahmen der Verkehrsplanung sind darüber hinaus häufig Fragestellungen zu beantworten, die sich auf größere Ausschnitte eines Verkehrsnetzes und einen längeren Zeitraum beziehen. Beispielsweise kann von Interesse sein, wie sich Änderungen der Nachfrage oder der Infrastruktur auf das betrachtete Verkehrsnetz auswirken. Hierfür sind Modellierungsansätze abseits der Verkehrsflussmodellierung erforderlich, die häufig unter dem Oberbegriff der Verkehrsnachfragemodelle zusammengefasst werden.

Ein Verkehrsmodell, das während der Planungsphase eines Knotenpunkts nach dem Shared-Space-Prinzip unterstützend eingesetzt werden kann, muss einerseits ähnliche Fragestellungen wie bei konventionellen Entwürfen beantworten, beispielsweise zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Entwurfs hinsichtlich Kennwerten wie der Kapazität. Im Vordergrund steht jedoch die Untersuchung, ob die spezifischen Ziele des Shared-Space-Prinzips tatsächlich erreicht werden können. In diesem Kontext würde insbesondere die Möglichkeit, mithilfe von Simulationsergebnissen verschiedene Varianten eines Entwurfs untereinander vergleichen zu können, ein hilfreiches Werkzeug während der Planung darstellen.

Ein adäquates Verkehrsmodell muss somit Ergebnisse generieren, die sowohl hinsichtlich der objektiven als auch der subjektiven Zielsetzungen ausgewertet werden können. Dabei lassen sich Kenngrößen wie Geschwindigkeitsverteilungen oder minimale Abstände der Verkehrsteilnehmer direkt aus den Ergebnissen einer mikroskopischen Simulation ermitteln. Weiterhin ist bei der Gestaltung von Mischverkehrsflächen die Analyse geeigneter Querungsbereiche von besonderem Interesse. Somit sollte das Verkehrsmodell in der Lage sein, die Routenwahl der simulierten Verkehrsteilnehmer abzubilden, um beispielsweise die Auswirkungen verschiedener Gestaltungselemente auf die Verkehrsströme untersuchen zu können.

Die Bewertung subjektiver Kriterien wie der wahrgenommenen Sicherheit oder Aufenthaltsqualität kann hingegen vom Verkehrsmodell nicht abgebildet werden. Hierfür ist eine weitergehende Modellierung zur Quantifizierung dieser Kriterien unter Einbezug verkehrspsychologischer Aspekte erforderlich. Das Verkehrsmodell sollte jedoch die notwendigen Eingangsdaten für entsprechende Modelle liefern.

Verkehrssimulationen können somit im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses beim Entwurf und der Konzeption von Maßnahmen und bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Dabei muss sichergestellt sein, dass das gewählte Modell die für die vorliegende Fragestellung relevanten Parameter hinreichend realistisch abbilden kann. Zu diesem Zweck wurden von der FGSV (2006) „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ herausgegeben. Diese beziehen sich zwar ausdrücklich auf die Simulation des Kraftfahrzeugverkehrs, jedoch lassen sich viele Aspekte auch auf die Simulation des Mischverkehrs übertragen. Unter anderem werden mögliche Validierungskenngrößen für verschiedene Fragestellungen angeführt. Im Umkehrschluss lässt sich folgern, dass potentielle Validierungskenngrößen von einem Verkehrsmodell möglichst realitätsnah wiedergegeben werden sollten. Wichtige Kenngrößen für die genannten Fragestellungen bezüglich Mischverkehrsflächen sind unter anderem Geschwindigkeitsprofile, Verkehrsdichten, Reise- bzw. Aufenthaltszeiten sowie akzeptierte Zeitlücken.

1.3. Stand der Forschung

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über andere wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der gleichzeitigen mikroskopischen Simulation mehrerer Verkehrsarten beschäftigen. Dazu werden zunächst in Abschnitt 1.3.1 verschiedene Arbeiten, die sich ohne ausdrücklichen Bezug zu gemeinsam genutzten Verkehrsflächen mit der Analyse und Modellierung kreuzender Ströme von Fußgängern und motorisiertem Verkehr befassen, diskutiert. In Abschnitt 1.3.2 werden Arbeiten vorgestellt, in denen mittels Erweiterungen des Soziale-Kräfte-Modells explizit die Interaktionen auf Shared Spaces modelliert werden sollen und somit ein ähnlicher Ansatz wie in der vorliegenden Arbeit verfolgt wird. Abschnitt 1.3.3 führt in das Forschungsprojekt zu gemeinsam genutzten Verkehrsflächen ein, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist.

1.3.1. Modellierung von Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsarten

Der überwiegende Anteil von Arbeiten zur Interaktion verschiedener Verkehrsarten beschäftigt sich mit der Analyse und Modellierung der Grenzzeitlücke (engl. *gap acceptance*) von Fußgängern und motorisiertem Verkehr. Dabei werden sowohl Situationen an Kreuzungen und ausgewiesenen als auch an nicht ausgewiesenen Fußgängerüberwegen (engl. *jaywalking*) betrachtet. Dieser Abschnitt soll einen ersten Überblick über dieses umfangreiche Themengebiet ermöglichen, weswegen die aufgeführten Arbeiten jeweils nur beispielhaft zu verstehen sind.

Derartige Untersuchungen gründen auf der Annahme, dass sich die **Trajektorien** der beteiligten Verkehrsteilnehmer kreuzen. Bei ausreichend großer Zeitlücke setzen beide

Verkehrsteilnehmer ihre Bewegung unbeeinflusst fort, andernfalls wird eine Kollision verhindert, indem einer der Beteiligten wartet und den jeweils anderen passieren lässt. Dabei verbleiben beide auf ihren jeweiligen Trajektorien bzw. Fahrstreifen, eine Ausweichbewegung ist im Gegensatz zu den Annahmen für Shared Spaces nicht vorgesehen. Die große Bandbreite der untersuchten Verkehrsflächen zeigt jedoch, dass diese Fälle nicht klar voneinander abzugrenzen sind, vielmehr ist der Übergang zu gemeinsam genutzten Verkehrsflächen fließend. So wurden beispielsweise von Chandra u. a. (2014) die Verteilungen der akzeptierten Zeitlücken an verschiedenen unregulierten Fußgängerquerungen in Indien untersucht. Dabei konnte unter anderem herausgestellt werden, dass beispielsweise die Geometrie der Querung einen größeren Einfluss auf die minimal akzeptierte Zeitlücke hat als etwa das Verkehrsaufkommen. Weiterhin hatte in der Untersuchung die Umgebung einen Einfluss, beispielsweise waren in der Nähe von Bildungseinrichtungen geringere Zeitlücken zu beobachten als in Gewerbegebieten. Untersuchungen wie diese liefern somit unbeabsichtigt einen wertvollen Beitrag zur Identifikation relevanter Parameter bei der Konzeptionierung und Gestaltung gemeinsam genutzter Verkehrsflächen, selbst wenn die ursprüngliche Fragestellung nicht im Kontext von Shared Spaces formuliert ist.

Die bei der Analyse beobachteter Zeitlücken erhobenen Daten dienen meist als Grundlage für die Überführung in deterministische oder stochastische Modelle. Dabei besteht der erste Schritt in der Formulierung eines Entscheidungsmodells für die Akzeptanz einer Zeitlücke. In verschiedenen Arbeiten werden hierfür beispielsweise deterministische Modelle für die Zeitlücke formuliert (Sun u. a. 2003) oder die Parameter entsprechender stochastischer Verteilungen geschätzt (Alhajyaseen u. a. 2013). Als Konsens scheint sich in jüngerer Zeit herauszustellen, dass eine Modellierung der Entscheidung auf alleiniger Grundlage der Zeitlücke keine ausreichenden Ergebnisse liefert, sodass sich neuere Entwicklungen häufig auf die Formulierung eines binären Logit-Modells konzentrieren, bei dem weitere Einflussgrößen wie die Geometrie des Umfelds berücksichtigt werden können (Zhao u. a. 2019).

Soll ein derartiges Entscheidungsmodell im Rahmen einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation angewandt werden, sind zwei grundsätzliche Ansätze geläufig. Eine regelbasierte Simulation impliziert die Diskretisierung des Raums und wird im Kontext der Verkehrssimulation meist in Form eines zellulären Automaten umgesetzt. Ein entsprechender Ansatz wird beispielsweise von Chen u. a. (2016) in Kombination mit einem kalibrierten Entscheidungsmodell für Fußgänger und Pkw verfolgt.

Kraftbasierte Modelle können als eine stetige Formulierung derartiger Regeln in Form von Bewegungsdifferentialgleichungen betrachtet werden. Zu dieser Modellklasse zählt auch das **Soziale-Kräfte-Modell (SKM)**¹, das etwa von Huynh u. a. (2013) zur Simulation kreuzender Ströme von Fußgängern und motorisiertem Verkehr verwendet wird.

¹Das SKM wird in Abschnitt 3.1 detaillierter beschrieben, wobei auch auf die unterschiedlichen Modellklassifizierungen näher eingegangen wird.

1.3.2. Erweiterungen des Soziale-Kräfte-Modells für Shared Spaces

Verschiedene Arbeiten haben sich in den vergangenen Jahren explizit mit der mikroskopischen Modellierung von Shared Spaces beschäftigt. Hier sind allen voran zwei Forschergruppen zu nennen. Beiden gemein ist, dass die jeweiligen Arbeiten auf dem **SKM** aufbauen. Damit wird ein ähnlicher Ansatz wie auch im gemeinsamen Forschungsprojekt der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover, auf das im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird, verfolgt. Übergreifend lassen sich drei wesentliche Anforderungen an die Modellierung identifizieren, die in den verschiedenen Arbeiten mit unterschiedlicher Gewichtung behandelt werden:

- Erweiterung des **SKM** um Radfahrer und motorisierten Verkehr. Dabei sind vor allem die fahrdynamischen Einschränkungen dieser Verkehrsarten ausschlaggebend.
- Verwendung eines Wegfindungsalgorithmus, der unter Berücksichtigung der in Shared Spaces vorhandenen zwei räumlichen Freiheitsgrade realistische Routen für Verkehrsteilnehmer liefert.
- Modellierung von Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern zur aktiven Konflikt- und Kollisionvermeidung.

Am Imperial College London (Anvari u. a. [2014](#), [2015](#)) wurde ein Modell zur Abbildung der Interaktionen zwischen Fußgängern und Pkw in Shared Spaces entwickelt. In diesem Modell wird die Fahrdynamik von Pkws über eine geschwindigkeitsabhängige Beschränkung des Lenkwinkels in das **SKM** eingebracht. Die initiale Routensuche erfolgt mittels eines Flutfüllungs-Algorithmus, wodurch für jeden Verkehrsteilnehmer jeweils Zwischenziele ermittelt werden, die der Reihe nach angesteuert werden. Während der Simulation erfolgt eine Konflikterkennung durch lineare Bewegungsextrapolation. Im Konfliktfall wird eine entsprechende Reaktion über zusätzliche neu formulierte Kräfte ins **SKM** eingebracht. Diese modelliert für Pkw ein Fahrzeugfolge- und Überholverhalten. Die Ausweichkraft für Fußgänger wird durch eine Optimierung der erwarteten Distanzfunktion ermittelt, sodass ein Wunschabstand durch Aufbringen der Reaktionskraft exakt eingehalten wird. Das Modell wurde an zwei Fallstudien in Großbritannien durch Minimierung der Abweichungen von simulierten und beobachteten Trajektorien kalibriert (Anvari u. a. [2016](#)).

Während sich dieser Ansatz durch die Verwendung von Zwischenzielen und zusätzlichen Kräften, also Konzepten, die in bestehenden Formulierungen des **SKM** bereits vorhanden sind, sehr gut in den Grundgedanken des **SKM** integriert, handelt es sich nach wie vor um einen physikalisch motivierten Ansatz. Dieser eignet sich laut Helbing und Molnar ([1995](#)) zur Modellierung reflexartiger Reaktionen und kann somit nur das Verhalten von Verkehrsteilnehmern in „einfachen“ Interaktionen abbilden. Komplexere Situationen, in denen eine bewusste Entscheidung durch die beteiligten Verkehrsteilnehmer getroffen wird, erfordern die Modellierung einer separaten Entscheidungsebene.

Ein vergleichbarer Ansatz wurde an der TU Graz im Forschungsprojekt „MixME“ (Schönauer 2017; Schönauer u. a. 2012) entwickelt. Hier wurde zunächst die Bewegung von Fußgängern, Radfahrern und Pkw mittels eines einfachen physikalischen Modells in das SKM integriert. Die Routenfindung erfolgt sukzessive während der Simulation auf Basis eines Potentialfelds, das aus dem Umfeld, wie beispielsweise Hindernissen, Begrenzungen oder für Pkw die Mitte der Fahrstreifen, aufgebaut wird. Eine vollständige Vorabrechnung der Trajektorie erfolgt somit nicht. Stattdessen wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen eine Konfliktdetektion durch Vorabsimulation der Bewegung aller Verkehrsteilnehmer unter der Annahme ungestörter Bewegung durchgeführt. Im Konfliktfall wählen beide involvierten Verkehrsteilnehmer eine Strategie mithilfe eines spieltheoretischen Ansatzes. Die verschiedenen Strategien werden mittels einer neu formulierten Kraft ins SKM integriert. Als Fallstudie zur Modellkalibrierung wurde der Sonnenfelsplatz in Graz herangezogen (Rudloff u. a. 2013), ein zum Shared Space umgebauter Kreisverkehr. Anhand von aufgezeichneten ungestörten Bewegungen wurde zunächst das Potentialfeld für die Navigation kalibriert. Die beobachteten Konfliktsituationen dienen zur Kalibrierung der spieltheoretischen Entscheidungsebene.

In den Arbeiten von Schönauer u. a. liegt der Fokus somit klar auf der Entscheidungsebene. Dadurch wurde ein Modell entwickelt, das in jeder Konfliktsituation eine aus mehreren geeigneten Strategien zur Konfliktlösung wählt. Dies entspricht zum einen dem qualitativ zu beobachtenden menschlichen Verhalten, zum anderen wurde die Plausibilität der erzielten Simulationsergebnisse hinsichtlich der Entscheidungsfindung erfolgreich anhand der Fallstudie belegt. Demgegenüber bringt die Modellierung der Navigation mittels des Potentialfelds mit sich, dass selbst im Konfliktfall kaum eine räumliche Streuung der simulierten Trajektorien zu beobachten ist. Dies bildet insbesondere für Fußgänger und Radfahrer die Realität nicht vollständig ab. Weiterhin suggeriert die Konflikterkennung auf Basis der ungestörten Bewegung, dass jeder Verkehrsteilnehmer ein vollständiges und objektives Wissen über die Absichten aller anderen Verkehrsteilnehmer hat. Eine subjektive Einschätzung der Situation wird somit nicht modelliert, die Konflikterkennung erfolgt mit diesem Ansatz immer symmetrisch und fehlerfrei.

1.3.3. Weiterentwicklung des Soziale-Kräfte-Modells im Forschungsumfeld der TU BS und LUH

Der gezeigte Forschungsbedarf wurde auch am Institut für Verkehr und Stadtbauwesen (IVS) der Technischen Universität Braunschweig sowie am damaligen Institut für Bauinformatik (heute Institut für Risiko und Zuverlässigkeit, IRZ) der Leibniz Universität Hannover erkannt. Daher wurde an den beiden Instituten im Jahr 2013 mit der Bearbeitung der ersten Phase des gemeinsamen Forschungsprojekts „Ein multi-modales Soziale-Kräfte-Modell zur Konfliktanalyse und Abschätzung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit gemeinsam genutzter Verkehrsflächen“ begonnen.

Das Ziel dieses Forschungsprojekts bestand in der ersten Phase darin, die softwaretechnischen sowie methodischen Grundlagen für eine Simulationsumgebung zur mikroskopischen Simulation der Verkehrsdynamik auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen zu schaffen. Diese Softwareumgebung wurde als **Multi-Modal Intersection Simulation (MODIS)** betitelt.

Um dieses Forschungsziel zu erreichen, wurden die folgenden Aspekte bearbeitet. Die Verteilung der Aufgaben auf die beteiligten Institute ist jeweils in Klammern vermerkt.

- Auswahl und Videoaufzeichnungen von für die Beobachtung der Verkehrsdynamik geeigneter Knotenpunkte (IVS + IRZ)
- Qualitative und auszugsweise quantitative Analyse der Videodaten hinsichtlich charakteristischer Verhaltensweisen (IVS)
- Entwurf geeigneter Erweiterungen des **SKM** zur Modellierung der beobachteten Verhaltensweisen (IRZ)
- Implementierung dieser Modellierungsansätze im Software-Framework und Kalibrierung von Modellparametern anhand der Realdaten (IRZ)
- Anwendung der Simulationssoftware zur detaillierten Analyse verkehrstechnischer Kennwerte (IVS)

In der zweiten Projektphase, die 2018 begonnen wurde, liegt der Schwerpunkt auf einer ausführlicheren quantitativen Analyse einer größeren Zahl an Verhaltensweisen mit dem Ziel, weitere spezifische Verhaltensweisen der verletzlichen Verkehrsteilnehmer (insbesondere Radfahrer) im Modell zu berücksichtigen und das in der ersten Projektphase prototypisch entworfene Entscheidungsmodell für weitere Verkehrsarten und Konflikttypen zu erweitern. Um die dafür erforderliche umfangreichere Datenbasis zu ermöglichen, ist im Gegensatz zur ersten Projektphase auch eine weitestgehend automatisierte Extraktion von Bewegungsdaten aus den Videoaufzeichnungen erforderlich.

Die ausführliche Diskussion und Interpretation der beobachteten Verhaltensweisen stellt einen wesentlichen Bestandteil der Dissertation von Pascucci (2020) dar. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit besteht in der detaillierten Analyse der Simulationsergebnisse, die im Laufe des Forschungsprojekts mit der **MODIS**-Software erzielt wurden. Demgegenüber liegt der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf der Modellierung verschiedener typischer Verhaltensweisen im Kontext eines mikroskopischen Simulationsmodells.

Im Laufe der zwei Phasen dieses Forschungsprojekts sind verschiedene wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden. Zu Beginn wurde das grundlegende Konzept des Forschungsprojekts nach den ersten erfolgreich implementierten Ansätzen von Pascucci u. a. (2015) beschrieben. Von Schiermeyer u. a. (2016) wurde die Kalibrierung von Reaktionsparametern mithilfe eines genetischen Algorithmus anhand von Konflikten zwischen zwei Fußgängern sowie zwischen Fußgängern und Pkw demonstriert. In Rinke u. a. (2017) werden verschiedene Reaktionsmechanismen für Radfahrer und

Fußgänger detaillierter vorgestellt. Nachdem in den bisherigen Veröffentlichungen ausschließlich Konfliktsituation zwischen genau zwei Verkehrsteilnehmern berücksichtigt wurden, stellen Schiermeyer u. a. (2017b) erstmalig einen Ansatz für die Modellierung der Verhaltensweise bei mehreren simultanen Konflikten vor. Schiermeyer u. a. (2017a) liefern einen Gesamtüberblick gegen Ende der ersten Projektphase. Pascucci u. a. (2018) entwickeln ein statistisch kalibriertes Entscheidungsmodell für Konfliktsituation, die durch unterschiedliche Strategien gelöst werden können. Trifunović u. a. (2021) zeigen den Forschungsschwerpunkt der zweiten Projektphase, in der eine detailliertere und automatisierte Datenaufnahme die quantitative Analyse deutlich größerer Beobachtungszeiträume ermöglicht.

1.4. Zielstellung und Aufbau dieser Arbeit

Das Kernziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines mikroskopischen Simulationsmodells zur Abbildung des Verhaltens von Fußgängern, Radfahrern und Pkw bei gemeinsamer Nutzung von Mischverkehrsflächen auf Basis des [Soziale-Kräfte-Modells \(SKM\)](#). Zu diesem Zweck werden die folgenden Teilaspekte der Verkehrsdynamik modelliert und das [SKM](#) an den notwendigen Stellen erweitert und modifiziert:

- Modellierung einer realitätsgetreuen Routenwahl im ungestörten Fall;
- Modifikation des [SKM](#) hinsichtlich physikalisch plausibler Bewegung aller Verkehrsarten entlang der gewählten Route;
- Modellierung des menschlichen Verhaltens zur vorausschauenden Konflikterkennung und -vermeidung;
- Erweiterung des [SKM](#) um Reaktionsmechanismen, die das menschliche Verhalten im Konfliktfall hinsichtlich Routenwahl und Geschwindigkeitsverlauf realistisch abbilden.

Die Arbeit ist in drei kapitelübergreifende Teile gegliedert. Im ersten Teil werden die Grundlagen für die weitere Modellierung sowohl aus verkehrsplanerischer als auch modelltechnischer Sicht erläutert. Dabei wird in Kapitel 2 zunächst das beobachtete Verhalten der Verkehrsteilnehmer an drei verschiedenen Knotenpunkten analysiert. Die Beschreibung der wesentlichen Struktur des [SKM](#) in Kapitel 3 stellt die Ausgangslage für die weitergehende Modellierung im Rahmen dieser Arbeit dar.

In den Kapiteln 4 und 5 erfolgt die eigentliche Entwicklung des mikroskopischen Verkehrsflussmodells. Dieses wird in die Bereiche Bewegung, Interaktion und vorausschauendes Verhalten unterteilt. Die Struktur dieses Teils wird anhand der einzelnen Modellbestandteile zur Abbildung des beobachteten Verhaltens in Abschnitt 2.4 detaillierter beschrieben.

Im dritten Teil werden zunächst deterministische Simulationsergebnisse des entwickelten Modells präsentiert und diskutiert (Kapitel 6). In Kapitel 7 wird ein Ansatz

entwickelt, um mithilfe stochastischer Modellierung eine nicht immer fehlerfreie Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer abbilden zu können. Kapitel 8 schließt die Arbeit mit Zusammenfassung und Ausblick ab.

2. Problemanalyse

Im vorigen Kapitel wurde der Forschungsbedarf im Bereich der mikroskopischen Simulation gemeinsam genutzter Verkehrsflächen aufgezeigt. Dieses Kapitel ordnet die vorliegende Arbeit innerhalb dieses Forschungsfelds ein und die Ziele ausführlich zu definieren und abzugrenzen. Dazu werden zunächst in Abschnitt 2.1 einige wichtige Begriffe im Kontext dieser Arbeit erläutert und die Notation für Formelgrößen eingeführt. In Abschnitt 2.2 werden drei Knotenpunkte vorgestellt, die als Datenbasis für die qualitative und quantitative Analyse typischer Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern dienen, und jeweils die Datenerfassung kurz erläutert. Die Erkenntnisse dieser Analyse werden in Abschnitt 2.3 zusammengefasst, wodurch die Grundlage für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit geschaffen wird. Dadurch lassen sich die Anforderungen für die Entwicklung eines mikroskopischen Modells zur Abbildung der beobachteten Verhaltensweisen definieren. Aus diesen Anforderungen wird in Abschnitt 2.4 die Forschungszielsetzung erläutert und der Aufbau der vorliegenden Arbeit detailliert beschrieben.

Die Inhalte der Abschnitte 2.2 und 2.3 stellen wesentliche Erkenntnisse des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt 1.3.3) dar und sind somit kein direkter Bestandteil dieser Arbeit. Jedoch sind sie für eine sinnvolle Einordnung der Arbeit in einen Gesamtkontext notwendig.

2.1. Begriffsdefinitionen

Im Anhang dieser Arbeit ist ein Glossar sowie ein [Symbolverzeichnis](#) zur Erläuterung häufig wiederkehrender Begriffe und Formelzeichen angeführt. Darüber hinaus werden in diesem Abschnitt verschiedene Begriffe, die für das Verständnis der Problemstellung erforderlich sind, in Bezug auf den Kontext dieser Arbeit ausführlicher beschrieben. Weiterhin wird das Notationsschema für Formelzeichen, die vor allem in den Kapiteln 4 und 5 eingeführt werden, erläutert.

Verkehrsteilnehmer und Verkehrsarten

Der Begriff der [Verkehrsart](#) stammt aus dem Bereich der Verkehrsplanung. In diesem Kontext dient er zur Kategorisierung des Verkehrsaufkommens auf einer Verkehrs-

2. Problemanalyse

fläche, wobei zwischen den vier Verkehrsarten Fußgänger, Radfahrer, **Motorisierter Individualverkehr (MIV)** und öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) unterschieden wird.

Motorisierter Individualverkehr (MIV) bezeichnet Verkehrsteilnehmer, die sich mithilfe eines Kraftfahrzeugs vollständig selbstbestimmt hinsichtlich ihrer Routenwahl bewegen. Der Begriff „Kraftfahrzeug“ fasst in diesem Zusammenhang alle Fahrzeuge zusammen, die technisch in der Lage sind, sich vollständig durch Motorleistung zu bewegen und umfasst somit auch motorisierte Zweiräder wie Motorräder oder Mopeds. Für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit werden aus der Gruppe des **MIV** ausschließlich Pkw berücksichtigt, weswegen der Begriff „Fahrzeug“ im weiteren Verlauf synonym zu „Pkw“ genutzt wird.

Verletzliche Verkehrsteilnehmer (engl. *vulnerable road users*, VRUs) ist ein Sammelbegriff, der sowohl Verkehrsteilnehmer des nicht-motorisierten (Fußgänger, Radfahrer, Skater, Pedelecs, E-Scooter, etc.) als auch des motorisierten Individualverkehrs (z. B. E-Bikes) umfasst. Ihnen gemein ist, dass bereits jeglicher physischer Kontakt mit einem anderen Verkehrsteilnehmer ein Verletzungsrisiko birgt.

Verkehrsarten in dieser Arbeit Für die Modellierung des individuellen Verhaltens stellt die in der Verkehrsplanung gebräuchliche Zusammenfassung verschiedenartiger Verkehrsteilnehmer unter den erläuterten Sammelbegriffen offensichtlich eine zu große Vereinfachung dar. So unterliegt beispielsweise die Routenwahl eines Fußgängers anderen Kriterien als die eines Radfahrers, obwohl beide zur Gruppe der verletzlichen Verkehrsteilnehmer angehören. Ebenso ist zu erwarten, dass der Fahrer eines motorisierten Zweirads ein anderes Konfliktverhalten als der Fahrer eines Pkws zeigt. Dieser Unterschied ist zum einen auf fahrdynamische Gesichtspunkte, vor allem aber auf das unterschiedliche Verletzungsrisiko im Fall einer Kollision zurückzuführen.

Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die Verkehrsarten Fußgänger, Radfahrer und Pkw berücksichtigt und, soweit erforderlich, unterschiedlich modelliert. Durch diese Beschränkung werden zwar mehrere im innerstädtischen Verkehr übliche Verkehrsarten vernachlässigt (z. B. motorisierte Zweiräder), jedoch konnten auf den betrachteten Kreuzungen (siehe Abschnitt 2.2) nur wenige Trajektorien und Interaktionen mit diesen Verkehrsarten beobachtet werden. Dadurch stand keine ausreichende Datenbasis für eine separate Modellierung entsprechender Verhaltensweisen dieser Verkehrsarten zur Verfügung.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die drei betrachteten Verkehrsarten, soweit es aus darstellungstechnischen Gründen bspw. in Abbildungen oder Tabellen erforderlich

ist, mit den abgekürzten Bezeichnungen PED (Fußgänger), CYC (Radfahrer) und CAR (Pkw) versehen.

Für den aktuell betrachteten Verkehrsteilnehmer, der in der englischsprachigen Literatur häufig auch mit dem Begriff *ego user* bezeichnet wird, wird im Folgenden das Formelzeichen V_i verwendet. Alle anderen Verkehrsteilnehmer aus der Sicht von V_i werden als V_j bezeichnet. Im Falle einer Konfliktsituation werden alle V_j , mit denen ein Konflikt besteht, als Konfliktgegner von V_i bezeichnet.

Alle weiteren Größen werden ebenfalls mit dem Index i bzw. j versehen, um die Zugehörigkeit zum jeweiligen Verkehrsteilnehmer zu kennzeichnen. Insbesondere ist an dieser Stelle die Verkehrsart eines Verkehrsteilnehmers zu nennen, die mit dem Formelzeichen M_j gekennzeichnet wird.

Bei der Modellierung des Konflikt- und Reaktionsverhalten werden Parameter eingeführt, die sich auf mehr als einen Verkehrsteilnehmer beziehen. Diese Größen sind an der doppelten Indizierung zu erkennen. Beispielsweise bezeichnet $d_{ij}(t)$ den in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen (zeitlich veränderlichen) Abstand von V_i und V_j . Bei subjektiven Größen ist dabei die Reihenfolge entscheidend, der erstgenannte Index bezeichnet die Perspektive.

Viele im Rahmen der Modellierung des Konfliktverhaltens verwendete Größen bezeichnen individuelle Präferenzen von V_i . Die begleitende Implementierung des Modells ist so konzipiert, dass diese Parameter für jeden simulierten Verkehrsteilnehmer individuelle Werte annehmen können, wobei angenommen wird, dass ein derartiger Parameter für alle anderen Verkehrsteilnehmer der gleichen Verkehrsart M_j immer gleich ist. Dementsprechend sollte beispielsweise der gewünschte Sicherheitsabstand (siehe Abschnitt 4.2.3) des Verkehrsteilnehmers V_i zu allen anderen Radfahrern dem obigen Schema zufolge $d_s^{i,CYC}$ lauten. Da diese Eigenschaft der Implementierung für die Beschreibung des Modells nur eine untergeordnete Rolle spielt, werden zugunsten der Lesbarkeit verkürzte Schreibweisen wie d_s^{ij} verwendet oder, wenn eine Missverständlichkeit ausgeschlossen werden kann, gänzlich auf eine Indexnotation verzichtet. In beiden Fällen sind jedoch immer die individuellen und von M_j abhängigen Parameter gemeint.

Zonierung des Straßenraums

Für die in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen und Modellbildungen werden die betrachteten Verkehrsflächen in drei Kategorien eingeteilt, die für die Beschreibung der untersuchten Knotenpunkte im weiteren Verlauf der Arbeit zu Zonen zusammengefasst werden.

- Die **Begegnungszone** wird durch alle drei betrachteten Verkehrsarten gleichwertig genutzt. Sie ist meist zusammenhängend und stellt im Sinne dieser Arbeit

das zentrale Element eines Knotenpunkts dar. In einigen europäischen Ländern wurde die Bezeichnung der Begegnungszone bereits in die jeweiligen Regelwerke aufgenommen und impliziert dabei teilweise unterschiedliche Vorrangsregelungen der Verkehrsarten (siehe auch Abschnitt 1.1). Bei der Modellierung in dieser Arbeit sollen jedoch, unabhängig vom jeweils gültigen Regelwerk, alle Knotenpunkte berücksichtigt werden, auf denen mindestens bereichsweise ein ebenbürtiges Verhalten der Verkehrsarten zu beobachten ist. Daher wird der Begriff hier auf alle derartigen Knotenpunkte ausgeweitet.

- Die aus Sicht der verletzlichen Verkehrsteilnehmer **sichere Zone** darf nur von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden. Sie grenzt meist von mehreren Seiten an die Begegnungszone an und kann sich somit aus mehreren nicht zusammenhängenden Flächen zusammensetzen. Oftmals ist sie nur durch optische Maßnahmen ohne deutliche bauliche Trennung von der Begegnungszone abgegrenzt, wodurch Fußgänger zusätzlich zur Nutzung der Begegnungszone animiert werden sollen.
- Die **Übergangszonen** umfasst üblicherweise Straßenbereiche, die an die anderen Zonen angrenzen und, den Fahrstreifen folgend und unter Einhaltung konventioneller Verkehrsregeln, überwiegend von motorisiertem Verkehr und Radfahrern genutzt werden. Dabei sind häufig höhere Geschwindigkeiten als in der Begegnungszone zu beobachten. Sie sind im Sinne dieser Arbeit kein direkter Bestandteil des Knotenpunkts, jedoch können motorisierte Verkehrsteilnehmer in dieser Zone, die sich der Begegnungszone nähern, bereits durch andere Verkehrsteilnehmer wahrgenommen werden, wodurch ein Einfluss auf die Verhaltensweise in den anderen Zonen zu erwarten ist.

Bewegung

Trajektorie Je nach physikalischem oder mathematischem Kontext existieren für den Begriff der **Trajektorie** formell unterschiedliche Definitionen. In dieser Arbeit dient die Trajektorie zur räumlich-zeitlichen Beschreibung der Bewegung eines Verkehrsteilnehmers. Dabei darf die zeitliche Komponente vom aktuellen Betrachtungszeitpunkt aus gesehen sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft liegen. In ersterem Fall beschreibt die Trajektorie die bereits absolvierte, im zweiten Fall die geplante oder erwartete Bewegung.

Ungestörte Bewegung Eine beobachtete Trajektorie wird als ungestörte Bewegung (engl. *Free Flow*) bezeichnet, wenn weder die Wahl der Route noch der Geschwindigkeit durch die Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer beeinflusst ist. Somit ist die Bewegung von individuellen Präferenzen hinsichtlich gewählter Verkehrsbereiche und Geschwindigkeiten geprägt. Das Pendant zur ungestörten Bewegung ist die „Bewegung

im Konfliktfall“. Der Lesbarkeit halber wird im Kontext dieser Arbeit hierfür synonym die verkürzte Bezeichnung „Konfliktfall“ verwendet.

2.2. Datenaufnahme

Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wurden Videoaufzeichnungen an verschiedenen innerstädtischen Kreuzungen durchgeführt und analysiert. Sämtliche Kreuzungen wurden mit der Maßgabe ausgewählt, dass entweder bereits durch bauliche Maßnahmen eine bewusste Aufhebung der Trennung zwischen den Verkehrsarten erkennbar sein sollte oder eine Vorabbegehung eindeutig das Vorhandensein typischer Bewegungsmuster zeigte. Weiterhin ist zur Generierung nützlicher Daten eine Verkehrsstärke erforderlich, die zumindest zu den Stoßzeiten Konfliktsituationen zwischen Fußgängern, Radfahrern und Pkws hervorruft. Das Ziel dieser Videoaufzeichnungen besteht darin, zunächst durch visuelle Untersuchungen qualitative Aussagen über typische Verhaltensmuster der jeweiligen Verkehrsarten treffen und Modellierungsansätze entwerfen zu können. Eine anschließende quantitative Analyse der einzelnen zurückgelegten Trajektorien ermöglicht eine Modellkalibrierung und -validierung.

Tabelle 2.1 beinhaltet eine Übersicht über die Verkehrsstärken während der Aufzeichnungen der untersuchten Knotenpunkte. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Situationen jeweils näher.

Ort	Aufzeichnung	Fußgänger	Radfahrer	Pkw	Gesamt
Pockelsstraße, BS (2.2.1)	Mi., 04.06.2014, 12:30-13:45 Uhr	1936	634	220	2790
Weidenbaumsweg, HH (2.2.2)	Sa., 02.04.2016, 13:50-14:20 Uhr	1114	0 ^[i]	299	1413
Wilhelm-Bode-Straße, BS (2.2.3)	Do., 28.03.2019, 14:50-15:50 Uhr	243	264	449	956

^[i] Radfahrer wurden hier zwar aufgezeichnet, jedoch nicht gezählt und analysiert.

Tabelle 2.1.: Übersicht über Aufnahmedaten zu den untersuchten Kreuzungen mit Anzahlen beobachteter Verkehrsteilnehmer aufgeteilt auf die Verkehrsarten

2.2.1. Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig

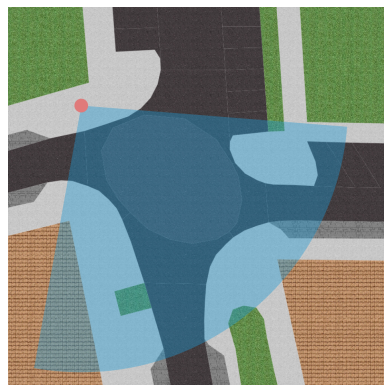
Die Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße befindet sich zwischen verschiedenen Gebäuden der Technischen Universität Braunschweig, wie

2. Problemanalyse



Abbildung 2.1.: Standbild aus den Videodaten am Knotenpunkt Pockelsstr. – Katharinenstr./Konstantin-Uhde-Str., Braunschweig

der Universitätsbibliothek, der Mensa, zahlreichen Instituten und Vorlesungssälen einschließlich des „Audimax“. Dementsprechend ist sie in der Vorlesungszeit zwischen den Vorlesungsblöcken insbesondere von Fußgängern und Radfahrern stark frequentiert. Die 75-minütige Aufzeichnungsphase beinhaltet eine derartige Stoßzeit, die von 13 bis 13:15 Uhr zu beobachten war. Auffällig an der 15-minütigen Stoßzeit ist, dass in Bezug auf den gesamten Betrachtungszeitraum je nach Verkehrsart zwischen 34 und 37 % aller Verkehrsteilnehmer innerhalb dieser Phase zu beobachten waren.



(a) Lageplan mit Kameraposition.



(b) Zonierung des Szenarios. Blau: Begegnungszone, Grün: Sichere Zone, Rot: Übergangszone.

Abbildung 2.2.: Draufsichten am Knotenpunkt Pockelsstr. – Katharinenstr./Konstantin-Uhde-Str., Braunschweig

Die Trajektorien wurden für diese Kreuzung durch händische Nachverfolgung mittels der Software „Tracker“¹ aufgezeichnet. Dabei wurde ein zeitlicher Abstand der beobachteten Punkte von 0,5 s gewählt.

¹Tracker ist eine Software zur händischen Analyse von Videos, die vornehmlich auf Experimente aus dem Bereich der Schulphysik ausgelegt ist, <https://physlets.org/tracker/>.

Aufgrund des hohen manuellen Aufwands wurde bei der quantitativen Analyse lediglich die Stoßzeit vollständig berücksichtigt. Für den restlichen Zeitraum wurden einzelne Konfliktsituationen visuell ausgewählt und anschließend erfasst.

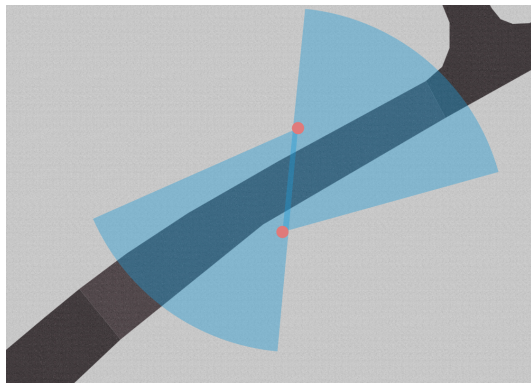
2.2.2. Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf

Der Weidenbaumsweg befindet sich in Bergedorf, einem südöstlichen Stadtteil Hamburgs. Im Gegensatz zu den beiden anderen Beispielen handelt es sich bei dem untersuchten Bereich nicht um einen Knotenpunkt im Sinne einer Kreuzung gleichartiger Verkehrswege. Vielmehr durchkreuzt der Weidenbaumsweg einen Bereich vor dem S-Bahnhof Hamburg-Bergedorf, der von Fußgängern als Verbindung zwischen dem Bahnhof und dem Innenstadtbereich genutzt wird. Der gegenwärtige und untersuchte Stand ist das Resultat einer Umbaumaßnahme des gesamten Bereichs, die 2012 fertiggestellt wurde. Im Rahmen dieses Umbaus wurde die Regulierung in einen „verkehrsberuhigten Geschäftsbereich“ (ugs. „Tempo-20-Zone“) umgewandelt.

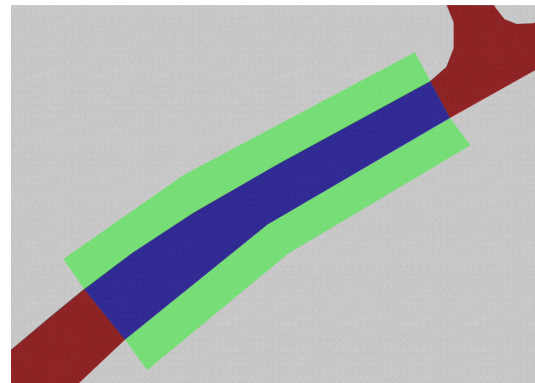


Abbildung 2.3.: Standbild aus den Videodaten des Bereichs Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf

Der Übergang vom Fußgängerbereich zur Fahrbahn erfolgt beidseitig nahezu höhen- gleich und ist optisch lediglich durch eine Reihe dunklerer Pflastersteine hervorgehoben. Auf einer Länge von gut 60 m ist auf der Fahrbahn der gleiche Bodenbelag wie im Fußgängerbereich verbaut. Obwohl im verkehrsberuhigten Geschäftsbereich laut Straßenverkehrsordnung die üblichen Verkehrsregeln gelten (u. a. darf die Fahrbahn nur zum Zweck der Querung betreten werden, wobei Fußgänger wartepflichtig sind), stellt sich durch die bauliche Gestaltung ein Querungsverhalten mit gegenseitiger Rücksicht- nahme über der gesamten Länge des Bereichs ein. Die Verkehrssituation entspricht somit dem „besonderen linearen Querungsbedarf“ nach FGSV (2014, siehe auch Abschnitt 1.1).



(a) Lageplan mit Kamerapositionen.



(b) Zonierung des Szenarios. Blau: Begegnungszone, Grün: Sichere Zone, Rot: Übergangszone.

Abbildung 2.4.: Draufsichten des Bereichs Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf

Die Videoaufzeichnung erfolgte über drei Stunden an einem frühen Samstagnachmittag, wovon die 30 min mit dem höchsten Verkehrsaufkommen ausgewählt (siehe Tab. 2.1) und nach dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verfahren manuell ausgewertet wurden. Dabei wurden lediglich die Trajektorien von Fußgängern und Pkw berücksichtigt, da nach einer ersten visuellen Auswertung der weitaus überwiegende Anteil der Interaktionen zwischen den kreuzenden Fußgängern und dem motorisierten Verkehr zu beobachten waren.

2.2.3. Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig

Die Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße befindet sich in einem Wohngebiet mit geschlossener Bebauung in ca. 2 km Entfernung zum Stadtkern Braunschweigs und ist der Straßenkategorie der „Erschließungsstraße“ zuzuordnen. Das Gebiet ist als Tempo-30-Zone ausgewiesen, somit besteht eine rechts-vor-links-Vorfahrtsregelung. Der Radverkehr wird gemeinsam mit dem MIV auf der Fahrbahn geführt.

In der Nähe der Kreuzung befinden sich Einkaufsmöglichkeiten, kleinere Gewerbeflächen, ein Krankenhaus und verschiedene Universitätsgebäude. Dementsprechend ist zu erwarten, dass sich ein großer Teil der Verkehrsteilnehmer auf dem Weg zwischen Wohnung und Arbeitsstätte oder einem anderen dieser Ziele befindet und somit der Anteil an Ziel- oder Quellverkehr deutlich gegenüber dem Durchgangsverkehr überwiegt. Zwischen dem östlichen und dem südlichen Arm der Kreuzung befindet sich der Eingang zu einem bewaldeten Stadtpark. Auf der gegenüberliegenden Seite dieses Parks befinden sich weitere Ziele wie Schule, Kindergarten und Sportanlagen. Für Fußgänger und Radfahrer nimmt der Park somit nicht nur eine Freizeit-, sondern auch

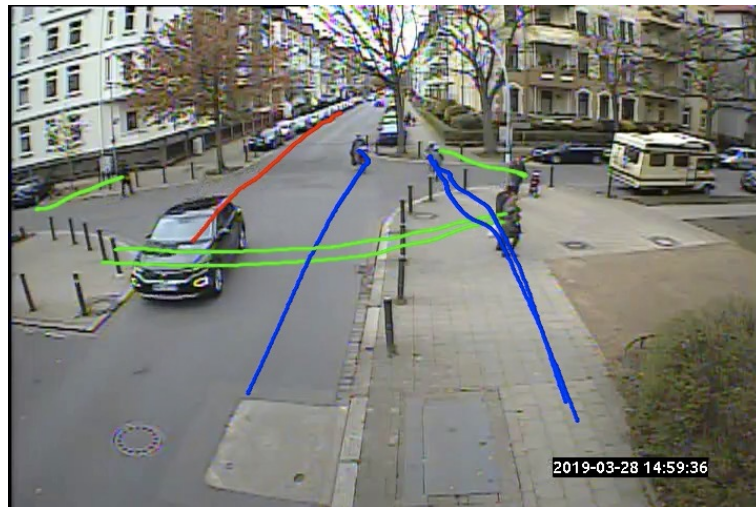
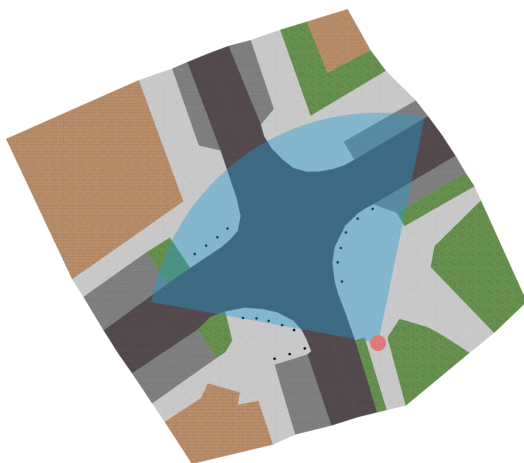
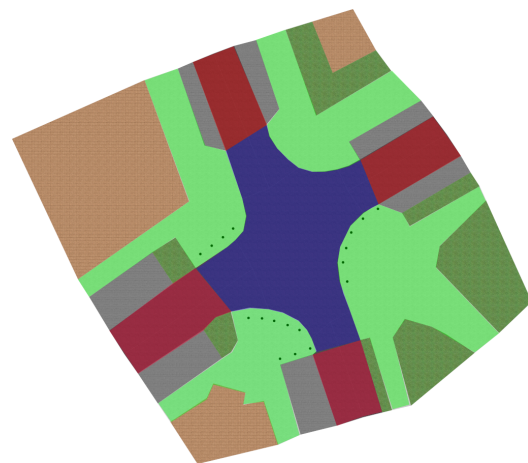


Abbildung 2.5.: Standbild aus den Videodaten an der Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig

eine Verbindungsfunktion ein. In allen Richtungen sind Parkstände bis kurz vor dem Knotenpunkt angeordnet, die neben ihrer eigentlichen Funktion auch von Fußgängern zum Überqueren der Fahrbahn genutzt werden.



(a) Lageplan mit Kameraposition.



(b) Zonierung des Szenarios. Blau: Begegnungszone, Grün: Sichere Zone, Rot: Übergangszone.

Abbildung 2.6.: Draufsichten an der Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig

Für die Analyse der aufgezeichneten Trajektorien wurde ein größtenteils automatisiertes Verfahren auf Basis des „Tracking-by-Detection“-Paradigmas verwendet. Die technische Umsetzung ist detailliert in Trifunović u. a. (2021) beschrieben. Im Gegensatz zur händischen Positionsbestimmung bei den vorherigen Kreuzungen ermöglicht die automatisierte Erfassung die Berücksichtigung jedes Einzelbilds der Videoaufzeichnung

gen. Da die verwendete Kamera eine Bildrate von 30 Bildern/s aufnimmt, resultieren Trajektoriendaten im zeitlichen Abstand von $1/30$ s.

2.3. Beobachtetes Verhalten

In diesem Abschnitt werden die auf drei untersuchten Knotenpunkten in Braunschweig und Hamburg beobachteten Verhaltensweisen beschrieben und hinsichtlich der Anforderungen an ihre Modellierung qualitativ analysiert und kategorisiert. Die Vorgehensweise dabei wird in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, wobei insbesondere das iterative Vorgehen bei der Unterscheidung zwischen ungestörter Bewegung und Konfliktfall diskutiert wird. In den beiden folgenden Abschnitten werden die Beobachtungen zusammengefasst, wobei zunächst (Abschnitt 2.3.2) allgemein auf beobachtete Bewegungsmuster eingegangen und anschließend (Abschnitt 2.3.3) besonderer Augenmerk auf das Bewegungs- und Reaktionsverhalten im Konfliktfall gelegt wird.

Die Beobachtungen und die darauf aufbauenden Analysen stammen aus dem Forschungsprojekt (1.3.3) und werden ggf. durch Hinzuziehen weiterer Quellen ergänzt.

2.3.1. Methodik

Für die weitergehende Analyse ist es notwendig, dass die beobachteten Trajektorien hinsichtlich ungestörter Bewegung oder dem Konfliktfall klassifiziert werden. Diese Unterscheidung erfordert eine Methode zur Abgrenzung dieser beiden Fälle in den aufgezeichneten Trajektoriendaten.

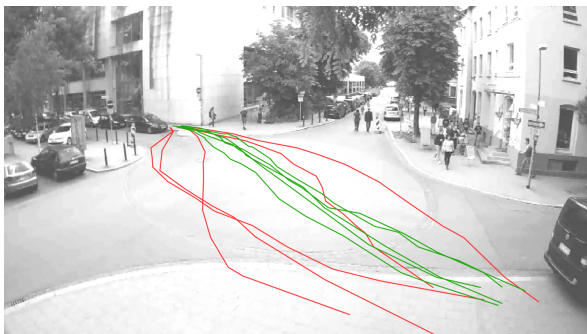
Eine ungestörte Bewegung lässt sich einfach identifizieren, wenn sich ein Verkehrsteilnehmer allein innerhalb eines ausreichend großen Radius befindet. In diesem Fall wird bei der Trajektorienanalyse lediglich ein Abstandskriterium benötigt. Jedoch ist in vielen Fällen eine ungestörte Bewegung auch bei der Anwesenheit mehrerer Verkehrsteilnehmer in geringerem Abstand zu beobachten.

Für die Abgrenzung dieser Fälle von tatsächlichen Konfliktfällen sind zwei Herangehensweisen denkbar. Einerseits lassen sich Konfliktfälle durch Bestimmung der räumlich-zeitlichen Abweichung der beobachteten Trajektorien von der ungestörten Bewegung identifizieren. Dieses Vorgehen setzt ein grundlegendes Verständnis der ungestörten Bewegung voraus, damit eine plausible Annahme über diese getroffen werden kann. Andererseits können durch simultanes zeitliches Abtasten der beobachteten Trajektorien Situationsparameter wie Abstände oder relative Geschwindigkeiten bestimmt werden. Wenn bereits ein Verständnis dafür besteht, welche räumlichen und zeitlichen Konstellationen von Verkehrsteilnehmern als Konfliktsituation wahrgenommen werden, können diese zur Identifikation der entsprechenden Trajektorien herangezogen werden.

Beide Ansätze setzen somit jeweils eine Kenntnis über grundlegende Verhaltensweisen voraus. Diese in voller Tiefe zu erlangen ist jedoch die eigentliche Zielstellung der Analyse der Beobachtungen. Insofern können beide Ansätze als iterative Ansätze aufgefasst werden.

Im Forschungsprojekt (siehe Abschnitt 1.3.3) wurde eine Kombination der beiden Ansätze gewählt, die folglich auch in die Arbeit von Pascucci (2020) eingeflossen ist und dort ausführlicher beschrieben ist. Zunächst wurden alle ungestörten Bewegungen analysiert, die sich auf Grundlage des oben erläuterten einfachen Falls eindeutig identifizieren lassen. Diese dienen als Grundlage für die Modellierung der ungestörten Bewegung und somit als Vergleichsgrundlage für die weniger eindeutigen Fälle. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden die Erkenntnisse aus der Modellbildung, insbesondere aus der Konfliktdetektion, rückwirkend verwendet, um die aufgezeichneten Trajektoriendaten hinsichtlich des erstmaligen Zeitpunkts der Konflikterkennung zu analysieren. Eine derartige Kombination der Ansätze ermöglicht es, Rückschlüsse darüber zu ziehen, ob situationsabhängig ein zeitlicher Versatz zwischen Erkennung einer Konfliktsituation und dem sichtbaren Einsetzen einer Reaktion besteht.

2.3.2. Bewegung



(a) Fußgänger



(b) Pkw

Abbildung 2.7.: Aufgezeichnete Trajektorien an der Kreuzung Pockelsstr./Katharinenstr. in Braunschweig. Grün: Ungestörte Bewegung, Rot: Bewegung beeinflusst durch andere Verkehrsteilnehmer. Aus: Pascucci u. a. (2015)

In Abb. 2.7 sind verschiedene Trajektorien für jeweils ähnliche Start-Ziel-Relationen im ungestörten Fall und im Konfliktfall für die Verkehrsarten Fußgänger und Pkw gegenübergestellt. Da sich für Radfahrer ein sehr ähnliches Bild wie für Fußgänger ergibt, sind diese nicht separat dargestellt. Die gewählte Darstellung betrachtet ausschließlich die räumliche Ausbildung der Trajektorien, sodass eine eventuelle Geschwindigkeitsänderung bei der Analyse der Bewegungen in diesem Abschnitt vorerst nicht berücksichtigt wird.

Bei Betrachtung der in grüner Farbe dargestellten ungestörten Bewegungen fällt auf, dass die beobachteten Trajektorien sowohl für Fußgänger (Abb. 2.7a) als auch für Pkw (Abb. 2.7b) bei vergleichbarer Start-Ziel-Relation jeweils räumlich kaum voneinander abweichen. Dies erlaubt im Hinblick auf die spätere Modellbildung für die ungestörte Bewegung den Schluss, dass für jede betrachtete Verkehrsart eine einheitliche Modellierung der Routenwahl im ungestörten Fall denkbar ist, da durch die Vernachlässigung der geringen beobachteten Streuung keine zu große Vereinfachung zu erwarten ist.

Weiterhin wird ersichtlich, dass die beobachteten Verkehrsteilnehmer auch im ungestörten Fall nicht den direkten, kürzesten Weg wählen. Stattdessen sind bei allen Verkehrsarten stetige Trajektorien ohne erkennbare abrupte Richtungsänderungen zu beobachten. Während dieser Effekt für Radfahrer und Pkw durch fahrdynamische Einschränkungen zu erklären ist, stellt er für Fußgänger eine gewissermaßen überraschende Beobachtung dar, da eine derartige Trajektorienwahl eine künstliche Verlängerung der Distanz und somit der Reisezeit zugunsten einer stetigeren Trajektorie bedeutet. Die beobachteten Trajektorien von Fußgängern scheinen, wie von Pascucci (2020) erläutert, häufig das Resultat einer Abwägung zwischen der Minimierung der Aufenthaltsdauer in der Begegnungszone und dem kürzesten Weg durch das gesamte System zu sein.

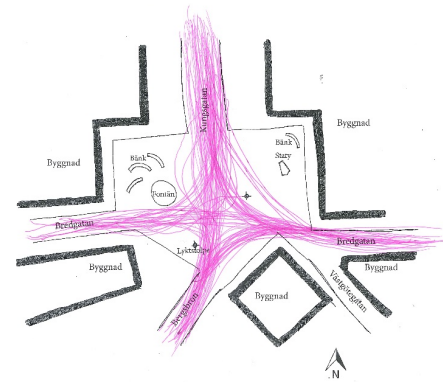
Die beobachteten Trajektorien im Konfliktfall sind in Abb. 2.7 in roter Farbe dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Bewegungen aller beobachteten Fußgänger im Konfliktfall von den beobachteten ungestörten Bewegungen abweichen. Im Gegensatz dazu ist für Pkw im Konfliktfall keine deutliche räumliche Abweichung zur ungestörten Bewegung zu erkennen. Da auf der in Abb. 2.7 gezeigten Kreuzung bedingt durch die Platzverhältnisse kaum eine andere Routenwahl für Pkw möglich ist, lassen sich allein aus den gezeigten Beobachtungen noch keine vollumfänglichen Schlüsse auf das Konfliktverhalten ziehen. Werden jedoch andere Beispiele für Shared Spaces mit räumlichen Verhältnissen, die eine freiere Routenwahl für Pkw ermöglichen, hinzugezogen, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Abb. 2.8 zeigt den „Skvallertorget“ (wörtlich etwa *Tratschplatz*) in Norrköping (Schweden). Dieser universitätsnahe Knotenpunkt wurde im Jahr 2000 zu einem ausgewiesenen Shared Space umgestaltet. Untersuchungen nach dem Umbau (Axelsson und Nederman 2016) ergaben, dass Pkw-Fahrer auch ohne eine räumliche Notwendigkeit eine starke Tendenz zur Kolonnenbildung zeigen, die zu einem fahrstreifenartigen Fahrverhalten führt.

2.3.3. Reaktionsverhalten im Konfliktfall

Gemäß der Definition zu Beginn von Kapitel 1 zeichnet sich eine Konfliktsituation dadurch aus, dass eine unveränderte Fortsetzung der Bewegung zu einer Kollision führen wird. Dementsprechend lässt sich die *Reaktion* auf eine Konfliktsituation als die Änderung der geplanten Bewegung mit dem Ziel der Konfliktlösung verstehen.



(a) Luftbild im September 2006



(b) Aufgezeichnete Trajektorien

Abbildung 2.8.: Skvallertorget (Norrköping, Schweden) nach der Konversion in einen Shared Space. Aus: Axelsson und Nederman (2016)

Im Rahmen des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt 1.3.3) wurden zahlreiche Konfliktsituationen beobachtet und hinsichtlich des Reaktionsverhaltens ausgewertet. In diesem Abschnitt werden die dabei beobachteten Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer zunächst qualitativ beschrieben. Auf dieser Grundlage wurde eine Quantifizierung des Reaktionsverhaltens, beispielsweise von Reaktionszeitpunkten und -stärke, von Pascucci (2020) ausführlicher analysiert und beschrieben.

In der vorliegenden Arbeit werden in Hinblick auf die Modellierung des Reaktionsverhaltens basierend auf der Datenanalyse drei Ebenen eingeführt, auf denen sich Konfliktsituationen und die resultierenden Reaktionen hinsichtlich verschiedener Kriterien unterscheiden lassen:

Hierarchische Ebene Die hierarchische Ebene beschreibt die gegenseitige Verletzlichkeit, die sich durch den Unterschied der beteiligten Verkehrsarten ergibt. Eine „niedrigere“ Verkehrsart bezeichnet diejenige, die im Kollisionsfall das größere Verletzungsrisiko trägt.

Auf der Grundlage dieser Verletzlichkeit wird für das Konfliktverhalten eine Rangfolge eingeführt, die auf dem subjektiven gegenseitigen Verletzungsrisiko im Kollisionsfall aufbaut. Dieses wird zum einen durch die (durchschnittlichen) Massen und Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer, zum anderen durch die ggf. durch das Verkehrsmittel bereitgestellte Schutzzone beeinflusst. Abb. 2.9 zeigt die gewählte Rangfolge der Verkehrsarten. Dabei sind die drei in dieser Arbeit berücksichtigten Verkehrsarten (siehe Abschnitt 2.1) in schwarzer Schrift hervorgehoben. Zur Verdeutlichung der Rangfolge sind weitere Verkehrsarten in grauer Schrift dargestellt.

Der Hierarchie kommt bei konventioneller Verkehrsregelung eine weitaus wichtigere Rolle zu und ist dort oft sogar Bestandteil des Regelwerks, wobei je nach Situation Vorrangregelungen in beide Richtungen der Hierarchie bestehen. Demgegenüber ist eines

2. Problemanalyse

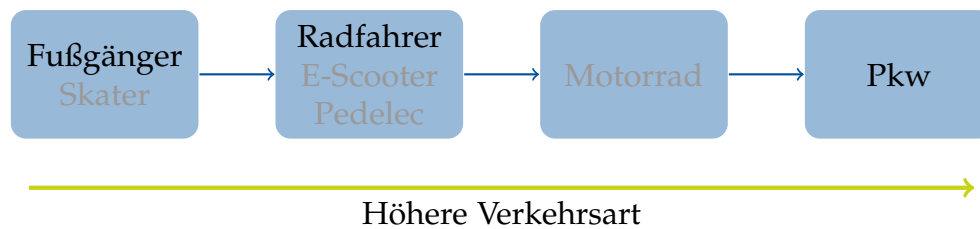


Abbildung 2.9.: Gewählte Rangfolge der Verkehrsarten. Die in dieser Arbeit verwendeten Verkehrsarten sind in schwarzer Schrift hervorgehoben.

der wichtigsten Ziele des Shared-Space-Gedankens, diese Hierarchie der Verkehrsarten möglichst aufzuheben. Tatsächlich zeigen die Beobachtungen an den beschriebenen Kreuzungen, dass sich auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen häufig eine größere Rücksichtnahme der nach dieser Einstufung höheren Verkehrsarten gegenüber niedrigeren beobachten lässt. Der Umkehrschluss lässt eine weitere Interpretation zu: Je seltener auf einem Knotenpunkt ein typisches hierarchisches Verhalten zu beobachten ist, desto besser funktioniert der kooperative Gedanke in der Begegnungszone.

Strategische Ebene Jeder Verkehrsteilnehmer trifft beim Erkennen einer Konfliktsituation auf der strategischen Ebene die Entscheidung, auf die Situation *offensiv*, *defensiv* oder (zunächst) nicht zu reagieren. Das Resultat dieser Entscheidung wird als **Konfliktlösungsstrategie** bezeichnet. Dabei lässt sich die offensive Reaktion in der Regel als diejenige auffassen, bei der sich selbst der Vorrang gewährt wird. Die defensive Reaktion stellt im Gegensatz dazu ein „Vorrang gewähren“ dar. Eine derartige Klassifizierung auf dieser Ebene sagt nichts über die Motivation für die jeweilige Entscheidung aus. So kann bspw. ein Weiterbeobachten der Reaktion sowohl zu einer defensiven als auch einer vorerst unveränderten Bewegung führen.

Die tatsächliche Auswirkung der auf dieser Ebene getroffenen Entscheidung auf die ursprüngliche Bewegung ist situationsabhängig und zusätzlich für die beteiligten Verkehrsarten unterschiedlich. Weiterhin sind nicht in jeder Situation alle Strategien möglich bzw. eindeutig voneinander unterscheidbar. Beides wird im folgenden Abschnitt anhand einer Beispielsituation verdeutlicht.

Taktische Ebene Diese Ebene beschreibt, auf welche Weise die geplante ungestörte Bewegung eines Verkehrsteilnehmers durch die Anwendung der auf der strategischen Ebene gewählten Strategie verändert wird. Diese Veränderung wird im Folgenden als **Reaktionsmechanismus** bezeichnet. Es lässt sich die Existenz von zwei Basismechanismen ausmachen: Änderung der Trajektorie (T) oder Änderung der Geschwindigkeit (V). Alle beobachteten Verhaltensweisen lassen sich auf diese Basismechanismen oder auf Kombinationen von ihnen (T + V) zurückführen.

In den aufgezeichneten Daten waren für einige Verkehrsarten nicht alle möglichen Mechanismen zu beobachten. Tab. 2.2 bietet einen Überblick über die überwiegend beobachteten Reaktionsmechanismen in Abhängigkeit der beteiligten Verkehrsarten.

$M_i \backslash M_j$	PED	CYC	CAR
PED	T	T / T + V	T / T + V / V
CYC	T / T + V	T / T + V	T / T + V / V
CAR	V	V	V

Tabelle 2.2.: Übersicht über die beobachteten Reaktionsmechanismen in Abhängigkeit der involvierten Verkehrsarten. T: Trajektorienänderung, V: Geschwindigkeitsänderung

Beispiel zu den Konfliktebenen

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den drei Ebenen anhand typischer beobachteter Verhaltensweisen mittels eines künstlichen Beispiels veranschaulicht. Abb. 2.10 zeigt zwei Varianten eines Konflikts zwischen einem Fußgänger und einem Pkw. Die in grüner Farbe dargestellten Wunschtrajektorien der beiden Verkehrsteilnehmer schneiden sich, so dass eine unveränderte Fortbewegung auf diesen zu einer Kollision führen würde. In Variante (a) befinden sich zum dargestellten Zeitpunkt beide Verkehrsteilnehmer in der Begegnungszone, wohingegen der Fußgänger sich in Variante (b) in seiner sicheren Zone befindet und die Intention hat, die Begegnungszone zu durchqueren.

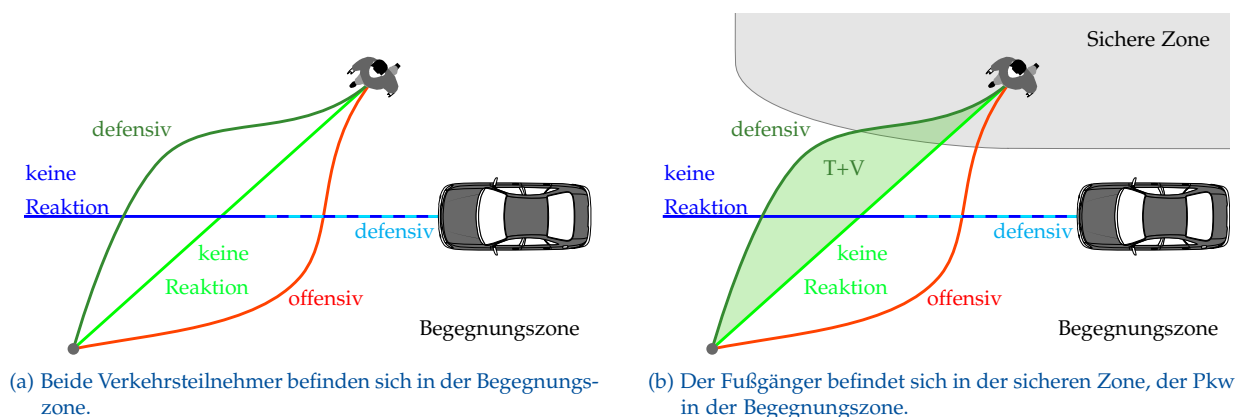


Abbildung 2.10.: Konflikt zwischen Fußgänger und Pkw.

Sichtweise Fußgänger Auf der hierarchischen Ebene handelt es sich aus Sicht des Fußgängers um einen Konflikt mit einer höheren Verkehrsart. Für Variante (a) hat die

2. Problemanalyse

Hierarchie keine erkennbare Auswirkung auf die strategische Ebene. Für Variante (b) zeigen die Beobachtungen auf den verschiedenen Knotenpunkten, dass diese Hierarchie das Verhalten tendenziell umso stärker in Richtung einer defensiven Strategie beeinflusst, je deutlicher die bauliche und optische Trennung zwischen Begegnungszone und der sicheren Zone ausgeprägt ist.

Ungeachtet der Faktoren, die letzten Endes zur Entscheidung für eine dieser Strategien führen, lassen sich die Strategien, offensiv oder defensiv zu reagieren, für beide Varianten anschaulich in Reaktionsmechanismen überführen. Die unveränderte Fortsetzung der Bewegung bedarf keiner näheren Erläuterung. Die offensive Reaktion wird in beiden Fällen umgesetzt, indem der Fußgänger seine Bewegung bewusst in Richtung der Trajektorie des Pkw ändert. Die zugrundeliegende Motivation für dieses Verhalten ist, die Trajektorie im Vergleich zur Wunschbewegung früher zu kreuzen und dadurch trotz einer vorübergehenden Verringerung des Abstands den Minimalabstand insgesamt zu vergrößern. Hieraus resultiert, dass eine Verringerung der Geschwindigkeit nicht nur kontraproduktiv, sondern sogar gefährlich wäre.

Demgegenüber unterscheidet sich die Umsetzung einer defensiven Strategie für die beiden Varianten. In beiden Fällen erfolgt zunächst eine Änderung der Bewegungsrichtung, sodass ein ausreichend großer Abstand zur Trajektorie des Pkw eingehalten werden kann, bis dieser passiert hat. In Variante (a) ist dabei nur sehr selten eine Geschwindigkeitsänderung des Fußgängers zu beobachten, wohingegen in Variante (b) der Übergang zwischen sicherer Zone und Begegnungszone eine wichtige Rolle spielt. Erreicht der Fußgänger den Rand der sicheren Zone, bevor der Pkw passiert hat, so ist eine starke Tendenz zum Verbleib in der sicheren Zone zu beobachten, was durch eine Verringerung der Geschwindigkeit bis hin zum vollständigen Anhalten erreicht wird.

Zusammengefasst lassen sich für Fußgänger im gezeigten Beispiel auf der taktischen Ebene somit in Variante (a) nur Änderungen der Trajektorie (T), in Variante (b) sowohl Änderungen der Trajektorie (T) als auch für die defensive Reaktion in Abhängigkeit der räumlichen Gegebenheiten zusätzlich eine Reduktion der Geschwindigkeit (T + V) beobachten.

Sichtweise Pkw Für den Fahrer des Pkw stellt die gezeigte Situation auf hierarchischer Ebene einen Konflikt mit einer niedrigeren Verkehrsart dar. Im Gegensatz zum Fußgänger hat diese Hierarchie in beiden Varianten einen Einfluss auf das Verhalten des Pkw. In Situationen, die Variante (a) ähneln, lässt sich häufig eine Rücksichtnahme auf die verletzlichsten Verkehrsteilnehmer durch Wahl einer defensiven Strategie beobachten, wohingegen in Variante (b) durch die Trennung der Zonen tendenziell Verhaltensweisen wie in einer konventionellen Vorfahrtssituation auftreten.

Auf der taktischen Ebene ist das Spektrum typischer Verhaltensweisen für Pkw in diesem Beispiel deutlich kleiner als für den Fußgänger. Obwohl sie physikalisch Möglichkeiten darstellen würden, den Konflikt zu lösen, sind Ausweichbewegungen sowie

positive Beschleunigungen in vergleichbaren Situationen nicht zu beobachten. Dementsprechend wird die defensive Verhaltensweise ausschließlich durch Abbremsen (V) ohne Ausweichbewegung umgesetzt. Die offensive Strategie und die unveränderte Fortsetzung der Bewegung sind auf taktischer Ebene nicht unterscheidbar. Da die aus den Videodaten gewonnenen Trajektorien letztlich ausschließlich die taktische Ebene wiedergeben, wäre für eine weitergehende Unterscheidung dieser Strategien eine verkehrspsychologische Erforschung der Strategiewahl erforderlich. Dies ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, somit werden im Folgenden für Pkw lediglich die Strategien „defensives Verhalten“ und „keine Reaktion“ berücksichtigt.

Über das gezeigte Beispiel hinaus zeigen die aufgezeichneten Trajektorien, dass eine Änderung der Trajektorie für Pkw generell nur sehr selten und in speziellen Fällen zu beobachten ist. Fast ausschließlich sind hier das Passieren eines am Fahrbahnrand stehenden Fahrzeugs und das Ausweichen in Richtung des rechten Fahrbahnrandes bei entgegenkommendem Verkehr und beengten Platzverhältnissen zu nennen.

2.4. Forschungszielsetzung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung eines Modells, das in der Lage ist, die im vorigen Abschnitt beschriebene Verkehrsdynamik gemeinsam genutzter Verkehrsflächen im Rahmen einer mikroskopischen Computersimulation abzubilden. Ein derartiges Simulationsmodell stellt einen wichtigen Baustein des in Abschnitt 1.3.3 beschriebenen Forschungsprojekts dar, innerhalb dessen es sich zwischen der quantitativen Analyse und der verkehrstechnischen Bewertung von Shared-Space-Gestaltungsentwürfen, die jeweils kein Bestandteil dieser Arbeit sind, einordnet.

Wie in Abschnitt 2.3.3 herausgearbeitet wurde, ist die untersuchte Verkehrsdynamik maßgeblich durch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer im Konfliktfall charakterisiert. Dementsprechend liegt auch der Schwerpunkt der Modellierung auf dem Konfliktverhalten. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit ein Framework entwickelt, das neben dem Konfliktverhalten auch die typischen Bewegungsmuster (siehe Abschnitt 2.3.2) der drei Verkehrsarten abbilden kann. Bewegungsmodelle sind für einzelne Verkehrsarten bereits seit vielen Jahren ein bewährtes Werkzeug, daher liegt es für die Modellierung der Bewegungsmuster auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen im Gegensatz zum Konfliktverhalten nahe, auf bestehenden Modellierungsansätzen aufzubauen und diese, wo erforderlich, anzupassen und zu erweitern.

Dementsprechend werden in Kap. 3 zunächst verschiedene Bewegungsmodelle vorgestellt, die als Grundlage für die weitergehende Modellierung in dieser Arbeit dienen. Hier ist zum einen das mikroskopische **Soziale-Kräfte-Modell (SKM)** zu nennen, das die Dynamik von Fußgängerströmen abbildet. Da dieses Modell auf der Annahme aufbaut, dass die Bewegung eines Fußgängers maßgeblich vom Verhalten anderer Fußgänger

in der näheren Umgebung abhängt, erscheint es als Basis für die Modellierung von interaktionsbasierter Verkehrsdynamik gut geeignet. Zum anderen wird in Abschnitt 3.2 mit den Fahrzeugfolgmodellen eine Modellklasse eingeführt, die zur Abbildung des Verhaltens von fahrestreifengebundenem Verkehr geeignet ist.

Die Kap. 4 und 5 umfassen die in dieser Arbeit neu entwickelten Modellierungsansätze für die Bewegung und das Konfliktverhalten. Dafür wird zunächst in Abschnitt 4.1 die Erweiterung des SKM um die Bewegung entlang einer vorgeplanten Trajektorie eingeführt. Der Modellierung des Konfliktverhaltens liegt das in Abschnitt 2.3.3 eingeführte Ebenenkonzept zugrunde. Während die beschriebenen beobachteten Verhaltensmuster dabei vor allem die taktische Ebene darstellen, impliziert die Überführung der Interaktionsebenen in ein Modell weitergehende Annahmen. Die Abfolge der in dieser Arbeit entwickelten Modellkomponenten ist in Abb. 2.11 für den Kontext einer zeitdiskreten mikroskopischen Simulation dargestellt.

Ausgangspunkt der gesamten Modellierung ist die Annahme, dass jeder Verkehrsteilnehmer zunächst eine Route für die ungestörte Bewegung plant und verfolgt. Durch kontinuierliche Beobachtung erfolgt eine subjektive Prädiktion der weiteren Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer und darauf aufbauend eine Konfliktdetektion. Die Entwicklung eines entsprechenden Wahrnehmungsmodells wird in Abschnitt 4.2 beschrieben. Subjektive Beobachtungen im Wahrnehmungsbereich (Abschnitt 4.2.1) werden dabei in Abschnitt 4.2.2 zur Bewegungsprädiktion mithilfe einer aus beobachteten diskreten Aufenthaltspunkten extrapolierten Lagrange-Kurve verwendet. Diese wird in Abschnitt 4.2.3 anhand der erwarteten zeitlichen Entwicklung des Abstands für die Konfliktdetektion herangezogen. Abschnitt 4.2.4 beschreibt die Klassifizierung detektierter Konfliktsituationen hinsichtlich verschiedener Kriterien.

Auf die frühzeitige Erkennung einer Konfliktsituation folgt die Entscheidung für eine Strategie zur Lösung des Konflikts und die Umsetzung auf der taktischen Ebene. Die strategische Entscheidung auf Basis dieser Klassifikation wird in Abschnitt 5.1 beschrieben. Die in Abschnitt 5.2 entwickelten Reaktionsmechanismen stellen die taktische Ebene des Modells dar. Aus Modellsicht wird hierbei zwischen Mechanismen, die eine einmalige Umplanung der Trajektorie bewirken (Abschnitt 5.2.1), und einer sukzessiven Reaktion über mehrere Zeitschritte (Abschnitt 5.2.2) unterschieden. In Abschnitt 5.3 wird ein Ansatz eingeführt, die entwickelten Reaktionsmechanismen für Konfliktsituationen zwischen mehr als zwei Verkehrsteilnehmern anzuwenden.

Um die Simulationsergebnisse, die mit den entworfenen deterministischen Modellierungsansätzen erzielt werden, auf Plausibilität zu überprüfen, wurde das Modell im Rahmen des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt 1.3.3) in Form der Simulationsumgebung **Multi-Modal Intersection Simulation (MODIS)** implementiert. Eine detaillierte Beschreibung der programmiertechnischen Umsetzung ist kein Bestandteil dieser Arbeit. Jedoch werden in Kap. 6 Simulationsergebnisse diskutiert, die mithilfe dieser Simulationsumgebung generiert wurden. Dabei werden in Abschnitt 6.1 für jeden der

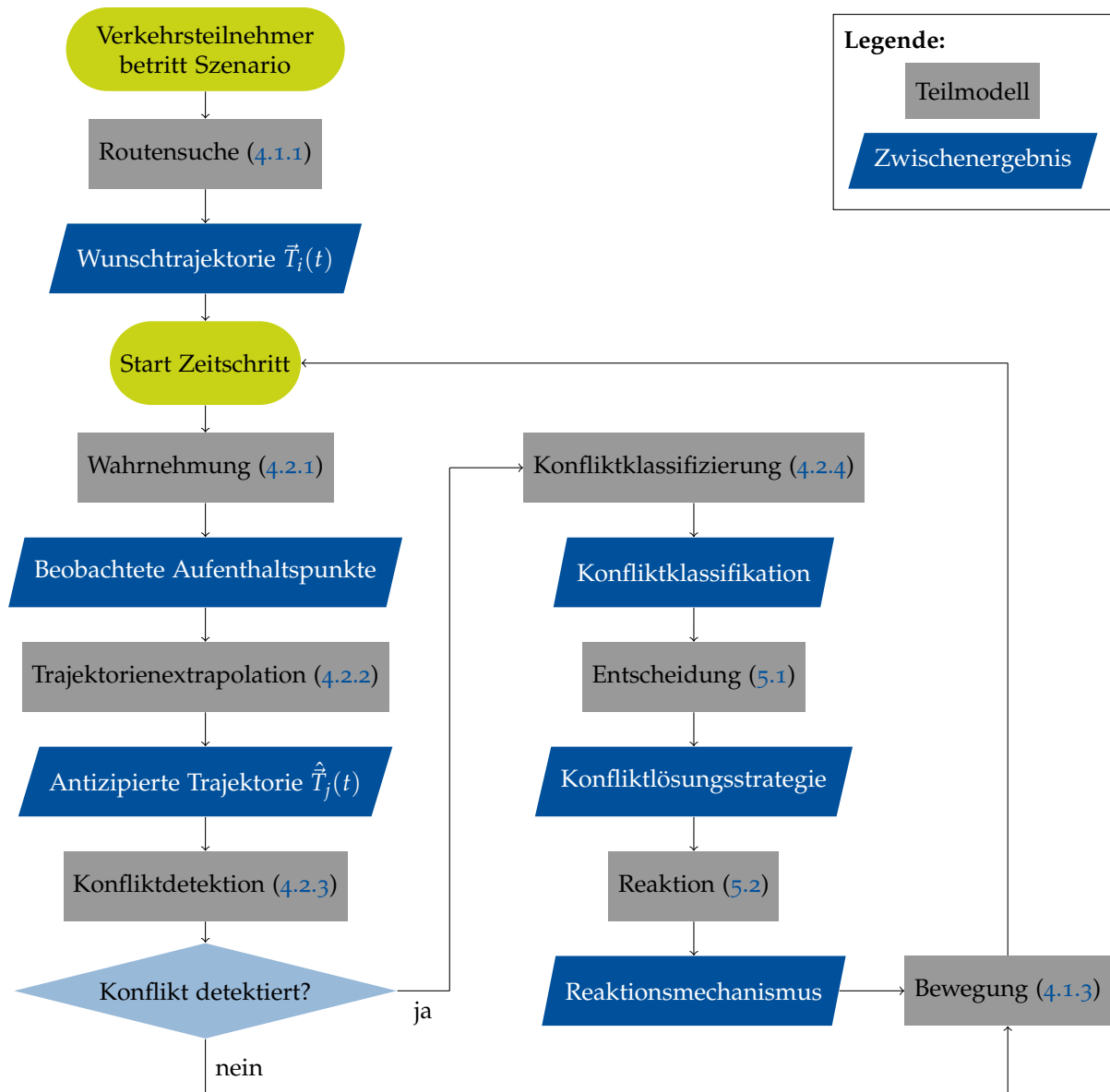


Abbildung 2.11.: Abfolge der in den Kap. 4 und 5 entwickelten Modellkomponenten im Kontext einer zeitdiskreten mikroskopischen Simulation.

in Abschnitt 5.2 beschriebenen Reaktionsmechanismen jeweils eine passende Konfliktsituation aus den Realdaten nachsimuliert und verglichen. In Abschnitt 6.2 werden die Simulationsergebnisse für einen 60-minütigen Ausschnitt aus den Realdaten hinsichtlich makroskopischer Verkehrskennwerte untersucht.

Nachdem das in den vorigen Kapiteln erarbeitete Modell und die damit erzielten Simulationsergebnisse ausschließlich in Hinblick auf eine deterministische Simulation konzipiert wurden, wird in Kap. 7 ein modellunabhängiger Ansatz zur stochastischen Modellierung am Beispiel fehlerbehafteter Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer entwickelt. Die Anwendung des Ansatzes wird an verschiedenen Beispielszenarien gezeigt, in denen sowohl das in dieser Arbeit entwickelte Modell als auch ein Fahrzeugfolgemodell stochastisch modifiziert wird. Für die Beispielszenarien werden Simulationsergebnisse, die durch eine Implementierung des stochastischen Modellierungsansatzes in der Simulationsumgebung MODIS erzielt wurden, präsentiert und diskutiert.

3. Modelltheoretische Grundlagen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellierung der Verkehrsdynamik auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Abbildung der Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern (entsprechende Modellierungsansätze werden in Kapitel 5 entwickelt), wofür die Modellierung der Bewegung der einzelnen Verkehrsteilnehmer eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung darstellt. Insbesondere für Fußgänger und den motorisierten Verkehr sind in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Modelle entstanden, die bei separater Betrachtung der jeweiligen Verkehrsart charakteristische Verhaltensweisen und Phänomene gut abbilden können. Mit den Soziale-Kräfte-Modellen für Fußgänger (Abschnitt 3.1) und den Fahrzeugfolgemodellen für den motorisierten Verkehr (Abschnitt 3.2) werden in diesem Kapitel zwei Modellklassen vorgestellt, die geeignete Ausgangspunkte für die weiterführende Modellierung von gemischtem Verkehr darstellen.

3.1. Das Soziale-Kräfte-Modell

Das **Soziale-Kräfte-Modell (SKM)** wurde von Helbing und Molnar (1995) zur Abbildung der Fußgängerdynamik formuliert. Obwohl in der ursprünglichen Veröffentlichung allgemein vom Verhalten von Fußgängern gesprochen wird, wurde das Modell in den darauffolgenden Jahren vor allem für Fußgängerströme verwendet, in denen die Dichte hoch genug ist, dass die Präsenz von weiteren Fußgängern die maßgebliche Einflussgröße für die Bewegung darstellt. Beispielhaft sind hier die An- und Abreise zu Großveranstaltungen, die „Rush-Hour“ an stark frequentierten Verkehrsflächen wie Bahnhöfen sowie Evakuierungssituationen zu nennen. Nicht zuletzt die Verwendung in kommerziellen Softwareprodukten (z. B. PTV Viswalk (2021), SimWalk (Savannah Simulations 2018), AnyLogic (2017)), die in diesen Bereichen zum Einsatz kommen, beweist die heutige Praxisrelevanz des Modells.

Modellklassifizierung

Verkehrsmodelle lassen sich hinsichtlich verschiedener Kriterien klassifizieren. In der Literatur, z. B. bei Schadschneider (2004), findet sich häufig eine Einstufung hinsichtlich folgender Kriterien:

Auflösung Im Zusammenhang mit der Verkehrsmodellierung wird häufig zwischen *mikroskopischer* und *makroskopischer* Betrachtung unterschieden. Bei der mikroskopischen Verkehrsmodellierung wird jeder Verkehrsteilnehmer individuell betrachtet. Daher ist in diesem Zusammenhang auch der Begriff der *agentenbasierten Simulation* geläufig. Eine derartige Modellierung erlaubt eine detaillierte Analyse von Simulationsergebnissen hinsichtlich einzelner Individuen. Um globale Effekte analysieren zu können, werden die Ergebnisse einzelner Individuen akkumuliert, z. B. durch Zählung in einem festgelegten Bereich zur Bestimmung von Dichten oder an einem Querschnitt zur Ermittlung verschiedener Verteilungen.

Demgegenüber wird in einem makroskopischen Modell nicht zwischen Individuen unterschieden. Stattdessen stehen, durch ausschließliche Betrachtung von Größen wie Dichte- oder Geschwindigkeitsverteilungen, Entstehung und Analyse globaler Effekte im Vordergrund. Weiterhin ist die Bezeichnung der *mesoskopischen* Modellierung anzutreffen, wenn in einem Modell Verkehrsteilnehmer zwar einzeln, jedoch nicht mit einem individuellen Verhalten, betrachtet werden. Da beim SKM für jeden Verkehrsteilnehmer eine eigene Bewegungsgleichung ausgewertet wird (siehe Abschnitt 3.1.1), handelt es sich um ein **mikroskopisches** Verkehrsmodell.

Räumliche Dimension Verkehrsmodelle für den Straßenverkehr lassen üblicherweise Bewegungen in einer oder zwei Raumdimensionen zu. Die Bewegung im SKM wird, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, durch verschiedene Kräfte bestimmt, die keinen Restriktionen hinsichtlich der Richtung unterliegen. Somit kann das SKM als **zweidimensionales** Bewegungsmodell klassifiziert werden.

Kontinuität Bei der Modellierung dynamischer Systeme können Raum und Zeit, auch unabhängig voneinander, diskret oder kontinuierlich betrachtet werden. Ein sowohl räumlich als auch zeitlich diskretisiertes Bewegungsmodell wird häufig in Form eines zellulären Automaten umgesetzt. Ein prominentes Beispiel hierfür stellt das Nagel-Schreckenberg-Modell (Nagel und Schreckenberg 1992) dar. Die Formulierung des SKM erfordert keine derartige Diskretisierung, somit handelt es sich um ein **zeitlich und räumlich kontinuierliches** Modell. Allerdings ist für die Anwendbarkeit numerischer Methoden zur Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung eine zeitliche Diskretisierung erforderlich. Auf diese Weise erzielte Simulationsergebnisse unterliegen somit der gleichen zeitlichen Auflösung.

Stochastik Die überwiegende Mehrzahl der gebräuchlichen Verkehrsmodelle folgt einer vollständig deterministischen Betrachtung. Stochastische Modellerweiterungen verfolgen häufig den Ansatz, einzelne Aspekte stochastisch zu modellieren, um beispielsweise eine Bandbreite individueller Präferenzen für Geschwindigkeiten, Abstände etc. der simulierten Verkehrsteilnehmer abbilden zu können.

In der ursprünglichen Formulierung des SKM von Helbing und Molnar (1995) sowie in vielen darauf aufbauenden Ansätzen werden keine stochastischen Terme berücksichtigt. Somit kann das Modell als **deterministisch** klassifiziert werden.

3.1.1. Bewegung

Das SKM basiert auf der Theorie der *Sozialen Felder* nach Lewin (1951), nach der ein *Stimulus* eine *Reaktion* verursacht. Diese Theorie wird im SKM umgesetzt, indem die verschiedenen Einwirkungen aus der Umgebung eines Fußgängers als *soziale Kräfte* formuliert werden. Durch eine, dem zweiten Newtonschen Gesetz entsprechende, Addition dieser Kräfte ergibt sich die folgende gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung zur räumlich-zeitlichen Beschreibung der Bewegung des Fußgängers V_i . Dieser wird dabei als Massepunkt betrachtet, wodurch $\vec{x}_i(t)$ als Schwerpunkt des Fußgängers aufgefasst werden kann:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i(t)}{dt^2} = \vec{f}_i(t) + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij}(t) + \sum_b \vec{f}_{ib}(t) \quad (3.1)$$

Dabei wird $\vec{f}_i(t)$ als *Antriebsterm* bezeichnet. Die Richtung des Antriebsterms wird durch die Navigationsstrategie beeinflusst, welche im folgenden Abschnitt erläutert wird. Die Terme $\vec{f}_{ij}(t)$ und $\vec{f}_{ib}(t)$ stellen die Abstoßungsterme dar. Dabei beschreibt $\vec{f}_{ij}(t)$ die Abstoßung, die von einem anderen Fußgänger V_j verursacht wird und $\vec{f}_{ib}(t)$ die Abstoßung durch Hindernisse in der Umgebung. In Abschnitt 3.1.3 werden verschiedene Ansätze für diese Terme näher betrachtet.

Die Masse m_i eines Fußgängers wird bei den meisten Anwendungen des SKM üblicherweise ignoriert, indem sie zu 1 gesetzt wird. Somit können die aufgebrachten Kräfte als betragsmäßig gleiche Beschleunigungen betrachtet werden.

3.1.2. Navigation

Der Ansatz von Helbing und Molnar (1995) setzt voraus, dass zu jeder Zeit ein punktförmiges Ziel \vec{p}_i existiert. Mit diesem lässt sich die Wunschrichtung $\vec{e}_i^0(t)$ als der normierte Vektor, der von der aktuellen Position $\vec{x}_i(t)$ in Richtung des Ziels zeigt, definieren:

$$\vec{e}_i^0(t) = \frac{\vec{p}_i - \vec{x}_i(t)}{\|\vec{p}_i - \vec{x}_i(t)\|} \quad (3.2)$$

Der Antriebsterm $\vec{f}_i(t)$ berücksichtigt sowohl die Wunschrichtung als auch die Abweichung der aktuellen Geschwindigkeit zur Wunschgeschwindigkeit v_i^0 :

$$\vec{f}_i(t) = \frac{v_i^0 \vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau}, \quad (3.3)$$

wobei die *Relaxationszeit* τ die Zeit darstellt, die ein Fußgänger benötigt, um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Diese Zeit wurde in verschiedenen Arbeiten experimentell ermittelt. So empfiehlt beispielsweise Höcker (2010), für Fußgängersimulationen einen Wert von $\tau = 0,5$ s anzusetzen.

Modifikationen am Antriebsterm sind Bestandteil verschiedener Arbeiten zur Erweiterung des SKM um zusätzliche Effekte. So führen beispielsweise Helbing u. a. (2002) einen „Herdentrieb“ ein, indem bei der Formulierung des Antriebsterms nicht nur die eigene Wunschrichtung, sondern auch die mittlere Richtung der anderen Fußgänger im näheren Umfeld berücksichtigt wird. Ein derartiger Herdentrieb wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Jedoch gründet die Modellierung in Abschnitt 4.1.3 ebenfalls auf dem Ansatz, Bewegungsmuster des SKMs durch Weiterentwicklung des Antriebsterms zu modifizieren.

3.1.3. Wahrnehmung

In die üblichen Formulierungen der Abstoßungsterme $\vec{f}_{ij}(t)$ und $\vec{f}_{ib}(t)$ fließen implizit Ansätze für die Modellierung der Wahrnehmung ein, da diese Terme neben dem physischen Platzbedarf eines Fußgängers, der in diesem Zusammenhang als Territorialeffekt bezeichnet wird, auch eine Abhängigkeit zum euklidischen Abstand beinhalten. Da die Abstoßungsterme die Bewegungsmuster des Modells maßgeblich beeinflussen, befassen sich viele Weiterentwicklungen des SKMs mit einer detaillierteren Modellierung der Abstoßungseffekte. Während Helbing und Molnar (1995) ursprünglich eine geschwindigkeits- und richtungsunabhängige Formulierung der Abstoßungsterme vorgeschlagen haben, fassen Johansson u. a. (2007) verschiedene Weiterentwicklungen zu einer Formulierung zusammen, die sowohl von der Richtung als auch von der relativen Geschwindigkeit abhängig ist.

Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass die Einflüsse anderer Fußgänger bzw. Hindernisse exponentiell mit dem euklidischen Abstand abnehmen, was zur Folge hat, dass der Einfluss für große Abstände zwar sehr klein, aber nie vollständig zu null wird und somit einer räumlich unbegrenzten Wahrnehmung entspricht. Da dies nicht realistisch erscheint und zudem bei größeren Anzahlen an Fußgängern einen erheblichen Rechenaufwand mit sich bringt, wurde von Höcker (2010) die Beschränkung der Reichweite der Abstoßungsterme durch einen Wahrnehmungsradius eingeführt. Weiterhin wurde von Höcker (2010) auf der Grundlage quantitativer Validierung ermittelt, dass ein Wert von 10 m zu plausiblen Simulationsergebnissen führt.

3.2. Fahrzeugfolgemodelle

Fahrzeugfolgemodelle bezeichnen eine Klasse mikroskopischer Verkehrsmodelle, die für die Simulation fahstreifengebundenen motorisierten Verkehrs konzipiert sind. Eine wichtige Eigenschaft dieser Modelle besteht darin, dass ein geschwindigkeitsabhängiger Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eine wesentliche Zielgröße darstellt. Treiber und Kesting (2010) unterscheiden innerhalb der Fahrzeugfolgemodelle zusätzlich zwischen Minimalmodellen und den detaillierteren, aus Fahrstrategien hergeleiteten, Fahrzeugfolgmodellen.

Intuitiv erscheint die Anwendbarkeit derartiger Modelle auf den fahstreifengebundenen Verkehr beschränkt. Jedoch zeigen Beobachtungen, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, dass Pkw-Fahrer auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen auch im Konfliktfall nur sehr selten von der geplanten Trajektorie abweichen und sich somit ein – wenngleich in vielen Fällen mit deutlich verringerter Geschwindigkeit gegenüber dem konventionellen Verkehr – fahstreifenartiger Effekt einstellt. Daher sind die Fahrzeugfolgemodelle als Baustein für ein Modell zur Abbildung der Verkehrsdynamik auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen durchaus gut geeignet.

In diesem Abschnitt werden mit dem [Optimal Velocity Model \(OVM\)](#) und dem [Intelligent Driver Model \(IDM\)](#) jeweils ein Vertreter der Minimalmodelle und der fahrstrategiebasierten Fahrzeugfolgemodelle vorgestellt. Beide Modelle folgen deterministischen sowie räumlich und zeitlich stetigen Formulierungen, die sich auf die Beschreibung der Längsdynamik beschränken. Dabei bleibt eine ggf. zugrundeliegende Fahrspur, entlang derer üblicherweise eine zweidimensionale Bewegung erfolgt, unberücksichtigt. Somit handelt es sich bei beiden betrachteten Modellen um eindimensionale Bewegungsmodelle. Für derartige Modelle ist in der Literatur die Bezeichnung als *Longitudinalmodelle* üblich.

Die Berechnungsvorschriften von Longitudinalmodellen setzen voraus, dass eine geordnete und eindeutige Indizierung der Fahrzeuge möglich ist, die der Reihenfolge der Fahrzeuge aus der Sicht eines stehenden Beobachters entspricht. Dementsprechend bezeichnet der Index $i - 1$ das vorausfahrende Fahrzeug des Fahrzeugs mit dem Index i . Gemäß dieser Indizierung werden in den folgenden Abschnitten die folgenden Größen verwendet:

- $x_i(t)$: (Longitudinale) Position des Fahrzeugs i
- $v_i(t)$: Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
- $a_i(t)$: Beschleunigung des Fahrzeugs i
- l_i : Länge des Fahrzeugs i

Daraus lässt sich der zeitabhängige Abstand $\Delta x_i(t)$ zwischen den Fahrzeugen i und $i - 1$ berechnen:

$$\Delta x_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t) - l_{i-1}$$

3.2.1. Optimal Velocity Model

Beim **Optimal Velocity Model (OVM)** handelt es sich um ein Minimalmodell für die Längsdynamik, das in der ursprünglichen Form auf Bando u. a. (1995) zurückzuführen ist. Die Bewegung jedes Fahrzeugs wird, ähnlich wie beim SKM, mit einer Differentialgleichung zweiter Ordnung mit der folgenden Struktur beschrieben:

$$a_i(t) = \frac{v_{\text{opt}}(\Delta x_i(t)) - v_i(t)}{\tau} \quad (3.4)$$

Dabei wird $v_{\text{opt}}(\Delta x_i)$ als *Optimal Velocity Function* bezeichnet und beschreibt die aus Modellsicht optimale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in Abhängigkeit des Abstands Δx_i zum vorausfahrenden Fahrzeug. Nach Bando u. a. (1995) darf für $v_{\text{opt}}(\Delta x_i)$ eine beliebige Funktion gewählt werden, die monoton steigend ist und gegen einen oberen Grenzwert konvergiert. Durch die obere Begrenzung ist das OVM in der Lage sowohl Folgefahrt als auch freie Fahrt abzubilden.

Treiber und Kesting (2010) schlagen für die Optimal Velocity Function eine Formulierung vor, die die ursprüngliche Formulierung von Bando u. a. (1995) so anpasst, dass die optimale Geschwindigkeit für große Abstände Δx_i gegen die Wunschgeschwindigkeit v_i^0 konvergiert:

$$v_{\text{opt}}(\Delta x_i) = v_i^0 \cdot \frac{\tanh\left(\frac{\Delta x_i}{\Delta s} - \beta\right) + \tanh \beta}{1 + \tanh \beta} \quad (3.5)$$

Neben dem Abstand Δx_i ist die optimale Geschwindigkeit demnach vom Formfaktor β und der Übergangsbreite Δs abhängig. Mit einer derartigen Optimal Velocity Function ist das Modell bei geeigneter Parametrisierung in der Lage, grundlegende verkehrstechnische Phänomene wie die Ausbreitung von Stauwellen zu reproduzieren. Jedoch sind diese Effekte äußerst sensibel gegenüber den Modellparametern, insbesondere der Relaxationszeit τ . Um Unfallfreiheit zu gewährleisten sind relativ kleine Werte für τ erforderlich, die wiederum zu unrealistisch großen Beschleunigungswerten führen. Darüber hinaus führen sehr kleine Werte von τ dazu, dass die Periodendauer der Stauwellen in unrealistisch kleine Bereiche, bis hin zum vollständigen Verlust der Wellenstruktur, sinkt. Der Grund für diese erhöhte Sensitivität ist in der Konzipierung des Modells auf Basis einer optimalen Geschwindigkeit zu finden, die ausschließlich vom Abstand zwischen zwei Fahrzeugen abhängt, ohne dabei relative oder absolute Geschwindigkeiten zu berücksichtigen. Daher stellen die gewählten Modellparameter immer einen Kompromiss für die gesamte Bandbreite der in der Simulation erwarteten Geschwindigkeiten dar.

Im Kontext dieser Arbeit ist durch die ausschließliche Betrachtung innerstädtischer Knotenpunkte eine wesentlich geringere Bandbreite an Geschwindigkeiten zu erwarten. Des

Weiteren ist auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen insbesondere für Kraftfahrzeuge häufig eine freiwillige fahrspurartige Bewegung zu beobachten (siehe Abschnitt 2.3.2), jedoch nicht in einem Maße, dass ein Kolonnenverhalten und die damit einhergehenden Effekte detailliert modelliert werden müssen. Vor diesem Hintergrund verlieren die geschilderten Nachteile des OVM an Bedeutung. Vielmehr tritt der Vorteil der Möglichkeit einer effizienten Implementierbarkeit des Modells in den Vordergrund. Weiterhin fällt auf, dass Gl. 3.4 eine gleichartige Struktur zum Antriebsterm des SKM aufweist. Aus diesem Grund wird für geeignete Situationen, in denen Fahrzeuge anderen Verkehrsteilnehmern folgen, eine Wunschgeschwindigkeit gemäß der Optimal Velocity Function aus Gl. 3.5 genutzt. Die Integration dieser ins SKM wird in Abschnitt 4.1.3 diskutiert.

3.2.2. Intelligent Driver Model

Das von Treiber u. a. (2000) formulierte Intelligent Driver Model (IDM) verfolgt das Ziel, bei einer mathematisch vergleichbaren Komplexität ein plausibleres Beschleunigungsverhalten zu modellieren als beispielsweise das OVM. Dies soll erreicht werden, indem ein geschwindigkeits- sowie abstandsabhängiges intelligentes Bremsverhalten eingeführt wird. Formell beschreibt auch das IDM den zeitabhängigen Verlauf der Beschleunigung für jedes Fahrzeug und stellt somit mathematisch eine gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung dar:

$$a_i(t) = a_{\max}^i \cdot \left(\underbrace{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_i^0} \right)^\delta}_{a^{\text{frei}}} - \underbrace{\left(\frac{s^*(v_i(t), \Delta v_i(t))}{\Delta x_i(t)} \right)^2}_{a^{\text{fol}}} \right) \quad (3.6)$$

Somit werden vom IDM neben den bereits erläuterten Modellgrößen folgende Parameter benötigt:

- a_{\max}^i : (Technische) Maximalbeschleunigung des Fahrzeugs i
- δ : Beschleunigungsexponent
- s^* : Wunschabstand (In der Originalpublikation *desired minimum gap*)
- Δv_i : Annäherungsrate

Die Annäherungsrate Δv_i wird dabei als Differenz der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge i und $i - 1$ berechnet:

$$\Delta v_i(t) = v_i(t) - v_{i-1}(t)$$

Anschaulich lässt sich Gl. 3.6 in einen Anteil a^{frei} für die freie Fahrt und a^{fol} für die Fahrgeschwindigkeit unterteilen. Da a^{fol} für große Abstände Δx_i gegen Null geht, überwiegt der Einfluss von a^{frei} und die Geschwindigkeit nähert sich der Wunschgeschwindigkeit an.

3. Modelltheoretische Grundlagen

Bei kleinerem Δx_i wird das Modellverhalten von a^{fol} dominiert. Neben dem Abstand geht in den Folgeanteil der zeitabhängige dynamische Wunschabstand s^* ein, der wie folgt definiert ist:

$$s^*(v_i(t), \Delta v_i(t)) = s_0 + v_i(t) \cdot T + \frac{v_i(t) \cdot \Delta v_i(t)}{2\sqrt{a_{\text{max}}^i \cdot b}}$$

mit:

- s_0 : Minimalabstand bei stehendem Verkehr
- T : Folgezeit
- b : Komfortable Bremsbeschleunigung (positiv)

Der Folgeanteil setzt sich aus dem Gleichgewichtsanteil $s_0 + v_i(t) \cdot T$ und einem dynamischen Anteil zusammen. Letzterer modelliert das namensgebende intelligente Bremsverhalten, welches mit der Zielstellung einer dynamischen Selbstregulierung hinsichtlich der Bremsbeschleunigung entwickelt wurde. Diese sorgt dafür, dass sich im zeitlichen Verlauf eines Abbremsvorgangs die aufgebrachte Bremsbeschleunigung der komfortablen Bremsbeschleunigung b nähert. Eine detailliertere Diskussion der Selbstregulierung in Hinblick auf verschiedene Situationen ist bei Treiber und Kesting (2010) zu finden.

In dieser Arbeit steht das **IDM** zwar nicht mit der Verkehrsdynamik auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen im Zusammenhang, jedoch wird es in Kapitel 7 im Rahmen der Simulationsstudien zur Demonstration des modellübergreifenden Ansatzes zur stochastischen Modellierung herangezogen.

4. Modellierung von Bewegungen und Interaktionen

Die Modellierung gemeinsam genutzter Verkehrsflächen erfordert verschiedene Anpassungen am **Soziale-Kräfte-Modell (SKM)**, die in diesem Kapitel erläutert werden. In Abschnitt 4.1 wird die Wegfindung von Verkehrsteilnehmern zur Generierung einer Trajektorie sowie die Umformulierung des Antriebsterms (siehe Abschnitt 3.1.2) entlang dieser Trajektorie beschrieben. Als Basis für das vorausschauende Verhalten, das in Kapitel 5 erarbeitet wird, beschreibt Abschnitt 4.2 die Modellierung der Wahrnehmung und darauf aufbauend die Konflikterkennung und -klassifizierung.

4.1. Modellierung von Bewegungen

Obwohl Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Entwurfsmuster für einige Verkehrsarten neben der Verbindungsfunktion auch eine Aufenthaltsfunktion besitzen (siehe Abschnitt 1.1), steuert jeder Verkehrsteilnehmer kurz- oder mittelfristig ein Ziel an. Ein derartiges Ziel kann ein Zwischenziel sein, auf das nach einem relativ kurzen Aufenthalt eine weitere Bewegung über die Verkehrsfläche erfolgt, oder ein endgültiges Ziel und somit den vorläufigen Abschluss der Nutzung der Verkehrsfläche darstellen, beispielsweise das Betreten eines angrenzenden Gebäudes, eines Verkehrsmittels etc.

Der Bewegungsmodellierung liegt die Annahme zugrunde, dass jeder Verkehrsteilnehmer innerhalb eines bestimmten visuellen und zeitlichen Horizonts eine Route mindestens bis zum nächsten (Zwischen-)Ziel grob vorplant. Diese Routenplanung erfolgt bei menschlichen Verkehrsteilnehmern zumeist intuitiv und unterbewusst. Zudem unterliegt sie je nach Verkehrsart unterschiedlich gewichteten Kriterien. Daher bietet es sich an die Routenwahl aufbauend auf einer graphenbasierten Bestwegesuche zu modellieren. Allen Verkehrsarten gemein ist dabei, dass das Kriterium des kürzesten Weges eine maßgebliche Rolle bei der Routenwahl spielt.

In Abschnitt 4.1.1 wird ein erweitertes Verfahren zur Generierung eines geeigneten Navigationsgraphen vorgestellt. Dieses liefert als Ergebnis einen Weg in Form eines Kantenzugs, der in Abschnitt 4.1.2 in eine Raum-Zeit-Trajektorie überführt wird. In Abschnitt 4.1.3 wird eine Erweiterung des SKM eingeführt, die es ermöglicht, simulierte Verkehrsteilnehmer einer vorgegebenen Trajektorie folgen zu lassen.

4.1.1. Aufbau eines Navigationsgraphen

Wie eingangs erwähnt, stellt die schnellste Route das maßgebliche Kriterium bei der initialen Routensuche im ungestörten Fall dar. Die Suche nach der schnellsten Route wird in Computermodellen üblicherweise als graphentheoretisches Problem behandelt. Daher muss die betrachtete Verkehrsfläche zunächst in einen Navigationsgraphen überführt werden, anhand dessen anschließend mit einem geeigneten Algorithmus eine Routensuche durchgeführt werden kann. Eine Methode, die bspw. auch im Bereich der Fußgängersimulation angewendet wird (Höcker u. a. 2010), besteht in der Bestimmung eines Sichtbarkeitsgraphen.

Das Konzept des Sichtbarkeitsgraphen (engl.: *Visibility Graph*) wurde ursprünglich im Bereich der Robotik (De Berg u. a. 2000) zur Navigation durch ein Umfeld mit Hindernissen, deren Berandungen polygonal approximiert sind, entwickelt. Dabei wird definiert, dass die Sichtbarkeit zwischen zwei Punkten gewährleistet ist, wenn die direkte Verbindung zwischen den Punkten kein Hindernis schneidet. Für die Navigation in diesem Kontext wird vorausgesetzt, dass eine Sichtbarkeit mit einer Erreichbarkeit gleichzusetzen ist. Im Umkehrschluss blockiert ein Hindernis sowohl die Sicht als auch die Erreichbarkeit. Weiterhin ist die Sichtbarkeit zwischen zwei Punkten immer symmetrisch, woraus sich ergibt, dass es sich beim Sichtbarkeitsgraphen um einen symmetrischen und reflexiven schlichten Graphen handelt.

Bei der Anwendung dieses Konzepts zur Modellierung der Navigation im Straßenverkehr muss berücksichtigt werden, dass Gestaltungselemente existieren, die die Sichtbarkeit zwar nicht oder nur teilweise einschränken, jedoch im Sinne der Navigation trotzdem ein Hindernis darstellen. Hier sind beispielsweise Poller zu nennen, aber auch ganze Teile der Verkehrsfläche, die von einer Verkehrsart nicht benutzt werden dürfen (so sollte z. B. eine kürzeste Route für Kraftfahrzeuge nicht den Bürgersteig nutzen). Der auf dieser Annahme aufgebaute Graph bildet somit ausschließlich Erreichbarkeiten ab und wird im Folgenden abweichend von der Literatur als *Navigationsgraph* bezeichnet. Die eigentliche Untersuchung der Sichtbarkeit wird in ein separates Wahrnehmungsmodell (siehe Abschnitt 4.2.1) ausgelagert.

Abb. 4.1 zeigt die schrittweise Generierung eines Navigationsgraphen am Beispiel einer Routensuche für ein rechtsabbiegendes Fahrzeug. Die polygonal approximierten Geometrie einer entsprechenden Kreuzung ist in Abb. 4.1a dargestellt. Hindernisse sind in dieser Abbildung grau eingefärbt. Der Navigationsgraph wird generiert, indem ihm zunächst von jedem Eckpunkt aller Hindernisse Kanten zu allen jeweils sichtbaren Punkten¹ hinzugefügt werden. Das Resultat wird, da es ausschließlich auf Basis der unveränderlichen Geometrie ermittelt wurde, als *statischer Navigationsgraph* bezeichnet und ist für das gezeigte Beispiel in Abb. 4.1b dargestellt. Der statische Navigationsgraph

¹Dementsprechend ist für die Überprüfung der Sichtbarkeit ein weiterer Algorithmus erforderlich, bspw. *Ray Casting* (Shimrat 1962).

ist für alle Verkehrsteilnehmer der gleichen Verkehrsart einheitlich und muss somit nur einmalig zu Beginn einer Simulation berechnet werden.

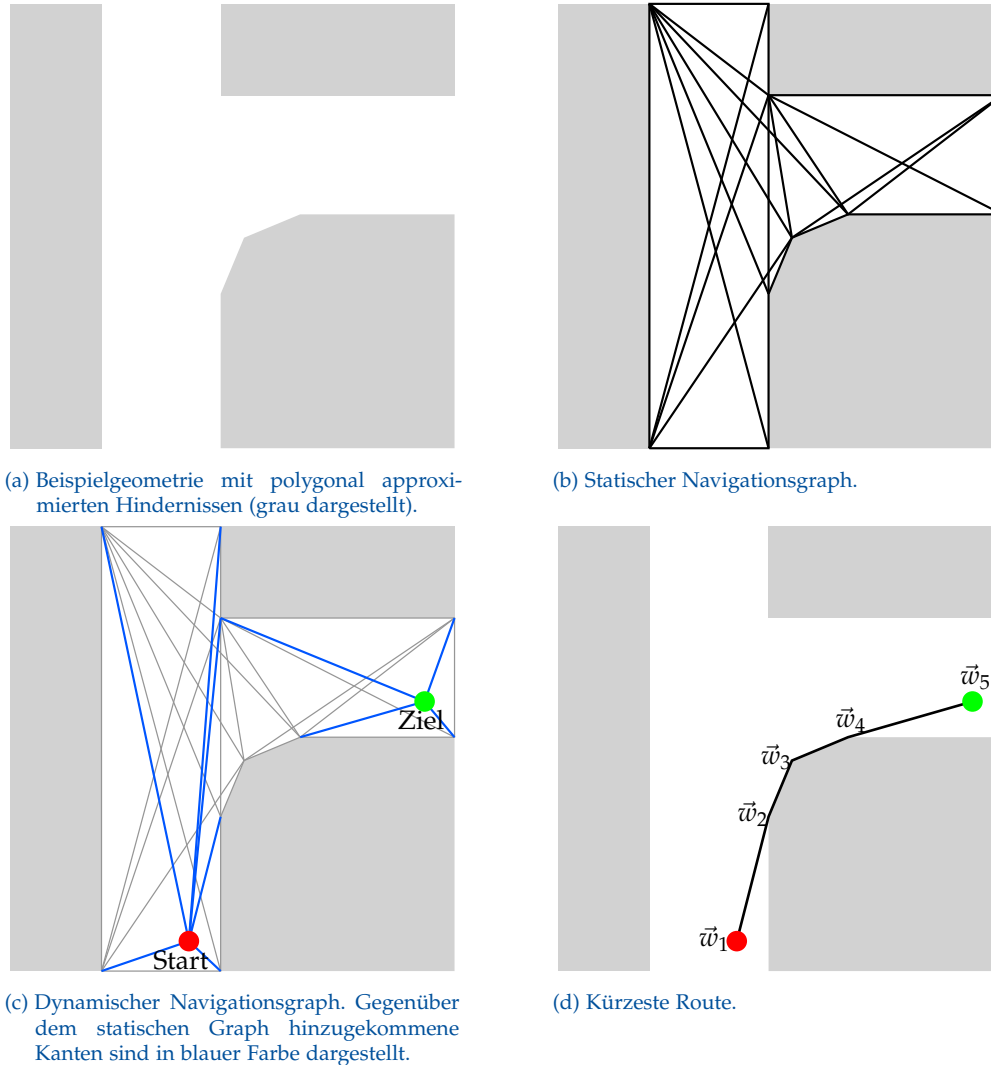


Abbildung 4.1.: Beispiel für die Routensuche durch ein Gebiet mit polygonal berandeten Hindernissen mittels Navigationsgraph.

Dem statischen Navigationsgraphen werden für die Routensuche eines einzelnen Verkehrsteilnehmers Knoten für den Zielpunkt und die aktuelle Position als Startpunkt der Routensuche hinzugefügt. Für beide Knoten werden die Sichtbarkeiten zu allen anderen Knoten des Graphen untersucht und entsprechende Kanten hinzugefügt. Das Ergebnis ist der individuelle *dynamische Navigationsgraph* für den betrachteten Verkehrsteilnehmer, der durch den Einbezug der aktuellen Position zeitlich veränderlich ist. In Abb. 4.1c sind die aktuelle Position rot, das Ziel grün eingefärbt und die gegenüber dem statischen Navigationsgraphen hinzugekommenen Kanten blau hervorgehoben.

Auf dem dynamischen Navigationsgraphen wird eine Bestwegesuche mittels des

A*-Algorithmus (Hart u. a. 1968) durchgeführt. Für das gezeigte Beispiel ist der kürzeste Weg in Abb. 4.1d dargestellt. Graphentheoretisch betrachtet ist das Resultat der Bestwegesuche ein Weg in Form eines Kantenzugs und somit in Bezug auf den zugrundeliegenden schlichten Graphen gleichzeitig eine eindeutige Knotenfolge. Im vorliegenden Fall ist, wie auch in vielen anderen Anwendungsfällen einer Bestwegesuche, jedem Knoten des Weges ein Punkt im zweidimensionalen Koordinatensystem zugeordnet. Im weiteren Verlauf werden nur noch ebendiese Punkte benötigt. Daher wird ein Weg W als ein Tupel definiert, das aus den Wegkoordinaten \vec{w}_i besteht:

$$W = (\vec{w}_1, \dots, \vec{w}_i, \dots, \vec{w}_n) \quad (4.1)$$

Der Weg beinhaltet den Ausgangspunkt der Routensuche \vec{w}_1 und das Ziel \vec{w}_n und besteht somit aus $n - 1$ Wegabschnitten zwischen zwei Punkten \vec{w}_i und \vec{w}_{i+1} .

4.1.2. Modellierung der Trajektorie mit Klothoiden

Aus Modellsicht ist es wünschenswert, das Ergebnis der Routensuche in eine Raum-Zeit-Trajektorie zu überführen. Diese beschreibt zeitabhängig den gewünschten Aufenthaltsort eines Verkehrsteilnehmers und impliziert dadurch auch einen gewünschten Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit. Die geplante Trajektorie des Verkehrsteilnehmers V_i wird im folgenden als $\vec{T}_i(t)$ bezeichnet.

Würden die Punkte \vec{w}_i aus Gl. 4.1 nun, analog zum Vorgehen im klassischen SKM für Fußgänger, direkt als Zwischenziele der Reihe nach angesteuert, würde sich eine Trajektorie in Form eines Polygonzugs ergeben. Die Beobachtungen in Abschnitt 2.3 haben jedoch gezeigt, dass Verkehrsteilnehmer unabhängig von der Verkehrsart glattere Trajektorien wählen. Eine im Verkehrswesen übliche stetige Kurvenform stellen Klothoiden dar. Diese werden im Verkehrswegebau als Trassierungselemente verwendet, um einem ruckartigen Einsetzen der Querbeschleunigung bei Einleitung einer Kurvenfahrt vorzubeugen.

Um komplexere Routen durch ein System mit Hindernissen zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, jede Kante des Weges als einzelnen Klothoidenabschnitt zu modellieren und die einzelnen Abschnitte tangential stetig miteinander zu verbinden. Dafür wird der Algorithmus von Bertolazzi und Frego (2015) verwendet. Dieser dient der numerischen Bestimmung eines diskretisierten Klothoids für vorgegebene Start- und Endpunkte sowie den Tangentensteigungen an diesen Punkten. Der Algorithmus wird somit für jeden Wegabschnitt separat ausgewertet. In Abb. 4.2 wird das Beispiel zur Routensuche aus Abb. 4.1 fortgesetzt, um die Schritte der Überführung eines Kantenzugs in Klothoidenabschnitte zu illustrieren.

Abb. 4.1d zeigt den kürzesten Weg in Form des Kantenzugs. Um die jeweiligen Klothoidenabschnitte mit dem verwendeten Algorithmus berechnen zu können, müssen

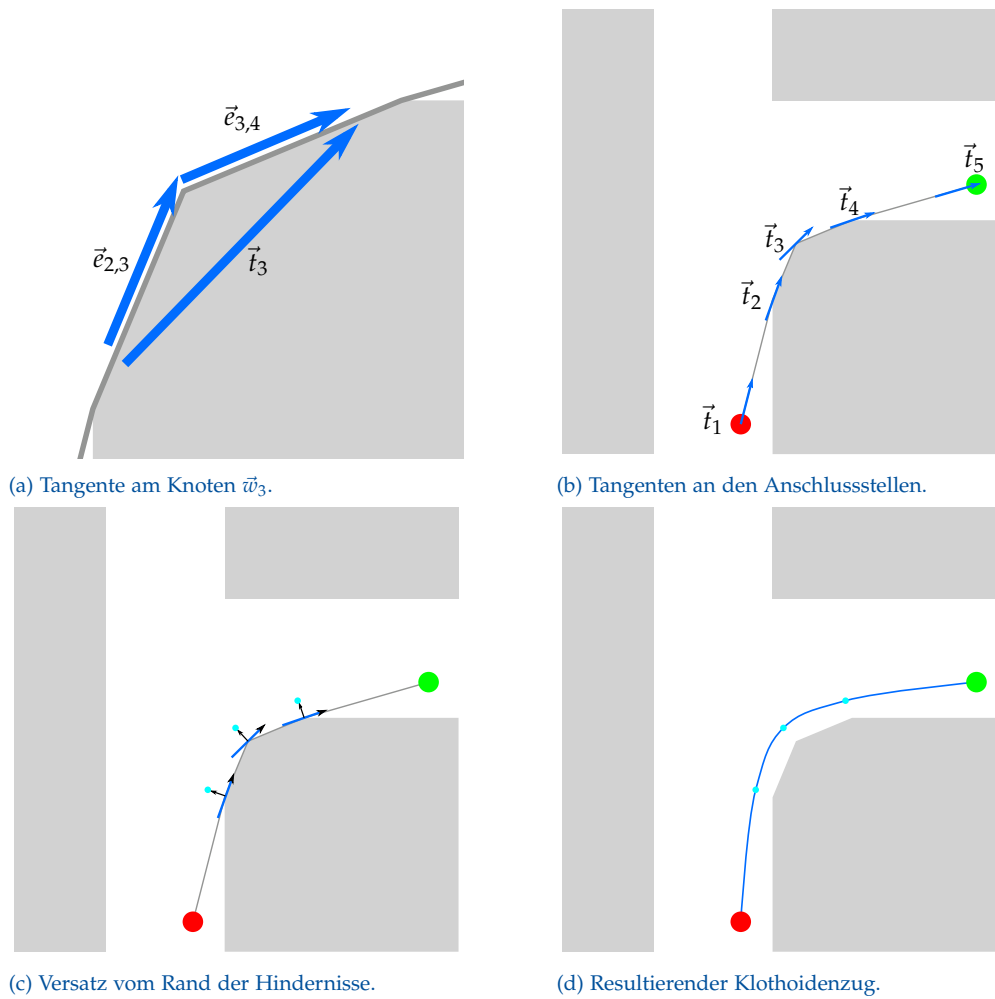


Abbildung 4.2.: Beispiel für die Konstruktion einer klothoidförmigen Trajektorie aus einem Kantenzug.

zunächst die Tangentenrichtungen an jedem Knoten bestimmt werden. Im Folgenden werden die Tangenten in Form von Vektoren \vec{t}_i bestimmt. Die Winkel zwischen diesen und der x -Achse werden als Eingangsgrößen für den Algorithmus verwendet. Die Längen $\|\vec{t}_i\|$ werden bei der Klothoidengenerierung nicht berücksichtigt.

Für den ersten und den letzten Knoten des Weges wird eine Tangente parallel zur angrenzenden Kante gewählt, so dass gilt:

$$\vec{t}_1 = \vec{w}_2 - \vec{w}_1 \quad \text{und} \quad \vec{t}_n = \vec{w}_n - \vec{w}_{n-1}$$

Für alle anderen Knoten wird eine Tangente gewählt, die die Richtungen der beiden angrenzenden Kantenrichtungen mittelt. Dazu wird zunächst die normalisierte Richtung

$\vec{e}_{i,i+1}$ der Kante vom Punkt \vec{w}_i zum Punkt \vec{w}_{i+1} definiert:

$$\vec{e}_{i,i+1} = \frac{\vec{w}_{i+1} - \vec{w}_i}{\|\vec{w}_{i+1} - \vec{w}_i\|}$$

Damit lassen sich die Tangentenrichtungen für die restlichen Knoten bestimmen:

$$\vec{t}_i = \vec{e}_{i-1,i} + \vec{e}_{i,i+1}, \quad 2 \leq i \leq n - 1$$

Abb. 4.2a zeigt die Berechnung der Tangentenrichtung für einen innenliegenden Knoten am Ausschnitt um den Knoten \vec{w}_3 . In Abb. 4.2b sind die Tangentenrichtungen für alle Knoten des Beispiels dargestellt.

Alle inneren Knoten des Weges befinden sich durch die Routensuche auf dem Navigationsgraphen am Rand eines Hindernisses. Da die Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ die Bewegung des Mittelpunkts eines Verkehrsteilnehmers modellieren soll, würde eine Bewegung durch diese Knoten einer Berührung mit dem Hindernis gleich kommen. Dementsprechend müssen die Körpermaße eines Verkehrsteilnehmers bei der Trajektorienbestimmung berücksichtigt werden. Hierzu werden alle Knoten um die halbe Körperbreite zuzüglich eines individuellen Hindernisabstands orthogonal zur Tangente vom Hindernisrand abgerückt (Abb. 4.2c). Nun können die Klothoidenabschnitte bestimmt und zur vollständigen Trajektorie zusammengesetzt werden. Abb. 4.2d zeigt die resultierende Trajektorie für das dargestellte Beispiel.

Durch die beschriebene Vorgehensweise ergibt sich eine zeitunabhängige Bahnkurve $\vec{x}_i(s)$ in x - y -Koordinaten. Durch den verwendeten Algorithmus ist diese über die Bogenlänge s parametrisiert. Die geforderte Zeitabhängigkeit wird erreicht, indem durch die Beziehung $s_i(t)$ eine (eindimensionale) Bewegung entlang der Bahnkurve eingeführt wird, die beliebige Beschleunigungen beinhalten kann. Somit ergibt sich die zeitabhängige Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ zu:

$$\vec{T}_i(t) = \vec{x}_i(s_i(t))$$

4.1.3. Ersetzen des Antriebsterms

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben beinhalten die gebräuchlichen Formulierungen des SKM einen Antriebsterm $\vec{f}_i(t)$, der von der aktuellen Position des Verkehrsteilnehmers in Richtung eines Ziels zeigt. Ohne weitere Einflüsse wird somit immer der direkte Weg gewählt. Neben der Beschreibung der Wunschrichtung hat der Antriebsterm die Aufgabe, eine Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit v_i^0 zu gewährleisten.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben soll die Bewegung jedoch entlang einer vorgegebenen Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ erfolgen. Daher ist eine Anpassung des Antriebsterm erforderlich, die sowohl eine Regulierung der Geschwindigkeit als auch das Verfolgen einer Trajektorie ermöglicht. Zu diesem Zweck wird der Antriebsterm wie folgt aufgeteilt:

$$\vec{f}_i(t) = \vec{f}_i^{\parallel}(t) + \vec{f}_i^{\perp}(t)$$

Dabei stellt $\vec{f}_i^{\parallel}(t)$ den tangentialen und $\vec{f}_i^{\perp}(t)$ den radialen Anteil dar. Der Tangentialanteil dient in dieser Formulierung ausschließlich der betragsmäßigen Regulierung der Geschwindigkeit. Die Berechnung ist abhängig von der Situation und der Verkehrsart. So wird für Fußgänger im ungestörten Fall beispielsweise eine Formulierung analog zu Gl. 3.3 verwendet. Für Kraftfahrzeuge wird der Tangentialanteil je nach Situation durch ein Fahrzeugfolgemodell (siehe Abschnitt 3.2) oder das gezielte Anbremsen eines Punktes (siehe Abschnitt 5.2.1) berechnet.

Der radiale Anteil gewährleistet die Einhaltung der vorgegebenen Trajektorie $\vec{T}_i(t)$. Er zeigt rechtwinklig zur aktuellen Bewegungsrichtung und stellt somit eine Zentripetalkraft dar. Die Zentripetalkraft ergibt sich aus der Zentripetalbeschleunigung \vec{a}_{\perp} , die bei richtungsunabhängiger skalarer Betrachtung von der Geschwindigkeit v und der Krümmung κ abhängt:

$$\vec{a}_{\perp} = v^2 \kappa \quad (4.2)$$

Somit lässt sich aus Gl. 4.2 und dem zweiten Newtonschen Gesetz eine notwendige Radialkraft $\vec{f}_i^{\perp}(t)$ berechnen, indem der Betrag der aktuellen Geschwindigkeit $v_i(t)$ und der Krümmungsvektor $\vec{\kappa}(t)$ der Trajektorie eingesetzt werden:

$$\vec{f}_i^{\perp}(t) = m_i v_i^2(t) \vec{\kappa}(t)$$

Dabei zeigt der Krümmungsvektor $\vec{\kappa}(t)$ in Richtung des Hauptnormalenvektors, welcher senkrecht auf dem Tangentenvektor steht und die Richtung des Schmiegekreismittelpunktes der Kurve anzeigt.

Wird die Trajektorie gemäß Abschnitt 4.1.2 durch ein Klothoid dargestellt, so ist die Krümmung an jeder Stelle der Kurve bekannt².

Neben der Gewährleistung einer Bewegung entlang einer vorgegebenen Trajektorie wird der Radialkraft $\vec{f}_i^{\perp}(t)$ eine weitere Aufgabe bei der Modellierung des Verhaltens verschiedener Verkehrsarten zuteil. Eine Begrenzung der Radialkraft ermöglicht es, dass bestimmte Verkehrsteilnehmer keinen beliebig engen Kurvenradien folgen können. Diese Begrenzung wird in Abhängigkeit von der Verkehrsart durchgeführt, da beispielsweise für Kraftfahrzeuge eine technische Untergrenze für den Kurvenradius

²Für andere Kurvendarstellungen hängt die Berechnung des Krümmungsvektors von der jeweiligen Parametrisierung der Kurve ab und wird daher an dieser Stelle nicht näher diskutiert.

existiert, wohingegen eine derartige Beschränkung für Fußgänger nicht besteht. Weiterhin kann die (erwartete) Radialkraft einer geplanten Trajektorie bei der Bestimmung einer Ausweichtrajektorie (siehe Abschnitt 5.2.1) berücksichtigt werden.

4.2. Modellierung der Wahrnehmung

Im Straßenverkehr werden Entscheidungen und das darauf aufbauende Handeln maßgeblich von der gegenseitigen Beobachtung beeinflusst. In diesem Abschnitt wird die Modellierung der menschlichen Wahrnehmung in einem Sichtbereich und die darauf aufbauende Antizipation des Verhaltens der anderen Verkehrsteilnehmer beschrieben. Diese stellt die Grundlage für eine realistische Modellierung der vorausschauenden Konfliktvermeidung dar.

4.2.1. Wahrnehmungsbereich

Die Wahrnehmung eines Verkehrsteilnehmers V_i wird mithilfe eines Wahrnehmungsbereichs in Form eines Kreissegments modelliert, das sich durch den **Wahrnehmungsradius** r_p und den **Blickfeldwinkel** ϕ_p eindeutig beschreiben lässt. Der Mittelpunkt des Kreissegments liegt im Sichtpunkt \vec{p}_p^i von V_i , wobei die genaue Lage des Sichtpunkts gegenüber der Körpermaße des Verkehrsteilnehmers abhängig von der **Verkehrsart** ist. Zwischen diesen bestehen deutliche Unterschiede hinsichtlich des Sichtpunkts, z. B. durch die Position des Fahrers bei Kraftfahrzeugen. In Abb. 4.3a ist der so parametrisierte Sichtbereich blau umrandet.

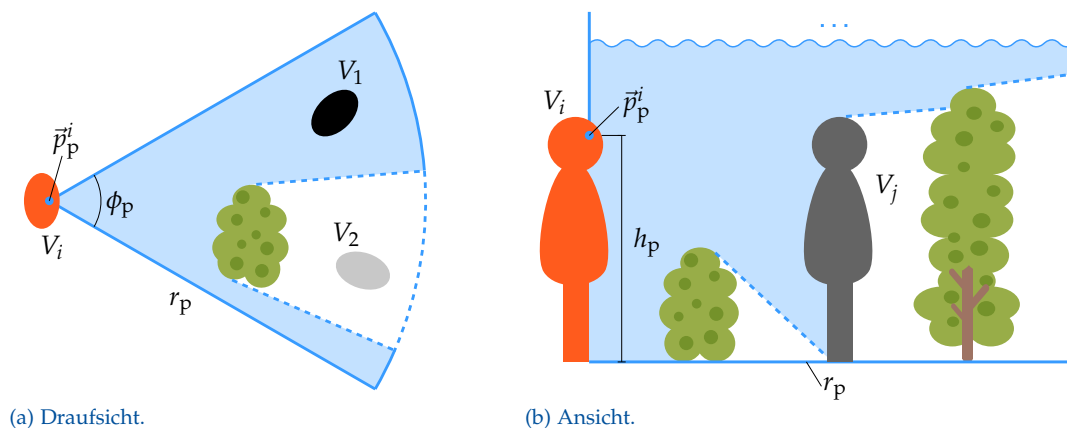


Abbildung 4.3.: Übersicht der Parameter zur Beschreibung der Wahrnehmung.

Teile des Wahrnehmungsbereichs können durch Hindernisse verdeckt sein. Ein Beispiel für den bei einer rein zweidimensionalen Betrachtung resultierenden Sichtbereich ist

in Abb. 4.3a hellblau dargestellt. Im gezeigten Beispiel wird der schwarz gezeichnete Verkehrsteilnehmer V_1 von V_i wahrgenommen, wohingegen sich V_2 innerhalb des durch das grün dargestellte Hindernis verdeckten Teil des Wahrnehmungsbereichs befindet und somit von V_i nicht wahrgenommen wird.

Durch die Sichthöhe h_p wird die dritte Dimension eingeführt und damit eine Berücksichtigung verdeckter Sicht in Abhängigkeit der Höhe von Hindernissen ermöglicht. Abb. 4.3b zeigt die Seitenansicht einer Wahrnehmung, die durch zwei unterschiedlich hohe Hindernisse teilweise verdeckt wird. Da das linke, kleinere Hindernis in diesem Beispiel V_j nicht vollständig verdeckt, wird dieser wahrgenommen. Das rechte, höhere Hindernis würde ihn hingegen vollständig verdecken. Die Implementierung einer derartigen Modellierung verdeckter Wahrnehmung unter Berücksichtigung statischer sowie dynamischer Hindernisse wurde von Meier (2019) diskutiert.

Bei der Auswertung der Sichtbarkeiten wird vereinfachend angenommen, dass jeder andere Verkehrsteilnehmer V_j , der sich mindestens teilweise innerhalb dieses Wahrnehmungsbereichs befindet und nicht vollständig durch ein Hindernis verdeckt wird, exakt wahrgenommen wird.

4.2.2. Bewegungsprädiktion

Durch die Einführung trajektorienorientierter Bewegung (siehe Abschnitt 4.1.2) ist eine sinnvolle Extrapolation der Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer aus Beobachtungen möglich. Befindet sich im Wahrnehmungsbereich eines Verkehrsteilnehmers V_i ein weiterer Verkehrsteilnehmer V_j , versucht V_i durch Beobachtung von V_j dessen Verhalten zu antizipieren. Dies wird modelliert, indem zeitdiskrete Aufenthaltspunkte $\vec{p}_j(t_k)$ zur Berechnung einer räumlichen und zeitlichen Extrapolation der beobachteten Trajektorie herangezogen werden.

Dabei besteht das Ziel ausdrücklich nicht in der möglichst genauen Bewegungsprädiktion. Vielmehr soll hiermit die menschliche Wahrnehmung abgebildet werden. Insbesondere Richtungs- oder Geschwindigkeitsänderungen in einem kurzen Zeitraum sind auch in der Realität durch die menschliche Wahrnehmung oftmals nur schwierig abzuschätzen. Somit ist es in gewissen Grenzen sogar wünschenswert, dass derartige Situationen auch im Prädiktionsmodell zu nicht oder falsch erkannten Konflikten führen.

Für die numerisch effiziente Extrapolation einer Bahnkurve aus diskreten Stützpunkten liegt es nahe, auf Verfahren aus dem Bereich der geometrischen Modellierung zurückzugreifen. Hierfür ist grundsätzlich die Verwendung einer Vielzahl von Kurventypen denkbar. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der geometrischen Modellierung mithilfe von Lagrange-Kurven erläutert und anschließend aufgezeigt, warum

diese Kurvenform für die Extrapolation von Bewegungen in dieser Arbeit gut geeignet ist.

Eigenschaften von Lagrange-Kurven

Eine Lagrange-Kurve ist eine räumliche Interpolation zwischen diskreten Stützpunkten (die in diesem Kontext als *Kontrollpunkte* bezeichnet werden). Als Basisfunktionen für die Interpolation werden die sogenannten *Lagrange-Polynome* verwendet³:

$$L_k^n(t) = \frac{\prod_{m=0; m \neq k}^n (t - t_m)}{\prod_{m=0; m \neq k}^n (t_k - t_m)},$$

wobei $L_k^n(t)$ als Lagrange-Polynom vom Grad n bezogen auf den Punkt $\vec{p}_j(t_k)$ bezeichnet wird. Abb. 4.4 zeigt exemplarisch die Graphen der fünf Lagrange-Polynome vierten Grades $L_0^4(t)$ bis $L_4^4(t)$.

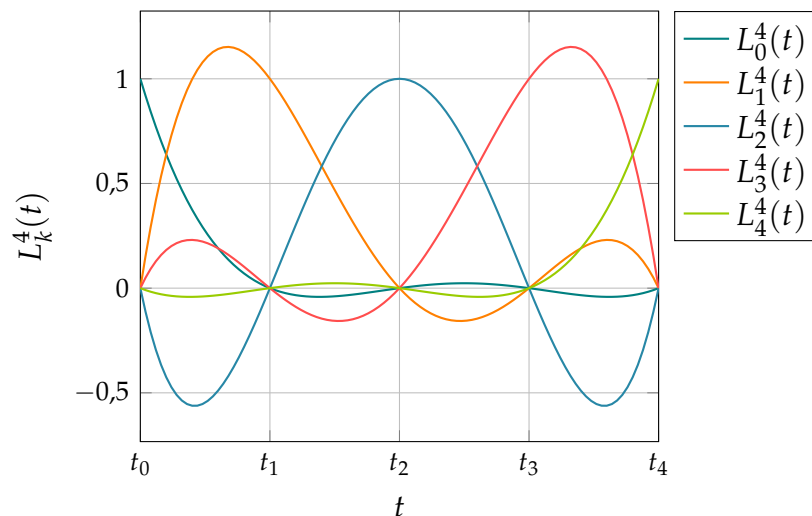


Abbildung 4.4.: Lagrange-Polynome $L_k^4(t)$ im Bereich von t_0 bis t_4 .

Lagrange-Polynome erfüllen, wie teilweise aus der Abbildung ersichtlich wird, die folgenden Eigenschaften:

³In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen zu den Lagrange-Kurven und -Polynomen nur so weit erläutert, wie es für die Anwendung zur Bewegungsextrapolation erforderlich ist. Weitergehende Erläuterungen sind der Literatur (z. B. Farin 1994; Hoschek und Lasser 1992) zu entnehmen.

- **Wertigkeit an den Stützstellen:** Jedes Polynom $L_k^n(t)$ hat an der Stelle t_k den Wert 1 und nimmt an allen anderen Stützstellen $t_{j \neq k}$ den Wert 0 an:

$$\begin{aligned} L_k^n(t_{j \neq k}) &= 0 \\ L_k^n(t_{j=k}) &= 1 \end{aligned}$$

- **Summe:** Die Summe aller Lagrange-Polynome ist an jeder Stelle t konstant 1:

$$\sum_{k=0}^n L_k^n(t) = 1$$

Die Interpolation mittels der Lagrange-Polynome wird als Lagrange-Kurve bezeichnet und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\vec{p}(t) = \sum_{k=0}^n \vec{p}_k L_k^n(t). \quad (4.3)$$

Aus den genannten Eigenschaften der Lagrange-Polynome lässt sich in Bezug auf die Lagrange-Kurve ableiten, dass es sich bei der Interpolation um eine affine Kombination handelt. Weiterhin verläuft die aus der Interpolation resultierende Kurve exakt durch die vorgegebenen Kontrollpunkte \vec{p}_k , da an diesen jeweils ausschließlich das zugehörige Lagrangepolynom $L_k^n(t)$ einen Einfluss hat.

Die Auswertung von Gl. 4.3 im Intervall $[t_0; t_n]$ stellt somit die Interpolation zwischen den Kontrollpunkten dar. Eine entsprechende Kurve ist in Abb. 4.5 in blauer Farbe dargestellt.

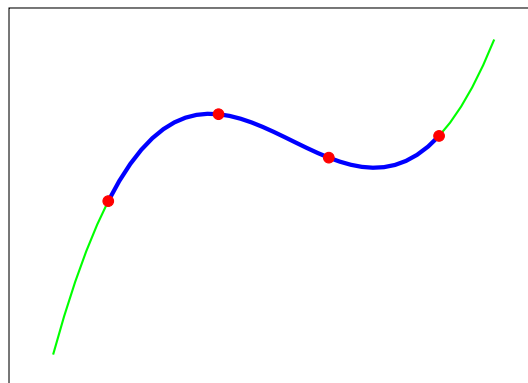


Abbildung 4.5.: Lagrange-Kurve dritten Grades. Die vier Kontrollpunkte \vec{p}_k sind in roter, die interpolierte Kurve in blauer und die extrapolierten Bereiche in grüner Farbe dargestellt.

Werte von t außerhalb dieses Intervalls sind mathematisch ebenfalls zulässig. Die resultierende Kurve lässt sich als Extrapolation der Kontrollpunkte interpretieren und wird für das Beispiel in Abb. 4.5 in grüner Farbe gezeichnet.

4. Modellierung von Bewegungen und Interaktionen

In der Diskussion des vorigen Beispiels wurde bisher lediglich die räumliche Inter- und Extrapolation durch die Lagrange-Kurve berücksichtigt. Wird der Kurvenparameter t als Zeit interpretiert, so können die Kontrollpunkte \vec{p}_k als diskrete Abtastung einer räumlichen Bewegung betrachtet werden. Die euklidischen Abstände der Kontrollpunkte implizieren in Kombination mit den zugehörigen Beobachtungszeitpunkten t_k die Geschwindigkeit dieser Bewegung. Die Lagrange-Kurve ermöglicht es, die implizierte Geschwindigkeit ebenfalls zu extrapolieren. Dieser Effekt ist in Abb. 4.6 durch die Gegenüberstellung einer gleichförmigen Bewegung (Abb. 4.6a) mit einer Geschwindigkeitsänderung (Abb. 4.6b) dargestellt. Die Geschwindigkeitsänderung, im gezeigten Beispiel ein Abbremsen, wirkt sich auf die Kontrollpunkte bei einem gleichmäßigen zeitlichen Abstand durch einen ungleichmäßigen räumlichen Abstand aus. Diese Tendenz wird durch die extrapolierte Kurve fortgesetzt. Die Lagrange-Kurve ermöglicht somit nicht nur eine räumliche, sondern auch eine zeitliche Extrapolation der beobachteten Bewegungen.

Da es sich bei dem gezeigten Beispiel um eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung handelt, ist die resultierende Bewegungsgleichung eine quadratische Funktion. Für eine exakte Beschreibung dieser Bewegung ist somit ebenfalls eine Lagrange-Kurve mindestens zweiten Grades (bzw. drei Kontrollpunkte) erforderlich.

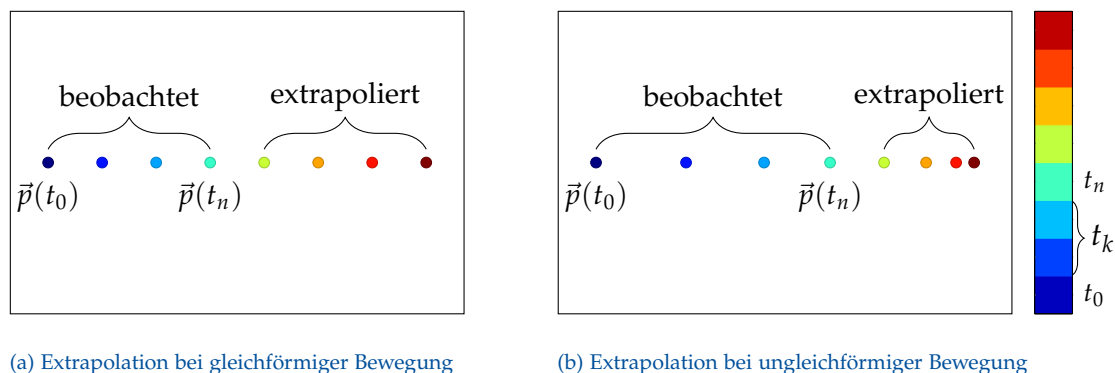


Abbildung 4.6.: Gegenüberstellung der Extrapolation von gleichförmiger und ungleichförmiger Bewegung. Der extrapolierte Bereich ist der Lesbarkeit halber als diskrete Punkte dargestellt, bei der Lagrange-Kurve handelt es sich jedoch um eine stetige Kurvendarstellung.

Extrapolation der Bewegung mit Lagrange-Kurven

Durch die im vorherigen Abschnitt erläuterten Eigenschaften der Lagrange-Kurve wird ersichtlich, warum diese Kurvendarstellung zur Modellierung einer antizipierten Trajektorie aus zeitdiskreten beobachteten Aufenthaltspunkten gut geeignet ist. Zum einen sind außer den Kontrollpunkten keine weiteren Kurvenparameter erforderlich. Zum anderen verläuft die resultierende Kurve exakt durch die vorgegebenen Kontrollpunkte, was der Modellierung von beobachteten Aufenthaltspunkten entspricht.

Bei Verwendung einer Lagrange-Kurve zur räumlich-zeitlichen Extrapolation von Bewegungen ergibt sich die zeitabhängige antizipierte Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ für den Verkehrsteilnehmer V_j zu:

$$\hat{T}_j(t) = \sum_{k=0}^n \vec{p}_j(t_k) L_k^n(t), \quad (4.4)$$

wobei $\vec{p}_j(t_k)$ den beobachteten Aufenthaltspunkt von V_j zum Zeitpunkt t_k beschreibt.

Allerdings tendieren Lagrange-Kurven höheren Grades zu unerwünschten Oszillationen im Kurvenverlauf (Farin 1994). Daher ist eine Beschränkung des Kurvengrads n erforderlich, um die praktische Anwendbarkeit der Kurve zu gewährleisten. Da die Anzahl berücksichtigter Kontrollpunkte über die Beziehung $n + 1$ direkt mit dem Kurvengrad zusammenhängt, geht für größere Punktmengen die Beschränkung des Kurvengrads mit einer Reduktion der Punktmenge einher.

Um den zwangsläufig mit der Verkleinerung der Punktmenge einhergehenden Informationsverlust zu minimieren, muss zur Ausdünnung der Kontrollpunkte ein Verfahren zur Bestimmung der verbleibenden Punkte gewählt werden, das eine möglichst große Genauigkeit der vereinfachten Kurve gewährleistet. Der Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus (RDP, Ramer 1972) stellt in dieser Hinsicht ein geeignetes Verfahren dar. Dieser Algorithmus stammt ursprünglich aus den Bereichen der Computergrafik bzw. Kartographie und dient zur Vereinfachung von Polygonzügen mit dem Ziel, die grobe Gestalt zu erhalten. Dies wird erreicht, indem diejenigen Punkte aus dem Polygonzug entfernt werden, die einen vorgegebenen Abstand ϵ zum vereinfachten Verlauf nicht überschreiten. Dabei bleiben die beiden Randpunkte des Polygonzugs in jedem Fall erhalten. Der RDP-Algorithmus wird zur Beschränkung des Kurvengrads einer Lagrange-Kurve verwendet, indem die Menge der Kontrollpunkte vorübergehend als Kontrollpolygon betrachtet wird. Dieses wird mithilfe des Algorithmus vereinfacht, bevor eine Berechnung der Lagrange-Kurve auf Basis der verbleibenden Punkte erfolgt. Eine derartige schrittweise Überführung der beobachteten Punkte in eine reduzierte Punktmenge ist in Abb. 4.7 beispielhaft dargestellt.

Abb. 4.7a zeigt die zeitdiskrete Menge $\vec{p}_j(t_k)$ der Aufenthaltspunkte von V_j im Wahrnehmungsbereich von V_i . Ein mögliches Resultat der Reduzierung durch den RDP-Algorithmus ist in Abb. 4.7b dargestellt.

Da der RDP-Algorithmus als alleinigen Eingangsparameter das Toleranzkriterium ϵ benötigt, ist der Umfang der reduzierten Punktmenge im Vorhinein nicht absehbar. Sofern nach der Reduktion durch den RDP-Algorithmus eine größere Anzahl an Punkten vorhanden ist als der maximale Kurvengrad n zulässt, werden nur die aktuellsten $n + 1$ Punkte berücksichtigt und die übrigen Punkte für die Extrapolation verworfen. Für das gezeigte Beispiel ist die resultierende Punktmenge in Abb. 4.7c dargestellt. Hier wird der Kurvengrad auf $n = 3$ beschränkt.

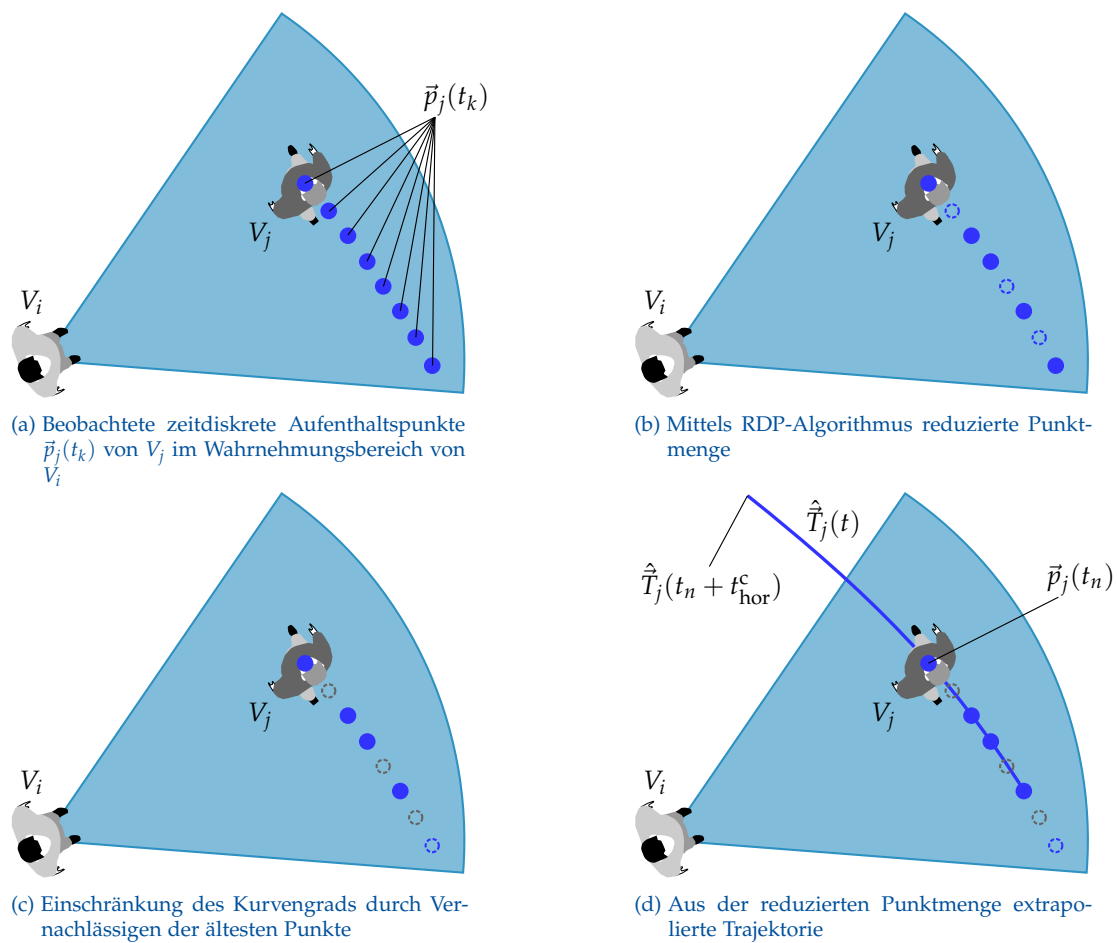


Abbildung 4.7.: Vorgehen bei der Trajektorienextrapolation mit Beschränkung des maximalen Kurvengrads.

Aus den verbleibenden Punkten wird die antizipierte Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ nach Gl. 4.4 berechnet. Dabei wird das Intervall $[t_0; t_n + t_{\text{hor}}^c]$ berücksichtigt, wobei t_n den Beobachtungszeitpunkt des letzten Kontrollpunkts und t_{hor}^c den zeitlichen Horizont für die Konflikterkennung beschreiben. Eine entsprechende Kurve ist in Abb. 4.7d dargestellt.

Die Anwendung des beschriebenen Verfahrens in der Simulationsumgebung zeigt, dass bei den auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen zu beobachtenden Geschwindigkeiten und Bewegungsmustern bei einem zeitlichen Abstand der beobachteten Punkte von 0,5s eine Beschränkung auf Kurven von höchstens dritten Grades (und somit maximal vier Kontrollpunkten) zu plausiblen Extrapolationen der Bewegungen führt, ohne dabei die unerwünschten Nebeneffekte der Modellierung durch Lagrange-Kurven aufzuweisen.

4.2.3. Konflikterkennung

Die Distanzfunktion

Mithilfe der extrapolierten Trajektorie kann eine Abschätzung über die zeitliche Entwicklung des Abstands durch Berechnung der Differenz der eigenen Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ und der antizipierten Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ getroffen werden:

$$d_{ij}(t) = |\vec{T}_i(t) - \hat{T}_j(t)| - r_{i,j}(t) - r_{j,i}(t), \quad (4.5)$$

wobei $r_{i,j}(t)$ den Abstand des Schwerpunkts des Verkehrsteilnehmers V_i zu seiner umgebenden Ellipse in Richtung V_j darstellt. Abb. 4.8 veranschaulicht die in Gl. 4.5 aufgeführten Größen.

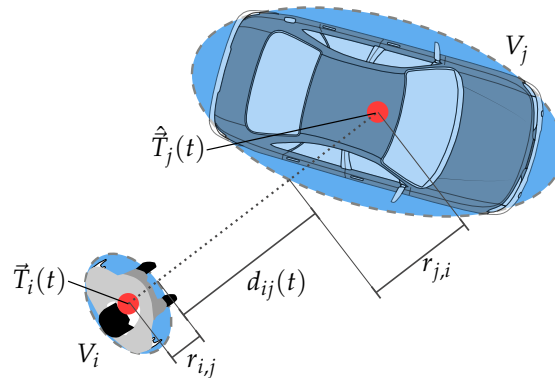


Abbildung 4.8.: Berechnung des Abstands zweier Verkehrsteilnehmer.

Der zeitabhängige antizipierte Abstand $d_{ij}(t)$ wird als **Distanzfunktion** bezeichnet. Diese wird in den folgenden Abschnitten zur Konflikterkennung und -vermeidung verwendet. Dazu lassen sich einige Parameter mithilfe des Verlaufs der Distanzfunktion identifizieren, anhand derer Konfliktsituationen korrekt identifiziert und gelöst werden können. Diese werden im Folgenden herausgearbeitet.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird die eigene Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ durch eine Klothoide modelliert. Zur Berechnung von $d_{ij}(t)$ ist somit eine zeitabhängige Abstandsberechnung zwischen einer Klothoide und einer Lagrange-Kurve erforderlich. Eine allgemeingültige analytische Formulierung hierfür ist grundsätzlich denkbar und für den Fall zweier gleichförmiger Bewegungen auch einfach durchführbar. Sobald mindestens eine ungleichförmige Bewegung involviert ist, wird die analytische Betrachtung jedoch deutlich komplexer. Daher wird der Verlauf der Distanzfunktion in der Simulation stattdessen durch eine Diskretisierung des Betrachtungszeitraums numerisch ermittelt.

In realitätsgetreuen Simulationsszenarien sind vollständig gleichförmige Bewegungen nur äußerst selten zu beobachten. Jedoch hält sich die Nichtlinearität der zu erwartenden

4. Modellierung von Bewegungen und Interaktionen

Kurven- und Geschwindigkeitsverläufe in gewissen Grenzen, sodass die Distanzfunktion üblicherweise ähnliche Eigenschaften wie die Distanzfunktion zweier vollständig gleichförmiger Bewegungen aufweist (siehe Fallbeispiele im Anhang A). Daher werden im Folgenden die relevanten Konfliktparameter anhand der gleichförmigen Bewegung erläutert. Eine entsprechende Distanzfunktion ist in Abb. 4.9 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums ein Minimum auszumachen ist, während die Distanzfunktion vor diesem monoton fallend, hinter diesem monoton steigend verläuft.

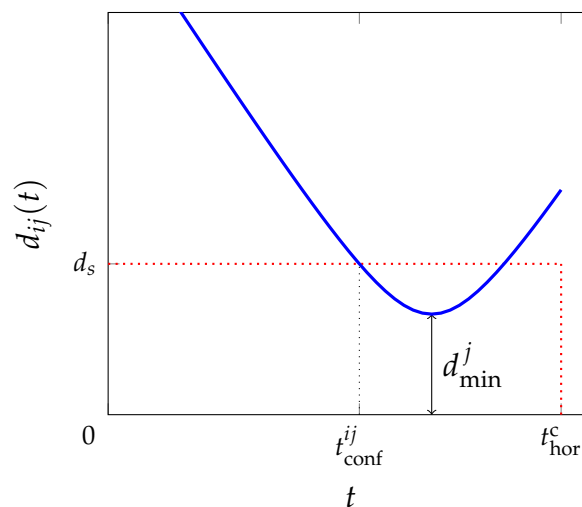


Abbildung 4.9.: Typische Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ mit den relevanten Parametern zur Beschreibung einer Konfliktsituation

Um die Distanzfunktion für die Konflikterkennung nutzen zu können werden zwei Parameter eingeführt:

Sicherheitsabstand d_s^{ij} Der Abstand d_s^{ij} ist der Abstand zwischen zwei Verkehrsteilnehmern, dessen Einhalten ein Sicherheitsgefühl bei dem betrachteten Verkehrsteilnehmer gewährleistet. Daher wird die Distanzfunktion auf Unterschreitung dieses Abstands untersucht.

Konflikthorizont t_{hor}^c Der Konflikthorizont ist der Zeitraum ausgehend vom aktuellen Zeitpunkt t , innerhalb dessen die Distanzfunktion ausgewertet wird.

Mithilfe der **Distanzfunktion** lässt sich die Definition eines Konflikts wie folgt formalisieren:

Definition 1

V_i beurteilt eine Situation zum Zeitpunkt t als Konflikt mit V_j , wenn es innerhalb des zeitlichen Konflikthorizonts t_{hor}^c einen Zeitpunkt gibt, zu dem die Distanzfunktion den Sicherheitsabstand d_s^{ij} unterschreitet:

$$\exists \tau \in [t, t + t_{\text{hor}}^c]: d_{ij}(\tau) < d_s^{ij}$$

Eine Situation, die nach dieser Definition als Konfliktsituation eingestuft ist, lässt sich durch verschiedene Parameter näher beschreiben. Teilweise lassen diese sich ebenfalls aus der Distanzfunktion ermitteln, für weitere Parameter ist zusätzlich eine geometrische Betrachtung der Situation erforderlich. Der Konfliktzeitpunkt sowie der minimale Abstand lassen sich allein aus der Distanzfunktion ablesen und sind in Abb. 4.9 bereits eingezeichnet.

Konfliktzeitpunkt t_{conf}^{ij} Sollte die Distanzfunktion den Sicherheitsabstand unterschreiten, so ist für die nachfolgende Konfliktbehandlung entscheidend, wie lange die erstmalige Unterschreitung vom aktuellen Zeitpunkt entfernt ist. Diese Zeitspanne wird als t_{conf}^{ij} bezeichnet⁴.

Minimaler Abstand d_{min}^j Das Minimum der Distanzfunktion beschreibt den minimal erwarteten Abstand innerhalb t_{hor}^c . Der zugehörige Zeitpunkt wird als $t_{d_{\text{min}}^j}$ bezeichnet.

Abb. 4.10 zeigt eine typische Konstellation zweier Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der Konfliktdetektion. Die folgenden Parameter lassen sich geometrisch aus dieser Konstellation ermitteln.

Konfliktpunkt \vec{p}_c^{ij} Der Konfliktpunkt bezeichnet den Aufenthaltspunkt von V_j zum Konfliktzeitpunkt. Formal lässt er sich somit aus der antizipierten Trajektorie zu $\hat{T}_j(t_{\text{conf}}^{ij})$ ermitteln.

⁴In der Literatur wird diese Zeitspanne häufig als *Time to Collision* (TTC) bezeichnet. Da in den hier betrachteten Fällen nicht zwingend eine Kollision die Konsequenz eines nicht behandelten Konflikts wäre, wird zur Verdeutlichung des Unterschieds eine andere Bezeichnung für den Konfliktzeitpunkt gewählt.

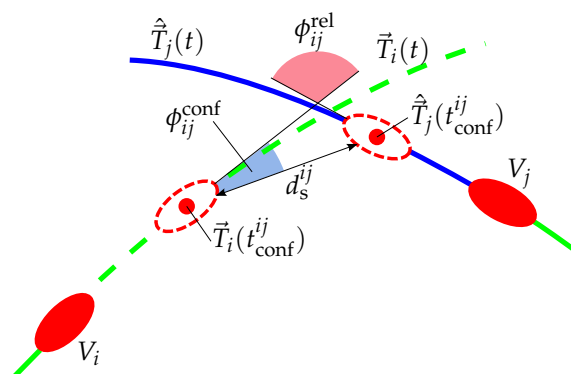


Abbildung 4.10.: Beispielhafte Konstellation zweier Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der Konflikterkennung. Die prädizierten Positionen zum Konfliktzeitpunkt sind gestrichelt dargestellt.

Konfliktwinkel ϕ_{ij}^{conf} Der Konfliktwinkel beschreibt den Winkel zwischen der erwarteten Bewegungsrichtung von V_i und der gedachten Verbindung von der Position $\vec{T}_i(t_{\text{conf}}^{ij})$ von V_i zum Konfliktzeitpunkt mit dem Konfliktpunkt. Der Konfliktwinkel befindet sich im Intervall $[-\pi, \pi]$. Unter Einbezug der erwarteten Bewegungsrichtung von V_j gibt er Aufschluss darüber, ob V_j die eigene Trajektorie bereits passiert hat. In Abb. 4.10 ist er in hellblauer Farbe dargestellt.

Relativer Körperwinkel ϕ_{ij}^{rel} Differenz der erwarteten Körperausrichtungen zum Konfliktzeitpunkt ausgehend von V_i . Im Gegensatz zum Konfliktwinkel wird kein Vorzeichen betrachtet, somit befindet sich der relative Körperwinkel im Intervall $[0, \pi]$. In Abb. 4.10 ist er in hellroter Farbe dargestellt.

Kreuzungspunkt \vec{p}_x^{ij} Der zeitlich erste antizipierte Schnittpunkt der Trajektorien $\vec{T}_i(t)$ und $\hat{\vec{T}}_j(t)$, sofern dieser existiert. Der Schnittpunkt wird im allgemeinen Fall nicht von beiden Verkehrsteilnehmern gleichzeitig erreicht, sodass zwischen den beiden zugehörige Zeitpunkten $t_{p_x}^i$ und $\hat{t}_{p_x}^j$ auf der jeweiligen Trajektorie unterschieden wird. Somit gilt:

$$\vec{p}_x^{ij} = \vec{T}_i(t_{p_x}^i) = \hat{\vec{T}}_j(\hat{t}_{p_x}^j)$$

Für den Fall, dass sich die Trajektorien nicht schneiden, wird ersatzweise der Punkt auf $\vec{T}_i(t)$ verwendet, an dem der kleinste Abstand zu $\hat{\vec{T}}_j(t)$ erwartet wird:

$$\vec{p}_x^{ij} = \vec{T}_i(t_{d_{\min}^j})$$

4.2.4. Konfliktklassifizierung

Nachdem die Konfliktdetektion wie beschrieben durchgeführt wurde, steht für alle V_j im Wahrnehmungsbereich von V_i fest, ob sich diese im Konflikt mit V_i befinden. Auf Grundlage der bei der Konfliktdetektion ermittelten Parameter wird nun eine Klassifizierung der Konfliktsituation nach verschiedenen Kriterien vorgenommen. Das Gesamtergebnis der Konfliktklassifizierung ist der **Konflikttyp**, der eine Beschreibung der Situation zum aktuellen Zeitpunkt aus der Sicht jedes Verkehrsteilnehmers ermöglicht.

Klassifizierung nach involvierten Verkehrsteilnehmern

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale zwischen den Klassifizierungen sind die Anzahl der involvierten Verkehrsteilnehmer und deren **Verkehrsart**. In Tab. 4.1 ist eine Übersicht über die berücksichtigten Klassifizierungen aufgeführt. Dabei wird die Anzahl der sich im Konflikt befindenden V_j als n_{conf} , die Verkehrsarten von V_i und V_j als M_i bzw. M_j bezeichnet. Es wird zwischen Konflikten mit $n_{\text{conf}} = 1$ und $n_{\text{conf}} > 1$ unterschieden. Eine obere Grenze wird durch n_{max} festgelegt. Wird dieser Wert von n_{conf} überschritten, so gilt die Situation als zu unübersichtlich für ein effizientes vorausschauendes Verhalten. Dieser Fall wird im Modell wie die Ad-hoc-Situation behandelt.

Klassifizierung nach Konfliktzeitpunkt

Weiterhin wird der Konfliktzeitpunkt t_{conf}^{ij} des Konflikts berücksichtigt (bei mehreren simultanen Konflikten wird die kleinste Zeitspanne maßgeblich), indem sie mit dem Parameter t_{SR} verglichen wird. Dieser beschreibt die Dauer, die für eine vorausschauende Reaktion auf die Konfliktsituation erforderlich ist. Wenn t_{conf}^{ij} kleiner ist, wird die Situation als Ad-hoc-Situation eingestuft, in der zumeist vordergründig nur noch eine Kollision zu vermeiden ist, ohne dabei die Aspekte Kooperation oder Effizienz zu berücksichtigen.

Klassifizierung nach relativem Körperwinkel

Die Klassifizierung nach dem **relativen Körperwinkel** ϕ_{ij}^{rel} dient der Unterscheidung, ob es sich um einen frontalen, einen lateralen oder in seltenen Fällen um einen rückseitigen Konflikt handelt. Dazu wird der relative Körperwinkel mit den Grenzwinkeln $\alpha_{iM_j}^{\text{lateral}}$ und $\alpha_{iM_j}^{\text{frontal}}$ verglichen. Für ϕ_{ij}^{rel} kleiner als $\alpha_{iM_j}^{\text{lateral}}$ wird der Konflikt als rückseitig bezeichnet. Diese Konstellation kommt bei Bewegungen in Richtung eines langsameren

4. Modellierung von Bewegungen und Interaktionen

n_{conf}	t_{conf}^{ij}	Konflikttyp	Beschreibung
1	$> t_{\text{SR}}$	Schema: $M_i_M_j$ z. B. PED_PED, CYC_GROUP, ...	Konflikt mit genau einem weiteren Verkehrsteilnehmer
$1 < n_{\text{conf}} \leq n_{\text{max}}$		Schema: $M_i_M_j\text{s}$ z. B. PED_PEDs, CYC_CARs, ...	Konflikt mit mehreren anderen Verkehrsteilnehmern der jeweils gleichen Verkehrsart
		Schema: M_i_MULT z. B. PED_MULT, CAR_MULT ... ,	Konflikt mit mehreren anderen Verkehrsteilnehmern unterschiedlicher Verkehrsart
$> n_{\text{max}}$		CROWDED	Situationen, in denen zu viele Verkehrsteilnehmer für sinnvolles vorausschauendes Verhalten involviert sind.
egal	$\leq t_{\text{SR}}$	SHORT_RANGE	Ad-hoc-Situation
0	-	NO_CONF	Kein Konflikt
> 0	> 0	z. B. OTHER_LANE, FOLLOWING	Situationen, in denen eine bewusste Unterschreitung des Sicherheitsabstands zugelassen werden kann, z.B. beim Vorhandensein von Fahrspuren. Ermittlung anhand weiterer Kriterien erforderlich.

Tabelle 4.1.: Übersicht über die im Modell berücksichtigten Konflikttypen. Darstellung der jeweiligen Konflikttypen in Schreibmaschinenschrift.

Verkehrsteilnehmers in näherungsweise der gleichen Bewegungsrichtung vor. Relative Körperwinkel zwischen $\alpha_{iM_j}^{\text{lateral}}$ und $\alpha_{iM_j}^{\text{frontal}}$ kennzeichnen einen lateralen Konflikt. Der verbleibende Fall, ϕ_{ij}^{rel} größer als $\alpha_{iM_j}^{\text{frontal}}$, beschreibt den frontalen Konflikt.

$$\begin{aligned}
 0 \leq \phi_{ij}^{\text{rel}} < \alpha_{iM_j}^{\text{lateral}} & : && \text{Rückseitiger Konflikt} \\
 \alpha_{iM_j}^{\text{lateral}} \leq \phi_{ij}^{\text{rel}} < \alpha_{iM_j}^{\text{frontal}} & : && \text{Lateraler Konflikt} \\
 \alpha_{iM_j}^{\text{frontal}} \leq \phi_{ij}^{\text{rel}} \leq \pi & : && \text{Frontaler Konflikt}
 \end{aligned}$$

4.3. Übergang zum vorausschauenden Verhalten

Im vorherigen Abschnitt wurde zur Konfliktklassifizierung bereits der Parameter t_{SR} herangezogen, der den Übergang zur Ad-hoc-Situation festlegt. Zur Definition des in dieser Arbeit modellierten vorausschauenden Verhaltens wird darüber hinaus ein weiterer Parameter t_{LR} eingeführt. Dieser beschreibt den aktiven Beginn des vorausschauenden Verhaltens. Formell stellen beide Parameter Grenzwerte für t_{conf}^{ij} dar. Solange $t_{conf}^{ij} > t_{LR}$ ist, wird die Situation weiter beobachtet. Eine (vorläufige) Entscheidung kann getroffen werden, jedoch erfolgt trotz ggf. bereits erkannter Konfliktsituation noch keine Reaktion. Eine konfliktvermeidende vorausschauende Reaktion wird in der Zeitspanne $t_{LR} \geq t_{conf}^{ij} > t_{SR}$ ausgeführt. Ein auf diesen Annahmen aufbauendes vorausschauendes Verhalten der Verkehrsteilnehmer für den Fall $t_{conf}^{ij} > t_{SR}$ wird im folgenden Kapitel 5 modelliert.

Kommt es trotz vorausschauenden Verhaltens, beispielsweise durch Fehlentscheidungen oder spätes Erkennen eines Konflikts, zu $t_{conf}^{ij} \leq t_{SR}$, so wird die Situation gemäß Abschnitt 4.2.4 als Ad-hoc-Situation klassifiziert. In diesem Fall erfolgt ein Wechsel vom vorausschauenden Reaktionsmechanismus auf ein Verhalten, das allein das Ziel der kurzfristigen unbedingten Kollisionsvermeidung verfolgt. Dieses Verhalten wird in dieser Arbeit mithilfe eines nur leicht angepassten SKM modelliert. Im Gegensatz zum vorausschauenden Verhalten besteht die einzige Modifikation des SKM in diesem Fall in der Berücksichtigung fahrdynamischer Einschränkungen für Radfahrer und Pkw, die durch die Begrenzung der Radialkraft wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben in das Modell eingebracht wird.

5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten

Kooperative Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern, also eine auf aufmerksamer Beobachtung der aktuellen Situation basierende Anpassung des individuellen Verhaltens, dienen zum rechtzeitigen Erkennen und Vermeiden bevorstehender Konfliktsituationen. Sie stellen die Grundlage für einen sicheren und gleichzeitig effizienten Verkehrsablauf auf Verkehrsflächen, die ohne festes Regelwerk von unterschiedlichen Verkehrsarten genutzt werden, dar. Somit besteht die maßgebliche Anforderung an eine realistische Modellierung in der Berücksichtigung eines derartigen Verhaltens.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde herausgestellt, dass sich Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern im Sinne der Modellierung in drei Interaktionsstufen einteilen lassen:

1. Keine Interaktion: Ungestörte Bewegung (*Free Flow*)
2. Vorausschauendes Verhalten
3. Ad-hoc-Situationen

Die ungestörte Bewegung stellt aus Sicht jedes einzelnen Verkehrsteilnehmers den Idealzustand dar, ist aber je nach Frequentierung einer Verkehrsfläche oftmals nicht zu erreichen. Um dennoch einen sicheren und komfortablen Verkehrsablauf zu erzielen, streben Verkehrsteilnehmer ein vorausschauendes Verhalten an. Die dritte Interaktionsstufe besteht aus Fällen, in denen es trotz vorausschauenden Verhaltens zu unmittelbar bevorstehenden Konflikten kommt, und wird als Ad-hoc-Situation bezeichnet.

In Kap. 4 wurde das [Soziale-Kräfte-Modell \(SKM\)](#) erweitert, um typische Bewegungsmuster sowie die subjektive Wahrnehmung von Verkehrsteilnehmern abbilden zu können. Damit wurden zum einen die erste und die dritte Interaktionsstufe modelliert, zum anderen die Voraussetzungen für eine weitergehende Modellierung des vorausschauenden Verhaltens geschaffen. Darauf aufbauend liegt der Fokus in diesem Kapitel auf der modelltechnischen Integration der zweiten Interaktionsstufe in das modifizierte [SKM](#).

Zu diesem Zweck werden im Folgenden die in Abschnitt [2.3.3](#) beschriebenen, beobachteten Ebenen einer Reaktion aufgegriffen und in das Modell überführt. Abschnitt [5.1](#) beschreibt die Modellierung einer Entscheidung für eine [Konfliktlösungsstrategie](#). Die modelltechnische Umsetzung dieser Strategien in Form von [Reaktionsmechanismen](#)

wird in Abschnitt 5.2 erarbeitet. Dazu wird das SKM um verschiedene neu formulierte Kräfte sowie die Möglichkeit, die Wunschtrajektorie dynamisch umzuplanen, erweitert. Diese Modellierung stellt einen der wesentlichen Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit dar. Nachdem die Modellierung der Entscheidungs- und Reaktionsebenen zunächst für Konflikte zwischen exakt zwei Verkehrsteilnehmern erarbeitet werden, wird im darauf folgenden Abschnitt 5.3 ein Ansatz vorgestellt, diese Konzepte auf Situationen mit mehreren simultanen Konflikten zu erweitern.

5.1. Entscheidung

Die Einführung einer Entscheidungsebene ermöglicht, die in Abschnitt 2.3.3 beschriebene **Strategische Ebene** zu modellieren. Der Entscheidungsebene kommt somit die Rolle zuteil, in einer Konfliktsituation die Strategie für die nachfolgende Reaktion zu bestimmen. Dementsprechend erfolgt auf dieser Ebene noch keine direkt sichtbare Verhaltensänderung. Wie in Abschnitt 2.3.3 ausgeführt, wird bei der Strategiewahl zwischen offensiver, defensiver und (zunächst) keiner Reaktion unterschieden.

Durch den modularen Aufbau des in dieser Arbeit vorgestellten Modells ist grundsätzlich eine Entscheidungsfindung anhand beliebiger Kriterien denkbar. Im Folgenden wird auf ein stochastisches Entscheidungsmodell, das im Rahmen des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt 1.3.3) von Pascucci u. a. (2018) für Konfliktsituationen zwischen Fußgängern und Kraftfahrzeugen kalibriert wurde, näher eingegangen.

Dem Entscheidungsmodell liegt eine Signifikanzanalyse zugrunde, in der aus zwölf Parametern, die eine Konfliktsituation beschreiben, diejenigen ermittelt werden, die die Wahl einer spezifischen Konfliktlösungsstrategie maßgeblich beeinflussen. Mithilfe von Realdaten aus den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Aufnahmen und einem im Gegensatz zu dem in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen leicht vereinfachten Verfahren zur Bewegungsprädiktion wurde von Pascucci u. a. (2018) erarbeitet, dass vier von den zwölf untersuchten Parametern unabhängig von der Verkehrsart einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung haben.

Durch die Analogie zum in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz wurden einige dieser Parameter bereits in Abschnitt 4.2.3 anhand der Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ hergeleitet. Im Einzelnen handelt es sich bei den signifikanten Parametern um den erwarteten minimalen Abstand d_{\min}^j der Trajektorien, die zugehörige verbleibende Zeitspanne $t_{d_{\min}^j}$ bis zum minimalen Abstand, den erwarteten zeitlichen Abstand der Ankunft am Kreuzungspunkt der Trajektorien (die zeitlich versetzte Ankunft am Kreuzungspunkt wird im Rahmen der Formulierung einer **trajektorienbasierten Ausweichkraft** ausführlicher diskutiert) und die Beschleunigung des Fußgängers zum Zeitpunkt der Entscheidung.

Basierend auf diesen vier Parametern wurde ein logistisches Regressionsmodell formuliert, das Einzelwahrscheinlichkeiten für alle Strategien, die in dem jeweiligen Konflikttyp üblich sind, ermittelt. Pascucci u. a. benennen die möglichen Strategien als *Aggressive*, *Prudent* und *No Reaction*. Diese Bezeichnungen lassen sich auf die in dieser Arbeit verwendeten direkt übertragen. Weiterhin suggerieren Pascucci u. a., dass in PED_CAR-Konflikten alle drei Strategien zu berücksichtigen sind, während in CAR_PED-Konflikten lediglich defensive oder keine Reaktionen zu beobachten sind.

5.2. Reaktion

Die Reaktion bezeichnet die Anwendung der strategisch getroffenen Entscheidung. Aus Modellsicht ist ein Reaktionsmechanismus erforderlich, der eine Modellerweiterung für ein spezifisches Verhalten einer oder mehrerer Verkehrsarten darstellt.

In Abschnitt 2.3.3 wurden verschiedene Konfliktlösungsstrategien aus Beobachtungen des Verkehrsgeschehens extrahiert und klassifiziert. Dabei wurde gezeigt, dass Kombinationen der Basismechanismen „Ausweichen“ und „Abbremsen“ zu verschiedenen Reaktionsmechanismen führen.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze erarbeitet, Reaktionsmechanismen ins modifizierte SKM zu integrieren. Die Unterscheidung dieser Ansätze löst sich zunächst von der strategischen Ebene (offensive/defensive/keine Reaktion). Stattdessen wird unterschieden, auf welche Art die Mechanismen appliziert werden. In Abschnitt 5.2.1 werden verschiedene Mechanismen auf Grundlage einer einmaligen Trajektorienumplanung diskutiert. Reaktionen durch kontinuierliche Beeinflussung der Bewegung durch eine Reaktionskraft werden in Abschnitt 5.2.2 vorgestellt. Während die einmalige Trajektorienumplanung eine zielstrebigere und entschlossenerere Verhaltensweise modelliert, lassen sich mit den kraftbasierten Mechanismen Reaktionen abbilden, die sukzessive über einen längeren Reaktionszeitraum aufgebracht werden. Tabelle 5.1 zeigt einen Überblick über die sechs in dieser Arbeit entwickelten Reaktionsmechanismen mit den im Folgenden verwendeten Abkürzungen.

Die Reaktionsmechanismen wurden auf Grundlage der in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen beobachteten Verhaltensmuster der verschiedenen Verkehrsarten entwickelt. Da diese Verhaltensmuster wesentlich vom Konflikttyp abhängen, entsteht die gleiche Abhängigkeit für die Reaktionsmechanismen. Tab. 5.2 gibt einen Überblick, welche Reaktionsmechanismen bei Konflikten zwischen den Verkehrsarten Fußgänger (PED),

Trajektorienbasiert	Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt	NT
	Anbremsen eines Wartepunkts	WP
Kraftbasiert	Safe Zone Force	\vec{f}_{SZ}
	Reaktionskraft für defensive Reaktion	\vec{f}_{def}
	Reaktionskraft für offensive Reaktion	\vec{f}_{off}
	Trajektorienbasierte Ausweichkraft	\vec{f}_{traj}

Tabelle 5.1.: Überblick über die Reaktionsmechanismen.

$M_i \backslash M_j$	PED	CAR	CYC
PED	\vec{f}_{traj}	$\vec{f}_{SZ}, \vec{f}_{def}, \vec{f}_{off}$	$\vec{f}_{SZ}, \vec{f}_{def}, \vec{f}_{off}$
CAR	WP, $\vec{f}_{traj}^{[i]}$	WP	WP, $\vec{f}_{traj}^{[i]}$
CYC	NT	NT, WP	NT, WP

^[i] Projiziert auf die Wunschtrajektorie

Tabelle 5.2.: Zuordnung der Reaktionsmechanismen zu den Konflikttypen.

Kraftfahrzeug (CAR) und Radfahrer (CYC) im Modell zur Anwendung kommen.

5.2.1. Strategien mit einmaliger Trajektorienumplanung

Die Reaktion durch die bewusste Umplanung der eigenen Wunschtrajektorie erfolgt mit dem Ziel, einen Konflikt durch einmalige Applikation eines Reaktionsmechanismus direkt zu lösen. Somit soll eine neue Trajektorie gefunden werden, die im Sinne der Konflikterkennung aus Abschnitt 4.2.3 nicht mit den prädizierten Trajektorien für andere Verkehrsteilnehmer im Konflikt steht. Dementsprechend ist die Voraussetzung für die Anwendung eines solchen Reaktionsmechanismus, dass bereits eine Bewegungsprädiktion vorhanden ist, auf deren Basis ein Fixpunkt im sicheren Abstand zur prädizierten Trajektorie des Konfliktgegners bestimmt werden kann. Dieser wird in den Weg W (siehe Gl. 4.1) eingefügt, der für die Berechnung einer neuen Trajektorie gemäß Abschnitt 4.1.2 herangezogen wird. Auf Modellebene wird somit keine zusätzliche Reaktionskraft aufgebracht, die für die Reaktion notwendige Bewegung wird ausschließlich durch den modifizierten Antriebsterm (siehe Abschnitt 4.1.3) hervorgerufen. Um eine Kollision durch einen falsch eingeschätzten Fixpunkt zu vermeiden, ist ein sukzessives Reevaluieren der Reaktion möglich, aber im Gegensatz zu den kraftbasierten Reaktionen nicht zwingend erforderlich. Ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Prädiktionsgenauigkeit besteht darin, eine Reevaluation erst nach einer bestimmten Anzahl an Simulationszeitschritten durchzuführen.

In den folgenden Abschnitten werden mit der **Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt** und dem **Anbremsen eines Wartepunkts** zwei verschiedene Reaktionsmechanismen erarbeitet, in deren Kontext der Fixpunkt unterschiedliche Funktionen erfüllt. Die Mechanismen unterscheiden sich somit nicht nur in der Berechnung des Fixpunkts, sondern vor allem durch die zugrundeliegende **Konfliktlösungsstrategie**.

Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt

Obwohl es sich bei der Bestimmung einer neuen Trajektorie durch einen erwarteten sicheren Fixpunkt um eine Ausweichbewegung handelt, wird diese Reaktion zu den offensiven Strategien gezählt, da der Verkehrsteilnehmer versucht, den Konflikt aktiv und ohne Änderung der eigenen Geschwindigkeit zu lösen.

Für die Bestimmung des Ausweichpunkts werden die eigene Wunschtrajektorie $\vec{T}_i(t)$ sowie die prädizierte Trajektorie $\hat{\vec{T}}_j(t)$ des Konfliktgegners V_j benötigt. Aus diesen lassen sich die weiteren für die Berechnung erforderlichen Größen ableiten. In Abb. 4.10 wurde bereits eine mögliche Konstellation zweier Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der Erkennung der Konfliktsituation dargestellt und die entsprechenden Konfliktparameter diskutiert.

Für die Berechnung wird im Folgenden eine Reihe von Parametern eingeführt. Diese erlauben zum einen eine spätere Kalibrierung des Reaktionsausmaßes, zum anderen die Beschreibung eines individuellen Konfliktverhaltens.

Die Berechnung möglicher Ausweichpunkte unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Klassifizierung des **relativen Körperwinkels** (siehe Abschnitt 4.2.4). Für laterale Konflikte lassen sich Ausweichpunkte direkt auf der prädizierten Trajektorie $\hat{\vec{T}}_j(t)$ bestimmen. Für frontale und rückseitige Konflikte ist dies nicht möglich, da so ein ausreichender Abstand nicht immer gewährleistet wäre. Der Unterschied wird in Abb. 5.1 verdeutlicht.

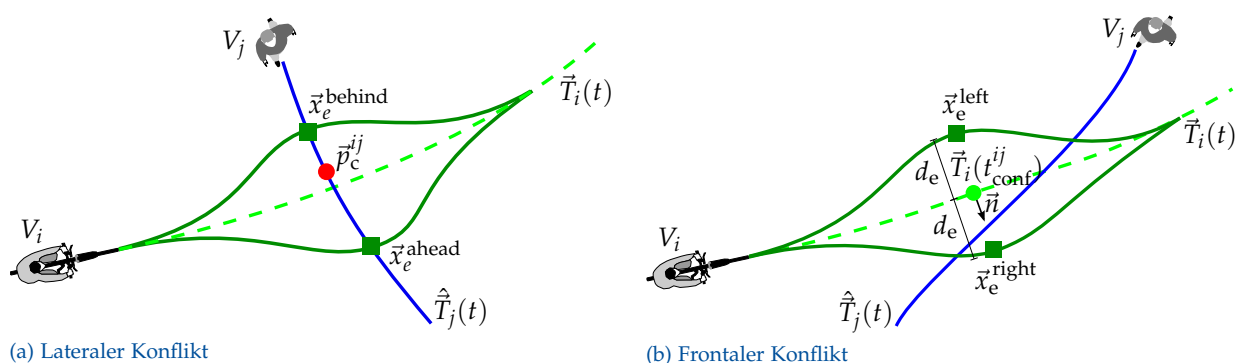


Abbildung 5.1.: Bestimmung möglicher Ausweichpunkte. Rückseitiger Konflikt analog zum frontalen Konflikt.

Abb. 5.1a zeigt die Berechnung der Ausweichpunkte für einen lateralen Konflikt. Es werden zwei Ausweichpunkte \vec{x}_e jeweils relativ zur prädictierten Bewegungsrichtung von V_j vor und nach dem Konfliktpunkt \vec{p}_c^{ij} bestimmt. Hierfür werden zwei Parameter t_e^{behind} und t_e^{ahead} für den zeitlichen Abstand der Ausweichpunkte zum Konfliktpunkt eingeführt, mit denen sich die Ausweichpunkte wie folgt berechnen lassen:

$$\begin{aligned}\vec{x}_e^{\text{behind}} &= \hat{T}_j(t_{\text{conf}}^{ij} - t_e^{\text{behind}}) \\ \vec{x}_e^{\text{ahead}} &= \hat{T}_j(t_{\text{conf}}^{ij} + t_e^{\text{ahead}})\end{aligned}\quad (5.1)$$

Die Parametrisierung als zeitliche Abstände bringt eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Sicherheitsabstände mit sich. Dies entspricht den Beobachtungen, nach denen beim Kreuzen von Trajektorien Sicherheitsabstände angestrebt werden, die mit der erwarteten Geschwindigkeit wachsen.

Für frontale und rückseitige Konflikte, wie in Abb. 5.1b schematisch für einen frontalen Konflikt dargestellt, müssen Ausweichpunkte abseits der antizipierten Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ ermittelt werden, da die Trajektorien $\vec{T}_i(t)$ und $\hat{T}_j(t)$ bedingt durch ihre relative Lage im Umfeld des Konfliktpunkts keinen ausreichenden Abstand für ein Vorgehen analog zu den lateralen Konflikten gewährleisten. Mit dem Ausweichabstand d_e und dem in Bewegungsrichtung nach rechts weisenden Normalenvektor $\vec{n}(t)$ lassen sich ein links- und ein rechtsseitiger Ausweichpunkt bestimmen:

$$\begin{aligned}\vec{x}_e^{\text{left}} &= \vec{T}_i(t_{\text{conf}}^{ij}) - d_e \cdot \vec{n}(t_{\text{conf}}^{ij}) \\ \vec{x}_e^{\text{right}} &= \vec{T}_i(t_{\text{conf}}^{ij}) + d_e \cdot \vec{n}(t_{\text{conf}}^{ij})\end{aligned}$$

Wenn durch Beobachtungen bekannt ist, dass bestimmte Verhaltensmuster für eine Konfliktart untypisch sind, kann die entsprechende Ausweichrichtung ausgeschlossen werden. Im allgemeinen Fall werden jedoch zwei Ausweichpunkte bestimmt, zwischen denen das Modell eine Auswahl treffen muss. Sollte einer der Ausweichpunkte zu einer Trajektorie führen, die für den Verkehrsteilnehmer durch ein nicht erreichbares Gebiet führt, wird diese Auswahl bereits durch die Umfeldgeometrie getroffen. Dies kann beispielsweise bei Bewegungen nahe dem Rand einer Verkehrsfläche der Fall sein.

In allen anderen Fällen wird ein Verkehrsart-spezifisches Entscheidungskriterium benötigt. Für Fußgänger liefert das Kriterium des kürzesten Weges plausible Ergebnisse.

In Rinke u. a. (2017) wurde für die Modellierung des Konfliktverhaltens von Radfahrern ein Ansatz für die Auswahl eines Ausweichpunkts vorgestellt, der auf der Untersuchung der durch die beiden Ausweichtrajektorien maximal auftretenden Radialbeschleunigung basiert. Hiernach wird die Trajektorie mit der geringeren Radialbeschleunigung

ausgewählt, oder, sofern diese einen Grenzwert überschreitet, diejenige, für die der Radfahrer weniger abbremsen muss.

Anbremsen eines Wartepunkts

Beim gezielten Anbremsen eines Wartepunkts handelt es sich um eine defensive Strategie, die allen Verkehrsarten zur Verfügung steht. Sie wird genutzt, wenn sich die Trajektorien $\vec{T}_i(t)$ und $\hat{\vec{T}}_j(t)$ kreuzen und V_i die Entscheidung trifft, V_j den Kreuzungspunkt der Trajektorien zuerst passieren zu lassen, ohne dabei die eigene Trajektorie zu verändern. Dies wird erreicht, indem V_i die Geschwindigkeit reduziert und somit die eigene Aufenthaltszeit im Bereich vor dem Kreuzungspunkt vergrößert.

Dabei kann der Wartepunkt, im Folgenden mit \vec{x}_{stop} bezeichnet, entweder durch die Umgebung vorgegeben werden (z. B. Straßenmarkierungen oder Wechsel der Oberflächen) oder situationsabhängig anhand der prädizierten Trajektorie $\hat{\vec{T}}_j(t)$ und des Sicherheitsabstands d_s^{ij} abgeschätzt werden. Ein Beispiel für die Schätzung des Wartepunkts ist in Abb. 5.2 dargestellt.

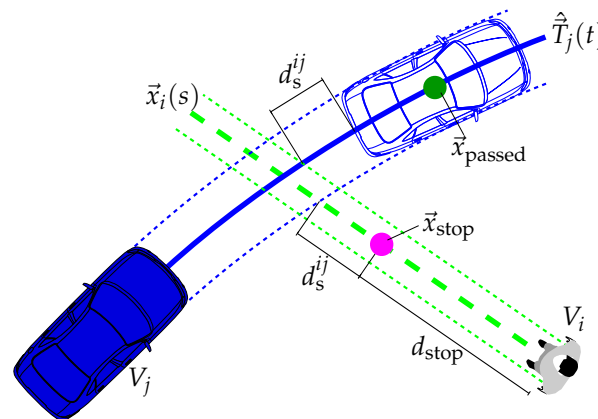


Abbildung 5.2.: Bestimmung des Wartepunkts \vec{x}_{stop} durch Trajektorienprädiktion.

Im gezeigten Beispiel wird der Wartepunkt ermittelt, indem zunächst der erwartete Kreuzungspunkt zwischen den Trajektorien bestimmt wird. Ausgehend von diesem wird das Körperausmaß sowie der gewünschte Sicherheitsabstand d_s^{ij} entlang der Trajektorie von V_i zurückprojiziert.

Unabhängig von der Herkunft des Wartepunkts befindet er sich auf der Trajektorie von V_i . Anhand der zeitunabhängigen Bahnkurve $\vec{x}_i(s)$ wird die Bogenlänge s_{stop} ermittelt, für die gilt:

$$\vec{x}_i(s_{\text{stop}}) = \vec{x}_{\text{stop}}$$

5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten

Daraus ergibt sich, ausgehend von der aktuellen Position s auf $\vec{x}_i(s)$, die für das Bremsmanöver verbleibende Distanz d_{stop} zu:

$$d_{\text{stop}}(s) = s_{\text{stop}} - s$$

Einen weiteren maßgeblichen Parameter stellt $\hat{t}_{\text{passed}}^j$ dar. Hiermit wird der frühestmögliche Zeitpunkt bezeichnet, zu dem V_i den Wartepunkt passieren kann, ohne dabei d_s^{ij} zu unterschreiten. Zur Bestimmung von $\hat{t}_{\text{passed}}^j$ ist ein Punkt \vec{x}_{passed} erforderlich. Ist dieser nicht durch das Umfeld vorgegeben, kann er analog zu \vec{x}_{stop} anhand einer Abstandsberechnung zum Kreuzungspunkt bestimmt werden. Dieser Fall ist in Abb. 5.2 dargestellt. Mithilfe der Beziehung

$$\hat{T}_j(\hat{t}_{\text{passed}}^j) = \vec{x}_{\text{passed}}$$

wird $\hat{t}_{\text{passed}}^j$ durch numerische Invertierung der geschätzten Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ berechnet.

Vereinfachend wird, wie bereits von Berkahn u. a. (2018) beschrieben, von einem Abbremsen mit konstanter Bremsbeschleunigung ausgegangen. Dadurch können zwei Fälle entstehen:

1. Die erwartete Zeitspanne bis zum Vorbeifahren von V_j ist klein genug, dass V_i lediglich abbremsen muss. Für diesen Fall wird die benötigte Bremsbeschleunigung bestimmt, sodass der gewünschte Abstand eingehalten werden kann.
2. Die erwartete Zeitspanne ist so groß, dass V_i bis zum vollständigen Stillstand abbremsen und ggf. auf die Passage von V_j warten muss. Für diesen Fall wird die benötigte Bremsbeschleunigung für ein vollständiges Anhalten am Punkt \vec{x}_{stop} bestimmt.

Die Fallunterscheidung wird getroffen, indem zunächst die notwendige konstante Bremsbeschleunigung a_{stop} , um von der aktuellen Geschwindigkeit v_i exakt bei x_{stop} zum Stillstand zu kommen, berechnet wird¹:

$$a_{\text{stop}} = -\frac{v_i}{2d_{\text{stop}}}$$

Daraus lässt sich die Zeitspanne t_{stop} bis zum vollständigen Stillstand beim Abbremsen mit a_{stop} ermitteln:

$$t_{\text{stop}} = -\frac{v_i}{a_{\text{stop}}}$$

¹Die Berechnung der notwendigen Bremsbeschleunigung ist zwar zeitabhängig, jedoch wird der Lesbarkeit halber im Folgenden auf eine entsprechende Notation verzichtet.

Dies ist die längstmögliche Zeitspanne, die sich V_i unter der Annahme konstanter Bremsbeschleunigung zwischen der aktuellen Position und \vec{x}_{stop} in Bewegung befinden kann. Zwischen den genannten Fällen kann nun unterschieden werden, indem die verbleibende Zeitspanne bis zum Erreichen von $\hat{t}_{\text{passed}}^j$ wie folgt mit der benötigten Zeit bis zum vollständigen Stillstand verglichen wird:

$$1. t_{\text{stop}} > \hat{t}_{\text{passed}}^j - t:$$

Ein Abbremsen bis zum vollständigen Stillstand ist zur Einhaltung des Sicherheitsabstands nicht erforderlich. Stattdessen wird bestimmt, wie stark V_i abbremsen muss, um exakt zum Zeitpunkt $\hat{t}_{\text{passed}}^j$ am Wartepunkt anzukommen:

$$a_{\text{smooth}}^{i,j} = \left(\frac{d_{\text{stop}}}{\hat{t}_{\text{passed}}^j} - v_i \right) \frac{2}{\hat{t}_{\text{passed}}^j}$$

Die Geschwindigkeit von V_i beim Erreichen des Wartepunkts ist in diesem Fall größer Null.

$$2. t_{\text{stop}} \leq \hat{t}_{\text{passed}}^j - t:$$

Die erwartete Zeitspanne bis zum Vorbeifahren von V_j ist so groß, dass die Einhaltung des Sicherheitsabstands nur durch vollständiges Anhalten gewährleistet ist. a_{stop} wird als erforderliche Bremsbeschleunigung gesetzt.

Die ermittelte Bremsbeschleunigung, also entweder $a_{\text{smooth}}^{i,j}$ oder a_{stop} , wird aufgebracht, indem sie auf den tangentialen Teil des Antriebsterms (siehe Abschnitt 4.1.3) projiziert wird.

5.2.2. Kraftbasierte Strategien

In manchen Situationen ist die eindeutige Bestimmung eines sicheren Fixpunkts und die zugehörige Umplanung der Wunschtrajektorie nicht zweifelsfrei möglich. In diesen Fällen ist ein Reaktionsmechanismus, der über einen längeren Zeitraum appliziert wird, sinnvoll. Dies wird im Modell dargestellt, indem die ursprüngliche SKM-Gleichung 3.1 um eine Reaktionskraft \vec{f}_{LR}^{ij} (engl.: *long range reaction force*) erweitert wird:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i(t)}{dt^2} = \vec{f}_i(t) + \sum_{j,j \neq i} \vec{f}_{ij}(t) + \sum_b \vec{f}_{ib}(t) + \sum_{j,j \neq i} w_j \cdot \vec{f}_{\text{LR}}^{ij}(t)$$

Die Reaktionskraft kann, je nach Richtung und Größe, zu einer Änderung der Trajekto-

Darstellung in Abb. 5.3a). Die *Safe Zone Force* wird durch die Addition von zwei Komponenten berechnet:

$$\vec{f}_{SZ}(t) = \vec{f}_{SZ}^e(t) + \frac{d_{SZ}^{\max} - d_{SZ}(t)}{d_{SZ}^{\max} - d_{SZ}^{\min}} \cdot \vec{f}_{SZ}^b(t).$$

Dabei bezeichnet \vec{f}_{SZ}^e den Ausweichanteil, der in Normalenrichtung zur Bewegungsrichtung des Fußgängers wirkt. Der Bremsanteil $\vec{f}_{SZ}^b(t)$ wirkt entlang der Bewegungsrichtung und wird antiproportional zum Abstand $d_{SZ}(t)$ zum Rand der sicheren Zone gewichtet. Sie ist innerhalb eines Bereichs, der durch die Abstände d_{SZ}^{\min} und d_{SZ}^{\max} zum Rand begrenzt wird, aktiv. Am Rand d_{SZ}^{\min} soll durch \vec{f}_{SZ} eine Bewegung rechtwinklig zum Rand vollständig unterbunden werden.

Die Formulierung von \vec{f}_{SZ} erfolgt in Hinblick auf die Verwendung in einer zeitdiskreten Simulation. Daher ist es möglich, eine Anhaltekräft $\vec{f}_{\text{stop}}(t)$ zu definieren, die die Bewegung eines Verkehrsteilnehmers innerhalb eines Simulationszeitschritts vollständig ausgleicht und diesen somit zum Stillstand zwingt. Die genaue Formulierung der Anhaltekräft ist von der jeweilig verwendeten numerischen Integration abhängig und wird daher an dieser Stelle nicht näher erläutert. Da die *Safe Zone Force* eine Bewegung in Richtung des Randes begrenzen soll, wird nur der Anteil der Anhaltekräft senkrecht zum Rand berücksichtigt. Dieser wird als $\vec{f}_{\text{stop}}^\perp$ bezeichnet und lässt sich durch Projektion auf den Normalenvektor \vec{n}_{SZ} berechnen (siehe Abb. 5.3b):

$$\vec{f}_{\text{stop}}^\perp(t) = \left(\vec{f}_{\text{stop}}(t) \cdot \vec{n}_{SZ}(t) \right) \cdot \vec{n}_{SZ}(t)$$

Die Ausweich- und Bremsanteile von \vec{f}_{SZ} werden, wie in Abb. 5.3c schematisch dargestellt, durch Projektion von $\vec{f}_{\text{stop}}^\perp$ auf den Normalenvektor \vec{n}_{T_i} bzw. den Tangentenvektor \vec{t}_{T_i} der Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ bestimmt:

$$\begin{aligned} \vec{f}_{SZ}^e(t) &= \left(\vec{f}_{\text{stop}}^\perp(t) \cdot \vec{n}_{T_i}(t) \right) \cdot \vec{n}_{T_i}(t) \\ \vec{f}_{SZ}^b(t) &= \left(\vec{f}_{\text{stop}}^\perp(t) \cdot \vec{t}_{T_i}(t) \right) \cdot \vec{t}_{T_i}(t) \end{aligned}$$

Eine aktive *Safe Zone Force* führt zu einer Bewegung, die sich einer Parallelen zum Rand der sicheren Zone annähert, bis kurz bevor der Kreuzungspunkt mit dem Rand erreicht ist. Wenn die durch die vorangegangene Ausweichbewegung angepasste Trajektorie den Rand nahezu senkrecht schneidet, bleibt der Fußgänger im Abstand d_{SZ}^{\min} zum Rand stehen, da der Anteil der Anhaltekräft senkrecht zum Rand in diesem Fall der vollständigen Anhaltekräft entspricht.

Reaktionskraft für defensive Reaktion

Entscheidet sich ein Fußgänger für eine defensive Reaktion, während er sich bereits in der Begegnungszone befindet, ist häufig ein ähnliches Verhalten wie im vorigen Abschnitt zu beobachten. Anstelle des Übergangs zwischen zwei Bereichen nähert sich die Bewegung in diesem Fall einer Bewegung parallel zur antizipierten Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ des Konfliktgegners. Eine entsprechende Ausweichbewegung ist in Abb. 5.4a dargestellt.

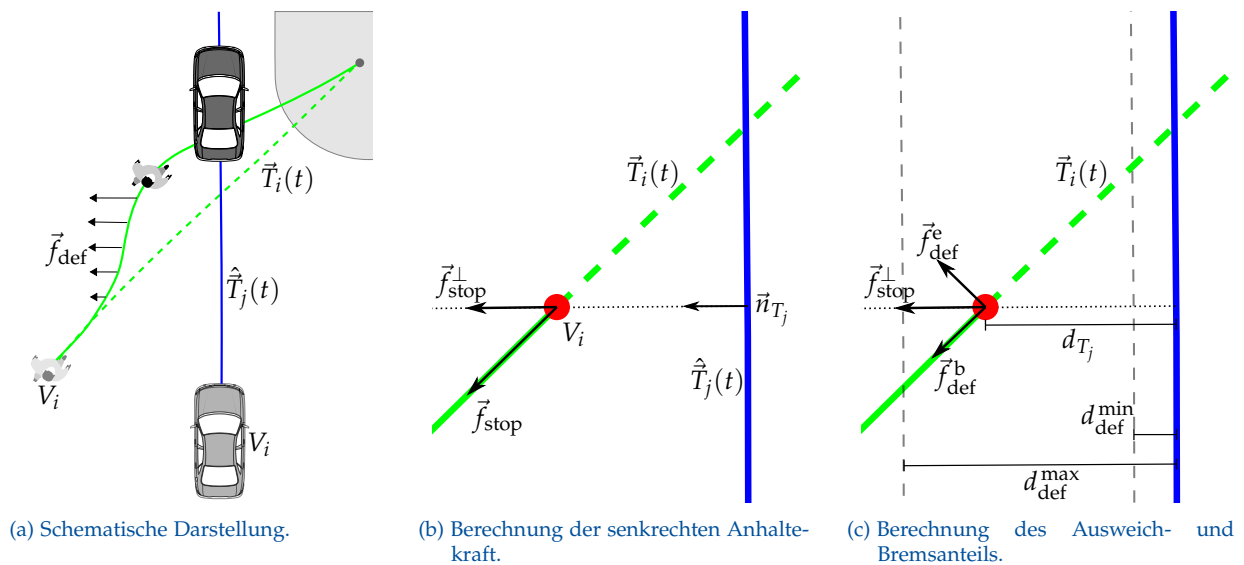


Abbildung 5.4.: Berechnung der defensiven Reaktionskraft.

Analog zur Berechnung der **Safe Zone Force** erfolgt die Berechnung der defensiven Reaktionskraft \vec{f}_{def} durch Aufteilung auf einen Ausweich- und einen Bremsanteil:

$$\vec{f}_{\text{def}}(t) = \vec{f}_{\text{def}}^e(t) + \frac{d_{\text{def}}^{\text{max}} - d_{T_j}(t)}{d_{\text{def}}^{\text{max}} - d_{\text{def}}^{\text{min}}} \cdot \vec{f}_{\text{def}}^b(t).$$

Dabei beschreibt $d_{\text{def}}^{\text{max}}$ den Abstand zu $\hat{T}_j(t)$, ab dem \vec{f}_{def} aktiv wird. Der minimal einzuhaltende Abstand $d_{\text{def}}^{\text{min}}$ lässt sich als Summe der halben Körperbreite von V_j und dem Sicherheitsabstand d_s^{ij} berechnen. Für die lineare Gewichtung zwischen diesen Grenzabständen wird der zeitabhängige Abstand $d_{T_j}(t)$ zur antizipierten Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ verwendet.

Der wesentliche Unterschied zur **Safe Zone Force** besteht darin, dass sich die Ausweichbewegung an der gegnerischen Trajektorie anstelle der Umgebungsgeometrie orientiert. Dementsprechend wird für die Berechnung des senkrechten Anteils der Anhaltkraft

die Normalenrichtung $\vec{n}_{T_j}(t)$, die im rechten Winkel vom nächstgelegenen Punkt auf $\hat{T}_j(t)$ in Richtung V_i zeigt, verwendet (siehe Abb. 5.4b):

$$\vec{f}_{\text{stop}}^{\perp}(t) = \left(\vec{f}_{\text{stop}}(t) \cdot \vec{n}_{T_j}(t) \right) \cdot \vec{n}_{T_j}(t).$$

Diese wird, wie in Abb. 5.4c dargestellt, analog zur **Safe Zone Force** durch Projektion in Ausweich- und Bremskomponente aufgeteilt:

$$\begin{aligned} \vec{f}_{\text{def}}^e(t) &= \left(\vec{f}_{\text{stop}}^{\perp}(t) \cdot \vec{n}_{T_i}(t) \right) \cdot \vec{n}_{T_i}(t) \\ \vec{f}_{\text{def}}^b(t) &= \left(\vec{f}_{\text{stop}}^{\perp}(t) \cdot \vec{t}_{T_i}(t) \right) \cdot \vec{t}_{T_i}(t) \end{aligned}$$

Reaktionskraft für offensive Reaktion

Trifft ein Fußgänger die Entscheidung, eine Konfliktsituation mit einer höheren Verkehrsart durch eine offensive Reaktion zu lösen, so geschieht dies im Falle sich kreuzender Trajektorien häufig durch eine bewusste Bewegung in Richtung der antizipierten Trajektorie (siehe schematische Darstellung in Abb. 5.5a). Dies hat eine zeitlich sowie räumliche Verschiebung des Kreuzungspunkts zur Folge. Eine entsprechende Reaktionskraft muss daher eine Bewegung rechtwinklig zu $\hat{T}_j(t)$ verursachen und die Bewegungsgeschwindigkeit mindestens beibehalten, um die Vergrößerung des minimalen Abstands nicht durch Verlangsamung der Bewegung aufzuheben.

Die rechtwinklige Bewegung lässt sich erzielen, indem eine Kraft parallel zu $\hat{T}_j(t)$ durch den entsprechenden Anteil der Anhaltekraft aufgebracht wird:

$$\vec{f}_{\text{stop}}^{\parallel}(t) = \left(\vec{f}_{\text{stop}}(t) \cdot \vec{t}_{T_j}(t) \right) \cdot \vec{t}_{T_j}(t).$$

Dabei bezeichnet $\vec{t}_{T_j}(t)$ die Richtung der Tangente am nächstgelegenen Punkt auf $\hat{T}_j(t)$ (siehe Abb. 5.5b). Während die defensiven Reaktionen aus den vorherigen Abschnitten dazu dienen, den Sicherheitsabstand durch „Vorrang gewähren“ einzuhalten, was durch Ausweichbewegungen und teilweise einer Reduktion der eigenen Geschwindigkeit erreicht wird, wird bei der offensiven Reaktion die Möglichkeit einer vorübergehenden Verringerung des Abstands zum Konfliktgegner bewusst in Kauf genommen. Da die Reaktion somit von Beginn an in voller Stärke erfolgen muss, erfolgt die Formulierung der Kraft unabhängig vom Abstand zur Trajektorie $\hat{T}_j(t)$. Um die Geschwindigkeit nicht zu verringern, wird zudem, wie in Abb. 5.5c dargestellt, lediglich der Ausweichanteil

der parallelen Anhaltkraft verwendet:

$$\vec{f}_{\text{off}}(t) = \left(\vec{f}_{\text{stop}}^{\parallel}(t) \cdot \vec{n}_{T_i}(t) \right) \cdot \vec{n}_{T_i}(t).$$

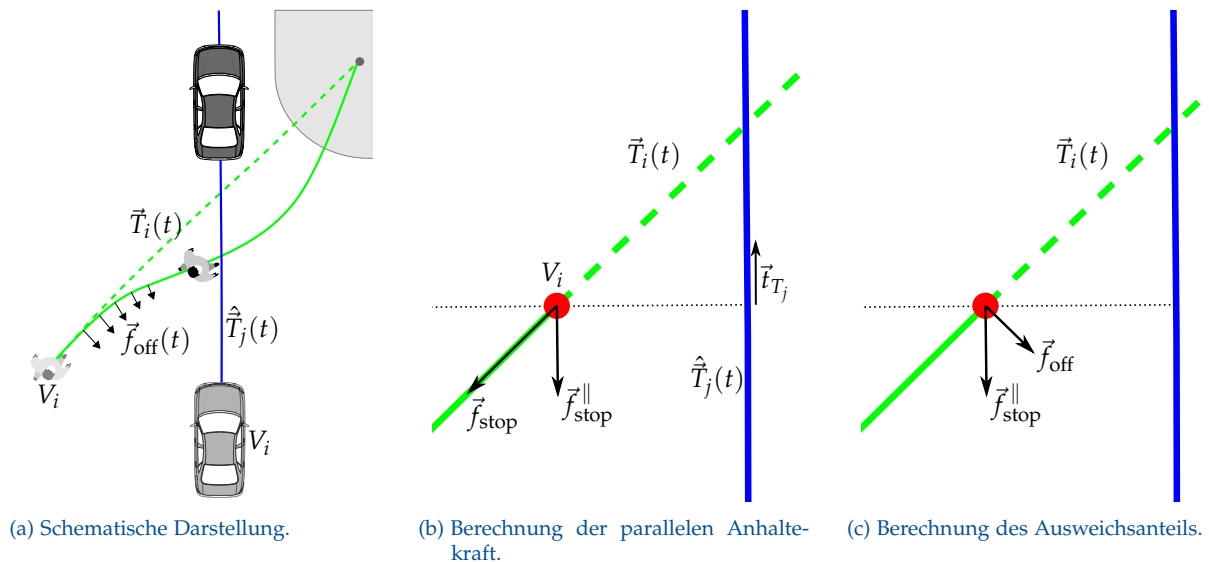


Abbildung 5.5.: Berechnung der offensiven Reaktionskraft.

Trajektorienbasierte Ausweichkraft

Die trajektorienbasierte Ausweichkraft modelliert ein Reaktionsverhalten zwischen gleichberechtigten Verkehrsteilnehmern, bei denen mindestens einer der Teilnehmer die Konfliktsituation durch Ausweichen lösen möchte. Hierzu wird jeweils die eigene und die antizipierte gegnerische Trajektorie betrachtet und eine Kraft so formuliert, dass diese von dem Bereich der beiden Trajektorien abhängt, in dem der Abstand am kleinsten ist. Häufig zu beobachten ist eine derartige Reaktion beispielsweise bei sich zeitversetzt kreuzenden Trajektorien, wobei oftmals der später am Kreuzungspunkt ankommende Verkehrsteilnehmer entgegen der Bewegungsrichtung des anderen ausweicht. In dieser Arbeit wird die von Schiermeyer u. a. (2016) vorgestellte Formulierung dieser Reaktionskraft erweitert.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben kennt jeder Verkehrsteilnehmer V_i seine eigene geplante Trajektorie sowie seine persönliche Abschätzung aller Trajektorien der Verkehrsteilnehmer V_j in seinem Wahrnehmungsbereich. Daraus resultiert je eine geschätzte Distanzfunktion für jeden wahrgenommenen Verkehrsteilnehmer V_j , deren Eigenschaften in Abschnitt 4.2.3 diskutiert wurden.

Für die Berechnung der Reaktionskraft sind weitere Größen erforderlich. Daher werden die beiden Abstände d_0 und d_1 eingeführt. Sie stellen die Begrenzungen des Bereichs

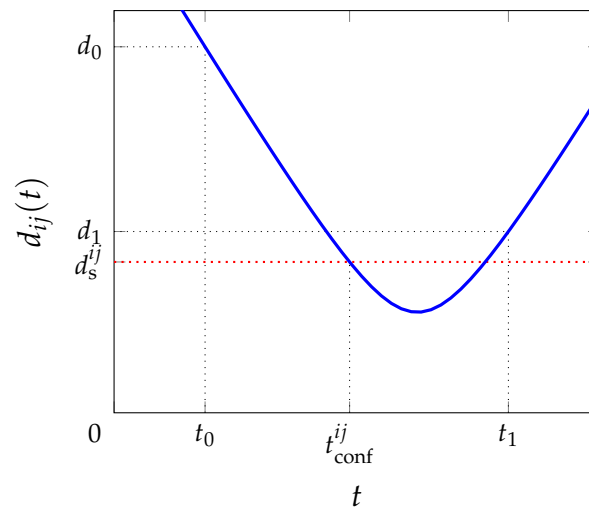


Abbildung 5.6.: Typische Distanzfunktion $d(t)$ mit den relevanten Größen für die trajektorienbasierte Ausweichkraft

zwischen den beiden Trajektorien dar, der für die Berechnung berücksichtigt wird. Abb. 5.6 erweitert die Darstellung der Distanzfunktion aus Abb. 4.9 um die beiden Abstände. Es wird ersichtlich, dass sich mithilfe der Distanzfunktion die zugehörigen Zeitpunkte t_0 und t_1 bestimmen lassen, die im Folgenden für die Auswertung der Trajektorien benötigt werden. Die folgende Formulierung der Kraft erfordert, dass $d_0 \geq d_1$ ist. Weiterhin muss d_0 mindestens dem Sicherheitsabstand d_s^{ij} entsprechen. Eine stärkere Reaktion lässt sich durch höhere Werte für beide Größen erzielen, was jedoch eine Kalibrierung erfordert.

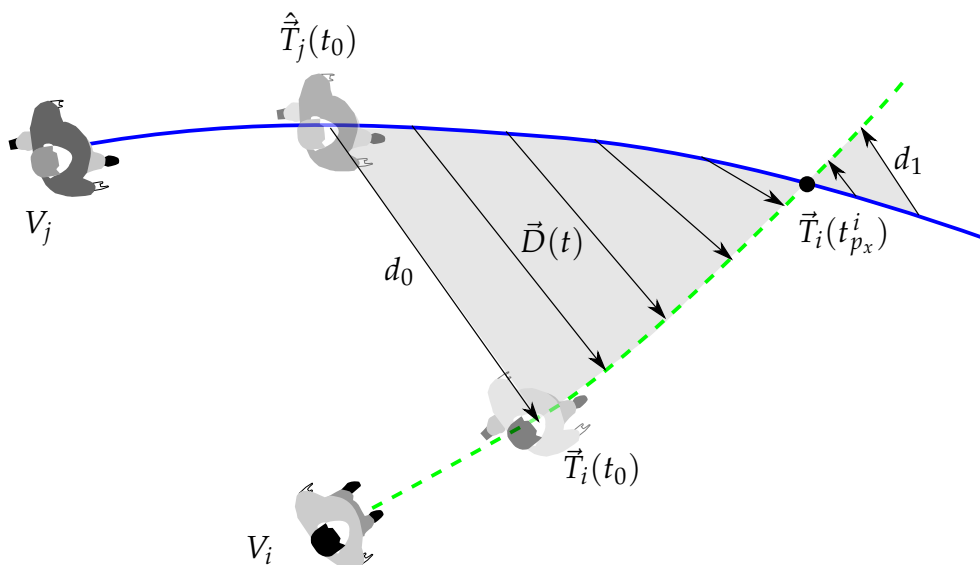


Abbildung 5.7.: Bei der Berechnung der Reaktionskraft \vec{f}_{traj} verwendete Größen

5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten

Die Reaktionskraft \vec{f}_{traj} wird durch Integration des gerichteten, zeitabhängigen Abstands $\vec{D}(t)$ über den Zeitraum von t_0 bis t_1 berechnet:

$$\vec{f}_{\text{traj}}(t) = \text{dir}_e \cdot \int_{t_0}^{t_1} w(\tau) \cdot \vec{D}(\tau) d\tau \quad (5.2)$$

Dabei wird die Richtung der Reaktionskraft durch die Ausweichrichtung (*evasion direction*) dir_e festgelegt. Für eine Konfliktsituation mit einem Kreuzungspunkt der Trajektorien, wie sie im Beispiel in Abb. 5.7 dargestellt ist, ist die Ausweichrichtung davon abhängig, welcher der beiden Verkehrsteilnehmer den Kreuzungspunkt zuerst erreicht. Der Spätere weicht entgegen der Bewegungsrichtung des Ersten aus, um den erforderlichen Umweg möglichst gering zu halten. Daher wird die Ausweichrichtung in Abhängigkeit der erwarteten bzw. geschätzten eigenen und gegnerischen Ankunftszeiten am Kreuzungspunkt $t_{p_x}^i$ und $\hat{t}_{p_x}^j$ bestimmt:

$$\text{dir}_e = \text{sign}(\hat{t}_{p_x}^j - t_{p_x}^i) \quad (5.3)$$

Die Modellierung über eine situationsabhängig zu definierende Ausweichrichtung erlaubt die Anwendung des Reaktionsmechanismus für verschiedene Situationen. Die Formulierung in Gl. 5.3 ist nur für laterale Konfliktsituationen sinnvoll anwendbar. Sollen hingegen Konflikte mit näherungsweise parallel verlaufenden Trajektorien (frontale oder rückseitige Konflikte) mithilfe der Reaktionskraft gelöst werden, muss die Ausweichrichtung immer von der gegnerische Trajektorie in Richtung der eigenen weisen. Dies entspricht gemäß der in Gl. 5.2 verwendeten Definition für $\vec{D}(t)$ der Ausweichrichtung $\text{dir}_e = 1$.

Bei der Formulierung einer Reaktionskraft auf Grundlage der prädizierten Trajektorie entsteht ein Widerspruch: Einerseits erscheint es sinnvoll, den Abschnitten der Trajektorie in der Nähe des Kreuzungspunkts ein höheres Gewicht zuzuweisen, da in diesem Bereich die geringsten Abstände zu erwarten sind. Andererseits wird die Prädiktion immer ungewisser, je weiter der betrachtete Zeitpunkt in der Zukunft liegt.

Um hier einen Ausgleich dieser beiden Einflüsse zu ermöglichen, wird bei der Berechnung der Reaktionskraft eine Wichtungsfunktion $w(t)$ berücksichtigt. Diese wird in Gl. 5.2 mit dem gerichteten Abstand $\vec{D}(t)$ multipliziert und skaliert dessen Einfluss in Abhängigkeit des antizipierten Abstands $d_{ij}(t)$:

$$w(t) = k_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{ij}(t)}{d_0} \right)^{k_2} \right)$$

Neben der Abhängigkeit von der Distanzfunktion geht ein Skalierungsparameter k_1 in die Wichtungsfunktion ein. Dieser beziffert den Maximalwert der Funktion. Der

Kurvenverlauf zwischen Minimum und Maximum kann durch den Formparameter k_2 justiert werden. Ihr jeweiliger Einfluss auf den Kurvenverlauf ist in Abb. 5.8 dargestellt. Die Parameter müssen durch eine Kalibrierung für jede Konfliktart bestimmt werden. In Schiermeyer u. a. (2016) wurden die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Realdaten verwendet, um eine Kalibrierung der Parameter d_0 , k_1 und k_2 für Konflikte zwischen Fußgängern mithilfe eines genetischen Algorithmus zu kalibrieren.

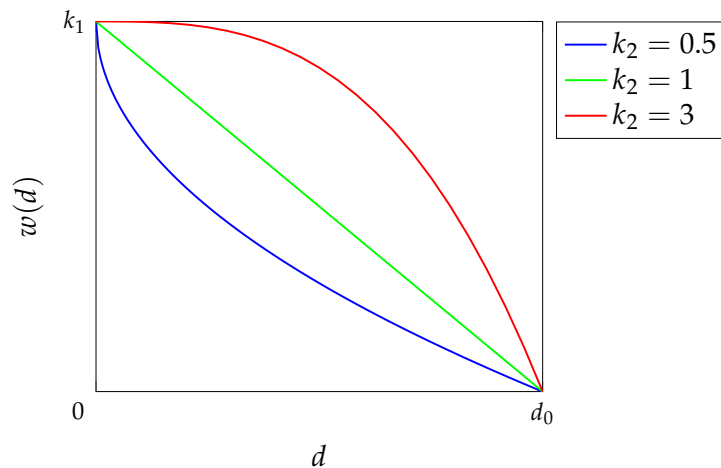


Abbildung 5.8.: Wichtungsfunktion $w(d)$ für verschiedene Formparameter k_2

5.3. Mehrfachkonflikte

In den vorhergehenden Abschnitten wurden verschiedene Konfliktlösungsstrategien erläutert und beispielhaft für Situationen, in denen genau zwei Verkehrsteilnehmer beteiligt sind, demonstriert. Im tatsächlichen Verkehrsgeschehen treten jedoch häufig Situationen auf, in denen mehr als zwei Verkehrsteilnehmer in einen Konflikt entweder direkt oder indirekt involviert sind. Diese Situationen werden im Folgenden als *Mehrfachkonflikte* bezeichnet. Eine derartige Situation liegt vor, wenn mehr als ein weiterer Verkehrsteilnehmer die Entscheidung für eine Konfliktlösungsstrategie beeinflusst. Die Entstehung derartiger Situationen kann verschiedene Ursachen haben:

- (a) Im Wahrnehmungsbereich eines Verkehrsteilnehmers V_i befinden sich mehrere andere Verkehrsteilnehmer V_j . Durch die Konfliktdetektion gemäß Abschnitt 4.2.3 werden Konflikte mit allen V_j und somit mehrere Konfliktpunkte erkannt.
- (b) Es besteht ein Konflikt mit genau einem oder gemäß (a) mit mehreren V_j . Zusätzlich befinden sich weitere V_j im Wahrnehmungsbereich, mit denen bei isolierter Betrachtung kein Konflikt besteht.

Hieraus lassen sich die Anforderungen an die weitere Modellierung und eine formelle Definition der betrachteten Situationen ableiten.

5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten

Eine geeignete Lösungsstrategie für einen Mehrfachkonflikt muss so gewählt werden, dass alle unmittelbaren Konflikte gelöst werden. Für Fall (b) muss bei der Wahl einer Konfliktlösungsstrategie zusätzlich berücksichtigt werden, dass diese keine zusätzlichen Konflikte mit weiteren, in der Umgebung befindlichen Verkehrsteilnehmern hervorruft.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben geht aus Beobachtungen hervor, dass sich die grundlegenden Strategien für die Lösung von Mehrfachkonflikten nicht von denen für Einzelkonflikte unterscheiden. Allerdings nehmen die Parameter, die die Auswahl einer spezifischen Strategie beeinflussen, andere Werte an. Weiterhin ist häufig ein defensiveres Verhalten zu beobachten, je mehr Verkehrsteilnehmer in eine Situation involviert sind.

Aus diesem Grund wird das in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte Konzept für die Konflikterkennung auf Basis einer Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ um *interagierende Verkehrsteilnehmer* erweitert. Wie in Abb. 5.9 dargestellt, werden dafür in Analogie zum Sicherheitsabstand d_s^{ij} und dem zeitlichen Horizont t_{hor}^c zwei weitere Größen d_{int} und t_{hor}^{int} eingeführt. Wenn die erwartete Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ innerhalb des zeitlichen Interaktionshorizonts t_{hor}^{int} den Interaktionsabstand d_{int} unterschreitet, wird der wahrgenommene Verkehrsteilnehmer als interagierender Verkehrsteilnehmer bezeichnet.

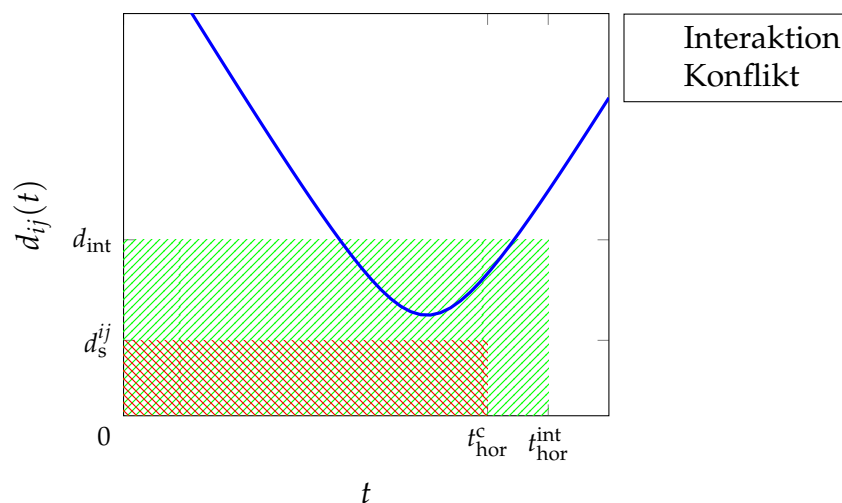


Abbildung 5.9.: Verwendung der Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ zur Beschreibung einer Interaktion. Verläuft $d_{ij}(t)$ durch den grün schraffierten Bereich, wird die Situation als Interaktion bezeichnet. Bei einem Verlauf durch den rot schraffierten Bereich handelt es sich zusätzlich um eine Konfliktsituation. Das Beispiel zeigt eine Interaktion ohne Konflikt.

Da Verkehrsteilnehmer, die sich im Konflikt befinden, automatisch auch interagierende Verkehrsteilnehmer sind, ergibt sich, dass $t_{hor}^c \leq t_{hor}^{int}$ und $d_s^{ij} \leq d_{int}$ sein müssen.

Durch die Einführung der interagierenden Verkehrsteilnehmer lässt sich die Definition eines Mehrfachkonflikts aufstellen:

Definition 2

Eine Situation wird als Mehrfachkonflikt bezeichnet, wenn $n_{\text{conf}} > 0$, $n_{\text{int}} > 1$ und $n_{\text{conf}} \leq n_{\text{max}}$ ist.

Dabei bezeichnet n_{conf} die Anzahl gleichzeitig erkannter Konflikte und n_{int} die Anzahl gleichzeitig interagierender anderer Verkehrsteilnehmer. Aus den Bedingungen für die zeitlichen Horizonte und die jeweiligen Abstände ergibt sich, dass $n_{\text{int}} \geq n_{\text{conf}}$ ist.

Im Rahmen der Konfliktklassifizierung in Abschnitt 4.2.4 wurde eine individuelle Grenze n_{max} eingeführt. Übersteigt die Anzahl an gleichzeitigen Konflikten diese Grenze, erscheint die Situation dem Verkehrsteilnehmer zu unübersichtlich für eine vorausschauende Reaktion. Die im folgenden diskutierte Strategiewahl für vorausschauendes Verhalten bei Mehrfachkonflikten bezieht sich somit ausschließlich auf Situationen, die obige Definition erfüllen.

Um die oben geschilderten Anforderungen an die Strategiewahl zu erfüllen, wird in diesem Abschnitt ein Ansatz erarbeitet, der die Einzelentscheidungen für alle interagierenden Verkehrsteilnehmer zu einer Gesamtentscheidung aggregiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass für jeden interagierenden Verkehrsteilnehmer V_j für alle Strategien S_k situationsbezogene Auswahlwahrscheinlichkeiten $P_j(S_k)$ bekannt sind.

Diese Voraussetzung wird von dem in Abschnitt 5.1 vorgestellten Entscheidungsmodell nach Pascucci u. a. (2018) erfüllt. Das auf einer logistischen Regression basierende Modell ermittelt für eine gegebene Situation Einzelwahrscheinlichkeiten für alle Strategien, die in dem jeweiligen Konflikttyp üblich sind. Bei der Kalibrierung dieses Modells hat sich herausgestellt, dass bereits die Anwesenheit anderer, nicht in den Konflikt involvierter Verkehrsteilnehmer die Entscheidung beeinflusst. Diese Beobachtung entspricht dem hier verwendeten Konzept der interagierenden Verkehrsteilnehmer. Daher wird angenommen, dass die Ergebnisse des Entscheidungsmodells auch für Mehrfachkonflikte angewendet werden dürfen, obwohl das Modell nur für Situationen mit $n_{\text{conf}} = 1$ kalibriert wurde.

Unabhängig vom verwendeten Entscheidungsmodell muss eine Gesamtwahrscheinlichkeit aus den Auswahlwahrscheinlichkeiten $P_j(S_k)$ für die Einzelkonflikte berechnet werden. Eine solche Aggregation von unabhängigen Einzelwahrscheinlichkeiten ist eine Problemstellung, die im Rahmen der Kombination verschiedener Prognosen, beispielsweise aus Vorhersagemodellen oder Expertenmeinungen, häufig anzutreffen ist. Für Vorhersagemodelle, die unter anderem in den Geowissenschaften weit verbreitet sind, wurde von Allard u. a. (2012) ein umfangreicher Überblick über geläufige Aggregationsmethoden aufgestellt. Die Aggregation von Expertenmeinungen ist in der Literatur unter dem Begriff des *Opinion Pooling* (Dietrich und List 2017) zu finden.

5. Modellierung von vorausschauendem Verhalten

In beiden Disziplinen stellt das *Linear Pooling* eine intuitive Herangehensweise dar, bei dem die Gesamtwahrscheinlichkeit $P_G(S_k)$ für die Wahl einer Strategie S_k als konvexe Kombination der Einzelwahrscheinlichkeiten für diese Strategie über alle interagierenden Verkehrsteilnehmer berechnet wird:

$$P_G(S_k) = \sum_{j=1}^{n_{\text{int}}} w_j P_j(S_k), \quad w_j \in [0, 1], \quad \sum_{j=1}^{n_{\text{int}}} w_j = 1$$

Dabei stellt w_j einen Wichtungsfaktor dar, mit dem die Entscheidung bezüglich des interagierenden Verkehrsteilnehmers V_j gewichtet wird. Bei der Aggregation der Einzelentscheidungen erscheint es sinnvoll, diese nach der jeweiligen „Konfliktschwere“ der Einzelkonflikte zu gewichten. Da die Bestimmung eines entsprechenden Maßes kein Bestandteil dieser Arbeit ist, erfolgt die Wichtung der Einzelwahrscheinlichkeiten antiproportional zum erwarteten minimalen Abstand d_{\min}^j zum interagierenden Verkehrsteilnehmer V_j , sodass der Wichtungsfaktor w_j zu

$$w_j = \frac{1}{d_{\min}^j \cdot \sum_{j=1}^{n_{\text{int}}} \frac{1}{d_{\min}^j}}$$

berechnet wird. Da, bedingt durch die Definition des interagierenden Verkehrsteilnehmers, d_{\min}^j im Konfliktfall immer kleiner als im reinen Interaktionsfall ist, ist sichergestellt, dass Konfliktsituationen höher gewichtet werden als Interaktionen.

Analog zur Verwendung des statistischen Entscheidungsmodells bei Einzelkonflikten ist der Umgang mit der Gesamtwahrscheinlichkeit bei Mehrfachkonflikten ebenfalls abhängig von der verwendeten Simulationsumgebung. Schiermeyer u. a. (2017b) verwenden einen Ansatz für deterministische Simulationen, bei denen durch eine Schwellwertbetrachtung grundsätzlich der defensiven Reaktion der Vorzug gegeben wird. Erst wenn die Wahrscheinlichkeit der Entscheidung für eine andere Strategie einen Schwellwert übersteigt, darf diese gewählt werden.

6. Simulationen zur Modellvalidierung

Das in den vorangegangenen Kapiteln entwickelte Modell wurde in der Simulationsumgebung **Multi-Modal Intersection Simulation (MODIS)** implementiert. Diese Implementierung ermöglicht es, beliebige Verkehrssituationen zu simulieren und hinsichtlich verschiedener Kriterien auszuwerten. Dabei können sowohl künstliche Situationen betrachtet als auch reale Situationen in der Simulation nachgestellt werden, indem beobachtete Startpositionen und -zeitpunkte sowie Zielpositionen (die sog. *OD-Relation*) jedes Verkehrsteilnehmers als Eingangsdaten für die Simulation vorgegeben werden. Die Aufgabe des Modells ist in beiden Fällen, zwischen Start und Ziel ein plausibles Verhalten der Verkehrsteilnehmer abzubilden.

In diesem Kapitel werden verschiedene Simulationsergebnisse, die auf diese Weise berechnet wurden, vorgestellt und diskutiert. Die erzielten Simulationsergebnisse ermöglichen eine qualitative Überprüfung der Plausibilität des Modells. Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die in Abschnitt 5.2 erarbeiteten Reaktionsmechanismen isoliert an ausgewählten Situationen demonstriert. Die Situationen stammen aus den Realdaten und werden durch Vergleich mit diesen qualitativ und hinsichtlich einzelner Parameter auch quantitativ verglichen.

Anschließend zeigt Abschnitt 6.2 das Zusammenspiel der Reaktionsmechanismen über einen längeren Simulationszeitraum. Hier wurden, um möglichst realitätsnahe Randbedingungen zu schaffen, OD-Relationen aus den Realdaten eines 60-minütigen Beobachtungszeitraums extrahiert und als Eingangsdaten verwendet. Bei dieser Untersuchung steht weniger die korrekte Wiedergabe einzelner Reaktionsmechanismen als vielmehr der Vergleich von Kenngrößen, die sich auf den gesamten Simulationszeitraum beziehen, im Vordergrund.

6.1. Validierung der Reaktionsmechanismen

In diesem Abschnitt werden die in Kap. 5 entwickelten Reaktionsmechanismen anhand von Simulationsergebnissen demonstriert und qualitativ validiert. Dazu werden zu jedem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Reaktionsmechanismus jeweils eine Situation, in der in den Realdaten (siehe Abschnitt 2.2) das entsprechende Verhalten zu beobachten war, in der Simulationsumgebung **MODIS** nachsimuliert.

In jedem der folgenden Abschnitte werden die Situation und die beobachtete Reaktion zunächst qualitativ beschrieben und die für die Reaktion verwendeten Modellparameter aufgelistet. Anschließend werden entscheidende Zeitpunkte während der Simulation gezeigt und erläutert. Die Simulationsergebnisse werden qualitativ validiert, indem sie hinsichtlich für den jeweiligen Reaktionsmechanismus relevanter Kriterien mit den Beobachtungen verglichen werden. Für Ausweichbewegungen besteht dieser Vergleich vor allem in der Gegenüberstellung der simulierten und beobachteten Trajektorien sowie der relativen Abstände, während bei Geschwindigkeitsänderungen der zeitliche Verlauf dieser untersucht wird.

Dabei sind die Situationen in den Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.6 an der Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße (siehe Abschnitt 2.2.1), die Beispielsituation zu Mehrfachkonflikten in Abschnitt 6.1.7 am Weidenbaumsweg (siehe Abschnitt 2.2.2) aufgezeichnet worden.

6.1.1. Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt

Die Reaktion durch eine einmalige [Neuberechnung einer Trajektorie durch einen Ausweichpunkt](#) wird anhand einer Konfliktsituation zwischen zwei Radfahrern demonstriert. Die Situation stammt aus den Videodaten, die an der [Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig](#), aufgezeichnet wurden und wurde ebenfalls von Rinke u. a. (2017) verwendet, um den einfacheren Ausweichmechanismus einer früheren Version des Modells zu präsentieren.

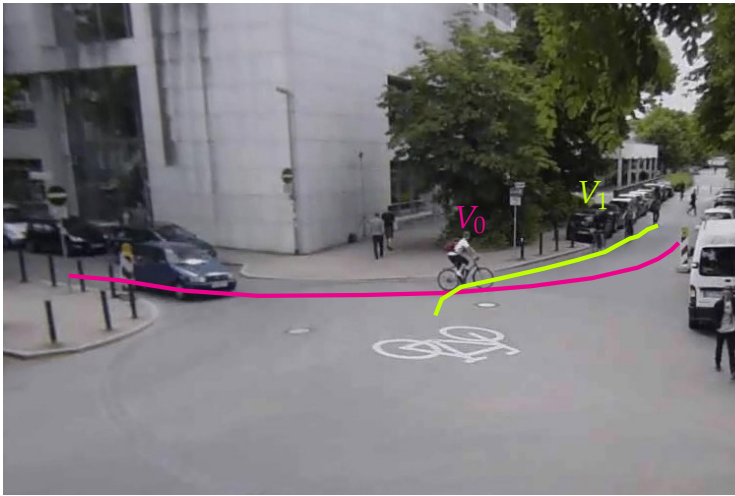
Beschreibung

Beide Radfahrer nähern sich der Kreuzung etwa zeitgleich aus östlicher (V_0) bzw. südlicher Richtung (V_1) mit der jeweiligen Absicht, links abzubiegen. Abb. 6.1a zeigt eine Ansicht dieser Situation aus den Videodaten. Die Ausgangssituation für die Simulation (Simulationszeitpunkt $t = 0$) ist mit den angenommenen ungestörten Wunschtrajektorien in Abb. 6.1b dargestellt.

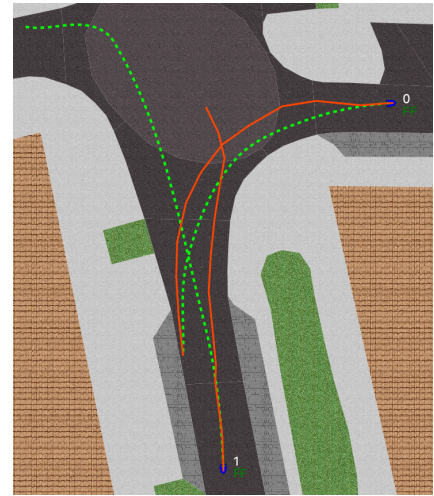
Die Gegenüberstellung der Wunschtrajektorien mit den beobachteten Trajektorien zeigt, dass beide Radfahrer die Konfliktsituation durch ein Ausweichen nach rechts lösen. In Tab. 6.1 sind die für die folgende Simulation verwendeten Reaktionsparameter aufgeführt.

Ergebnisse

Zu Beginn der Simulation können sich die beiden Radfahrer noch nicht wahrnehmen, da die Sicht durch die Vegetation im Südosten der Kreuzung eingeschränkt ist. Eine direkte



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Gegenüberstellung der angenommenen Wunschtrajektorien (grün) und der beobachteten Trajektorien (rot).

Abbildung 6.1.: Überblick über die betrachtete Situation.

Sichtverbindung ist ab dem Zeitpunkt $t = 1,6\text{ s}$ gewährleistet. Nach einem weiteren Simulationszeitschritt, also zum Zeitpunkt $t = 1,7\text{ s}$, ist eine erstmalige Extrapolation der Bewegungen aus Sicht beider Radfahrer möglich. Dieser Zeitpunkt ist in Abb. 6.2a dargestellt.

Die blaue Linie stellt die mittels Lagrange-Kurve (siehe Abschnitt 4.2.2) prädiizierte Trajektorie $\hat{T}_j(t)$ aus der Sicht von V_1 dar. Es ist zu erkennen, dass die Prädiktion der Bewegung, und somit des erwarteten Konfliktpunkts \hat{p}_c^{ij} , nach diesem kürzestmöglichen Beobachtungszeitraum noch sehr ungenau ist (siehe Abb. 6.2a). Auf Grundlage dieser Prädiktion wird die Situation aus Sicht von V_1 als lateraler Konflikt mit einem relativen Körperwinkel ϕ_{ij}^{rel} von 95° klassifiziert. Dementsprechend erfolgt eine Berechnung von zwei möglichen Ausweichpunkten gemäß Gl. 5.1. Diese sind in Abb. 6.2a in hellblauer Farbe dargestellt. Da \bar{x}_e^{ahead} auf dem Gehweg liegt, ist eine Ausweichtrajektorie durch $\bar{x}_e^{\text{behind}}$ die einzige Möglichkeit, den Konflikt zu lösen.

Die resultierende Ausweichbewegung wird wie von Rinke u. a. (2017) beschrieben auf die erwartete Seitwärtsbeschleunigung überprüft. Mit der Wunschgeschwindigkeit von V_1 würde die Trajektorie zu einer maximalen Seitwärtsbeschleunigung von $5,04\text{ m/s}^2$ führen, was die maximale komfortable Seitwärtsbeschleunigung c_{max}^i (siehe Tab. 6.1) überschreitet. Daher geht die Wahl der Ausweichtrajektorie durch $\bar{x}_e^{\text{behind}}$ mit einem leichten Abbremsen von $-0,1\text{ m/s}^2$ einher.

V_0 hat zu diesem Zeitpunkt noch keine Konfliktsituation erkannt. In den folgenden Zeitschritten führt die Ausweichbewegung von V_1 dazu, dass V_0 auch weiterhin keinen Konflikt detektiert und eine vorausschauende Reaktion somit ausbleibt. Die Gegenüber-

Parameter	Wert
d_s^{ij}	1,75 m
t_{LR}	4,5 s
t_{SR}	1,5 s
$\alpha_{iM_j}^{\text{lateral}}$	45°
$\alpha_{iM_j}^{\text{frontal}}$	135°
t_e^{behind}	1,0 s
t_e^{ahead}	1,5 s
c_{max}^i	3,5 m/s ²

Tabelle 6.1.: Reaktionsparameter für die Berechnung der Ausweichpunkte.

stellung der simulierten und beobachteten Trajektorien in Abb. 6.2b verdeutlicht dieses unterschiedliche Verhalten von V_0 und V_1 .

Diskussion

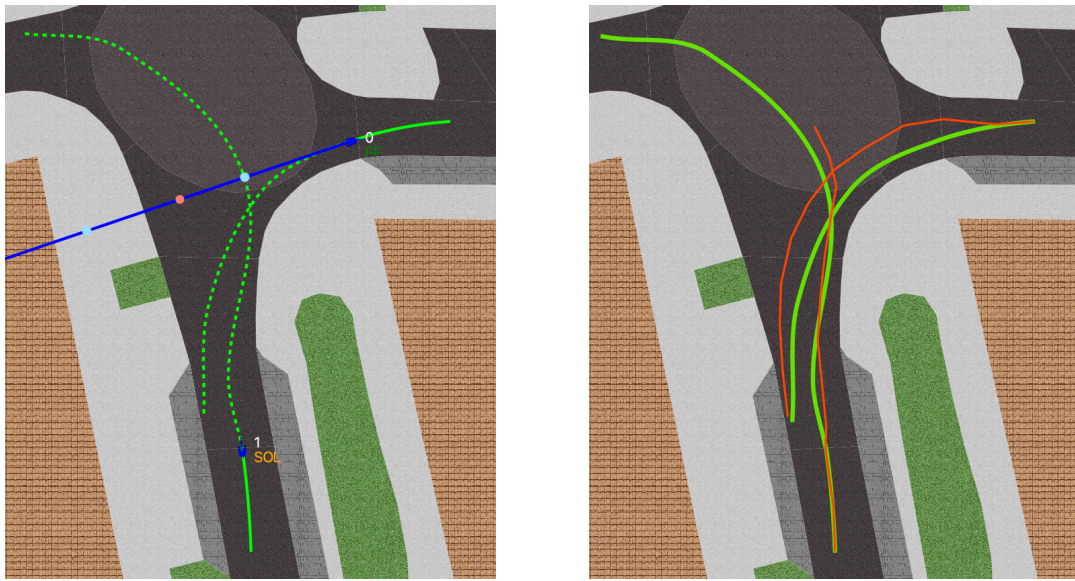
Wie beschrieben erfolgt in der Simulation aufgrund der Bewegungsextrapolation eine zeitversetzte Reaktion, wohingegen in der Realität beide Radfahrer etwa zeitgleich ihre Ausweichbewegung initiiert haben. Dies führt in der Simulation dazu, dass die Konfliktsituation allein von V_1 gelöst wird. Mit den verwendeten Simulationsparametern wurde eine quantitativ plausible Ausweichbewegung von V_1 erzielt.

6.1.2. Anbremsen eines Wartepunkts

Das simulierte [Anbremsen eines Wartepunkts](#) wird anhand einer Konfliktsituation demonstriert, die an der [Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig](#), beobachtet und aufgezeichnet wurde.

Beschreibung

Die betrachtete Konfliktsituation besteht aus einem Fußgänger V_0 und einem Pkw V_1 . V_0 überquert die Straße im westlichen Arm der Kreuzung, in die V_1 aus nördlicher Richtung kommend rechts abbiegen will. V_1 löst den Konflikt durch leichtes Abbremsen, bis V_0 die Begegnungszone verlassen hat. Eine Ansicht aus der Videoaufnahme der Situation ist in Abb. 6.3a dargestellt. Unabhängig davon, ob dieses regelkonforme Verhalten



(a) Zeitpunkt $t = 1,7\text{s}$. Der Konfliktpunkt ist in hellroter, die möglichen von V_1 berechneten Ausweichpunkte in hellblauer Farbe dargestellt.

(b) Gegenüberstellung der simulierten (grün) und beobachteten (rot) Trajektorien.

Abbildung 6.2.: Konfliktreaktion während und nach der Simulation.

beider Verkehrsteilnehmer repräsentativ für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen ist, liegt der Fokus an dieser Stelle auf der Untersuchung des Bremsverhaltens.

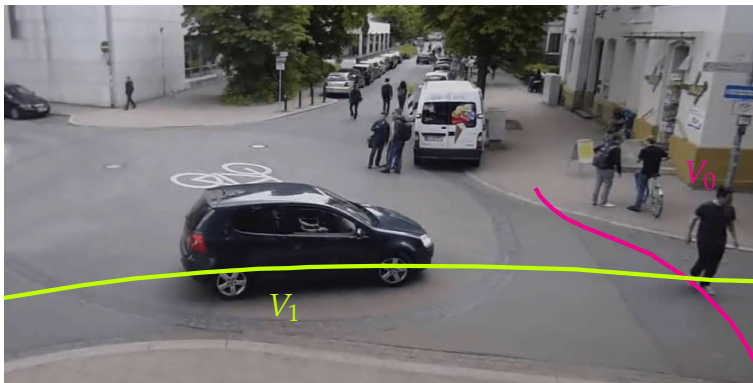
Da die beobachtete Reaktion von V_1 erst spät einsetzt, sind die Reaktionsparameter für das gezeigte Beispiel (siehe Tab. 6.2) im Vergleich zu den anderen Situationen in diesem Kapitel relativ klein gewählt.

Parameter	Wert
$d_s^{\text{CAR_PED}}$	1,5 m
$t_{\text{LR}}^{\text{CAR_PED}}$	2 s
$t_{\text{SR}}^{\text{CAR_PED}}$	0 s

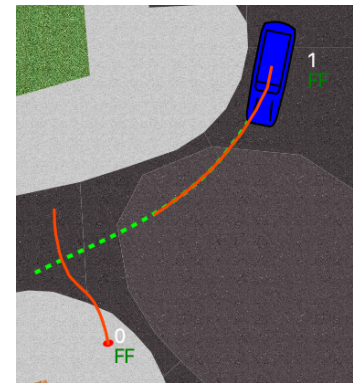
Tabelle 6.2.: Reaktionsparameter für das Beispiel zum Anbremsen eines Wartepunkts.

Ergebnisse

Um das Bremsverhalten des Pkws isoliert zu betrachten und eine Wechselwirkung mit einer etwaigen Reaktion des Fußgängers auszuschließen, wird in dem gezeigten Beispiel lediglich der Pkw simuliert. Der Fußgänger wird in der Simulation entsprechend der aufgezeichneten Realdaten bewegt.



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Beobachtete Trajektorien (rot) und Wunschtrajektorie des Pkw (grün dargestellt).

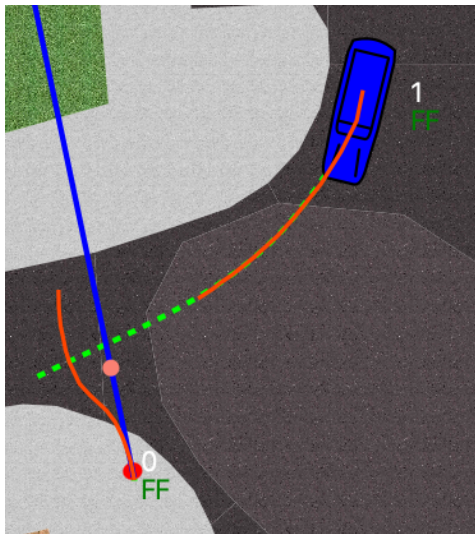
Abbildung 6.3.: Überblick über die betrachtete Situation.

Ab dem Simulationszeitpunkt $t = 0,3\text{ s}$ liegen genügend Beobachtungspunkte für eine sinnvolle Trajektorienextrapolation vor (siehe Abb. 6.4a), sodass V_1 den Konflikt erstmalig erkennt. Die Konfliktdetektion ergibt einen erwarteten Konfliktzeitpunkt t_{conf}^{ij} von $3,1\text{ s}$ in der Zukunft. Da dieser Wert größer als der Grenzwert t_{LR} für den Beginn der Reaktion ist, reagiert V_1 zunächst nicht. Zum Simulationszeitpunkt $t = 1,7\text{ s}$ (siehe Abb. 6.4b) wird dieser Schwellwert erstmalig erreicht, sodass die Reaktion einsetzt. Der Wartepunkt wird dynamisch ermittelt, indem der erwartete Konfliktpunkt \vec{p}_c^{ij} auf die Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ projiziert und der Punkt auf $\vec{T}_i(t)$ im Abstand d_s^{ij} zum Fußpunkt der Projektion bestimmt wird. V_1 bremst den Wartepunkt zunächst mit $-0,8\text{ m/s}^2$ an. Da V_0 im Gegenzug ab etwa diesem Zeitpunkt beginnt, leicht nach links auszuweichen, verschiebt sich der Bremspunkt im Laufe der nächsten Zeitschritte entsprechend in Richtung der angepassten Extrapolation, was in einer geringfügigen Verringerung der erforderlichen Bremsbeschleunigung resultiert.

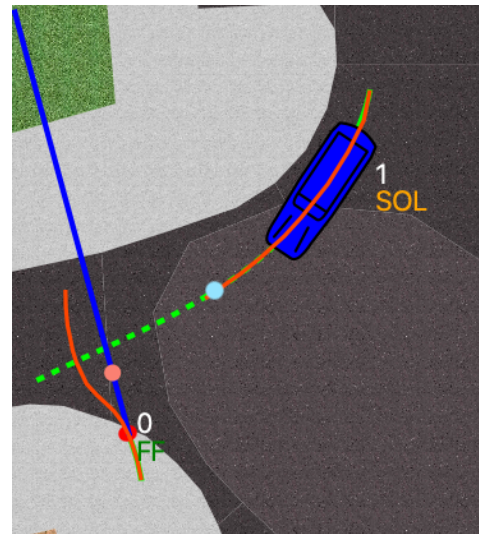
Kurz bevor V_0 den Fahrbahnrand erreicht, erscheint der Konflikt aus Sicht von V_1 gelöst, sodass dieser wieder beschleunigt. In Abb. 6.5 wird der beobachtete und der simulierte Verlauf der Geschwindigkeit von V_1 gegenübergestellt.

Diskussion

Mit den gewählten Reaktionsparametern konnten in der gezeigten Situation der Bremszeitpunkt sowie die minimale Geschwindigkeit von knapp 1 m/s , auf die der Pkw abbremst, zufriedenstellend reproduziert werden. Der Vergleich der simulierten und beobachteten Geschwindigkeitsverläufe zeigt, dass die Annahme einer konstanten Bremsbeschleunigung, die in einen linearen Geschwindigkeitsverlauf während der Reaktion resultiert, keine großen Abweichungen vom beobachteten Geschwindigkeitsverlauf



(a) Simulationszeitpunkt $t = 0,3$ s. Der Konfliktpunkt ist in hellroter Farbe dargestellt.



(b) Simulationszeitpunkt $t = 1,7$ s. Der Wartepunkt ist in hellblauer Farbe dargestellt.

Abbildung 6.4.: Erstmalige Konflikterkennung und Beginn der Reaktion.

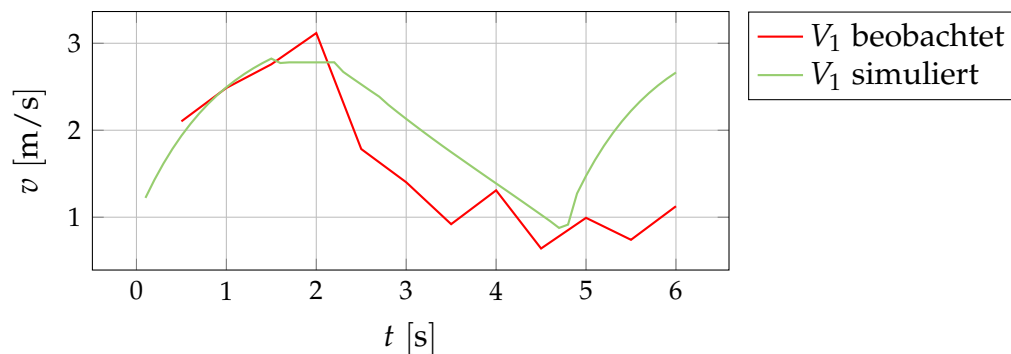


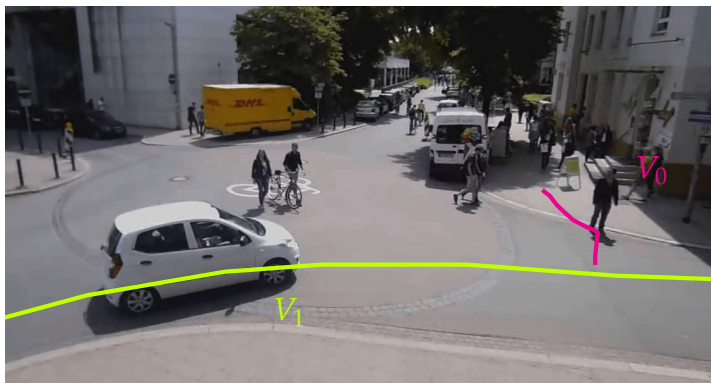
Abbildung 6.5.: Geschwindigkeitsverlauf von V_1 beim Anbremsen des Wartepunkts.

hervorrufen. Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse ist allerdings zu beachten, dass sich die gesamte Reaktion sowohl in der Realität als auch in der Simulation innerhalb von weniger als 4s abspielt. Um das Bremsverhalten in diesem kurzen Zeitraum besser beurteilen zu können, sollten weitere Untersuchungen auf einer Datenbasis, die mit einer höheren Abtastrate als den vorliegenden 0,5s erhoben wurde, durchgeführt werden.

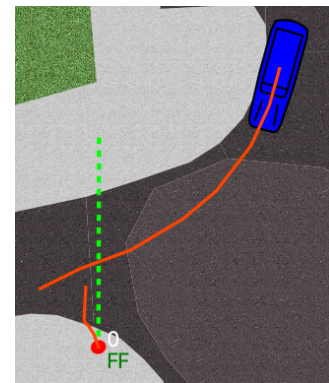
6.1.3. Safe Zone Force

Beschreibung

Für die Demonstration der *Safe Zone Force* wird erneut ein Konflikt zwischen einem Fußgänger V_0 und einem Pkw V_1 herangezogen. Dabei überquert V_0 den westlichen Straßenbereich der Kreuzung, um vom südwestlichen zum nordwestlichen Fußgängerbereich zu gelangen. Gleichzeitig nähert sich V_1 von Norden, um in Richtung Westen rechts abzubiegen. Die Situation ähnelt somit der im vorigen Abschnitt vorgestellten, jedoch reagieren die beiden Verkehrsteilnehmer anders. Nachdem V_0 den Konflikt erkennt, bewegt er sich zunächst entlang des Randes vom Fußgängerbereich und gewährt damit V_1 Vorrang. Nach kurzem Innehalten setzt er seine Bewegung in ausreichendem Abstand zu V_1 fort. Abb. 6.6a zeigt eine Ansicht aus der Videoaufzeichnung zu diesem Zeitpunkt.



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Beobachtete Trajektorien (rot) und angenommene Wunschtrajektorie von V_0 (grün dargestellt).

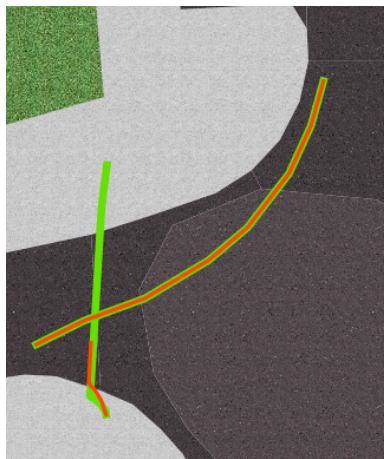
Die Konflikt- und Reaktionsparameter für die im folgenden Abschnitt beschriebene Simulation sind in Tab. 6.3 aufgelistet.

Parameter	Wert
$d_s^{\text{PED_CAR}}$	2,0 m
$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CAR}}$	10,0 s
$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CAR}}$	1,5 s
$d_{\text{SZ}}^{\text{min}}$	0,3 m
$d_{\text{SZ}}^{\text{max}}$	2,0 m

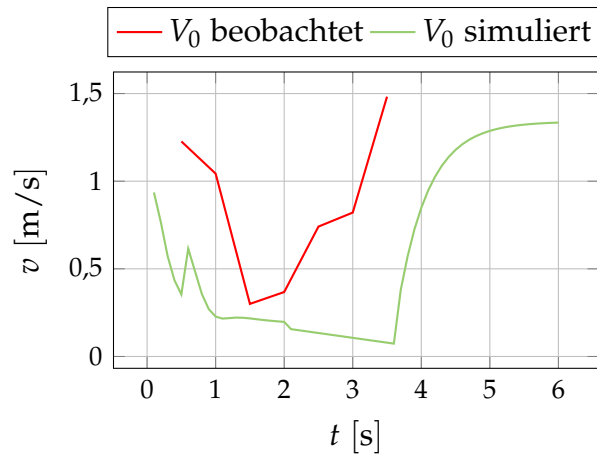
Tabelle 6.3.: Reaktionsparameter für das Beispiel zur Safe Zone Force.

Ergebnisse

Die Ausgangskonstellation sowie die angenommene Wunschtrajektorie von V_0 für den konfliktfreien Fall sind in Abb. 6.6b dargestellt. V_0 erkennt den Konflikt mit dem abbiegenden Pkw V_1 unmittelbar nach Beginn der Simulation. Da er sich zu diesem Zeitpunkt in einer Entfernung von 0,77 m zum Rand der sicheren Zone befindet und dieser Abstand kleiner als der obere Grenzwert d_{SZ}^{\max} ist, wirken von Beginn der Reaktion an sowohl die Ausweich- als auch die Abbremskomponente der **Safe Zone Force**. Dementsprechend verringert V_0 seine Geschwindigkeit, während er sich in den folgenden Simulationszeitschritten parallel zum Bordstein bewegt. Nachdem V_1 passiert hat, erscheint V_0 der Konflikt als gelöst, sodass er den Straßenbereich betritt und wieder in Richtung seines Ziels auf der anderen Straßenseite beschleunigt. Die simulierte Trajektorie ist in Abb. 6.7a der Beobachteten gegenübergestellt.



(a) Gegenüberstellung der simulierten (grün) und beobachteten (rot) Trajektorien.



(b) Geschwindigkeitsverlauf von V_0 .

Abbildung 6.7.: Simulationsergebnisse für das Beispiel zur Safe Zone Force.

Diskussion

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Realdaten zeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelte Formulierung einer Safe Zone Force in der Lage ist, beobachtete Trajektorien in entsprechenden Situationen zufriedenstellend zu reproduzieren. Durch die Gegenüberstellung der simulierten und aufgezeichneten Geschwindigkeiten von V_0 (siehe Abb. 6.7b) wird jedoch ersichtlich, dass V_0 in der Simulation für ca. 2 s nahezu stehen bleibt, wohingegen in den Realdaten nur eine geringere Reduktion der Geschwindigkeit von kürzerer Dauer auszumachen ist. Dieser Unterschied ist durch die Konzeption der Safe Zone Force begründet, da sie auf der Annahme beruht, dass der Fußgänger so lange in der sicheren Zone verbleibt, bis kein Konflikt mehr besteht.

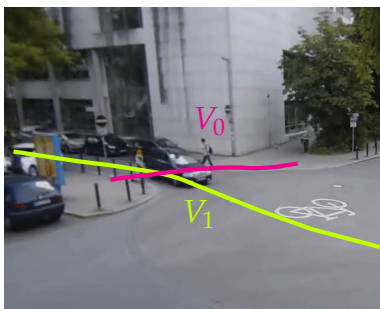
In der Videoaufzeichnung der untersuchten Situation wird hingegen deutlich, dass der Fußgänger nach kurzem Innehalten und einem abschätzenden Blick in Richtung des Pkws seine Bewegung bereits fortsetzt, bevor dieser vollständig passiert hat. Dieses Verhalten lässt sich vom Simulationsmodell derzeit nicht abbilden.

6.1.4. Reaktionskraft für defensive Reaktion

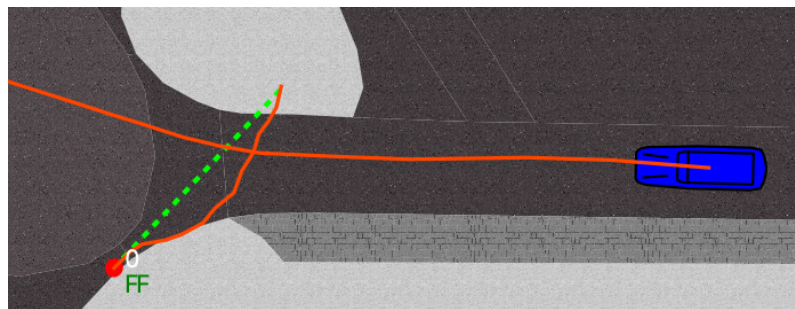
Die Wirkung der defensiven Reaktionskraft wird anhand einer Konfliktsituation zwischen dem Fußgänger V_0 und dem Pkw V_1 demonstriert, die an der **Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig**, beobachtet und aufgezeichnet wurde.

Beschreibung

Der Fußgänger V_0 überquert die Kreuzung von Südwesten nach Nordosten. Dabei wählt er eine Trajektorie, die am Rand der Begegnungszone im Südosten verläuft. Die betrachtete Situation beginnt, kurz bevor V_0 diesen Rand verlässt. Zeitgleich nähert sich der Pkw V_1 aus östlicher Richtung. V_0 reagiert auf den Konflikt, indem er entgegen der Fahrtrichtung von V_1 ausweicht, zunächst, ohne dabei die Geschwindigkeit zu reduzieren. Abb. 6.8a zeigt eine Ansicht aus der Videoaufzeichnung kurz nach Beginn der Ausweichbewegung. Nachdem V_1 passiert hat, setzt V_0 seine Bewegung in Richtung des Fußgängerbereichs im Nordosten fort.



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Gegenüberstellung der angenommenen Wunschtrajektorien (grün) und der beobachteten Trajektorien (rot).

Abbildung 6.8.: Überblick über die betrachtete Situation.

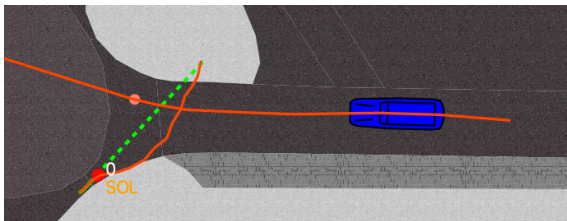
Obwohl sich V_0 am Anfang der Simulation noch in der sicheren Zone befindet, wird vom Modell als defensive Reaktion keine **Safe Zone Force** angewandt, da sich zu Beginn der Reaktion beide Verkehrsteilnehmer bereits in der Begegnungszone befinden. Die Reaktionsparameter für diesen Reaktionsmechanismus sind in Tab. 6.4 aufgeführt.

Parameter	Wert
$d_s^{\text{PED_CAR}}$	3,0 m
$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CAR}}$	10,0 s
$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CAR}}$	1,0 s
$d_{\text{def}}^{\text{min}}$	1,0 m
$d_{\text{def}}^{\text{max}}$	4,0 m

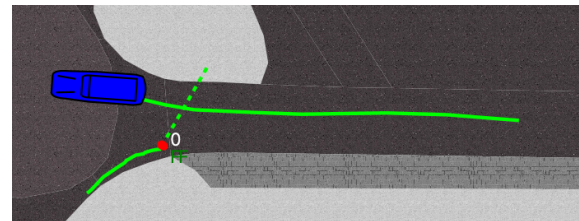
Tabelle 6.4.: Reaktionsparameter für das Beispiel zur Reaktionskraft für defensive Reaktion.

Ergebnisse

Um eine etwaige Wechselwirkung mit der Reaktion des Pkws auszuschließen, wird in dem gezeigten Beispiel nur das Verhalten des Fußgängers V_0 simuliert. Der Pkw V_1 wird gemäß seiner beobachteten Trajektorie bewegt. Die Ausgangskonstellation zu Beginn der Simulation mit der angenommenen Wunschtrajektorie von V_0 ist in Abb. 6.8b dargestellt.



(a) Simulationszeitpunkt $t = 0,9\text{ s}$. V_0 erkennt den Konflikt und leitet die Reaktion ein. Der Konfliktpunkt ist in hellroter Farbe dargestellt.



(b) Simulationszeitpunkt $t = 4,2\text{ s}$. Der Konflikt ist gelöst.

Abbildung 6.9.: Beginn und Ende der Reaktion.

Während der ersten Simulationszeitschritte bewegt sich V_0 gemäß seiner Wunschtrajektorie. Zum Simulationszeitpunkt $t = 0,9\text{ s}$ erkennt er den Konflikt mit V_1 und leitet die defensive Reaktion ein (siehe Abb. 6.9a). Zu diesem Zeitpunkt beträgt der Abstand zur antizipierten Trajektorie 4,77 m. Da dieser Abstand größer als $d_{\text{def}}^{\text{max}}$ ist, wird zunächst nur die Ausweichkomponente der Defensivkraft aktiv. Wenige Zeitschritte später, zum Zeitpunkt $t = 1,5\text{ s}$, unterschreitet der Abstand $d_{\text{def}}^{\text{max}}$, sodass zusätzlich zur Ausweichbewegung die Bremskomponente der Defensivkraft einsetzt. Der Konflikt ist zum Zeitpunkt $t = 4,2\text{ s}$ gelöst (siehe Abb. 6.9b), sodass V_0 wieder in Richtung seines Ziels beschleunigt. Abb. 6.10 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten und beobachteten Trajektorien zum Ende der Simulation.

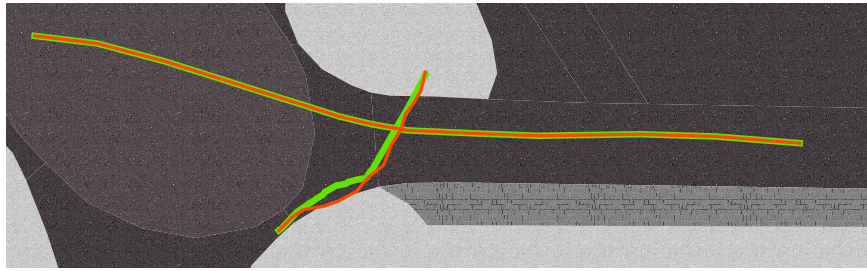


Abbildung 6.10.: Trajektorien am Ende der Simulation.

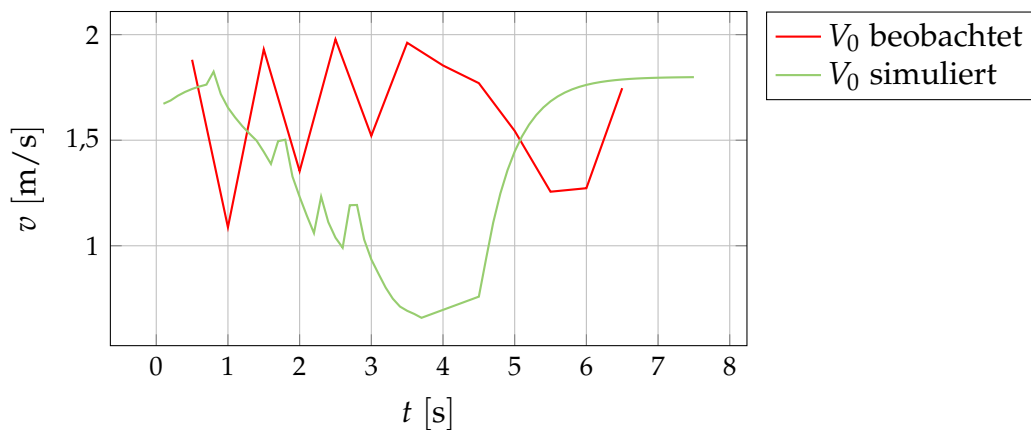


Abbildung 6.11.: Simulierter und beobachteter Geschwindigkeitsverlauf von V_0 .

Diskussion

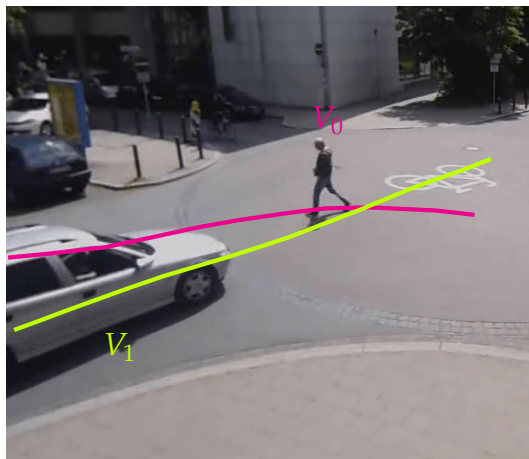
Mit den verwendeten Modellparametern setzt die Reaktion von V_0 in der Simulation etwa zum gleichen Zeitpunkt wie in der Realität ein. Beim räumlichen Vergleich der simulierten und beobachteten Trajektorien zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Jedoch fällt die simulierte Ausweichbewegung zunächst schwächer aus als die Beobachtete. Die daraus resultierende schnellere Annäherung an V_1 erfordert, wie in der Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsprofile in Abb. 6.11 dargestellt, ein stärkeres Abbremsen im weiteren Verlauf der Simulation, was letztendlich eine um ca. 1 s größere Reisezeit zur Folge hat.

6.1.5. Reaktionskraft für offensive Reaktion

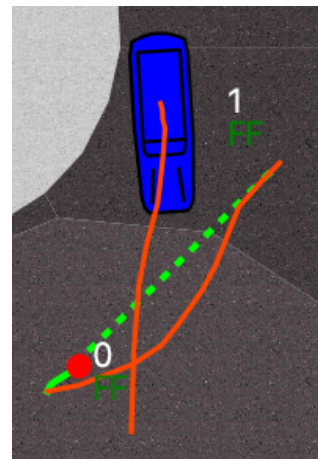
Beschreibung

Die beobachtete Konfliktsituation entsteht, da der Fußgänger V_0 die Kreuzung von Südwesten kommend in Richtung Nordosten diagonal überquert. Er ist etwa in der Mitte der Kreuzung, als sich der Pkw V_1 aus nördlicher Richtung nähert. V_0 erkennt

den Konflikt und reagiert offensiv, indem er seine Bewegung in Richtung der Trajektorie von V_1 ändert, um diese eher zu kreuzen. Abb. 6.12a zeigt eine Ansicht aus der Videoaufnahme zum Kreuzungszeitpunkt. Dabei bewegt sich V_0 konstant mit ca. 2 m/s. Sowohl V_0 als auch V_1 befinden sich während der gesamten Beobachtungszeit in der Begegnungszone.



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Angenommene Wunschtrajektorie von V_0 (grün) und beobachtete Trajektorien (rot).

Abbildung 6.12.: Überblick über die betrachtete Situation.

Die Reaktionsparameter für das gezeigte Beispiel sind in Tab. 6.5 aufgelistet.

Parameter	Wert
$d_s^{\text{PED_CAR}}$	2,5 m
$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CAR}}$	10 s
$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CAR}}$	0 s

Tabelle 6.5.: Reaktionsparameter für das Beispiel zur Reaktionskraft für offensive Reaktion.

Ergebnisse

Auch in diesem Beispiel wird der Pkw zur isolierten Untersuchung der offensiven Reaktion des Fußgängers nicht simuliert, sondern gemäß der aufgezeichneten Trajektorie bewegt. In Abb. 6.12b ist die Ausgangskonstellation zu Beginn der Simulation mit angenommener Wunschtrajektorie des Fußgängers dargestellt.

V_0 erkennt die Konfliktsituation direkt beim Start der Simulation. Die Reaktionskraft wird ab dem Zeitschritt $t = 0,3\text{s}$ aufgebracht, was zu einer Abweichung von der Wunschtrajektorie führt. Da die Reaktionskraft in Normalenrichtung zur Bewegung von

6. Simulationen zur Modellvalidierung

V_0 wirkt, hat sie keinen Einfluss auf die absolute Geschwindigkeit. In Abb. 6.13a sind die simulierten und beobachteten Trajektorien von V_0 gegenübergestellt.

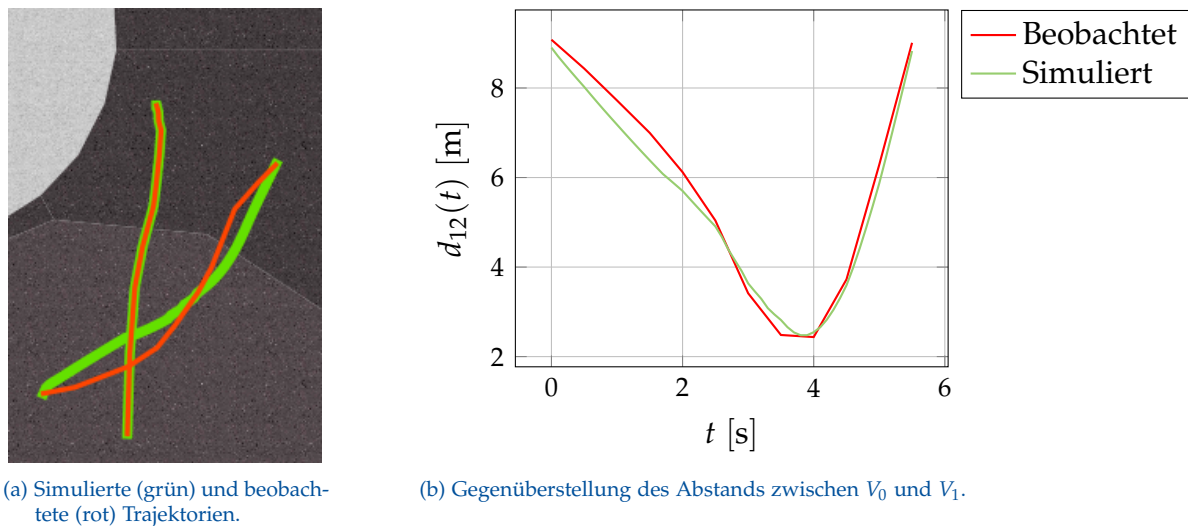


Abbildung 6.13.: Simulationsergebnisse für die offensive Reaktionskraft.

Durch die Ausweichbewegung wird der erwartete minimale Abstand zu V_1 zwar sukzessive größer, jedoch wird der Konflikt im Sinne der Konflikterkennung bis zum Passieren der antizipierten Trajektorie nicht gelöst. Um dieses Simulationsergebnis auf Plausibilität zu überprüfen, ist in Abb. 6.13b die zeitliche Entwicklung des euklidischen Abstands der Mittelpunkte von V_0 und V_1 dargestellt.

Diskussion

Die in dieser Arbeit konzipierte kraftbasierte Modellierung einer offensiven Reaktion ermöglicht in dem gezeigten Beispiel, das Verhalten des Fußgängers qualitativ korrekt zu simulieren. Beim direkten Vergleich der simulierten und beobachteten Trajektorien zeigt sich, dass die Ausweichbewegung in der Realität stärker ausfällt als in der Simulation. Im Gegenzug kehrt der Fußgänger in der Realität nach Lösen des Konflikts schneller zu seiner Wunschtrajektorie zurück.

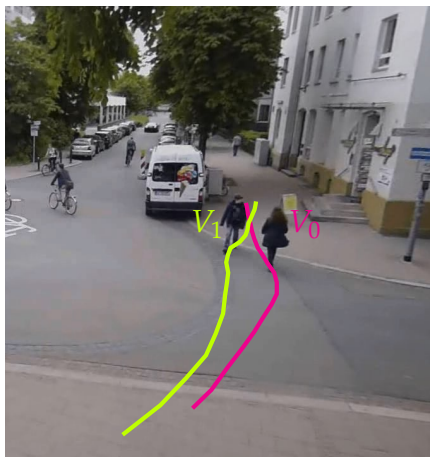
Der charakteristische Aspekt einer offensiven Reaktion, durch die Ausweichbewegung in Richtung des Konfliktgegners die vorübergehende Verringerung des Abstands unterhalb des Sicherheitsabstands bewusst in Kauf zu nehmen, wird mit den gewählten Parametern in der Simulation auch quantitativ wiedergegeben.

6.1.6. Trajektorienbasierte Ausweichkraft

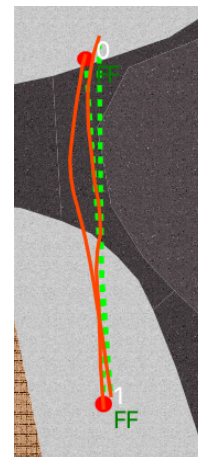
Die **Trajektorienbasierte Ausweichkraft** wird anhand einer Konfliktsituation zwischen zwei sich entgegengerichteten Fußgängern, die an der **Kreuzung Pockelsstraße – Katharinenstraße/Konstantin-Uhde-Straße, Braunschweig** aufgezeichnet wurde, demonstriert.

Beschreibung

Der Fußgänger V_0 überquert den westlichen Rand der Begegnungszone, um vom nordwestlichen zum südwestlichen Fußgängerbereich zu gelangen. Der andere Fußgänger V_1 quert an der gleichen Stelle in entgegengesetzter Richtung. Beide Fußgänger weichen in Bewegungsrichtung nach rechts aus, ohne dabei ihre Geschwindigkeit zu verringern. Dabei fällt auf, dass die initiale Ausweichbewegung von V_0 stärker ausfällt. V_1 hingegen korrigiert die Bewegungsrichtung noch einmal kurz vor der Begegnung, die nahe dem Rand des südwestlichen Fußgängerbereichs stattfindet. Dieser Moment ist in der Ansicht aus den Videodaten in Abb. 6.14a gezeigt.



(a) Standbild aus den Videodaten mit Blickrichtung Südosten.



(b) Angenommene Wunschtrajektorien (grün) und beobachtete Trajektorien (rot).

Abbildung 6.14.: Überblick über die betrachtete Situation.

Die Konfliktparameter sowie die vier Parameter für die Berechnung der Ausweichkraft sind in Tab. 6.6 aufgeführt.

Ergebnisse

Beide Fußgänger erkennen den Konflikt, sobald nach Beginn der Simulation genügend Beobachtungspunkte für die Trajektorienextrapolation vorliegen. Die Situation zum

Parameter	Wert
$d_s^{\text{PED_PED}}$	1,25 m
$t_{\text{LR}}^{\text{PED_PED}}$	5,0 s
$t_{\text{SR}}^{\text{PED_PED}}$	1,0 s
d_0	2,0 m
d_1	1,0 m
k_1	1,5
k_2	0,5

Tabelle 6.6.: Reaktionsparameter für die Berechnung der trajektorienbasierten Ausweichkraft.

Simulationszeitpunkt $t = 0,3\text{ s}$ ist mit den Konfliktpunkten und den extrapolierten Trajektorien in Abb. 6.15a dargestellt. Beide Konflikte werden korrekt als frontale Konflikte klassifiziert, sodass die Ausweichkraft wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben mit einer Ausweichrichtung $dir_e = 1$ berechnet wird. Dies führt zu einer gegenseitigen Abstoßung durch die antizipierten Trajektorien, sodass beide simulierten Fußgänger beginnen, nach rechts auszuweichen. Da die Ausweichkraft aufgebracht wird, bis der Konflikt gelöst ist, entsteht eine sukzessive Ausweichbewegung. Durch diese Ausweichbewegung wird der erwartete gegenseitige Abstand im Laufe der folgenden Zeitschritte immer größer, wodurch die Ausweichkraft kleiner wird, bis sich die beiden Fußgänger wie in Abb. 6.15b dargestellt in ausreichendem Abstand begegnen können.

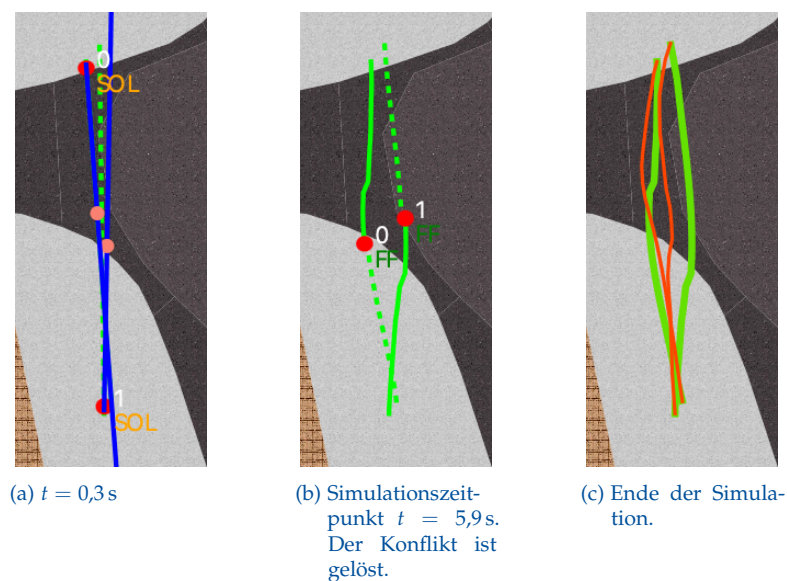


Abbildung 6.15.: Reaktion durch trajektorienbasierte Ausweichkraft zu verschiedenen Simulationszeitpunkten.

Diskussion

Die trajektorienbasierte Ausweichkraft modelliert eine gegenseitige Abstoßung, die durch die antizipierte Trajektorie verursacht wird. Im gezeigten Beispiel lässt sich damit für beide Fußgänger die gleiche Ausweichrichtung wie in der Realität beobachtet simulieren. Die Ausweichbewegung ermöglicht es, dass sich die Fußgänger, wie auch in der Beobachtung, ohne Verringerung der Geschwindigkeit begegnen können. Für die quantitative Betrachtung ist von Bedeutung, dass die Situation aus Sicht der beiden Fußgänger nahezu symmetrisch erscheint. Dies führt zu Ausweichbewegungen, die etwa gleich stark von den jeweils angenommenen Wunschtrajektorien abweichen. Wie eingangs beschrieben reagiert V_0 jedoch in der Realität früher und stärker als V_1 . Dieser Effekt ließe sich in der Simulation nur durch individuelle Konflikt- und Reaktionsparameter erreichen.

6.1.7. Mehrfachkonflikte

Die Aggregation einer Gesamtentscheidung für den Fall mehrerer simultaner Konflikte wird anhand einer Konfliktsituation zwischen mehreren Kraftfahrzeugen und Fußgängern gezeigt. Die Situation wurde im [Weidenbaumsweg, Hamburg-Bergedorf](#), beobachtet und aufgezeichnet. Von Schiermeyer u. a. (2017b) wurde die Situation bereits genutzt, um die Methodik zur Ermittlung einer Gesamtwahrscheinlichkeit vorzustellen. Darauf aufbauend wurde das Modell in dieser Arbeit erweitert, unter anderem um die in Abschnitt 5.3 erarbeitete Wichtung der Einzelwahrscheinlichkeiten nach dem minimal erwarteten Abstand.

Beschreibung

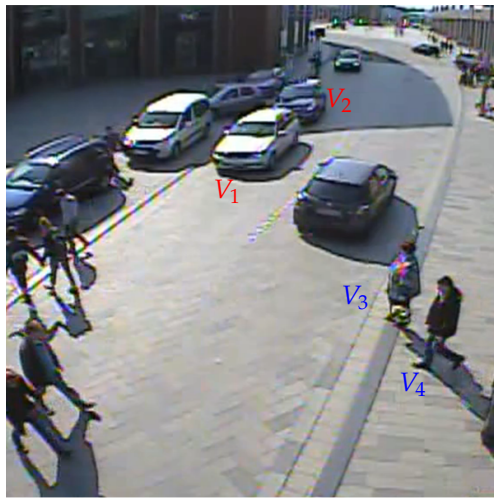
In der untersuchten Situation interagieren insgesamt drei Fußgänger mit zwei Pkw, wobei die Interaktionen mit den Fußgängern mit einem zeitlichen Versatz von ca. 2 s beginnen. Die Ausgangskonstellation zum Simulationszeitpunkt $t = 0$ ist in Abb. 6.16 dargestellt.

Die bei der Simulation verwendeten und für die Konfliktdetektion und -klassifizierung relevanten Parameter sind in Tab. 6.7 aufgeführt.

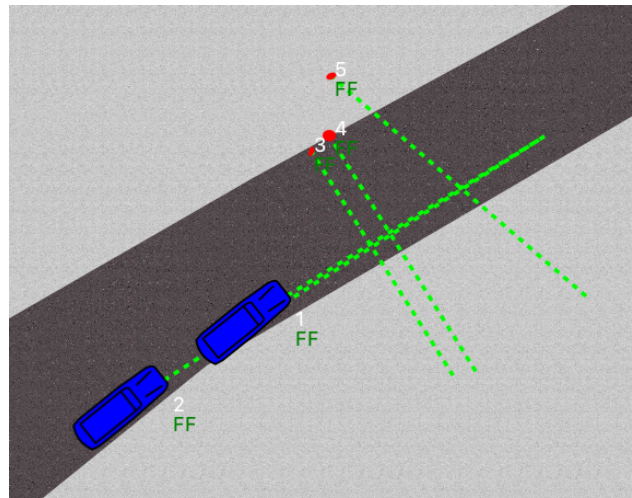
Ergebnisse

Da die individuellen Reaktionsmechanismen der einzelnen Verkehrsteilnehmer bereits in den vorherigen Abschnitten demonstriert wurden, werden in diesem Beispiel

6. Simulationen zur Modellvalidierung



(a) Standbild aus den Videodaten. Der Fußgänger V_5 ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht im dargestellten Bildausschnitt.



(b) Angenommene Wunschtrajektorien.

Abbildung 6.16.: Konstellation zu Beginn der Simulation.

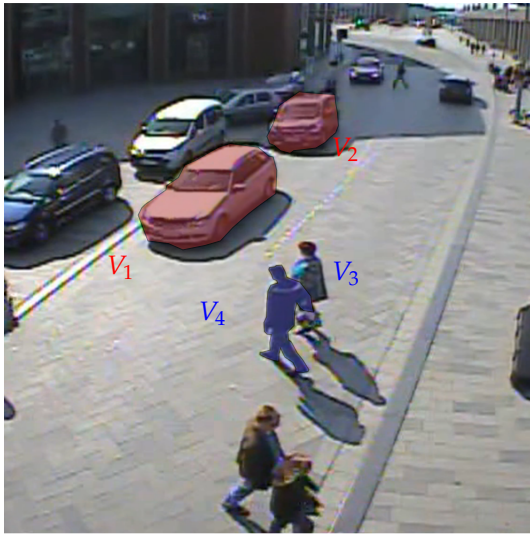
Parameter	Wert
$d_s^{\text{PED_CAR}}$	2,5 m
$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CAR}}$	10 s
$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CAR}}$	1 s
$d_s^{\text{CAR_PED}}$	3,5 m
$t_{\text{LR}}^{\text{CAR_PED}}$	10 s
$t_{\text{SR}}^{\text{CAR_PED}}$	2 s

Tabelle 6.7.: Reaktionsparameter für das Beispiel zu Mehrfachkonflikten.

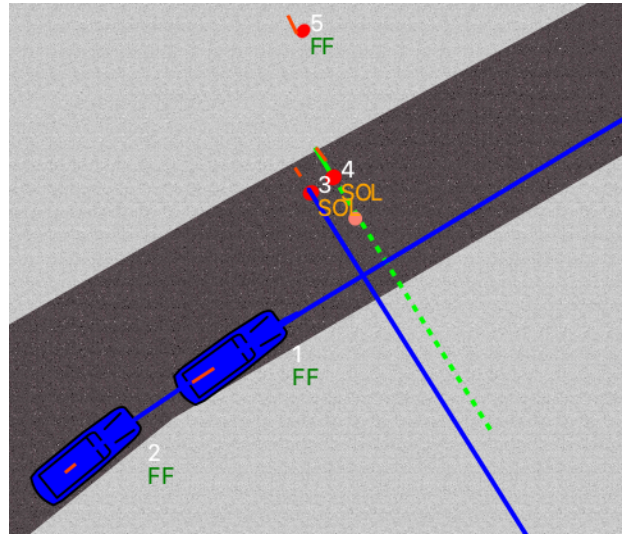
lediglich die Einzelentscheidungen und deren Aggregation zu verschiedenen, als ausschlaggebend herausgearbeiteten, Zeitpunkten analysiert.

Aus der Sicht der Fußgänger findet der erste entscheidende Moment in der Simulation zum Zeitpunkt $t = 0,9$ s statt. Die Fußgänger V_3 und V_4 befinden sich bereits in der Begegnungszone (siehe Abb. 6.17a). Beide Fußgänger detektieren die Situation zu diesem Zeitpunkt als Konflikt mit dem Pkw V_1 . Der zweite Pkw V_2 wird als interagierender Verkehrsteilnehmer eingestuft. Die prädizierten Trajektorien sowie der daraus resultierende Konfliktpunkt aus der Perspektive von V_4 sind in Abb. 6.17b dargestellt. Auf die Zahlenwerte für V_3 wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da diese durch die sehr ähnliche geometrische Konstellation analog aussehen.

Durch die Anwesenheit eines interagierenden Verkehrsteilnehmers wird die Situation als Mehrfachkonflikt betrachtet, wodurch die Gesamtentscheidung für V_4 zum betrach-



(a) Standbild aus den Videodaten. Der Fußgänger V_4 ist blau, die Pkw V_1 und V_2 sind rot hervorgehoben.



(b) Ansicht der Simulation mit präzidierten Trajektorien und Konfliktpunkten aus der Sicht von V_4 .

Abbildung 6.17.: Situation zum Zeitpunkt $t = 0,9$ s.

teten Zeitpunkt aggregiert wird, indem zunächst Einzelentscheidungen für V_1 und V_2 bestimmt werden. Dabei wird, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, auch die Interaktion mit V_2 als Konflikt behandelt. Die aus dem Entscheidungsmodell resultierenden Einzelwahrscheinlichkeiten sowie die Aggregation dieser gemäß Gl. 5.3 sind in Tab. 6.8 aufgeführt.

V_j	Klassifikation	$P_j(\text{def.})$	$P_j(\text{off.})$	$P_j(\text{k. Reaktion})$	d_{\min}^j/m	w_j
V_1	Konflikt	0,53	0,0	0,47	2,2	0,74
V_2	Interaktion	0,00	1,0	0,00	6,5	0,26
Aggregation	-	0,39	0,26	0,35	-	1,0

Tabelle 6.8.: Entscheidungswahrscheinlichkeiten von V_4 zum Zeitpunkt $t = 0,9$ s

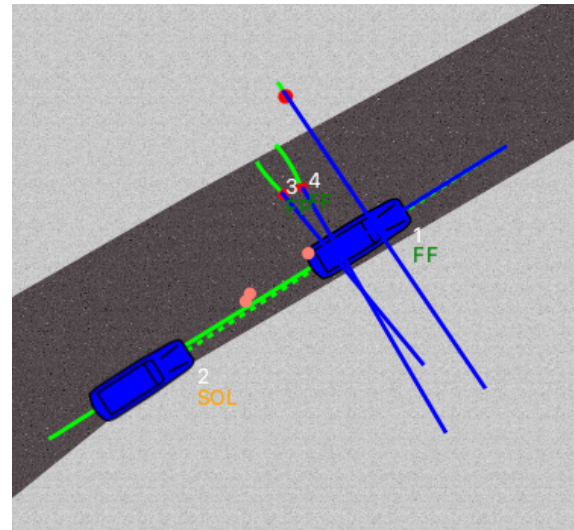
Die Aggregation ergibt somit, dass sich V_4 in dieser Situation mit der größten Wahrscheinlichkeit für ein defensives Verhalten entscheidet. In der Simulation wird für beide Fußgänger somit das defensive Verhalten ausgewählt und durch Aufbringen der **Reaktionskraft für defensive Reaktion** umgesetzt. Die daraus resultierende Verlangsamung der beiden Fußgänger führt in der Simulation ab dem Zeitpunkt $t = 1,6$ s dazu, dass nun auch mit dem zweiten Pkw V_2 ein Konflikt erkannt wird. Zum Zeitpunkt $t = 4,0$ s hat V_1 die nun wartenden Fußgänger V_3 und V_4 fast passiert, was dazu führt, dass der Konflikt mit V_1 gelöst ist und nur noch ein Konflikt mit V_2 besteht. Das Entscheidungsmodell für diesen Einzelkonflikt ergibt die größte Wahrscheinlichkeit für die Entscheidung „keine Reaktion“, sodass die Fußgänger ihren Weg fortsetzen.

6. Simulationen zur Modellvalidierung

Die beiden Pkw V_1 und V_2 detektieren in den ersten Sekunden der Simulation zwar Konflikte mit den Fußgängern V_3 und V_4 , entscheiden sich jedoch zunächst dafür, nicht zu reagieren. Zum Zeitpunkt $t = 2,6\text{ s}$ erreicht der Fußgänger V_5 den Rand der Begegnungszone (siehe Abb. 6.18a).



(a) Standbild aus den Videodaten. Der Pkw V_2 ist blau, die Fußgänger V_3 , V_4 und V_5 sind rot hervorgehoben.



(b) Ansicht der Simulation mit prädizierten Trajektorien und Konfliktpunkten aus der Sicht von V_2 .

Abbildung 6.18.: Situation zum Zeitpunkt $t = 2,6\text{ s}$.

Durch die vorherige Reaktion der Fußgänger V_3 und V_4 besteht kein Konflikt mehr mit diesen, jedoch erkennt V_2 nun einen Konflikt mit dem weiter entfernten Fußgänger V_5 , der bisher noch nicht reagiert hat. Somit trifft V_2 in dieser Situation eine Gesamtentscheidung, die sich aus den Einzelentscheidungen für die interagierenden Fußgänger V_3 und V_4 sowie dem Konflikt mit V_5 zusammensetzt. Die Ergebnisse des Entscheidungsmodells und die Aggregation sind in Tab. 6.9 aufgeführt.

V_j	Klassifikation	$P_j(\text{defensiv})$	$P_j(\text{keine Reaktion})$	d_{\min}^j/m	w_j
V_3	Interaktion	0,52	0,48	4,1	0,33
V_4	Interaktion	0,45	0,55	5,0	0,27
V_5	Konflikt	0,76	0,24	3,4	0,40
Aggregation	-	0,60	0,40	-	1,0

Tabelle 6.9.: Entscheidungswahrscheinlichkeiten von V_2 zum Zeitpunkt $t = 2,6\text{ s}$

Das gemäß der Aggregation in dieser Situation für V_2 wahrscheinlichste defensive Verhalten wird für Pkw durch das **Anbremsen eines Wartepunkts** modelliert, der in der Simulation dynamisch ermittelt wird. Nach Erreichen des Wartepunkts verbleibt V_2 dort, bis alle drei Fußgänger die Begegnungszone durchquert haben.

Diskussion

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die gewichtete Aggregation von Einzelentscheidungen es ermöglicht, auch das Verhalten bei Mehrfachkonflikten qualitativ zu reproduzieren, obwohl das zugrundeliegende Entscheidungsmodell lediglich für Einzelkonflikte kalibriert wurde. Quantitativ betrachtet erfolgen die Reaktionen der Fußgänger in der Simulation später als in der Realität, sodass diese erst in geringerem Abstand zu den Pkw stehen bleiben. Während dies vor allem durch den Sicherheitsabstand d_s^{ij} verursacht wird, ist nachfolgend die Wechselwirkung der Reaktionen ausschlaggebend. In der Simulation setzen die Fußgänger ihre Bewegung erst fort, nachdem V_2 bereits deutlich abgebremst hat. In der Realität zeigen die Fußgänger direkt nach dem Passieren von V_1 ein offensiveres Verhalten. Dieses kann durch das Modell mit den verwendeten Parametern nicht dargestellt werden.

6.2. 60-minütiges Szenario

Eine Simulation über einen Zeitraum von einer Stunde wurde auf der [Kreuzung Wilhelm-Bode-Straße – Grünewaldstraße/Roonstraße, Braunschweig](#), durchgeführt. Bei der Simulation wurden die Verkehrsarten Fußgänger, Radfahrer und Pkw berücksichtigt. Um für die Simulation möglichst realitätsnahe Randbedingungen zu schaffen, wurden Eingangsdaten aus beobachteten Trajektorien generiert. Die dafür notwendige Extraktion von Trajektorien aus den Videoaufnahmen der Kreuzung wird in Abschnitt 2.2.3 beschrieben. Aus den Trajektorien werden für jeden Verkehrsteilnehmer der Startzeitpunkt, Start- und Zielpunkte sowie die vektorielle Startgeschwindigkeit extrahiert und die Wunschgeschwindigkeit v_i^0 jedes Verkehrsteilnehmers als das 70 %-Quantil v_{70} der jeweils beobachteten Trajektorie gesetzt.

Für die Simulation wurde die Kreuzung in die drei in Abschnitt 2.1 beschriebenen Zonen unterteilt, die sich in der Nutzung durch die drei Verkehrsarten unterscheiden. Diese sind bereits in Abb. 2.6b (siehe Abschnitt 2.2.3) dargestellt. Der zentrale Straßenbereich (in der Abbildung blau hinterlegt) stellt die durch alle drei Verkehrsarten gleichwertig genutzte Begegnungszone dar. Er endet bündig mit dem Beginn der Park- bzw. Grünstreifen, da zwischen diesen Punkten ein direkter Übergang zur sicheren Zone möglich ist.

Die sichere Zone setzt sich aus den Gehwegen und dem Parkeingang (in der Abbildung jeweils grün hinterlegt) zusammen. Diese Flächen dürfen in der Simulation nur von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden.

Die Erschließungszone umfasst die Straßenbereiche in den Armen der Kreuzung (in der Abbildung rot hinterlegt). Diese werden in der Realität überwiegend von passierenden

Radfahrern und Pkw verwendet. In der Simulation werden sie daher als für Fußgänger nicht benutzbar umgesetzt.

6.2.1. Szenariospezifische Modellierung

Als Erweiterung der Routenfindung kommt für das vorliegende Szenario ein Konzept für händisch definierte Fahrspuren zum Einsatz. Hierfür wird der automatisch generierte Navigationsgraph (siehe Abschnitt 4.1.1) um zusätzliche Knoten erweitert, die den beobachteten Trajektorien von Radfahrern und motorisiertem Verkehr nachempfunden sind. Zwischen diesen Knoten werden im Gegensatz zum automatisch generierten Navigationsgraphen gerichtete Kanten eingefügt, sodass eine Verwendung der Fahrspuren in nur eine Richtung gewährleistet ist. Diese Kanten werden für Pkw und Radfahrer, deren Start- und Zielpunkte sich in der Straßenzone befinden, bei der Routensuche bevorzugt. Die zusätzlichen Knoten und Kanten sind in Abb. 6.19 dargestellt.

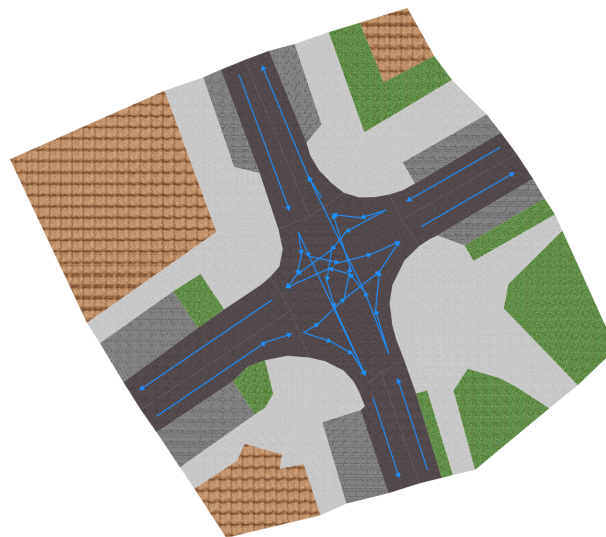


Abbildung 6.19.: Manuelle Erweiterung des Navigationsgraphen durch Knoten und Kanten zur Modellierung von Fahrspuren.

Das Konfliktverhalten wird für dieses Szenario um eine Modellierung von Vorfahrtsregeln nach Diekmann und Schiermeyer (2019) erweitert. Mithilfe dieser graphenbasierten Vorfahrtsmodellierung wird die auf der Kreuzung bestehende Rechts-vor-links-Regelung abgebildet. Sie ersetzt für Konflikte zwischen oder unter Radfahrern und Pkw die Entscheidungsebene, wenn die beteiligten Verkehrsteilnehmer näherungsweise zeitgleich die Begegnungszone erreichen. Obwohl die Vorfahrtsmodellierung in der Lage ist, auch den Vorrang bei Beteiligung von Fußgängern darzustellen, wurde hier bewusst darauf verzichtet, um den Aspekt der gemeinsam genutzten Verkehrsfläche hervorzuheben.

Die bei der Simulation verwendeten Modellparameter sind in Anhang B tabelliert.

6.2.2. Ergebnisse

Verteilungen der Konflikte und Reaktionsmechanismen

Zur Analyse der Simulationsergebnisse wird zunächst die Gesamtanzahl der durch die Konfliktdetektion erkannten Konfliktsituationen betrachtet. Tab. 6.10 zeigt eine Matrixdarstellung der Verteilung der detektierten Konflikte auf die drei Verkehrsarten. Dabei wird ein Konflikt zwischen den Verkehrsteilnehmern V_i und V_j nur einmal gezählt, unabhängig davon, ob er über mehrere Simulationszeitschritte besteht oder unmittelbar nach dem Erkennen gelöst wird. Bei dieser Darstellung wird jedoch nicht berücksichtigt, ob in eine Konfliktsituation mehr als zwei Verkehrsteilnehmer involviert waren.

$M_i \backslash M_j$	PED	CYC	CAR	Summe
PED	71	37	50	158
CYC	29	83	62	174
CAR	111	132	305	548
Summe	211	252	417	880

Tabelle 6.10.: Überblick über die Anzahl der durch die Konfliktdetektion erkannten Konflikte in der Simulation

Somit müssen im untersuchten Simulationszeitraum 880 Konflikte durch das Modell behandelt werden. In den Tabellen 6.11, 6.12 und 6.13 sind die dabei verwendeten Reaktionsmechanismen nach Verkehrsarten aufgeschlüsselt. Für Situationen, in denen sich durch Änderung der subjektiven Einschätzung die Klassifizierung ändert, wird, sofern nicht anders angemerkt, der Reaktionsmechanismus angegeben, der maßgeblich den Konflikt löst.

Tabelle 6.11 zeigt die Reaktionsmechanismen, die von Fußgängern verwendet werden. Konflikte mit anderen Fußgängern werden zunächst mit der trajektorienbasierten Ausweichkraft \vec{f}_{traj} zu lösen versucht. Kommt es anschließend oder durch eine späte Konflikterkennung zu einer Ad-hoc-Situation, wird eine Kollision mit dem **Soziale-Kräfte-Modell (SKM)** verhindert. Liegt ein Konflikt zu weit in der Zukunft, wird zunächst nicht reagiert. In 14 Fällen wurde der detektierte Konflikt in der Zeitspanne bis zum Erreichen von t_{LR} bereits anderweitig gelöst, sodass keine Reaktion mehr erforderlich war.

Auf Konflikte mit Radfahrern wird zunächst mit einer defensiven Strategie reagiert, die positionsabhängig entweder durch die Safe Zone Force \vec{f}_{SZ} oder die defensive Reaktionskraft \vec{f}_{def} aufgebracht wird. Die Fälle „Reaktion durch SKM“ und „keine

Reaktionsmechanismus	M_j		
	PED	CYC	CAR
Safe Zone Force \vec{f}_{SZ}	-	6	19 ^[i]
Defensive Reaktionskraft \vec{f}_{def}	-	13	24 ^[i]
Ausweichkraft \vec{f}_{traj}	32	-	-
Reaktion durch SKM	25	2	0
keine Reaktion (Entscheidung)	-	-	14
keine Reaktion ($t_{conf}^{ij} > t_{LR}$)	14	16	0

^[i] In 7 Fällen erfolgt nach dem Verlassen der sicheren Zone ein Wechsel von \vec{f}_{SZ} zu \vec{f}_{def} , daher ist die Gesamtsumme der Reaktionen hier größer als in Tab. 6.10.

Tabelle 6.11.: Reaktionsmechanismen Fußgänger.

Reaktion ($t_{conf}^{ij} > t_{LR}$)“ entstehen analog zu den Konflikten zwischen zwei Fußgängern, weswegen im Folgenden auf eine wiederholte Erläuterung dieser Fälle verzichtet wird.

In Konfliktsituationen mit einem Pkw wird zunächst mithilfe des Entscheidungsmodells nach Pascucci u. a. (2018) eine Strategie gewählt. Die defensive Strategie wird abermals in Abhängigkeit der Position durch die Safe Zone Force oder die defensive Reaktionskraft appliziert. Auffällig ist, dass es in keiner Situation zu einer Entscheidung für ein offensives Verhalten kam. Sämtliche der 14 beobachteten Fälle einer Entscheidung, bewusst nicht zu reagieren, stammen aus einer einzigen Situation, in der eine Gruppe aus zehn Fußgängern beim Queren der Kreuzung zwei Pkw begegnet. Dieser Effekt war einerseits zu erwarten, da, wie in Abschnitt 5.1 erläutert und in dem Beispiel in Abschnitt 6.1.7 demonstriert, die Anzahl gleichzeitig anwesender Fußgänger eine maßgebliche Einflussgröße für die Entscheidung darstellt. Andererseits kann das Ergebnis ein Indiz dafür sein, dass das anhand der Aufzeichnungen vom Weidenbaumsweg (siehe Abschnitt 2.2.2) kalibrierte Entscheidungsmodell für eine so deutlich unterschiedliche Kreuzungsgeometrie nicht uneingeschränkt übertragbar ist. Abschließend lässt sich festhalten, dass sämtliche Konflikte zwischen Fußgängern und Pkw durch vorausschauende Reaktionen gelöst werden konnten und somit keine einzige Ad-hoc-Situation entstanden ist.

Die Reaktionsmechanismen für Radfahrer sind in Tab. 6.12 aufgeführt. Für alle Verkehrsarten versuchen Radfahrer, mit Ausnahme der zwei im Folgenden geschilderten Fälle, den Konflikt durch Bestimmung eines Ausweichpunkts im sicheren Abstand zum prädierten Konfliktpunkt zu lösen.

Wie beschrieben wird in dem untersuchten Szenario zwischen Radfahrern und Pkw die Rechts-vor-Links-Regelung berücksichtigt. In Fällen, in denen der Konfliktgegner Vorrang hat, wird die Reaktion durch das Anbremsen eines Haltepunkts appliziert.

Reaktionsmechanismus	M_j		
	PED	CYC	CAR
Ausweichpunkt	8	8	12
Vorfahrt gewähren	-	1	9
Reaktion durch IDM	4	42	23
Reaktion durch SKM	4	7	6
keine Reaktion	13 ^[i]	25 ^[ii]	12 ^[iii]

^[i] durch $t_{\text{conf}}^{ij} > t_{\text{LR}}$ ^[ii] durch Vorfahrt oder $t_{\text{conf}}^{ij} > t_{\text{LR}}$

Tabelle 6.12.: Reaktionsmechanismen Radfahrer

Durch die Modellierung von Fahrspuren werden Konflikte mit Verkehrsteilnehmern, die sich zum Zeitpunkt der Konfliktdetektion bereits im Bereich der Fahrspur befinden, für Radfahrer und Pkw als FOLLOWING klassifiziert (siehe Tab. 4.1). Diese Konflikte werden im Modell durch das Fahrzeugfolgemodell **Intelligent Driver Model (IDM)** behandelt.

Fälle, in denen keine Reaktion erfolgt, sind für Konflikte mit Fußgängern erneut durch $t_{\text{conf}}^{ij} > t_{\text{LR}}$ zu erklären. Für Pkw und andere Radfahrer wird in der Tabelle hingegen nicht differenziert, ob keine Reaktion erfolgt, weil der Konfliktzeitpunkt zu weit in der Zukunft liegt oder ob der Radfahrer die Fahrt aufgrund der Vorfahrtsregelung unverändert fortsetzt.

Reaktionsmechanismus	M_j		
	PED	CYC	CAR
Abbremsen	18 ^[i]	7 ^[ii]	23 ^[iii]
Reaktion durch IDM	3	67	108
Reaktion durch SKM	14	2	6
keine Reaktion	76 ^{[iii][iv]}	56 ^{[ii][iv]}	168 ^{[ii][iv]}

^[i] durch defensive Reaktion ^[ii] durch Vorfahrt ^[iii] durch Entscheidung ^[iv] durch $t_{\text{conf}}^{ij} > t_{\text{LR}}$

Tabelle 6.13.: Überblick über die Verteilung der Konfliktsituationen auf die Reaktionsmechanismen für Pkw.

Die Reaktionsmechanismen, die in der Simulation für Pkw zum Einsatz kommen (siehe Tab. 6.13), ähneln weitestgehend denen der Radfahrer. Lediglich für Konflikte mit Fußgängern wird zunächst eine Strategiewahl durch das Entscheidungsmodell von Pascucci u. a. (2018) getroffen. Die tabellierten 18 defensiven Reaktionen sind auch hier ausschließlich in der beschriebenen Situation zwischen zwei Pkw und einer Fußgängergruppe entstanden. Die entsprechende defensive Reaktion erfolgt durch Anbremsen eines dynamisch ermittelten Haltepunkts in sicherem Abstand zum Fußgänger.

6. Simulationen zur Modellvalidierung

Situationen, in denen ein Pkw auf einen Konflikt mit einem Fußgänger nicht reagiert, sind entweder auf die bewusste Entscheidung oder erneut den Fall $t_{\text{conf}}^{ij} > t_{\text{LR}}$ zurückzuführen. Eine derartige Entscheidung wird für Konflikte mit Radfahrern oder anderen Pkw nicht berücksichtigt, jedoch kann hier auch die Vorfahrtsregelung der Grund für eine ausbleibende Reaktion sein.

Analyse der Wegstrecken und Geschwindigkeiten

Die in diesem Abschnitt diskutierten Simulationsergebnisse wurden in Auszügen bereits von Trifunović u. a. (2021) publiziert.

Die Plausibilität von Simulationsergebnissen lässt sich anhand verschiedenster Kriterien bewerten. Laut FGSV (2006) ist unter anderem die korrekte Wiedergabe von Zeitbedarfswerten ein Indikator, ob ein mikroskopisches Modell zur Beantwortung verkehrsplanerischer Fragen herangezogen werden kann. Bei einem Modell, das eine derartig freie Routenwahl durch das System ermöglicht, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, ist eine ausschließliche Betrachtung der Reisezeiten jedoch nicht aussagekräftig. Daher werden in diesem Abschnitt die Verteilungen der zurückgelegten Wegstrecken sowie der durchschnittlichen Geschwindigkeiten jeweils für die Simulationsergebnisse und die aufgezeichneten Trajektorien aufgestellt und anschließend gegenübergestellt und bewertet. Auf einen zusätzlichen expliziten Vergleich der Reisezeiten wird hingegen verzichtet, da sich diese aus den gezeigten Daten ableiten lassen.

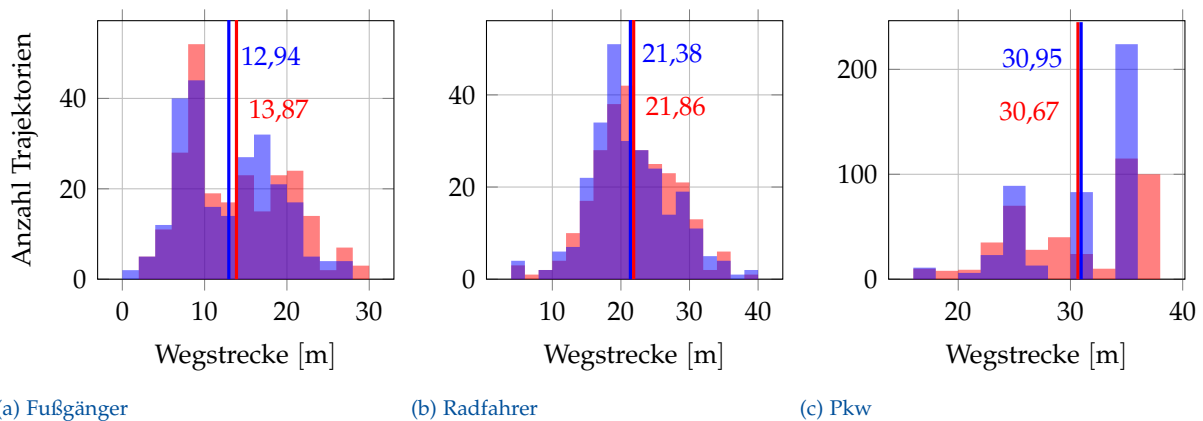


Abbildung 6.20.: Verteilungen der beobachteten und simulierten zurückgelegten Wegstrecken für Fußgänger, Radfahrer und Pkw mit Angabe der Mittelwerte. Blau: Simulationsergebnisse, rot: Beobachtungen.

In Abb. 6.20 sind die Verteilungen der zurückgelegten Wegstrecken getrennt nach Verkehrsarten dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Simulationsergebnisse für Radfahrer und Pkw in Hinblick auf die mittleren Wegstrecken eine gute Übereinstimmung mit den Realdaten zeigen. Die simulierten Fußgänger wählen jedoch im Durchschnitt 7 %

kürzere Wege durch den untersuchten Bereich der Kreuzung als die Beobachteten. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten (Abb. 6.21).

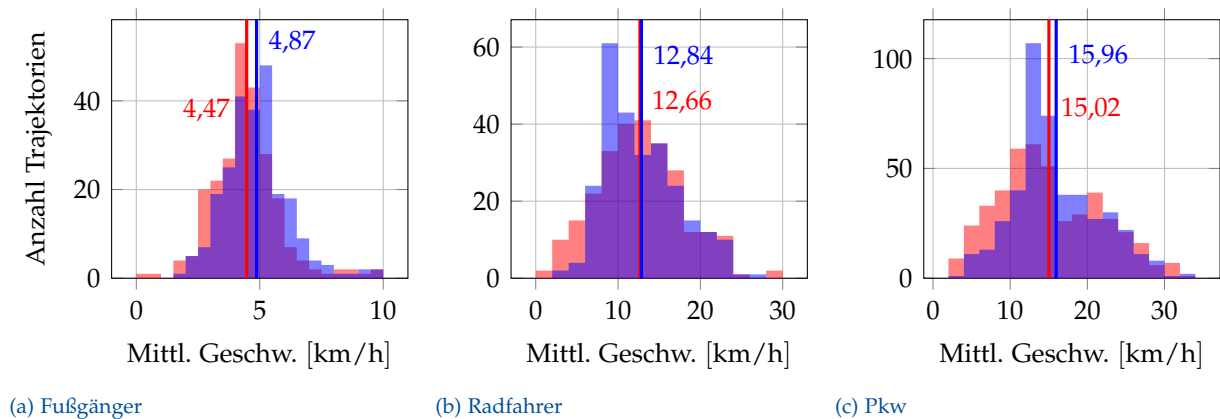


Abbildung 6.21.: Beobachtete und simulierte Geschwindigkeitsverteilungen für Fußgänger, Radfahrer und Pkw mit Angabe der Mittelwerte. Blau: Simulationsergebnisse, rot: Beobachtungen.

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Modelle für Routensuche und Ausweichverhalten im Konfliktfall für die Verkehrsarten Radfahrer und Pkw plausible Ergebnisse liefern. Um die Abweichung bei den Fußgängern erklären zu können, ist eine differenziertere Betrachtung notwendig.

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, wurde die untersuchte Kreuzung als Beispielszenario gewählt, da durch die Nähe zum Park trotz konventioneller Rechts-vor-Links-Regelung mit Wartepflicht für querende Fußgänger vielfach ein für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen typisches Verhalten zu beobachten ist. Die Tatsache, dass sich in der Realität somit eine Mischung aus regelkonformem und kooperativem Verhalten einstellt, wird vom Modell allerdings nicht berücksichtigt, sodass alle Verkehrsteilnehmer unter der Annahme interaktionsbasierten Verhaltens simuliert werden. Der Unterschied wird insbesondere bei der Betrachtung der Fußgänger, die die Kreuzung diagonal queren, deutlich.

Von den 243 betrachteten Fußgängern liegen bei 25 die Start- und Zielpunkte in nicht benachbarten Teilen der sicheren Zone. Die Routensuche des Modells bestimmt für diese 25 Fußgänger somit Wunschtrajektorien, die die Kreuzung diagonal queren. In den Realdaten ist eine derartige Routenwahl jedoch nur bei fünf der 25 Fußgänger zu beobachten, die restlichen 20 wählen eine Route mit zweifacher Querung durch einen dazwischen liegenden Teil der sicheren Zone. Die simulierten und beobachteten Trajektorien dieser 25 Fußgänger sind in Abb. 6.22 gegenübergestellt.

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, wählen die simulierten Fußgänger bei der diagonalen Querung der Kreuzung deutlich kürzere Routen. Die zugehörige Verteilung der zurückgelegten Wegstrecken ist in Abb. 6.23a dargestellt. Demgegenüber zeigt Abb.

6. Simulationen zur Modellvalidierung

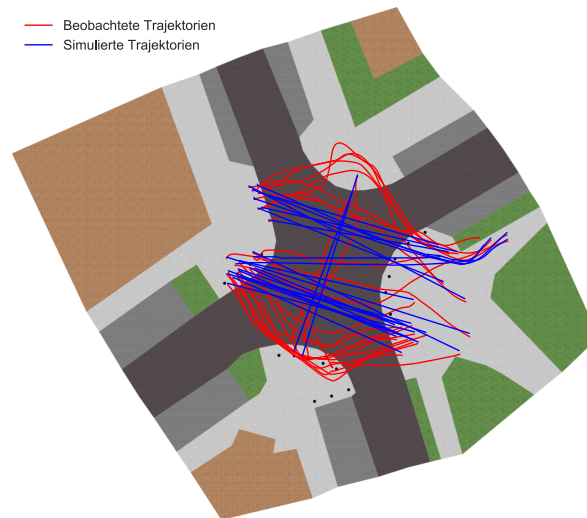
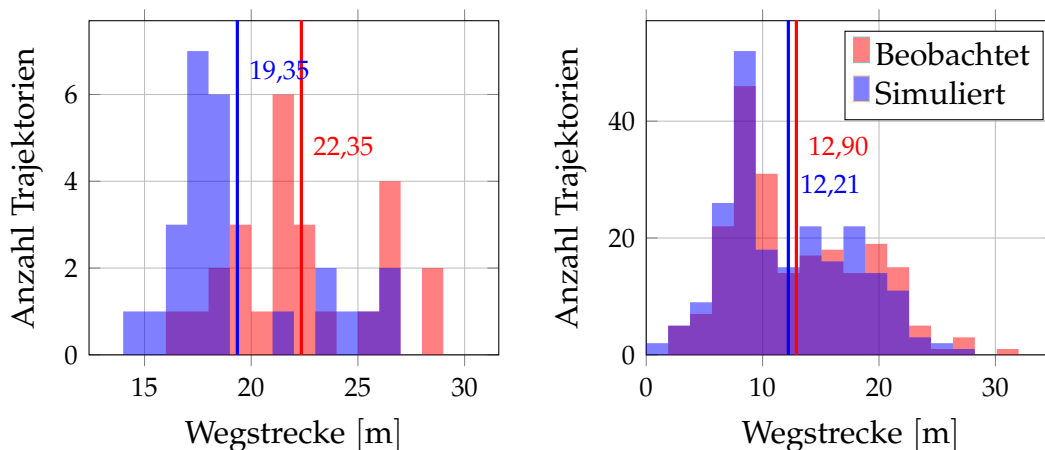


Abbildung 6.22.: Beobachtete und simulierte Trajektorien der diagonal kreuzenden Fußgänger

6.23b die Verteilung der Wegstrecken aller anderen Fußgänger mit Ausnahme der 25 diagonal Kreuzenden.



(a) Diagonal kreuzende Fußgänger.

(b) Fußgänger ohne diagonal Kreuzende.

Abbildung 6.23.: Getrennte Betrachtung der zurückgelegten Wegstrecken für kreuzende und nicht kreuzende Fußgänger. Simulierte Trajektorien sind blau, beobachtete rot dargestellt.

Die Gegenüberstellung der Mittelwerte zeigt, dass die in Abb. 6.20a dargestellte Abweichung der mittleren zurückgelegten Wegstrecken größtenteils auf die diagonalen Querungen zurückzuführen ist. Somit ist das Modell auch für Fußgänger in der Lage, realistische Trajektorien zu ermitteln, sofern das generelle Verhalten korrekt wiedergegeben wird.

Weiterhin ist bemerkenswert, dass der motorisierte Verkehr trotz des weitaus höheren Anteils diagonal kreuzender Fußgänger den Simulationsergebnissen zufolge kaum in

der Effizienz beeinträchtigt wird. Dies lässt den Schluss zu, dass eine hypothetische Konversion der Kreuzung von konventioneller Verkehrsregelung in einen ausgewiesenen Shared Space in Anbetracht der sich ohnehin bereits zum aktuellen Zeitpunkt einstellenden Verkehrsdynamik hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Knotenpunkts keinen Nachteil mit sich bringen würde.

7. Stochastische Modellierung der Wahrnehmung

In den Kapiteln 4 und 5 wurden Modellkomponenten für die Bewegung, Wahrnehmung, Konfliktdetektion, Entscheidung und Reaktion entwickelt. Die in Kap. 6 diskutierten Simulationsergebnisse zeigen, dass durch das Zusammenspiel dieser Modellkomponenten in den betrachteten Situationen und Szenarien die mikroskopische Simulation realistischer Verhaltensweisen ermöglicht wird. Jedoch sind die so erzielten Simulationsergebnisse deterministischer Natur.

Für die Reaktionsmechanismen wurden zahlreiche Parameter eingeführt, mit denen sich das individuelle Konfliktverhalten in gewissem Maße abbilden lässt. Diese Modellierung bedingt, dass sich ein Verkehrsteilnehmer in einander ähnlichen Situationen immer gleich verhält und suggeriert somit, dass beim Entwurf der vorhandenen Modellparameter sämtliche Einflussgrößen berücksichtigt wurden.

Eine Möglichkeit, diesen Effekten entgegenzuwirken, stellen stochastische Simulationen dar. Um eine derartige Modifikation am Modell vornehmen zu können, müssen zunächst die stochastisch zu modellierenden Größen bestimmt werden. Bei einer Modellierung nach den Kapiteln 4 und 5 setzt sich das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers im Konfliktfall aus der Wahrnehmung der Situation, der Entscheidung und der darauf aufbauenden Reaktion zusammen. In jeder dieser Modellkomponenten lassen sich eine Vielzahl an Parametern stochastisch modellieren. Exemplarisch dafür wird in diesem Kapitel ein Ansatz erarbeitet, der eine Fehlwahrnehmung modelliert, indem einzelne Parameter der Wahrnehmung mit einem zufälligen, zeitlich veränderlichen Fehler multipliziert werden. Dies wird im Folgenden als „verschmieren“ eines Parameters bezeichnet.

Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 7.1 ein Ansatz für die Modellierung gestörter Wahrnehmung mithilfe stochastischer Prozesse am Beispiel des Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses eingeführt. Der Ansatz wird in Abschnitt 7.2 an drei künstlichen Fallstudien demonstriert und qualitativ bewertet. In den untersuchten Szenarien werden Wahrnehmungsparameter verschiedener Verkehrsmodelle verschmiert. Dabei wird sowohl das in dieser Arbeit vorgestellte Modell als auch mit dem [Intelligent Driver Model \(IDM\)](#) ein bewährtes Fahrzeugfolgemodell verwendet, wodurch in diesem grundsätzlich als unfallfrei klassifizierten Modell Unfälle eingeführt werden. Abschnitt 7.3 liefert eine abschließende Bewertung der erzielten Ergebnisse sowie einen Ausblick.

Die in diesem Kapitel entwickelte Methodik entstand im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Versicherungs- und Finanzmathematik der Leibniz Universität Hannover. Insbesondere die Wahl des für die Modellierung verwendeten Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses ist hier auf die Expertise des Kooperationspartners im Bereich der stochastischen Modellierung zurückzuführen. Die gezeigten Fallstudien wurden im Rahmen dieser Zusammenarbeit bereits von Berkahn u. a. (2018, 2021) vorgestellt.

7.1. Methodik

Eine fehlerhafte Wahrnehmung kann auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein. Unter diesen muss grundsätzlich unterschieden werden, ob es sich um die menschliche Wahrnehmung oder um die eines (teil-)automatisierten Fahrzeugs handelt. In letzterem Fall erfolgt die Wahrnehmung durch technische Maßnahmen wie Kameras oder Sensoren, deren Wahrnehmung beispielsweise durch Defekte oder Verschmutzungen gestört sein kann.

Diese Störungen zu quantifizieren ist nicht Bestandteil dieses Kapitels, jedoch soll ein Ansatz entwickelt werden, der es ermöglicht, eine große Bandbreite verschiedenartiger Fehler abzubilden. Dazu wird in diesem Abschnitt mit dem Ornstein-Uhlenbeck-Prozess zunächst ein stochastischer Prozess vorgestellt, der sich für die Modellierung eines zeitlich veränderlichen Wahrnehmungsfehlers eignet. Dieser wird in Abschnitt 7.1.2 für eine vom zugrundeliegenden Verkehrsmodell unabhängige stochastische Modifikation beliebiger skalarer Größen verwendet.

7.1.1. Ornstein-Uhlenbeck-Prozess

Unter einem stochastischen Prozess wird in der Mathematik ein zufälliger Vorgang verstanden, der, im Gegensatz zu einer Zufallsvariablen, einer zeitlichen Veränderung unterliegt. Die Realisierung eines stochastischen Prozesses, also das Äquivalent zum Ausgang des Zufallsexperiments bei einer Zufallsvariablen, wird als *Pfad* bezeichnet.

Der Ornstein-Uhlenbeck-Prozess ist ein solcher stochastischer Prozess, bei dem sowohl die zeitliche Entwicklung (die sog. Indexmenge) stetig als auch die möglichen Zustände des Prozesses (die sog. Wertemenge) reellwertig sind. Formell ist er als Lösung des folgenden stochastischen Anfangswertproblems definiert:

$$d\varepsilon_t = \alpha(\beta - \varepsilon_t)dt + \sigma dW_t, \quad \varepsilon_0 = a$$

Dabei bezeichnet W_t einen Standard-Wienerprozess. Löst ein stochastischer Prozess ε_t dieses Anfangswertproblem, wird er als Ornstein-Uhlenbeck-Prozess mit dem Gleichge-

wichtsniveau $\beta \in \mathbb{R}$, der Diffusion $\sigma > 0$, der Steifigkeit $\alpha > 0$ und dem Anfangswert $a \in \mathbb{R}$ bezeichnet.

Um den Prozess im Rahmen einer zeitdiskreten Verkehrssimulation nutzen zu können, ist ein entsprechendes Lösungsverfahren für das Anfangswertproblem wünschenswert. Wie beispielsweise von Glasserman (2003) beschrieben ist unter Verwendung einer regelmäßigen zeitlichen Diskretisierung Δt die exakte Simulation¹ des Prozesses gemäß der folgenden iterativen Lösungsvorschrift möglich:

$$\varepsilon_{t_{i+1}} = h\varepsilon_{t_i} + \beta(1-h) + \sigma\sqrt{\frac{1-h^2}{2\alpha}}Z_{i+1} \quad (7.1)$$

Dabei ist $h := e^{-\alpha\Delta t}$ und (Z_i) eine Folge unabhängig standardnormalverteilter Zufallsvariablen, also $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$.

Die Parameter des Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses können anschaulich interpretiert werden. Bei einer Diffusion von $\sigma = 0$ wird der Prozess zu einer gewöhnlichen Differentialgleichung, deren Lösung vom Anfangswert a exponentiell mit $e^{-\frac{t}{\alpha}}$ gegen das Gleichgewichtsniveau β konvergiert, wobei die Annäherungsrate durch die Steifigkeit α bestimmt wird. Eine Diffusion $\sigma > 0$ führt die zufällige Störung dieser Konvergenz ein.

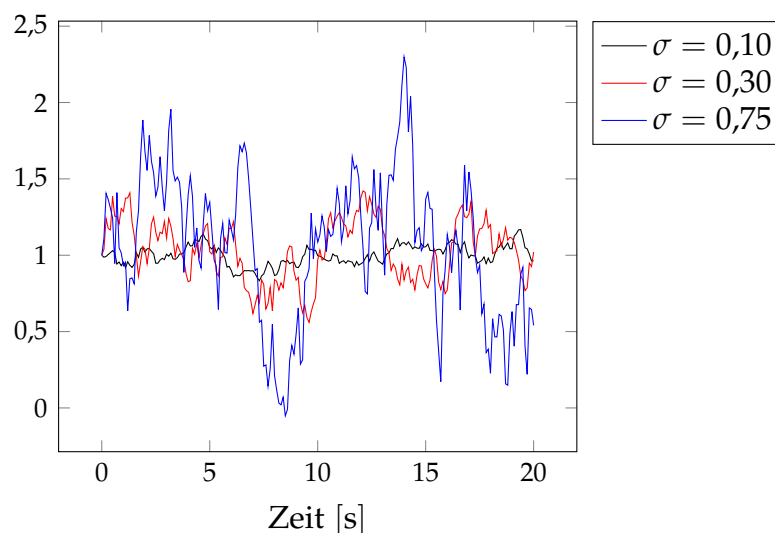


Abbildung 7.1.: Simulierte Pfade eines Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses (ε_t) für verschiedene σ mit $\alpha = 1$, $\varepsilon_0 = 1$, $\beta = 1$.

¹In diesem Kontext bezieht sich der Begriff der Simulation ausschließlich auf die Generierung eines konkreten Pfades des Prozesses und steht (noch) nicht mit der mikroskopischen Verkehrssimulation in Verbindung.

Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich der Ornstein-Uhlenbeck-Prozess daher für die Modellierung einer zeitlich schnell veränderlichen Fehlwahrnehmung, wie beispielsweise der menschlichen Wahrnehmung, die sich z. B. durch Fortbewegung oder Geschwindigkeitsänderung kontinuierlich ändern kann. In den Untersuchungen in Abschnitt 7.2 wird ausschließlich der Fall $a = \alpha = \beta = 1$ betrachtet. Dies führt dazu, dass der Prozess über den gesamten Betrachtungszeitraum gleichmäßig um sein Gleichgewichtsniveau fluktuiert. In Abb. 7.1 sind entsprechende Pfade für verschieden große Diffusionsparameter σ , die nach der Iterationsvorschrift aus Gl. 7.1 simuliert wurden, dargestellt.

7.1.2. Kopplung mit Verkehrsmodellen

Mikroskopische Verkehrsmodelle enthalten in der Regel verschiedene Modellgrößen, die als Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens zusammengefasst werden können, z. B. Abstände, eigene oder fremde Geschwindigkeiten oder Zeitspannen. Für die stochastische Modellierung der Wahrnehmung bietet es sich somit an, je nach Verkehrsmodell mindestens eine dieser Größen heranzuziehen.

Eine derartige Modellgröße, im Folgenden gemäß der in Abschnitt 2.1 erläuterten Notation als $x_{i(j)}(t)$ bezeichnet, wird durch das Produkt aus sich selbst und allen betrachteten Pfaden $\varepsilon_t^{i,k}$ ersetzt:

$$x_{i(j)}(t) := x_{i(j)}(t) \cdot \prod_k \varepsilon_t^{i,k}$$

Somit kann jeder Parameter gleichzeitig durch beliebig viele stochastische Prozesse verschmiert werden. Da diese durch Multiplikation kombiniert werden, können Situationen entstehen, in denen sich verschiedene Fehlerquellen gegenseitig ausgleichen oder potenzieren.

Bei der Auswahl eines stochastischen Prozesses muss beachtet werden, dass ein sinnvoller Parameterbereich, häufig vor allem eine Nichtnegativität, eingehalten wird. Weiterhin ist es oft wünschenswert, die Parameter des Prozesses so zu wählen, dass mit sinkender Diffusion σ ein Zustand erreicht wird, der dem ungestörten Fall entspricht. Für den Ornstein-Uhlenbeck-Prozess ist dies beispielsweise der Fall, wenn ein Gleichgewichtsniveau $\beta = 1$ verwendet wird.

Der Ansatz eignet sich in der dargestellten multiplikativen Form nur für die stochastische Modellierung orts- und zeitunabhängiger skalarer Größen. Für diese Größen wird ein relativer Fehler modelliert. Für absolute Fehler oder die Störung von Größen, auf die diese Eigenschaften nicht zutreffen, etwa absolute Zeitpunkte oder Positionen, ist eine entsprechende additive Modellierung denkbar.

In Bezug auf das in dieser Arbeit entwickelte Modell muss berücksichtigt werden, dass die gewöhnliche Soziale-Kräfte-Modell (SKM)-Differentialgleichung 3.1 durch Einsetzen von stochastischen Prozessen zu einer zufälligen gewöhnlichen Differentialgleichung (engl. *Random Ordinary Differential Equation*, RODE) wird. Die Handhabung dieses Differentialgleichungstyps im Kontext zeitdiskreter mikroskopischer Simulation wird von Berkahn u. a. (2021) diskutiert.

7.2. Fallstudien

In diesem Abschnitt werden drei künstliche Fallstudien untersucht, an denen der vorgestellte Ansatz zur stochastischen Modellierung der Wahrnehmung und seine Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse demonstriert werden. Im ersten Szenario wird die Konflikterkennung aus Abschnitt 4.2.3, hier angewandt auf die Abschätzung einer ausreichenden Zeitlücke für Linksabbieger, stochastisch modifiziert. Im zweiten Szenario werden die Geschwindigkeits- und Abstandsterme eines Fahrzeugfolgmodells verschmiert. Dieses Szenario zeigt, dass der entwickelte Ansatz nicht nur für das in dieser Arbeit entwickelte Modell konzipiert ist, sondern auch bei der Anwendung auf weitere Verkehrsmodelle zu plausiblen Simulationsergebnissen führt. Das dritte Szenario kombiniert beide Modelle.

In allen Szenarien werden jeweils Parameter, mit denen sich die Auswirkungen der Risikoaversion eines Verkehrsteilnehmers auf sein Fahrverhalten beschreiben lassen, sowie die Volatilität der zugrunde liegenden stochastischen Prozesse variiert. Für jede Kombination im gewählten Parameterbereich werden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Da durch die stochastische Modellierung der Wahrnehmung Verkehrsunfälle entstehen können, werden die Simulationsergebnisse hinsichtlich Unfallraten ausgewertet. In allen betrachteten Szenarien blockieren verunfallte Fahrzeuge zunächst ihre Fahrspur und werden nach einer exponentialverteilten Standzeit T_r aus dem System entfernt. Um eine Aussage darüber treffen zu können, inwieweit sich ein sicheres Fahrverhalten auf die Systemleistungsfähigkeit auswirkt, werden weiterhin die in der Simulation erzielten Verkehrsflüsse \hat{Q} analysiert.

Durch die Gegenüberstellung von Unfallrate und Fluss wird untersucht, ob sich mithilfe des vorgestellten Ansatzes in den betrachteten Szenarien ein Zusammenhang zwischen Effizienz und Sicherheit ermitteln lässt. Es ist zu erwarten, dass ein sicheres Fahrverhalten einerseits weniger Unfälle, andererseits aber geringere Flüsse und somit eine geringere Effizienz verursacht. Demgegenüber wirkt sich eine Blockade des Systems durch verunfallte Fahrzeuge ebenfalls negativ auf den Verkehrsfluss aus. Die Ergebnisse der drei Fallstudien wurden bereits von Berkahn u. a. (2018, 2021) mit Fokus auf die mathematischen Eigenschaften der modifizierten Modelle publiziert, wohingegen in dieser Arbeit die Anbindung des stochastischen Ansatzes an die bestehenden deterministischen Verkehrsmodelle im Vordergrund steht.

Fahrzeug als Startgeschwindigkeit die aktuelle Geschwindigkeit des zuletzt an der jeweiligen Quelle generierten Fahrzeugs.

Neben dem IDM ist für die Fahrzeuge auf der Geradeausspur aufgrund der Vorfahrtsituation keine weitere Konfliktbehandlung aktiv. Die links abbiegenden Fahrzeuge treffen auf Basis der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Konfliktdetektion die Entscheidung, ob der Abbiegevorgang unter Einhaltung des gewünschten Sicherheitsabstands d_s^{ij} zu allen entgegenkommenden Fahrzeugen möglich ist. Wenn dies nicht der Fall ist, erfolgt eine Reaktion durch **Anbremsen eines Wartepunkts** \vec{x}_{stop} (Lage siehe Abb. 7.2).

In die Konflikterkennung wird an zwei Stellen eine stochastische Störung mithilfe des in Abschnitt 7.1.2 eingeführten Ansatzes eingebracht. Zum einen wird die Einschätzung der eigenen Geschwindigkeit v_i mit einem stochastischen Prozess $\varepsilon_t^{i,1}$ verschmiert:

$$v_i := \varepsilon_t^{i,1} v_i$$

Dadurch ändert sich, aufgrund der Herleitung aus der zeitunabhängigen Wunschtrajektorie $\vec{x}_i(s)$ (siehe Abschnitt 4.1.2), auch die Einschätzung der zeitabhängigen Position $\vec{T}_i(t)$.

Weiterhin wird die Abschätzung der Distanzfunktion $d_{ij}(t)$ (Gl. 4.5) direkt mit dem stochastischen Prozess $\varepsilon_t^{i,2}$ verschmiert zu:

$$d_{ij}(t) = \varepsilon_t^{i,2} \left[\left| \vec{T}_i(t) - \hat{\vec{T}}_j(t) \right| - r_{i,j}(t) - r_{j,i}(t) \right]$$

Da die Trajektorie $\vec{T}_i(t)$ in die Abschätzung der Distanzfunktion einfließt, wird diese somit durch beide stochastischen Prozesse $\varepsilon_t^{i,1}$ und $\varepsilon_t^{i,2}$ beeinflusst.

Durch eine derartige stochastische Modifikation der Konflikterkennung entstehen in der Simulation Fehleinschätzungen der Situation. Diese können unterschiedliche Auswirkungen haben. Ein Unterschätzen der Zeitlücke führt zu unnötig großen Wartezeiten der Linksabbieger am Haltepunkt. Hierdurch ist eine Beeinträchtigung des maximal erreichbaren Verkehrsflusses zu erwarten. Ein Überschätzen der Zeitlücke führt zur Unterschreitung des gewünschten Sicherheitsabstands bis hin zum Zusammenstoß des Linksabbiegers mit dem Gegenverkehr. Beide Effekte werden im folgenden Abschnitt mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen genauer untersucht.

Simulationsergebnisse

Für die Monte-Carlo-Simulationen werden die stochastischen Störungen $\varepsilon_t^{i,1}$ und $\varepsilon_t^{i,2}$ jeweils durch einen Ornstein-Uhlenbeck-Prozess modelliert. Dabei wird ein Gleichgewichtsniveau $\beta = 1$ verwendet, was bei einer Diffusion von $\sigma = 0$ dem ungestörten Fall

7. Stochastische Modellierung der Wahrnehmung

entspricht. Sofern im Folgenden die Diffusion variiert wird, bezieht sich dies auf beide Prozesse gleichermaßen, sodass $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ gilt. Als Parameter zur Beschreibung des Fahrverhaltens dient der gewünschte Sicherheitsabstand d_s^{ij} . Für jede Parameterkombination werden 10 000 Durchläufe über einen Simulationszeitraum von 600 s durchgeführt. Die Messung der Verkehrsflüsse \hat{Q} beginnt nach einer Einschwingphase, die der Dauer einer ungestörten Fahrt auf der (längeren) Relation $O_2 - D_2$ entspricht. Verunfallte Fahrzeuge werden nach einer exponentialverteilten Wartezeit mit $\lambda_r = 1/300 \text{ s}^{-1}$ aus dem System entfernt, was einer mittleren Verweildauer von $\mu_r = 300 \text{ s}$ entspricht.

Zunächst wird der Einfluss der Diffusion σ untersucht. Dazu wird σ im Bereich von 0 bis 0,75 variiert, wobei ein fester Sicherheitsabstand $d_s^{ij} = 1,5 \text{ m}$ verwendet wird. In Abb. 7.3 sind die mittleren Verkehrsflüsse \hat{Q} den zugehörigen Unfallraten \hat{f}_{acc} gegenübergestellt.

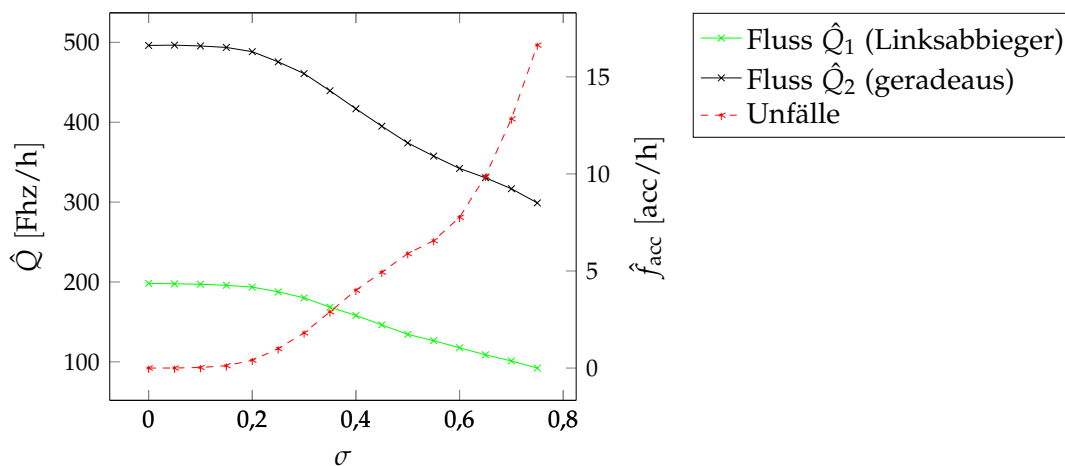


Abbildung 7.3.: Über 10 000 Simulationsdurchläufe gemittelte Verkehrsflüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von σ mit $d_s^{ij} = 1,5 \text{ m}$.

Es wird deutlich, dass mit steigender Diffusion auch die Unfallrate wächst. Gegenüber dem ungestörten Fall ist eine Beeinträchtigung der Flüsse auf beiden Relationen zu erkennen, die bei dieser Betrachtung ausschließlich auf ein blockiertes System durch verunfallte Fahrzeuge zurückzuführen ist. Um den Einfluss des Fahrverhaltens auf den Verkehrsfluss untersuchen zu können, wird der Sicherheitsabstand d_s^{ij} im Bereich von 0,5 bis 15 m variiert. Die jeweiligen Flüsse sind in Abb. 7.4 für verschiedene Diffusionen dargestellt.

Für alle untersuchten Diffusionen wird ersichtlich, dass die Unfallrate mit wachsendem Sicherheitsabstand sinkt. Anzumerken ist hier, dass auch der ungestörte Fall $\sigma = 0$ bei sehr kleinen Sicherheitsabständen nicht zu einer Unfallfreiheit führt. Dies ist auf die Konfliktdetektion zurückzuführen, die, wie in Kap. 4 herausgestellt, bewusst nicht vollständig fehlerfrei ist. Dadurch können kleine Fehler bei der Konfliktdetektion in Kombination mit sehr kleinen Sicherheitsabständen zu Unfällen führen. Bereits bei

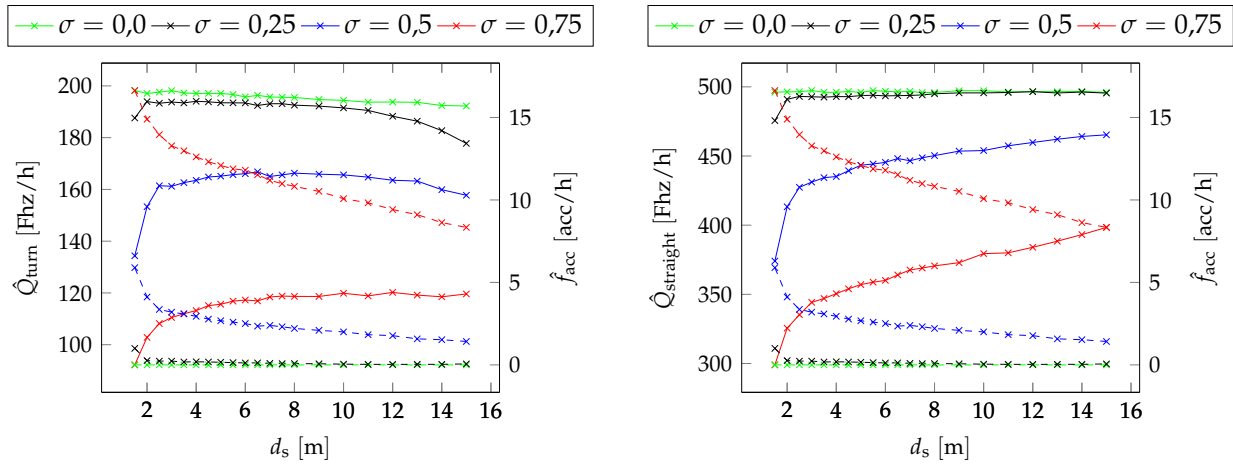
(a) Relation $O_1 - D_1$.(b) Relation $O_2 - D_2$.

Abbildung 7.4.: Flüsse für Linksabbieger (a) und geradeaus fahrende Fahrzeuge (b) mit den korrespondierenden Unfallraten in Abhängigkeit von d_s^{ij} , jeweils über 10 000 Simulationen für verschiedene Diffusionen σ gemittelt. Durchgängige Linien beschreiben den Fluss, gestrichelte die Unfallrate.

einem Sicherheitsabstand von $d_s^{ij} = 1,5$ m ist dieser Effekt jedoch im Rahmen dieser Simulationen nicht mehr zu beobachten.

Die Betrachtung des Flusses \hat{Q}_1 für die Linksabbieger (siehe Abb. 7.4a) zeigt, dass dieser sowohl mit wachsender Diffusion als auch mit wachsendem Sicherheitsabstand sinkt. Bei den größten betrachteten Diffusionen wird ersichtlich, dass sich jeweils ein Optimum für den Fluss ausbildet, das mit wachsender Diffusion bei einem größeren Sicherheitsabstand zu finden ist.

Ein derartiger Effekt ist für den Fluss \hat{Q}_2 der geradeaus fahrenden Fahrzeuge (siehe Abb. 7.4b) nicht zu erkennen. Da die IDM-Parameter bei dieser Untersuchung über alle Simulationen konstant bleiben, sind diese Fahrzeuge von der Variation des Sicherheitsabstands nur indirekt betroffen. Die mit kleinerem d_s^{ij} sinkenden Flüsse sind ausschließlich auf die damit einhergehenden steigenden Unfallraten zurückzuführen, die zu einer häufigeren Blockade des Systems durch verunfallte Fahrzeuge führen.

7.2.2. Szenario B: Fahrzeugfolgmodell

Das zweite Szenario dient zur Veranschaulichung der Übertragbarkeit der stochastischen Modellierung auf ein Verkehrsmodell, das nicht im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Daher wurde mit einem geraden, einspurigen Straßenabschnitt ein künstliches Szenario gewählt, dessen Verkehrsdynamik sich vollständig mit dem IDM abbilden lässt. Abbildung 7.5 zeigt einen Ausschnitt dieses Straßenabschnitts.

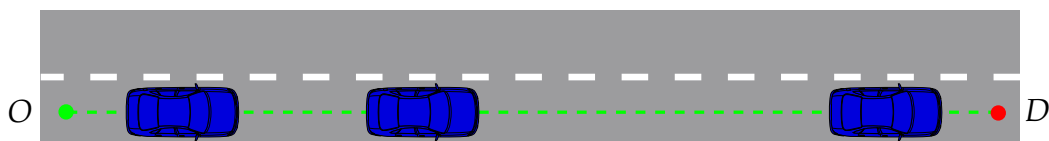


Abbildung 7.5.: Überblick über Szenario B.

Beschreibung

Das Szenario besteht aus einer einzigen Quelle-Senke-Relation, zwischen denen eine geradlinige Verbindung mit einer Länge von 2 km besteht. Die Generierung von Fahrzeugen an der Quelle erfolgt mit einer gleichmäßigen Zeitlücke, die aus der Soll-Verkehrsstärke Q von 1500 Fhz/h hervorgeht. Es werden die gleichen Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen bei der Generierung wie in [Szenario A](#) getroffen, wodurch auch in diesem Szenario eine geringere Generierungsrate als durch die Soll-Verkehrsstärke vorgegeben entstehen kann.

Die Bewegung zwischen Quelle und Senke wird mittels des [IDM](#) modelliert, das in Abschnitt 3.2.2 eingeführt wurde. Gegenüber der Formulierung von Treiber u. a. (2000) werden im Rahmen der stochastischen Modellierung jedoch einige Modifikationen vorgenommen. Neben der Einschätzung der eigenen Geschwindigkeit wird in diesem Szenario zusätzlich die Wahrnehmung der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs $v_{i-1}(t)$ sowie die Lücke $\Delta x_i(t)$ zu diesem mit jeweils einem stochastischen Prozess verschmiert.

Des Weiteren wird die maximale Bremsbeschleunigung eines Fahrzeugs i auf den (negativen) Wert a_{\min}^i begrenzt. Somit wird die IDM-Differentialgleichung 3.6 für die zeitabhängige Beschleunigung $a_i(t)$ modifiziert zu:

$$a_i(t) = \max \left\{ a_{\max}^i \cdot \left(1 - \left(\frac{\varepsilon_t^{i,1} v_i(t)}{v_i^0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(\varepsilon_t^{i,1} v_i(t), \Delta v_i(t))}{\Delta x_i(t)} \right)^2 \right), a_{\min}^i \right\}$$

Dabei beschreibt $\Delta v_i(t)$ die wahrgenommene Annäherungsrate und $\Delta x_i(t)$ die Einschätzung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug, die wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} \Delta v_i(t) &= \varepsilon_t^{i,1} v_i(t) - \varepsilon_t^{i,2} v_{i-1}(t), \\ \Delta x_i(t) &= \varepsilon_t^{i,3} (x_{i-1}(t) - x_i(t) - l_{i-1}) \end{aligned}$$

Durch die zeitlich stetig veränderliche Fehlwahrnehmung entsteht im Gegensatz zum IDM kein Gleichgewichtszustand mit regelmäßigen Abständen zwischen den Fahrzeugen. Abb. 7.5 zeigt ein charakteristisches Bild der unregelmäßigen Abstände, die aus der kontinuierlichen Anpassung des Fahrverhaltens an die aktuell wahrgenommenen Abstände resultieren. In Kombination mit der Begrenzung der Bremsbeschleunigung

ist bei entsprechenden Parameterkombinationen das Auftreten von Auffahrunfällen zu erwarten.

Simulationsergebnisse

Auch in diesem Szenario werden die Störungen $\varepsilon_t^{i,1}$, $\varepsilon_t^{i,2}$ und $\varepsilon_t^{i,3}$ jeweils durch voneinander unabhängige Ornstein-Uhlenbeck-Prozesse mit dem Gleichgewichtsniveau $\beta = 1$ und den Diffusionsparametern $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ modelliert. Das Fahrverhalten wird bei den folgenden Untersuchungen mit dem Parameter T , der im IDM die angestrebte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug modelliert, variiert. Jede untersuchte Parameterkombination wird 1000 Mal über einen Simulationszeitraum von 600 s simuliert, wobei der erreichte Fluss \hat{Q} und die Unfallrate \hat{f}_{acc} gemessen wird. Für die exponential verteilte Verweildauer verunfallter Fahrzeuge wird ein Verteilungsparameter $\lambda_r = 1/60 \text{ s}^{-1}$ verwendet.

In Abb. 7.6 sind die so erzielten Simulationsergebnisse mit variierendem T für verschiedene Diffusionen σ aufgetragen. Der Fall $\sigma = 0$ stellt dabei den unfallfreien Fall dar und entspricht, abgesehen von der Beschränkung der Bremsbeschleunigung, der ungestörten Formulierung des IDM. In diesem Fall werden die größten Flüsse erzielt, je kleiner T gewählt wird.

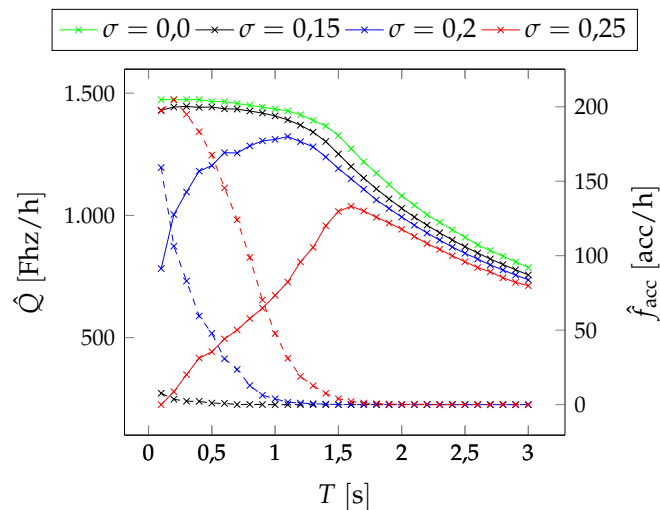


Abbildung 7.6.: Flüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von T , jeweils über 1000 Simulationen für verschiedene Diffusionen σ gemittelt. Durchgängige Linien beschreiben den Fluss, gestrichelte die Unfallrate.

Im Vergleich mit den Kurven für $\sigma > 0$ wird ersichtlich, dass der Fluss sinkt, je größer die Diffusion ist. Weiterhin bildet sich auf jedem Diffusionsniveau ein maximaler Fluss aus. Unterhalb des zugehörigen Werts für T wird der Fluss vor allem durch verunfallte Fahrzeuge beschränkt, oberhalb durch die Kapazität des Systems infolge des

7. Stochastische Modellierung der Wahrnehmung

wachsenden Sicherheitsabstands. Dementsprechend befindet sich der maximale Fluss bei einem größeren Sicherheitsabstand, je größer die Diffusion ist. Über das Maximum hinaus nähert sich der Fluss für große Werte von T dem ungestörten Fall an.

Um die Entwicklung des maximalen Flusses in Abhängigkeit des Wahrnehmungsfehlers untersuchen zu können, wird in Abb. 7.7 die Diffusion für verschiedene konstante Werte von T untersucht. Erwartungsgemäß führt eine höhere Diffusion für alle betrachteten T zu höheren Unfallraten und geringerem Fluss. Darüber hinaus wird ein Effekt deutlich, der in der vorigen Betrachtung noch nicht zu erkennen war. In den untersuchten Parameterkombinationen bildet sich näherungsweise ein Schnittpunkt der Kurven aus. Dieser Schnittpunkt lässt den Schluss zu, dass bei der Modellierung von spurgebundenem Verkehr mit dem IDM eine Schwelle für das Ausmaß gestörter Wahrnehmung existiert, oberhalb derer eine Fahrweise mit größeren Sicherheitsabständen zu einer höheren Effizienz führt.

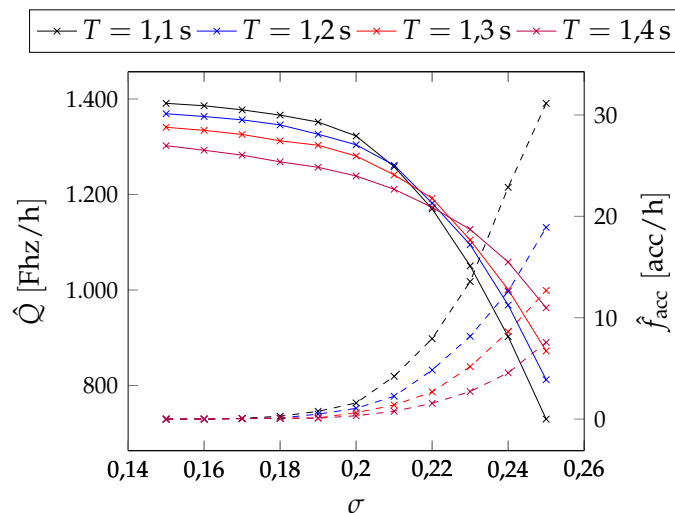


Abbildung 7.7.: Flüsse und Unfallraten in Abhängigkeit von σ , jeweils über 1000 Simulationen für verschiedene Zeitlücken T gemittelt. Durchgängige Linien beschreiben den Fluss, gestrichelte die Unfallrate.

7.2.3. Szenario C: Kreuzung mit Rechts-vor-links-Vorfahrtsregelung

Im letzten untersuchten Szenario werden zum einen die Modelle aus den beiden anderen Szenarien kombiniert, zum anderen wird darüber hinaus untersucht, wie sich eine ungleichmäßige Verteilung der Fehlwahrnehmung über die Fahrzeuge auswirkt. Wie in der Übersichtsskizze in Abb. 7.8 dargestellt wurde dafür eine Kreuzung mit jeweils einem Fahrstreifen in jeder Fahrtrichtung gewählt.

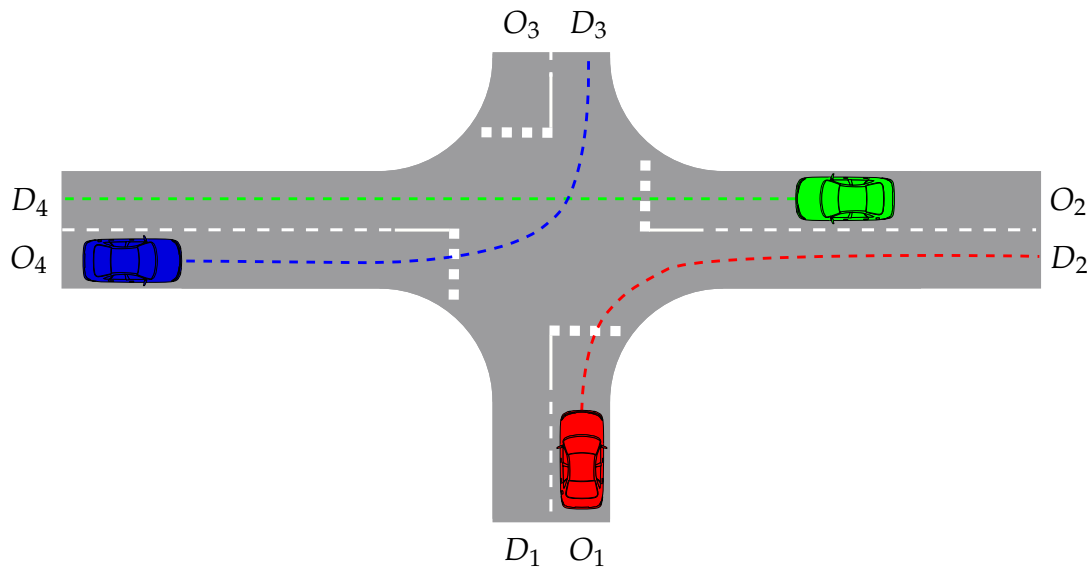


Abbildung 7.8.: Überblick über Szenario C.

Beschreibung

Das Szenario besteht aus jeweils einer Quelle und einer Senke in jeder Richtung der Kreuzung. Von jeder der vier Quellen ausgehend ist es möglich, dass Fahrzeuge entweder geradeaus fahren oder links oder rechts abbiegen. Somit werden insgesamt zwölf Relationen berücksichtigt. An jeder Quelle werden Fahrzeuge mit einer aus der Soll-Verkehrsstärke von 150 Fhz/h abgeleiteten exponentialverteilten Zeitlücke nach der gleichen Generierungsvorschrift wie in [Szenario A](#) erzeugt. Darüber hinaus wird für jedes generierte Fahrzeug eine der drei möglichen Relationen zufällig und gleichverteilt gewählt.

Durch die modellierten baulichen Gegebenheiten in Verbindung mit der Gesamtverkehrsstärke über alle Relationen von 600 Fhz/h lässt sich die betrachtete Kreuzung als „Quartierstraße“ klassifizieren, für die nach geltenden Richtlinien (RASt 2006) eine Rechts-vor-links-Regelung empfohlen wird. Dementsprechend gibt es zwei grundverschiedene Konstellationen, in denen ein Fahrzeug V_i einem anderen Fahrzeug V_j Vorfahrt gewähren muss:

1. V_i befindet sich auf einer Geradeaus- oder Linksabbiegerrelation und V_j nähert sich von rechts
2. V_i befindet sich auf einer Linksabbiegerrelation und V_j nähert sich frontal

Für alle anderen Konstellationen wird angenommen, dass der Platz auf der Kreuzung ausreicht, um keinen Konflikt entstehen zu lassen (bspw. gleichzeitiges voneinander Linksabbiegen entgegenkommender Fahrzeuge). Die Konstellationen in Fall 1 werden

mit perfekter Wahrnehmung modelliert, die Fehleinschätzung einer derartigen Vorfahrtssituation ist dementsprechend nicht berücksichtigt. Fall 2 entspricht Szenario A und wird in diesem Szenario gleichartig modelliert.

Ungeachtet der Relation werden alle Fahrzeuge nach dem modifizierten IDM wie in Szenario B beschrieben bewegt. Im Gegensatz zu Szenario B lässt sich in diesem Szenario das vorausfahrende Fahrzeug jedoch nicht allein durch die Generierungsreihenfolge bestimmen, da es sich durch Abbiegevorgänge ändern kann. Stattdessen wird das vorausfahrende Fahrzeug während der Simulation laufend mithilfe der Wahrnehmung gemäß Abschnitt 4.2 ermittelt.

Bei der Störung der Konflikterkennung werden wie beschrieben zwei und für das Fahrzeugfolgemodell drei Parameter mithilfe eines stochastischen Prozesses gestört. Da die eigene Geschwindigkeit in beiden Modellen benötigt wird, wird die Wahrnehmung jedes Fahrzeugs in diesem Szenario insgesamt durch vier stochastische Prozesse $\varepsilon_t^{i,k}$ gestört.

Weiterhin wird für dieses Szenario eine Durchdringungsrate ρ für die perfekte Wahrnehmung eingeführt. Sie beschreibt den Anteil der Fahrzeuge, deren Wahrnehmung nicht stochastisch modifiziert wird. Bei der Generierung wird einem Fahrzeug mit der Wahrscheinlichkeit ρ eine Diffusion von $\sigma = 0$ zugeordnet.

Simulationsergebnisse

Wie in den anderen Szenarien werden die vier stochastischen Prozesse $\varepsilon_t^{i,k}$ für jedes Fahrzeug mit der jeweils gleichen Diffusion simuliert. Die Parameter d_s^{ij} und T modellieren die gewünschten Sicherheitsabstände beim Abbiegen bzw. zum Vorausfahrenden. Zunächst wird der homogene Fall mit $\rho = 0$ und einer Diffusion von $\sigma = 0,2$ untersucht. Dazu werden sowohl d_s^{ij} als auch T variiert und für jede Parameterkombination 20 000 Simulationsdurchläufe über 600 s durchgeführt. Die Unfallraten für den untersuchten Parameterbereich sind in Abb. 7.9 dargestellt.

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die Unfallrate mit wachsenden Sicherheitsparametern d_s^{ij} bzw. T sinkt. Wird jeweils einer der Sicherheitsparameter isoliert betrachtet, was sich anschaulich durch einen gedachten Schnitt durch die flächige Darstellung in Abb. 7.9 erzielen lässt, ergeben sich Kurvenverläufe, die qualitativ den Ergebnissen aus den vorherigen Szenarien entsprechen. Dies lässt den Schluss zu, dass sich die beiden Unfallursachen (Abbiege- und Auffahrunfälle) nahezu linear überlagern.

Als Indikator für die Effizienz ist in Abb. 7.10 der akkumulierte Verkehrsfluss auf allen Relationen in Abhängigkeit der Sicherheitsparameter aufgetragen.

Wie in den anderen Szenarien bildet sich ein Bereich maximalen Flusses aus. Dieser Bereich stellt das Optimum zwischen der temporären Blockade des Systems durch hohe

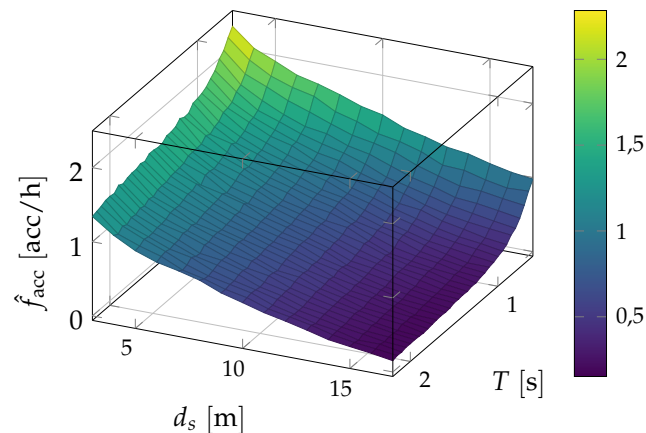


Abbildung 7.9.: Unfallraten in Abhängigkeit von d_s und T für $\sigma = 0,2$ und $\rho = 0$, jeweils über 20 000 Simulationsdurchläufe gemittelt.

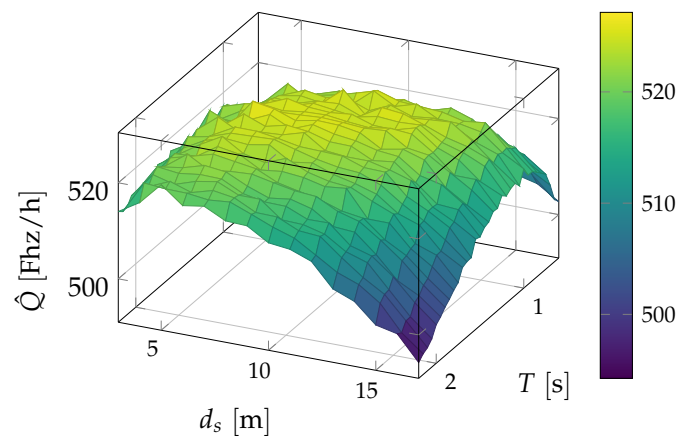


Abbildung 7.10.: Flüsse in Abhängigkeit von d_s und T für $\sigma = 0,2$ und $\rho = 0$, jeweils über 20 000 Simulationsdurchläufe gemittelt.

Unfallraten auf der einen Seite und der negativen Beeinträchtigung der Effizienz durch eine defensive Fahrweise auf der anderen Seite dar.

Die gezeigten Simulationsergebnisse wurden ohne Variation der Diffusion erzielt. Weiterführende Darstellungen ähnlicher Ergebnisse für verschiedene Diffusionen sowie eine anteilige Betrachtung beider Unfallursachen wurden von Berkahn u. a. (2021) gezeigt.

Abschließend wird die Durchdringungsrate ρ untersucht, die den Anteil an Fahrzeugen mit ungestörter Wahrnehmung beschreibt. Dazu werden die gleichen Parameterbereiche für d_s^{ij} und T wie im homogenen Fall jeweils mit Durchdringungsraten von 10, 50 und 90 % simuliert. Abb. 7.11 zeigt die resultierenden Unfallraten und Flüsse.

Über den gesamten Parameterbereich zeigt sich, dass die Unfallraten (siehe Abb. 7.11a)

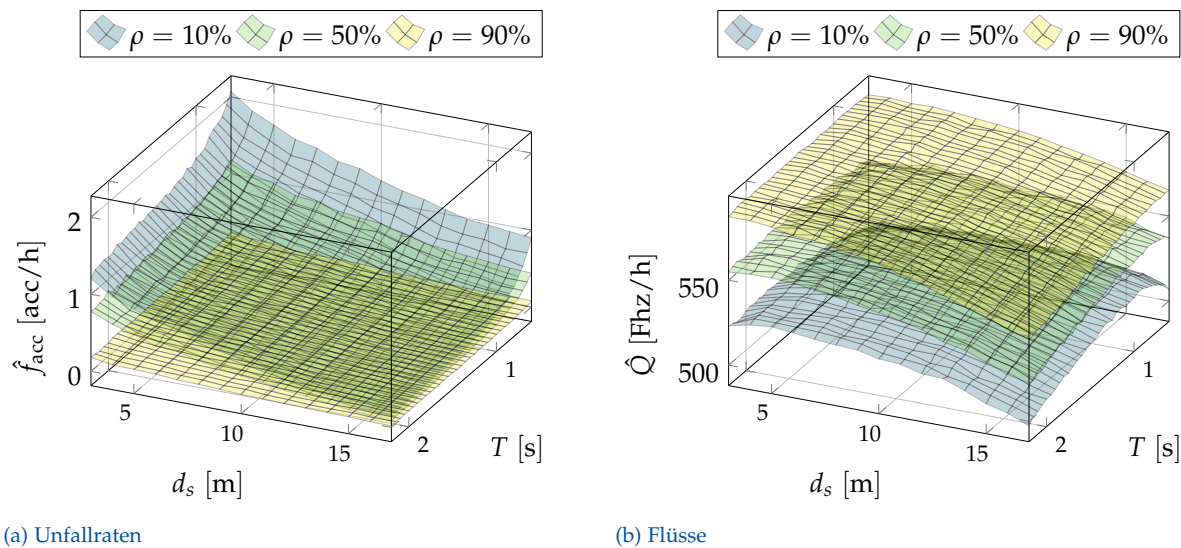


Abbildung 7.11.: Unfallraten und Flüsse in Abhängigkeit von d_s und T für $\sigma = 0,2$, jeweils für verschiedene Durchdringungsraten ρ über 20 000 Simulationdurchläufe gemittelt.

mit einem höheren Anteil an Fahrzeugen mit perfekter Wahrnehmung sinken. Diese Differenz der Unfallraten zwischen den Durchdringungsraten wird kleiner, je höher die Sicherheitsparameter gewählt werden. Im Umkehrschluss wird in Abb. 7.11b deutlich, dass sich mit höherer Durchdringungsrate größere Flüsse erzielen lassen. Die Abhängigkeit des Flusses zu den Sicherheitsparametern ist jedoch deutlich weniger ausgeprägt als die der Unfallraten. Dies lässt den Schluss zu, dass die Effizienzsteigerung durch einen größeren Anteil perfekter Wahrnehmung nicht allein durch das Ausbleiben von Unfällen erklärt werden kann, sondern eine verbesserte Wahrnehmung insgesamt zu einem flüssigeren Verkehrsablauf beiträgt.

7.3. Bewertung und Ausblick

In diesem Kapitel wurde ein Ansatz für die Modellierung einer gestörten Wahrnehmung auf der Basis stochastischer Prozesse entwickelt, der sich unter Beachtung der genannten Einschränkungen unabhängig vom zugrundeliegenden Verkehrsmodell anwenden lässt, was an verschiedenen künstlichen Fallstudien demonstriert wurde. Die Simulationsergebnisse dieser Fallstudien haben qualitativ gezeigt, dass der Ansatz geeignet ist, eine Aussage über den Zusammenhang von Effizienz und Sicherheit treffen.

Bezug nehmend auf die simulationsbasierte Analyse gemeinsam genutzter Verkehrsflächen, die trotz des kleinen Exkurses in diesem Kapitel nach wie vor den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, sind für zukünftige Arbeiten verschiedene Erweiterungen sinnvoll. Zunächst sollte der Ansatz auf weitere Verkehrsarten angewandt werden. Eine Situation, in der eine fehlerhafte Wahrnehmung häufig die Ursache darstellt, sind

beispielsweise Unfälle zwischen Fußgängern und Kraftfahrzeugen beim Abbiegen. Darüber hinaus wäre neben der Störung der Konflikterkennung wie in Szenario A die stochastische Modellierung weiterer Größen, insbesondere im Zusammenhang mit der Entscheidung und der Reaktion, interessant. Des Weiteren kann die stochastische Modellierung in zukünftigen Arbeiten helfen, einen weiteren Aspekt zu untersuchen, der bislang noch nicht berücksichtigt wurde: Führt in Szenarien, die nach der deterministischen Simulation als unproblematisch eingestuft werden, bereits eine geringe Volatilität zu einer Häufung von Unfällen, kann dies ein Indikator für das Auftreten sehr riskanter Situationen sein. Die stochastische Modellierung kann somit dazu beitragen, die Robustheit einer Reaktion gegenüber Fehleinschätzungen zu bewerten.

Die Plausibilität der Simulationsergebnisse konnte bisher nur qualitativ bewertet werden, zudem wurden für die Simulationen bewusst hohe Volatilitäten gewählt, die zu unrealistisch hohen Unfallraten führen. Diese waren für die dargestellten Untersuchungen erforderlich, um die Implikationen der stochastischen Modellierung mit einem vertretbaren Rechenaufwand im Rahmen der Monte-Carlo-Simulationen verstehen zu können. Für weitergehende Untersuchungen wäre daher eine Kalibrierung zwingend erforderlich, die wiederum umfangreiche Realdaten benötigt. Als Zielgrößen für die Kalibrierung werden zum einen Daten über Unfallursachen und -häufigkeiten benötigt, zum anderen über die temporären Auswirkungen auf die Effizienz in derartigen Situationen. Zudem würden Quantifizierungen sowohl der menschlichen Fehl Wahrnehmung als auch technischer Fehlerursachen bei der Modellierung der zeitlichen Entwicklung der Wahrnehmungsfehler nützen.

Während die Messung von Verkehrseffizienz im Verkehrsingenieurwesen ein gebräuchliches Werkzeug ist, werden Unfalldaten vor allem im Bereich der Unfallforschung und im Versicherungswesen erhoben. Die Kalibrierung eines Modells, das einen Zusammenhang zwischen derartigen Größen plausibel wiedergeben soll, erfordert somit eine enge Zusammenarbeit dieser Disziplinen. Darüber hinaus erfordern die mit realistischen Daten einhergehenden geringeren Unfallraten effizientere Simulationsmethoden.

In allen betrachteten Szenarien konnten jeweils hinsichtlich eines maximalen Verkehrsflusses optimale Sicherheitsparameter in Abhängigkeit des Ausmaßes der Störung ermittelt werden. Diese können allerdings nur erreicht werden, wenn eine gewisse Unfallrate dabei in Kauf genommen wird. Eine derartige Abwägung impliziert ethische Betrachtungen, die an anderer Stelle ausführlich diskutiert und bewertet werden müssen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde, aufbauend auf dem [Soziale-Kräfte-Modell \(SKM\)](#), ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell entwickelt, das die Bewegungen der drei Verkehrsarten Fußgänger, Radfahrer und Pkw auf gemeinsam genutzten Mischverkehrsflächen abbildet. In diesem Kapitel werden zunächst das Vorgehen bei der Modellierung und die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Diskussion verschiedener sinnvoller Anknüpfungspunkte für weitergehende Forschungstätigkeiten.

Zusammenfassung

Die Datengrundlage für die Modellierung stellen die im Rahmen des Forschungsprojekts (siehe Abschnitt [1.3.3](#)) erhobenen Beobachtungen dar. Diese wurden in Kapitel [2](#) zunächst beschrieben und hinsichtlich typischer Bewegungsmuster analysiert. Auf dieser Grundlage wurde ermittelt, welche Bewegungsmuster bereits durch bestehende Modelle abgebildet werden können und für welche Verhaltensweisen neue Modellierungsansätze erforderlich sind. Als notwendige Modellerweiterungen wurden die drei übergeordneten Aspekte Bewegung, Konflikterkennung und Reaktionsverhalten identifiziert.

In Kapitel [4](#) wurde das [SKM](#) in Hinblick auf realistischere Bewegungsmuster für die drei Verkehrsarten modifiziert. Diese Modifikation besteht darin, den vorhandenen Antriebsterm durch zwei neu formulierte Kräfte zu ersetzen, die, zumindest ohne weitere Einflüsse, einen Verkehrsteilnehmer entlang einer vorgegebenen Trajektorie bewegen. Die Wunschtrajektorie für den ungestörten Fall wurde dabei mittels eines Klothoidenzugs modelliert, die Formulierung der neuen Kräfte im modifizierten [SKM](#) erfolgte jedoch unabhängig von der Kurvendarstellung.

Diese Erweiterung des [SKM](#) um vorgeplante Trajektorien ermöglicht die Modellierung einer Konflikterkennung. In Abschnitt [4.2](#) wurde eine Bewegungsprädiktion durch Extrapolation beobachteter Aufenthaltspunkte beschrieben. Die extrapolierten Trajektorien bilden eine subjektive Einschätzung der Situation durch jeden simulierten Verkehrsteilnehmer ab und ermöglichen es, bevorstehende Konflikte durch den Vergleich mit der eigenen Wunschtrajektorie zu erkennen. Für die Extrapolation wurde ein Ansatz auf Basis von Lagrange-Kurven gewählt. Der modulare Aufbau des Modells ermöglicht

jedoch auch an dieser Stelle die Verwendung beliebiger Kurvendarstellungen bis hin zu gänzlich anderen Extrapolationsmethoden wie eines Kalman-Filters.

Das Resultat eines erkannten Konflikts ist in der Regel ein vorausschauendes Verhalten, mit dem die Einhaltung eines ausreichend großen Abstands zu allen anderen Verkehrsteilnehmern erreicht werden soll. Erweiterungen des SKM, um ein derartiges Verhalten abbilden zu können, wurden in Kapitel 5 entwickelt. Hierzu wurde zunächst eine Entscheidungsebene auf Basis des von Pascucci u. a. (2018) kalibrierten Entscheidungsmodells in das Modell integriert. Die auf dieser Ebene getroffene Entscheidung wird in Form verschiedener Reaktionsmechanismen in das modifizierte SKM eingebunden. Die entwickelten Mechanismen modellieren ein vorausschauendes Verhalten entweder mittels neu formulierter, situationsabhängiger Kräfte, die eine sukzessive Ausweichbewegung und Anpassung der Geschwindigkeit hervorrufen, oder durch Bestimmen einer Ausweichtrajektorie. Abschließend wird ein Ansatz zur Aggregation einer Reaktion für Situationen, in denen Konflikte mit mehr als einem anderen Verkehrsteilnehmer bestehen, entwickelt.

Mit der Implementierung dieses Modells im Rahmen der Simulationsumgebung **Multi-Modal Intersection Simulation (MODIS)** wurden verschiedene Szenarien modelliert und simuliert. In Abschnitt 6.1 wurden zunächst Simulationsergebnisse für einzelne Konfliktsituationen gezeigt und diskutiert, um die entwickelten Reaktionsmechanismen mit entsprechenden beobachteten Situationen zu vergleichen. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell bei Verwendung passender Konflikt- und Reaktionsparameter in den untersuchten Situationen qualitativ und hinsichtlich Geschwindigkeitsprofilen und zurückgelegter Distanzen auch quantitativ in der Lage ist, die beobachteten Verhaltensweisen zu replizieren. Darüber hinaus wurde mit der Simulation der Verkehrsnachfrage eines Zeitraums von 60 min in Abschnitt 6.2 demonstriert, dass das Modell auch teilweise enge zeitliche Abfolgen verschiedener Konfliktsituationen hinsichtlich situationsübergreifender Kriterien wie Geschwindigkeits- oder Reisezeitverteilungen plausibel abbilden kann.

In Kapitel 7 wurde die bisherige deterministische Modellierung mithilfe stochastischer Prozesse um die Berücksichtigung von zufälligen Modellgrößen erweitert. Exemplarisch für die stochastische Modellierung bilden die stochastischen Prozesse in den gezeigten Fallbeispielen eine imperfekte Wahrnehmung ab. Jedoch ist der entwickelte Ansatz so universell gehalten, dass er zum einen zur stochastischen Modellierung beliebiger Größen verwendet werden kann und zum anderen nicht auf das in dieser Arbeit entwickelte Modell beschränkt ist, wie durch die gezeigten Fallbeispiele anhand der stochastischen Modellierung einzelner Parameter des **Intelligent Driver Model (IDM)** demonstriert wurde.

Ausblick

Kalibrierung der Reaktionsmechanismen

Von Schiermeyer u. a. (2016) wurde bereits die Kalibrierung von Reaktionsparametern mithilfe eines genetischen Algorithmus beschrieben. Exemplarisch wurden Parameter für die **Trajektorienbasierte Ausweichkraft** durch Minimierung des räumlich-zeitlichen Unterschieds zwischen simulierten und beobachteten Trajektorien bestimmt, die dementsprechend auch in den Simulationen in Kap. 6 verwendet wurden. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung zeigen einerseits, dass mit einer Kalibrierung über verschiedene Situationen mit gleichartiger Reaktion hinweg ein Parametersatz gefunden werden kann, der für alle betrachteten Situationen zufriedenstellende Simulationsergebnisse ermöglicht. Andererseits birgt die gewählte Methodik die Gefahr, Simulationsergebnisse fälschlicherweise schlecht zu bewerten, hervorgerufen etwa durch eine abweichende Ausweichrichtung bei ansonsten realistischem Modellverhalten. Dementsprechend sollte für eine weitergehende Kalibrierung zunächst eine Zielfunktion formuliert werden, mit der sich die Plausibilität von Simulationsergebnissen anhand anderer Kriterien, wie beispielsweise des Reaktionszeitpunkts, des minimalen Abstands oder Geschwindigkeitsprofilen, bewerten lässt.

Darüberhinaus wäre in diesem Kontext auch eine Untersuchung der geografischen Übertragbarkeit der modellierten Verhaltensweisen interessant. Bei der Analyse des Konfliktverhaltens im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Knotenpunkte in Braunschweig und Hamburg untersucht. Eine größere geografische Streuung könnte hier Aufschlüsse darüber ergeben, ob sich regionale Unterschiede der Verhaltensweisen allein durch Anpassung der Reaktionsparameter abbilden lassen oder ob die Modellierung gänzlich anderer Reaktionsmechanismen erforderlich wäre.

Ausweitung der Entscheidungsebene

Neben den Reaktionsmechanismen sollte auch die Entscheidungsebene auf die bisher nicht untersuchten **Konflikttypen**, insbesondere diejenigen, in die Radfahrer involviert sind, ausgeweitet werden. Während zunächst eine statistische Auswertung gemäß der von Pascucci (2020) entwickelten Methodik nahe liegt, wäre darüber hinaus eine weitergehende Untersuchung der Einflussgrößen für die Strategiewahl interessant. Durch Einbeziehen der Verkehrspsychologie könnte in diesem Zusammenhang ein vertieftes Verständnis über die Motivationen der Strategiewahl erlangt werden. Beispielsweise kann in den betrachteten Daten mehrfach beobachtet werden, dass Fußgänger im Konfliktfall eine Ausweichbewegung wählen, anstatt stehenzubleiben und zu warten, was einen Umweg bei gleicher Reisezeit bedeutet. Diese Beobachtung lässt die Vermutung zu, dass Fußgänger eine Wartezeit als zeitaufwändiger wahrnehmen als eine Bewegung.

Derartige Thesen lassen sich allerdings rein anhand der aufgezeichneten Datenbasis nicht belegen.

Bewertungsmaßstäbe für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen

Das in dieser Arbeit entwickelte Verkehrsflussmodell wurde maßgeblich durch das in Abschnitt 1.3.3 vorgestellte Forschungsprojekt, das die „Abschätzung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit gemeinsam genutzter Verkehrsflächen“ bereits im Namen trägt, motiviert. Die mithilfe des Modells erzielbaren Simulationsergebnisse liefern zwar die Datenbasis für entsprechende Untersuchungen, können isoliert betrachtet aber noch nicht für entsprechende Aussagen herangezogen werden. Dementsprechend müssen Bewertungsmaßstäbe definiert werden, nach denen Simulationsergebnisse ausgewertet werden können.

Ein Indikator für die Leistungsfähigkeit gemeinsam genutzter Verkehrsflächen mit Fokus auf Fußgänger wurde, ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts, von Pascucci und Friedrich (2017) bzw. Pascucci (2020) formuliert. In die Bewertung fließen hier unter anderem die Anzahlen motorisierter Verkehrsteilnehmer, minimale zeitliche und räumliche Abstände sowie die Gleichförmigkeit der Bewegung ein.

Die Bewertung der Verkehrssicherheit durch Auswertung von Ergebnissen einer mikroskopischen Simulation, die üblicherweise keine Unfälle berücksichtigt, wird als *Surrogate Safety Assessment Methodology* (SSAM, Gettman und Head 2003) bezeichnet. Um diese Methodik für die Bewertung der Verkehrssicherheit gemeinsam genutzter Verkehrsflächen anwenden zu können, müssen geeignete Kriterien identifiziert und in die Formulierung eines Indikators aufgenommen werden.

Modellierungsgrundlage

Eine der wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit besteht darin, dass eine Modellierung von Interaktionen mittels der Abfolge Beobachtung, Konfliktdetektion, Entscheidung und Reaktion das vorausschauende Verhalten von Verkehrsteilnehmern auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen im Computermodell plausibel abbilden kann. Dabei wurden das Bewegungsmodell sowie die Reaktionsmechanismen in Hinblick auf die Integration ins SKM formuliert.

Der Austausch mit wissenschaftlichen Kollegen aus dem Bereich der Fußgängersimulation zeigt jedoch, dass in den letzten Jahren die Verwendung von Modellen 2. Ordnung vermehrt infrage gestellt wird. Die Argumentation dabei lautet, dass diese Modelle aufwändige numerische Integrationsverfahren benötigen, obwohl die dabei modellierten Beschleunigungen zumindest für Fußgänger häufig bei der Auswertung von Simulationsergebnissen gar nicht von Interesse sind. Vor diesem Hintergrund haben

beispielsweise Tordeux u. a. (2016) das *Collision-Free Velocity Model* postuliert, das bei einer ausschließlichen Modellierung mittels Geschwindigkeiten und somit der Formulierung einer Differentialgleichung 1. Ordnung eine ähnliche Fußgängerdynamik wie das SKM abbilden soll.

Da bei der Bewertung der Simulationsergebnisse im Rahmen dieser Arbeit bisher ohnehin lediglich Trajektorienwahl und Geschwindigkeitsprofile berücksichtigt wurden, wäre ein derartiger Ansatz auch als Basis für die Modellierung von Mischverkehrsflächen vorstellbar. Bezogen auf die vorgenommenen Erweiterungen des SKM, die mittels verschiedener Kräfte modelliert wurden, wäre dafür mindestens die Formulierung von Ansätzen für das Folgen einer Wunschtrajektorie sowie der sukzessiven Reaktionsmechanismen auf Basis von Geschwindigkeitsvektoren erforderlich.

Vorab sollte allerdings gründlich geprüft werden, ob sich durch diese mathematische Vereinfachung bei der praktischen Anwendung von Simulationen gemeinsam genutzter Verkehrsflächen überhaupt ein spürbarer Vorteil erzielen lässt oder ob sich entsprechende Effekte erst bei sehr großen Anzahlen gleichzeitig simulierter Verkehrsteilnehmer, wie es in typischen Szenarien der Fußgängersimulation häufig der Fall ist, bemerkbar machen.

Datenbasierte Modellierung

Unabhängig von der mathematischen Ordnung der Differentialgleichung haben Modellierungsansätze auf Basis einer Bewegungsgleichung die Gemeinsamkeit, dass bei der Modellierung bereits sehr genau bekannt sein muss, welche Umstände zu bestimmten Bewegungsmustern führen. Daher werden diese Modelle auch unter dem Oberbegriff „Expertenmodelle“ zusammengefasst. Im vergangenen Jahrzehnt konnten jedoch auch im Bereich des maschinellen Lernens große Fortschritte erzielt werden, weswegen entsprechende datenbasierte Modellierungsansätze zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Ein derartiger Ansatz wird etwa von Cheng und Sester (2018) verfolgt, die in ihrer Arbeit die Trajektorien von Fußgängern, Radfahrern und Pkw über einen kurzen Zeitraum mithilfe eines künstlichen neuronalen Netzes prädizieren. Der Ansatz wurde anschließend von Cheng u. a. (2020) mit Expertenmodellen verglichen. Die datenbasierte Modellierung ohne Berücksichtigung von Expertenwissen erfordert eine derart umfangreiche und präzise Datenbasis, dass die Datenerhebung automatisiert erfolgen muss. Wie die von Trifunović u. a. (2021) entwickelte Methodik gezeigt hat, sind die momentan zur Verfügung stehenden Werkzeuge aus dem Bereich der Photogrammetrie bereits in der Lage, Verkehrsteilnehmer auf Videoaufzeichnungen mit hoher Genauigkeit zu detektieren, für eine präzise vollautomatische Extraktion von Trajektorien Daten ist jedoch noch eine Weiterentwicklung notwendig. Da in diesem Bereich derzeit ein stetiger Fortschritt zu beobachten ist, wird das Training datenbasierter Modelle für die

Anwendung bei der Verkehrssimulation in den nächsten Jahren eine spannende Herausforderung darstellen. Eine vielversprechende Möglichkeit besteht in der Kombination beider Ansätze, sodass statt eines vollständig geschlossenen *black box models* einzelne Modellkomponenten, wie etwa die Trajektorienextrapolation oder die Entscheidungsebene, mithilfe datenbasierter Modellierung umgesetzt und so zu einem *grey box model* zusammengesetzt werden. Auf kleinerer und manuell erfasster Datengrundlage wurde dieser Weg in dem Forschungsprojekt mit dem von Pascucci u. a. (2018) trainierten Entscheidungsmodell bereits eingeschlagen.

Literatur

- Alhajyaseen, W. K., Asano, M. und Nakamura, H. (2013). „Left-turn gap acceptance models considering pedestrian movement characteristics“. In: *Accident Analysis & Prevention* 50, S. 175–185 (siehe S. 33).
- Allard, D., Comunian, A. und Renard, P. (2012). „Probability aggregation methods in geoscience“. In: *Mathematical Geosciences* 44.5, S. 545–581 (siehe S. 107).
- Anvari, B., Bell, M. G., Angeloudis, P. und Ochieng, W. Y. (2014). „Long-range collision avoidance for shared space simulation based on social forces“. In: *Transportation Research Procedia* 2, S. 318–326 (siehe S. 34).
- Anvari, B., Bell, M. G., Angeloudis, P. und Ochieng, W. Y. (2016). „Calibration and validation of a shared space model: case study“. In: *Transportation Research Record* 2588.1, S. 43–52 (siehe S. 34).
- Anvari, B., Bell, M. G., Sivakumar, A. und Ochieng, W. Y. (2015). „Modelling shared space users via rule-based social force model“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 51, S. 83–103 (siehe S. 34).
- Axelsson, H. und Nederman, L. (2016). „Skvallertorget in Norrköping: A Study on Pedestrian’s Use of the Square and the Meaning of Shared Space for the Area“. Bachelorarbeit. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Schweden (siehe S. 50, 51).
- Baier, R., Engelen, K., Klemps-Kohnen, A. und Reinartz, A. (2015). *Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken*. Hrsg. von Bundesanstalt für Straßenwesen (siehe S. 26, 29).
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. und Sugiyama, Y. (1995). „Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation“. In: *Physical review E* 51.2, S. 1035 (siehe S. 64).
- Berkhahn, V., Kleiber, M., Schiermeyer, C. und Weber, S. (2018). „Modeling Traffic Accidents Caused by Random Misperception“. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, S. 2568–2574 (siehe S. 96, 140, 143).

- Berkhahn, V., Kleiber, M., Langner, J., Timmermann, C. und Weber, S. (2021). „Traffic Dynamics at Intersections Subject to Random Misperception“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. DOI: [10.1109/TITS.2020.3045480](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3045480) (siehe S. 140, 143, 153).
- Bertolazzi, E. und Frego, M. (2015). „G1 fitting with clothoids“. In: *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 38.5, S. 881–897 (siehe S. 70).
- Chandra, S., Rastogi, R. und Das, V. R. (2014). „Descriptive and parametric analysis of pedestrian gap acceptance in mixed traffic conditions“. In: *KSCE journal of civil engineering* 18.1, S. 284–293 (siehe S. 33).
- Chen, P., Wu, C. und Zhu, S. (2016). „Interaction between vehicles and pedestrians at uncontrolled mid-block crosswalks“. In: *Safety science* 82, S. 68–76 (siehe S. 33).
- Cheng, H., Johora, F. T., Sester, M. und Müller, J. P. (2020). „Trajectory modelling in shared spaces: Expert-based vs. deep learning approach?“ In: *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Springer, S. 13–27 (siehe S. 161).
- Cheng, H. und Sester, M. (2018). „Modeling mixed traffic in shared space using lstm with probability density mapping“. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, S. 3898–3904 (siehe S. 161).
- De Berg, M., Van Kreveld, M., Overmars, M. und Schwarzkopf, O. C. (2000). „Visibility Graphs“. In: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer. Kap. 15, S. 307–317. ISBN: 978-3-662-04245-8. DOI: [10.1007/978-3-662-04245-8_15](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04245-8_15) (siehe S. 68).
- Diekmann, N. und Schiermeyer, C. (2019). „Modellierung eines gerichteten Graphen zur Abbildung von Vorfahrtsregeln“. In: *Forum Bauinformatik 2019. Von jungen Forschenden für junge Forschende*. 31. Forum Bauinformatik (Technische Universität Weimar). Hrsg. von M. Sternal, L.-C. Ungureanu, L. Böger und C. Bindal-Gutsche (siehe S. 130).
- Dietrich, F. und List, C. (2017). „Probabilistic opinion pooling generalized. Part one: general agendas“. In: *Social Choice and Welfare* 48.4, S. 747–786 (siehe S. 107).
- Dudenredaktion, Hrsg. (2019). *Duden - Deutsches Universalwörterbuch. Das umfassende Bedeutungswörterbuch der deutschen Gegenwartssprache*. 9. Aufl. Berlin: Bibliographisches Institut GmbH. ISBN: 978-3-411-05509-8 (siehe S. 23).
- Farin, G. (1994). *Kurven und Flächen im Computer Aided Geometric Design: Eine praktische Einführung*. Vieweg (siehe S. 76, 79).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Hrsg. (2006). *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Grundlagen und Anwendung*. ISBN: 3-939715-11-5 (siehe S. 32, 134).

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Hrsg. (2014). *Hinweise zu Straßenräumen mit besonderem Querungsbedarf. Anwendungsmöglichkeiten des „Shared Space“-Gedankens*. ISBN: 978-3-86446-081-4 (siehe S. 26, 27, 45).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“, Hrsg. (2006). *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*. 2008. Aufl. ISBN: 978-3-939715-21-4 (siehe S. 23, 151).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Verkehrsplanung“, Hrsg. (2008). *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*. ISBN: 978-3-939715-79-5 (siehe S. 25).
- Freie Hansestadt Bremen, Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr, Hrsg. (2014). *Verkehrsentwicklungsplan 2025*. Broschüre (siehe S. 28).
- Gemeinde Bohmte, Hrsg. (2008). *EU-Projekt Shared Space*. URL: <https://www.bohmte.de/staticsite/staticsite.php?menuid=123&topmenu=123> (besucht am 29.05.2021) (siehe S. 25).
- Gerike, R. (2017). *Grundidee des Shared Space*. Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) herausgegeben durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). URL: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/354994/> (besucht am 31.05.2021) (siehe S. 27).
- Gettman, D. und Head, L. (2003). „Surrogate safety measures from traffic simulation models“. In: *Transportation Research Record* 1840.1, S. 104–115 (siehe S. 160).
- Glasserman, P. (2003). „Generating Sample Paths“. In: *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. New York, NY: Springer New York, S. 79–184. ISBN: 978-0-387-21617-1. DOI: 10.1007/978-0-387-21617-1_3 (siehe S. 141).
- Hamilton-Baillie, B. (2008). „Shared space: Reconciling people, places and traffic“. In: *Built environment* 34.2, S. 161–181 (siehe S. 25).
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. und Raphael, B. (1968). „A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths“. In: *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics* 4.2, S. 100–107 (siehe S. 70).
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnar, P. und Vicsek, T. (2002). „Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations“. In: *Pedestrian and evacuation dynamics* 21.2, S. 21–58 (siehe S. 62).
- Helbing, D. und Molnar, P. (1995). „Social force model for pedestrian dynamics“. In: *Physical review E* 51.5, S. 4282 (siehe S. 34, 59, 61, 62).
- Höcker, M. (2010). „Modellierung und Simulation von Fußgängerverkehr“. Diss. Leibniz Universität Hannover (siehe S. 62).

- Höcker, M., Berkhahn, V., Kneidl, A., Borrmann, A. und Klein, W. (2010). „Graph-based approaches for simulating pedestrian dynamics in building models“. In: (Siehe S. 68).
- Hoschek, J. und Lasser, D. (1992). *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. B. G. Teubner (siehe S. 76).
- Huynh, D. N., Boltze, M. und Vu, A. T. (2013). „Modelling mixed traffic flow at signalized intersection using social force model“. In: *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 10, S. 1734–1749 (siehe S. 33).
- Johansson, A., Helbing, D. und Shukla, P. K. (2007). „Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data“. In: *Advances in complex systems* 10.supp02, S. 271–288 (siehe S. 62).
- Karndacharuk, A., Vasisht, P. und Prasad, M. (2015). „Shared Space Evaluation: O’Connell Street, Auckland“. In: *Proceedings of the Australasian Transport Research Forum* (siehe S. 30).
- Landeshauptstadt Hannover, Baudezernat, Hrsg. (2011). *Masterplan Mobilität 2025*. Broschüre (siehe S. 28, 29).
- Lewin, K. (1951). *Field Theory in Social Science: Selected Theoretical Papers*. Hrsg. von D. Cartwright. New York: Harpers (siehe S. 61).
- Meier, R. (2019). „Modellierung des Verhaltens in Verkehrssituationen mit verdecktem Wahrnehmungsbereich“. Bachelorarbeit. Institut für Risiko und Zuverlässigkeit, Leibniz Universität Hannover (siehe S. 75).
- Nagel, K. und Schreckenberg, M. (1992). „A cellular automaton model for freeway traffic“. In: *Journal de physique I* 2.12, S. 2221–2229 (siehe S. 60).
- Netzwerk Shared Space, Hrsg. (2016). *Gute Beispiele*. URL: <http://netzwerk-sharedspace.de/> (besucht am 05.06.2021) (siehe S. 25, 28).
- Parker, M. R. und Zegeer, C. V. (1989). *Traffic conflict techniques for safety and operations: Engineers guide*. Techn. Ber. FHWA/IP-88-026. Federal Highway Association (siehe S. 23).
- Pascucci, F. (2020). „A microsimulation based method to evaluate shared space performances“. Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. DOI: 10.24355/dbbs.084-202005271112-0 (siehe S. 36, 49–51, 159, 160).
- Pascucci, F. und Friedrich, B. (2017). „Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Straßenräumen mit Shared Space“. In: *Tagungsband HEUREKA 2017* (siehe S. 160).
- Pascucci, F., Rinke, N., Schiermeyer, C., Berkhahn, V. und Friedrich, B. (2018). „Should I Stay or Should I Go? A Discrete Choice Model for Pedestrian–Vehicle Conflicts in Shared Space“. In: Transportation Research Board 97th Annual Meeting. Washington DC, United States (siehe S. 37, 90, 91, 107, 132, 133, 158, 162).

- Pascucci, F., Rinke, N., Schiermeyer, C., Friedrich, B. und Berkhahn, V. (2015). „Modeling of shared space with multi-modal traffic using a multi-layer social force approach“. In: *Transportation Research Procedia*. 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015 (14.–16. Juli 2015). Bd. 10. Elsevier, S. 316–326. DOI: [10.1016/j.trpro.2015.09.081](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.081) (siehe S. 36, 49).
- PTV Group, Hrsg. (2021). *Social Force Model – Die Basis von PTV Viswalk*. URL: <https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-viswalk/> (besucht am 13.03.2021) (siehe S. 59).
- Ramer, U. (1972). „An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves“. In: *Computer Graphics and Image Processing* 1.3, S. 244–256. ISSN: 0146-664X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(72\)80017-0](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(72)80017-0) (siehe S. 79).
- Rinke, N., Schiermeyer, C., Pascucci, F., Berkhahn, V. und Friedrich, B. (2017). „A multi-layer social force approach to model interactions in shared spaces using collision prediction“. In: *Transportation Research Procedia*. Bd. 25. Elsevier, S. 1249–1267. DOI: [10.1016/j.trpro.2017.05.144](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.144) (siehe S. 36, 94, 110, 111).
- Rudloff, C., Schönauer, R. und Fellendorf, M. (2013). „Comparing calibrated shared space simulation model with real-life data“. In: *Transportation research record* 2390.1, S. 44–52 (siehe S. 35).
- Savannah Simulations, Hrsg. (2018). *Two model version SimWalk 5.1 released*. URL: https://www.simwalk.com/news/news_18_01.html (besucht am 13.03.2021) (siehe S. 59).
- Schadschneider, A. (2004). *Physik des Straßenverkehrs*. Vorlesungsskript (siehe S. 59).
- Schiermeyer, C., Pascucci, F., Rinke, N., Berkhahn, V. und Friedrich, B. (1. Aug. 2017a). „MODIS - Ein Simulationsmodell zur Bewertung von Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Gestaltungsprinzip“. In: *Bauingenieur. Die Richtungsweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen* 92 (Juli/August 2017): *Verkehr und Infrastruktur*, S. 341–346 (siehe S. 37).
- Schiermeyer, C., Pascucci, F., Rinke, N., Berkhahn, V. und Friedrich, B. (2016). „A genetic algorithm approach for the calibration of a social force based model for shared spaces“. In: *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016* (17.–21. Okt. 2016). University of Science and Technology of China, Hefei, China. University of Science and Technology of China Press, S. 485–491. ISBN: 9787312040771 (siehe S. 36, 102, 105, 159).
- Schiermeyer, C., Pascucci, F., Rinke, N., Berkhahn, V. und Friedrich, B. (2017b). „Modeling and Solving of Multiple Conflict Situations in Shared Spaces“. In: *Traffic and Granular Flow '17*. Hrsg. von S. H. Hamdar. ISBN: 978-3-030-11439-8. DOI: [10.1007/978-3-030-11440-4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11440-4) (siehe S. 37, 108, 125).

- Schönauer, R. (2017). „A microscopic traffic flow model for shared space“. Diss. Graz University of Technology (siehe S. 35).
- Schönauer, R., Stubenschrott, M., Huang, W., Rudloff, C. und Fellendorf, M. (2012). „Modeling concepts for mixed traffic: Steps toward a microscopic simulation tool for shared space zones“. In: *Transportation research record* 2316.1, S. 114–121 (siehe S. 35).
- Shimrat, M. (1962). „Algorithm 112: position of point relative to polygon“. In: *Communications of the ACM* 5.8, S. 434 (siehe S. 68).
- Sun, D., Ukkusuri, S., Benekohal, R. F. und Waller, S. T. (2003). „Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid-block crosswalks“. In: *Transportation Research Record, TRB Annual Meeting CD-ROM, Washington, DC* (siehe S. 33).
- Swinburne, G. (2006). *Report on Road Safety in Kensington High Street*. Techn. Ber. London: Royal Borough of Kensington & Chelsea (siehe S. 30).
- The AnyLogic Company, Hrsg. (2017). *Pedestrian Library*. URL: <https://www.anylogic.com/resources/libraries/pedestrian-library/> (besucht am 13.03.2021) (siehe S. 59).
- Tordeux, A., Chraïbi, M. und Seyfried, A. (2016). „Collision-free speed model for pedestrian dynamics“. In: *Traffic and Granular Flow 2015*. Springer, S. 225–232 (siehe S. 161).
- Treiber, M., Hennecke, A. und Helbing, D. (2000). „Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations“. In: *Physical review E* 62.2, S. 1805 (siehe S. 65, 144, 148).
- Treiber, M. und Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Verlag (siehe S. 31, 63, 64, 66).
- Trifunović, A., Timmermann, C., Friedrich, B. und Berkhahn, V. (2021). „Implications of Converting Low Capacity Intersection Adjacent to Park Into Shared Space“. In: *Transportation Research Board 100th Annual Meeting*. Washington DC, United States (siehe S. 37, 47, 134, 161).
- Zhao, J., Malenje, J. O., Tang, Y. und Han, Y. (2019). „Gap acceptance probability model for pedestrians at unsignalized mid-block crosswalks based on logistic regression“. In: *Accident Analysis & Prevention* 129, S. 76–83 (siehe S. 33).

Anhang A.

Beispiele zur Distanzfunktion

Im Folgenden werden verschiedene Sonderfälle von Bewegungen und die daraus resultierenden Verläufe der Distanzfunktion exemplarisch untersucht. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Charakteristik für den allgemeinen Fall. Darauf aufbauend werden in Kap. 4 Parameter erläutert, die sich aus der Distanzfunktion ergeben und für die Reaktion auf bestimmte Situationen erforderlich sind. Dabei werden, unter Vernachlässigung der umgebenden Ellipsen, vier Kombinationen aus gleichförmiger und ungleichförmiger sowie geradliniger und gekrümmter Trajektorie betrachtet. Die aufgeführten Beschleunigungen sind unabhängig von einer etwaigen Reaktion und dienen allein der Veranschaulichung der Auswirkungen auf die Distanzfunktion.

(a) Gleichförmige, geradlinige Bewegung

Beide Verkehrsteilnehmer bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit \vec{v}_i bzw. \vec{v}_j auf geraden Trajektorien. Die resultierende Distanzfunktion weist die Struktur

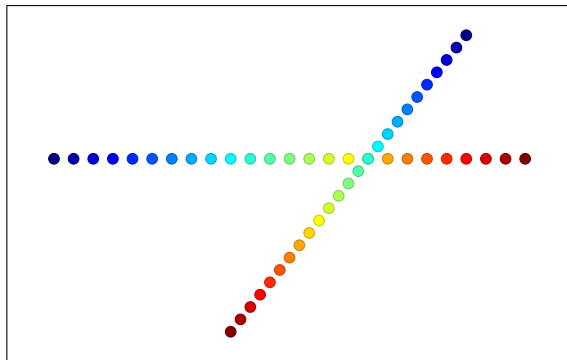
$$d_{ij}(t) = \left| \vec{d}_0 + t \cdot \Delta\vec{v} \right| = \sqrt{\left[\vec{d}_0 + t \cdot \Delta\vec{v} \right]^2}$$

auf. Dabei ist \vec{d}_0 die relative Lage der Verkehrsteilnehmer zu Beginn der Betrachtung ($t = 0$) und $\Delta\vec{v}$ die Differenz der Geschwindigkeiten. Aus der qualitativen Darstellung einer derartigen Distanzfunktion in Abb. A.1 wird ersichtlich, dass der Abstand symmetrisch um ein Minimum ist und vor diesem monoton fallend, danach monoton steigend verläuft.

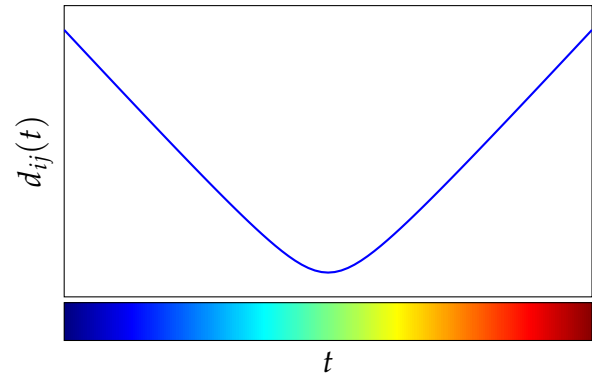
(b) Ungleichförmige, geradlinige Bewegung

Beide Verkehrsteilnehmer bewegen sich auf geraden Trajektorien. Dabei bewegt sich V_i mit der Startgeschwindigkeit $\vec{v}_{i,0}$ und konstanter Beschleunigung $\vec{a}_i = a_i \vec{e}_{v_i}$ entlang der Bewegungsrichtung \vec{e}_{v_i} . Unverändert zu Beispiel (a) bewegt sich V_j mit konstanter Geschwindigkeit v_j . Es ergibt sich die Distanzfunktion

$$d_{ij}(t) = \left| \vec{d}_0 + t \cdot \left(\Delta\vec{v} + \frac{1}{2} a_i \vec{e}_{v_i} t \right) \right|.$$

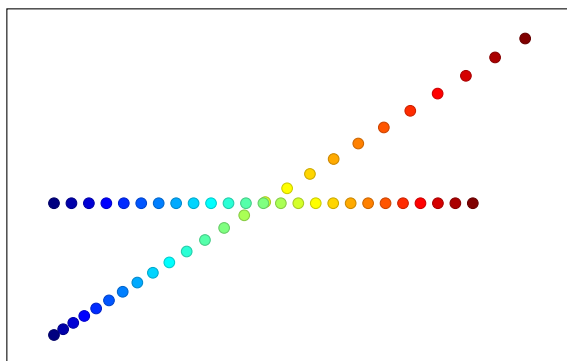


(a) Zeitlich diskretisierte Trajektorien.

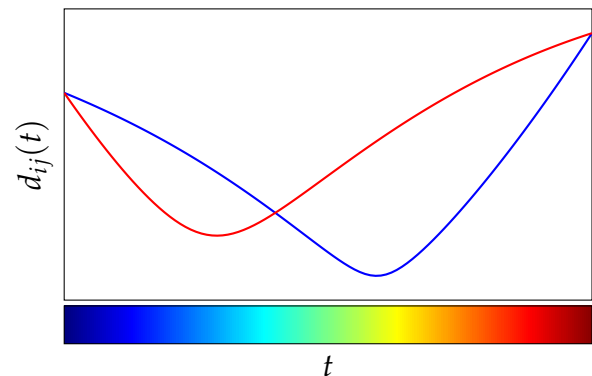


(b) Distanzfunktion.

Abbildung A.1.: Gleichförmige, geradlinige Bewegung.



(a) Zeitlich diskretisierte Trajektorien für positive Beschleunigung a_i .



(b) Distanzfunktion für positive (blau) und negative (rot) Beschleunigung a_i .

Abbildung A.2.: Ungleichförmige, geradlinige Bewegung.

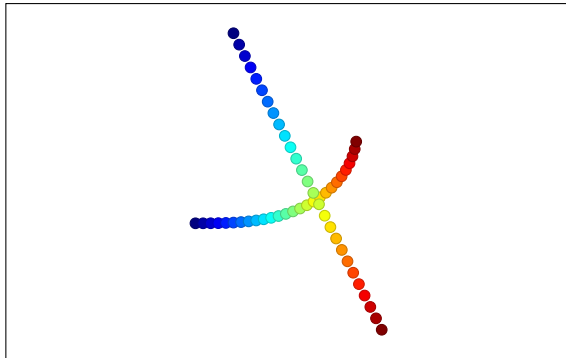
In Abb. A.2 ist der qualitative Verlauf der resultierenden Distanzfunktion für ein positives (blau) und ein negatives (rot) a_i dargestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu Beispiel (a) durch die ungleichförmige Bewegung eine geringere Linearität der Distanz beidseitig des Minimums verursacht wird.

(c) **Gleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie**

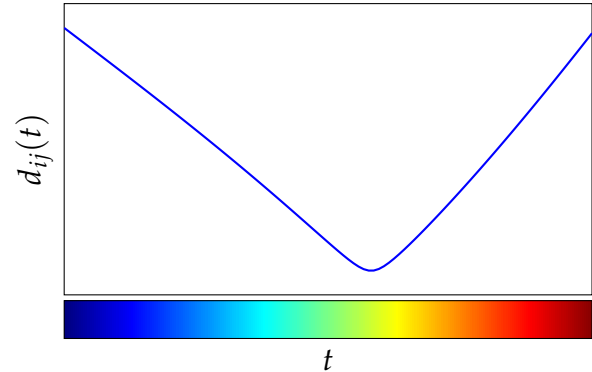
Beide Verkehrsteilnehmer bewegen sich mit betragsmäßig konstanter Geschwindigkeit. Dabei bewegt sich V_i entlang einer gekrümmten, V_j auf einer geradlinigen Trajektorie. Eine analytische Formulierung der Distanzfunktion hängt maßgeblich von der Kurvenform der gekrümmten Trajektorie ab und wird daher hier nicht aufgeführt. In Abb. A.3a ist eine parabelförmige Trajektorie für V_i dargestellt. Die Distanzfunktion der gleichförmigen gekrümmten Bewegung weist einen qualitativ ähnlichen Effekt wie in Beispiel (b) auf.

(d) **Ungleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie**

V_i bewegt sich mit konstanter Beschleunigung a_i entlang einer parabelförmigen

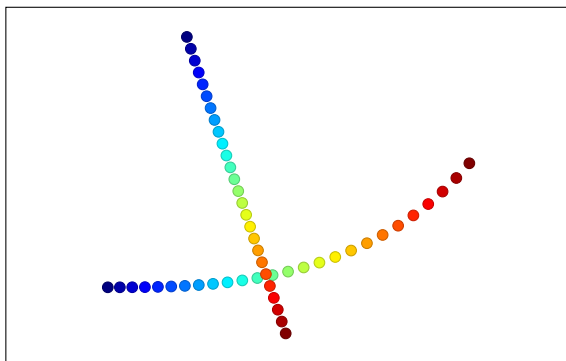


(a) Zeitlich diskretisierte Trajektorien.

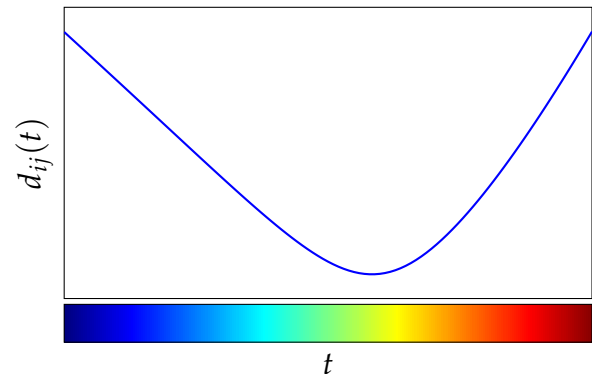


(b) Distanzfunktion.

Abbildung A.3.: Gleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie.



(a) Zeitlich diskretisierte Trajektorien.



(b) Distanzfunktion.

Abbildung A.4.: Ungleichförmige Bewegung auf gekrümmter Trajektorie.

Trajektorie, während sich V_j geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Das Beispiel stellt somit eine Kombination der Varianten (b) und (c) dar. Die in Abb. A.4 dargestellte Distanzfunktion zeigt, dass sich die Krümmung in die Beschleunigung in diesem Beispiel nahezu aufheben, sodass eine nahezu symmetrische Distanzfunktion entsteht.

Es wird ersichtlich, dass die Distanzfunktionen für alle vier betrachteten Fälle gemeinsame Eigenschaften aufweist (Minimum, monoton fallend, monoton steigender Verlauf) und sich die ungleichförmigen Bewegungen in den untersuchten Beispielen lediglich auf die Schiefe der Distanzfunktion auswirken. Diese Eigenschaften sind qualitativ auch bei den in der Realität üblichen komplexeren Bewegungen zu beobachten, weswegen Abschnitt 4.2.3 die relevanten Konfliktparameter an der Distanzfunktion einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung veranschaulicht werden.

Anhang B.

Simulationsparameter

In den folgenden Tabellen sind Parameter aufgelistet, die, sofern nicht anders angemerkt, bei den in Kapitel 6 diskutierten Simulationen verwendet wurden.

	Parameter	Wert
Simulationszeitschritt	Δt	0,1 s
Konfliktklassifizierung	α^{lateral}	45°
	α^{frontal}	135°
IDM	s_0	2,0 m
	T	1,5 s
	δ	4,0
	b	1,67 m/s ²

Tabelle B.1.: Von der Verkehrsart unabhängige Parameter.

	Parameter	Wert
Körpermaße	b	0,465 m
	t	0,235 m
	h	1,73 m
	h_p	1,66 m
Bewegung	a_{\max}	3,0 m/s ²
	b_{\max}	3,5 m/s ²
	τ	0,5 s
Konflikterkennung	$d_s^{\text{PED_PED}}$	0,3 m
	$d_s^{\text{PED_CYC}}$	1,0 m
	$d_s^{\text{PED_CAR}}$	1,4 m
Konfliktklassifizierung	$t_{\text{LR}}^{\text{PED_PED}}$	5,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{PED_PED}}$	1,0 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CYC}}$	15,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CYC}}$	2,0 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{PED_CAR}}$	10,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{PED_CAR}}$	2,0 s
Safe Zone Force	d_{SZ}^{\min}	0,8 m
	d_{SZ}^{\max}	5,0 m
Defensive Reaktionskraft	d_{def}^{\min}	2,0 m
	d_{def}^{\max}	10,0 m
Trajektorienbasierte Ausweichkraft	d_0	2,0 m
	d_1	1,0 m
	k_1	3,0
	k_2	0,5

Tabelle B.2.: Parameter für Fußgänger.

	Parameter	Wert
Körpermaße	b	0,5 m
	l	1,2 m
	h	1,80 m
	h_p	1,66 m
Bewegung	a_{\max}	1,0 m/s ²
	b_{\max}	1,5 m/s ²
	τ	1,5 s
Konflikterkennung	$d_s^{\text{CYC_PED}}$	1,5 m
	$d_s^{\text{CYC_CYC}}$	2,0 m
	$d_s^{\text{CYC_CAR}}$	3,0 m
Konfliktklassifizierung	$t_{\text{LR}}^{\text{CYC_PED}}$	7,5 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CYC_PED}}$	1,0 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{CYC_CYC}}$	4,5 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CYC_CYC}}$	1,5 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{CYC_CAR}}$	15,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CYC_CAR}}$	1,5 s
	t_e^{behind}	0,75 s
Berechnung eines Ausweichpunkts	t_e^{ahead}	2,0 s
	d_e	2,0 m
	c_{\max}^i	3,5 m/s ²

Tabelle B.3.: Parameter für Radfahrer.

	Parameter	Wert
Körpermaße	b	1,55 m
	l	4,2 m
	h	1,55 m
	h_p	1,11 m
Bewegung	a_{\max}	3,0 m/s ²
	b_{\max}	3,5 m/s ²
	τ	1,0 s
Konflikterkennung	$d_s^{\text{CAR_PED}}$	2,5 m
	$d_s^{\text{CAR_CYC}}$	1,5 m
	$d_s^{\text{CAR_CAR}}$	2,5 m
Konfliktklassifizierung	$t_{\text{LR}}^{\text{CAR_PED}}$	5,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CAR_PED}}$	2,0 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{CAR_CYC}}$	10,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CAR_CYC}}$	2,0 s
	$t_{\text{LR}}^{\text{CAR_CAR}}$	10,0 s
	$t_{\text{SR}}^{\text{CAR_CAR}}$	2,0 s

Tabelle B.4.: Parameter für Pkw.



Chris Patrick Timmermann

Geburtsdatum: 27.11.1985
Familienstand: verheiratet
(geb. Schiermeyer)



Berufserfahrung

- seit 01/2022 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, *Institut für Versicherungs- und Finanzmathematik & House of Insurance*, Leibniz Universität Hannover.
- 05/2011–04/2021 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, *Institut für Risiko und Zuverlässigkeit (bis 2015 Institut für Bauinformatik)*, Leibniz Universität Hannover.

Projekte an der Universität

Verkehrsflusssimulation

- 2013–2017 **Multi mODal Intersection Simulation (MODIS)**, *Interdisziplinäres DFG-Forschungsprojekt.*
- 2018–2021 **Multi mODal Intersection Simulation (MODIS 2)**, *Interdisziplinäres DFG-Folgeprojekt.*
- 2018–2021 **Autonomes Fahren im Mischverkehr (AFiM)**, *Interdisziplinäres BMVI-Forschungsprojekt*, seit 10/2019 Projektleitung.

Logistiksimulation

- 2011–2012 **Simulation des Umschlages auf Umschlagterminals des kombinierten Verkehrs**, *Deutsche Bahn und Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße (DUSS).*
- 2012 **Simulationsbasierte Konzeptberatung für die Abraumbeseitigung mehrerer Tunnelangriffe in Stuttgart**, *Deutsche Bahn.*

Ausbildung

- 1996–2005 **Allgemeine Hochschulreife**, *Immanuel-Kant-Gymnasium*, Bad Oeynhausen.
- 2005–2011 **Studium**, *Bauingenieurwesen*, Leibniz Universität Hannover, *Abschluss: Dipl.-Ing.*
Vertiefungsrichtung: numerische Methoden und angewandte Informatik
- 2011–2021 **Promotionsstudium**, *Bauingenieurwesen*, Leibniz Universität Hannover.

Sonstiges

- 2006–2010 **Studentische Hilfskraft**, *Institut für Bauinformatik*, Leibniz Universität Hannover.
- 2006–2008 **Studentische Hilfskraft**, *Institut für Baumechnik und Numerische Mechanik*, Leibniz Universität Hannover.
- 2010–2011 **Studentische Hilfskraft**, *GLASER -isb cad- GmbH*, Wennigsen.