



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

FAKULTÄT
FÜR MATHEMATIK, INFORMATIK
UND NATURWISSENSCHAFTEN

Masterarbeit

**Multiagenten Simulation von
Fahrradfahrern im Kontext urbaner
Verkehrsdynamik**

Katharina Mulack

katharina.mulack@informatik.uni-hamburg.de
Studiengang IT-Management und -Consulting
Matr.-Nr. 7095310

Betreuer: Prof. Dr.-Ing Norbert Ritter
 Prof. Dr. Thomas Clemen

Abgabe: 05.05.2020



Masterarbeit

Multiagenten Simulation von

Fahrradfahrern im Kontext urbaner

Verkehrsdynamik

In Kooperation mit der Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg

Title of the paper

Multi-agent simulation of cyclists in the context of urban traffic dynamics

Keywords

Traffic Simulation, Cyclists, MARS, SmartOpenHamburg, Hamburg

Abstract

In times of climate change, alternatives to passenger transport are becoming increasingly important. One environmentally friendly and healthy option is cycling. Since a reorientation of traffic involves considerable effort, traffic simulations are used for planning. In this thesis the SmartOpenHamburg project is extended by the possibility to simulate cyclists. For this purpose, characteristics of cyclists and bicycles are researched and different behavioral models are considered. The implementation is based on a variant of the Wiedemann 99 model adapted for cyclists. After checking the general driving behaviour of the cyclist agents, the influence of cyclists on road traffic is examined on the basis of the implementation. It is shown that there is a mutual influence of cyclists and other road users.

Thema der Arbeit

Multiagenten Simulation von Fahrradfahrern im Kontext urbaner Verkehrsdynamik

Stichworte

Verkehrssimulation, Fahrradfahrer, MARS, SmartOpenHamburg, Hamburg

Zusammenfassung

In Zeiten des Klimawandels gewinnen Alternativen zum Personenkraftverkehr zunehmend an Bedeutung. Eine umweltfreundliche und gesunde Option ist das Fahrradfahren. Da eine Neuausrichtung des Verkehrs einen erheblichen Aufwand mit sich zieht, kommen Verkehrssimulationen zur Planung zum Einsatz. In dieser Arbeit wird das SmartOpenHamburg Projekt um die Möglichkeit Fahrradfahrer zu simulieren erweitert. Dazu werden Eigenschaften von Radfahrern und Fahrrädern recherchiert sowie verschiedene Verhaltensmodelle betrachtet. Die Implementierung erfolgt auf Basis einer für Fahrradfahrer angepassten Variante des Wiedemann 99 Modells. Nach Überprüfung des generellen Fahrverhaltens der Radler-Agenten wird auf Basis der Implementierung der Einfluss von Fahrradfahrern auf den Straßenverkehr untersucht. Dabei zeigt sich, dass es eine wechselseitige Beeinflussung von Radfahrern und anderen Verkehrsteilnehmern gibt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Listings	xi
1. Einleitung	1
1. Forschungsfragen	2
2. Hypothesen	3
3. Zielsetzung	4
4. Aufbau der Arbeit	4
2. Methodik	5
1. Forschung und Simulation	5
2. SmartOpenHamburg	5
3. Verkehrsflussmodelle	6
3.1. Modellierungskonzepte	6
3.2. Konkrete Verflussmodelle	7
4. Verwandte Arbeiten	17
3. Konzept	23
1. Modellbeschreibung	23
1.1. Fahrradfahrer	23
1.2. Fahrräder	29
1.3. Verhalten und Umwelt	36
1.4. Interaktionen	40
2. Gewählter Stadtteil	43
3. Auswahl eines Verhaltensmodells	45
4. Empfohlene Parameter des Verhaltensmodells	48
5. Ermittlung der maximal möglichen Beschleunigung	50
6. Architektur	53
7. Abgrenzung	58
4. Implementierung	61
1. Integration in MARS	61
2. Untersuchung des gewählten Vorgehensmodell von R. Wiedemann von 1999	65
2.1. Ablauf des Modells	66
2.2. Gewählte Parameter	68
2.3. Parameter für die Vergleichs-Simulationen	69
2.4. Vergleich originale Implementierung und SUMO	71
2.5. Vergleich originale und aktuelle Implementierung	74
3. Datenmodelle	82
3.1. Fahrradfahrer	82

3.2. Fahrräder	85
3.3. Auswirkung des Fahrertyps auf das Verhaltensmodell	88
4. Verwendete Konstanten	92
4.1. Durchschnittliche und Maximale Verzögerung	92
4.2. Abbiege-Geschwindigkeiten	94
5. Normalverteilte Zufallsvariablen	94
5. Evaluation	95
1. Technische Evaluation	95
1.1. Beschleunigungsverhalten	97
1.2. Verzögerungstests	98
1.3. Verhalten an Kreuzungen ohne Lichtsignalgeber	99
1.4. Spurwechsel-Tests	107
1.5. Reaktionen auf Geschwindigkeitsbeschränkungen	109
1.6. Verhalten an Lichtsignalanlagen	111
1.7. Generelles Fahrverhalten	113
1.8. Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern	116
1.9. Isochrone Analyse	122
1.10. Untersuchung der Laufzeit	127
2. Untersuchung der Forschungsfragen	129
3. Diskussion	141
4. Technischer Ausblick	143
6. Zusammenfassung	145
1. Ausblick	147
A. Anhang	149
1. Wiedemann 99 Implementierung für Fahrradfahrer	149
2. Wiedemann 99 Implementierung vs SUMO	152
3. Eigene Implementierung vs SUMO	154
Literatur	157
Eidesstattliche Versicherung	167

Abbildungsverzeichnis

2.3.1.	Übersicht über die Schranken des Fritzsche Modells und deren Auswirkung [OT04]	10
2.3.2.	Übersicht über die Schranken des Wiedemann 74 Modells und deren Auswirkung [OT04]	14
2.3.3.	Übersicht über die Schranken des Wiedemann 99 Modells und deren Auswirkung (auf Basis [Wie96])	16
2.4.4.	Übersicht der unterschiedlichen Kreuzungsbereiche [TA13]	19
3.2.1.	Bezirk Altona mit den jährlichen Verkehrszählstellen [Wey19]	44
3.3.2.	Vergleich des Verhaltens eines Vordermannes, eines Fahrers mit Fritzsche (blau) und eines Fahrers mit VISSIM (rot) bezüglich der Geschwindigkeit (oben) und der Beschleunigung (unten) (Auf Basis [OT04] S. 28 / 29, bearbeitet)	48
3.5.3.	Vergleich möglicher Beschleunigungsverhalten	52
3.6.4.	Übersicht über die Komponenten und deren Interaktionen	54
3.6.5.	Sequenzdiagramm: Initialisierung	54
3.6.6.	Sequenzdiagramm: Tick Teil I	55
3.6.7.	Sequenzdiagramm: Tick Teil II	56
3.6.8.	ER-Modell: Übersicht	57
3.6.9.	ER-Modell: Bicycle	57
3.6.10.	ER-Modell: Cyclist	58
3.6.11.	ER-Modell: BicycleSteeringHandle	58
4.1.1.	Übersicht über die relevanten Klassen in MARS	62
4.1.2.	Klassendiagramm: Übersicht der Hauptklassen	64
4.1.3.	Klassendiagramm: Übersicht der Hilfsklassen und Typendefinitionen .	65
4.2.4.	Ablauf der Schrankenbestimmung im Wiedemann 99 Modell	66
4.2.5.	Bestimmung der Beschleunigung im Wiedemann 99 Modell	67
4.2.6.	Beschleunigung bei einem vorausfahrenden Fahrzeug mit farblicher Her- vorhebung der Verhaltensentscheidungen	68
4.2.7.	Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99	72
4.2.8.	Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99 bei einem stehenden Fahrzeug voraus	73
4.2.9.	Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99 bei einem Vorausfahrenden	74
4.2.10.	Vergleich der Auswirkung der unterschiedlichen Bestimmung von SDX_c	76
4.2.11.	Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung	80
4.2.12.	Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung bei einem stehenden Fahrzeug voraus .	81

4.2.13.	Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung bei einem Vorausfahrenden	82
4.3.14.	Vergleich der Auswirkung des <code>DriverType</code> auf das Fahrverhalten hier anhand der Beschleunigung bei einem vorausfahrenden Fahrzeug	91
4.4.15.	Vergleich der Auswirkung des <code>maxDecelFactors</code>	93
5.1.1.	Startpunkt für die Unit-Tests	96
5.1.2.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers während er seine Geschwindigkeit erhöht	98
5.1.3.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers während er verzögert	99
5.1.4.	Startpositionen der vier Radfahrer an einer Kreuzung	100
5.1.5.	Zwei Radfahrer treffen an einer ampellosen Kreuzung aufeinander . .	101
5.1.6.	Geschwindigkeit zweier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	102
5.1.7.	Beschleunigung zweier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	102
5.1.8.	Drei Fahrradfahrer stehen an der Kreuzung	103
5.1.9.	Geschwindigkeit dreier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	104
5.1.10.	Beschleunigung dreier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	104
5.1.11.	An einer Kreuzung ohne Lichtsignalgeber treffen vier Radfahrer aufeinander	105
5.1.12.	Geschwindigkeit von vier Radfahrern an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	106
5.1.13.	Beschleunigung von vier Radfahrern an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung	107
5.1.14.	Startpunkt und Route der zwei Radfahrer	108
5.1.15.	Visualisierung des Spurwechsels	109
5.1.16.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer Erhöhung der Geschwindigkeitsbegrenzung	110
5.1.17.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer Verringerung der Geschwindigkeitsbegrenzung	111
5.1.18.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer grünen Ampel	112
5.1.19.	Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer roten Ampel	113
5.1.20.	Verhalten von Radfahrern auf einem Ring I	114
5.1.21.	Verhalten von Radfahrern auf einem Ring II	115
5.1.22.	Startpunkte des Fahrrades (pink) und das Auto (blau)	117
5.1.23.	Simulation des Verhaltens eines Radfahrers (pink) bei einem langsamen vorausfahrenden Auto (blau)	118
5.1.24.	Startpunkte des Fahrrades (pink) und das Auto (blau)	120
5.1.25.	Simulation des Verhaltens eines Autos (blau) bei einem langsamen vorausfahrenden Radfahrers (pink)	121
5.1.26.	Für einen Radfahrer erreichbare Positionen nach 300, 500, 700 und 900 Sekunden vom Startpunkt aus	122
5.1.27.	Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 300 Sekunden vom Startpunkt aus	123
5.1.28.	Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 300 Sekunden vom Startpunkt aus	123
5.1.29.	Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 500 Sekunden vom Startpunkt aus	124

5.1.30. Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 500 Sekunden vom Startpunkt aus	124
5.1.31. Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 700 Sekunden vom Startpunkt aus	125
5.1.32. Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 700 Sekunden vom Startpunkt aus	125
5.1.33. Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 900 Sekunden vom Startpunkt aus	126
5.1.34. Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 900 Sekunden vom Startpunkt aus	126
5.1.35. Vergleich der Dauer eines Ticks eines Fahrrades mit Wiedemann 99 und Intelligent Driver (ID) als Verhaltensmodell	127
5.1.36. Übersicht der Dauer eines Ticks von einem Auto und einem Fahrrad	128
5.1.37. Vergleich der Dauer eines Ticks von einem Auto und einem Fahrrad im Detail	129
5.2.38. Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Fahrrädern und 2000 Autos mit 1000 Fahrrädern ohne Autos auf der Straße	132
5.2.39. Start- (gelb) und Endpunkt (blau) der Fahrradfahrer	133
5.2.40. Vergleich der Geschwindigkeit eines Fahrrades mit 0 bis 2500 Autos auf der Straße	133
5.2.41. Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Fahrrädern und 2000 Autos mit 1000 Fahrrädern ohne Autos auf der Straße	134
5.2.42. Vergleich der Geschwindigkeit von 500, 800 und 1000 Fahrrädern auf der Straße mit 1000 Radfahrern auf dem Radweg	135
5.2.43. Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Pkws während 2000 Fahrrädern auf dem Radweg fahren mit 2000 Pkws gemeinsam mit 1000 Radfahrern auf der Straße und 2500 beziehungsweise 5000 Pkws allein auf der Straße	137
5.2.44. Vergleich der Geschwindigkeit von 2000 Fahrradfahrern auf dem Radweg während 1000 Autos auf der Straße fahren mit 1000 Fahrrädern welche gemeinsam mit 2000 Pkws auf der Straße fahren und 1000 Radfahrern allein auf der Straße	138
5.2.45. Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 beziehungsweise 2500 Pkws allein auf der Straße mit 2000 Personenkraftwagen gemeinsam mit 500 beziehungsweise 1000 Fahrradfahrern	140
A.3.1. Vergleich des Verhaltens bei einem stehenden Vordermann zwischen SUMO und der eigenen Implementierung	154
A.3.2. Vergleich des Verhaltens bei einem vorausfahrenden Fahrzeuges zwischen SUMO und der eigenen Implementierung	155

Tabellenverzeichnis

3.1.1.	Übersicht über die Schulterbreiten von Männern und Frauen [BLW]	25
3.1.2.	Übersicht über die Häufigkeit der Nutzung von Fahrrädern nach Alter I [Bunb]	26
3.1.3.	Übersicht über die Häufigkeit der Nutzung von Fahrrädern nach Alter II und Geschlecht [Bunb]	26
3.1.4.	Übersicht über den Zweck der Nutzung von Fahrrädern nach Alter I [Bunb]	27
3.1.5.	Übersicht über den Zweck der Nutzung von Fahrrädern nach Alter II und Geschlecht [Bunb]	28
3.1.6.	Übersicht der Häufigkeit der Kombination unterschiedlicher Verkehrsmittel [Bunb]	29
3.1.7.	Übersicht der Häufigkeit der Kombination von ÖPNV und Fahrrad zur Arbeit / Fortbildungsstätte beziehungsweise Schule / Universität / Ausbildung [sB19]	29
3.1.8.	Übersicht der in der Praxis genutzten Fahrradtypen [sB19]	30
3.1.9.	Übersicht über das durchschnittliche Gewicht von unterschiedlichen Fahrradtypen [Peta] [Bun13] [Pro] [ver] [Tes] [gre] [ela]	31
3.1.10.	Übersicht über die möglichen Zusatzgewichte beim Fahrrad [mei19] [HS b] [HS a] [Bas]	31
3.1.11.	Übersicht über die Lenkerbreiten unterschiedlicher Fahrradtypen [Bun13]	32
3.1.12.	Übersicht über die durchschnittlichen Radfahrgeschwindigkeiten nach Alter und Geschlecht [Col]	33
3.1.13.	Übersicht über die durchschnittlichen Akkukennzahlen von E-Bikes / Pedelec [Faha]	34
3.1.14.	Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Alter I [Bunb] . .	35
3.1.15.	Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Alter II und Geschlecht [Bunb]	35
3.1.16.	Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Bundesland [Bunb]	36
3.1.17.	Übersicht über die Mindest- und Optimalbreiten unterschiedlicher Wegtypen [Bun17]	39
3.1.18.	Übersicht über die Nutzungshäufigkeit und das Sicherheitsempfinden unterschiedlicher Wegtypen durch Fahrradfahrer [sB19]	40
3.1.19.	Durchschnittliche Verzögerung der Radtypen bei trockener und nasser Fahrbahn [Bie12]	41
3.2.20.	Übersicht über die Verkehrsstärken im Bezirk Altona in 24 und 1 Stunde für Pkws [Lan]	44
3.2.21.	Übersicht über die Verkehrsstärken im Bezirk Altona in 24 Stunden für Pkws und Fahrräder [Lan]	45
3.4.22.	Übersicht der Parameter für das Wiedemann 99 Modell [Mül12] [Fra18] [Sor10] [TA13] [Wie96]	50

4.2.1.	Gewählte Parameter für den eigenen und vorausfahrende Radfahrer für die Vergleichstests	70
4.2.2.	Teil I - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung	75
4.2.3.	Teil II - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung	77
4.2.4.	Teil III - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung	78
4.2.5.	Teil IV - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung	79
4.3.6.	Übersicht der möglichen Werte von DriverRand	85
4.3.7.	Übersicht der möglichen Werte der HeadwayTime CC1	88
4.3.8.	Übersicht der möglichen Werte der FollowingVariation CC2	89
4.3.9.	Übersicht der möglichen Werte der EnterFollowingVariation CC3	89
4.3.10.	Übersicht der möglichen Werte der OscillationAcceleration CC7	89
4.3.11.	Übersicht über die Neigung zu Überholen in Abhängigkeit des Fahrertyps	90
4.3.12.	Übersicht der Parameter für das Wiedemann 99 Modell in Abhängigkeit des Fahrertyps	90
5.1.1.	Parameter für die Unitests	95
5.1.2.	Übersicht über die verschiedenen Fahrmodi innerhalb der Simulation [Wey19]	96
5.1.3.	Simulationsparameter für die Verhaltenstests an Kreuzungen	100
5.1.4.	Simulationsparameter für das Fahrrad und den langsamen Pkw	116
5.1.5.	Simulationsparameter für das langsame Fahrrad und den Pkw	119
5.2.6.	Simulationsparameter für die Simulationen für die Untersuchung der Forschungsfragen	130
A.2.1.	Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der SUMO Implementierung [Ins] (beides zur Vergleichbarkeit angepasst) . .	154

Listings

4.1. Anpassungen der Berechnung der maximalen Geschwindigkeit am originalen Wiedemann 99 Modell und SUMO	71
A.1. Auswahl der Parameter für das Wiedemann 99 Modell für einen normalen Fahrer	149
A.2. Berechnung der neuen Beschleunigung mit dem angepassten Wiedemann 99 Modell	149
A.3. Berechnung der aktuell maximal möglichen Beschleunigung	151
A.4. Bestimmung einer standardnormalverteilten Zufallsvariable	151

1. Einleitung

Fragt man den durchschnittlichen Einwohner in Deutschland, welches Verkehrsmittel er am häufigsten nutzt, ist die Antwort seit einigen Jahren stets die gleiche: Den (eigenen) Personenkraftwagen [Bunb] [Bun19]. Dies spiegelt sich auch in der jährlich steigenden Anzahl Pkws wieder [Kra]. Und bedenkt man die vielen Vorteile, wie hohe Flexibilität und Privatsphäre, erscheint dies auch wie eine kluge Wahl und wenig verwunderlich, dass 50 Prozent der Autofahrer aussagen, „Autofahren macht mir immer großen Spaß“ [Petb] [zan].

Doch wo Licht ist, ist in der Regel auch Schatten. Das wohl populärste Beispiel gegen den motorisierten Einzelverkehr ist der Klimawandel: Das Wetter wird weltweit immer wärmer, Extremwetterereignisse nehmen zu und der Meeresspiegel steigt [REP19]. Verursacher sind nicht nur die Emissionen der Energiewirtschaft und Fabriken, sondern auch die des Verkehrs. Auch wenn Pkws durch strenge staatliche Regelungen und konsequente Weiterentwicklungen heute im Vergleich zu 1995 weniger Emissionen ausstoßen, führt das Mehr und auch die Größe von Fahrzeugen nichtsdestotrotz zu einer Erhöhung der schädlichen Abgase [Umw20]. Auch der Umstieg auf elektrisch betriebene Kraftwagen kann beispielsweise durch die energieintensive Herstellung und die Abhängigkeit vom Strom nicht als ideale Lösung betrachtet werden [Tau16]. Und auch abseits von der Bedeutung für die Umwelt birgt der Autoverkehr ein Risiko für den einzelnen Fahrer selbst. So führt die schiere Menge an Fahrzeugen dazu, dass die Stauhäufigkeit und -Dauer groß sind. In konzentrierter Form tritt dieses Problem in Großstädten wie Hamburg im täglichen Berufsverkehr auf. So standen im Jahr 2018 Pendler in Hamburg etwa 139 Stunden - also knapp sechs Tage - im Stau [Rad].

Denkt man noch weiter an die Parkplatzsituation [onl18], den entstehenden Lärm [Umw19] und die Folgen der Luftverschmutzung für die Bewohner von Städten [Sch16] ist es kaum verwunderlich, dass auch das „Autoland Deutschland“ [Gol19] sich mit Alternativen zum Pkw beschäftigt. Neben dem öffentlichen Personennahverkehr, der in Form von Bussen ebenfalls Emissionen erzeugt, gibt es noch weitere Optionen, von denen eine hier untersucht wird: Das Fahrrad.

Dass dies in großen Städten gut funktionieren kann, macht eine der fahrradfreundlichsten Städte der Welt - Kopenhagen - vor: Parkplätze für Pkws werden reduziert, die Parkgebühren erhöht und die Radler durch Anerkennung und geeignete Infrastruktur gefördert [Diaa]. Dazu gehört auch ein Netz aus knapp 400 Kilometer Superradschnellwegen um die Innenstadt. Auch wenn die Entwicklung in Deutschland diesen Stand noch lange nicht erreicht hat, ist auch hier eine positive Entwicklung zu erkennen. So hat die Nut-

zung des Rades im Laufe der Jahre in fast allen Bundesländern zugenommen [Bunc] [SH] und Initiativen wie „Mehr Platz fürs Rad“ [All] wurden ins Leben gerufen. Zugleich wird untersucht, ob und wo sich Radschnellwege in Deutschland realisieren lassen [Diab] und Radwege aus- beziehungsweise neu gebaut.

Solche Veränderungen - zugunsten von Radfahrern und (potenziell) zulasten von Autofahren - müssen allerdings sorgfältig geplant werden, um eine tatsächliche Verbesserung zu erzielen. Dabei stehen diverse Fragen im Vordergrund wie beispielsweise die voraussichtliche Nutzungshäufigkeit eines Radweges und die Auswirkung auf den Straßenverkehr wenn die Straße verschmälert wird bei der normalen Verkehrslast. Jedoch stellt eine solche Planung ohne zusätzliche Unterstützung eine sehr komplexe, zeitaufwendige und fehleranfällige Aufgabe dar. Deshalb sind Verkehrssimulationen ein geeignetes Mittel, um solche und viele weitere Fragen zu beantworten [PTV].

Um das komplexe Zusammenspiel des Verkehrs untersuchen zu können, ist es relevant, dass dabei verschiedene Verkehrsteilnehmer, wie Pkws, der ÖPNV und Fahrradfahrer, simuliert werden können. Dies ist jedoch häufig nicht Fokus der bisherigen Simulationsanwendungen, sondern lediglich der motorisierte Kraftverkehr und die Verbesserung des Fahrerlebnisses dieser. Die MARS Arbeitsgruppe (Multi-Agent Research and Simulation) [MARb] der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg hingegen arbeitet im SmartOpenHamburg Projekt der an einer ganzheitlichen und effizienten Simulation verschiedener Verkehrsteilnehmer im Hamburger Verkehrsnetz. In dieses Projekt werden im Rahmen dieser Ausarbeitung Fahrradfahrer eingefügt und ihr Verhalten und ihre Auswirkungen untersucht.

1. Forschungsfragen

Bei der Integration von Fahrradfahrern in eine Verkehrssimulation und damit stellvertretend in ein Verkehrsnetz, ergeben sich einige Forschungsfragen, welche im Folgenden vorgestellt werden.

- Welche Auswirkungen haben Radschnellspuren, auch Radschnellweg genannt, auf den Radverkehr?
 - Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf einem Radschnellweg fahren?
 - Welche Auswirkung auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit hat das Hinzufügen eines Radschnellweges?
- Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf der Fahrbahn fahren?
- Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf dem Radweg fahren?

- Welche Auswirkungen auf beispielsweise die Reisezeit hat die Verwendung von ausschließlich Fahrrädern?
- Wie muss ein geeignetes Radfahrer-Modell aussehen?
 - Welche Unterschiede hat ein Fahrrad-Verkehrsmodell zu einem Verkehrsmodell ausgelegt auf Pkws / motorisierte Fahrzeuge?
 - Welche Parameter sind für das Fahrrad-Modell zu wählen?
 - Welche Anpassungen an bestehenden Verhaltensmodellen sind für Fahrräder vorzunehmen?
- Welche Routen nutzen Radfahrer im Gegensatz zu Autofahrern?
- Führt eine Erhöhung des Fahrradverkehrs zu einer Verbesserung der durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit der verbleibenden Autos?
- Welche Auswirkungen haben Radfahrer auf den Straßenverkehr?
 - Wie verändert sich die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Autofahrern, wenn Radfahrer auf der Fahrbahn fahren?
- Wie verändert sich die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Radfahrern, wenn es mehr Radfahrer gibt?

2. Hypothesen

Auf Basis der oben genannten Fragen ergeben sich die folgenden Hypothesen, welche innerhalb der Simulation untersucht werden.

Das Verhalten von Radfahrern weicht im Verkehr von dem von Fußgängern und Personenkraftwagen ab

Obwohl Radfahrer sich potenziell sowohl mit Fußgängern als auch mit Autofahrern Bereiche der Straße teilen, weisen diese ein abweichendes Verkehrsverhalten auf. Dies äußert sich unter anderem durch die Nutzung unterschiedlicher Strecken. So können Radfahrer beispielsweise nicht auf Autobahnen oder schmalen Trampelpfaden fahren.

Die Hinzunahme von Fahrradfahrer-Agenten hat Auswirkungen auf den Verkehrsfluss

Unter der Prämisse, dass Radfahrer, sofern kein Radweg vorhanden ist, neben motorisierten Fahrzeugen wie Pkws die Fahrbahn benutzen, wird davon ausgegangen, dass diese einen Einfluss auf den Verkehr haben. Darunter fallen beispielsweise eine Verlängerung der Reisezeit oder eine potenzielle Erhöhung der Stau-Wahrscheinlichkeit.

Das Hinzufügen von Schnellspuren wirkt sich auf Fahrradfahrer aus

Es wird davon ausgegangen, dass Schnellspuren, welche explizit für Fahrräder gedacht sind, in vielfacher Hinsicht einen Einfluss auf Radfahrer haben. So sollte sich dadurch die Reisegeschwindigkeit von Radfahrern erhöhen und die Notwendigkeit anzuhalten verringern lassen.

3. Zielsetzung

In dieser Masterarbeit soll das oben genannte SmartOpenHamburg Projekt um die Möglichkeit, Fahrradfahrer zu simulieren, erweitert werden. Dabei sollen die folgenden Dinge erreicht werden. Zunächst sind hinreichend Informationen über Radfahrer zu sammeln und ein konzeptionelles Modell dieser für Städte zu entwickeln. Anschließend ist ein geeignetes Bewegungsmodell zu finden und Fahrradfahrer zu implementieren und in die bestehende MARS Umgebung zu integrieren. Dabei ist zu beachten, dass Radfahrer geeignet mit ihrer Umwelt, also Lichtsignalanlagen und anderen Verkehrsteilnehmern, interagieren und von diesen berücksichtigt werden. Anschließend ist das Modell mittels der Durchführung geeigneter Simulationen zu evaluieren und die Forschungsfragen zu untersuchen.

4. Aufbau der Arbeit

Die nachfolgende Arbeit ist inhaltlich in fünf weitere Kapitel unterteilt. Zunächst werden in Kapitel 2 „Methodik“ die Einsatzumgebung für die Arbeit und relevante Grundlagen zu Modellierungskonzepten und unterschiedlichen Verkehrsflussmodellen vorgestellt. Zudem wird ein Überblick über verwandte Arbeiten gegeben. In Abschnitt 3 „Konzept“ folgt eine konzeptionelle Beschreibung des Radfahrer-Modells mit einer Analyse von Merkmalen und Verhalten von Radfahrern und Fahrrädern. Zusätzlich werden ein Verkehrsflussmodell ausgewählt, die Architektur vorgestellt und der Umfang der Arbeit abgegrenzt. Anschließend wird in Kapitel 4 „Implementierung“ die konkrete Umsetzung des zuvor erarbeiteten Konzeptes beschrieben und das Verkehrsflussmodell untersucht. In Kapitel 5 „Evaluation“ wird geprüft, ob die implementierten Fahrradfahrer die Erwartungen erfüllen und die Forschungsfragen und Hypothesen untersucht. Des Weiteren werden mögliche technische Weiterentwicklungen aufgezeigt. Zuletzt folgt in Kapitel 6 „Fazit“ die Zusammenfassung und ein Ausblick.

2. Methodik

In diesem Kapitel wird zum einen die Einsatzumgebung innerhalb der MARS Arbeitsgruppe der HAW Hamburg und des SmartOpenHamburg Projektes und zum anderen werden thematische Grundlagen vorgestellt, welche das Verständnis der Ausarbeitung erleichtern sollen.

1. Forschung und Simulation

Die Multi-Agent Research and Simulation, kurz MARS, Arbeitsgruppe forscht an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg im Bereich agentenbasierter Modellierung und Simulation. Während sich dies anfänglich mit Personenstromsimulationen wie beispielsweise der Durchführung von Evakuierungen befasste, werden heute viele verschiedene Bereiche untersucht ([Dal18], Vgl. hier und in diesem Absatz). Beispiele dafür sind Untersuchungen, wie sich Krankheiten verbreiten oder Verkehrssimulationen. Dabei stellt MARS diverse Tools bereit, um die Erstellung von Modellen, Datenimport und Simulation zur Verfügung.

2. SmartOpenHamburg

Im Bereich der Verkehrssimulationen ist das Anfang 2018 gestartete hochschulübergreifende Forschungsprojekt SmartOpenHamburg angesiedelt [aho]. Im Rahmen des Projektes wird ein digitaler Zwilling, also ein Abbild Hamburgs inklusive Gebäuden und Verkehrsnetz, entwickelt, durch welches sich verschiedene Agenten bewegen [MARa] [Wey19] [Löf19]. Ziel dabei ist zum einen die Unterstützung bei Entscheidungsprozessen und zum anderen die Untersuchung, welche Auswirkungen Veränderungen auf den Verkehr haben.

Die bisherigen Agenten in der multi-modalen mikroskopischen Simulation sind Autos, der öffentliche Nahverkehr wie beispielsweise Busse und Fußgänger ([Wey19] [Löf19], Vgl. hier und in diesem Absatz). Um ein realistisches Modell zu bieten, haben diese jeweils individuelle Eigenschaften. So haben die Menschen ein komplexes „Leben“ mit realistischen Tagesabläufen und die Möglichkeit, verschiedene Fortbewegungsmittel auf seinen Wegen zu nutzen. Im Bereich des Personenkraftverkehrs kommt das Verhaltensmodell „Intelligent Driver“ zum Einsatz. Um sich innerhalb des Modells bewegen zu können, wird ein spatialer Graph bestehend aus Kanten für Fahrbahnen und Knoten für Kreuzungen genutzt.

3. Verkehrsflussmodelle

Für die Simulation von Verkehr müssen potenziell eine Vielzahl von Informationen berücksichtigt und geeignet ausgewertet werden. Beispielsweise müssen Verkehrsteilnehmer auf andere Teilnehmer und ihre Umgebung, wie Lichtsignalanlagen entsprechend reagieren. Dieser komplexen Aufgabe widmen sich Verkehrsflussmodelle und versuchen für eine beschränkte Anzahl von Parametern effizient, verlässlich und reproduzierbar das Verhalten eines Fahrzeuges zu bestimmen [Neu00].

Nachfolgend wird erläutert, welche Typen von Flussmodellen es gibt und wie sich diese unterscheiden. Zudem werden die Modelle, welche für die Simulation von Fahrradfahrern in Betracht gezogen worden sind, vorgestellt.

3.1. Modellierungskonzepte

Man unterscheidet bei Verkehrsflussmodellen hinsichtlich des Detaillierungsgrades zwischen makro-, meso-, mikro- und submikroskopischen Modellen [Rei07] [Dal14]. Diese unterschiedlichen Modelltypen sind für verschiedene Einsatzzwecke geeignet.

Makroskopische Modelle

Bei Modellen mit geringerer Detailtiefe spricht man von makroskopischen Modellen ([Sch04] [Rei07] [Dal14] [Bar10], Vgl. hier und in diesem Absatz). Innerhalb dieser werden beispielsweise Flüssigkeitsmodelle oder gaskinetische Gleichungen verwendet, um Verkehrsströme zu simulieren. Konkret bedeutet dies, dass nicht jedes einzelne Fahrzeug, sondern die Menge aller im Strom betrachtet und dargestellt werden. Entsprechend sind lediglich Informationen über den aktuellen Zustand, wie die Verkehrsdichte oder die Anzahl Spuren von Straßen, nötig, um zum Beispiel die Geschwindigkeit oder Fahrdauer im Mittel zu bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass makroskopische Modelle im Vergleich größere Strecken und Modellierungszeiträume abdecken als andere Modellarten. Durch die Modellierung als Fluss hängt der Rechenaufwand nicht von der Zahl der einzelnen Fahrzeuge sondern proportional von der Größe des simulierten Raumes und der verwendeten Diskretisierung ab und ist damit vergleichsweise gering. Der Anwendungszweck solcher Modelle liegt in der Simulation großräumiger Verkehrsabläufe wie Autobahnverkehr. Üblicherweise beschränken sich makroskopische Flussmodelle auf den Personenkraftverkehr.

Mikroskopische Modelle

Im Gegensatz zu makroskopischen Modellen, simulieren mikroskopische Flussmodelle das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeuges ([Sch04] [Rei07] [Dal14] [Bar10], Vgl. hier und in diesem Absatz). Aufgrund dieser Detailtiefe ist es nötig, das individuelle Verhalten, wie bremsen und beschleunigen, eines Vehikels, das Zusammenspiel verschiedener Verkehrsteilnehmer sowie die aktuelle Umgebung und Verkehrsregelungen zu modellieren.

Durch die tiefe Betrachtungsweise ergeben sich auch andere Einsatzmöglichkeiten. So lassen sich mit mikroskopischen Modellen Verkehrsszenarien in Städten mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen simulieren. Es wird unterschieden zwischen Fahrzeugfolgemodellen und Modelle auf Basis zellulärer Automaten, wie das Nagel-Schreckenberg-Modell.

Submikroskopische Modelle

Noch detaillierter als die zuvor genannten Ansätze sind submikroskopische Modelle ([Rei07], Vgl. hier und in diesem Absatz). Bei dieser Sorte von Modellen werden zusätzlich zu den einzelnen Fahrzeugen auch bestimmte Beziehungen dargestellt. Beispiele für solche Beziehungen sind die Beziehung zwischen Fahrzeug und Fahrer, Fahrer und Assistenzsystemen des Vehikels oder auch zwischen den Fahrzeugen untereinander.

Mesoskopische Modelle

Werden makroskopische und mikroskopische Ansätze kombiniert, handelt es sich um ein mesoskopisches Modell ([Rei07] [Dal14] [Bar10], Vgl. hier und in diesem Absatz). Ein Beispiel für eine solche Kombination ist, eine mikroskopische Simulation eines Stadtgebiets mit makroskopisch dargestellten Zu- und Abflüssen in diesen Bereich. Ebenfalls eignen sich solche Flussmodelle für Simulationen, bei denen Routenwahl oder Verkehrslenkung untersucht werden sollen.

3.2. Konkrete Verflussmodelle

Im Folgenden werden einige konkrete Verkehrsflussmodelle inklusive relevanter Formeln vorgestellt. Dabei ist anzumerken, dass es sich bei Variable n um das folgende und bei Variable $n-1$ um das vorausfahrende Fahrzeug handelt.

3.2.1. Follow-the-Leader

Bei dem ersten betrachteten Modell handelt es sich um das Follow-the-Leader Modell, welches in den 50er Jahren von Reuschel und Pipes erstmals vorgestellt wurde ([Sch04] [Sor10], Vgl. hier und im Folgenden). Dabei wird, wie der Name bereits suggeriert, davon ausgegangen, dass der Vordermann ausschlaggebend ist, für das eigene Verhalten. Dabei steigt der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen mit der Geschwindigkeit.

Dem zugrunde liegt die Differenzialgleichung 2.1.

$$x_{n+1}(t) - x_n(t) = (\Delta x)_{safe} + \tau \dot{x}_n(t) \quad (2.1)$$

Wird diese differenziert, ergibt sich die Bewegungsgleichung 2.2 für das Fahrzeug an Position n mit Sensitivitätsmaß τ und Geschwindigkeit \dot{x} [Sch04].

$$\ddot{x}_n(t) = \frac{1}{\tau} [\dot{x}_{n+1}(t) - \dot{x}_n(t)] \quad (2.2)$$

Im Laufe der Zeit gab es diverse Verbesserungen an der oben genannten Gleichung welche beispielsweise die Reaktionszeit des Fahrers und die gewünschte Geschwindigkeit mit einbeziehen ([Sch04] [Dal14], Vgl. hier und im Folgenden). Daraus ergibt sich die folgende Bewegungsgleichung 2.3 mit Position $x_n(t)$, Geschwindigkeit $\dot{x}_n(t)$, Beschleunigung $\ddot{x}_n(t)$, Verhaltensschwankung $\xi_n(t)$ jeweils von Fahrzeug n zum Zeitpunkt t , Reaktionszeit T , Wunschgeschwindigkeit von Auto n v_n^0 , Relaxationszeit von Auto n τ_n und Abstoßung zwischen Fahrzeug n und $n-1$ zum Zeitpunkt t : $f_{n,(n-1)}(t)$.

$$\ddot{x}_n(t+T) = \frac{v_n^0 + \xi_n(t) - \dot{x}_n(t)}{\tau_n} + f_{n,(n-1)}(t) \quad (2.3)$$

Neben dem Follow-the-Leader Modell von Reuschel und Pipes gibt es noch weitere Modelle, innerhalb welcher Fahrer ihr Verhalten auf den Vordermann anpassen ([OT04] [Dal14], Vgl. hier und im Folgenden). Ein bekanntes ist das Gazis-Herman-Rothery-Modell (kurz GHR Modell), welches in der unsymmetrischen Variante in der Verkehrssimulation MITSIM [ITS] genutzt wird.

3.2.2. Optimal-Velocity

Ausgehend vom GHR Modell ist das Optimal-Velocity Modell, kurz OVM, von Bando 1994 weiterentwickelt worden ([Dal14], Vgl. hier und im Folgenden). Darin ergibt sich die optimale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in Relation zum Vorausfahrenden. Konkret wächst sie mit dem Abstand zu diesem. Daraus ergibt sich die folgende Formel 2.4 mit der Optimal-Velocity-Funktion $V(\Delta x(t))$ und der Sensitivitätskonstante τ .

$$\ddot{x}_n(t) = \frac{V(\Delta x(t)) - \dot{x}_{n-1}(t)}{\tau} \quad (2.4)$$

Das Vorgehen besteht dabei aus (a) dem Bestimmen des Abstands Δx zum Vordermann, (b) der Berechnung der optimalen Geschwindigkeit $V(\Delta x(t))$, (c) Vergleich der berechneten Geschwindigkeit mit der aktuellen v_n und (d) Anpassung der Geschwindigkeit mit der oben genannten Formel [Dal14] [Sch04].

3.2.3. Fritzsche

In der Verkehrssimulation Paramics [Par] kommt das psychisch-physikalische Verhaltensmodell von Fritzsche aus dem Jahr 1994 zum Einsatz¹ ([OT04], Vgl. hier und im Folgenden). Bei diesem Modell muss die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vordermann innerhalb bestimmter Grenzen liegen, um berücksichtigt zu werden. Die negative (PTN) und positive Schranke (PTP) sind in Gleichung 2.5 und 2.6 dargestellt, wobei k_{PTN} , k_{PTP} und f_x Modellparameter sind und es sich bei s_{n-1} um die Länge des Fahrzeugs plus der

¹Es ist nicht bekannt, ob und welche Änderungen in der Paramics Simulation an dem ursprünglichen Modell vorgenommen wurden.

minimale Abstand zwischen stehenden Fahrzeugen handelt.

$$PTN = -k_{PTN}(\Delta x - s_{n-1})^2 - f_x \quad (2.5)$$

$$PTP = k_{PTP}(\Delta x - s_{n-1})^2 - f_x \quad (2.6)$$

Dabei ist anzumerken, dass davon ausgegangen wird, dass die negativen Geschwindigkeitsdifferenzen kleiner sind als die Positiven [OT04]. Entsprechend ist PTN kleiner als PTP .

Zusätzlich werden vier verschiedene Distanzen zum voran fahrenden Fahrzeug unterschieden [OT04]:

- Gewünschte Distanz AD mit der gewünschten Zeitdifferenz T_D

$$AD = s_{n-1} + T_D * v_n \quad (2.7)$$

- Gefährliche Distanz AR mit der gefährlichen Zeitdifferenz T_r

$$AR = s_{n-1} + T_r * v_{n-1} \quad (2.8)$$

- Sichere Distanz AS mit Modellparameter T_s

$$AS = s_{n-1} + T_s * v_n \quad (2.9)$$

- Bremsabstand AB

$$AB = AR + \frac{\Delta v^2}{\Delta b_m} \quad (2.10)$$

mit

$$\Delta b_m = |b_{min}| + \alpha_{n-1}^- \quad (2.11)$$

mit Modellparametern b_{min} und α_{n-1}^- , welche die maximale Verzögerung steuern

Die folgende Abbildung 2.3.1 zeigt, wie sich die oben genannten Schranken auf das Verhalten des Fahrzeugs auswirken.

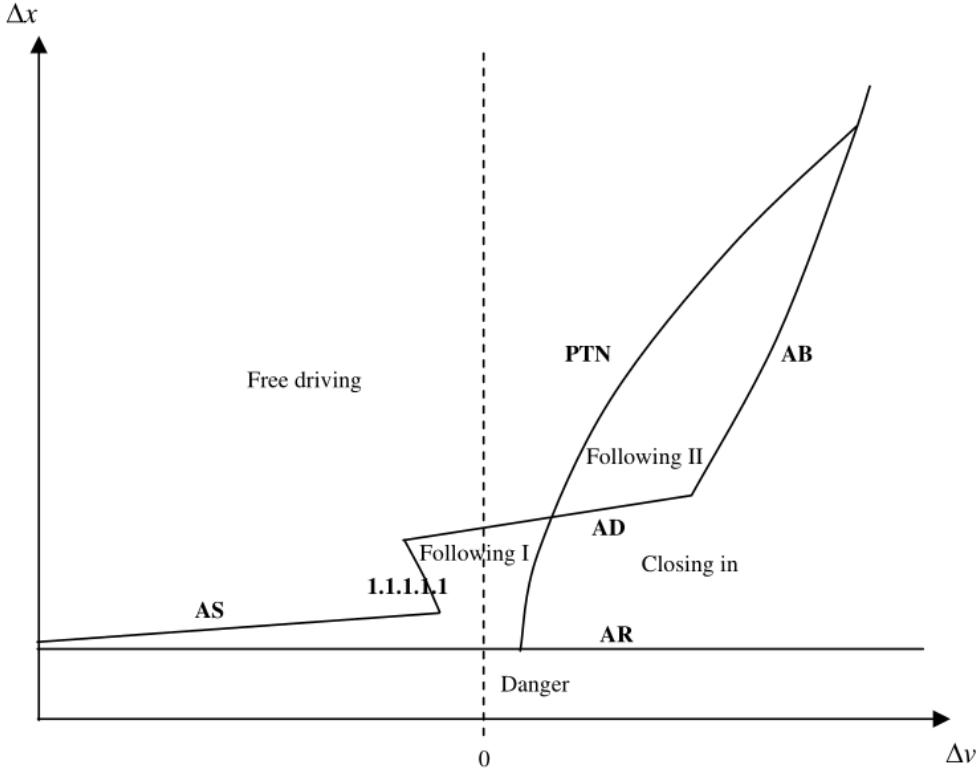


Abbildung 2.3.1.: Übersicht über die Schranken des Fritzsche Modells und deren Auswirkung [OT04]

Der Unterschied zwischen Following I und Following II ist, dass bei Following II der Fahrer merkt, dass die Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug sich verringert aber noch keine Aktion nötig ist, da die Distanz noch groß genug ist [OT04].

3.2.4. Intelligent-Driver

Beim Intelligent-Driver Modell von Helbing und Treiber von 1999 wird das Verhalten auf Basis der Geschwindigkeit, Distanz und der Geschwindigkeitsdifferenz des Vorausfahrenden bestimmt ([Dal14] [Sch04], Vgl. hier und im Folgenden). Die zugehörige Formel dabei ist in 2.12 dargestellt.

$$\dot{v}_n = \alpha \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s_n} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

mit der minimalen Wunschlücke

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s'_n + s''_n \sqrt{\frac{v_n}{v_0}} + T v_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{\alpha b}} \quad (2.13)$$

und Wunschgeschwindigkeit v_0 , Lücke zum Vordermann $s_n = \Delta x_n - l_{n-1}$, Maximalbeschleunigung α , dem Beschleunigungsexponenten δ , der komfortablen Verzögerung b ,

zeitlicher Sicherheitsabstand T und Lücken in Staus s' und s''^2 ([Dal14] [Sch04], Vgl. hier und im Folgenden). In Formel 2.12 sind die Beschleunigung auf freier Straße $(\alpha \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta \right])$ und die Verzögerung durch andere Verkehrsteilnehmer $(-\alpha \left(\frac{s^*}{s_n} \right)^2)$ abgebildet. Geeignete Parameter für das Modell für Autobahn und Stadtverkehr sind in „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt“ von Jörg Dallmeyer [Dal14], Kapitel 3.1.1. auf Seite 22 zu finden.

3.2.5. Wiedemann Modelle

Zuletzt werden die beiden Modelle, welche 1974 bzw. 1999 von Rainer Wiedemann veröffentlicht wurden, untersucht. Nachfolgend werden beide vorgestellt. Die Modelle von Wiedemann finden in der Simulationssoftware VISSIM [PTV] Anwendung.

Erstes Wiedemann Modell von 1974

Im Jahr 1974 wurde das erste psychisch-physikalisches Verhaltensmodell von Wiedemann vorgestellt ([Dal14], Vgl. hier und im Folgenden). Dieses erweitert das GHR Modell um eine Wahrnehmungsschwelle. Durch diese reagieren Fahrer lediglich auf spürbare Änderungen der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden.

Das Modell besitzt dafür verschiedene Schranken, welche das Verhalten des Fahrenden einteilen. Diese werden nachfolgend genannt.

- Gewünschte Distanz zu stationären Fahrzeugen AX mit Kalibrierungsparametern AX_{add} und AX_{mult} und dem fahrerabhängigen normal verteilten Parameter $RND1_n$

$$AX = L_{n-1} + AX_{add} + RND1_n * AX_{mult} \quad (2.14)$$

- Gewünschte minimale Folgedistanz bei niedrigen Geschwindigkeiten ABX mit Kalibrierungsparametern BX_{add} und BX_{mult} ³

$$ABX = AX + BX \quad (2.15)$$

mit

$$BX = (BX_{add} + BX_{mult} * RAND1_n) * \sqrt{v} \quad (2.16)$$

mit der Geschwindigkeit

$$v = \begin{cases} v_{n-1} & \text{für } v_n > v_{n-1} \\ v_n & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.17)$$

ABX ist ebenfalls als Sicherheitsabstand zu verstehen.

²In der Regel gilt $s'' = 0$

³Quellen: [Mül12] [HAM11] [Bie13] [Rei07] [OT04]

- Maximale Folgedistanz SDX mit Kalibrierungsparametern EX_{add} und EX_{mult} , der normalverteilten Zufallszahl $NRND$ und dem fahrerabhängigen normalverteilten Parameter $RND2_n$ ³

$$SDX = AX + EX * BX \quad (2.18)$$

mit

$$EX = EX_{add} + EX_{mult} * (NRND - RND2_n) \quad (2.19)$$

SDX ist in der Regel 1,5 bis 2,5 mal ABX .

- Annäherungspunkt SDV , ab diesem Punkt merkt der Fahrer, dass er auf ein langsameres Fahrzeug auffährt bei großen Abständen mit Kalibrierungsparametern CX_{add} , CX_{mult} und CX_{const} ³

$$SDV = \left(\frac{\Delta x - L_{n-1} - AX}{CX} \right)^2 \quad (2.20)$$

mit

$$CX = CX_{const} * (CX_{add} + CX_{mult} * (RND1_n + RND2_n)) \quad (2.21)$$

- Annäherungspunkt SDV , wo der Fahrer merkt, dass er auf ein langsameres Fahrzeug auffährt bei kleinen Abständen $CLDV$ mit³

$$CLDV = \left(\frac{\Delta x - L_{n-1} - AX}{CLDV * CX} \right)^2 \quad (2.22)$$

In VISSIM wird angenommen, dass $CLDV = SDV$.

- Punkt ab dem der Fahrer merkt, dass der Vordermann sich entfernt $OPDV$ mit Kalibrierungsparametern $OPDV_{add}$ und $OPDV_{mult}$ und der normalverteilten Zufallszahl $NRND$ ³

$$OPDV = CLDV * (-OPDV_{add} - OPDV_{mult} * NRND) \quad (2.23)$$

Aus diesen Schranken ergeben sich die folgenden Verhaltensweisen.

- *Folgen:* Errechnete Geschwindigkeitsveränderung³

$$b_{null} = BNULL_{mult} * (RND4_n + NRND) \quad (2.24)$$

mit Kalibrierungsparameter $BNULL_{mult}$, der normalverteilten Zufallszahl $NRND$ und dem fahrerabhängigen normalverteilten Parameter $RND4_n$ ³

- *Freies Fahren:* Das Fahrzeug versucht auf seine Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen. Errechnete Geschwindigkeitsveränderung³

$$b_{max} = BMAX_{mult} * (v_{max} - v * FaktorV) \quad (2.25)$$

mit

$$FaktorV = \frac{v_{max}}{v_{des} + FaktorV_{mult} * (v_{max} - v_{des})} \quad (2.26)$$

mit Maximalgeschwindigkeit v_{max} und Kalibrierungsparameter $FaktorV_{mult}$

- *Annähern:* Wenn nötig, passt der Fahrer seine Geschwindigkeit an um eine Kollision zu vermeiden. Errechnete Geschwindigkeitsveränderung³

$$b_n = \frac{1}{2} * \frac{(\Delta v)^2}{ABX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1} \quad (2.27)$$

mit Beschleunigung des Vordermannes b_{n-1}

- *Notfallregelungen:* Errechnete Geschwindigkeitsveränderung³

$$b_n = \frac{1}{2} * \frac{(\Delta v)^2}{AX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1} + b_{min} * \frac{ABX - (\Delta x - L_{n-1})}{BX} \quad (2.28)$$

mit der maximalen Verzögerung

$$b_{min} = -BMIN_{add} - BMIN_{mult} * RND3_n + BMIN_{mult} * v_n \quad (2.29)$$

mit Kalibrierungsparametern $BMIN_{add}$ und $BMIN_{mult}$ und dem fahrerabhängigen normalverteilten Parameter $RND3_n$

Folgende Abbildung 2.3.2 verdeutlicht das Verhalten nach dem Wiedemann 74 Modell.

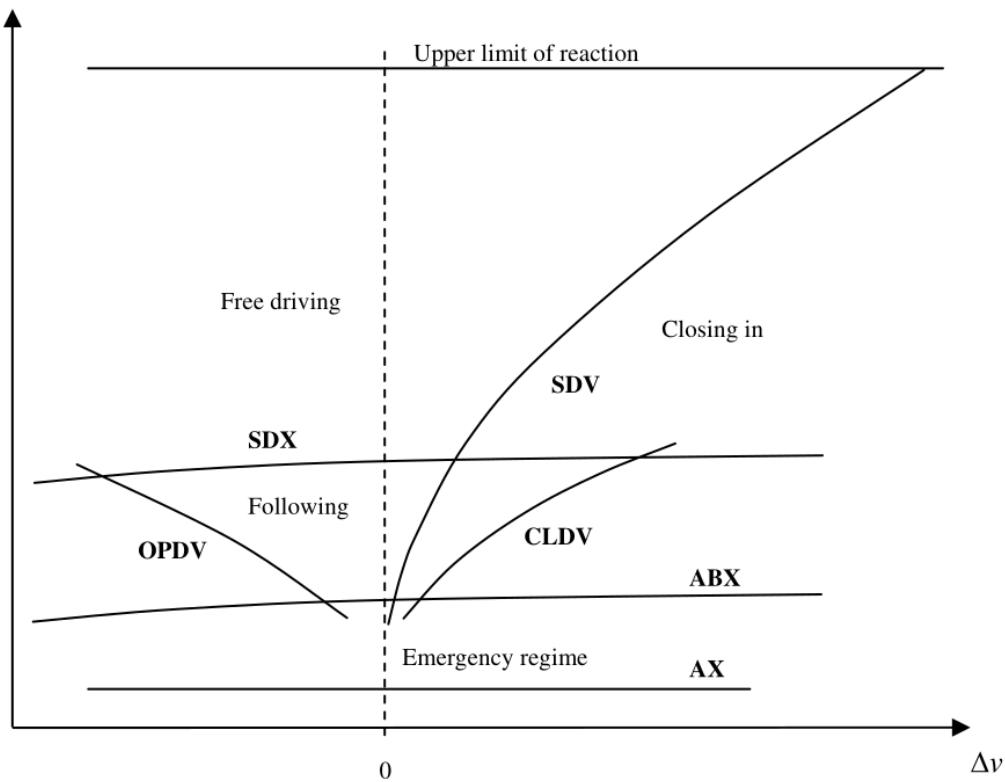


Abbildung 2.3.2.: Übersicht über die Schranken des Wiedemann 74 Modells und deren Auswirkung [OT04]

Zweites Wiedemann Modell von 1999

Bei dem Wiedemann 99 Modell handelt es sich um eine modifizierte Version des Modells von 1974 ([Mül12] [Fra18] [Sor10], Vgl. hier und in diesem Absatz). Dafür wurden diverse Schranken überarbeitet um eine Vereinfachung zu erzielen. Auch dieses Modell weist eine Vielzahl an Parametern auf, wodurch eine Justage des Verhaltens erzielt werden kann. Nachfolgend werden die Parameter, die zugehörigen Formeln und das aus ihnen resultierende Verhalten näher beschrieben.

Zunächst werden die zehn Parameter des Modells vorgestellt.

- Durchschnittliche Distanz zwischen stehenden Fahrzeugen $CC0$ in Meter⁴
- Zeitdistanz $CC1$, welche der Fahrer zum vorausfahrenden Fahrzeug aufrechterhalten möchte in Sekunden. Da dies auch als Reaktionszeit angesehen werden kann, bedeuten höhere Werte einen vorsichtigeren Fahrer.⁴
- Längs-Oszillation $CC2$ in Meter. Dieser Parameter bestimmt, welche Distanz größer als der Sicherheitsabstand der Fahrer akzeptiert, bevor er versucht aufzuschließen

⁴

⁴Quellen: [Mül12] [Fra18] [Sor10]

- Schranke für Eintritt in Folgen CC3 in Sekunden. Durch diesen Wert wird bestimmt, ab welcher zeitlichen Distanz der Fahrer beginnt zu verzögern⁴
- Reaktionsempfindlichkeit auf Beschleunigung / Verzögerung des Vorausfahrenden bei negativen Geschwindigkeitsdifferenzen CC4. CC4 und CC5 sollten identische Werte mit unterschiedlichen Vorzeichen beinhalten. Je kleiner der Wert ist, desto sensibler reagiert der Fahrer eines Fahrzeuges.⁴
- Reaktionsempfindlichkeit auf Beschleunigung / Verzögerung des Vorausfahrenden bei positiven Geschwindigkeitsdifferenzen CC5. CC4 und CC5 sollten identische Werte mit unterschiedlichen Vorzeichen beinhalten. Je kleiner der Wert ist, desto sensibler reagiert der Fahrer eines Fahrzeuges.⁴
- Geschwindigkeitsabhängigkeit im Oszillationsfall CC6. Dieser Wert bestimmt, wie gut ein Fahrer die pendelnde Geschwindigkeit bei Zunahme des Abstandes des Vorausfahrenden einschätzen kann. Ein Wert von 0 bedeutet, dass die Einschätzung immer gleich gut erfolgt. Je höher der Wert, desto schlechter die Einschätzung von Veränderungen der Geschwindigkeit.⁴
- Beschleunigung im Oszillationsfall CC7 in m/s^2 ⁴
- Beschleunigung bei Stillstand CC8 in m/s^2 ⁴
- Beschleunigung bei 80 km/h CC9 in m/s^2 ⁴

Nun folgt die Nutzung dieser Parameter gemäß der Notizen von R. Wiedemann [Wie96].

- DX

$$DX = \Delta x_{n-1} - \Delta x_n - L_{n-1} \quad (2.30)$$

mit L_{n-1} als Länge des Vorgängers

- DV

$$DV = v_{n-1} - v_n \quad (2.31)$$

- SDX_c

$$SDX_c = \begin{cases} CC0 & \text{für } v_{n-1} \leq 0 \\ CC0 + CC1 * VIJ & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.32)$$

mit

$$VIJ = \begin{cases} v_n & \text{für } DV \geq 0 \vee b_{n-1} < -1 \\ v_{n-1} - DV * RND & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.33)$$

mit RND als fahrerabhängigen Zufallsparameter zwischen -0,5 und 0,5. Sofern gilt $VIJ = v_n$ und der Vorausfahrende weder steht noch rückwärts fährt, gilt $SDX_c = dx_{safe}$.

- SDX_o

$$SDX_o = CC2 + SDX_c \quad (2.34)$$

- SDV_c

$$SDV_c = \begin{cases} CC4 - CC6 * DX^2 & \text{for } v_{n-1} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.35)$$

- SDV_o

$$SDV_o = \begin{cases} CC5 + CC6 * DX^2 & \text{für } v_n > CC5 \\ CC6 * DX^2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.36)$$

- Sicherheitsabstand dx_{safe}

$$dx_{safe} = CC0 + CC1 * v_n \quad (2.37)$$

Daraus ergeben sich die folgenden vier Bereiche Freies Fahren (Geschwindigkeit erhöhen / beibehalten), Folgen (beschleunigen / verzögern, um die Distanz zu halten), Auffahren (Bremsen mit einer Verringerung des Abstandes) und der Notfallaktion (Bremsen zur Vergrößerung des Abstandes) [Wie96]. Diese sind in Abbildung 2.3.3 grafisch dargestellt.

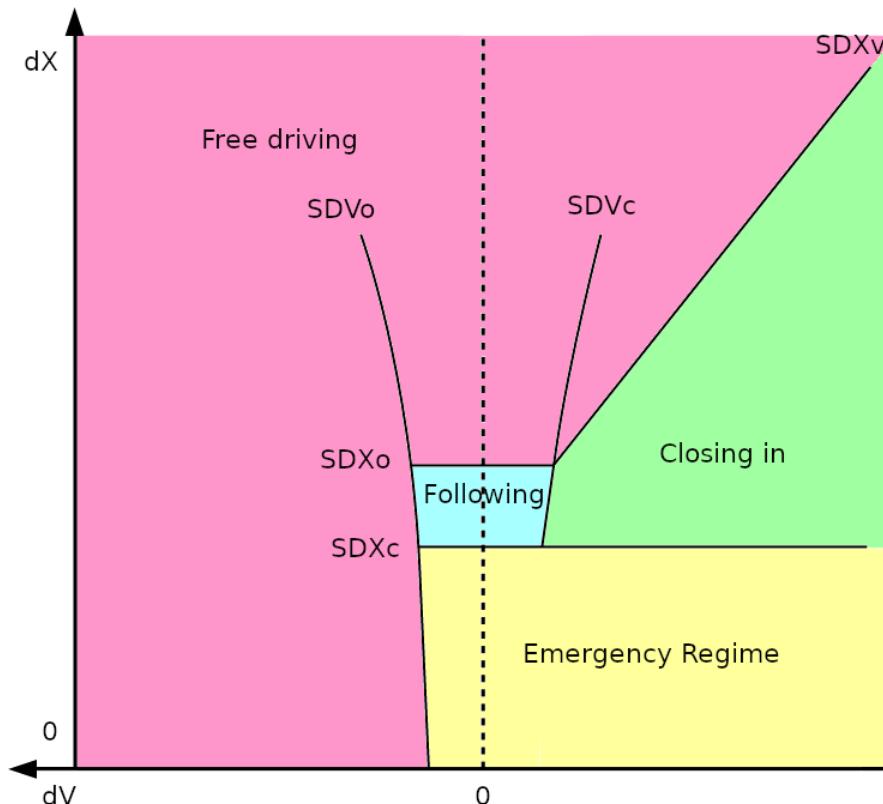


Abbildung 2.3.3.: Übersicht über die Schranken des Wiedemann 99 Modells und deren Auswirkung (auf Basis [Wie96])

4. Verwandte Arbeiten

Jörg Dallmeyer: *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*

In seinem Buch „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt“ [Dal14] von 2014 widmet sich Jörg Dallmeyer umfangreich dem Thema der Verkehrssimulationen. Dazu werden zunächst einige Simulationsmodelle für generelle Fahrzeuge, Fahrräder und Fußgänger vorgestellt. Existierende Simulationssysteme wie CORSIM [Uni], TRANSIMS [Fed], MATSIM [MAT], Vissim [PTV], HUTSIM [Hel] und SUMO [Ins] werden anschließend beschrieben. Zusätzlich schlägt Herr Dallmeyer einen eigenen Ansatz für die Simulation von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern in einer Stadt vor.

In dem Abschnitt über die Modelle für Fahrradfahrer wird zunächst festgehalten, dass diese in vielen Simulationen bisher wenig bis keine Rolle spielen. Zudem werden auf Basis bisheriger Veröffentlichungen gewonnene Erkenntnisse über das Verhalten von Radfahrern genannt. Eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse folgt, wobei die konkreten Quellenverweise [Dal14] zu entnehmen sind.

- Es ist am wahrscheinlichsten bei einem Unfall mit einem PKW tödlich zu verunglücken
- Die Einstellung anderer Verkehrsteilnehmer in Kombination mit dem Verhalten der Fahrradfahrer wirkt sich auf die Entstehung von Unfällen aus
- Gesonderte Spuren für Radfahrer führen zu einer reduzierten Anzahl an Unfällen
- In einer Studie von 5420 Fahrradfahrern haben 11 Prozent der Radfahrer rote Ampeln überfahren. Diese werden untergliedert in „Rennfahrer“ (25 %; beschleunigen bei Gelb), „Ungeduldig“ (33 %; warten zunächst bei Rot, fahren aber noch vor Grün los) und „Roller“ (42 %; halten nicht bei Rot)
- Freizeitfahrer, welche selten Rad fahren, nutzen häufig Radwege wohingegen Radfahrer, welche häufig oder mit einem bestimmten Ziel fahren vermeiden diese weitestgehend
- Autofahrer halten zu Frauen und Fahrern ohne Fahrradhelm einen größeren Seitenabstand beim Überholen als zu Männern und Fahrern mit Helm

Dallmeyer erläutert im folgenden vier verschiedene existierende Verhaltensmodelle für Fahrradfahrer. G. Gould und A. Karner haben 2009 ein Zellularautomaten-Modell identisch zum Nagel-Schreckenberg-Modell (NSM) vorgestellt, welches Wege als Folge von Zellen darstellt aber keine Interaktion zwischen verschiedenen Typen von Verkehrsteilnehmern modelliert. Im Jahre 2011 haben J. Vasić und H. Ruskin auf Basis von Zellularautomaten und NSM ein räumlich diskretes Modell eingeführt, welches allerdings die Interaktionen mit PKWs berücksichtigt. Trotz gründlicher Evaluierung wurden keine Realwelt-Szenarien simuliert. Faghri und Egyháziová stellten bereits 1999 ein multimodales Fahrzeugfolgemodell vor bei welchem kontinuierliche Geschwindigkeiten und

individuelle Eigenschaften abgebildet werden können. In dem Modell wird allerdings als maximale Beschleunigung a_{max} für Fahrradfahrer $1,52m/s^2$ verwendet. Zuletzt wird das Modell von Guo et al. vorgestellt, welches ähnlich zu dem Modell von Faghri und Egyháziová ist. Dieses wird genutzt, um zu evaluieren, welchen Einfluss Radfahrer auf den Straßenverkehr haben. Dabei fahren Fahrradfahrer zunächst auf ihrer eigenen Spur und wechseln mit steigender Wahrscheinlichkeit auf die Straße.

Später im Buch stellt Dallmeyer ein eigenes multi-modales Simulationssystem MAIN-SIM vor. Im Rahmen dieser wird ein mikroskopisches Automodell angepasst um Fahrradfahrer zu simulieren. Dazu werden für die Maße $1,5 m \times 2 m$ und für die Maximalgeschwindigkeit ein zufällig gleichverteilter Wert zwischen 12 und $33 km/h$ angenommen. Daraus ergibt sich der Beschleunigungsfaktor $a_f = \frac{v_{max}}{33km/h}$. Die minimale Beschleunigung beträgt dabei $a_{min} = 0,5m/s^2$ und die maximale $a_{max} = (a_{min} + k) * a_f$ wobei $k \in [0,5; 1]$ (gleichverteilt). Daraus ergibt sich eine maximal mögliche Beschleunigung $a_{max} = (a_{min} + k) * a_f = (0,5 + 1) * 1 = 1,5m/s^2$. Zudem werden die Intensität der Beschleunigung $a^\oplus(v)$, wie in Gleichung 2.38 aufgezeigt, mit $r \in [0,1]$ (zufällig gleichverteilt) und die Trödelwahrscheinlichkeit \perp wie in Gleichung 2.39 dargestellt ermittelt.

$$a^\oplus(v) = r * a_{min} + (1 - r) * a_{max} \quad (2.38)$$

$$\perp = \frac{\min(\max(1 - a_f; 0); 0,7)}{3} \quad (2.39)$$

Die Trödelwahrscheinlichkeit ist dabei unabhängig von der aktuellen Verkehrssituation und kommt ebenfalls bei Bremsvorgängen zum Tragen. Verzögert ein Fahrrad zur Wahrung des Sicherheitsabstandes, trödelt es und verschätzt sich um die dreifache Trödelwahrscheinlichkeit. Zudem wird angenommen, dass Fahrräder vor einer Kreuzung später verzögern als Personenkraftwagen und Fahrräder andere Fahrräder in jedem Fall überholen können.

Auch wenn die Berücksichtigung des Trödelns voraussichtlich zu einem realistischen Verhalten führt, ist die Beschreibung des Verhaltens von Fahrradfahrern nicht umfangreich und keine konkrete Implementierung vorhanden. Zudem erscheint die Beschleunigung zwischen $0,5$ und $1,5 m/s^2$ zu eingeschränkt. Aus diesen Gründen empfiehlt sich das Buch primär als sehr umfangreiches und informatives Nachschlagewerk im Bereich Verkehrssimulationen.

Niels Tørslev, Rasmus Albrink: *Micro simulation of cyclists*

Dem Thema der Verkehrssimulation von Fahrradfahrern widmen sich auch Niels Tørslev und Rasmus Albrink der Stadt Kopenhagen in „Micro simulation of cyclists“ [TA13]. Dabei handelt es sich um eine Präsentation, welche kurz den generellen Ablauf vorstellt (Analyse von Video-Material → Tests in VISSIM → Vergleiche mit dem Video → Validierung hinsichtlich des Verkehrsvolumens) und festgehalten, dass die Simulation von Fahrradfahrern relativ komplex ist und es diverse verschiedene Verhaltensweisen dieser

auf einem Radweg gibt. Zudem unterscheiden sich die Abschnitte dieser drastisch und sind unterteilt in den normalen Radweg, Kreuzungen, Wartezeonen an diesen, verkürzte Radwege, „Ausgleichsabschnitten“ und Verengungen. Abbildung 2.4.4 stellt diese Bereiche grafisch dar.

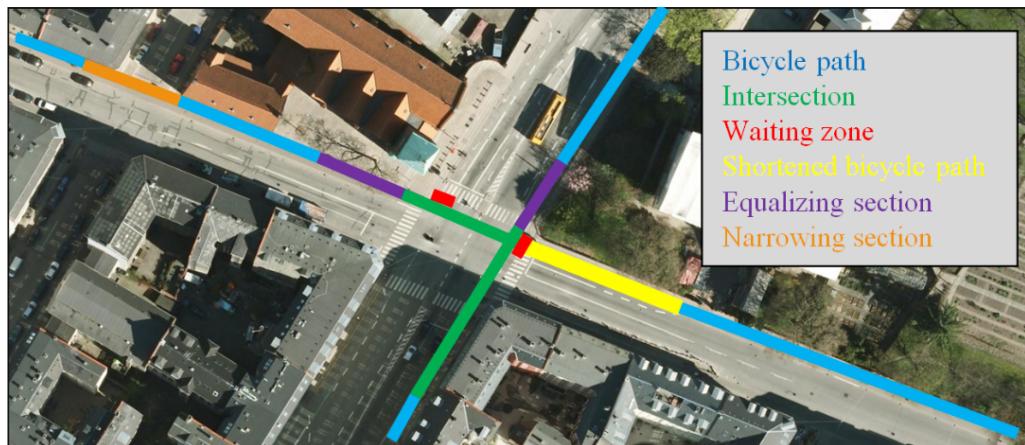


Abbildung 2.4.4.: Übersicht der unterschiedlichen Kreuzungsbereiche [TA13]

Zudem werden in der Präsentation die Parameter für das Wiedemann 99 Modell in Vis-sim erläutert und konkrete Werte für Fahrradfahrer dargestellt.

Auch wenn der Informationsgehalt der Folien zunächst gering ist, sind die Parameter für Wiedemann 99 von sehr großer Bedeutung.

Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Jérôme Härri, Thrasyvoulos Spyropoulos: Including Pedestrian and Bicycle Traffic in the Traffic Simulation SUMO

Das DLR [Deub] hat 2001 mit der Entwicklung einer open source Verkehrssimulation namens SUMO [Ins] begonnen [Beh+11]. Bis 2014 wurde diese im Rahmen des COLOMBO Projektes um die Möglichkeit, Fußgänger und Fahrradfahrer zu simulieren erweitert. Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Jérôme Härri und Thrasyvoulos Spyropoulos beschreiben dies im Rahmen ihrer Veröffentlichung „Including Pedestrian and Bicycle Traffic in the Traffic Simulation SUMO“ [Kra+14]. Dabei steht im Projekt besonders die Interaktion zwischen Fußgängern, Radfahrern und Lichtsignalanlagen im Fokus. Das Paper konzentriert sich allerdings primär um die Herausforderungen der Integration von Fußgängern. Zunächst werden im Paper die Requirements, welche sich aus der Integration in SUMO ergeben, und aus dem COLOMBO Projekt beschrieben. Darauf folgt eine Beschreibung der notwendigen Anpassungen beziehungsweise Voraussetzungen des Netzwerk-Modells. Dabei hängt die Umsetzung von Radfahrern davon ab, eigene Radfahrspuren zu modellieren, welches zu einer Anpassung des Netzwerkes führt, da neue Spuren auch neue „Konfliktzonen“ erzeugen und die Verhaltensregeln an Kreuzungen verändern. Das konkrete Verhalten an Kreuzungen ist dabei an das Verhalten motorisierter Fahrzeuge angelehnt.

Dabei entsteht der Eindruck, dass Fahrräder im Rahmen von SUMO als normale Vehikel interpretiert haben und kein eigenes, angepasstes Verhaltensmodell nutzen. Trotz diesem besitzt SUMO eigene Implementierungen diverser Verhaltensmodelle wie Wiedemann, Wiedemann 99 und Intelligent Driver [Ins], welche bei der Implementierung und Anpassung eines Modells ausgesprochen hilfreich sein können.

Zu einzelnen Aspekten, wie dem Überqueren von Kreuzungen, sind weitere Veröffentlichungen verfügbar [Kra+12] [TGB16].

Yongxiang Zhao, H.M. Zhang: A unified follow-the-leader model for vehicle, bicycle and pedestrian traffic

„A unified follow-the-leader model for vehicle, bicycle and pedestrian traffic“ von Yongxiang Zhao der School of Economics and Management und H.M. Zhang vom Department of Civil and Environmental Engineering [ZZ17] untersucht die Ähnlichkeiten des Verhaltens zwischen Fußgängern, Fahrradfahrern und Autofahrern. Dabei haben die Autoren die These, dass für alle drei Verkehrsteilnehmer der Wunsch im Vordergrund steht, Geschwindigkeit und Sicherheit in Balance zu bringen. Dazu werden zunächst Experimente mit Fußgängern und Radfahrern auf einem Ring durchgeführt und mit einem früheren Experiment mit Autos in Relation gesetzt. Die Ergebnisse werden anschließend genutzt, um einheitliches „Follow-the-Leader“ Modell vorzuschlagen.

Bei den Experimenten wird ein Ring mit einem Durchmesser von 52 Metern genutzt, um 5 bis 23 Fahrradfahrer auf diesem gegen den Uhrzeigersinn fahren zu lassen. Derselbe Ring wurde danach von 5 bis 70 Fußgängern in normalem Schritttempo genutzt. Auf Basis dieser werden Dichte-Geschwindigkeit und Dichte-Fluss Relationen hergestellt. Dabei zeigt es sich, dass die drei Verkehrstypen ähnliche Muster in den Diagrammen bilden aber Fußgänger hinsichtlich der Geschwindigkeits-Dichte Relation verstreuter sind.

Nach diesen Analysen wird ein universelles Verkehrsmodell vorgestellt bei welchem jedes Objekt versucht, sich mit seiner Wunschgeschwindigkeit v_i^0 fortzubewegen und dazu neigt, seine Geschwindigkeit v_i mit einer Zeitcharakteristik τ anzupassen. Gleichung 2.40 zeigt die zugehörige Formel.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) - v_i(t)}{\tau} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (2.40)$$

mit Vordermann j , Kreisbahnbegrenzung w und Interaktionskräften f_{ij} und f_w .

Zudem passen Fahrer ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Distanz zum Vordermann an, überholen jedoch nicht. Für dieses Modell werden zudem einige Parameter vorgeschlagen und die Ergebnisse verglichen.

Um dieses Modell zu einer gewissen Reife zu bringen und zu untersuchen, ob es auch in der Realität anwendbar ist, sind allerdings noch weiterführende Experimente nötig.

Jelena Vasic, Heather J. Ruskin: *Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles*

Jelena Vasic und Heather J. Ruskin widmen sich in „Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles“ [VR12] einem anderen Ansatz um Verkehr von Autos und Fahrräder zu modellieren: Ein eindimensionaler zellulärer Automat. Dabei nimmt das Modell an, dass beide auf der Straße fahren wobei sich Radfahrer stets am Rand halten.

Das räumliche Modell unterscheidet zwischen den Basisblöcken, sogenannten „Tracks“, „Turns“, Netzwerknotenpunkten und Beziehungstypen zwischen den Tracks wie beispielsweise „joined side-by-side“. Fahrzeuge bewegen sich über dieses Modell über Routen⁵. Das konkrete Vorgehen ist dabei an das Nagel-Schreckenberg Modell angelehnt:

- Sofern die Maximalgeschwindigkeit noch nicht erreicht wurde und die aktuelle Geschwindigkeit die Distanz zum Vordermann in Zellen nicht übersteigt, beschleunigt ein Fahrzeug
- Übersteigt die aktuelle Geschwindigkeit die Anzahl Zellen zum Vordermann, wird verzögert
- Sofern die aktuelle Geschwindigkeit größer null ist, wird mit einer Wahrscheinlichkeit von p_R randomisiert

Dabei unterscheiden sich Fahrräder und Autos durch die Maximalgeschwindigkeit und unterschiedliche Zellgrößen.

Die Interaktion zwischen den beiden Verkehrsteilnehmern, wird im Normalfall als nicht gegeben betrachtet. Sollte es beispielsweise bei sehr engen Straßen doch nötig sein eine solche Interaktion abzubilden, beschleunigt beziehungsweise verzögert ein Auto sofern seine Geschwindigkeit kleiner beziehungsweise größer ist als die Maximalgeschwindigkeit, die Distanz zum Fahrrad und die durch das Fahrrad erzeugte maximale Geschwindigkeit.

Dieses Modell wurde in zwei Szenarien untersucht: Ein 100 Zellen langer Auto Track und ein 200 Zellen Fahrrad Track ohne Turns und eine enge Einbahnstraße, welche sich von Autos und Fahrrädern geteilt wird und eine Linkskurve beinhaltet.

⁵(= Tracks)

3. Konzept

Nachdem im vorherigen Kapitel einige Grundlagen erläutert wurden, wird hier das konzeptionelle Modell des Radfahrers und des Fahrrades entwickelt. Außerdem wird ein Stadtteil für die Simulationen und ein Verhaltensmodell für die Radfahrer ausgewählt. Zuletzt wird die Architektur des Systems erläutert und die Arbeit inhaltlich abgegrenzt.

1. Modellbeschreibung

Nachfolgend werden die Bestandteile des Modells vorgestellt. Dabei handelt es sich in den Abschnitten 1.1 und 1.2 zum einen um die Fahrradfahrer und die Fahrräder an sich und zum anderen unter 1.3 um das Verhalten derer beziehungsweise die Umgebung in welcher sich diese befinden.

1.1. Fahrradfahrer

In diesem Abschnitt werden relevante Eigenschaften von Fahrradfahrern näher erläutert, deren Relevanz für das entwickelte Modell beurteilt und die voraussichtliche Nutzung beschrieben.

1.1.1. Fahrertypen

Denkt man an den Straßenverkehr, fallen einem häufig stereotype Fahrertypen ein ([Sto16] [Spi12] [Lan03], Vgl. hier und in diesem Absatz). Darunter finden sich zum Beispiel zu sogenannten „Sonntagsfahrer“- häufig ältere Menschen mit Wackel-Dackel auf der Heckablage, oder auch aggressive BMW Fahrer, die rücksichtslosen „Raser“, ein. So ist es wenig verwunderlich, dass es in der Realität unterschiedliche Fahrertypen gibt, welche ein voneinander abweichendes Verhalten an den Tag legen. Beispielsweise werden aggressive Fahrer dichter auffahren, öfter überholen und generell größere Risiken eingehen als ein „Schleicher“.

Ebenso wenig verwunderlich ist es, dass diese Typen sich nicht auf das Autofahren beschränken, sondern auch Fahrradfahrer unterschiedliche Wesenszüge im Verkehr aufweisen. So gibt es auch hier beispielsweise „Freizeitfahrer“ ohne Eile und „Kampfradler“, die jede Konfrontation mit Autofahrern, parkenden Fahrzeugen und Fußgängern gern in Kauf nehmen [Tan18] [Amb13].

Entsprechend werden, um ein realistischeres Fahrverhalten abzubilden, unterschiedliche Fahrertypen modelliert. Dabei soll es neben normalen Fahrradfahrern auch vorsichtige

Fahrer geben, welche einen größeren Sicherheitsabstand einhalten und früher mit einer Anpassung der Geschwindigkeit auf Hindernisse reagieren. Zudem neigen vorsichtige Fahrer seltener dazu, zu überholen. Zusätzlich werden auch aggressive Fahrer abgebildet, welche sich exakt gegenteilig zu den vorsichtigen verhalten: Sie halten wenig Sicherheitsabstand, verzögern verhältnismäßig spät und neigen dazu, zu überholen. Diese Fahrertypen sollen sich entsprechend auf das Verhaltensmodell auswirken.

1.1.2. Leistung

Anders als bei motorisierten Fahrzeugen, ist für das Betreiben eines Fahrrades die Leistungsfähigkeit des Fahrers von großer Bedeutung. Diese unterscheidet sich jedoch mit der Konstitution der Person. John Parkin und Jonathon Rotheram geben in „Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal“ an, dass die typische Leistung eines Radfahrers, welcher kein Athlet ist, 75 Watt beträgt [PR10]. Dies kann sich auf 200 bis 250 Watt (bei männlichen Touren-Fahrern) beziehungsweise 350 bis 400 Watt (bei Rennfahrern zwischen 20 und 60 Minuten) erhöhen. Für diese Ausarbeitung wird von einer durchschnittlichen Leistung von 75 Watt ausgegangen, wobei dieser Wert im Rahmen einer Normalverteilung abweichen kann.

1.1.3. Masse

Für die Masse von Radfahrern wird eine Studie der Gesundheitsberichterstattung des Bundes aus dem Jahr 2017 genutzt ([Ges20], Vgl. hier und in diesem Absatz). Diese enthält die Jahresdurchschnittsergebnisse von Kindern, Männern und Frauen in Deutschland. Es zeigt sich, dass Kinder bis 18 Jahre im Schnitt 35,17 kg wiegen, wobei Jungen im Mittel knapp 3 kg schwerer sind als Mädchen. Bei Erwachsenen vergrößert sich dieser Unterschied weiter: Männer wiegen im Schnitt 84,46 kg und Frauen 68,05 kg. Geschlechtsunabhängig ergibt dies ein Durchschnittsgewicht von 76,53 kg.

1.1.4. Maße

Bei den Maßen werden die Höhe und die Breite eines Fahrers betrachtet. Jedoch werden beide Attribute unter der Annahme, dass die Breite eines Menschen die Breite des Fahrradlenkers nicht übersteigt und es keine Wege gibt, bei welchen die Höhe kleiner als die Größe eines Menschen ist, werden die Maße des Radfahrers bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Höhe

Auch hier wird die Studie der Gesundheitsberichterstattung des Bundes genutzt ([Ges20], Vgl. hier und im Folgenden). Laut dieser sind erwachsene Männer gemittelt 1,79 Meter groß und Frauen 1,66 Meter. Daraus ergibt sich geschlechtsneutral eine Größe von 1,73 Metern.

Breite

Die Breite eines Radfahrers wird über dessen Schulterbreite bestimmt, da diese in der Regel die breiteste Stelle eines Menschen darstellt. Die Werte für das 5.¹, 50.² und 95. Perzentil³, hier mit P. abgekürzt, für Männer und Frauen sind dabei wie folgt verteilt [BLW].

	Männer			Frauen		
	5. P.	50. P.	95. P.	5. P.	50. P.	95. P.
Schulterbreite	44 cm	48 cm	52,5 cm	39,5 cm	43,5 cm	48,5 cm

Tabelle 3.1.1.: Übersicht über die Schulterbreiten von Männern und Frauen [BLW]

1.1.5. Fahrrad Nutzung

Nachfolgend wird vorgestellt, wie oft und mit welchem Zweck Menschen nach Alter und Geschlecht Fahrräder nutzen, mit welchen anderen Verkehrsmitteln sie das Rad kombinieren und wie oft sie beim Radfahren einen Helm tragen.

Da im Rahmen der multiagenten Simulation des SmartOpenHamburg Projektes sowohl realistische Tagesabläufe als auch die Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel durch „Mensch-Agenten“ bereits umgesetzt beziehungsweise in naher Zukunft geplant sind, ist eine Untersuchung der Nutzungsgewohnheiten von Radfahrern von Bedeutung. Darunter fällt sowohl die Häufigkeit als auch der Grund der Nutzung.

Häufigkeit

In Tabellen 3.1.2 und 3.1.3 wird aufgezeigt, wie oft Personen unterschiedlichen Alters und Geschlechts mit dem eigenen beziehungsweise einem gemieteten Rad fahren.

¹Fünf Prozent der Werte sind kleiner als dieser Wert.

²Je 50 Prozent der Werte liegen unter und über diesem Wert.

³Fünf Prozent der Werte liegen über diesem Wert.

Häufigkeit	Alter in Jahren					
	14-17	18-29	30-39	40-49	50-59	60-64
(fast) täglich	34%	19%	18%	18%	18%	17%
1-3 Tage / Woche	20%	16%	16%	19%	19%	20%
1-3 Tage / Monat	13%	14%	18%	19%	16%	15%
<1 / Monat	12%	16%	19%	18%	15%	13%
(fast) nie	19%	35%	29%	26%	32%	36%
Basis gewichtet	6 746	34 369	32 851	37 162	43 185	17 520

Tabelle 3.1.2.: Übersicht über die Häufigkeit der Nutzung von Fahrrädern nach Alter I [Bunb]

Häufigkeit	Alter in Jahren			Geschlecht			
				eigenes Rad		Mietrad	
	65-74	75-79	80+	M	W	M	W
(fast) täglich	18%	15%	9%	19%	17%	0%	0%
1-3 Tage / Woche	18%	15%	8%	19%	16%	0%	0%
1-3 Tage / Monat	11%	7%	4%	16%	13%	1%	0%
<1 / Monat	11%	7%	4%	14%	14%	4%	4%
(fast) nie	42%	56%	74%	32%	41%	94%	95%
Basis gewichtet	28 159	17 731	13 351	113 528	117 973	40 239	39 212

Tabelle 3.1.3.: Übersicht über die Häufigkeit der Nutzung von Fahrrädern nach Alter II und Geschlecht [Bunb]

Es zeigt sich, dass Menschen vor Erreichen der Volljährigkeit am meisten Fahrradfahren und diese Neigung anschließend stark abnimmt. Zugleich ist die Anzahl an täglichen Radlern ab dem Erwachsenenalter mit Werten unter 20 Prozent gering.

Hinsichtlich des Geschlechts ist abzulesen, dass Männer unabhängig des Alters öfter radfahren als Frauen. Eine zusätzliche Erkenntnis ist, dass sowohl Männer als auch Frauen sehr selten bis nie mit einem Mietrad, wie dem Stadtrad [Deua], fahren.

Zweck

Die unterschiedlichen Gründe für die Nutzung eines Rades nach Alter und Geschlecht sind in den Tabellen 3.1.4 und 3.1.5 dargestellt. Dabei ist der erste Wert in jeder Zelle die Nutzung mit einem Pedelec und der zweite mit einem normalen Fahrrad.

Zweck	Alter in Jahren					
	14-17	18-29	30-39	40-49	50-59	60-64
Erreichen des Arbeitsplatzes	0% / 24%	0% / 13%	0% / 14%	1% / 13%	1% / 13%	0% / 12%
Dienstlich/ geschäftlich	0% / 10%	0% / 6%	0% / 4%	1% / 5%	1% / 4%	0% / 3%
Erreichen der Ausbildungsstätte/ Schule	0% / 24%	0% / 18%	- / 16%	0% / 5%	0% / 13%	-
Einkauf	0% / 10%	0% / 9%	0% / 8%	0% / 10%	1% / 10%	1% / 10%
Private Erledigung	0% / 16%	0% / 10%	0% / 7%	1% / 9%	1% / 9%	1% / 10%
Bringen/ Holen/ Begleiten von Personen	- / 12%	0% / 5%	0% / 9%	0% / 8%	0% / 2%	0% / 1%
Freizeitaktivität	0% / 20%	0% / 11%	0% / 10%	0% / 10%	1% / 11%	2% / 11%
Nach Hause	0% / 22%	0% / 12%	0% / 11%	0% / 11%	1% / 11%	1% / 10%
Rückweg vom vorherigen Weg	- / 9% -	0% / 8%	0% / 6%	1% / 5%	0% / 6%	1% / 8%
Sonstiges	1% / 17%	0% / 11%	0% / 10%	0% / 9%	0% / 7%	2% / 8%
Generell	0% / 21%	0% / 11%	0% / 10%	1% / 10%	1% / 9%	1% / 9%
Basis gewichtet	32 916 825	129 393	134 578	157 578	169 920	62 604

Tabelle 3.1.4.: Übersicht über den Zweck der Nutzung von Fahrrädern nach Alter I
[Bunb]

Zweck	Alter in Jahren			Geschlecht	
	65-74	75-79	80+	M	W
Erreichen des Arbeitsplatzes	2% / 9%	- / 3%	-	1% / 13%	0% / 13%
Dienstlich/ geschäftlich	2% / 3%	1%	-	1% / 3%	1% / 8%
Erreichen der Ausbildungsstätte/ Schule	-	-	-	0% / 18%	0% / 17%
Einkauf	1% / 10%	1% / 10%	1% / 8%	1% / 10%	1% / 9%
Private Erledigung	1% / 9%	2% / 9%	1% / 7%	1% / 9%	1% / 8%
Bringen/ Holen/ Begleiten von Personen	1% / 1%	0% / 1%	0% / 3%	0% / 6%	0% / 6%
Freizeitaktivität	2% / 9%	2% / 9%	1% / 7%	1% / 13%	1% / 10%
Nach Hause	1% / 10%	2% / 9%	1% / 7%	1% / 12%	1% / 11%
Rückweg vom vorherigen Weg	1% / 7%	0% / 4%	1% / 4%	1% / 6%	0% / 6%
Sonstiges	1% / 5%	1% / 5%	1% / 6%	1% / 10%	0% / 9%
Generell	2% / 9%	1% / 7%	1% / 10%	1% / 10%	2% / 9%
Basis gewichtet	87 335	46 656	27 272	490 669	469 574

Tabelle 3.1.5.: Übersicht über den Zweck der Nutzung von Fahrrädern nach Alter II und Geschlecht [Bunb]

Zusätzlich haben 1 Prozent von 38 905 Personen angegeben, das Fahrrad als Hauptverkehrsmittel für Reisen unter 100 Kilometer Entfernung zu nutzen.

Aus den Tabellen lassen sich zwei Dinge ablesen. Zum einen ist die Nutzung für geschäftliche Reisen, das Bringen von anderen Personen und der Rückweg vom vorherigen Weg im Mittel am geringsten. Abseits davon ist die Nutzung im Schnitt etwa gleich hoch. Die andere Erkenntnis, die sich hier gewinnen lässt, ist, dass Pedelecs bis zu einem gewissen Alter nicht zum Einsatz kommen. Ab der Altersgruppe 40 bis 49 werden Elektro-Fahrräder genutzt, allerdings ebenfalls nur sehr selten.

Kombination mit anderen Verkehrsmitteln

Neben der Nutzung von Fahrrädern als Hauptverkehrsmittel ist auch die Kombination dieser mit anderen Verkehrsmitteln von Bedeutung.

Verkehrsmittel	Häufigkeit
Auto + Fahrrad	20%
Fahrrad + ÖPNV	5%
Auto + Fahrrad + ÖPNV	4%
Basis gewichtet	228 446

Tabelle 3.1.6.: Übersicht der Häufigkeit der Kombination unterschiedlicher Verkehrsmittel [Bunb]

Verkehrsmittel	Häufigkeit
zur Arbeit / Fortbildungsstätte	28%
zur Schule / Universität / Ausbildung	25%

Tabelle 3.1.7.: Übersicht der Häufigkeit der Kombination von ÖPNV und Fahrrad zur Arbeit / Fortbildungsstätte beziehungsweise Schule / Universität / Ausbildung [sB19]

Die obenstehenden Tabellen hinsichtlich der Verkehrsmittelkombination zeigen, dass die häufigste Kombination aus dem Personenkraftwagen und dem Fahrrad besteht. Dies ist in gewisser Hinsicht überraschend. Unter der Annahme, dass die meisten Personen zuhause sowohl Zugang zu einem Pkw als auch zu einem Fahrrad haben (siehe Tabellen 3.1.14 und 3.1.15 und [Ahl]), erscheint dieses Ergebnis für die Nutzung des Fahrrades außerhalb der Freizeit (zum Beispiel bei Mitnahme des Rades im Auto) unpassend. Die geringen Zahlen bei Kombinationen aus Fahrrad und ÖPNV beziehungsweise Auto, Fahrrad und ÖPNV sind wiederum weniger überraschend. Fährt ein Fahrer bereits mit dem Rad ist es bei Strecken bis zu einer gewissen Länge unwahrscheinlich, dass er vom Rad in den Nahverkehr wechselt.

1.2. Fahrräder

In den folgenden Abschnitten werden Angaben zu relevanten Eigenschaften von Fahrrädern und zur Verfügbarkeit von diesen nach Personengruppen beziehungsweise Bundesland gemacht.

1.2.1. Fahrradtypen

Da es in der Realität viele verschiedene Typen von Fahrrädern gibt, welche sich auch auf bestimmte Eigenschaften des Rades auswirken, sollen auch hier einige verschiedene

Typen abgebildet werden. Laut des Fahrrad-Monitors von 2019 der sinus Markt- und Sozialforschung gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [sB19] werden folgende Fahrradtypen genutzt:

Fahrradtyp	Nutzung
Damenrad / Stadtrad / Citybike / o.ä.	62%
Mountainbike	27%
Trekkingrad	14%
Pedelec	14%
Fitnessbike / Rennrad / o.ä.	8%
Lastenrad	3%
Faltrad	2%
Sonderanfertigungen	1%
Sonstiges	3%

Tabelle 3.1.8.: Übersicht der in der Praxis genutzten Fahrradtypen [sB19]

Auf Basis dieser Werte sollen die folgenden Fahrradtypen umgesetzt werden. Diese Typen wirken sich auf diverse Attribute des Rades aus. So können das Gewicht, die Maße, die potenzielle Ladung und die Bereifung aus ([Tes] [Al18], Vgl. hier und in diesem Absatz). So ist anzunehmen, dass die Reifen eines Rennrades dünner sind, als die Räder eines klassischen Mountainbikes. Durch die schmaleren Reifen sinkt der Rollwiderstand und das Rad hat eine höhere Effizienz. Da sich allerdings auch der Luftdruck des Reifens auf das Fahrverhalten auswirkt, wird dieser Aspekt hier lediglich vereinfacht berücksichtigt. So wirkt sich der Fahrradtyp auf die Maximalgeschwindigkeit aus.

Zusätzlich kann es sich bei jedem Fahrrad um ein E-Bike handeln.

- Rennrad
- Stadtrad
- Trekkingrad
- Mountainbike
- Cross-Rad
- Fitnessrad
- Lastenrad

1.2.2. Gewicht

Wie in 1.2.1 bereits erwähnt, wirkt sich der Typ des Fahrrades auf das Eigengewicht des Rades aber auch auf die potenzielle Zuladung aus. Nachfolgend wird vorgestellt, wie

sich die Typen konkret unterscheiden. Für das Gewicht der Radtypen werden zum einen Vergleiche von Fahrrädern und zum anderen Webseiten, bei welchen solche verkauft werden, zurate gezogen.

Typ	Gewicht	
	min.	max.
Rennrad	6 kg	13 kg
Stadtrad	17 kg	20 kg
Trekkingrad	16 kg	18 kg
Mountainbike	8 kg	16 kg
Cross-Rad	11 kg	16 kg
Fitnessrad	8 kg	13 kg
Lastenrad	16 kg	65 kg

Tabelle 3.1.9.: Übersicht über das durchschnittliche Gewicht von unterschiedlichen Fahrradtypen [Peta] [Bun13] [Pro] [ver] [Tes] [gre] [ela]

Ladung

Bis auf Lastenräder, welche explizit auf das Transportieren von Gegenständen ausgelegt sind und entsprechende Boxen besitzen, entscheidet bei den anderen Fahrradtypen zusätzliches Zubehör über die maximale Tragkraft.

Dabei wird zwischen Gepäckträgern, Fahrradtaschen und Fahrradkörben unterschieden.

Typ	Gewicht	
	min.	max.
Gepäckträger	- (sofern nicht vorhanden)	25 kg
Fahrradtaschen	9 kg	13 kg
Fahrradkorb (Vorderrad)	5 kg	7 kg

Tabelle 3.1.10.: Übersicht über die möglichen Zusatzgewichte beim Fahrrad [mei19] [HS b] [HS a] [Bas]

Sofern ein Fahrrad einen normalen, nicht gefederten Rahmen hat, lässt sich an diesem in der Regel unabhängig vom Typ ein Gepäckträger und damit einhergehend auch eine Fahrradtasche befestigen [kur19]. Zu Lenkerkörben sind bezüglich der Befestigungsmöglichkeiten beziehungsweise -Einschränkungen keine hinreichenden Informationen vorhanden. Da allerdings alle Fahrräder über eine Lenkerstange verfügen ist davon auszugehen, dass sich, bei genügend Platz, an jedem Fahrrad ein solcher Korb befestigen lässt.

Bei Lastenräder wird auf Basis aktuell verfügbarer Räder auf ein Ladungsgewicht zwischen 25 und 150 kg geschlossen [gre].

1.2.3. Maße

Die durchschnittliche Länge und Höhe von Fahrrädern beträgt $1,9 \times 1$ Meter. Die Breite richtet sich dabei nach der Lenkerbreite, welche mit dem Typ des Fahrrades leicht abweicht.

Fahrradtyp	Lenkerbreite	
	min.	max.
Standard	45 cm	57 cm
Mountainbike	50 cm	70 cm
Rennrad	38 cm	44 cm
Triathlon	15 cm	40 cm
BMX	55 cm	74 cm

Tabelle 3.1.11.: Übersicht über die Lenkerbreiten unterschiedlicher Fahrradtypen [Bun13]

Lastenrad

Die Maße von Lastenrädern weichen, je nach Aufbau, in Bezug auf Breite und Länge drastisch von denen normaler Räder ab ([gre] [ela], Vgl. hier und im Folgenden).

- Länge: 1,83 bis 2,9 Meter
- Breite: 62 bis 93 Zentimeter

1.2.4. Geschwindigkeit

In diesem Abschnitt werden durchschnittliche Geschwindigkeit von Personengruppen mit dem Fahrrad und die Geschwindigkeit beim Schieben vorgestellt.

Durchschnittlich

Tabelle 3.1.12 zeigt wie schnell Männer und Frauen unterschiedlichen Alters Fahrrad fahren.

	Männer			Frauen		
	5. P.	50. P.	95. P.	5. P.	50. P.	95. P.
bis 20 Jahre	14 km/h	23 km/h	32,5 km/h	12 km/h	18 km/h	26 km/h
20 - 30 Jahre	14 km/h	20 km/h	29 km/h	11,5 km/h	16,5 km/h	22,5 km/h
30 - 40 Jahre	14 km/h	20 km/h	28 km/h	11 km/h	15 km/h	22 km/h
40 - 60 Jahre	10 km/h	19 km/h	24 km/h	10 km/h	14 km/h	22 km/h
über 60 Jahre	8 km/h	14 km/h	22 km/h	11 km/h	13 km/h	16 km/h
Generell	13 km/h	20 km/h	29 km/h	11 km/h	16,5 km/h	22,5 km/h

Tabelle 3.1.12.: Übersicht über die durchschnittlichen Radfahrgeschwindigkeiten nach Alter und Geschlecht [Col]

Gemittelt zwischen Männern und Frauen ergeben sich daraus die folgenden Werte: 12 km/h für das 5. Perzentil, 18 km/h im 50. Perzentil und 27,5 km/h im 95 [Col].

Zusätzlich kann der Typ des Fahrrades einen Einfluss auf die durchschnittliche Geschwindigkeit haben. So wird ein herkömmliches Fahrrad im Schnitt mit 18,5 km/h gefahren, ein E-Bike mit 19,7 km/h und ein Rennrad mit 24,2 km/h [Bun13].

Schiebend

Neben dem Fahren gibt es natürlich die Möglichkeit, Fahrräder zu schieben. Dabei zeigt sich aus Erfahrung, dass man dabei selten schneller ist, als ein normaler Fußgänger. Potenziell ist man durch die Behinderung durch das Fahrrad sogar etwas langsamer. Als Schiebe-Geschwindigkeit wird auf Basis der normalen Geh-Geschwindigkeit für Männer und Frauen ein Wert von 1,57 m/s gewählt [Löf19].

1.2.5. E-Bikes

In den letzten Jahren gewinnen Fahrräder mit zusätzlicher Motorunterstützung, sogenannte E-Bikes beziehungsweise Pedelecs, immer mehr an Bedeutung und werden zunehmend häufiger genutzt ([Fahb], Vgl. hier und in diesem Absatz). Dabei ist der Begriff E-Bike in den meisten Fällen nicht zutreffend und meint eigentlich Pedelecs. Der Unterschied liegt in der Antriebsart. Bei Pedelecs muss der Radfahrer weiterhin das Fahrrad betreiben und bekommt bis 25 km/h lediglich Unterstützung durch den verbauten Motor. E-Bikes hingegen funktionieren vom Prinzip her wie Personenkraftwagen: Per Knopfdruck wird der Motor gestartet und das Fahrrad fährt von allein. Sobald ein E-Bike jedoch schneller als 6 km/h fährt, muss es offiziell zum Straßenverkehr zugelassen werden. Aus diesem Grund sind E-Bikes seltener anzutreffen.

Wie bei normalen Fahrrädern auch, gibt es auch verschiedene Typen von elektrischen Rädern. Beispielsweise gibt es E-Citybikes, E-Trekkingbikes, E-Crossbikes und E-Rennräder [fah]. Generell wird davon ausgegangen, dass es sich bei jedem normalen Fahrradtypen

auch um ein E-Bike handeln kann.

Wird nachfolgend von einem E-Bike gesprochen, ist ein Pedelec gemeint.

Zusätzliches Gewicht

Wie oben erwähnt besitzen E-Bikes einen Akkumotor, um den Fahrer zu unterstützen. Je nachdem, welche elektrischen Komponenten und wie diese im Rad verbaut sind, bringen E-Bikes im Vergleich zu einem normalen Fahrrad einiges an Mehrgewicht mit ([PM] [Kar] [fah], Vgl. hier und in diesem Absatz). Im Schnitt handelt es sich dabei um etwa 6 kg Zusatzgewicht, welches ein E-Bike schnell auf ein Gesamtgewicht von 30 kg bringt. Vergleicht man das Gewicht von normalen Mountainbikes mit E-Mountainbikes fällt auf, dass Letztere mit etwa 23 kg sehr viel mehr wiegen als das durchschnittliche nicht motorisierte Modell (zwischen 8 und 16 kg).

Akkus

Da E-Bikes mit einem Akkumotor betrieben werden, sind dessen Kennzahlen - die Kapazität, Reichweite und die Ladezeit - bei der Nutzung von großer Bedeutung [Faha]. Nachfolgend werden in Tabelle 3.1.13 typische Wertebereiche für diese drei Kenngrößen gelistet.

Kennzahl	Werte	
	min.	max.
Akkukapazität	300 Wh	1250 Wh
Durchschnittliche Reichweite	55 km	205 km
Ladezeit	2 h	9,8 h

Tabelle 3.1.13.: Übersicht über die durchschnittlichen Akkukennzahlen von E-Bikes / Pedelec [Faha]

Durch die Tretunterstützung sieht die Beschleunigungskurve von Pedelecs voraussichtlich anders aus als die von normalen Fahrrädern. Zugleich gibt es Pedelecs welche mit einer Anfahrhilfe ausgestattet sind und bis 6 km/h auch ohne Treten beschleunigen [Gei]. Dadurch weicht auch das Verhalten von elektrischen Fahrrädern potenziell ab.

1.2.6. Verfügbarkeit

Um, wie oben bereits erwähnt, einen realistischen Tagesablauf zu simulieren, wird nachfolgend vorgestellt, wie viele Menschen aus welchen Personengruppen Zugang zu Fahrrädern haben. Zusätzlich wird angegeben, wie es sich mit dem Zugang zu Pedelecs verhält.

Alter - Geschlecht

Nachfolgende Tabellen 3.1.14 und 3.1.15 zeigen, wie viele Personen innerhalb welcher Altersgruppe und mit Geschlechts über ein Fahrrad oder ein Pedelec verfügen.

Fahrradtyp	Alter in Jahren					
	14-17	18-29	30-39	40-49	50-59	60-64
Fahrrad	88%	74%	80%	83%	79%	72%
E-Bike	2%	1%	2%	4%	7%	10%
Fahrrad Basis gewichtet	12 470	44 769	39 011	44 007	50 002	20 057
E-Bike Basis gewichtet	6 746	34 369	32 851	37 162	43 185	17 520

Tabelle 3.1.14.: Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Alter I [Bunb]

Fahrradtyp	Alter in Jahren			Geschlecht	
	65-74	75-79	80+	M	W
Fahrrad	67%	56%	36%	76%	71%
E-Bike	13%	10%	5%	6%	6%
Fahrrad Basis gewichtet	31 837	19 627	14 975	155 884	160 324
E-Bike Basis gewichtet	28 159	17 731	13 351	113 528	117 973

Tabelle 3.1.15.: Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Alter II und Geschlecht [Bunb]

Dabei zeigt sich, dass die Verfügbarkeit von normalen Fahrrädern bei Kindern am höchsten ist, aber bis zur Altersgruppe 60 bis 64 noch über 70 Prozent liegt. Danach sinkt die Anzahl der Personen mit Zugang stark. Zugleich kann man erkennen, dass es zwischen Frauen und Männern nur geringe Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit gibt. Die hohen Verfügbarkeitszahlen von normalen Rädern können Pedelecs nicht erreichen. So liegt der Wert bis 60 Jahre stetig unter 10 Prozent. Auch in den Altersgruppen darüber haben nur maximal 13 Prozent Zugang zu einem Elektrofahrrad.

Ort

Anschließend wird untersucht, wie es sich bei der Verfügbarkeit von Fahrrädern in Hamburg in Vergleich zu den anderen Bundesländern verhält. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1.16 zu finden.

Bundesland	Fahrradtyp	
	Fahrrad	E-Bike
Brandenburg	82%	3% (6.)
Niedersachsen	81%	9% (1.)
Mecklenburg-Vorpommern	79%	3% (6.)
Bremen	79%	5% (4.)
Bayern	77%	6% (3.)
Sachsen-Anhalt	76%	3% (6.)
Schleswig-Holstein	76%	6% (3.)
Hamburg	74%	3% (6.)
Baden-Württemberg	72%	7% (2.)
Berlin	71%	1% (7.)
Thüringen	70%	3% (6.)
Sachsen	70%	3% (6.)
Nordrhein-Westfalen	70%	7% (2.)
Hessen	69%	6% (3.)
Rheinland-Pfalz	68%	6% (3.)
Saarland	59%	4% (5.)
Basis gewichtet	316 361	231 524

Tabelle 3.1.16.: Übersicht der Fahrrad- und E-Bike-Verfügbarkeit nach Bundesland [Bunb]

Hinsichtlich der Nutzung normalen Fahrräder liegt Hamburg mit 74 Prozent im guten Mittelfeld. Die Nutzung von Pedelecs ist deutschlandweit sehr gering, fällt in Hamburg allerdings im Vergleich mit lediglich drei Prozent besonders gering aus.

1.3. Verhalten und Umwelt

Nachfolgend werden Regelungen wie die Straßenverkehrsordnung, welche den Radverkehr betreffen, sowie das Verhalten der Radfahrer aufgezeigt.

1.3.1. Straßenverkehrsordnung

Für Fahrräder gilt, wie für alle anderen Verkehrsteilnehmer, die Straßenverkehrsordnung. Nachfolgend werden verhaltensrelevante Regelungen dieser vorgestellt.

Befahrbare Wege

Mit einem blauen Hinweisschild markierte Radwege müssen verpflichtend genutzt werden. Dabei kann eine Fahrtrichtung angegeben sein, sodass es möglich ist, dass beide

Richtungen auf der gleichen Straßenseite fahren. Radwege mit einem weißen Schild beziehungsweise keinem Schild können, müssen aber nicht genutzt werden. Radwege, welche sich direkt neben dem Gehweg befinden und nicht explizit ausgezeichnet sind aber beispielsweise durch einen anderen Bodenbelag sichtbar, zählen auch in diese Kategorie. Teilen sich Radfahrer und Fußgänger einen verpflichtenden Weg, haben Letztere Vorrang und müssen Rücksicht nehmen ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Handelt es sich um einen Gehweg beziehungsweise eine Fußgängerzone, in welcher Fahrräder frei sind, müssen diese Schrittgeschwindigkeit (4 bis 7 km/h) fahren und Rücksicht auf Fußgänger nehmen. Sofern es nicht anders gekennzeichnet ist, ist es Fahrradfahrern ausdrücklich verboten, den Fußweg zu benutzen. Dies gilt ebenfalls bei einem Überholvorgang. Eine Ausnahme stellen Kinder unter zehn Jahren dar.

Sofern es keinen verpflichtenden Radweg gibt, dürfen Fahrradfahrer die Fahrbahn benutzen ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Dabei haben diese eine Abstand zum rechten Fahrbahnrand von etwa 80 cm und zu parkenden Fahrzeugen von einem Meter zu halten. Zusätzlich ist es Radfahrern erlaubt, bei genügend Platz (1 Meter) auf der rechten Spur rechts an wartenden Fahrzeugen vorbei zu fahren.

Auf speziellen Fahrradstraßen dürfen sowohl Personenkraftwagen als auch Fahrräder fahren ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Jedoch haben Fahrradfahrer hier Vorfahrt und es gilt für beide die Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h . Zusätzlich haben Radfahrer hier die Genehmigung, nebeneinander zu fahren.

Fahrtrichtung

In allen Fällen (auf Fahrbahnen, Radwegen, Radfahrstreifen, erlaubten Gehwegen, Schutzstreifen und Fahrradstraßen) müssen sich Radfahrer an das Rechtsfahrgebot halten, heißt mit der Fahrtrichtung der Pkws fahren ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Eine Ausnahme stellen Radwege dar, bei welchen beide Fahrtrichtungen explizit für diesen vorgeschrieben sind und Schilder, welche einen Weg (darunter auch Einbahnstraßen entgegen der Fahrtrichtung) explizit für Fahrräder frei geben. Eine Nutzung ist allerdings nur bei Erstem vorgeschrieben.

Signalgeber

Sofern Radfahrer auf der Straße fahren gelten für sie die allgemeinen Signalgeber ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Auf dem Radweg gelten je nach Lage und Vorhandensein die allgemeinen oder explizit für Radfahrer gedachte Lichtzeichen. Auch wenn seit 2017 Ampeln für Fußgänger für Radfahrer nicht mehr verbindlich sind, gelten Kombi-Signale welche Radfahrer und Fußgänger zeigen für beide Verkehrsteilnehmer.

Abbiegen

Möchte ein Radfahrer abbiegen, muss er dies deutlich anzeigen ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Beim Linksabbiegen kann die Fahrbahn, sofern rechtzeitig eingeordnet, genutzt werden oder eine Radverkehrsführung.

Überholen

Wie alle Verkehrsteilnehmer müssen auch Fahrradfahrer beim Überholen einen ausreichenden Seitenabstand einhalten und andere Fahrradfahrer beziehungsweise Fußgänger vorher durch Klingeln darüber informieren [adfa].

An Fußgängerüberwegen

Bei Nutzung eines Fußgängerüberweges haben Fahrradfahrer ebenso wie Fußgänger Vorfahrt, sofern sie ihr Rad schieben ([adfa], Vgl. hier und in diesem Absatz). Bei einer fahrenden Überquerung müssen diese auf den Verkehr Rücksicht nehmen und querende Fahrzeuge passieren lassen.

In Kreisverkehren

Im Kreisverkehr gelten Autos und Fahrräder als gleichberechtigt ([Wei18], Vgl. hier und in diesem Absatz). Somit gelten für beide die gleichen Verkehrsregeln. Handelt es sich um einen Rechts-vor-Links-Kreisel, muss dies auch als Radfahrer berücksichtigt werden. Ist im Kreisel eine Radfahrerspur vorhanden, muss diese genutzt werden. Diese Spur kann auch für beide Fahrtrichtungen zugelassen sein. In diesem Fall haben Fahrräder Vorrang.

Geschwindigkeitsbegrenzungen

Auch für Fahrradfahrer gelten im Rahmen der Straßen Verkehrsordnung [BB] Regelungen hinsichtlich der erlaubten Geschwindigkeit ([Aktb], Vgl. hier und in diesem Absatz). So müssen sich Radfahrer nicht nur an die Geschwindigkeitsbegrenzung, welche auch für Autofahrer gilt halten, sondern zusätzlich an Begrenzungen auf Radwegen. Sie sind angehalten, auf Fußwegen zwischen sieben und 15 km/h schnell zu fahren. Auf Radwegen ist die Geschwindigkeit an die aktuelle Verkehrssituation anzupassen. So soll auf beispielsweise Wegen, welche uneben oder von Astwerk durchdrungen sind, langsamer gefahren werden, als auf Intakten. Im Falle eines beschädigten Radweges ist allerdings auch die Straße befahrbar.

1.3.2. Mögliche Wege

Auch wenn gemäß Straßenverkehrsordnung, wie unter 1.3.1 festgehalten, Radfahrer im Normalfall lediglich auf Radwegen und der (Fahrrad-)Straße fahren dürfen, kommt es in der Praxis trotzdem vor, dass Radfahrer auch den Gehweg benutzen. In diesem Fall interagieren sie auch mit Fußgängern.

Auf Radwegen

Bezüglich des Radweges sind von der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung Breiten für die verschiedenen Formen von Radwegen angegeben. Tabelle 3.1.17 zeigt die Mindest- und Optimalbreiten für die Wegtypen.

Wegtyp	Breite	
	mindestens	möglichst
Baulich angelegter Radweg	1,5 m	2 m
Radfahrstreifen	1,5 m	1,86 m
Gemeinsamer Fuß- und Radweg (innerorts)	2,5 m	
Gemeinsamer Fuß- und Radweg (außerorts)	2 m	
Getrennter Fuß- und Radweg	1,5 m	

Tabelle 3.1.17.: Übersicht über die Mindest- und Optimalbreiten unterschiedlicher Wegtypen [Bun17]

Bezüglich der Nutzung von Radwegen wurden im Rahmen einer Untersuchung in Kanada ([LE11], Vgl. hier und in diesem Absatz) 2917 Fahrradfahrer zwischen 14 und 81 Jahren zu ihrem Wohnort, ihrem Primärziel beim Radfahren, der gewählten Wegart und der Nutzungshäufigkeit befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass Radfahrer, welche regelmäßig mit einem festgelegten Ziel, also nicht lediglich als Freizeitbeschäftigung oder zu Sportzwecken, mit einer um 64 Prozent geringeren Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu Freizeit-Radlern den Radweg nutzen.

Auf Straßen

Auch wenn Fahrradfahrer bei fehlendem Radweg verpflichtet sind, auf der Straße zu fahren gibt es einige wenige Straßen, welche sie nicht befahren dürfen ([BB] [bus19], Vgl. hier und in diesem Absatz). So sind Kraftfahrstraßen und Autobahnen lediglich für Kraftfahrzeuge freigegeben, welche eine Geschwindigkeit von mindestens 60 km/h erreichen können. Angekündigt wird eine solche Straße durch ein blaues Schild mit einem weißen Pkw auf blauem Grund. Zudem ist es aber auch möglich, dass gewisse Straßenabschnitte auf „normalen“ Straßen für Radfahrer und Fußgänger nicht freigegeben sind. In den Fällen ist in der Regel ein rot umrandetes Verbotsschild angebracht.

Zusätzliche Wege

Im Vergleich zu Personenkraftwagen können Fahrräder zusätzliche Wege nutzen, welche für Erstere nicht passierbar sind. So ist es beispielsweise möglich, Waldwege zu befahren, sofern sie breiter als 2 Meter sind [Tre16]. Zudem sind in einigen Parks Radfahrer, Einbahnstraßen entgegen der Fahrtrichtung und Durchfahrten in Sackgassen erlaubt beziehungsweise möglich ([adfa], Vgl. hier und im Folgenden). Dies muss in der Regel aber durch Hinweisschilder explizit erlaubt werden.

Nutzungshäufigkeit und Sicherheitsempfinden auf unterschiedlichen Wegen

Nachdem oben bereits aufgezeigt wurde, welche Wege Radfahrer befahren können beziehungsweise dürfen, zeigt die folgende Tabelle 3.1.18, welche Wege in der Praxis tat-

sächlich genutzt werden und zugleich, wie sicher sich Fahrradfahrer auf diesen Wegen fühlen.

Wegart	Nutzungshäufigkeit	Gefühl auf dem Weg	
		sicher	unsicher
Fahrbahn mit separatem Radstreifen	50%	23%	35%
Getrennter Geh- und Radweg	49%	44%	5%
Fahrbahn	46%	3%	82%
Gemeinsamer Geh- und Radweg	46%	12%	31%
Baulich getrennter Radweg abseits Fahrbahn und Fußweg	20%	53%	3%
Fahrradstraße	10%	34%	4%

Tabelle 3.1.18.: Übersicht über die Nutzungshäufigkeit und das Sicherheitsempfinden unterschiedlicher Wegtypen durch Fahrradfahrer [sB19]

Es zeigt sich, dass Radfahrer sehr häufig auf der Fahrbahn gemeinsam mit Autos fahren, sich dort aber durch diese sehr unsicher fühlen. Das höchste Sicherheitsempfinden bieten baulich getrennte Radwege, welche ausschließlich von Fahrrädern genutzt werden dürfen. Zugleich zeigt sich aber auch, dass diese Wegart neben Fahrradstraßen am wenigsten genutzt wird. Am häufigsten nutzen Radfahrer Fahrbahnen mit separatem Radstreifen.

1.4. Interaktionen

Im folgenden Abschnitt werden die Interaktionen eines Fahrradfahrers mit anderen Verkehrsteilnehmern (Abschnitt 1.4.1 und 1.4.2) und Lichtsignalanlagen (Abschnitt 1.4.3) beschrieben. Das Vorgehen ist dabei in allen Fällen zunächst gleich. Zunächst prüft die Steuerungseinheit (das `SteeringHandle`) des Rades, wie die aktuelle Umgebung aussieht. Dabei werden Hindernisse wie Fahrzeuge und Kreuzungen in der Nähe identifiziert und für die Verhaltensentscheidungen hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht. Dabei wird die Entfernung, die Fahrtrichtung (beispielsweise bei Rechts-vor-Links Kreuzungen und einem Fahrzeug von links), und die aktuelle Spur von Hindernissen betrachtet.

1.4.1. Mit anderen Verkehrsteilnehmern

Da Radfahrer nicht alleine auf der Straße unterwegs sind, tritt naheliegenderweise an vielen Stellen eine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern unterschiedlicher Typen auf.

Überholen

Bei einem vorausfahrenden Fahrzeug muss ein Radfahrer prüfen, ob er den anderen überholen möchte. Dazu wird zunächst der Bremsweg s_{decel} ermittelt (Gleichung 3.1).

$$s_{decel} = \frac{v^2}{2 * a_{decel}} \quad (3.1)$$

Dazu wird die aktuelle Geschwindigkeit im Quadrat durch die doppelte durchschnittliche Bremsverzögerung geteilt. Die durchschnittliche Verzögerung richtet sich dabei sowohl nach der jeweiligen Bremse (Vorder- oder Hinterrad) und dem Zustand der Fahrbahn (trocken oder nass) [Bie12].

Rad	Verzögerung	
	trockene Fahrbahn	nasse Fahrbahn
Vorderrad	5,79 m/s ²	4,01 m/s ²
Hinterrad	2,56 m/s ²	1,92 m/s ²

Tabelle 3.1.19.: Durchschnittliche Verzögerung der Radtypen bei trockener und nasser Fahrbahn [Bie12]

Da es in dem Smart Open Hamburg Modell kein Wetter gibt, werden die Werte für die trockene Fahrbahn genutzt und daraus ein Durchschnitt gebildet.

$$a_{\overline{decel}} = \frac{a_{decel,rear} + a_{decel,front}}{2} \quad (3.2)$$

Dabei wird versucht zu überholen wenn

- Keine Kreuzung innerhalb der nächsten 55 Meter Entfernung kommt
- Die Wunschgeschwindigkeit mindestens 3 m/s größer ist als die aktuelle Geschwindigkeit des Vordermannes
- Die Distanz zum Vordermann kleiner ist als der dreifache Bremsweg
- Der Fahrer in Abhängigkeit seines Typs überholen möchte

in allen anderen Fällen wird dem Vordermann weiter gefolgt.

Sollte der Fahrer überholen wollen, wird unterschieden, ob dies auf einem Weg mit verschiedenen Spuren, wie der Fahrbahn, erfolgt oder ob es generell nur eine Spur gibt. Im letzteren Fall wird überprüft, ob die Breite des Weges es zulässt, dass zwei Fahrräder nebeneinander fahren können. Ist dies der Fall, überholt das hintere Fahrrad seinen Vordermann. Andernfalls nicht. Sollte es mehr als eine Spur geben, wird es als normaler Spurwechsel betrachtet. Das Verhalten in diesem Fall ist in Abschnitt 1.4.2 beschrieben.

Überholt werden

Im Rahmen einer britischen Studie wurde untersucht, welche Einflüsse es auf das Überholen von Fahrrädern gibt [Wal07]. Zunächst wurde untersucht, welchen Einfluss das Tragen eines Helmes auf den Abstand hat, den Autofahrer bei einem Überholvorgang lassen. Dabei zeigt sich, dass das Tragen eines Helmes dazu führt, dass Autofahrer beim Überholen weniger Abstand lassen als ohne. Anschließend wurde analysiert, welchen Abstand welche Sorte von Fahrzeugen bei Überholvorgängen halten. Normale Personenkraftwagen und SUVs halten dabei im Schnitt den größten Abstand mit etwa 1,3 Metern, dicht gefolgt von Minibussen mit 1,275 Metern. Ebenfalls im Mittelfeld befinden sich Taxis mit 1,2 Metern. Die geringsten Abstände halten Schwerlastfahrzeuge (1,15 m) und Busse (1,1 m). Zuletzt wurde noch untersucht, welchen Einfluss das Geschlecht des Radfahrers auf den Abstand hat. Dabei halten Überholende zu Frauen einen durchschnittlichen Abstand von 1,35 Metern und zu Männern lediglich 1,225 Metern.

Setzt man diese Ergebnisse in Relation zu den hierzulande empfohlenen 1,5 bis 2 Metern Abstand beim Überholen [adfd], fallen alle diese Werte, teilweise drastisch, zu niedrig aus.

1.4.2. Spurwechsel

Bei einem Spurwechsel muss zunächst geprüft werden, ob es eine Spur links beziehungsweise rechts von der aktuellen Spur gibt. Anschließend muss geprüft werden, ob die gewünschte Spur (die linke für einen Überholvorgang, die rechte, sofern sich der Radfahrer derzeit nicht auf dieser befindet) derzeit frei ist.

Auch hierfür wird wieder der Bremsweg gemäß 3.1 und 3.2 ermittelt. Anschließend wird geprüft ob sich Fahrzeuge vor beziehungsweise hinter dem Eigenen auf der Spur befinden. Bei Fahrzeugen voraus wird geprüft, ob die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen derer Geschwindigkeit und der eigenen Maximalgeschwindigkeit größer ist als 4 m/s und die Distanz kleiner ist als der dreifache Bremsweg. Trifft einer dieser Fälle zu, wird nicht versucht auf die Spur zu wechseln.

Bei von hinten auf der Spur heranfahrenden Fahrzeugen wird ähnlich überprüft, ob die Spur blockiert ist. Ist das kommende Fahrzeug in Relation zur aktuellen Geschwindigkeit⁴ um mehr als 4 m/s schneller und die Distanz kleiner als der dreifache Bremsweg⁵ kann auf die Spur nicht gewechselt werden.

Ist die gewünschte Spur frei erfolgt der Wechsel.

⁴Hier ist nicht die Maximalgeschwindigkeit von Bedeutung, da potenziell die eigene Beschleunigung zu langsam erfolgen würde für die aktuelle Geschwindigkeit des Hintermannes

⁵Prinzipiell wäre hier der jeweilige Bremsweg des Hintermannes von Bedeutung. Da es sich dabei aber um verschiedene Fahrzeugtypen handeln kann, welche jeweils eine andere durchschnittliche Verzögerung aufweise, wird hier vereinfacht der eigene Bremsweg genutzt.

1.4.3. Mit Lichtsignalgebern

Als Verkehrsteilnehmer bekommt man das Gefühl, dass sich viele andere Personen im Straßenverkehr sich nicht an Ampeln gebunden fühlen und diese auch bei Rot überqueren. Dabei erscheint es so, als würden Fußgänger mit 49 Prozent oft beziehungsweise sehr oft eine rote Ampel überqueren ([Ver13], Vgl. hier und im Folgenden). Bei Fahrradfahrern sind es 43 Prozent und bei Pkws 37%. Eine Untersuchung der Polizei Hamburg kommt zu anderen Ergebnissen und bestätigt diese Empfindung nicht ([Kra17], Vgl. hier und in diesem Absatz). Um zu dieser Erkenntnis zu kommen, haben sie einen ganzen Tag lang im Stadtgebiet den Verkehr kontrolliert und Rotlichtverstöße notiert. Dabei zeigt sich, dass an diesem 226 Autofahren und lediglich 22 Radler bei Rot über einen Lichtsignalgeber gefahren sind. Auch wenn dabei die Angabe fehlt, wie viele Auto- und Fahrradfahrer insgesamt an diesem Tag kontrolliert wurden, ist davon auszugehen, dass es weit mehr Autos als Fahrräder waren.

Demgegenüber steht eine Studie des Verhaltens von Fahrradfahrern an roten Ampeln in Melbourne ([JCO08], Vgl. hier und in diesem Absatz). Bei dieser wurden in einem Zeitraum von 18 Stunden an zwei verschiedenen Positionen 5420 Fahrradfahrer, darunter 4282 Männer, beobachtet. In dem gesamten Zeitraum sind sieben Prozent der Fahrer (379) über Rot gefahren, wobei am Abend mehr Verstöße auftraten (11%) als morgens (3%). Im Zuge dessen haben sie die Radfahrer in drei verschiedene Typen unterteilt: „Runner“ (halten in der Regel nicht bei Rot), „Impatient“ (warten zunächst an der Ampel und fahren noch bei Rot los) und „Racer“ (beschleunigen bei einer gelben Ampel). Die „Runner“ haben dabei von den drei Typen mit 42 Prozent der Fälle abends am häufigsten die rote Ampel überfahren. Die Ungeduldigen kommen auf 33% und die „Racer“ auf 25. Die Studie aus Melbourne kommt zu einer weit höheren Anzahl von Rotlichtverstößen bei Fahrradfahrern. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die Ergebnisse in Hamburg nicht ganz der Realität entsprechen beziehungsweise an einem „guten Tag“ gemessen wurde. Allerdings ist unklar, wie die kulturellen Unterschiede in dieser Hinsicht zwischen Australien und Deutschland ausfallen.

Obwohl es sich leicht mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einbauen ließe, dass Radfahrer potenziell über Rot fahren würden, ist es geplant, dass Fahrradfahrer sich gemäß der Straßenverkehrsordnung verhalten und bei Rot an einer Lichtsignalanlage zum stehen kommen.

2. Gewählter Stadtteil

Für die Simulationen und die Evaluation wird der Bezirk Altona ausgewählt ([adfc] [Lan], Vgl. hier und im Folgenden). Dies beinhaltet die Stadtteile Altona-Altstadt, Altona-Nord, Ottensen, Sternschanze, Bahrenfeld, Groß Flottbek, Iserbrook, Lurup, Osdorf, Blankenese, Nienstedten, Othmarschen, Rissen und Sülldorf. Abbildung 3.2.1 zeigt die Außengrenze dieses Gebiets und die jährlichen Verkehrszählstellen in diesem Gebiet.

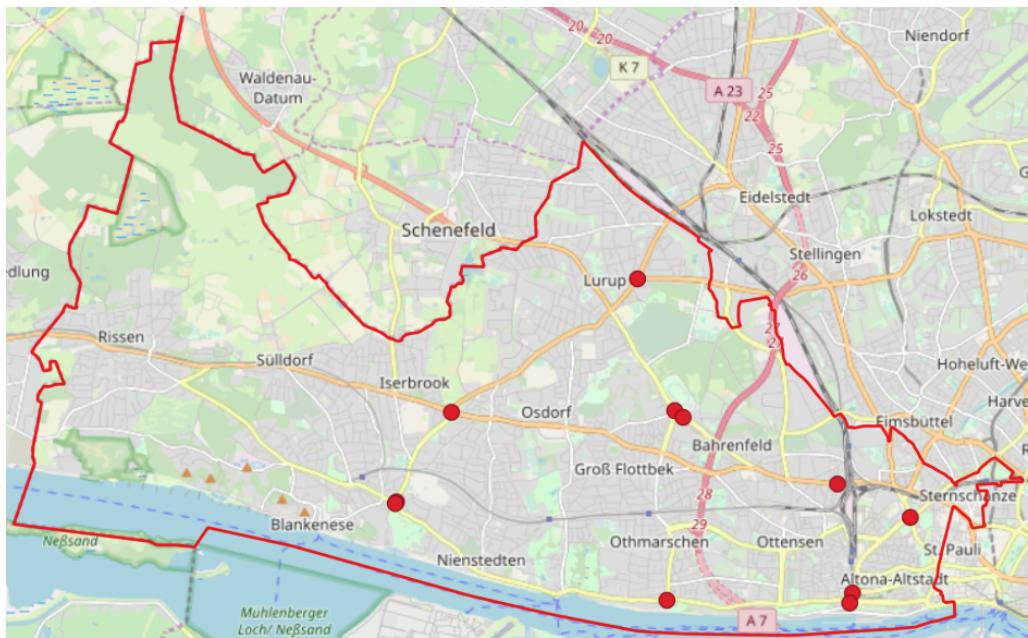


Abbildung 3.2.1.: Bezirk Altona mit den jährlichen Verkehrszählstellen [Wey19]

Die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken dieser Zählstellen sind in der nachfolgenden Tabelle 3.2.20 dargestellt.

Stadtteil	Verkehrsstärken	
	In 24 Stunden	In 1 Stunde (rechnerisch)
Iserbrook	16 000	667
Blankenese (kombiniert)	35 000	1 458
Bahrenfeld (kombiniert)	32 000	1 333
Lurup	31 000	1 292
Othmarschen	8 000	333
Altona (kombiniert)	48 000	2 000
Altona Nord	37 000	1 542
Holstenstraße	13 000	542
Gemittelt	27 500	1 146

Tabelle 3.2.20.: Übersicht über die Verkehrsstärken im Bezirk Altona in 24 und 1 Stunde für Pkws [Lan]

Für den Radverkehr in Hamburg gibt es derzeit nur ein Fahrradbarometer an der Alster, an welchem der tägliche Radverkehr gemessen wird ([Bun18] [adfb] [adfc], Vgl. hier und im Folgenden). Jedoch zeigt eine Studie vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur von 2017, dass in Metropolen wie Hamburg etwa 15 Prozent des Verkehrsaufkommens Radfahrer sind. Aufgrund der mangelnden Messwerte wird mit

diesem Wert der Radverkehr aus den genannten Verkehrsstärken ermittelt und in Tabelle 3.2.21 dargestellt.

Stadtteil	Verkehrsstärken in 24 Stunden	
	Autos	Fahrrad (rechnerisch)
Iserbrook	16 000	2 400
Blankenese (kombiniert)	35 000	5 250
Bahrenfeld (kombiniert)	32 000	4 800
Lurup	31 000	4 650
Othmarschen	8 000	1 200
Altona (kombiniert)	48 000	7 200
Altona Nord	37 000	5 550
Holstenstraße	13 000	1 950
Gemittelt	27 500	4 125

Tabelle 3.2.21.: Übersicht über die Verkehrsstärken im Bezirk Altona in 24 Stunden für Pkws und Fahrräder [Lan]

Die Zahlen werden in durchgeführten Simulationen als Grundlage für die Anzahl von Agenten genutzt.

3. Auswahl eines Verhaltensmodells

Nachdem in Kapitel 2 Abschnitt 3 bereits die infrage kommenden Verhaltensmodelle vorgestellt wurden, werden nachfolgend die jeweiligen Schwachstellen der Modelle aufgezeigt und ein geeignetes Modell für die Modellierung von Fahrradfahrern ausgewählt.

Follow-the-Leader und GHR Modell

Das Follow-the-Leader Modell hat, trotz diverser Verbesserungen, einige Schwachstellen, welche bis heute nicht behoben worden sind [Sch04] [Sor10]:

- Es ist in dem Modell nicht vorgesehen, Fahrzeuge durch Spurwechsel zu überholen [Sch04]
- Das Verhalten bei Abwesenheit eines Vorgängers ist potenziell falsch [Sch04]
- Beschleunigt der Vorgänger führt dies dazu, dass das nachfolgende Fahrzeug ebenfalls (ungewollt) beschleunigt (Mitzieheffekt) [Sch04]
- Die Dauer der Beschleunigung und der Verzögerung sind identisch [Sch04]

Das in MITSIM genutzte GHR Modell ist zu physikalisch ausgelegt und kann dadurch zu unrealistischen Beschleunigungs- / Verzögerungswerten und Auffahrunfällen führen

([Dal14], Vgl. hier und im Folgenden). Zudem kann es in dem Modell, bei fehlendem Vorgänger, zu einem Ausbleiben von Beschleunigung kommen.

Betrachtet man das Verhalten von Fahrradfahrern, so führen die Nachteile des Follow-the-Leader und des GHR Modells potenziell zu einer großen Abweichung von diesem. So überholen zwar Radfahrer ebenfalls selten durch Spurwechsel, da es häufig nur eine Radspur gibt, jedoch ist die Verkehrsdichte viel geringer, wodurch häufig kein Vordermann vorhanden ist. Zudem führt das Beschleunigen des Vordermannes in der Regel nicht dazu, dass ein Radfahrer ebenfalls beschleunigt. Aufgrund dieser Probleme, werden beiden Modelle für die Umsetzung ausgeschlossen.

Optimal-Velocity

Beim Optimal-Velocity-Modell gibt es ebenfalls einige Nachteile. So ist das Modell, aufgrund fehlender Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug und Beachtung der Geschwindigkeit dieses, sehr sensibel in Bezug auf die Optimal-Velocity-Funktion ([Dal14] [Sch04] [Bie+17], Vgl. hier und in diesem Absatz). Dadurch entstehen teilweise starke Verzögerungen, welche ein realistisches Maß überschreiten. Zusätzlich ist die Reaktion auf stehende Fahrzeuge ungenügend und führt häufig zu Unfällen. Um diese Nachteile zu vermeiden, muss ein sehr kleiner Wert für die Sensitivitätskonstante τ gewählt werden, was jedoch wiederum zu unrealistischen Beschleunigungen führt. Des Weiteren ist es möglich, dass negative Geschwindigkeitswerte vorkommen können wenn beispielsweise ein Auto schnell auf stehende Fahrzeuge auffährt. Zuletzt ist zu erwähnen, dass Fahrer bei größeren Geschwindigkeitsunterschieden einen großen Sicherheitsabstand wählen und sehr schnell bremsen.

Anders als bei Autofahrern, haben Fahrradfahrer in der Regel keine, vom Vordermann abhängende, Wunschgeschwindigkeit. Des Weiteren erfolgt häufig ein Auffahren auf (wesentlich) langsamere oder stehende Verkehrsteilnehmer, wie beispielsweise Fußgänger, wobei das Bremsen hier im Normalfall relativ kurzfristig erfolgt. Dies im Kombination mit den unrealistischen Verzögerungen oder Beschleunigungen führt zu einem Ausschluss des OVM.

Intelligent-Driver

Das Intelligent-Driver Modell hat im Vergleich zu anderen Modellen weit weniger schwierige Probleme, welche nachfolgend vorgestellt werden. So kann es auf Straßen mit mehreren Fahrbahnen teilweise zu plötzlichen, ungewollten und unrealistisch starken Bremsvorgängen während Spurwechseln kommen ([Dal14] [Rei07], Vgl. hier und im Folgenden). Jedoch berücksichtigt das Modell keine physiologischen oder psychologischen Einflüsse beziehungsweise Verhaltensweisen.

Obwohl das IDM im Rahmen des SmartOpenHamburg Projektes für Autofahrer genutzt wird, kommt es für Fahrradfahrer nicht in Betracht. Dies liegt unter anderem daran, dass das Modell für seine Berechnung lediglich die Wunschgeschwindigkeit, die gewünsch-

ten Abstände zum Vordermann im Normal- und Staufall, die Maximalbeschleunigung, die komfortable Verzögerung und den Sicherheitsabstand in Sekunden berücksichtigt. Dies erscheint für motorisierte Fahrzeuge ausreichend. Jedoch schwanken die Lücken bei Fahrrädern stärker und sind abhängiger vom Fahrer als bei Pkws.

Auch wenn die prinzipielle Anpassung möglich erscheint, fehlen zudem psychologische Aspekte wie die persönliche Reaktionsfähigkeit des Fahrers aber auch physiologische Aspekte wie die Änderung der maximal möglichen Beschleunigung in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes.

Erstes Wiedemann Modell von 1974

Das erste Modell von Wiedemann aus dem Jahr 1974 weist im Vergleich zu anderen Modellen einen höheren Berechnungsaufwand auf ([Dal14] [Rei07] [Bie+17], Vgl. hier und in diesem Absatz). Aus diesem Grund wird es häufig lediglich für die Simulation von kleineren Bereichen innerhalb Städten genutzt. Zudem ist das Verhalten von Fahrern potenziell sehr „schwankend“ in dem Sinne, dass zunächst, bei einem langsameren Vordermann, stärker gebremst wird, als nötig wäre, um diesem mit gleichbleibendem Abstand zu folgen. Entsprechend vergrößert sich der Abstand zum Vorausfahrenden wieder, was den Fahrer dazu veranlasst, zu beschleunigen. Diese Beschleunigung fällt allerdings ebenfalls wieder zu stark aus, hierdurch stellt sich ein oszillierendes Verhaltens ein. Obwohl das Modell laut diverser Veröffentlichungen im Vergleich zum 99er Modell besser für die Simulation von Stadtverkehr geeignet ist, wird es aufgrund der vielen unklaren Parameter und Schranken nicht verwendet [Sor10].

Zweites Wiedemann Modell von 1999

Wie das Modell von 1974 ist auch das 99er Modell rechenintensiver als andere Modelle und erfordert zudem, durch seine Vielzahl an Parametern, einen höheren Kalibrierungsaufwand ([Agh+13], Vgl. hier und im Folgenden). Zugleich zeigt es wie das Vorgängermodell das „pendelnde“ Verhalten der Fahrer. Ebenfalls spricht die Ausrichtung auf außer-städtischen Verkehr gegen das Modell für die Simulation von Fahrradfahrern. Dafür spricht jedoch, dass von der Stadt Kopenhagen eine Veröffentlichung [TA13] mit Parametern für VISSIM für das Wiedemann 99 Modell für die Simulation von Fahrradfahrern vorliegt.

Fritzsche

Ein weiteres, gut geeignetes Modell ohne relevante Nachteile ist das Fritzsche Modell. Nachfolgend werden Vergleiche bezüglich des Verhaltens aus der „Comparison of Car-following models“ des Swedish National Road and Transport Research Institute [OT04] herangezogen um seine Eignung näher zu untersuchen. Die folgende Abbildung 3.3.2 zeigt im oberen Diagramm die Geschwindigkeit des Vordermannes (Leader) und die vom Fritzsche Modell beziehungsweise VISSIM auf Basis eines Wiedemann Modells be-

stimmten Geschwindigkeiten des Folgenden. Im unteren Diagramm ist selbiges für die Beschleunigung dargestellt.

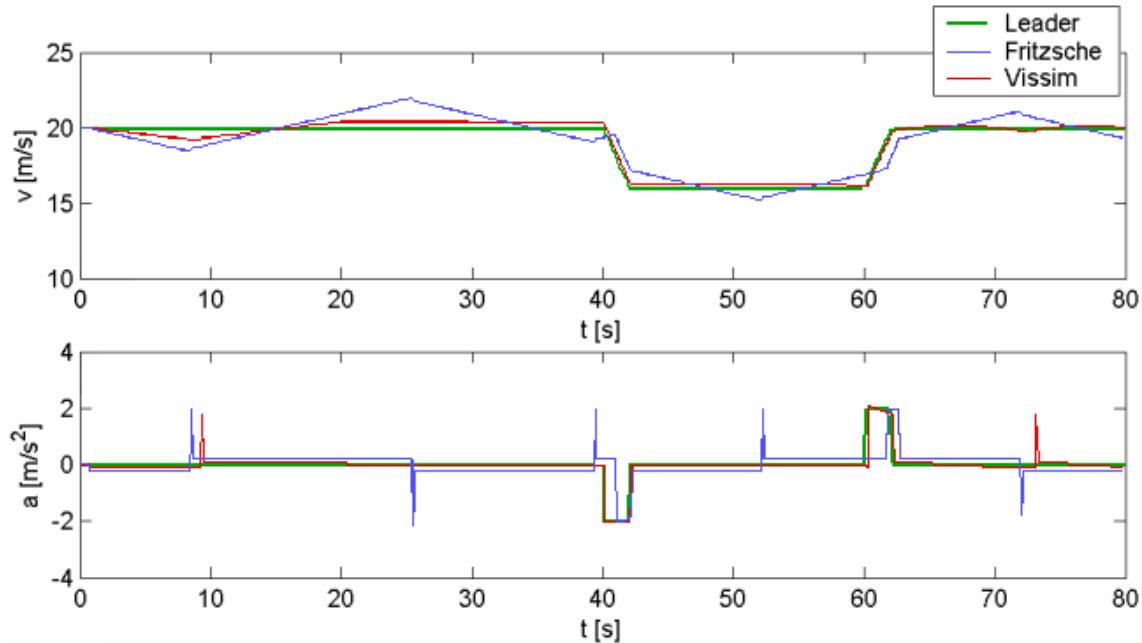


Abbildung 3.3.2.: Vergleich des Verhaltens eines Vordermannes, eines Fahrers mit Fritzsche (blau) und eines Fahrers mit VISSIM (rot) bezüglich der Geschwindigkeit (oben) und der Beschleunigung (unten) (Auf Basis [OT04] S. 28 / 29, bearbeitet)

Der obere Teil der Grafik zeigt, dass das Verhalten auf Grundlage des Fritzsche Modells an diversen Stellen viel stärker ausfällt, als beim VISSIM Modell und häufig stark von der Geschwindigkeit des Vordermannes abweicht. Bei der Beschleunigung zeigen sich noch deutlichere Unterschiede. Dort weicht das Fritzsche Modell an fünf Stellen in Form eines Peaks von dem Verhalten des Vordermannes ab. Das VISSIM Modell tut dies lediglich an zwei Punkten. Zudem fällt auf, dass gemäß des Fritzschen Modells bei Sekunde 40 und 60 einige Sekunden zu spät und zudem nur relativ kurz beschleunigt.

Aufgrund dieses Verhaltens kommt das Fritzsche Modell ebenfalls weniger in Frage.

Nachdem alle betrachteten Modelle vorgestellt und bewertet wurden, wird für die Simulation von Fahrradfahrern das Wiedemann 99 Modell ausgewählt. Auch wenn der Rechenaufwand höher ist, als bei anderen Modellen, sprechen die ausführlich beschriebenen und mit Werten versehenen Parameter für Fahrradfahrer für das Modell.

4. Empfohlene Parameter des Verhaltensmodells

Wie oben bereits erwähnt, haben Niels Tørslev und Rasmus Albrink für die Stadt Kopenhagen in ihrer Veröffentlichung „Micro simulation of cyclists“ [TA13] Parameter für

Fahrradfahrer mittels Wiedemann 99 genannt. Nachfolgende Tabelle 3.4.22 wiederholt die in Kapitel 2 Abschnitt 3.2.5 vorgestellten Parameter kurz, zeigt die Auswirkung der Werte und listet vergleichend die Standardwerte für Personenkraftwagen und Fahrräder.

Param.	Kurzbeschreibung	Auswirkung	Parameter		
			Auto Orig. W99	Sonst. Ver- öf- fentl.	Fahrrad
CC0	Durchschnittliche Distanz zwischen stehenden Fahrzeugen	Höhere Werte → vorsichtigerer Fahrer	1,5m	1,5m	0,2m
CC1	Reaktionszeit	Höhere Werte → vorsichtigerer Fahrer	1,3s	0,9s	0,5s
CC2	Distanz größer als der Sicherheitsabstand, welche der Fahrer akzeptiert, bevor er versucht aufzuschließen	Höhere Werte → vorsichtigerer Fahrer	4m	4m	2m
CC3	Zeitliche Distanz, ab der der Fahrer beginnt zu verzögern	Höhere Werte → vorsichtigerer Fahrer	-12s	-8s	-20s
CC4	Reaktionsempfindlichkeit auf Beschleunigung / Verzögerung des Vorausfahrenden bei negativen Geschwindigkeitsdifferenzen.	Kleinere Werte → sensiblere Reaktionen des Fahrers	-0,25 <i>m/s</i>	-0,35 <i>m/s</i>	-0,25 <i>m/s</i>
CC5	Reaktionsempfindlichkeit auf Beschleunigung / Verzögerung des Vorausfahrenden bei positiven Geschwindigkeitsdifferenzen.	Kleinere Werte → sensiblere Reaktionen des Fahrers	0,35 <i>m/s</i>	0,35 <i>m/s</i>	0,25 <i>m/s</i>
CC6	Wie gut kann ein Fahrer die pendelnde Geschwindigkeit bei Zunahme des Abstandes des Vorausfahrenden einschätzen.	Größere Werte → schlechtere Einschätzung von Veränderungen	6	11,44	1

CC7	Beschleunigung im Oszillationsfall		2 m/s^2	0,25 m/s^2	0,2 m/s^2
CC8	Beschleunigung bei Stillstand		2 m/s^2	3,5 m/s^2	1,8 m/s^2
CC9	Beschleunigung bei 80 km/h		1,5 m/s^2	1,5 m/s^2	0,01 m/s^2

Tabelle 3.4.22.: Übersicht der Parameter für das Wiedemann 99 Modell [Mül12] [Fra18] [Sor10] [TA13] [Wie96]

5. Ermittlung der maximal möglichen Beschleunigung

Während bei motorisierten Fahrzeugen die mögliche Beschleunigung vorrangig von der Motorleistung abhängt, die erst bei relativ hoher Geschwindigkeit voll ausgeschöpft wird, zeigt sich bei von Muskelkraft betriebenen Fahrzeugen viel eher ein Zusammenhang mit dem aktuellen Bewegungszustand. Konkret wird die Beschleunigung von der Kraft und dem Gewicht des Fahrers und des Fahrzeugs, der aktuellen Geschwindigkeit, der maximal möglichen Geschwindigkeit⁶, der aktuellen Steigung und der Erdbeschleunigung $G = 9,81 m/s^2$ beeinflusst. Die Berechnungsgrundlage der im aktuellen Zustand möglichen Beschleunigung eines Fahrradfahrers wird in den Gleichungen 3.3 bis 3.5 aufgeführt:

$$a_{max} = \frac{F_{adjust}}{m} * \left(\frac{1}{|v| + \epsilon} - \frac{|v|^2}{v_{max}^3} \right) - 9,81 * \frac{gradient}{100} \quad (3.3)$$

mit

$$F_{adjust} = F * Efficiency \quad (3.4)$$

und

$$\epsilon = \frac{F_{adjust}}{m * a_{max-factor}} \quad (3.5)$$

Dabei dient ϵ als Regularisierung für den Bereich $v = 0$. Würde dies nicht gesetzt, gäbe es hier keinen endlichen Wert für die Beschleunigung, da in 3.3 durch 0 geteilt würde. Aus diesem Grund muss ein geeigneter Wert für $a_{max-factor}$ gewählt werden. Für eine Entscheidung wurden Werte zwischen 0,07 und 5 untersucht. Dazu ist anzumerken, dass die Beschleunigung $a_{v=0} = a_{max-factor}$ entspricht und $a_{v>0} < a_{max-factor}$. Folgendes Beispiel verdeutlicht dieses Verhalten. Die Beschleunigung für $v = 0 m/s$ mit $F = 75 W$, $Efficiency = 95\%$, $m = 80 kg$, $v_{max} = 9 m/s$, $a_{max-factor} = 3$ und $gradient = 0$ wird in

⁶Wobei diese wiederum ein Maß für Luft- und Rollwiderstand gibt.

folgender Gleichung 3.6 ermittelt.

$$\begin{aligned}
 a_{v=0} &= \frac{75W * 95\%}{80kg} * \left(\frac{1}{0 + (\frac{75W*95\%}{80kg*3})} - \frac{0^2}{9m/s^3} \right) - 9,81 * \frac{0}{100} \\
 &= 89,06 * \left(\frac{1}{29,69} - \frac{0}{729} \right) - 0 \\
 &= 89,06 * 0,034 \\
 &= 3
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Entsprechend sorgen Werte unter 1 für $a_{max-factor}$ für durchweg sehr geringe Beschleunigungswerte, welche ab einem gewissen Punkt sogar leicht negativ werden⁷. Deshalb kommen lediglich Werte ab einem Wert von 1 infrage. In Abbildung 3.5.3 werden Kurven für die Beschleunigung (Y-Achse) von 0 bis 4 m/s (X-Achse) für $a_{max-factor} = 1$, $a_{max-factor} = 3$ und $a_{max-factor} = 5$ dargestellt. Werte größer als 5 führen zu einer Beschleunigung von über 5m/s² aus dem Stand heraus. Da dies unrealistisch erscheint, kommen solche Werte auch nicht in Betracht.

⁷Bei $v_{max} = 11,11m/s$ ist bei einer Geschwindigkeit von $v = 8,334m/s$ und $a_{max-factor} = 0,07$ die Beschleunigung $a = -0,003$.

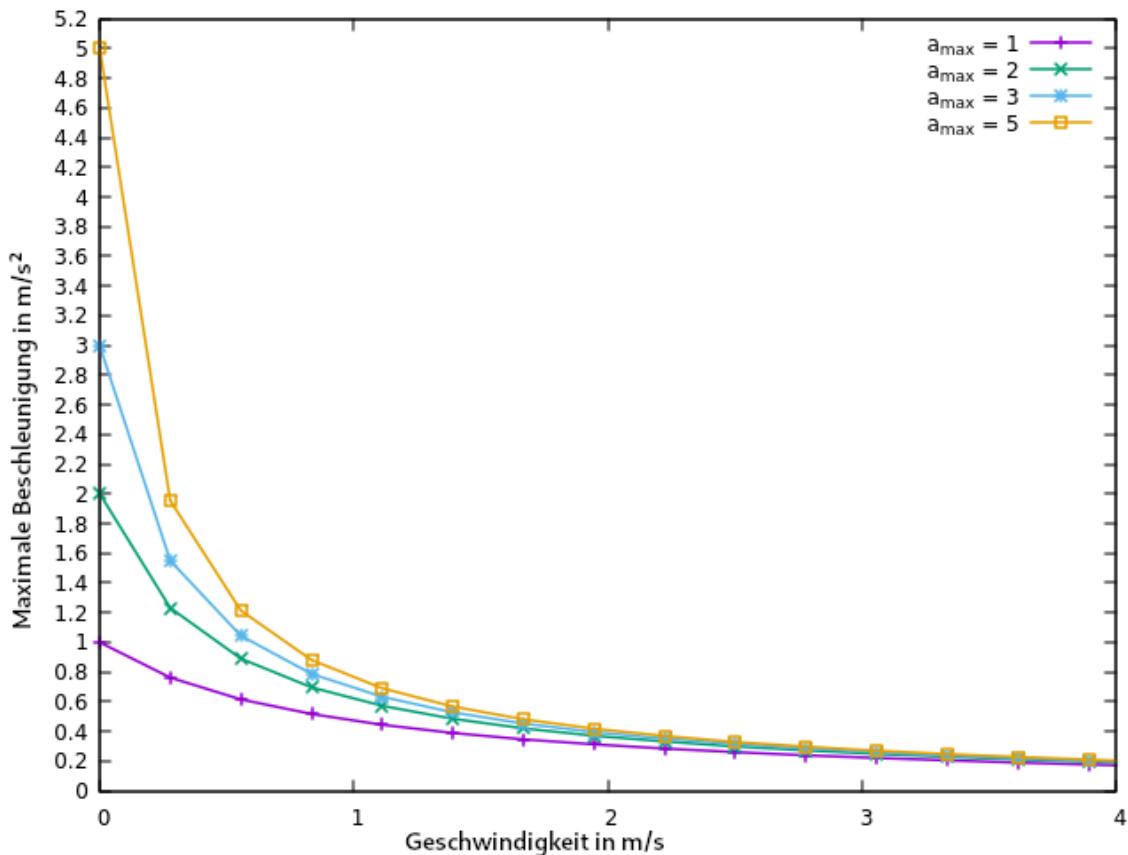


Abbildung 3.5.3.: Vergleich möglicher Beschleunigungsverhalten für $a_{max-factor} = 1$ (lila), $a_{max-factor} = 2$ (grün), $a_{max-factor} = 3$ (blau) und $a_{max-factor} = 5$ (orange)

Die Kurven sind ab $4 m/s$ abgeschnitten, da sie sich bereits ab $3 m/s$ stark aneinander annähern und anschließend nahezu identische Beschleunigungswerte generieren. Entsprechend ist der Wert von $a_{max-factor}$ vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich von Bedeutung.

Es zeigt sich, dass Werte bis $a_{max-factor} = 1 m/s^2$ den natürlichen Kurvenverlauf ($\epsilon = 0$) über einen weiten Bereich zu gering abschätzen, aber die geschmeidigste Beschleunigungskurve liefern. Die Kurve bei $a_{max-factor} = 5 m/s^2$ bietet hingegen das unharmonischste Bild. Zudem wird eine Beschleunigung von $5 m/s^2$ aus dem Stand für eher unrealistisch gehalten⁸. Deshalb wird für $a_{max-factor}$ Werte von $2 m/s^2$ beziehungsweise $3 m/s^2$ präferiert. Da dies natürlicherweise nicht von Radfahrer zu Radfahrer identisch sein sollte, wird eine Normalverteilung um diese Werte angestrebt.

⁸Zum Vergleich: Ein ICE beschleunigt im Mittel lediglich mit $0,53 m/s^2$ [Wik]. Zudem in [Wik] für Radfahrer ein Wert zwischen $1 m/s^2$ und $2 m/s^2$ angegeben.

6. Architektur

Die Architektur des Systems wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Der Aufbau sieht dabei wie folgt aus: Ein Agent, hier der Fahrradfahrer (`Cyclist`), erzeugt ein neues Fahrrad (`Bicycle`) und steigt auf dieses auf. Das Rad wird anschließend der Umgebung (`Environment`) hinzugefügt. Dabei bewegt sich der Agent innerhalb der Umwelt auf sogenannten Layern. Im Fall der Radler stehen zwei Layer zur Wahl: Der `CarLayer` und der `BicycleLayer`. Dabei teilen sich Agenten die Layer potenziell mit Agenten anderer Typen. So kann der `CarLayer` von motorisierten Fahrzeugen, wie Personenkraftwagen, und Fahrrädern genutzt werden. Den `BicycleLayer` nutzen hingegen lediglich die Fahrräder. Potenziell können Fahrräder auch den `PedestrianLayer` nutzen und sich diesen mit Fußgängern teilen. Da jedoch die Straßenverkehrsordnung die Nutzung des Fußweges nur für Kinder freigibt und die Agenten ohne Alter modelliert werden, wird der Fußweg von Fahrradfahrern nicht genutzt. Während der Initialisierung lässt der Radler für sein gewünschtes Ziel vom `RouteFinder` eine Route generieren.

Nachdem das Fahrrad in die Umgebung eingesetzt wurde, kommt das Steering-Konzept zum Tragen. Dabei wird zwischen dem `PassengerHandle` und dem `SteeringHandle` unterschieden. Ersteres dient dem Einstiegen als Mitfahrer ohne aktive Rolle. Bei normalen Fahrrädern ist dies obsolet, da diese nur einen Platz für den Fahrer haben und die Mitnahme auf dem Gepäckträger verboten ist [Akta]. Das `SteeringHandle` übernimmt die Steuerung des Radler-Agenten über sein Fahrrad je Simulationsschritt, auch Tick genannt. Dabei fragt es von der Umwelt relevante Informationen, wie andere Verkehrsteilnehmer oder Kreuzungen an und bestimmt auf Basis dessen das geeignete Verhalten. Für notwendige Geschwindigkeitsänderungen, wie beispielsweise bei einem langsam vorausfahrenden Fahrzeug, kommt der `BicycleAccelerator` zum Einsatz. Dieser ermittelt die notwendige Beschleunigung oder Verzögerung und reicht diese an das `SteeringHandle` zurück. Dieses teilt die Änderungen an Geschwindigkeit und damit einhergehend der neuen Position, an welche sich das Rad im Simulationsschritt bewegt, der Umgebung mit. Am Ende des Fahrens beantragt das `SteeringHandle` die Löschung des Fahrrades.

Um das oben beschriebene Vorgehen zu verdeutlichen, werden in Abbildung 3.6.4 die Komponenten und deren Interaktionen dargestellt.

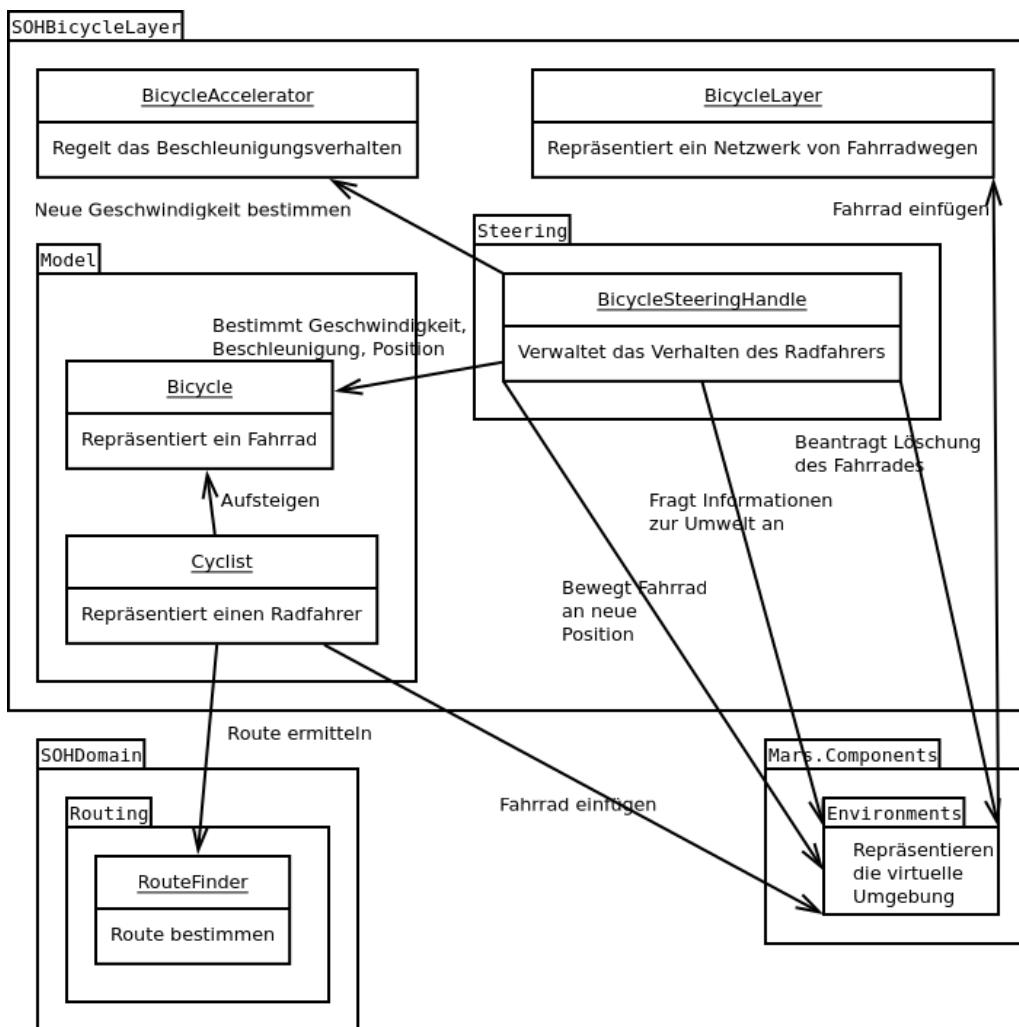


Abbildung 3.6.4.: Übersicht über die Komponenten und deren Interaktionen

Zusätzlich folgt in den Grafiken 3.6.5, 3.6.6 und 3.6.7 ein Sequenzdiagramm für das Vorgehen während eines Ticks.

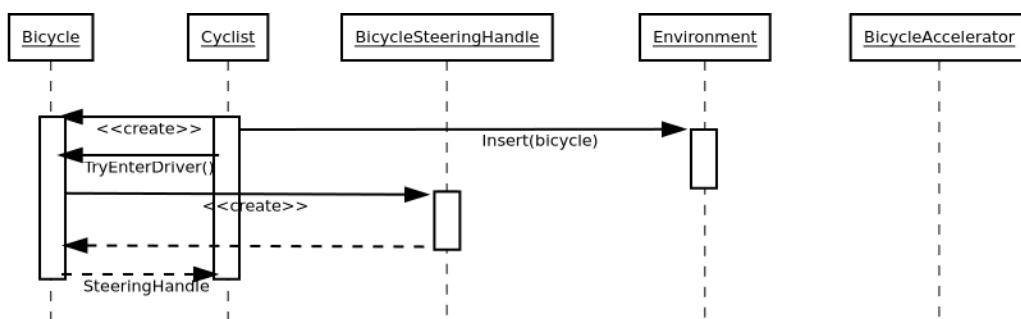


Abbildung 3.6.5.: Sequenzdiagramm: Initialisierung

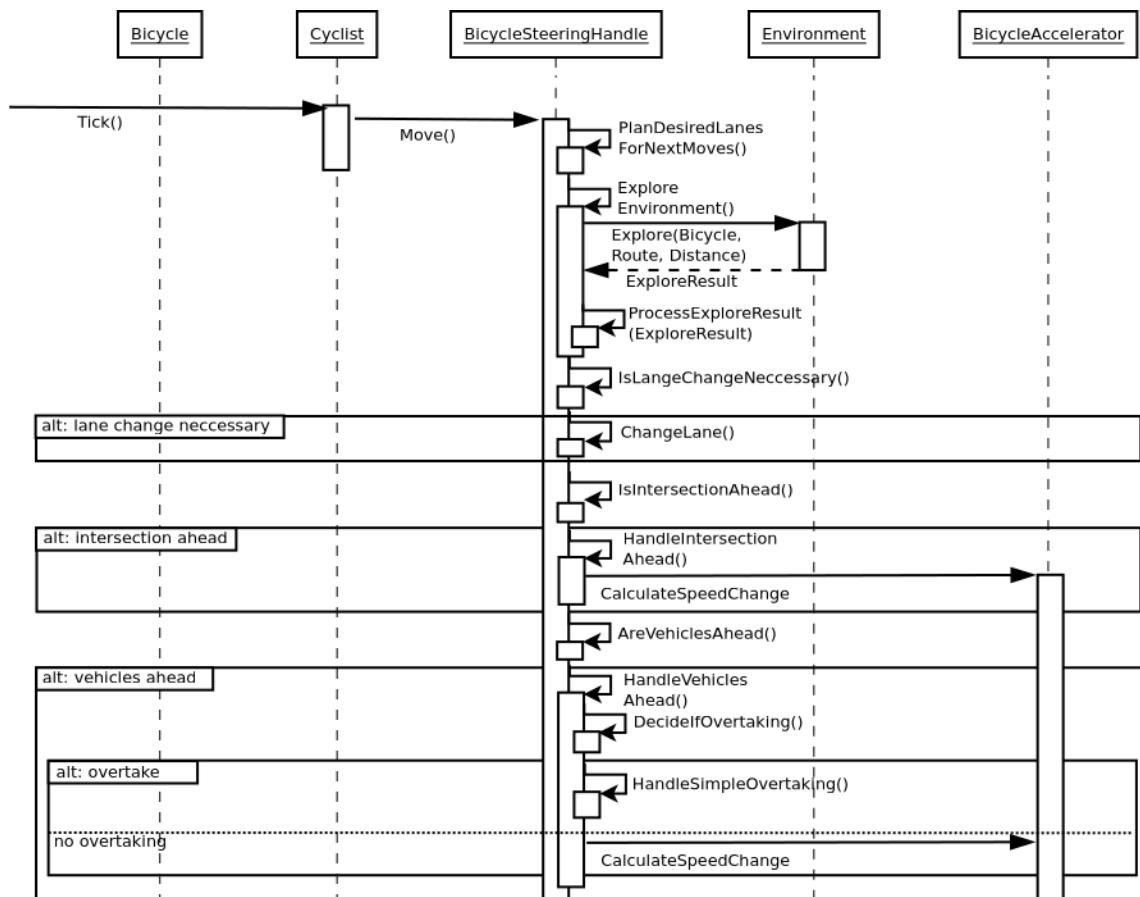


Abbildung 3.6.6.: Sequenzdiagramm: Tick Teil I

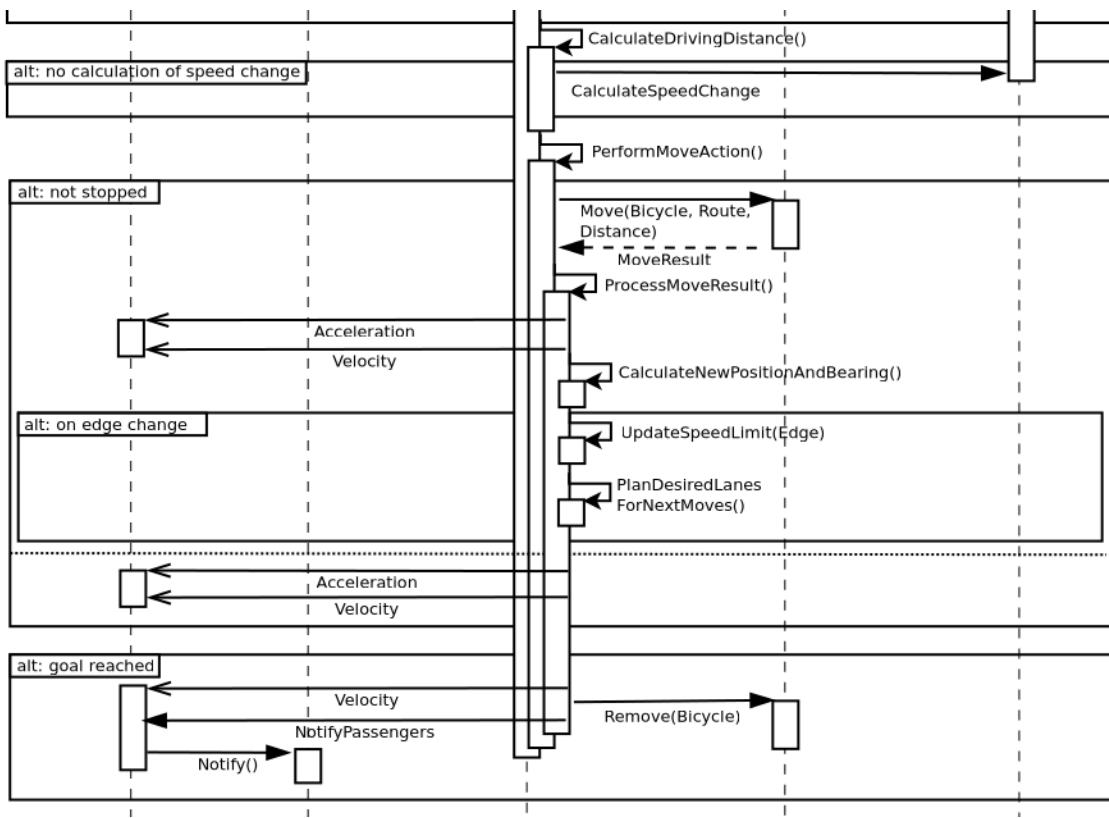


Abbildung 3.6.7.: Sequenzdiagramm: Tick Teil II

Entitätsmodell

Nachdem oben die Architektur und das Vorgehen vorgestellt wurden, folgt hier in Abbildung 3.6.8 eine Übersicht über die relevantesten Entitäten und deren Beziehungen zueinander. Dabei steht, wie auch oben in Abbildung 3.6.4, die Beziehung zwischen dem SteeringHandle, dem Bicycle, dem Cyclist und der Environment im Vordergrund.

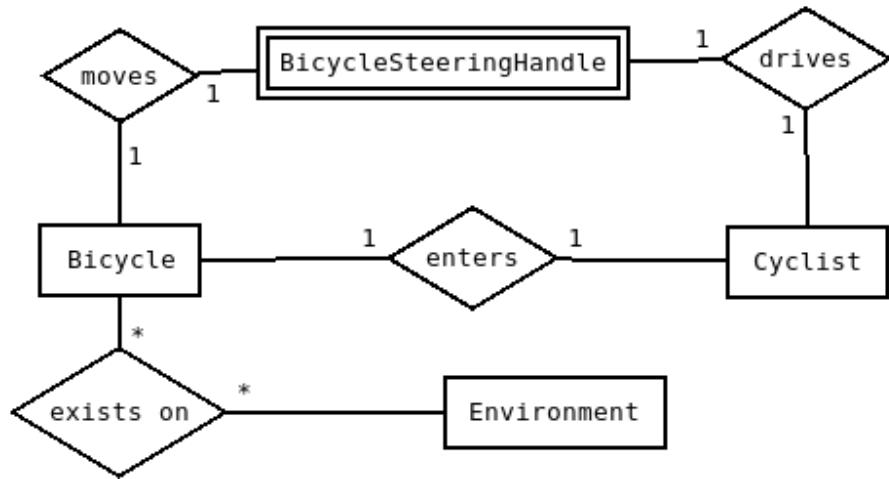


Abbildung 3.6.8.: ER-Modell: Übersicht

In den Abbildungen 3.6.9, 3.6.10 und 3.6.11 werden deren Eigenschaften dargestellt. Dabei werden in Abbildung 3.6.9 vererbte Eigenschaften gelb (von **Vehicle**) beziehungsweise blau (von **RoadUser**) dargestellt.

Gestrichelte Attribute ergeben sich dabei aus anderen. So werden die **Latitude** und **Longitude** in Abbildung 3.6.10 aus der **Position** abgeleitet und der **MaxPossibleSpeed** stellt das Minimum aus dem **SpeedLimit** und dem **MaxSpeed** des **Bicycles** dar.

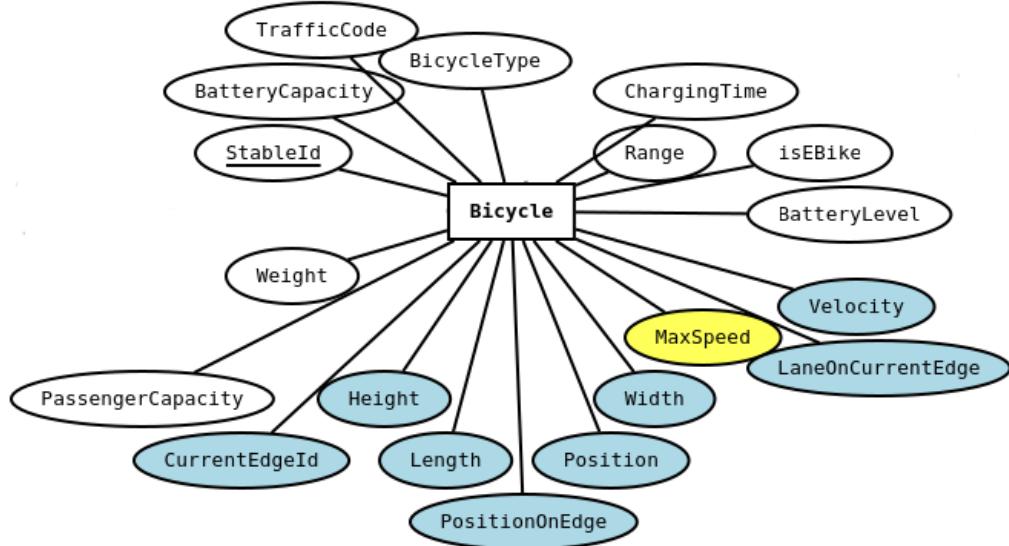


Abbildung 3.6.9.: ER-Modell: Bicycle

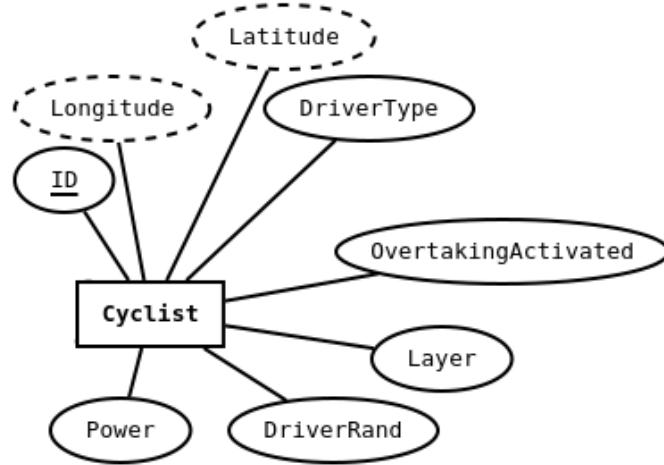


Abbildung 3.6.10.: ER-Modell: Cyclist

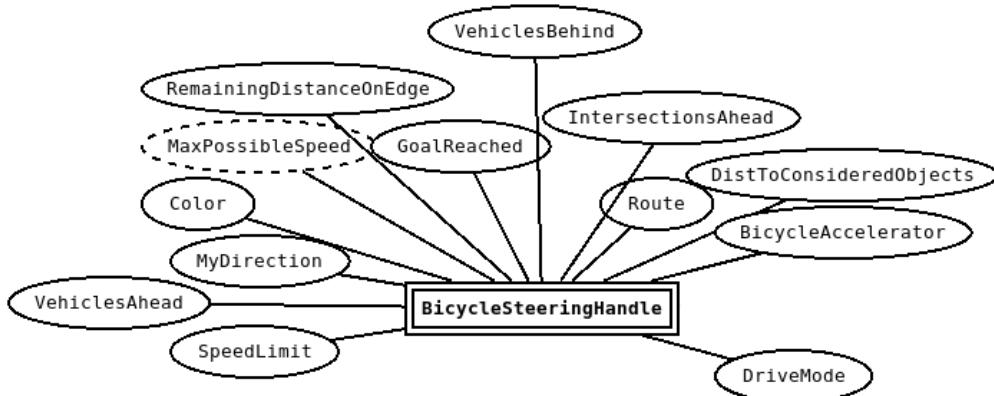


Abbildung 3.6.11.: ER-Modell: BicycleSteeringHandle

7. Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Modellierung von Fahrradfahrern, deren Verhalten und die Interaktionen mit der Umwelt. Dabei werden die oben beschriebenen Punkte mit den nachfolgenden Einschränkungen umgesetzt.

Fahrradfahrer werden mit unterschiedlichen Fahrertypen, einer gewissen Kraft und einem Gewicht modelliert. Die Maße, das Alter und das Geschlecht eines Radlers werden in diesem initialen Ansatz nicht berücksichtigt, können aber teilweise später von Bedeutung sein. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird das Tragen von Helmen, da keine Unfälle untersucht werden. Zudem wird angenommen, dass Radler stets mit ihrem eigenen Fahrrad fahren und sich keines bei Verleihstationen abholen.

Bei den Fahrrädern werden ebenfalls unterschiedliche Typen umgesetzt, welche sich auf das Gewicht auswirken. Zusätzlich kann für ein Fahrrad das Ladungsgewicht, Maße und

eine Maximalgeschwindigkeit angegeben werden. Eine Auswirkung des Radtyps auf das Verhaltensmodell ist nicht geplant, kann aber als Erweiterung der Arbeit relevant sein da es zu erwarten ist, dass Menschen mit beispielsweise einem Rennrad schneller fahren als ein Lastenrad. Auch die Auswirkung von Gangschaltungen und Rahmen- und Radgrößen wird nicht untersucht. Die Integration von E-Bikes wird vorbereitet, die komplette Umsetzung allerdings nicht angestrebt. Dies begründet sich in den teilweise starken Unterschieden, besonders beim Beschleunigungsverhalten, von Pedelecs zu normalen Fahrrädern. Die wenigen Nutzungszahlen in der Praxis deuten allerdings darauf hin, dass diese Einschränkung nicht kritisch ist.

Innerhalb der Simulationen verhalten sich Fahrradfahrer gemäß der Straßenverkehrsordnung. So fahren sie stets hintereinander (sofern sie nicht überholen), queren die Fahrbahn lediglich an dafür vorgesehenen Bereichen und beachten Lichtsignalanlagen. Radler können sowohl auf der Straße, dem Radweg aber auch dem Fußweg fahren und geeignet mit den dortigen Agenten interagieren. Dabei sind sie in der Lage zu überholen oder ohne das Erzeugen von Unfällen zu folgen.

Ebenfalls wird im Rahmen der Arbeit die Eignung des Wiedemann 99 Modells für Fahrradfahrer inklusive potenziell nötiger Anpassungen untersucht.

4. Implementierung

Im Kapitel „Implementierung“ wird die tatsächliche Realisierung des im vorherigen Kapitel 3 beschriebenen Konzeptes vorgestellt. Dabei wird die Integration in das bestehende SmartOpenHamburg Projekt vorgestellt, das verwendete Wiedemann 99 Modell untersucht und die konkrete Umsetzung des Konzeptes inklusive der Datenmodelle dargelegt.

1. Integration in MARS

Ein Teil der Arbeit ist die Integration in das bestehende MARS System. Dies kann durch den modularen Aufbau denkbar einfach erfolgen. Dazu muss lediglich die Struktur gemäß des Klassendiagramms in Abbildung 4.1.1 angepasst werden. Es ist anzumerken, dass das Klassendiagramm auf die für Fahrradfahrer relevanten Teile beschränkt ist.

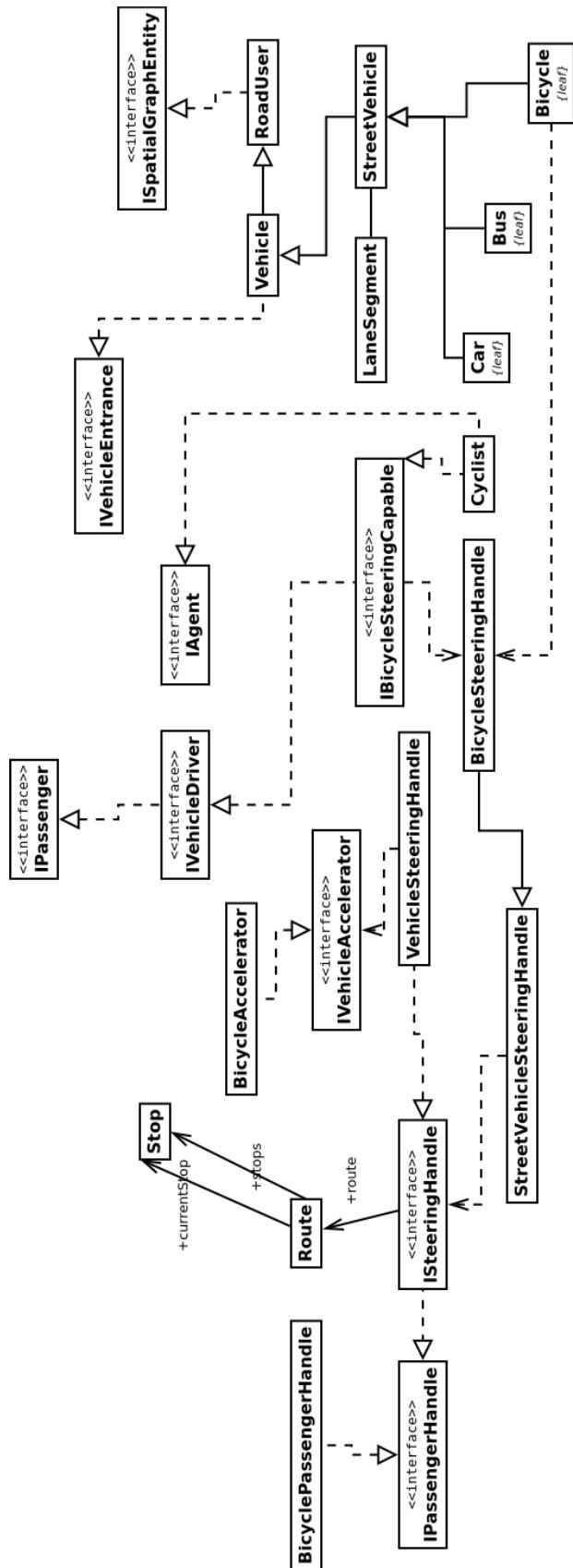


Abbildung 4.1.1.: Übersicht über die relevanten Klassen in MARS

Relevant bei der Integration ist die Aufteilung gemäß der obenstehenden Struktur: Der Radfahrer stellt die aktive Agenten-Komponente dar, welche ein Fahrrad benutzt. Das Fahrrad ist dabei ein StreetVehicle, damit ein Vehicle und damit ein RoadUser. Die Steuerung des Fahrrades erfolgt über das Steering-Konzept, welches mit dem Accelerator und der Environment kommuniziert.

Eine detaillierte Übersicht über die hier implementierten Klassen inklusive der Attribute und Methoden folgt in Abbildung 4.1.2. Die in blau hervorgehobenen Elemente sind ohne ihre Methoden dargestellt, da sie nicht Teil der eigenen Implementierung sind und den Umfang der Darstellung zu sehr vergrößern würden. Zudem ist anzumerken, dass das Diagramm stark reduziert wurde.

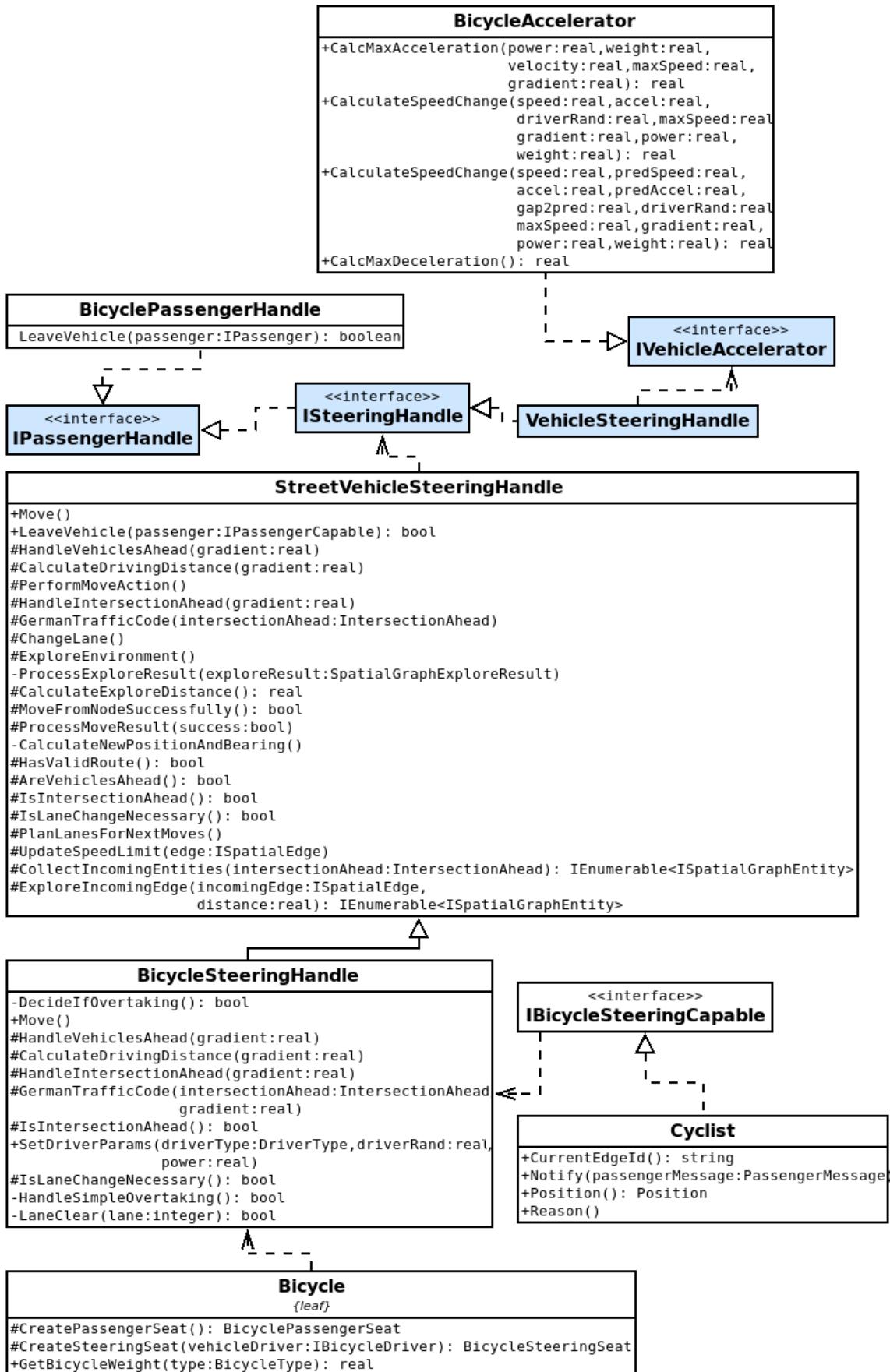


Abbildung 4.1.2.: Klassendiagramm: Übersicht der Hauptklassen

Abbildung 4.1.3 zeigt die zusätzlichen Hilfsklassen und Typendefinitionen.

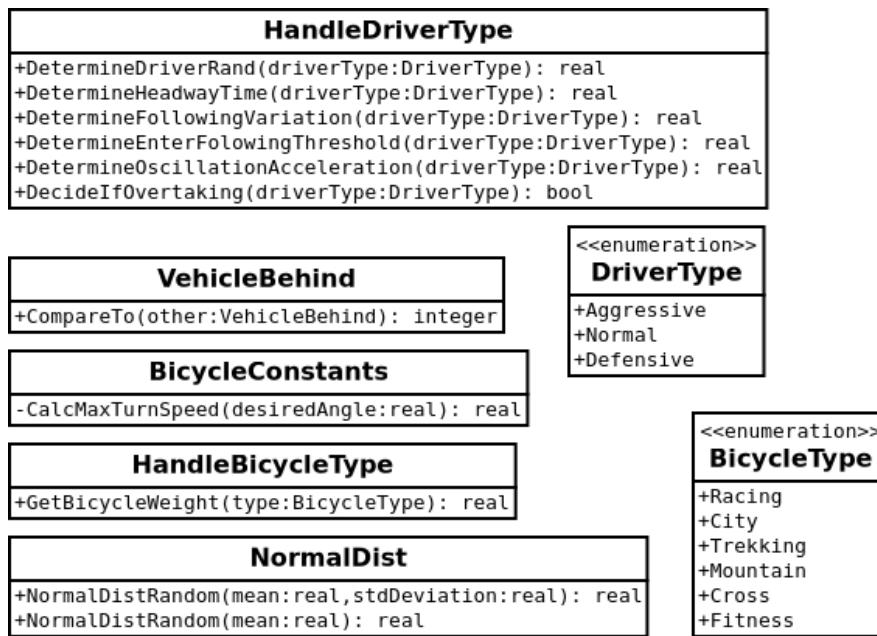


Abbildung 4.1.3.: Klassendiagramm: Übersicht der Hilfsklassen und Typendefinitionen

Wird ein Agent mit der obenstehenden Struktur der Environment und einem passenden Layer hinzugefügt, wird er automatisch von dieser und den Agenten darin berücksichtigt. Konkret bedeutet dies, dass ein Fahrradfahrer, der auf der Straße fährt, von Autos berücksichtigt wird und zugleich die Pkws selber berücksichtigt.

Durch diese einfache Struktur kann das System einfach um neue Agenten erweitert werden, ohne Änderungen an anderen Agenten vornehmen zu müssen.

2. Untersuchung des gewählten Vorgehensmodell von R. Wiedemann von 1999

In diesem Abschnitt wird das Wiedemann 99 Modell ausführlich beleuchtet. Zunächst wird für das bessere Verständnis der nachfolgenden Abschnitte unter 2.1 vorgestellt, wie der Ablauf mit dem Modell aussieht. In den anschließenden Abschnitten wird die konkrete Umsetzung betrachtet. Da es bereits zwei verschiedene Implementierungen des Modells gibt - die Originale von Rainer Wiedemann und SUMO - wird zunächst das Verhalten eines Fahrzeugs in unterschiedlichen Situationen in beiden Varianten miteinander verglichen und Unterschiede untersucht. Darauf folgt die Vorstellung der eigenen Umsetzung. Dies umfasst notwendige Veränderungen des Modells und gewählte Parameter. Nach der Vorstellung wird die eigene Implementierung mit dem originalen Wiedemann 99 Modell hinsichtlich des Verhaltens verglichen.

2.1. Ablauf des Modells

Um das Vorgehen beim Wiedemann 99 Verhaltensmodell zu verdeutlichen, wird nachfolgend in Abbildung 4.2.4 dargestellt, wie die Schranken im bestimmt werden.

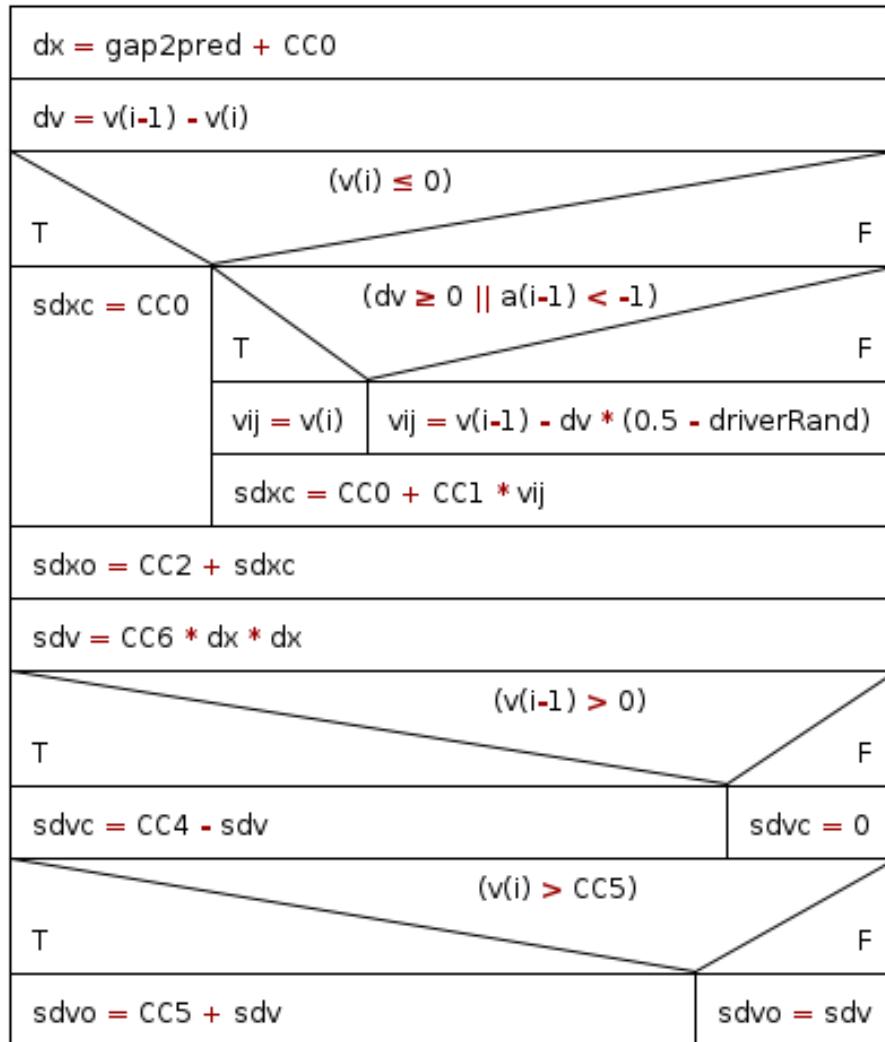


Abbildung 4.2.4.: Ablauf der Schrankenbestimmung im Wiedemann 99 Modell

Abbildung 4.2.5 zeigt wie die oben bestimmten Schranken in den verschiedenen Modi genutzt werden. Dabei sind die Modi wie folgt:

- Pink: Freies Fahren
- Grün: Aufschließen
- Blau: Folgen
- Gelb: Notfallprotokoll

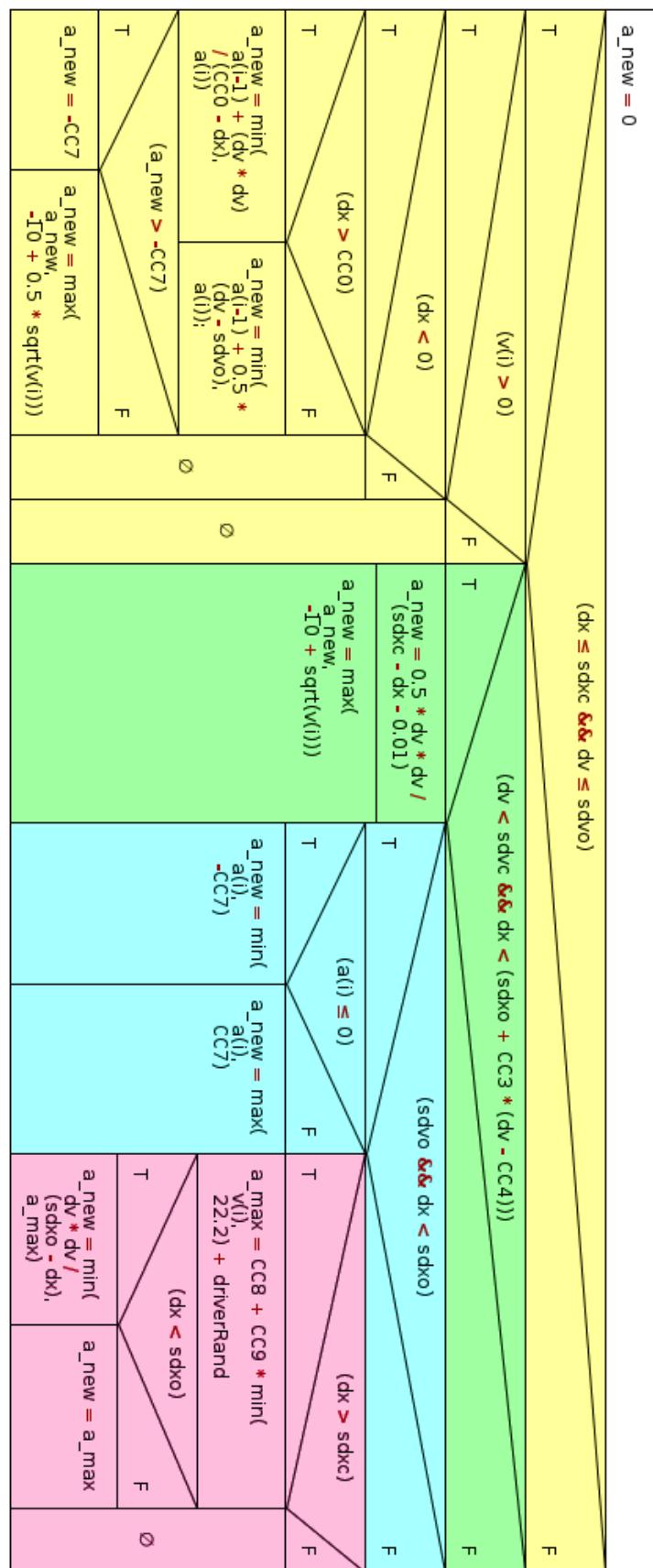


Abbildung 4.2.5.: Bestimmung der Beschleunigung im Wiedemann 99 Modell

Nachdem oben das Vorgehen bereits farblich hervorgehoben wurde, wird dies anhand eines praktischen Beispiels noch verdeutlicht. Dazu wird in Abbildung 4.2.6 die Beschleunigung eines Fahrzeuges bei einem vorausfahrenden anderen Fahrzeug gezeigt und die jeweiligen Entscheidungen jeweils hervorgehoben.

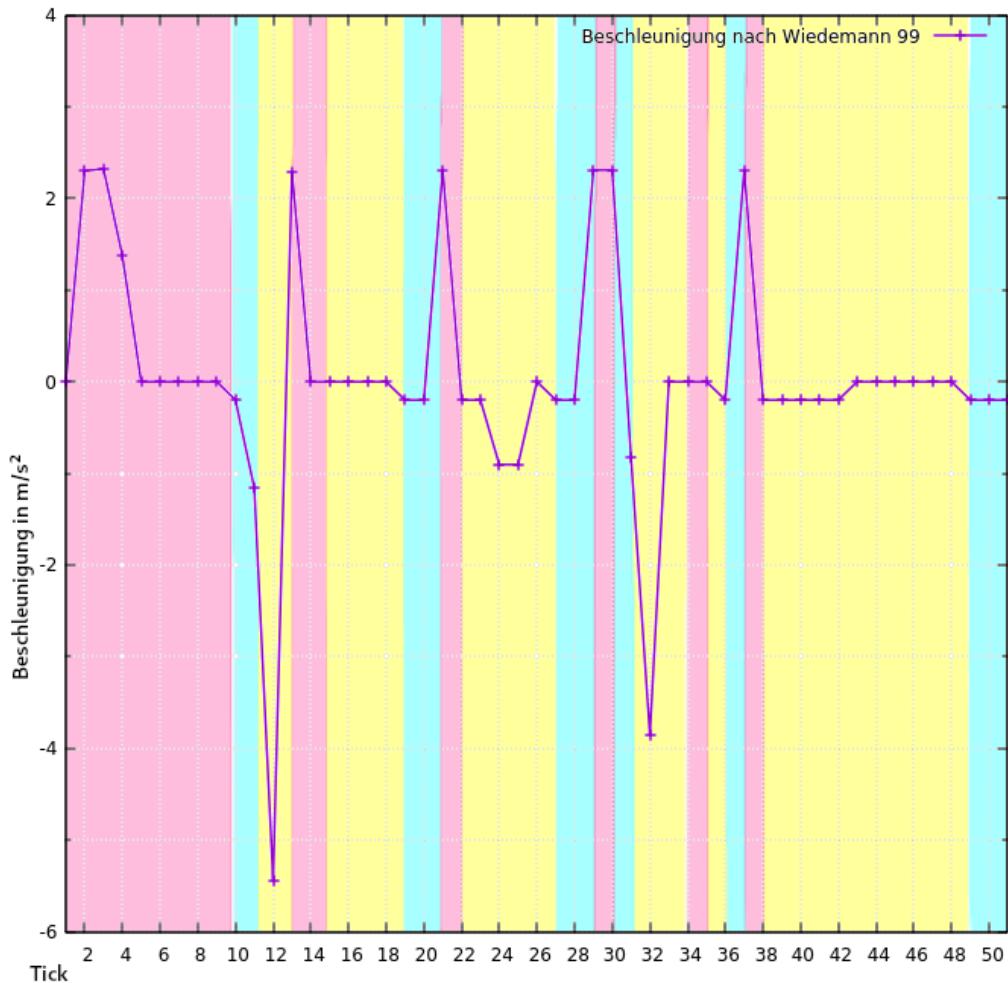


Abbildung 4.2.6.: Beschleunigung bei einem vorausfahrenden Fahrzeug mit farblicher Hervorhebung der Verhaltensentscheidungen

2.2. Gewählte Parameter

In Kapitel 3 Abschnitt 4 wurden bereits empfohlene Parameter für Fahrradfahrer gemäß [TA13] vorgestellt. Diese werden auch weitestgehend so genutzt und gegebenenfalls an den Typ des Fahrers angepasst. Einzig die Reaktionszeit des Fahrers CC1 von 0,5 Sekunden wird als zu niedrig empfunden und führt teilweise zu einer zu späten Reaktion auf Hindernisse. Entsprechend wird diese erhöht. Im Rahmen von Tests hat sich eine Zeit von 1,5 Sekunden als sinnvoll erwiesen.

2.3. Parameter für die Vergleichs-Simulationen

Auf Basis des Wiedemann Modells von 1999 wurde im Rahmen der mikroskopischen Verkehrssimulation Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) [Ins] vom Institut für Verkehrssystemtechnik vom DLR [Deub] ebenfalls eine Version mit einigen Anpassungen verfügbar gemacht. Diese und die hier entwickelte Version sollen mit der Ursprünglichen bezüglich des Verhaltens bei Beschleunigung, stehenden Fahrzeugen voraus und einem langsamer fahrenden Vordermann untersucht und verglichen werden. Dazu werden für diese Fälle Vergleichs-Simulationen durchgeführt. Dabei werden jeweils die gleichen Parameter für das Verhaltensmodell verwendet, um das Ergebnis reproduzier- und vergleichbar zu machen. Diese lauten wie folgt.

Radfahrer generell	
Effizienz	95 Prozent
Kraft	75 W
Gewicht (Fahrrad + Fahrer)	80 kg
DriverRand	0,5
Maximalgeschwindigkeit	6 m/s
Eigener Radfahrer	
Startgeschwindigkeit	0 m/s
Startbeschleunigung	0 m/s ²
Distanz zum Vordermann (wenn vorhanden)	30 m
Verhaltensmodell	
CC0	0,2 m
CC1	1,5 s
CC2	2 m
CC3	-20 s
CC4	-0,25 m/s
CC5	0,25 m/s
CC6	1
CC7	0,2 m/s ²
MaxAccelerationFactor	3
Andere Radfahrer: Stehend	
Geschwindigkeit	0 m/s
Beschleunigung	0 m/s ²
Andere Radfahrer: Fahrend	
Geschwindigkeit	2 m/s
Beschleunigung	1 m/s ²
Umgebungsvariablen	
Steigung	0 Grad

Tabelle 4.2.1.: Gewählte Parameter für den eigenen und vorausfahrende Radfahrer für die Vergleichstests

2.3.1. Notwendige Anpassung der Implementierungen

Sowohl in der originalen Implementierung als auch in SUMO wird zur Berechnung der maximal möglichen Beschleunigung die in 4.1 folgende Formel genutzt.

$$a_{max} = CC8 + CC9 * \min(v(i), 22, 2) + rand(i); \quad (4.1)$$

mit $CC8 = 1,8m/s^2$ und $CC9 = 0,01m/s^2$

Diese Formel sorgt allerdings dafür, dass bei Fehlen eines Vordermannes stets die maximal mögliche Beschleunigung angewendet wird. Diese wird jedoch nicht von der maximalen Geschwindigkeit beeinflusst, sondern versucht diese ungehindert zu erhöhen. Um diese zu verhindern, müsste, unter der Prämisse, dass diese Formel genutzt werden soll, die maximale Beschleunigung bei Erreichen der Maximalgeschwindigkeit auf $0 m/s^2$ gesetzt werden.

Entsprechend werden folgende Veränderungen an der originalen und der SUMO Implementierung ab Zeile 76 vorgenommen:

```

1 double amax = CC8 + CC9 * min(v(i), 22,2) + rand(i);
2 if (dx < sdxo) {
3     acceleration = min(dv * dv / (sdxo - dx), amax);
4 } else {
5     acceleration = amax;
6 }
7 if (v(i) + acceleration > maxv(i)) {
8     acceleration = maxv(i) - v(i);
9 }
```

Listing 4.1: Anpassungen der Berechnung der maximalen Geschwindigkeit am originalen Wiedemann 99 Modell und SUMO

2.4. Vergleich originale Implementierung und SUMO

Wie bereits erwähnt, existiert im Rahmen der Simulation of Urban Mobility [Ins] vom Institut für Verkehrssystemtechnik vom DLR [Deub] eine Version der Wiedemann 99 Implementierung mit einigen Anpassungen. Diese wird nachfolgend mit der originalen hinsichtlich Quellcode und Verhalten mit und ohne Vordermann verglichen.

Eine zeilenweise Auflistung der Unterschiede zwischen den beiden Implementierungen ist im Anhang unter 2 zu finden.

2.4.1. Verhalten im Vergleich

Um zu vergleichen, wie sich die beiden Implementierungen unterscheiden, werden Tests mit den unter 2.3 genannten Parametern und Anpassungen aus 2.3.1 durchgeführt.

Ohne Hindernis

Zunächst soll ein einzelner Fahrradfahrer auf seine Maximalgeschwindigkeit beschleunigen. Wie Abbildung 4.2.7 zeigt, erfolgt die Beschleunigung in beiden Implementierungen identisch.

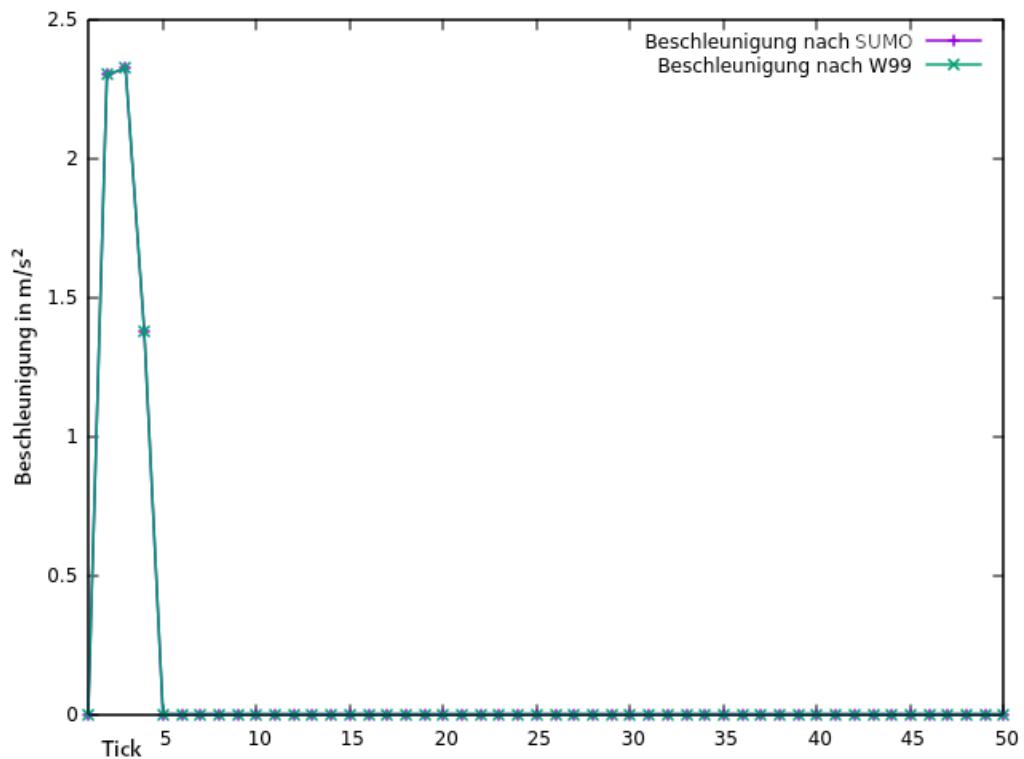


Abbildung 4.2.7.: Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99

Mit Hindernis

Bei dem Vorhandensein eines Vordermannes wird zwischen zwei Tests unterschieden. Zunächst wird von einem stehenden Fahrzeug in 30 Metern Entfernung ausgegangen. Diese Situation wird in Abbildung 4.2.8 dargestellt. Anschließend wird mit einem langsameren Vorausfahrenden getestet (Abbildung 4.2.9).

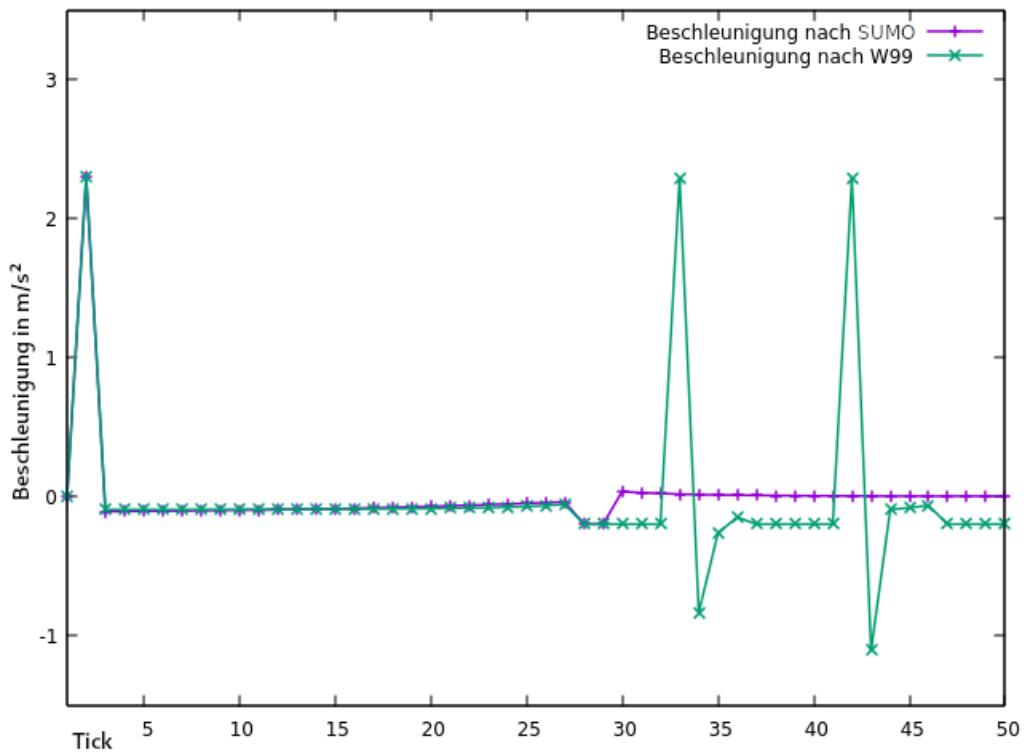


Abbildung 4.2.8.: Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99 bei einem stehenden Fahrzeug voraus

Es zeigt sich, dass der Fahrer in der originalen Implementierung wesentlich stärker beschleunigt beziehungsweise verzögert als in SUMO. Dadurch entsteht ein unruhigeres Fahrverhalten.

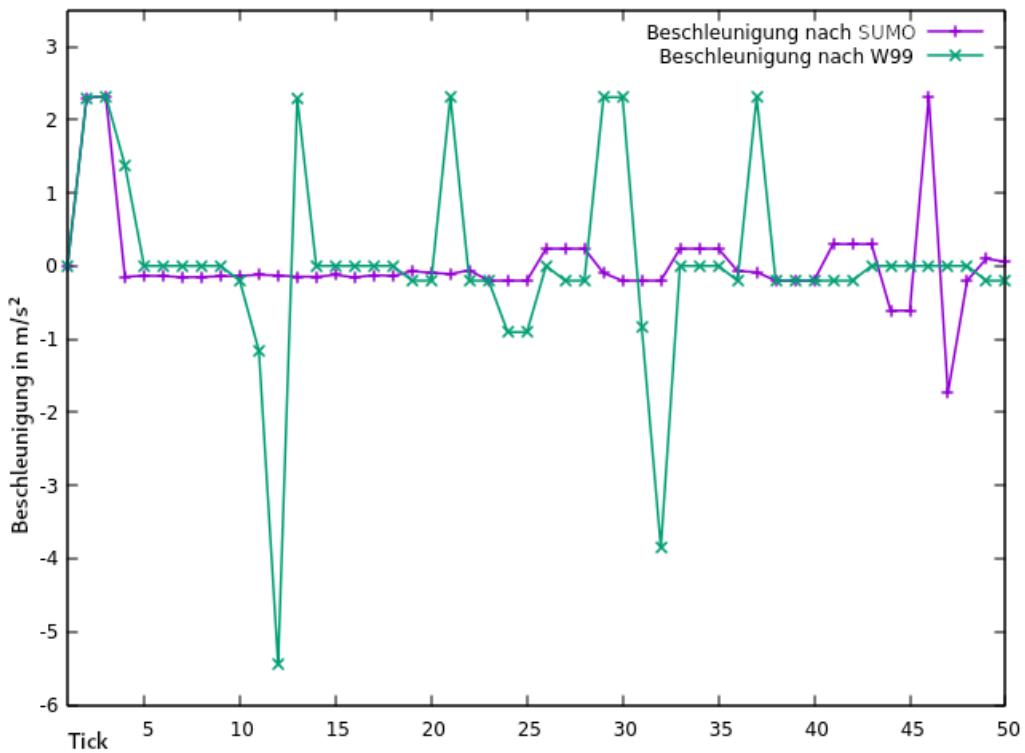


Abbildung 4.2.9.: Vergleich der Beschleunigung mit SUMO und dem originalen Wiedemann 99 bei einem Vorausfahrenden

Bewegt sich der Vordermann, fallen diese Spitzen noch stärker ins Gewicht. So wirkt das Verhalten in der originalen Variante sehr unruhig mit sehr starken Verzögerungen, teilweise gefolgt von starken Beschleunigungen. Hier wird das pendelnde Verhalten, welches in Kapitel 3 Abschnitt 3 genannt wurde, deutlich. Bei SUMO verhält sich der Fahrer nur zum Ende hin unruhig und hält seine Geschwindigkeit zwischen durch relativ stabil.

2.5. Vergleich originale und aktuelle Implementierung

In diesem Abschnitt wird die originale Wiedemann 99 Implementierung mit der aktuellen verglichen. Dabei werden Unterschiede jeweils in Rot hervorgehoben und erläutert. Es ist anzumerken, dass es sich bei $i - 1$ um den Vorausfahrenden und bei i um das eigene, folgende Fahrzeug handelt.

	Wiedemann 99 Notizen	Aktuelle Implementierung
1	<code>double dx = x(i-1) - x(i) - length(i-1);</code>	<code>double dx = gap2pred + CC0;</code>
2	<code>double dv = v(i-1) - v(i);</code>	<code>double dv = v(i-1) - v(i);</code>
3	<code>double sdxc = CC0;</code>	<code>double sdxc = CC0</code>
4	<code>if (v(i-1) > 0)</code>	<code>if (v(i-1) > 0) {</code>
5	<code> double VIJ;</code>	
6	<code> if (dv >= 0 a(i-1) < -1) {</code>	
7	<code> VIJ = v(i);</code>	
8	<code> } else {</code>	
9	<code> VIJ = v(i-1) - dv * (0,5 - rand(i))</code>	
10	<code> }</code>	
11	<code> sdxc += CC1 * VIJ;</code>	<code> sdxc += CC1 * v(i);</code>
12	<code>}</code>	<code>}</code>

Tabelle 4.2.2.: Teil I - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung

In diesem Codeabschnitt unterschiedet sich die Berechnung vom Abstand dx in Zeile 1. Bei der originalen Implementierung erfolgt diese auf Basis der Position des jeweiligen Fahrzeugs. Hier wird direkt die Größe der Lücke genutzt und um die StandstillDistance vergrößert. Dies erfolgt zum einen aufgrund der Verfügbarkeit im Rahmen der aktuellen MARS Implementierung und zum anderen entspricht dies der in SUMO genutzten Variante. Des Weiteren ist die untere Schranke SDX_c in Zeilen 5 bis 11 verschieden. Die linke Variante bestimmt diesen Grenzwert auf zwei verschiedene Arten:

- Der Vordermann ist gleich schnell beziehungsweise schneller oder verzögert stärker als -1 → die Schranke setzt sich aus der StandstillDistance, der HeadwayTime und der eigenen Geschwindigkeit zusammen
- Treffen die Bedingungen nicht zu → die Geschwindigkeit des Vordermannes wird um die Geschwindigkeitsdifferenz multipliziert mit $x \in [-0,5; 0,5]$ verringert und mit der StandstillDistance und der HeadwayTime addiert beziehungsweise multipliziert

Rechts hingegen hängt die Schranke, bei deren Unterschreitung ein Bremsvorgang eingeleitet wird, ausschließlich von der eigenen Geschwindigkeit, CC0 und CC1 ab. Dies erfolgt, da es realistischer erscheint, auf Basis der eigenen Geschwindigkeit abzuschätzen, ob verzögert werden sollte. Zudem zeigt Abbildung 4.2.10, dass das Beschleunigungsverhalten mit der angepassten SDX_c Schranke aus weniger Beschleunigungen und geringeren Verzögerungen besteht als mit der originalen.

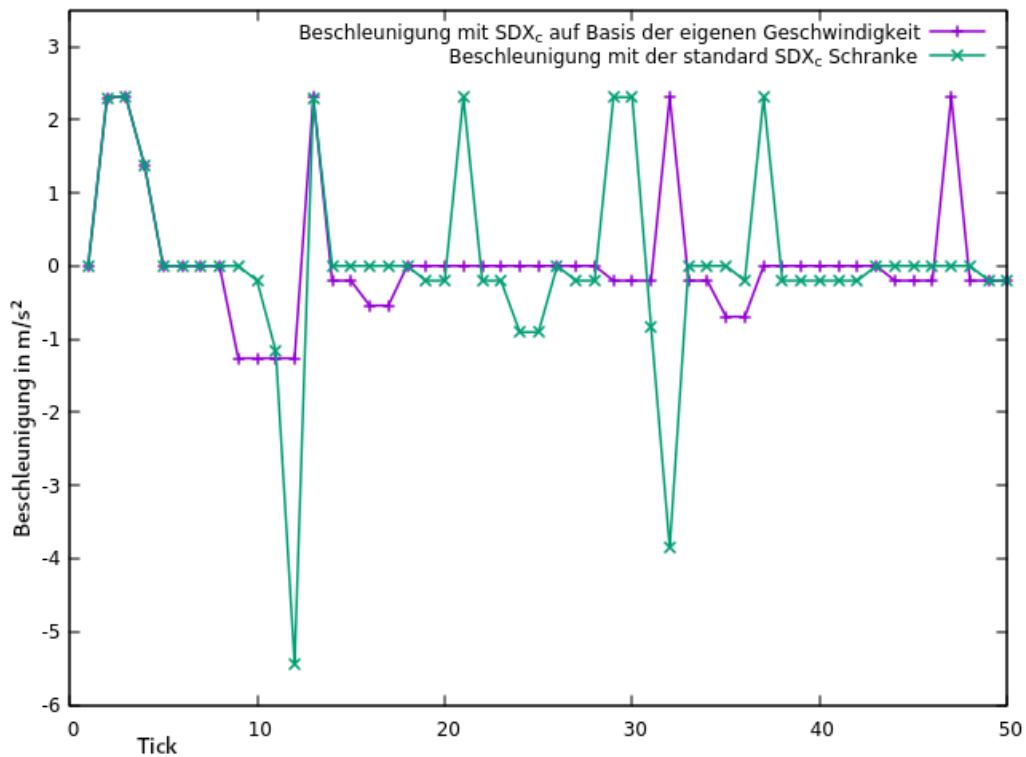


Abbildung 4.2.10.: Vergleich der Auswirkung der unterschiedlichen Bestimmung von SDX_c

	Wiedemann 99 Notizen	Aktuelle Implementierung
13	double sdxo = sdxc + CC2;	double sdxo = sdxc + CC2;
14	double sdv = CC6 * dx * dx;	double sdv = CC6 * dx * dx;
15	double sdvc;	double sdvc;
16	double sdvo;	double sdvo = sdv;
17	if (v(i-1) > 0) {	if (v(i-1) > 0) {
18	sdvc = CC4 - sdv;	sdvc = CC4 - sdv;
19	} else {	} else {
20	sdvc = 0;	sdvc = 0;
21	}	}
22	if (v(i) > CC5) {	if (v(i) > CC5) {
23	sdvo = sdv + CC5;	sdvo += CC5;
24	} else {	} else {
25	sdvo = sdv;	sdvo = sdv;
26	}	}
27	double acceleration = 0;	double acceleration = 0;
28	if (dv <= sdvo && dx <= sdxc) {	if (dv <= sdvo && dx <= sdxc) {
29	if (v(i) > 0) {	if (v(i) > 0) {
30	if (dv < 0) {	if (dv < 0) {

<pre> 31 if (dx > CC0) { 32 acceleration = min(a(i-1) + (dv * 33 dv) / (CC0 - dx), a(i)); 34 } else { 35 acceleration = min(a(i-1) + 0,5 * 36 (dv - sdvo), a(i)); 37 } 38 if (acceleration > -CC7) { 39 acceleration = (-CC7); 40 } else { 41 acceleration = max(acceleration, 42 -10 + 0,5 * sqrt(v(i))); 43 } 44 } 45 } else { 46 acceleration = 0; 47 } 48 } else if (dv < sdvc && dx < (sdxo + CC3 49 * (dv - CC4))) { 50 acceleration = 0,5 * dv * dv / (sdxc - dx - 0,01); 51 acceleration = max(acceleration, -10 + sqrt(v(i))); </pre>	<pre> if (dx > CC0) { acceleration = min(a(i-1) + (dv * dv) / (CC0 - dx), a(i)); } else { acceleration = min(a(i-1) + 0,5 * (dv - sdvo), a(i)); } if (acceleration > -CC7) { acceleration = -CC7; } else { acceleration = max(acceleration, maxDecelFactor + 0,5 * sqrt(v(i))); } } } else if (dv < sdvc && dx < (sdxo + CC3 * (dv - CC4))) { acceleration = 0,5 * dv * dv / (sdxc - dx - 0,1); acceleration = max(acceleration, max- DecelFactor + sqrt(v(i))); } </pre>
--	---

Tabelle 4.2.3.: Teil II - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung

Auch in diesem Abschnitt gibt es zwei Unterschiede zwischen den beiden Implementierungen. Zunächst wird in Zeile 39 und Zeile 50 der Wert von -10 durch einen geeigneten MaxDecelFactor ersetzt. Die Wahl dieses Faktors wird in Abschnitt 4.1 erläutert. Zudem wird in Zeile 41 bis 43 eine Überprüfung eingefügt, ob die ermittelte Verzögerung dazu führt, dass die neue Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs geringer ausfällt als die des Vorausfahrenden. Dies kann zu einer zu starken Verzögerung führen. Deshalb wird in diesem Fall die Verzögerung auf *dv* verringert um die Haltung des Fahrers (DriverRand).

	Wiedemann 99 Notizen	Aktuelle Implementierung
51	<code>} else if (dv < sdvo && dx < sdxo) {</code>	<code>} else if (dv < sdvo && dx < sdxo) {</code>
52	<code> if (a(i) <= 0) {</code>	<code> if (a(i) <= 0) {</code>
53		<code> if (v(i) + a(i) < v(i-1)) {</code>
54		<code> acceleration = min(dv, -CC7);</code>
55		<code> } else {</code>
56	<code> acceleration = min(a(i), -CC7);</code>	<code> acceleration = min(a(i), -CC7);</code>
57		<code> }</code>
58		<code> if (v(i) + acceleration < 0) {</code>
59		<code> acceleration = -v(i);</code>
60		<code> }</code>
61	<code>} else {</code>	<code>} else {</code>
62	<code> acceleration = max(a(i), CC7);</code>	<code> acceleration = max(a(i), CC7);</code>
63	<code> if (length(i) >= 6,5) {</code>	
64	<code> acceleration = 0,5 * acceleration;</code>	
65	<code> }</code>	
66	<code> acceleration = min(acceleration, W(i)</code>	
67	<code> - v(i));</code>	<code>}</code>

Tabelle 4.2.4.: Teil III - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung

Zunächst wird in diesem Codeabschnitt in Zeile 53 in der eigenen Implementierung erneut eine Schranke eingeführt, welche überprüft, ob die neue Geschwindigkeit des Folgenden kleiner ausfällt als die des Vorausfahrenden. In diesem Fall wird nicht das Minimum aus der aktuellen Beschleunigung und $CC7 * -1$ sondern aus der Geschwindigkeitsdifferenz und $CC7 * -1$. Zudem soll mit den Zeilen 58 bis 60 verhindert werden, dass als Ergebnis eine negative Geschwindigkeit, also der Fahrradfahrer rückwärts fahren würde, auftreten kann. In diesem Fall wird in diesem Fall maximal mögliche verzögert, sodass die neue Geschwindigkeit 0 m/s beträgt.

Die Zeilen 63 bis 66 werden entfernt, da ein normales Fahrrad voraussichtlich niemals eine Länge größer gleich 6,5 Meter erreicht und der Wert $W(i)$ nicht erklärt und somit nicht verwendbar ist.

	Wiedemann 99 Notizen	Aktuelle Implementierung
68	<pre>} else { if (dx > sdxc) { double amax = CC8 + CC9 * min(v(i), 22,2) + rand(i); if (dx < sdxo) { acceleration = min(dv * dv / (sdxo - dx), amax); } else { acceleration = amax; } } else { acceleration = 0; } }</pre>	<pre>} else { if (dx > sdxc) { double amax = calcAMax(F(i), m(i), v(i), maxv(i), gradient); if (dx < sdxo) { acceleration = min(dv * dv / (sdxo - dx), amax); } else { acceleration = amax; } } }</pre>

Tabelle 4.2.5.: Teil IV - Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der aktuellen Implementierung

Der letzte Unterschied zwischen den beiden Implementierungen ist in Zeile 70 bei der maximal möglichen Beschleunigung zu finden. Das Problem mit der Standardvariante ist unter 2.3.1 zu finden. Die verwendete Formel, die sich hinter $calcAMax(F(i), m(i), v(i), maxv(i), gradient)$ verbirgt, wird in Kapitel 3 Abschnitt 5 erläutert.

2.5.1. Verhalten im Vergleich

Wie bereits bei dem Vergleich der originalen und der SUMO Implementierung, werden auch hier Tests mit den unter 2.3 genannten Parametern und Anpassungen der originalen Implementierung (siehe 2.3.1) mit und ohne einem voraus stehenden beziehungsweise fahrenden Fahrzeugs durchgeführt.

Ohne Hindernis

Zunächst wird das Verhalten ohne Vordermann geprüft.

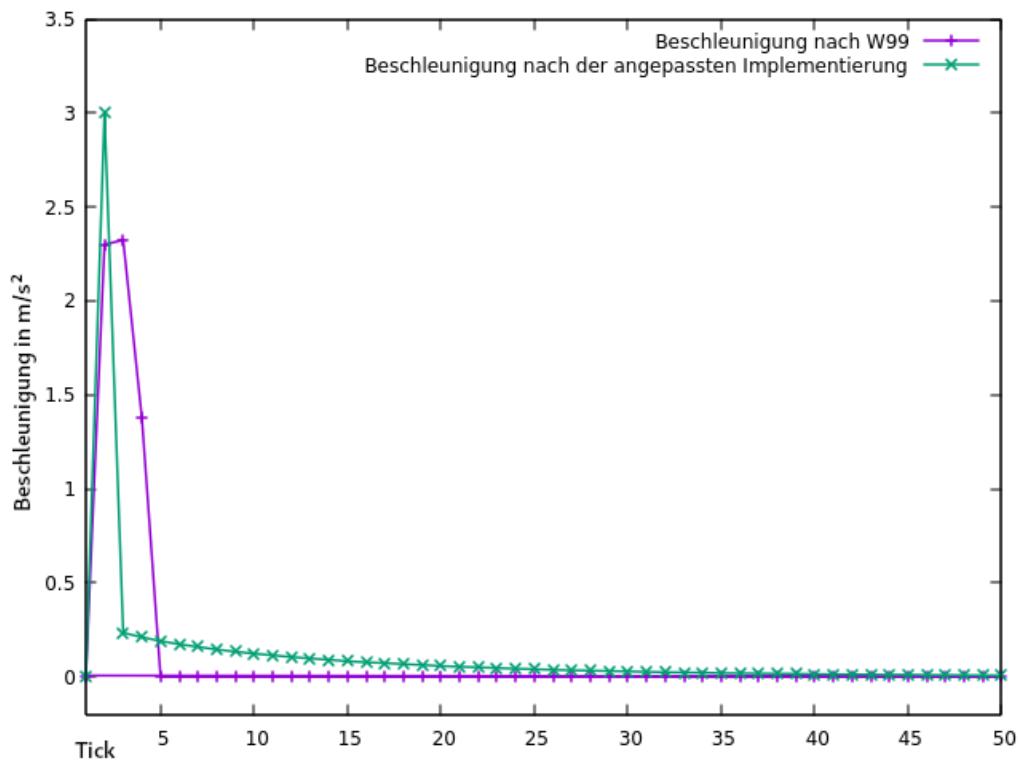


Abbildung 4.2.11.: Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung

Abbildung 4.2.11 zeigt, dass die initiale Beschleunigung bei der eigenen Implementierung zwar höher ausfällt als bei der originale Variante aber diese sich anschließend langsamer 0 annähert. Dies erscheint bei nicht motorisierten Fahrzeugen realistischer.

Mit Hindernis

Die nachfolgenden zwei Tests finden mit einem Vordermann statt. Im ersten Test steht der Vordermann (Abbildung 4.2.12) und im zweiten fährt er langsamer voraus (Grafik 4.2.13).

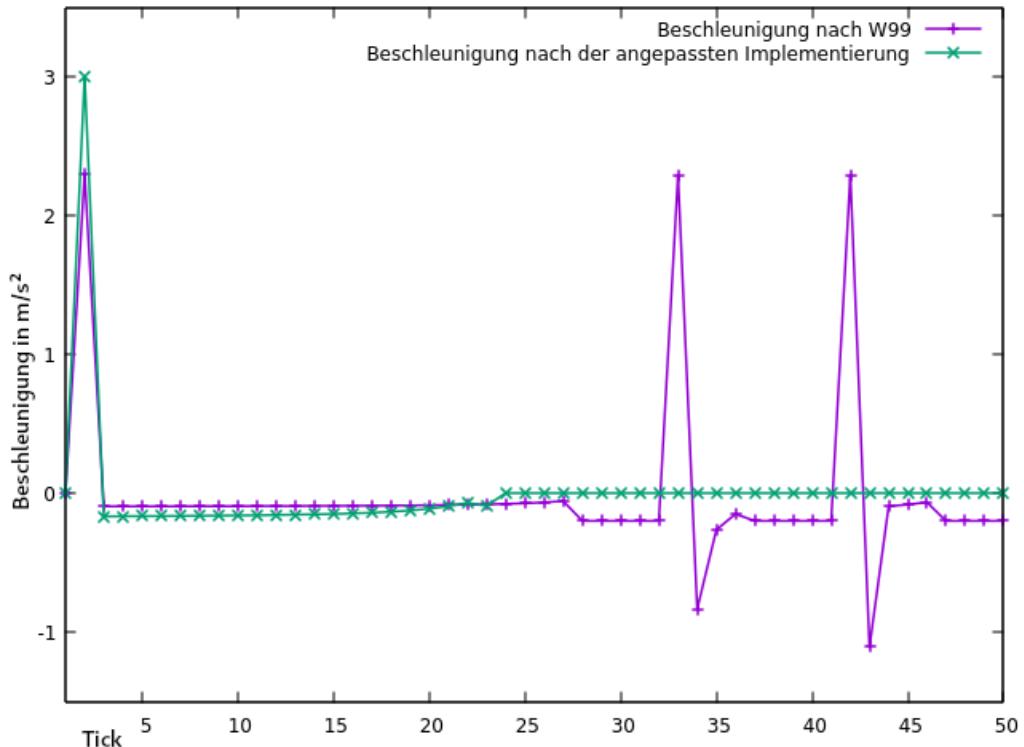


Abbildung 4.2.12.: Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung bei einem stehenden Fahrzeug voraus

Der erste Test zeigt, dass das Verhalten in der aktuellen Implementierung im Vergleich zur originalen sehr kontinuierlich ausfällt. Abseits von der starken Initialbeschleunigung erfolgen nur minimale Verzögerungen beziehungsweise Beschleunigungen.

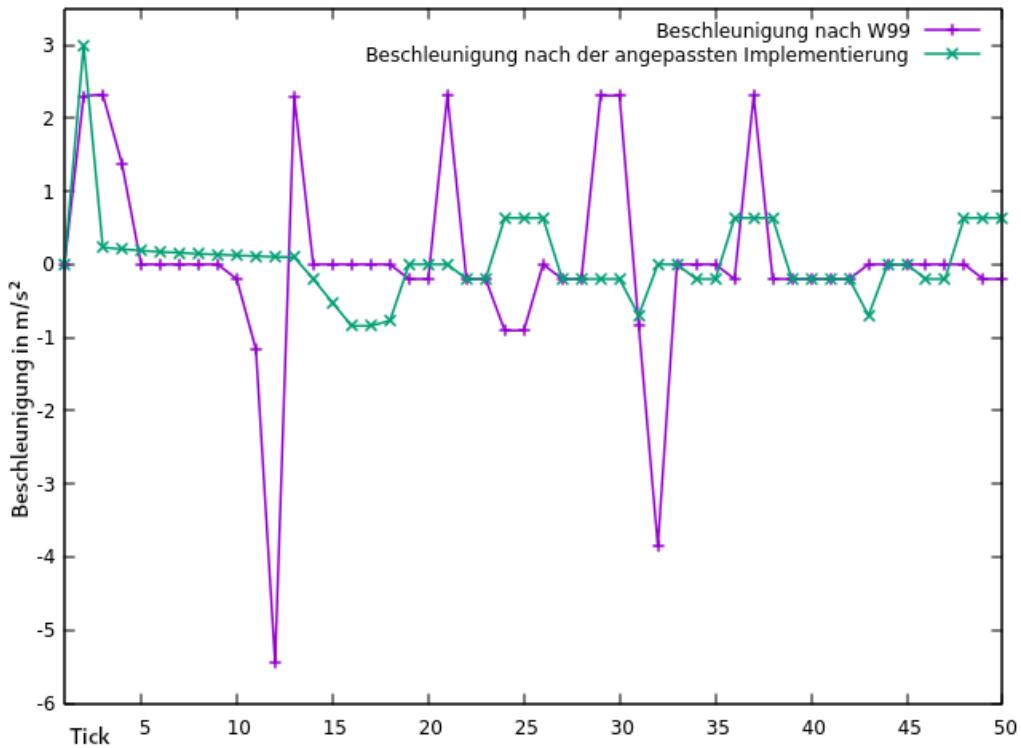


Abbildung 4.2.13.: Vergleich der Beschleunigung mit dem originalen Wiedemann 99 und der aktuellen Implementierung bei einem Vorausfahrenden

Auch bei einem sich bewegenden Vordermann erfolgen etwas weniger aber vor allem weit weniger starke Veränderungen der Beschleunigung. Dadurch wirkt das Verhalten harmonischer aber auch realistischer, da der Radfahrer bei sehr starker, pendelnder Verzögerung und Beschleunigung stets sehr viel Energie aufwenden muss.

3. Datenmodelle

In diesem Abschnitt wird die konkrete Umsetzung der Eigenschaften von Fahrradfahrern und Fahrrädern und deren potenzielle Auswirkung vorgestellt.

3.1. Fahrradfahrer

Zuerst werden die Fahrradfahrer näher betrachtet.

Position

Die Position des Radfahrers und damit des Fahrrades, bestehend aus Latitude und Longitude, entspricht initial der Startposition (sofern angegeben) und wird laufend gemäß der ermittelten Geschwindigkeit angepasst.

Fahrertyp DriverType

Im Rahmen des Modells werden, wie im Konzept 3 unter 1.1.1 vorgestellt, drei verschiedene Fahrertypen modelliert: Aggressiv, normal und defensiv. Dieser Typ wirkt sich auf verschiedene andere Bereiche des Fahrradfahrers aus. So werden das Verhaltensmodell und die Neigung zu überholen beeinflusst. Eine Übersicht der Beeinflussung auf das Verhaltensmodell ist unter 3.3 zu finden.

OvertakingActivated

Mittels des Attributs `OvertakingActivated` kann das Überholen für den Agenten komplett unterbunden werden. Sollte es erlaubt sein, wird auf Basis des Typen des Fahrrers in jedem Einzelfall entschieden, ob überholt wird oder nicht.

Layer

Die Umgebung, in welcher die Agenten existieren, ist in unterschiedliche Ebenen, sogenannte `Layer`, unterteilt. Jeder Agent fährt dabei auf einem festgelegten `Layer` und agiert mit den Agenten auf diesem `Layer`. Beispiele für diese `Layer` sind der `CarLayer` und der `BicycleLayer`. Auf Ersterem Fahren motorisierte Agenten wie Autos, auf letzterem nur Fahrräder. Je nachdem auf welchem `Layer` der Fahrrad-Agent fährt, kann er andere Wege nutzen und wie oben genannt, mit anderen Verkehrsteilnehmern interagieren.

Power

Da ein Fahrradfahrer sein Rad mit seiner eigenen Kraft (`Power`) antreiben muss, beeinflusst diese die maximal mögliche Beschleunigung. Je geringer die Kraft des Radlers ist, desto weniger Beschleunigung ist für ihn möglich.

DriverRand

Wie in Zeile 9 und Zeile 70 der originalen Implementierung beziehungsweise Zeile 42 des hier genutzten Codes dargestellt (in beidem als `rand(i)` angegeben), wird ein fahrerabhängiger Zufallsparameter `driverRand` verwendet. Dieser nimmt in bestimmten Situationen Einfluss auf das Verhalten des Fahrers. So fließt er im Original zum einen in die Schranke SDX_c ein, sofern das vorausfahrende Fahrzeug beschleunigt oder das folgende Vehikel sehr viel schneller ist und Δv damit negativ (Zeile 9). Zum anderen geht der Parameter in die Berechnung der maximal möglichen Beschleunigung ein (Zeile 70). Dabei entsprechen niedrigere Werte einem vorsichtigeren Fahrer. Nachfolgend wird die Bedeutung von dem Wert verdeutlicht. Dabei werden jeweils die folgenden Parameter verwendet: $v(i) = 4$, $v(i - 1) = 3$ und $dv = -1$. Der zufallsabhängige Parameter beträgt zunächst 1 und im zweiten Durchlauf jeweils 0,2.

In Zeile 9 wird der Parameter dazu genutzt, den Sicherheitsabstand in Bezug auf die Ge-

schwindigkeit des Vorausfahrenden mit dem eigenen Sicherheitsbedürfnis zu verbinden.

$$\begin{aligned} VIJ &= v(i-1) - dv * (0,5 - rand(i)) = 3 - -1 * (0,5 - 1) = 2,5 \\ sdx_c &= CC0 + CC1 * VIJ = 0,2 + 1,5 * 2,5 = 3,95 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} VIJ &= v(i-1) - dv * (0,5 - rand(i)) = 3 - -1 * (0,5 - 0,2) = 3,3 \\ sdx_c &= CC0 + CC1 * VIJ = 0,2 + 1,5 * 3,3 = 5,15 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Es zeigt sich, dass ein hoher Wert für `DriverRand / rand(i)` zu einer niedrigeren Schranke von sDX_c führt. Dies bedeutet, dass erst bei einer sehr geringen Nähe zum Vorausfahrenden eine Verringerung der Geschwindigkeit erfolgt.

Zeile 70 ermittelt die maximal mögliche Beschleunigung auf Basis der aktuellen Geschwindigkeit und erhöht diese zusätzlich um den Zufallsparameter.

$$a_{max} = CC8 + CC9 * min(v(i), 22, 2) + rand(i) = CC8 + CC9 * min(4, 22, 2) + 1 = 2,84 \quad (4.4)$$

$$a_{max} = CC8 + CC9 * min(v(i), 22, 2) + rand(i) = CC8 + CC9 * min(4, 22, 2) + 0,2 = 2,04 \quad (4.5)$$

Naheliegenderweise erhöht sich die maximale Beschleunigung um diesen Wert.

In der eigenen Wiedemann 99 Implementierung kommt dieser Parameter lediglich in Zeile 42 bei der Reaktion auf einen nahen, langsameren Vordermann sofern die in den Zeilen 29 bis 40 bestimmte Verzögerung zu hoch ausfällt und das folgende Fahrzeug somit zu langsam werden würde. In diesem Fall entspricht ein niedrigerer Wert einem aggressiveren Fahrer. Hier werden wieder die Parameter von oben verwendet: $v(i) = 4$, $v(i-1) = 3$, $dv = -1$, $rand_{groesser}(i) = 1$ und $rand_{kleiner}(i) = 0,2$.

$$\begin{aligned} a &= dv - (0,5 * rand(i)) = -1 - (0,5 * 1) = -1,5 \\ a &= dv - rand(i) = -1 - 1 = -2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} a &= dv - (0,5 * rand(i)) = -1 - (0,5 * 0,2) = -1,1 \\ a &= dv - rand(i) = -1 - 0,2 = -1,2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ein großer Wert von `rand(i)` sorgt also für eine stärkere, wenn auch unnötig starke Verzögerung des folgenden Fahrzeugs. Der konkrete Wert von `DriverRand` wird durch den Typ des Fahrers innerhalb eines bestimmten Bereiches zufällig ermittelt. Nachfolgende Tabelle 4.3.6 zeigt für jeden Fahrertypen den Wertebereich des Parameters.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	0,66	1
Normal	0,33	0,66
Defensiv	0	0,33

Tabelle 4.3.6.: Übersicht der möglichen Werte von `DriverRand`

Der Fahrradfahrer stellt dabei, wie in der Realität, den Agenten dar und nutzt lediglich das Fahrrad zum Fahren.

3.2. Fahrräder

Hier folgt die Vorstellung der Attribute der Fahrräder. Wie bereits aus dem Klassendiagramm in Abbildung 4.1.1 hervorgeht, ist das Fahrrad, wie auch andere die Straße nutzende Fahrzeuge, vom Typ `StreetVehicle` und damit ein `Vehicle` und `RoadUser`. Dadurch wird das Fahrrad von der Anwendung erkannt und kann für Simulationen mit anderen Agenten genutzt werden. Zudem erbt es einige Eigenschaften, von welchen nicht alle genutzt werden und Methoden. Die Methoden realisieren zum Beispiel das Ein- und Aussteigen in das Fahrzeug durch Fahrer und Beifahrer (von `Vehicle`) und das Ermitteln der neuen Position nach einem Simulationsschritt (von `RoadUser`).

Nachfolgend werden die Attribute kurz vorgestellt.

Verkehrsordnung `TrafficCode`

Über den `TrafficCode` kann gesteuert werden, welche Straßenverkehrsordnung Anwendung findet. Dies beeinflusst beispielsweise, ob es sich um Links- oder Rechtsverkehr handelt. Hier ist aktuell nur die deutsche Verkehrsordnung umgesetzt.

Wird von `Vehicle` vererbt.

Fahrradtyp `BicycleType`

Wie bereits in Kapitel 3 Abschnitt 1.2.1 beschrieben, werden sieben verschiedene Fahrradtypen umgesetzt: Rennrad, Stadtrad, Trekkingrad, Mountainbike, Cross-Rad, Fitnessrad und Lastenrad. Diese Typen wirken sich aktuell lediglich auf das Gewicht des Rades aus.

E-Bike-spezifische Parameter

Bei jedem Fahrradtypen kann es sich um ein E-Bike handeln (`IsEBike`). Zusätzlich verfügen E-Bikes über zusätzliche Eigenschaften: Die Kapazität der Batterie `BatteryCapacity` in Wattstunden `Wh`, die Reichweite `Range` in Kilometer `km`, die nötige Zeit in Minuten zum Vollladen des Akkus `ChargingTime` und den aktuellen Ladestand der Batterie `BatteryLevel` in Prozent als Gleitzahl. Die Auswirkung dieser Parameter ist noch unklar, da die Integration von E-Bikes nicht umgesetzt wurde. Deshalb sind diese Parameter, bis auf `IsEBike`, optional.

Geschwindigkeit Velocity

Die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrrades wird in der `Velocity` abgebildet. Initial lässt sich hiermit die Geschwindigkeit des Fahrrades und damit des Fahrrad-Agenten zu Beginn der Simulation steuern. Anschließend werden auf Basis dieser alle relevanten Entscheidungen während des Fahrens getroffen. Beispiele dafür sind die Reaktionen auf Kreuzungen und andere Verkehrsteilnehmer. Ebenfalls wird die Geschwindigkeit nach jedem Fahrtsschritt angepasst.

Wird von `RoadUser` vererbt.

Spur auf der Fahrbahn LaneOnCurrentEdge

Für ein realistischeres Fahrverhalten und um das Überholen und Wechseln von Spuren zu realisieren, ist es relevant zu wissen, auf welcher Spur der aktuellen Straße sich der Fahrradfahrer aktuell befindet.

Wird von `RoadUser` vererbt.

Maximale Geschwindigkeit MaxSpeed

Im Rahmen des Wiedemann 99 Modells strebt ein Verkehrsteilnehmer ohne Vordermann beziehungsweise andere Hindernisse an, seine Geschwindigkeit bis zur Maximalgeschwindigkeit zu erhöhen. Um dies zu realisieren, muss diese für jeden Fahrrad-Agenten im `MaxSpeed` abgebildet werden.

Wird von `Vehicle` vererbt.

Maße

Wie auch in der Realität besitzt ein Fahrrad eine Breite `Width`, Länge `Length` und Höhe `Height`. Dabei ist die Höhe eines Fahrrades beim Fahren weitestgehend irrelevant, da diese in der Regel unterhalb der Höhe von beispielsweise Unterführungen liegt. Die Länge und Breite jedoch sind an unterschiedlichen Stellen von Bedeutung. Die Breite ist für das Überholen innerhalb derselben Spur, zum Beispiel auf einem Radweg, ein relevanter Faktor. Die Länge wird innerhalb des Wiedemann 99 Modells zwar nicht berücksichtigt allerdings nutzen andere Verkehrsteilnehmer wie Pkws für ihre Entscheidungen die Länge des vorausfahrenden Fahrzeuges.

`Length`, `Height` und `Width` werden von `RoadUser` vererbt.

Gewicht

Das Gewicht des Rades ist, wie auch das Gewicht des Fahrers, für die Ermittlung der maximal möglichen Beschleunigung relevant. Je höher das Gesamtgewicht ist, desto weniger Beschleunigung ist möglich.

Aktuelle Kante CurrentEdge

Innerhalb der Umgebung fahren Agenten auf ihrem Layer auf sogenannten Kanten. Diese stellen im CarLayer Straßen und im BicycleLayer Radwege und andere, für Fahrräder geeignete, Wege als Kanten dar. Jede dieser Kanten hat eine ID und eine fixe Länge. Wird von RoadUser vererbt.

PassengerCapacity

Die Kapazität des Fahrzeugs PassengerCapacity ist für normale Fahrräder nicht von Bedeutung, da lediglich für einen Fahrer Platz ist. Sollten Tandems implementiert werden, kann die Kapazität von Relevanz sein.

Wird von Vehicle vererbt.

Acceleration

Die Beschleunigung wird zwar nicht explizit selbst definiert aber in jedem Simulationsschritt anhand des Wiedemann 99 Modells ermittelt.

Wird von RoadUser vererbt.

Mass

Die Masse des Fahrzeuges wird auf Basis des Gewichts des Fahrers, des Fahrrades und der Ladung bestimmt.

Wird von RoadUser vererbt.

PositionOnCurrentEdge

Die Position auf der aktuellen Kante wird gemäß der aktuellen Geschwindigkeit und der fixen Länge der Kante erfasst. Dadurch kann das Wechseln von Kanten an beispielsweise Kreuzungen erfasst werden. Zudem lässt sich auf Basis der Position erkennen, wie weit Hindernisse entfernt sind.

Wird von RoadUser vererbt.

MaxAcceleration und MaxDeceleration

Bei anderen Verkehrsmitteln, wie Pkws, können die maximale Beschleunigung und Verzögerung angegeben und vom Verhaltensmodell interpretiert werden. Beim Fahrrad und beim Wiedemann 99 Modell erfolgt dies nicht.

Wird von Vehicle vererbt.

Passengers

Kann ein Vehikel Beifahrer aufnehmen, werden diese in der Passengers-Liste erfasst.

Da Fahrräder jedoch keine Beifahrer haben, ist diese Liste in dem Fall stets leer.

Wird von Vehicle vererbt.

Driver

Der Fahrer des Fahrrades wird als Referenz als `Driver` gespeichert.

Wird von `Vehicle` vererbt.

VehicleConstants

Die `VehicleConstants` umfassen einige Konstanten für das Fahrverhalten und werden für Entscheidungen, wie beispielsweise ob Abbremsen vor einer Kurve nötig ist, herangezogen. Die Konstanten umfassen die Geschwindigkeit in engen, normalen und weiten Kurven, sowie beim Wenden und an Kreuzungen. Diese Konstanten sind jedoch auf motorisierte Fahrzeuge angepasst (beispielsweise beträgt die Geschwindigkeit bei weiten Kurven knapp 20 km/h) und erscheinen zu hoch. Deshalb werden eigene Werte festgelegt, wie in 4.2 beschrieben, gewählt.

Wird von `Vehicle` vererbt.

3.3. Auswirkung des Fahrertyps auf das Verhaltensmodell

Wie sich der Typ des Fahrers auf das Verhaltensmodell auswirkt ist im Folgenden beschrieben.

HeadwayTime CC1

Die Reaktionszeit CC1 in Sekunden wird durch den Fahrertypen beeinflusst. Je kleiner der Wert ist, desto später reagiert der Fahrer eingreifend auf seine Umgebung. Entsprechend ist davon auszugehen, dass ein solcher Fahrer eher aggressiv ist. Tabelle 4.3.7 zeigt, welche Werte konkret genutzt werden.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	0,75s	1,5s
Normal		1,5s
Defensiv	1,5s	2,25s

Tabelle 4.3.7.: Übersicht der möglichen Werte der HeadwayTime CC1

FollowingVariation CC2

Der Abstand in Metern, ab welchem versucht wird aufzuschließen, CC2 hängt auch vom Typ des Fahrers ab. Hier sprechen kleinere Werte ebenfalls für einen aggressiveren Fahrer, da bereits ab kleinen Distanzen versucht wird, wieder aufzuschließen. Die Werte, welche dafür genutzt werden, sind in Tabelle 4.3.8 dargestellt.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	1m	2m
Normal		2m
Defensiv	2m	3m

Tabelle 4.3.8.: Übersicht der möglichen Werte der FollowingVariation CC2

EnterFollowingVariation CC3

Versucht ein Fahrer bereits sehr früh zu verzögern, kann man davon sprechen, dass dieser eher vorsichtig fährt. Dies wird im Wiedemann 99 Modell durch größere Werte von CC3 ausgedrückt. Wie dies und das Verhalten der anderen Fahrertypen in Zahlen ausgedrückt werden kann, zeigt Tabelle 4.3.8 dargestellt.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	-30s	-20s
Normal		-20s
Defensiv	-20s	-10s

Tabelle 4.3.9.: Übersicht der möglichen Werte der EnterFollowingVariation CC3

OscillationAcceleration CC7

Es wird davon ausgegangen, dass ein defensiver Fahrer sich im Vergleich zu anderen Fahrertypen mehr Zeit lässt und entsprechend auch weniger stark beschleunigt. Ein aggressiver Fahrer hingegen wird eher stark beschleunigen. Tabelle 4.3.10 zeigt, wie stark die unterschiedlichen Fahrertypen beschleunigen, ist in Tabelle 4.3.10 zu finden.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	$0,2 \text{ m/s}^2$	$0,3 \text{ m/s}^2$
Normal		$0,2 \text{ m/s}^2$
Defensiv	$0,1 \text{ m/s}^2$	$0,2 \text{ m/s}^2$

Tabelle 4.3.10.: Übersicht der möglichen Werte der OscillationAcceleration CC7

Neigung zu Überholen

Es wird davon ausgegangen, dass die Neigung zum Überholen maßgeblich durch die Haltung und den Gemütszustand des Fahrers beeinflusst wird. Entsprechend wird gemäß dem Typ des Fahrers entschieden, ob zu einem bestimmten Zeitpunkt überholt werden soll, oder nicht. Dazu wird über einen Zufallswert abhängig vom Typ die Wahrscheinlichkeit bestimmt, ob der Fahrer überholen will oder nicht. Konkret überholt ein

Fahrer, sobald die Wahrscheinlichkeit größer gleich 50 Prozent liegt. Tabelle 4.3.11 zeigt, dass aggressive Fahrer mit einem Verhältnis von 50:10 überholen. Defensive Fahrer hingegen überholen lediglich in einem Verhältnis von 10:50 und meiden es entsprechend eher. Normale Fahrer haben dort jedoch keine Präferenz.

Fahrertyp	minimaler Wert	maximaler Wert
Aggressiv	40	100
Normal	0	100
Defensiv	0	60

Tabelle 4.3.11.: Übersicht über die Neigung zu Überholen in Abhängigkeit des Fahrertyps

Verhaltenstests

Um die Auswirkung des Fahrertyps auf das Verhaltensmodell zu verdeutlichen, werden drei verschiedene Verhaltenstests durchgeführt: Das Verhalten ohne vorausfahrendes Fahrzeug, das Verhalten, wenn der Fahrer auf ein in 30 Meter entferntes stehendes Vehikel auffährt und wenn der 30 m entfernte Vordermann sich mit konstant 2 m/s und einer festen Beschleunigung von 1 m/s² fortbewegt. Nachfolgend werden die Parameter gelistet, mit denen diese Tests durchgeführt werden.

Parameter	Werte		
	Aggressiv	Normal	Defensiv
CC1	0,75 s	1,5 s	2,25 s
CC2	1 m	2 m	3 m
CC3	-30 s	-20 s	-10 s
CC7	0,1 m/s ²	0,2 m/s ²	0,3 m/s ²
DriverRand	1	0,5	0
Effizienz	95 Prozent		
Kraft	75 W		
Gewicht (Fahrrad + Fahrer)	80 kg		
Maximalgeschwindigkeit	6 m/s		
CC0	0,2 m		
CC4	-0,25 m/s		
CC5	0,25 m/s		
CC6	1		
MaxAccelerationFactor	3		
Steigung	0 Grad		

Tabelle 4.3.12.: Übersicht der Parameter für das Wiedemann 99 Modell in Abhängigkeit des Fahrertyps

Die Ergebnisse für stehende beziehungsweise fehlende Vordermänner sind in allen drei Fällen identisch. Jedoch weicht das Verhalten bei einem beweglichen Objekt voraus stark voneinander ab. Abbildung 4.3.14 zeigt das Verhalten der drei Fahrertypen normal (grün), aggressiv (lila) und defensiv (blau).

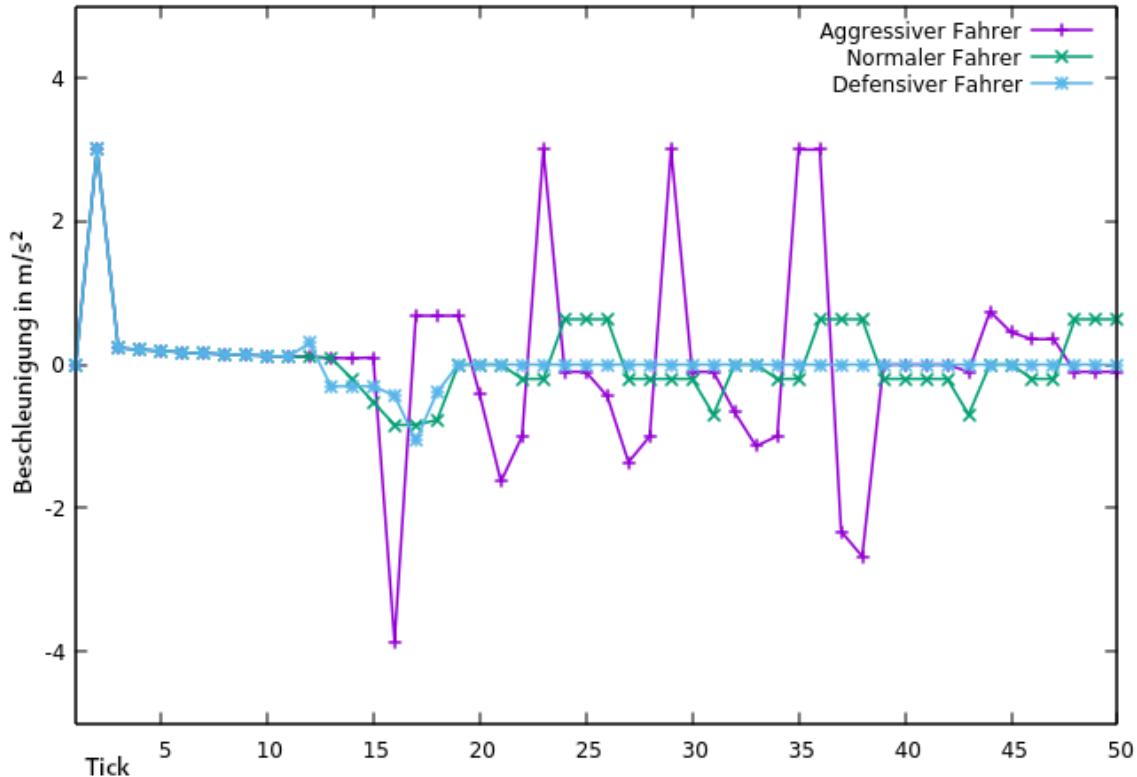


Abbildung 4.3.14.: Vergleich der Auswirkung des DriverType auf das Fahrverhalten hier anhand der Beschleunigung bei einem vorausfahrenden Fahrzeug

Zunächst verhalten sich auch hier alle drei Fahrertypen gleich. Sobald der Radfahrer jedoch auf das vorausfahrende Fahrzeug trifft, unterscheiden sich die Typen stark. Der defensive Fahrer verzögert zunächst iterativ und passt seine Geschwindigkeit anschließend der des Vordermannes an, sodass es anschließend keine Änderungen gibt. Der normale Fahrer verzögert ebenfalls jedoch gleichmäßiger. Danach pendelt er hinter dem Vorausfahrenden. Konkret äußert sich das dadurch, dass er zeitweise zu langsam fährt, deshalb (zu stark) beschleunigt und darauf wieder verzögern muss. Die Änderungen sind allerdings eher gering. Der aggressive Fahrer hingegen verzögert und beschleunigt sehr stark und muss entsprechend häufig Nachsteuern.

4. Verwendete Konstanten

Im Rahmen der Implementierung werden verschiedene Konstanten für die Modelle genutzt. Diese sind im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.1. Durchschnittliche und Maximale Verzögerung

Durchschnittliche Verzögerung

Für die durchschnittliche Verzögerung wird auf Basis der in Kapitel 3 Abschnitt 1.4.1 beschriebenen Verzögerungswerte die mittlere Bremsverzögerung ermittelt. Entsprechend wird dafür ein Wert von $4,9 \text{ m/s}^2$ genutzt.

Maximale Verzögerung

Im originalen Wiedemann 99 Quellcode, wie in Abschnitt 2.5 dargestellt, wird in Zeile 39 ($a = \max(a, -10 + 0,5 * \sqrt{\bar{v}_i})$) und Zeile 50 ($a = \max(a, -10 + \sqrt{\bar{v}_i})$) ein Faktor von -10 angewendet, um die Beschleunigung zu berechnen. Dabei soll die größere Beschleunigung angewendet werden. Da jedoch normale Fahrradfahrer lediglich mit einer Verzögerung von etwa $5,5 \text{ m/s}^2$ bremsen, findet hier in der Regel immer die aktuelle Beschleunigung Anwendung [Col19]. Selbst bei routinierten Fahrradfahrern, welche mit rund 7 m/s^2 verzögern, ist der Faktor von -10 stets kleiner und damit irrelevant. Dementsprechend wird untersucht, welcher Wert für diesen Faktor (nachfolgend `maxDecelFactor` genannt) in Frage kommt. Abbildung 4.4.15 zeigt die Auswirkung des Faktors auf die berechnete Verzögerung bei Geschwindigkeiten von 0 bis 10 m/s .

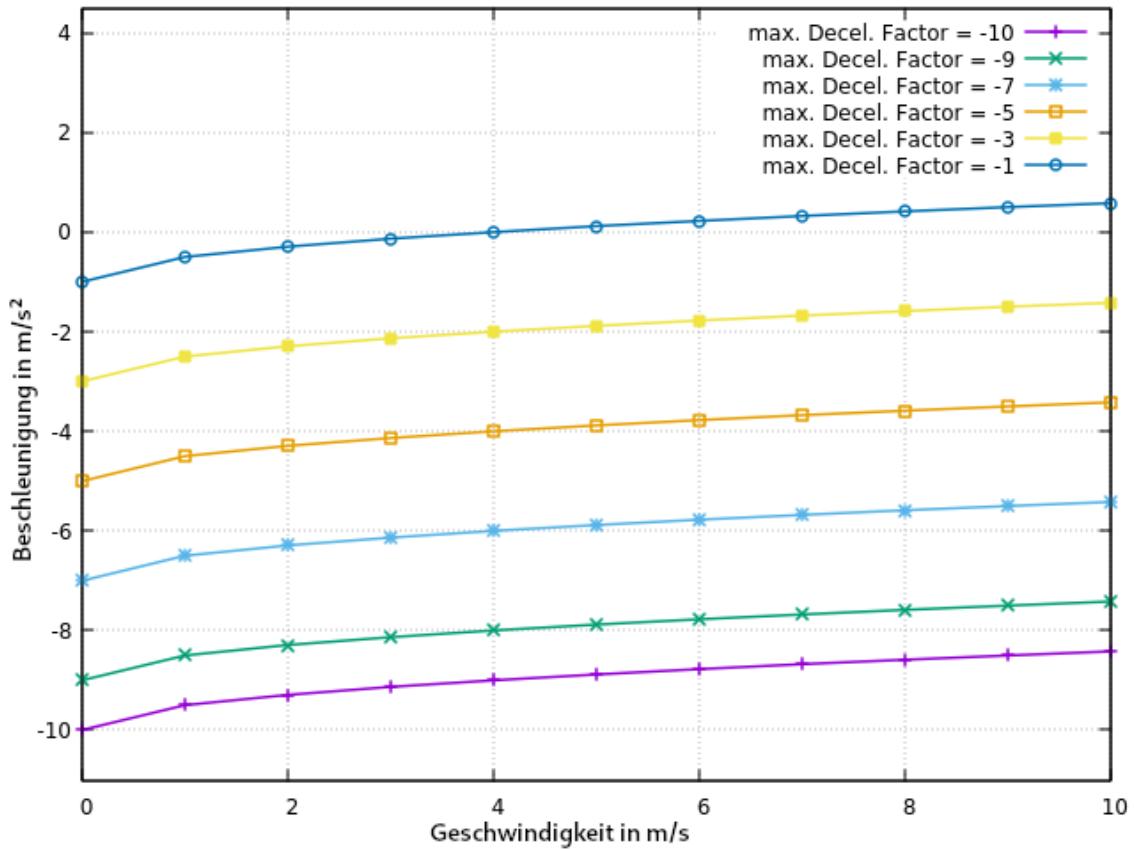


Abbildung 4.4.15.: Vergleich der Auswirkung des `maxDecelFactors` mit Werten zwischen -10 und -1 bei Geschwindigkeiten bis $10 m/s$ (X-Achse) für die Formel $maxDecelFactor + 0,5 * \sqrt{v_i}$

Es zeigt sich, wie oben erwähnt, dass Faktoren kleiner als -8 unrealistisch kleine Verzögerungen mit maximal $-6,42 m/s^2$ bei $10 m/s$ erzeugen. Zu große Werte über -3 führen allerdings zu eher kleinen Bremsungen mit minimal $-3 m/s^2$. Da jedoch wie oben bereits erwähnt, die mittlere Bremsverzögerung bei 4,9 liegt und auch andere Regelungen eine Verzögerung um diesen Wert implizieren, erscheinen diese Werte zu klein [DIN06] [Bu-na].¹.

Aufgrund der durchschnittlichen Verzögerung, der „maximal gut machbaren“ von $5,5 m/s^2$ und der Tatsache, dass der Faktor bei -5 Werte zwischen -5 und $-3,42 m/s^2$ generiert, wird dieser Wert für den `maxDecelFactor` gewählt. Dies geschieht ebenfalls unter der Annahme, dass nicht alle Fahrradfahrer aktuelle Fahrräder benutzen und somit gegebenenfalls geringe maximale Verzögerungen durchführen können.

¹In der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung ist für Fahrräder nicht explizit eine minimale Bremsverzögerung vorgegeben. Jedoch ist Paragraph 41 „Bremsen und Unterlegkeile“ Abschnitt (4) für Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit von $25 km/h$ eine mittlere Vollverzögerung von $3,5 m/s^2$ angegeben.

4.2. Abbiege-Geschwindigkeiten

Bei der Abbiege-Geschwindigkeit kommt es unter anderem darauf an, wie eng die Kurve ist, die gefahren werden soll. So erfordern enge Kurven eine geringere Geschwindigkeit als weitere. Da diese Information nicht vorliegt, werden zur Vereinfachung Prozentanteile der durchschnittlichen, geschlechtsunabhängigen Radfahrer Geschwindigkeit im 50. Perzentil, vorgestellt in Kapitel 3 Abschnitt 1.2.4, von 18 km/h , also 5 Meter pro Sekunde, genutzt. Nachfolgend werden die verschiedenen Geschwindigkeiten aufgezeigt.

Der Radius beim Wenden ist in der Regel sehr gering und damit einhergehend auch die Geschwindigkeit. Dabei kommen häufig, bei einem sehr kleinen Radius auch die Füße zum Einsatz. Entsprechend wird als Geschwindigkeit etwas mehr als die durchschnittliche Geschwindigkeit zu Fuß genutzt. In [Löf19] wird diese als $1,27 \text{ m/s}$ für weibliche Passanten und $1,41 \text{ m/s}$ für männliche angegeben. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Schrittgeschwindigkeit von $1,34 \text{ m/s}$ ($4,824 \text{ km/h}$). Da ein Wenden mit kleinem Radius allerdings auch ohne Fuß-Einsatz durchgeführt werden kann, wird dieser Wert auf 5 km/h ($1,389 \text{ m/s}$) aufgerundet.

Die Geschwindigkeit bei engen, aber nicht so engen Kurven wie beim Wenden, wird als Drittel der durchschnittlichen Geschwindigkeit angegeben. Konkret handelt es sich dabei um $1,667 \text{ m/s}$.

Es wird ebenfalls angenommen, dass beim „normalen“ Abbiegen die Geschwindigkeit ebenfalls reduziert werden muss, allerdings nicht so stark wie bei engeren Kurven. Deshalb wird hier zwei Drittel der Durchschnittsgeschwindigkeit als Abbiege-Geschwindigkeit festgelegt ($3,33 \text{ m/s}$).

Bei weiten Kurven wird, ausgehend von der Geschwindigkeit von 18 km/h beziehungsweise 5 m/s , keine Verringerung angestrebt.

Sollte ein Radfahrer sowieso schon langsamer fahren als diese Werte, wird keine Veränderung angestrebt. Denkbar wäre ebenfalls eine prozentuale Änderung.

5. Normalverteilte Zufallsvariablen

Da es bei Menschen und von Menschen betriebenen „Anlagen“ selten die immer gleichen Werte für beispielsweise die Kraft und den Faktor für die maximale Beschleunigung, wird eine Normalverteilung dieser Werte angestrebt. Dazu wird die Box Muller Methode [Shi07] angewendet.

Bei dieser wird auf Basis zweier Zufallszahlen zu einem Mittelwert und der Standardabweichung ein normal verteilter Zufallswert wie in Gleichung 4.8 generiert.

$$z = \mu + \sigma * \sqrt{-2 * \log(u1)} * \sin(2 * \pi * u2) \quad (4.8)$$

mit $u1 = 1 - p \in [0, 1]$ und $u2 \in [0, 1]$ wobei μ dem Durchschnitt entspricht und σ der Standardabweichung.

5. Evaluation

Die Untersuchung der in Kapitel 4 vorgestellten konkreten Umsetzung des Modells hinsichtlich der Funktionalität folgt in diesem Abschnitt „Evaluation“. Anschließend werden die Forschungsfragen und die Erfüllung der Hypothesen durch verschiedene Simulationen untersucht. Zuletzt erfolgt ein technischer Ausblick.

1. Technische Evaluation

Für die Evaluation hinsichtlich der Funktionalität werden diverse Unit- und Simulations-Tests durchgeführt. Eine Vorstellung der Tests, deren Ergebnisse und die zugehörigen Parameter für die Fahrradfahrer folgen in diesem Abschnitt.

Simulationsparameter für Fahrradfahrer

Für die Durchführung der Simulationstests werden in den meisten Fällen die gleichen Parameter verwendet, welche nachfolgend in Tabelle 5.1.1 vorgestellt werden. Eine Erläuterung dieser Parameter ist in Kapitel 4 Abschnitt 3 zu finden. Zudem ist in Abbildung 5.1.1 der Startpunkt auf der Karte dargestellt. Bei der folgenden Beschreibung der Tests gibt es lediglich eine Auflistung der Abweichungen von diesen Parametern.

Parameter	Wert
Länge des Fahrrades	1,9 m
Höhe des Fahrrades	1 m
Breite des Fahrrades	0,6 m
Maximale Geschwindigkeit	4,167 m/s (= 15 km/h)
Fahrmodus	6
Gewicht des Fahrradfahrers	60,25 kg
Gewicht der Ladung des Fahrrades	0 kg
Startgeschwindigkeit des Fahrrades	0 m/s
Fahrertyp	Normal
Fahrradtyp	City
E-Bike	X

Tabelle 5.1.1.: Parameter für die Unittests

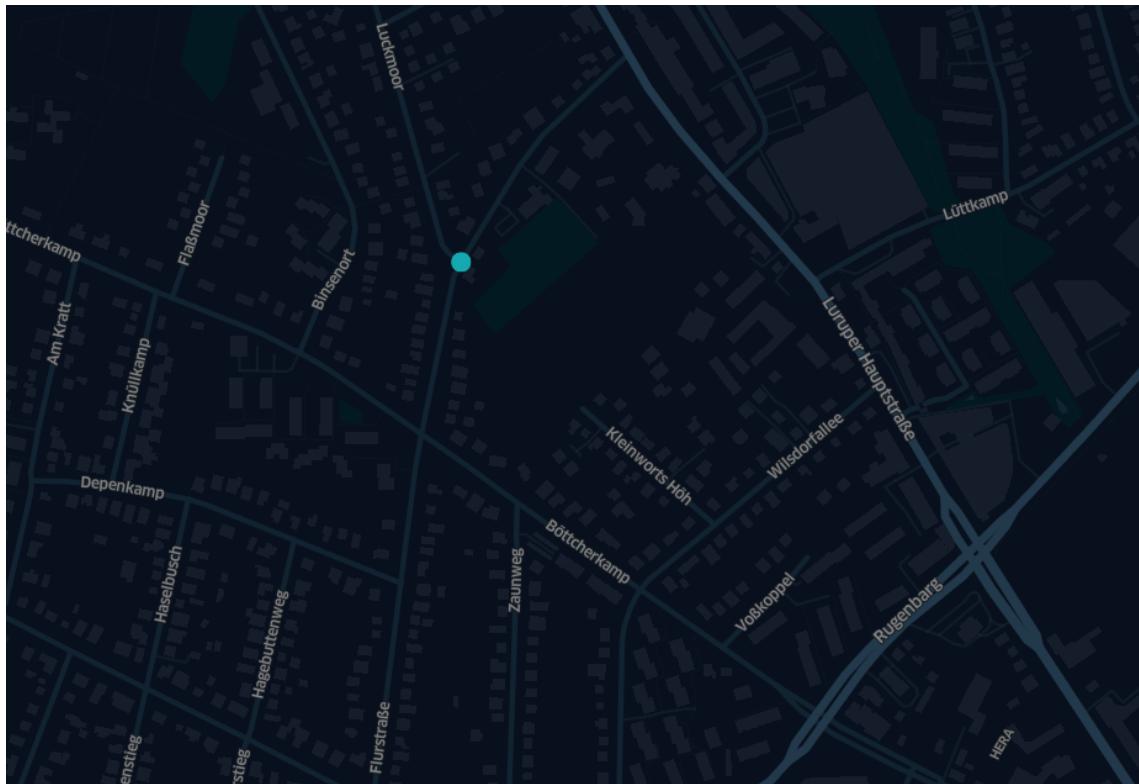


Abbildung 5.1.1.: Startpunkt für die Unit-Tests

Bei den oben genannten Fahrmodi gibt es sechs verschiedene Optionen, welche in nachfolgender Tabelle 5.1.2 vorgestellt werden [Wey19].

Fahrmodus	Start	Ziel	Routing	Sonstiges
1	Zufällig	Zufällig	X	
2	Zufällig	Zufällig	Y	
3	Bekannt	Bekannt	Y	
4	Bekannt	Zufällig	Y	
5	Bekannt	Zufällig	Y	Erste Kannte bekannt
6	Bekannt	Bekannt	OSM Route als OSM IDs bekannt	

Tabelle 5.1.2.: Übersicht über die verschiedenen Fahrmodi innerhalb der Simulation [Wey19]

1.1. Beschleunigungsverhalten

Erwartetes Verhalten

Bei diesem Test wird die Beschleunigung des Radfahrers von 0 m/s auf 4 m/s untersucht. Dabei wird zunächst überprüft, ob die Startgeschwindigkeit 0 entspricht, die Geschwindigkeit anschließend erhöht wird und die Geschwindigkeit sich der Maximalgeschwindigkeit annähert und dort stagniert.

Simulationsparameter

Es wird 1 Radfahrer mit den oben genannten Parametern initialisiert. Dieser fährt zunächst auf einer Straße mit einer Länge von 1 150 Metern und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von $13,889 \text{ m/s}$ und biegt ab auf eine Straße mit 10 000 Metern Länge und derselben Maximalgeschwindigkeit. Die Simulation läuft 3 Minuten und 30 Sekunden.

Verhalten des Radfahrers

Abbildung 5.1.2 zeigt, dass die initiale Beschleunigung, gemäß dem in Kapitel 3 Abschnitt 5 gewählten maximalen Beschleunigungsfaktor $a_{max-factor} = 3 \text{ m/s}^2$, relativ hoch ausfällt und anschließend stetig kleiner wird. Dieses Verhalten wird als sinnvoll erachtet, da es mit steigender Geschwindigkeit zunehmend schwieriger wird, weiter zu beschleunigen.

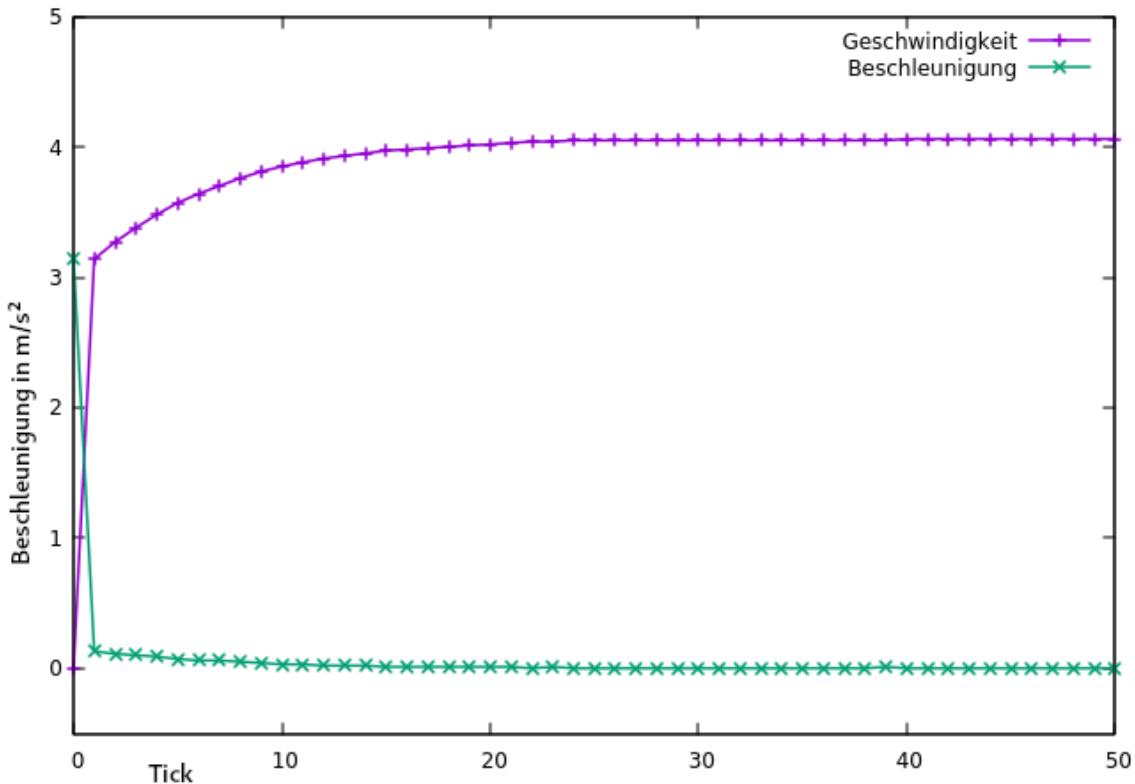


Abbildung 5.1.2.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers während er seine Geschwindigkeit erhöht

1.2. Verzögerungstests

Erwartetes Verhalten

Hier wird betrachtet, wie sich ein Fahrradfahrer beim Bremsen von 9 m/s auf 0 m/s auf einer kurzen Strecke verhält. Dazu wird überprüft, ob die Endgeschwindigkeit bei 0 m/s liegt.

Simulationsparameter

Es wird 1 Radfahrer mit einer, von den oben genannten Parametern, abweichenden Start- und Maximalgeschwindigkeit initialisiert. Die aktuelle Geschwindigkeit beträgt $6,944\text{ m/s}$ und die maximal mögliche 9 m/s . Der Radfahrer fährt zunächst auf einer Straße mit einer Länge von 27 Metern und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von $13,889\text{ m/s}$ und biegt ab auf eine Straße mit 10 000 Metern Länge und derselben Maximalgeschwindigkeit. Die Simulation läuft 3 Minuten und 30 Sekunden.

Verhalten des Radfahrers

Es zeigt sich, dass der Radfahrer in relativ kurzer Zeit auf die Wunschgeschwindigkeit von 0 m/s abbremst (Abb. 5.1.3).

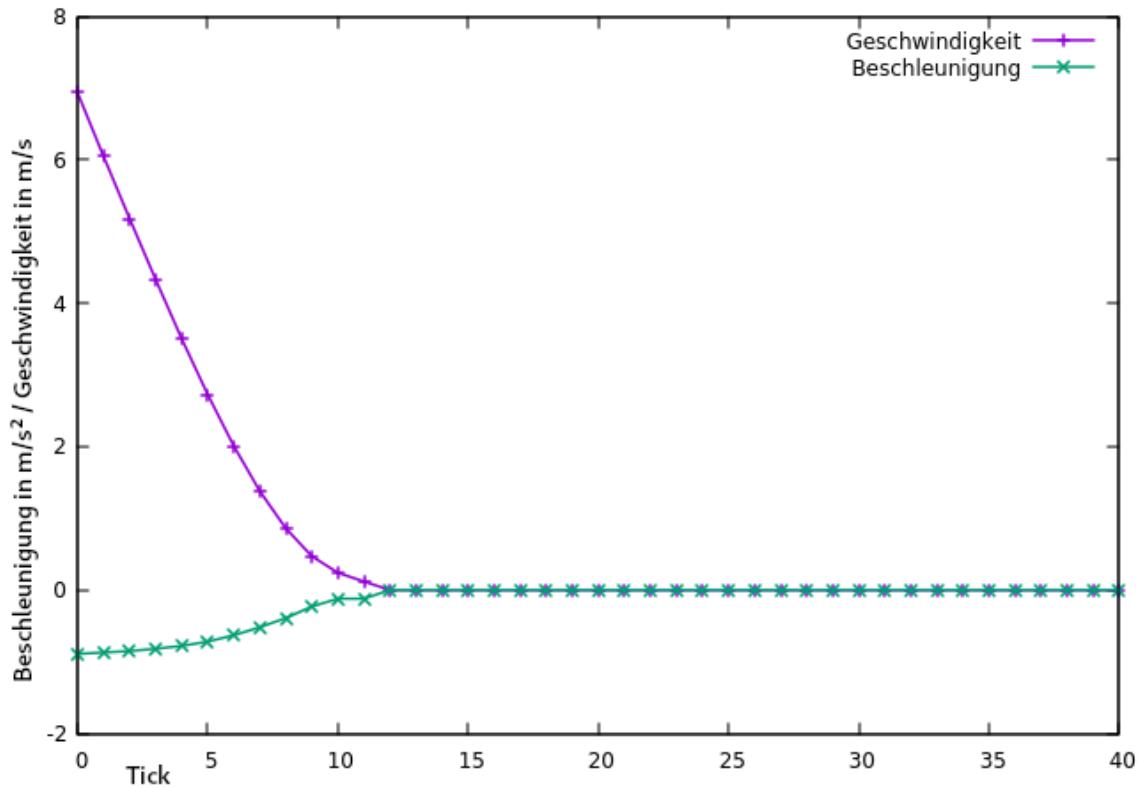


Abbildung 5.1.3.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers während er verzögert

1.3. Verhalten an Kreuzungen ohne Lichtsignalgeber

Bei Kreuzungen ohne Ampeln und ohne Vorfahrtsschilder gibt es vier verschiedene relevante Situationen. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Dabei wird als Umgebung stets die gleiche Kreuzung mit vier Armen genutzt.

Bei den nachfolgenden Tests werden für die Fahrradfahrer stets die gleichen Parameter verwendet:

Parameter	Wert
Länge des Fahrrades	2 m
Höhe des Fahrrades	1,1 m
Breite des Fahrrades	0,6 m
Maximale Geschwindigkeit	9 m/s (= 32,4 km/h)
Fahrmodus	6
Gewicht des Fahrradfahrers	60 kg
Gewicht der Ladung des Fahrrades	0 kg
Startgeschwindigkeit des Fahrrades	0 m/s
Fahrertyp	Normal
Fahrradtyp	City
E-Bike	X

Tabelle 5.1.3.: Simulationsparameter für die Verhaltenstests an Kreuzungen

Die Startpositionen der Radfahrer werden in Abbildung 5.1.4 dargestellt.

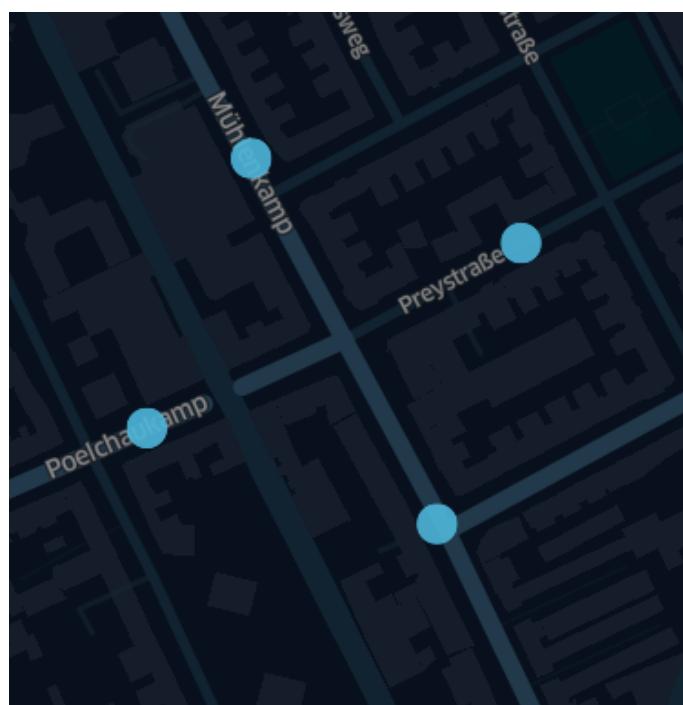


Abbildung 5.1.4.: Startpositionen der vier Radfahrer an einer Kreuzung

Zwei Fahrradfahrer

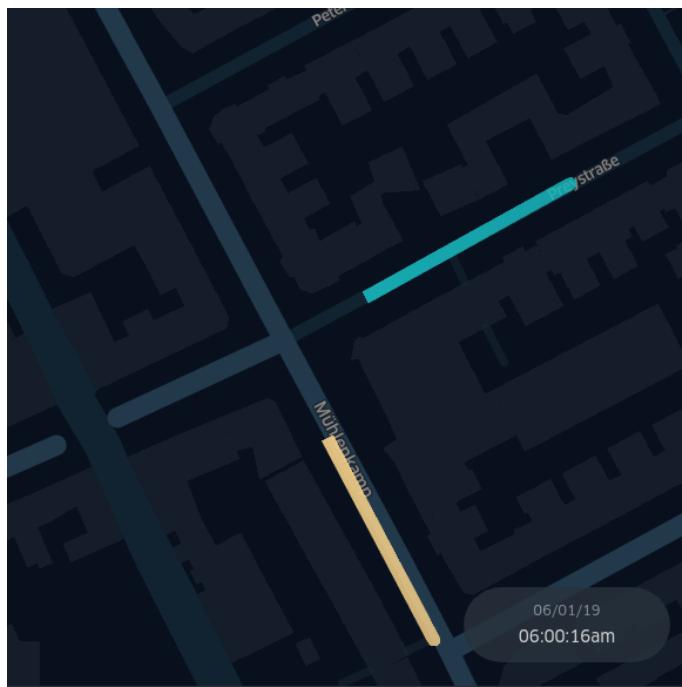


Abbildung 5.1.5.: Zwei Radfahrer treffen an einer ampellosen Kreuzung aufeinander

Erwartetes Verhalten

Hier gibt es zwei Radfahrer, wobei Radfahrer 2 gemäß Abbildung 5.1.5 Vorfahrt hat, da er von rechts kommt. Gemäß dessen wird erwartet, dass Radfahrer 2 in einem früheren Zeitschritt die Kante wechselt (abbiegt) als Radfahrer 1.

Verhalten des Radfahrers

Treffen zwei Fahrradfahrer an einer Recht-vor-Links Kreuzung aufeinander, verzögern beide zunächst bis 0 m/s . Anschließend beschleunigt der Fahrer mit Vorfahrt vor dem anderen. Die Abbildungen 5.1.6 und 5.1.7 zeigen die Geschwindigkeit und Beschleunigung in diesen Fällen.

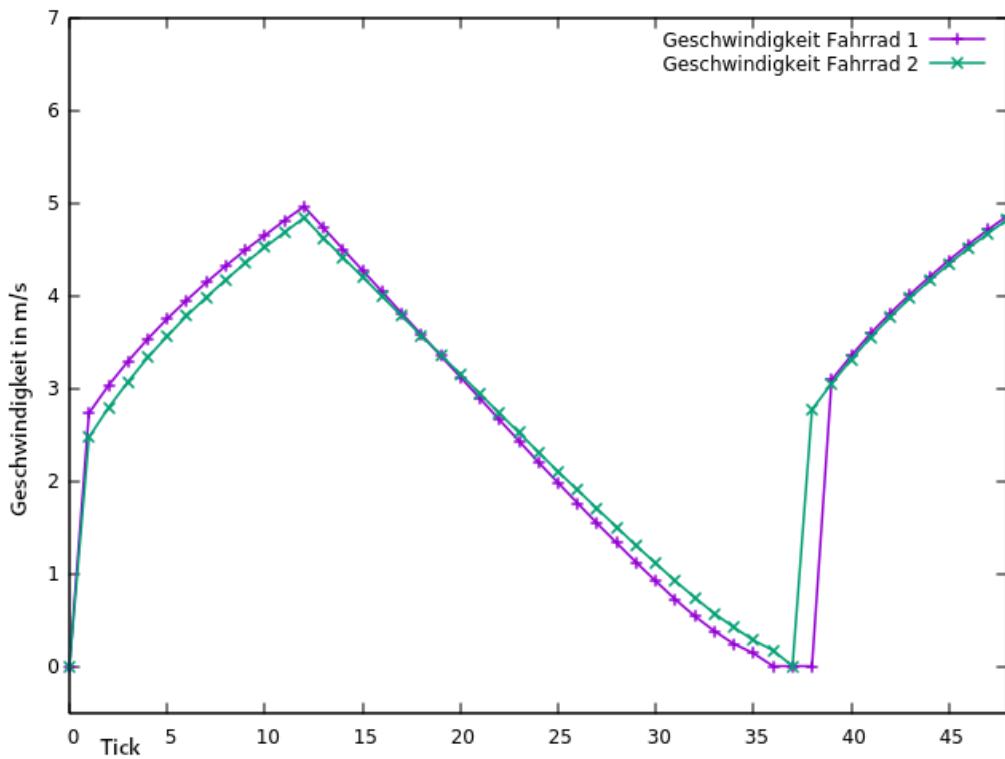


Abbildung 5.1.6.: Geschwindigkeit zweier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

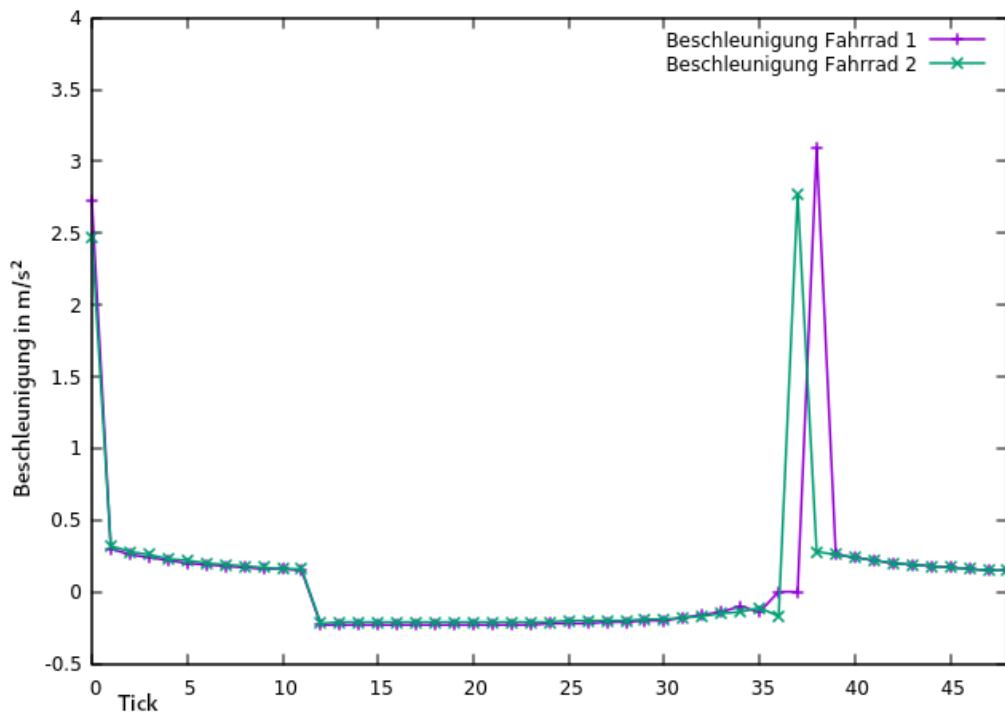


Abbildung 5.1.7.: Beschleunigung zweier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

Drei Radfahrer

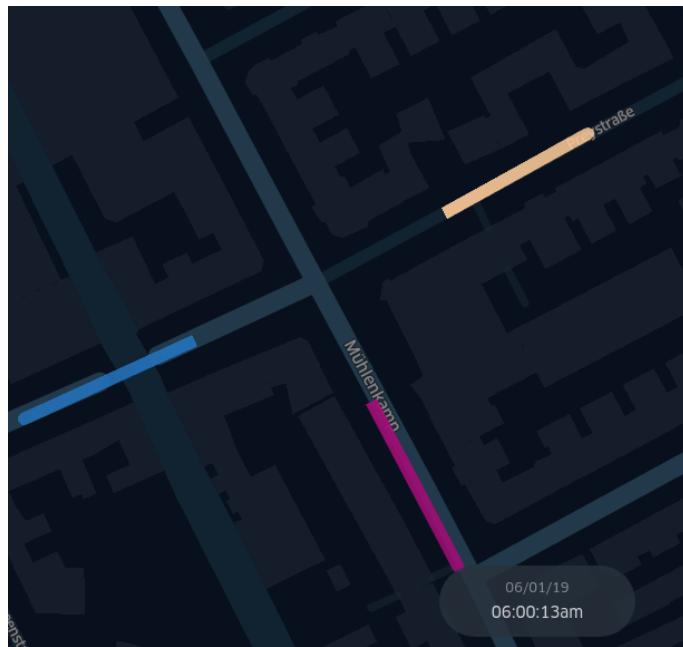


Abbildung 5.1.8.: Drei Fahrradfahrer stehen an der Kreuzung

Erwartetes Verhalten

Bei diesem Test stehen drei Radfahrer an der Kreuzung wie in Abbildung 5.1.8 dargestellt. Dabei muss Radfahrer 2 als Erstes und Radfahrer 1 als zweites fahren. Daraus folgt in Bezug auf die Zeitschritte: $\text{Rad2.Step} < \text{Rad1.Step} < \text{Rad3.Step}$

Verhalten des Radfahrers

Auch hier halten zunächst alle Radfahrer an und fahren dann gemäß Straßenverkehrsordnung in der richtigen Reihenfolge wieder los. Die Abbildungen 5.1.9 und 5.1.10 verdeutlichen dies.

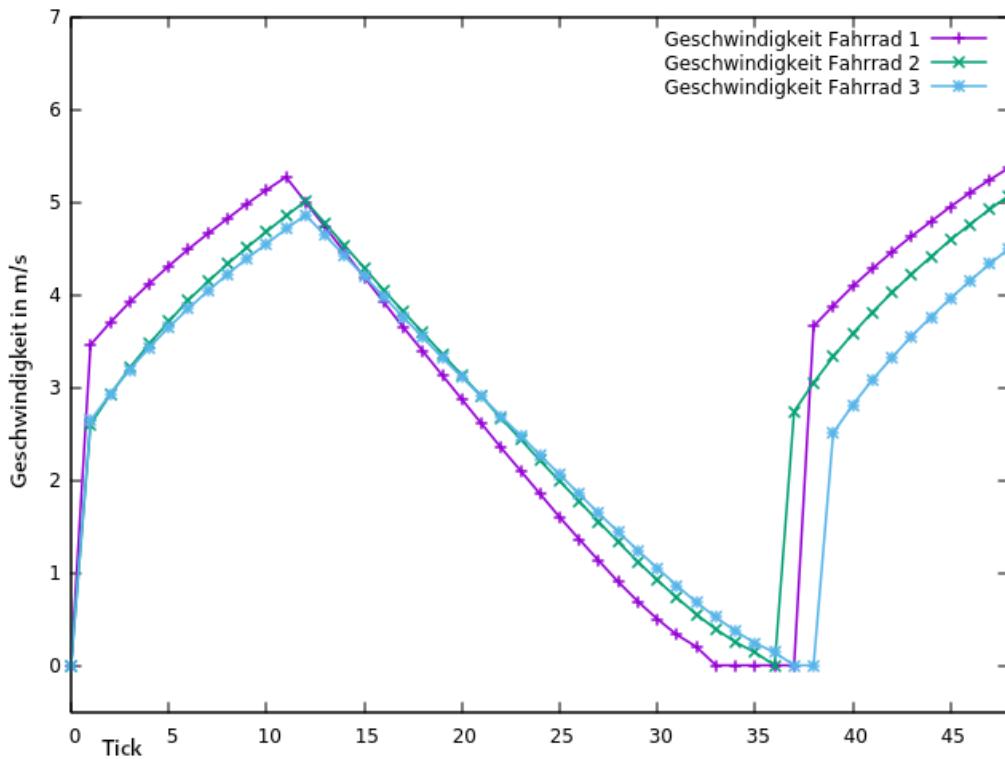


Abbildung 5.1.9.: Geschwindigkeit dreier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

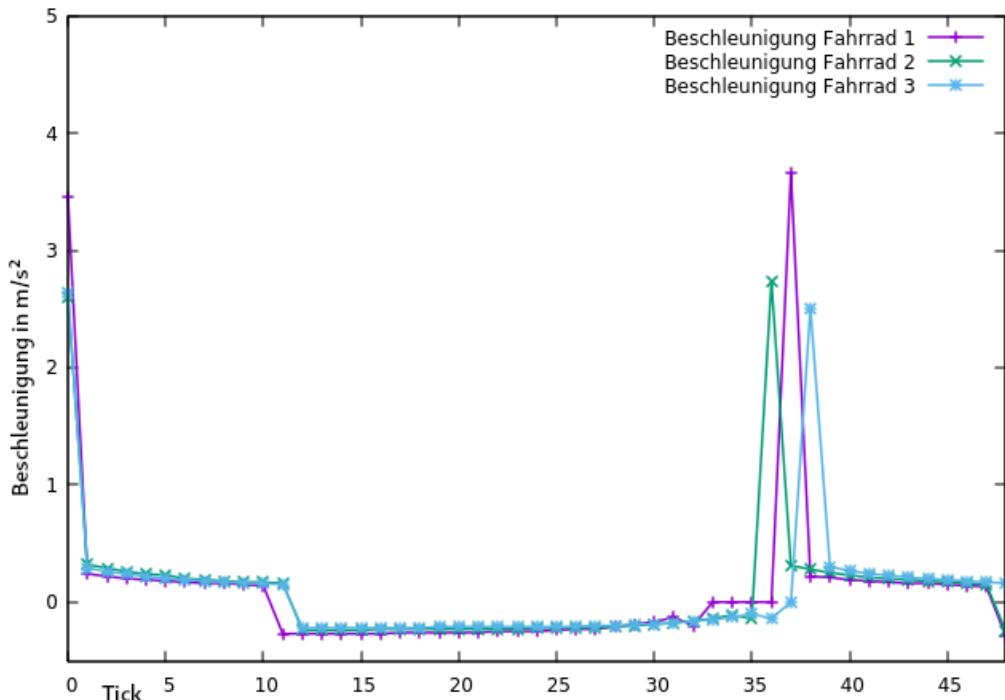


Abbildung 5.1.10.: Beschleunigung dreier Radfahrer an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

Aus jeder Straße kommt ein Fahrzeug

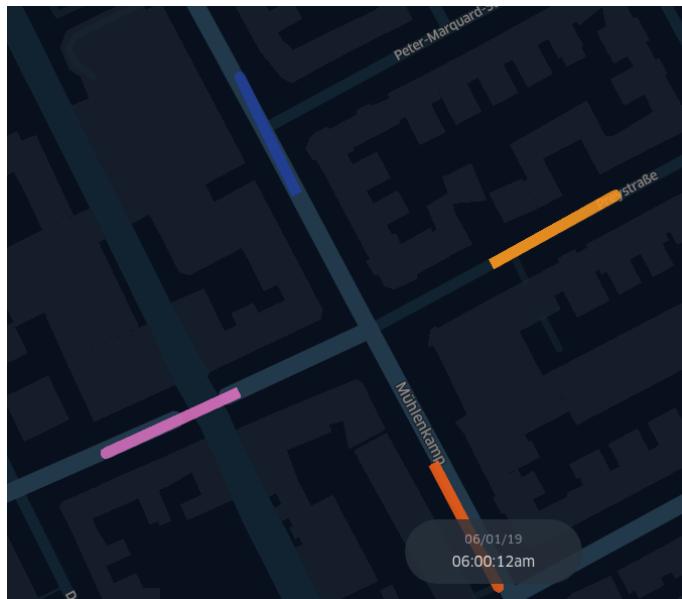


Abbildung 5.1.11.: An einer Kreuzung ohne Lichtsignalgeber treffen vier Radfahrer aufeinander

Erwartetes Verhalten

Zuletzt stehen vier Fahrradfahrer, jeweils an einem Ast, an der Kreuzung und wollen alle geradeaus fahren (siehe Abbildung 5.1.11). Gemäß Straßenverkehrsordnung gibt es hier keine klare Regelung, wer zuerst fahren darf. Stattdessen müssen sich die Verkehrsteilnehmer untereinander einigen. Dies wird in der Simulation ebenfalls erwartet. Entsprechend wird überprüft, ob die vier Radfahrer jemals die Kanten wechseln und entsprechend kein Deadlock aufgetreten ist.

Verhalten des Radfahrers

Zunächst bleiben alle vier Fahrräder an der Kreuzung stehen und warten eine gewisse Weile (10 Ticks). Anschließend fahren alle nacheinander über die Kreuzung, beginnend mit Fahrrad 4 (Abbildungen 5.1.12 und 5.1.13).

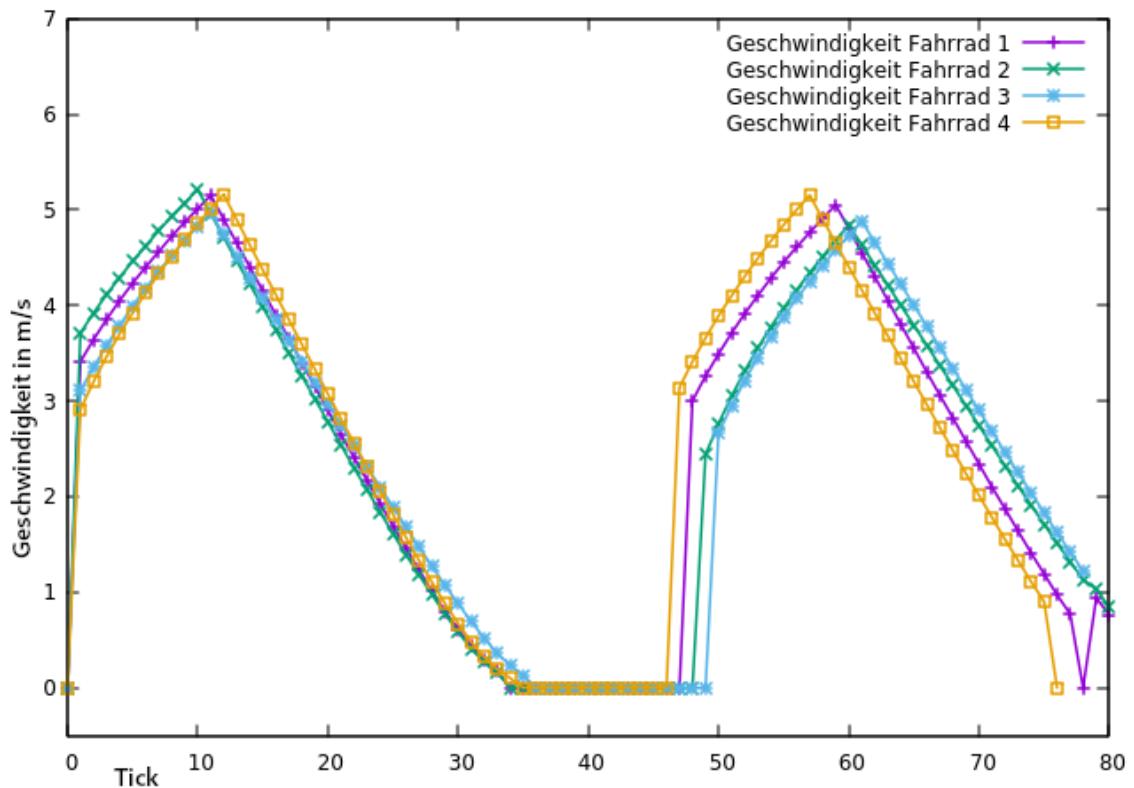


Abbildung 5.1.12.: Geschwindigkeit von vier Radfahrern an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

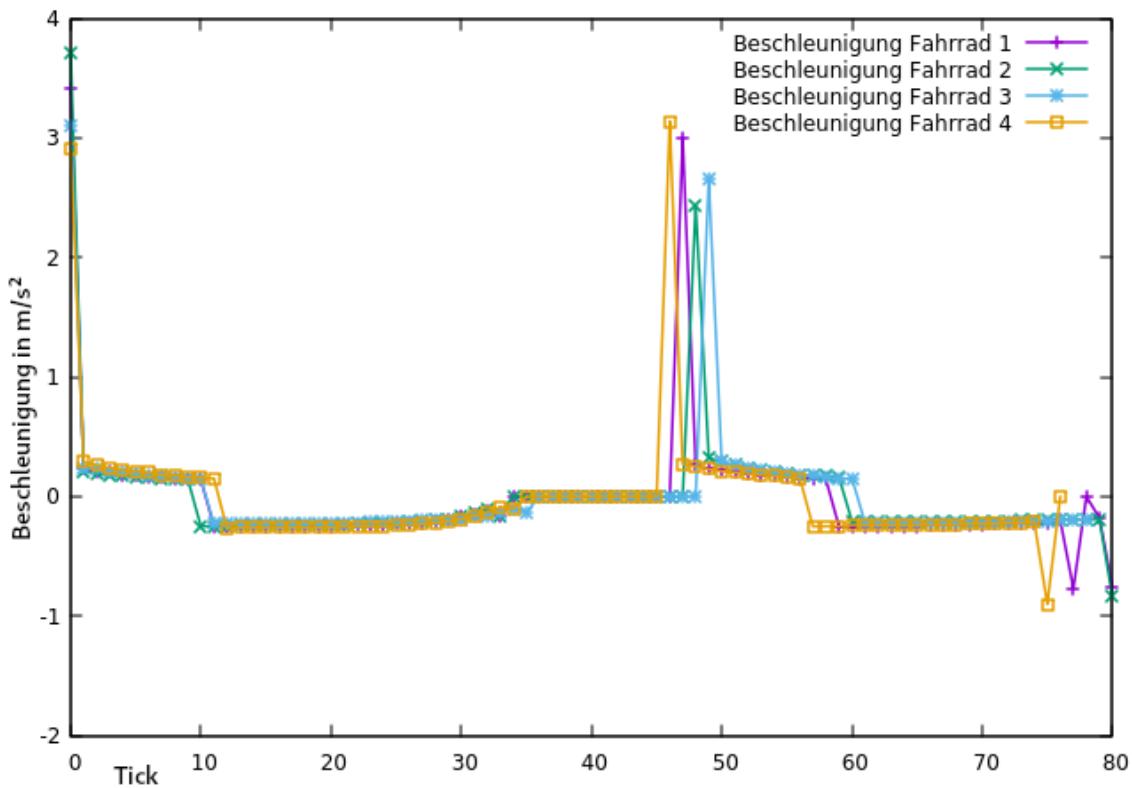


Abbildung 5.1.13.: Beschleunigung von vier Radfahrern an einer Rechts-vor-Links-Kreuzung

1.4. Spurwechsel-Tests

Simulationsparameter

Für die Spurwechsel Tests werden zwei Fahrradfahrer von der gleichen Position mit der gleichen Route (Abbildung 5.1.14). Der relevante Unterschied zwischen den beiden Fahrradfahrer ist, dass einer der beiden eine Maximalgeschwindigkeit von $1 m/s$ und der andere $11,11 m/s$. Abseits davon entsprechen die Parameter den oben genannten.

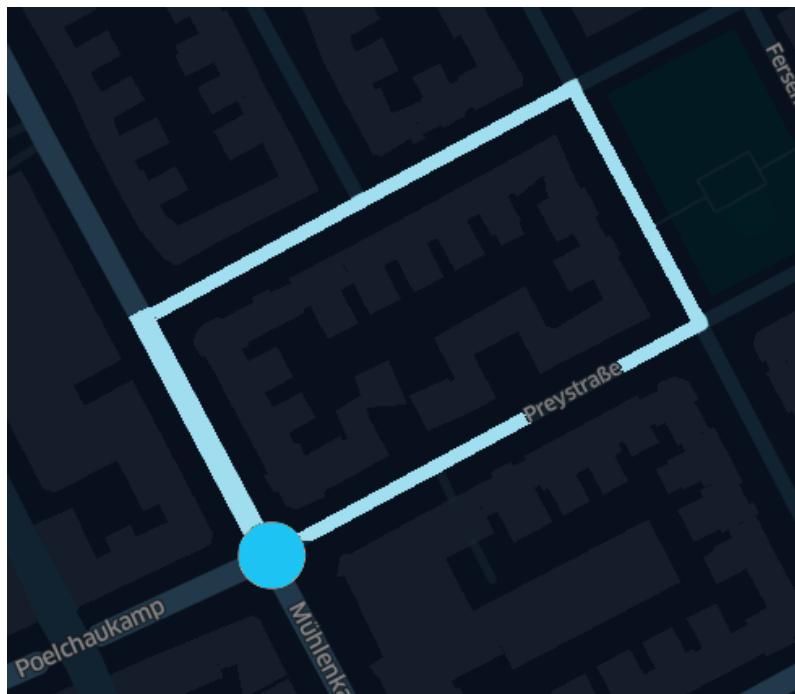


Abbildung 5.1.14.: Startpunkt und Route der zwei Radfahrer

Erwartetes Verhalten

Bei den Spurwechseltests wird erwartet, dass der schnellere Fahrradfahrer die Spur wechselt um den langsameren zu überholen.

Verhalten des Radfahrers

Nachdem der schnellere Fahrradfahrer (grau) dem langsamen (türkis) folgt, setzt er an zu Überholen. Jedoch tritt beim Wechsel der Spur ein interner Fehler auf, und der Fahrradfahrer wird fortan nicht mehr bewegt. Dieses Problem ist in Abbildung 5.1.15 dargestellt.

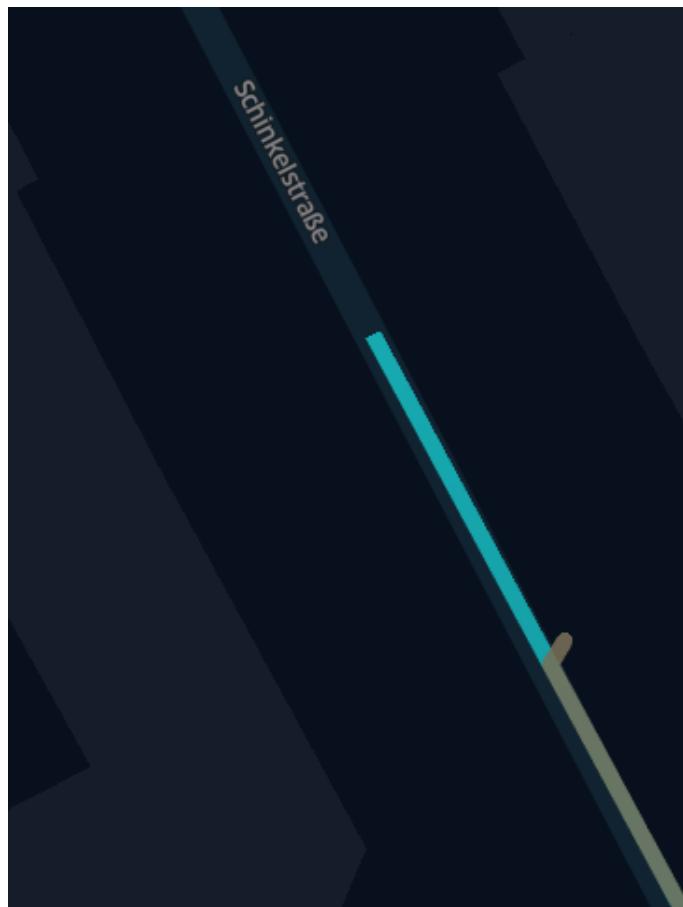


Abbildung 5.1.15.: Visualisierung des Spurwechsels

1.5. Reaktionen auf Geschwindigkeitsbeschränkungen

Erwartetes Verhalten

Hier wird über den Graphen zum einen die Geschwindigkeitsbeschränkung von 2,778 m/s auf 6,944 m/S erhöht (*a*) und zum anderen von 6,944 auf 2,778 m/s verringert (*b*). Zunächst wird geprüft, dass die Startgeschwindigkeit den zulässigen Wert von 2,778 m/s beziehungsweise 6,944 m/s nicht überschreitet und bis zur Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkung nicht maßgeblich verändert wird. Sobald die Anpassung nach 1 150 Metern erfolgt ist, wird geprüft, ob der Fahrer seine Geschwindigkeit entsprechend anpasst und diese nicht überschreitet.

Simulationsparameter

Bei beiden Tests wird jeweils ein Fahrradfahrer mit weitestgehend den obigen Parametern. Abweichen tun jeweils die Startgeschwindigkeit mit 2,778 (*a*) beziehungsweise 6,944 m/s (*b*) und die Maximalgeschwindigkeit mit 6,944 (*a*) und 11,11 m/s (*b*).

Verhalten des Radfahrers

Bei den beiden Tests ist das Verhalten exakt entgegengesetzt. So fährt der Radfahrer in beiden Fällen mit einer konstanten Geschwindigkeit, welche er nach der Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkung langsam an die neue maximal erlaubte Geschwindigkeit anpasst. Die Bilder 5.1.16 und 5.1.17 zeigen die Geschwindigkeit und Beschleunigung in den beiden Fällen.

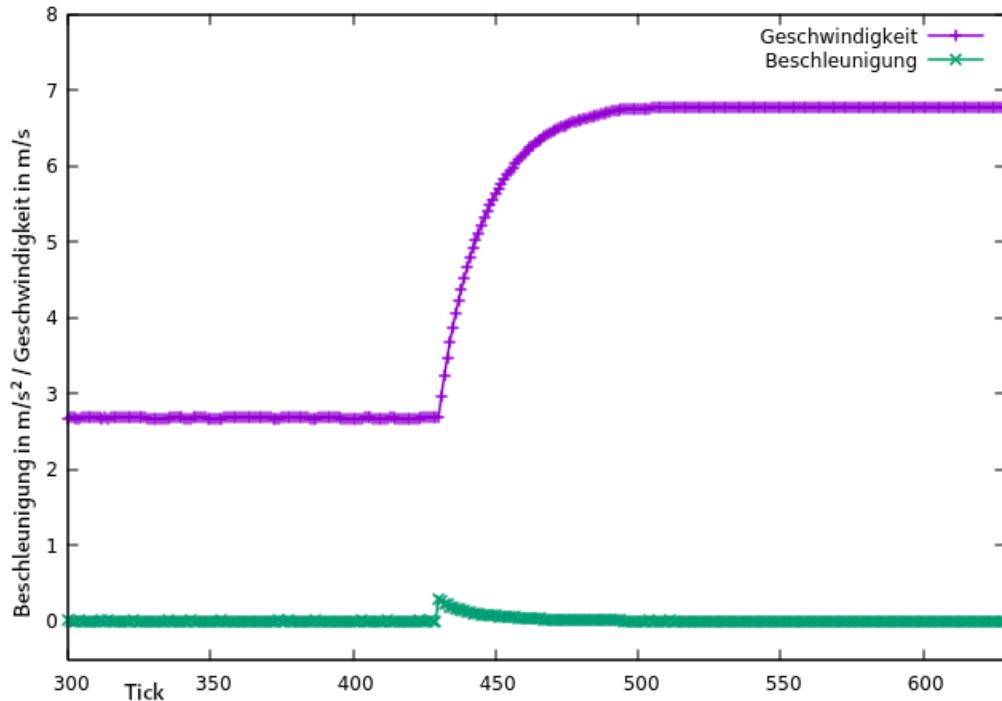


Abbildung 5.1.16.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer Erhöhung der Geschwindigkeitsbegrenzung

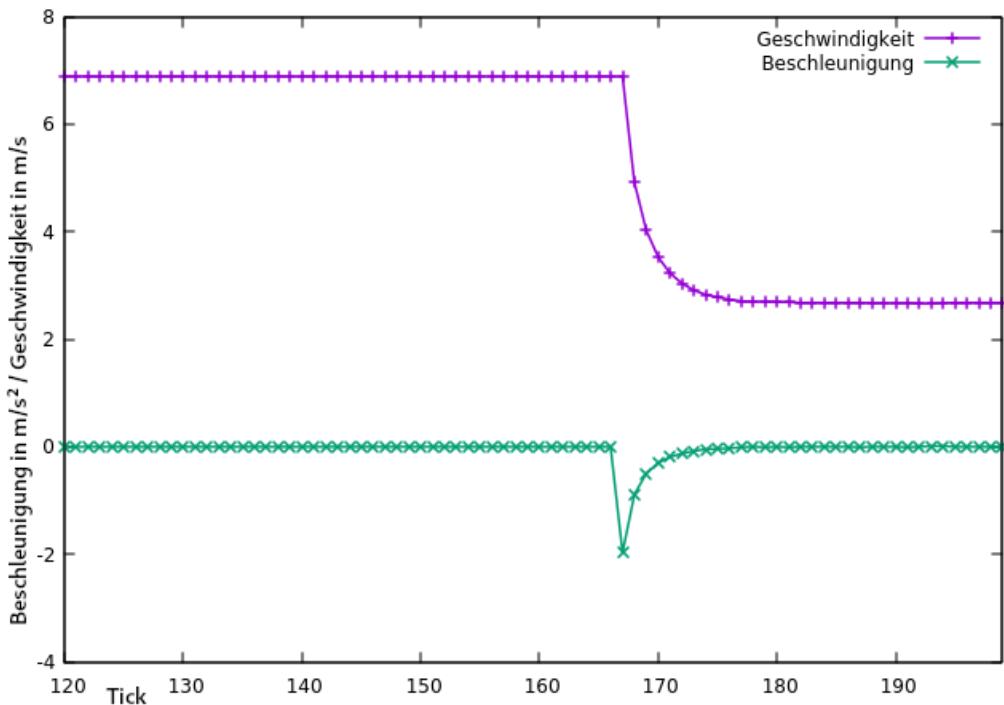


Abbildung 5.1.17.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer Verringerung der Geschwindigkeitsbegrenzung

1.6. Verhalten an Lichtsignalanlagen

Erwartetes Verhalten

Auch hier erfolgen zwei Tests. Dabei handelt es sich um die Reaktion eines Fahrradfahrers auf eine grüne (*a*) beziehungsweise eine rote Ampel (*b*). Bei einer roten Ampel wird erwartet, dass der Radfahrer zunächst mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit fährt, bis er sich der Ampel nähert. Sobald er dieser nahe genug kommt, dass sie für ihn von Bedeutung ist, wird geprüft, ob der Fahrradfahrer zum Stehen gekommen ist. Bei einer grünen Ampel ist die Erwartungshaltung, dass der Radfahrer rechtzeitig (bei etwa 40 Meter Entfernung) wahrnimmt, dass es eine Ampel gibt und diese grün ist. Eine Anpassung der Geschwindigkeit soll nicht erfolgen. Entsprechend sollte die Geschwindigkeit vor und nach der Ampel der für den Radfahrer gesetzten Maximalgeschwindigkeit entsprechen.

Simulationsparameter

Die hier jeweils erzeugten Fahrradfahrer haben eine, von den oben genannten Parametern abweichende, Start- und Maximalgeschwindigkeit von jeweils 6,944 m/s zu Beginn der Simulation und 9 m/s maximal.

Verhalten des Radfahrers

Bei einer grünen Ampel beschleunigt der Radfahrer auf seine maximale Geschwindigkeit und behält diese bei. Abbildung 5.1.18 visualisiert dabei die Beschleunigung und Geschwindigkeit.

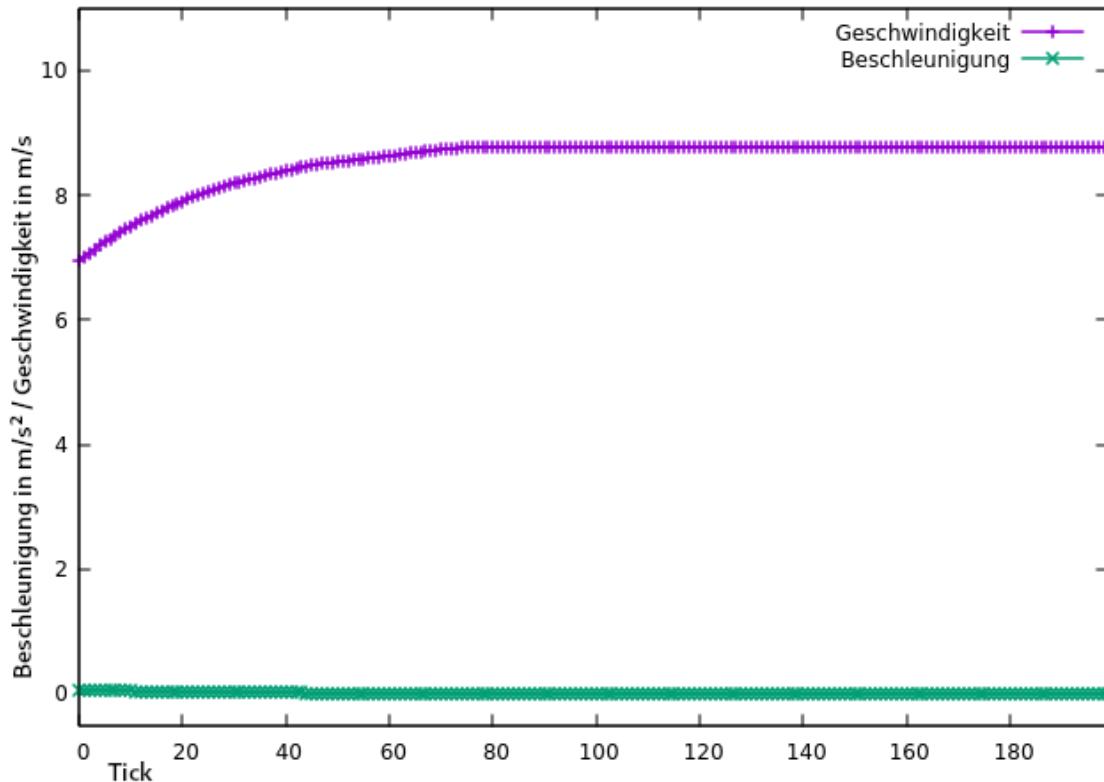


Abbildung 5.1.18.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer grünen Ampel

Ist die Ampel hingegen rot, zeigt Grafik 5.1.19 deutlich, dass der Fahrer nach einer kurzen Beschleunigung beginnt, seine Geschwindigkeit zu verringern, bis sie bei 0 m/s ankommt.

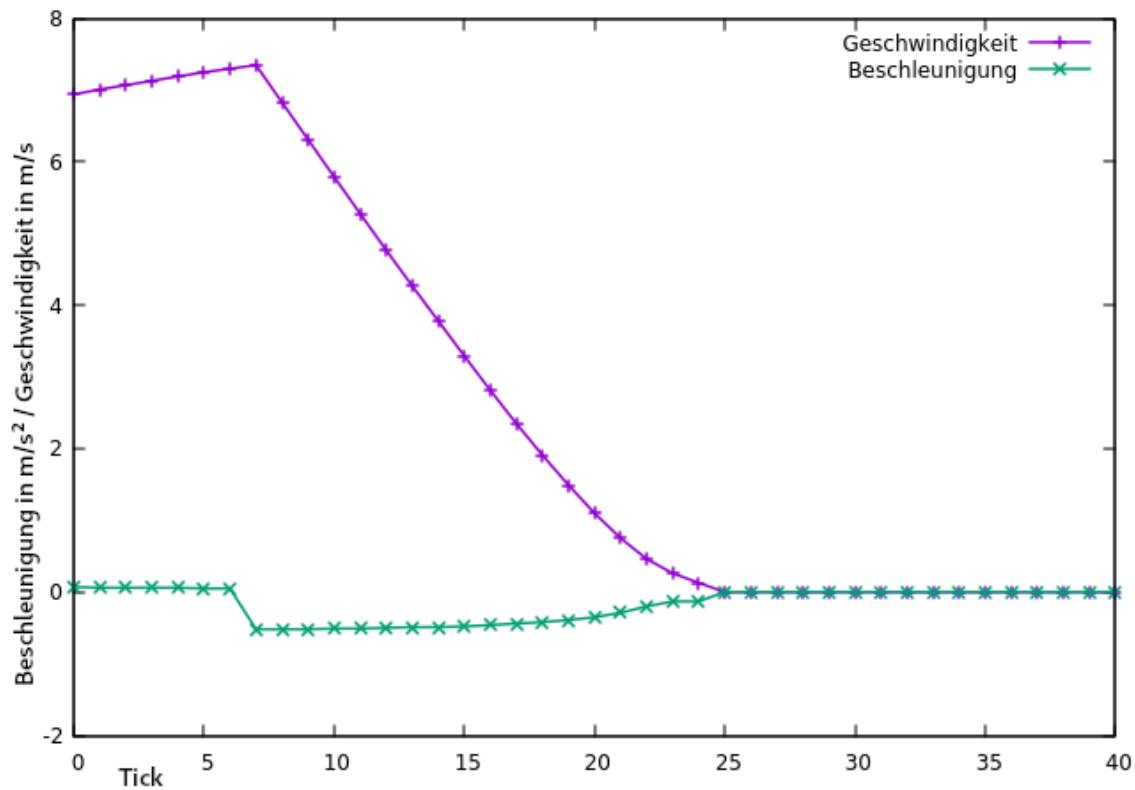


Abbildung 5.1.19.: Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrradfahrers bei einer roten Ampel

1.7. Generelles Fahrverhalten

Hierbei werden zehn vereinfachte Radfahrer mit dem angepassten Wiedemann-Verhaltensmodell auf einem elliptischen Ring simuliert. Dabei haben diese die Parameter eines normalen Fahrradfahrers (CC0 bis CC7 und DriverRand), einem Gewicht von 80 kg, eine Kraft von 75 W und einer maximalen Geschwindigkeit mit einer normalverteilten Zufallszahl um 7 m/s und einer Abweichung von 1,5. Lediglich bei einem der Radfahrer wird die maximale Geschwindigkeit manuell auf eine geringere Zahl gesetzt (3,667 m/s). Abbildungen 5.1.20 und 5.1.21 zeigen das Verhalten der Radfahrer.

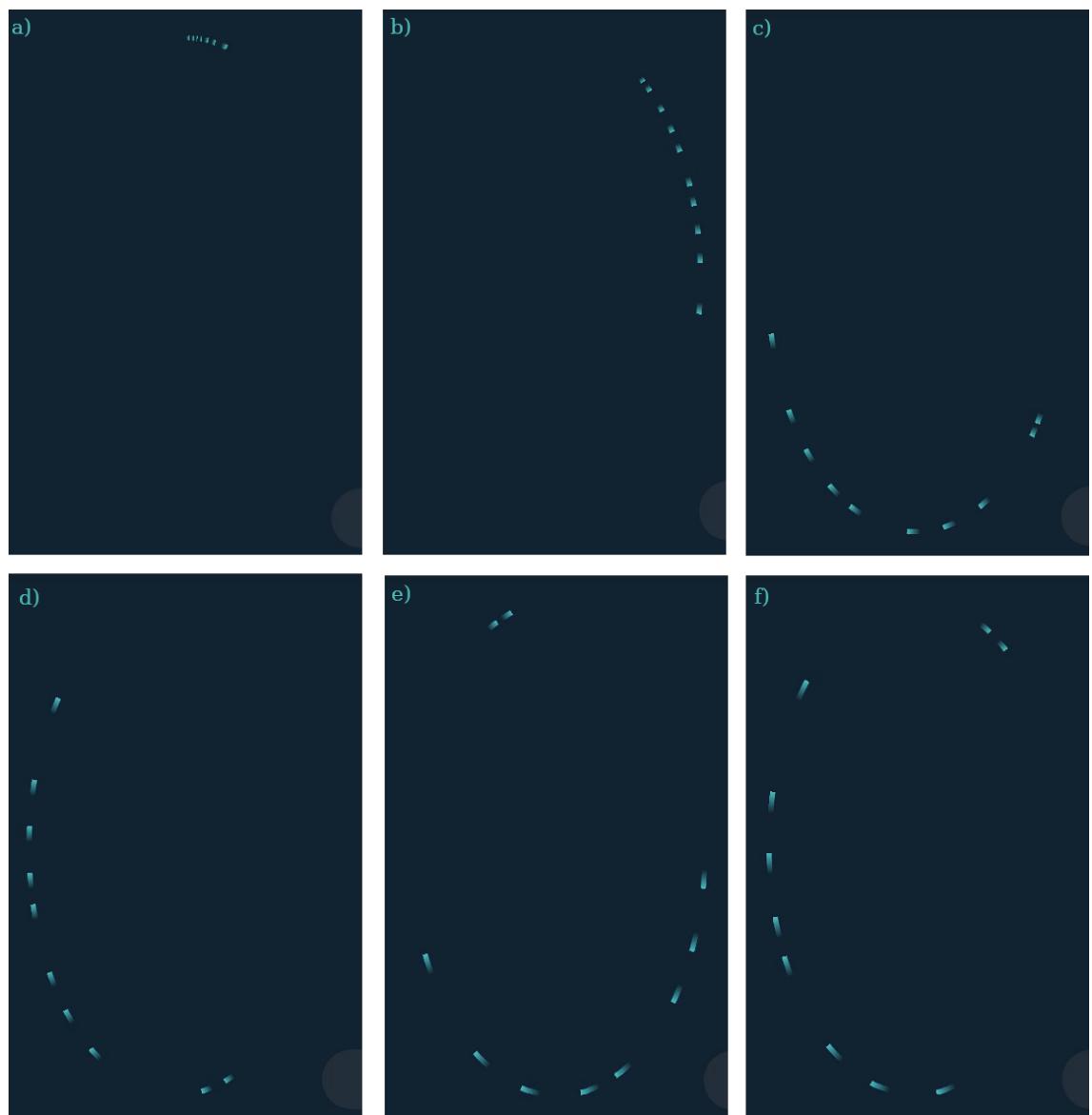


Abbildung 5.1.20.: Verhalten von Radfahrern auf einem Ring I



Abbildung 5.1.21.: Verhalten von Radfahrern auf einem Ring II

Die Bilder zeigen, dass zunächst alle Radfahrer nacheinander starten (a)) und sich anschließend langsam über den Ring verteilen (b) - (d)). Nach einer kleinen Weile zeigt sich, dass die Radfahrer unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten haben und sich über den Ring verteilen (e)). Konkret zeigt sich, dass mindestens ein Radfahrer relativ langsam fährt und er und sein Hintermann im Ring zurückbleiben. Die schnelleren Fahrer schließen langsam von hinten auf die langsameren auf (f) und g)). Sobald sie diese erreicht haben (h) - l)), verringern sie ihre eigene Geschwindigkeit und verhalten sich so, dass sie keinen Auffahrungsfall produzieren. Zudem kommt es zu keinem Zeitpunkt, zu einem Überholversuch, sondern lediglich zu einem Folgeverhalten. Es fällt zudem auf, dass sich der Abstand zwischen den einzelnen Fahrrädern mal verkleinert und mal vergrößert.

Dieses Verhalten entspricht zum einen dem erwarteten Verhalten, aber erscheint auch als Verhalten für Fahrradfahrer im Verbund realistisch: Verzögerungen beziehungsweise Beschleunigungen pflanzen sich langsam in der Kette fort wobei die Fahrer nicht im richtigen Maße bremsen / schneller werden und somit häufiger gezwungen sind, ihre eigene Geschwindigkeit anzupassen.

1.8. Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern

Bei diesen Interaktionstests fahren jeweils ein Radfahrer und ein Auto auf einem quadratischen Straßenzug. Dabei starten sie an unterschiedlichen Ecken. Im ersten Fall ist das Auto langsamer als der Radfahrer und im zweiten ist es andersrum.

1.8.1. Langsames vorausfahrendes Auto

Hier werden entsprechend der folgenden Parameter ein normal schnelles Fahrrad und ein langsames Auto initialisiert. Das Auto befindet sich dabei vor dem Radfahrer.

Simulationsparameter

Die Simulationsparameter und die Startpunkte in diesem Fall sind in Tabelle 5.1.4 und Abbildung 5.1.22 zu finden.

Parameter	Wert
Fahrrad	
Länge des Fahrrades	2 m
Höhe des Fahrrades	1,1 m
Breite des Fahrrades	0,6 m
Maximale Geschwindigkeit	9 m/s (= 32,4 km/h)
Fahrmodus	6
Gewicht des Fahrradfahrers	60 kg
Gewicht der Ladung des Fahrrades	0 kg
Startgeschwindigkeit des Fahrrades	0 m/s
Fahrertyp	Normal
Fahrradtyp	City
E-Bike	X
Pkw	
Länge des Autos	2 m
Maximale Geschwindigkeit	1 m/s (= 3,6 km/h)
Fahrmodus	6
Startgeschwindigkeit	0 m/s

Tabelle 5.1.4.: Simulationsparameter für das Fahrrad und den langsamen Pkw

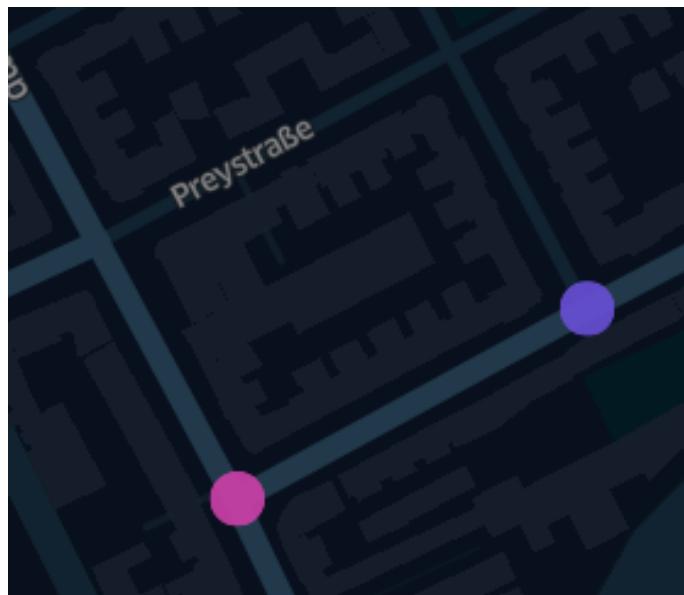


Abbildung 5.1.22.: Startpunkte des Fahrrades (pink) und das Auto (blau)

Erwartetes Verhalten

Es wird erwartet, dass der Radfahrer von hinten zu dem Auto aufschließt dieses jedoch weder überholt noch einen Unfall mit diesem erzeugt. Stattdessen soll der Radfahrer dem Auto in passender Geschwindigkeit folgen.

Verhalten des Radfahrers

Das erwartete Verhalten tritt ein und ist in Abbildung 5.1.23 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass der Radfahrer schnell aufschließt und seine Geschwindigkeit anschließend passend verringert.

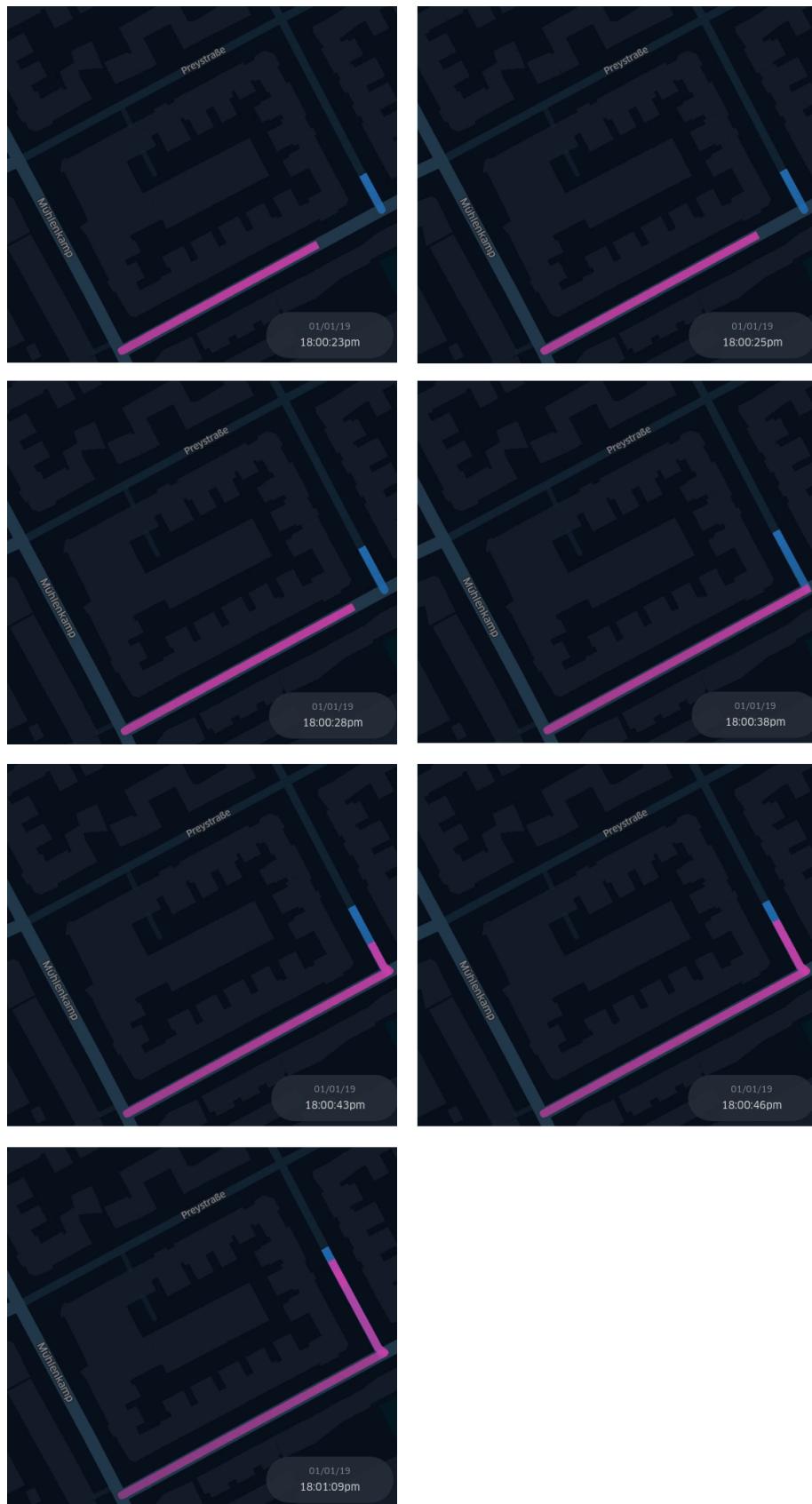


Abbildung 5.1.23.: Simulation des Verhaltens eines Radfahrers (pink) bei einem langsam vorausfahrenden Auto (blau)

1.8.2. Langsames vorausfahrendes Fahrrad

Anschließend wird getestet, ob Autofahrer auch geeignet auf Fahrräder reagieren. Dazu fährt hier ein langsames Fahrrad voraus.

Simulationsparameter

Hier werden die Agenten wie in Tabelle 5.1.5 und Abbildung 5.1.24 dargestellt initialisiert.

Parameter	Wert
Fahrrad	
Länge des Fahrrades	2 m
Höhe des Fahrrades	1,1 m
Breite des Fahrrades	0,6 m
Maximale Geschwindigkeit	4 m/s (= 14,4 km/h)
Fahrmodus	6
Gewicht des Fahrradfahrers	60 kg
Gewicht der Ladung des Fahrrades	0 kg
Startgeschwindigkeit des Fahrrades	0 m/s
Fahrertyp	Normal
Fahrradtyp	City
E-Bike	X
Pkw	
Länge des Autos	2 m
Maximale Geschwindigkeit	13 m/s (= 46,8 km/h)
Fahrmodus	6
Startgeschwindigkeit	0 m/s

Tabelle 5.1.5.: Simulationsparameter für das langsame Fahrrad und den Pkw

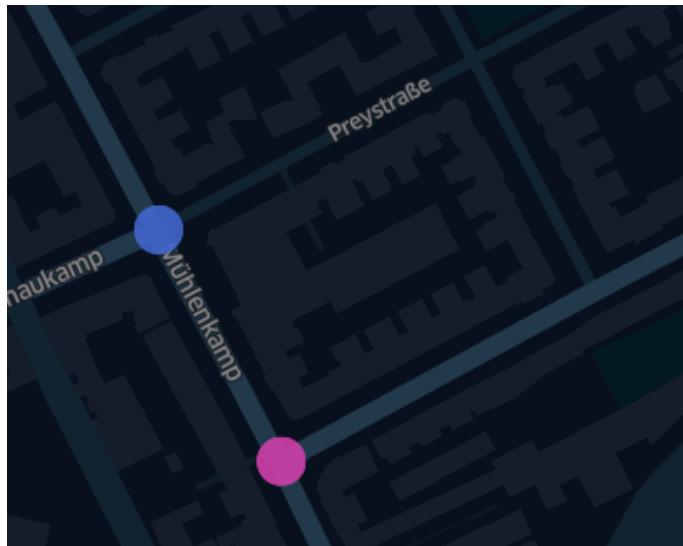


Abbildung 5.1.24.: Startpunkte des Fahrrades (pink) und das Auto (blau)

Erwartetes Verhalten

Trifft der Radfahrer auf das langsame Fahrrad, soll er diesem unfallfrei folgen und nicht versuchen, es zu überholen.

Verhalten des Radfahrers

Abbildung 5.1.25 zeigt, dass der Autofahrer, sobald er das Fahrrad erreicht, seine Geschwindigkeit verringert und anschließend mit einem gewissen Abstand folgt.



Abbildung 5.1.25.: Simulation des Verhaltens eines Autos (blau) bei einem langsamen vorausfahrenden Radfahrer (pink)

1.9. Isochrone Analyse

Bei der isochronen Analyse wird um einen Startpunkt herum für den angegebenen Verkehrstypen, hier das Fahrrad, geprüft, wie weit dieser innerhalb einer angegebenen Zeit kommen kann. Die Ausgangslage ist in Abbildung 5.1.26 für 300 (innerster Ring), 500, 700 und 900 Sekunden (äußerster Ring) dargestellt.

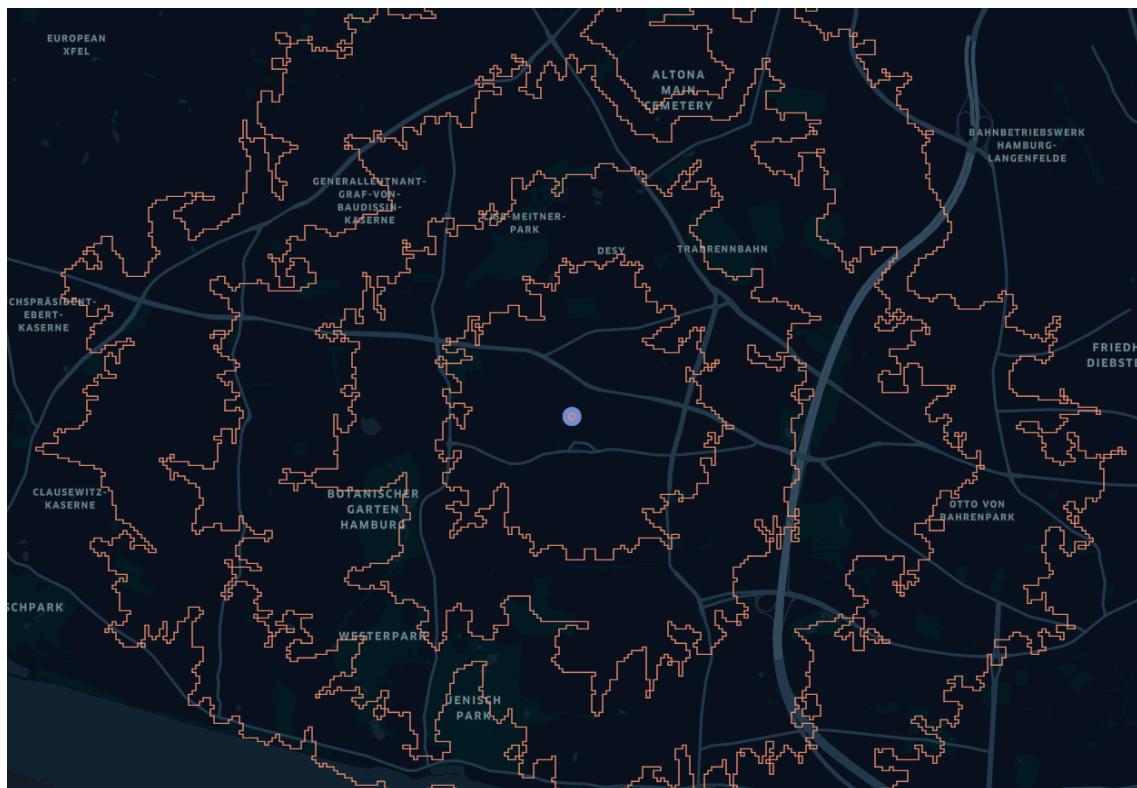


Abbildung 5.1.26.: Für einen Radfahrer erreichbare Positionen nach 300, 500, 700 und 900 Sekunden vom Startpunkt aus

Von diesem Startpunkt aus werden nun Fahrradfahrer in drei Unterschiedlichen Szenarien simuliert und untersucht, wie weit diese innerhalb der entsprechenden Zeit gekommen sind. Die Erwartungshaltung ist dabei, dass die Fahrradfahrer in der Simulation langsamer sind, als für sie laut der isochronen Analyse möglich wäre.

Nachfolgend sind jeweils die Vergleiche mit 30 normalen Fahrradfahrern mit einem beliebigen Ziel (links), drei Radler mit den unterschiedlichen Fahrertypen (rechts; aggressiv - blau, normal - gelb, defensiv - grün) und 20 Radfahrern gemeinsam mit 500 Pkws, jeweils unter Verwendung von Lichtsignalgebern, dargestellt.

300 Sekunden

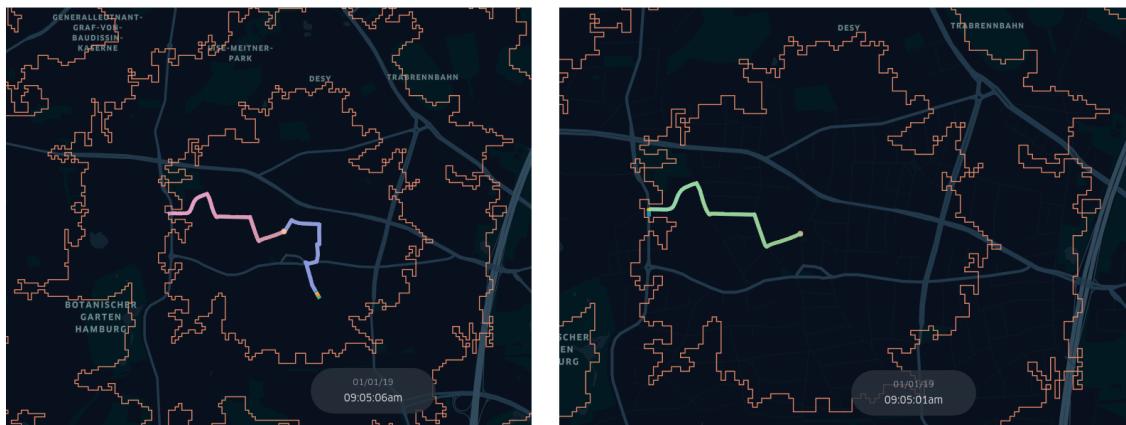


Abbildung 5.1.27.: Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 300 Sekunden vom Startpunkt aus

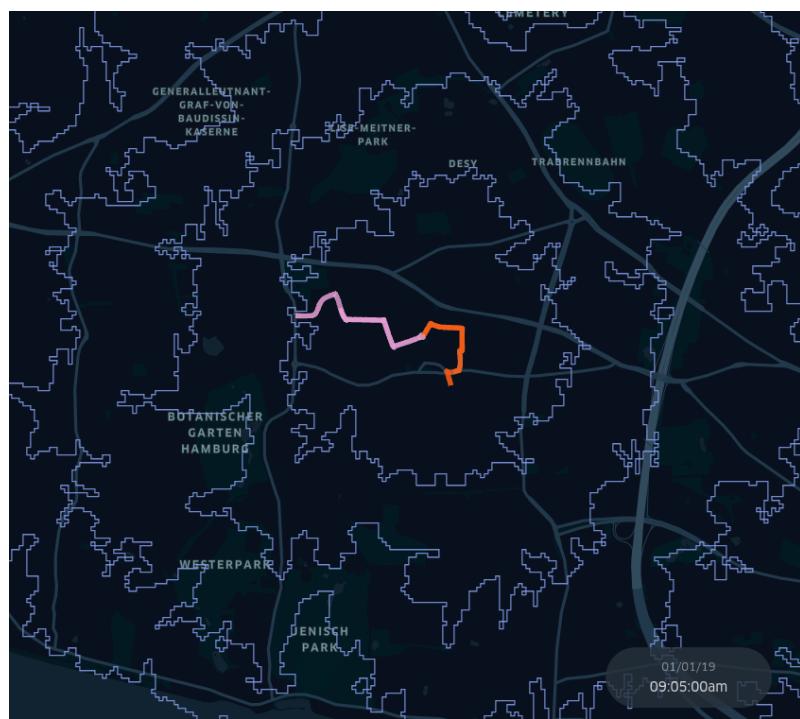


Abbildung 5.1.28.: Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 300 Sekunden vom Startpunkt aus

Nach 300 zeigt sich in beiden Abbildungen, dass die Radfahrer je nach gewählter Strecke das mögliche „Ziel“ exakt erreichen können. Wählen sie jedoch eine weniger günstige Strecke, kommen sie etwa 30 Prozent weniger weit, als möglich gewesen wäre. Zudem lässt sich erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Fahrertypen nach 300 Sekunden

sehr gering ausfallen. Auch wenn sie sich die Straße mit Pkws teilen, erreichen die Agenten auf der gut gewählten Strecke das Ziel. Bei der anderen Strecke fällt die Beeinflussung allerdings mehr auf und die Radfahrer verfehlten das Ziel um knapp die Hälfte.

500 Sekunden



Abbildung 5.1.29.: Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 500 Sekunden vom Startpunkt aus

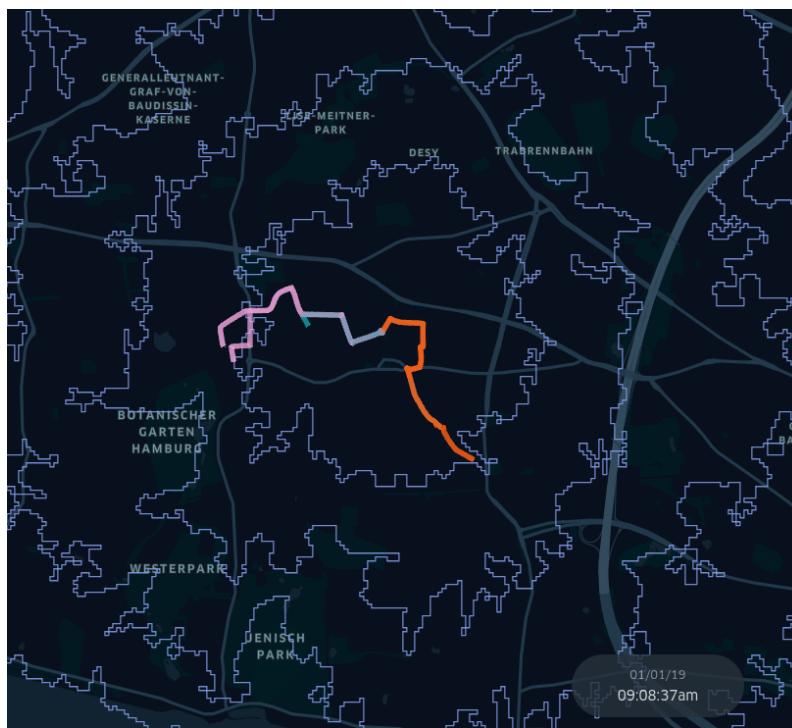


Abbildung 5.1.30.: Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 500 Sekunden vom Startpunkt aus

Auch hier kann man erkennen, dass die Wahl der Strecke einen großen Einfluss hat. Die

Radler, welche weiterhin zum Rand der Ringe streben, kommen bei der günstig gewählten Strecke fast bis zum 500-Sekunden-Ring, erreichen ihn jedoch nicht. Bei der weniger günstigen Strecke erreichen die Radler lediglich den 300-Sekunden-Ring und verfehlten das Ziel somit stark. Auch die unterschiedlichen Fahrertypen erreichen den Ring nicht und bewegen sich im Vergleich wenig fort. Hier fällt der Einfluss der Autos stärker aus. So sind auf beiden Strecken die Radler nicht weit von der 300-Sekunden-Grenze entfernt und somit zu langsam.

700 Sekunden



Abbildung 5.1.31.: Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 700 Sekunden vom Startpunkt aus

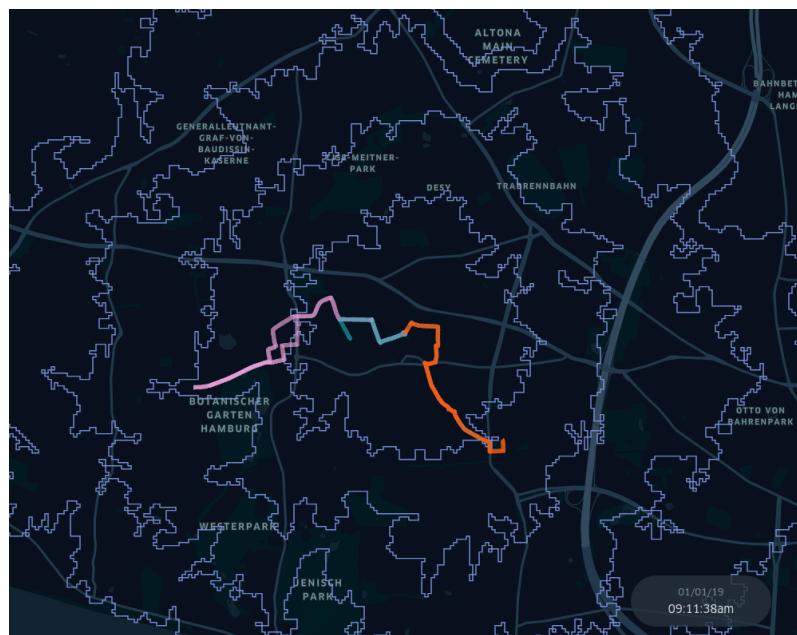


Abbildung 5.1.32.: Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 700 Sekunden vom Startpunkt aus

Mit Fortschreiten der Simulation bewegt sich nur noch eine Gruppe von Radfahrern in

Richtung des äußersten Ringes. Jedoch verfehlt auch diese das 700-Sekunden Ziel, wenn auch eher gering. Auch die unterschiedlichen Fahrertypen erreichen den Ring nicht. Dies fällt noch stärker aus, wenn sie sich die Straße mit Autos teilen. In dem Fall haben die Radfahrer in den Simulationen nicht einmal den 500-Sekunden-Ring erreicht.

900 Sekunden

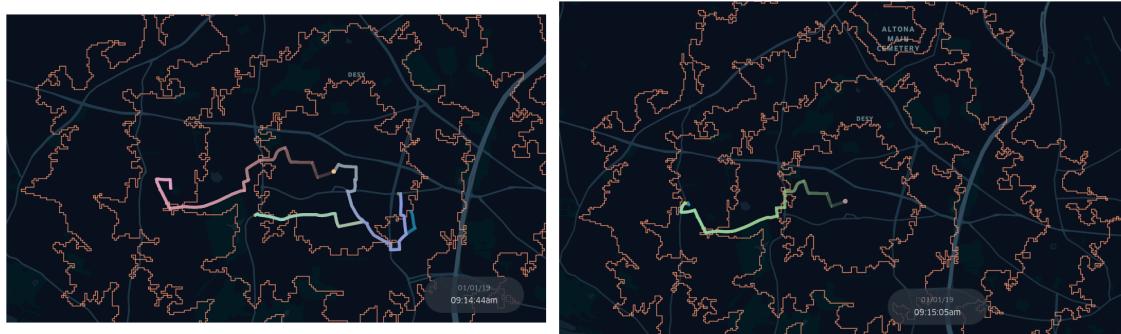


Abbildung 5.1.33.: Für Radfahrer erreichbare Positionen nach 900 Sekunden vom Startpunkt aus

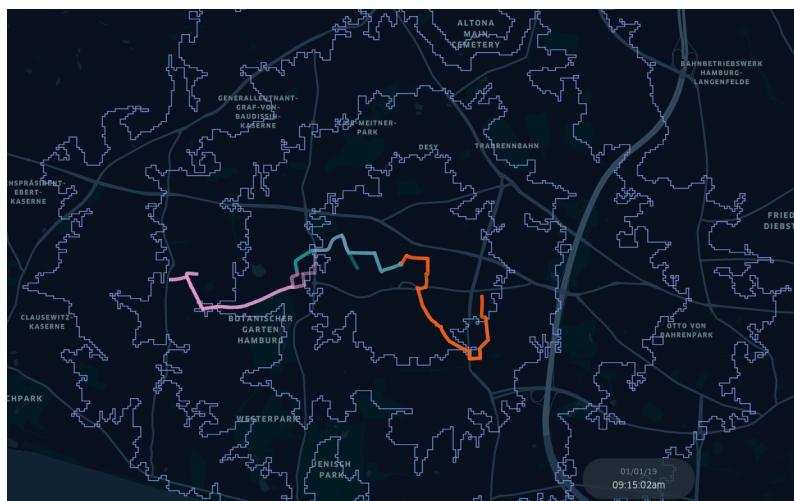


Abbildung 5.1.34.: Für Radfahrer mit 500 Pkws erreichbare Positionen nach 900 Sekunden vom Startpunkt aus

Eine Auswertung nach 900 Sekunden ist aufgrund der vom Fahrrad-Agenten gewählten Routen nur bei der Simulation mit 500 Pkws möglich. In den anderen beiden haben die Agenten die Richtung kontraproduktiv gewechselt und fahren nicht mehr dem Ring entgegen. Bei der Simulation gemeinsam mit 500 Pkws kann man allerdings erkennen, dass die Radfahrer von der 900-Sekunden-Grenze weit entfernt sind.

Innerhalb der isochronen Analyse zeigt sich in jeder Simulation in jedem Zeitschritt, dass die Fahrrad-Agenten die Ringe nur zu Beginn erreichen können und anschließend stets langsamer Vorankommen. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da die Agenten von Lichtsignalgebern und anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst werden. Ob die Beeinflussung jedoch in einem vertretbaren Umfang vorliegt oder zu hoch ausfällt, kann hier nicht beurteilt werden. Für eine Aussage diesbezüglich müssen weitere Untersuchungen erfolgen.

1.10. Untersuchung der Laufzeit

Um die prinzipielle Eignung der Fahrräder und des implementierten Wiedemann 99 Vorgehensmodells in Simulationen zu untersuchen, werden zwei Zeitmessungen durchgeführt. Dabei wird jeweils die Dauer eines Ticks gemessen. Im ersten Schritt wird das Vorgehensmodell untersucht. Dazu werden Radfahrer mit dem Wiedemann 99 Modell mit Radfahrern mit dem Vorgehensmodell, welches für motorisierte Fahrzeuge genutzt wird, dem Intelligent Driver Modell, verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1.35 dargestellt. Dabei ist die Abbildung für die Übersichtlichkeit nach oben beschränkt.

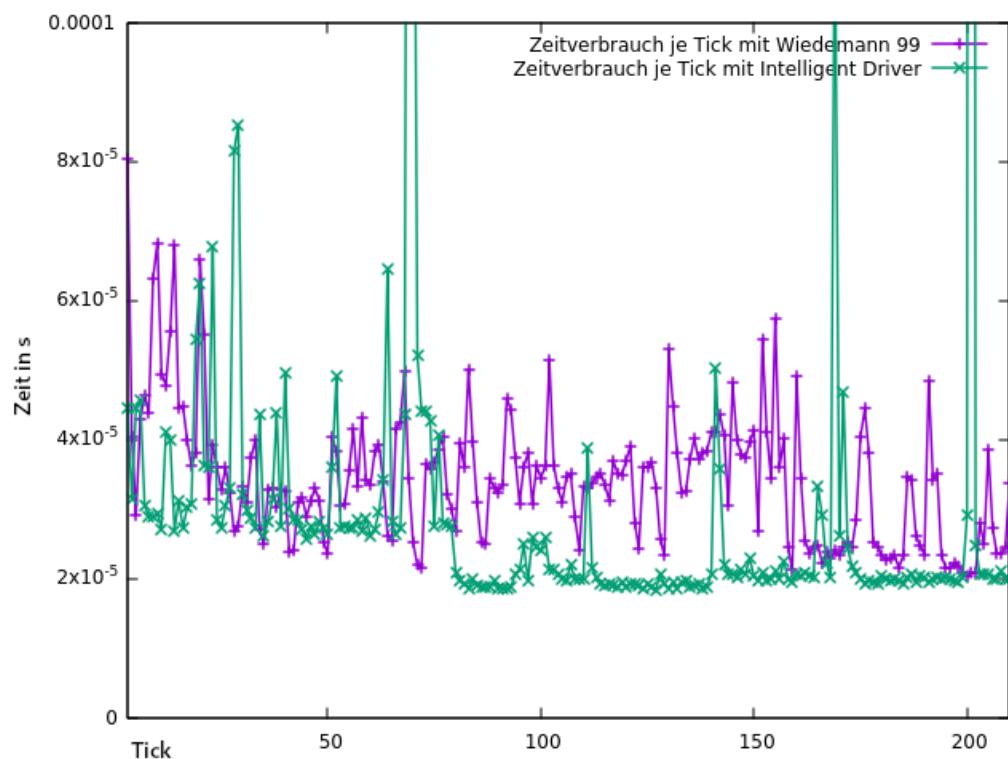


Abbildung 5.1.35.: Vergleich der Dauer eines Ticks eines Fahrrades mit Wiedemann 99 und Intelligent Driver (ID) als Verhaltensmodell

Es zeigt sich, dass in der Regel der Zeitbedarf des Intelligent Driver Modells geringer ausfällt als der des Wiedemann 99 Modells. Allerdings gibt es beim ID einige starke Aus-

schläge. Gemittelt benötigt das Wiedemann 99 Modell 0,0001566 s und das Intelligent Driver Modell 0,0001353 s und ist somit 0,0000213 s schneller.

Der zweite Schritt untersucht die Laufzeit von Personenkraftwagen mit Intelligent Driver und Fahrrädern mit Wiedemann 99. Abbildung 5.1.36 zeigt zunächst eine grobe Übersicht des Zeitbedarfs, welcher in Abbildung 5.1.36 detailliert und nach oben begrenzt dargestellt wird.

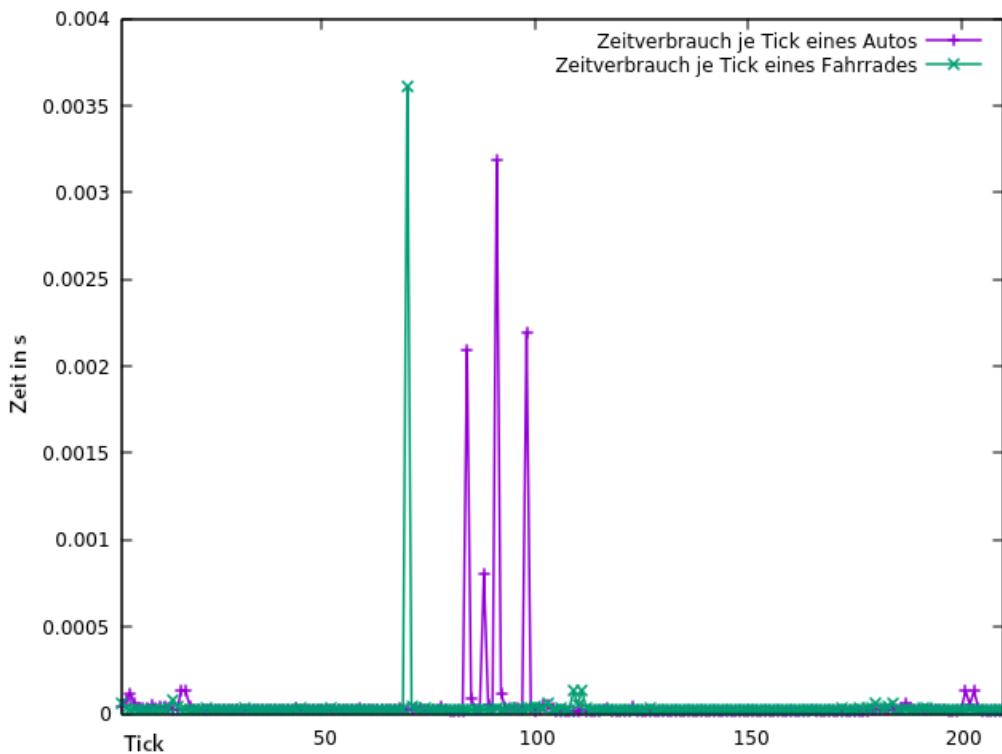


Abbildung 5.1.36.: Übersicht der Dauer eines Ticks von einem Auto und einem Fahrrad

Bereits in der ersten Grafik werden deutliche Unterschiede sichtbar. Zwar zeigen sowohl Radler als auch Autofahrer deutliche Ausschläge, jedoch sind es bei den Personenkraftwagen deutlich mehr.

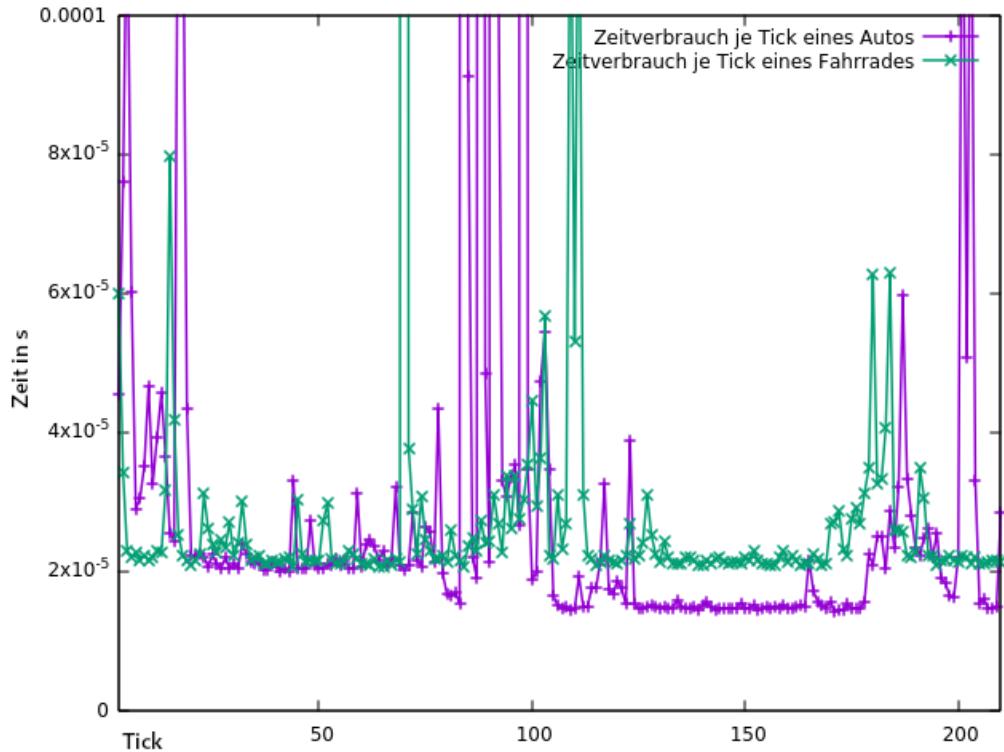


Abbildung 5.1.37.: Vergleich der Dauer eines Ticks von einem Auto und einem Fahrrad im Detail

Auch in der Detailansicht wird sichtbar, dass es diverse zeitliche Ausschläge gibt. Zudem fällt auf, dass es beim Auto zwar mehr Ausschläge gibt, der Zeitbedarf jedoch häufig unter dem des Fahrradfahrers liegt. Auch hier werden die Berechnungsdauern gemittelt: Beim Pkw ergibt sich eine Dauer von 0,0001686 s, beim Fahrrad von 0,0001442 s. Damit ist die Simulation von Fahrradfahrern trotz des langsameren Vorgehensmodells 0,0000244 s schneller.

2. Untersuchung der Forschungsfragen

Im folgenden Abschnitt werden die in Kapitel 1 Abschnitt 1 vorgestellten Forschungsfragen untersucht. Für die meisten davon werden geeignete Simulationen im gewählten Bezirk Altona auf der Straße beziehungsweise auf Radwegen durchgeführt. Dazu werden jeweils eine gewisse Anzahl von Agenten und, bei Nutzung der Straße, Lichtsignalgeber in diesem Bereich für jeweils ein beziehungsweise zwei Stunden simuliert. Jede dieser Simulationen wird zehn Mal durchgeführt. Die gewählten Strecken der Agenten sind in der Regel zufällig aber mit einer Route versehen¹. Auf Basis der Simulationsergebnisse werden Bewegungsprofile für die einzelnen Agenten erstellt und für ausgewählte Agen-

¹Dies entspricht einem DriveMode von 2.

ten² untersucht. Diese Untersuchung umfasst zum einen das Ermitteln der Reisezeit und zum anderen der in dieser Zeit zurückgelegten Strecke. Daraus wird die Geschwindigkeit ermittelt und über alle analysierten Agenten des gleichen Typs der Simulation gemittelt. Nachfolgend werden die Parameter, welche für die Fahrrad- und Pkw-Agenten genutzt werden, vorgestellt.

Parameter	Wert
Fahrrad	
Länge des Fahrrades	1,9 m
Höhe des Fahrrades	1 m
Breite des Fahrrades	0,6 m
Maximale Geschwindigkeit	9 m/s (= 32,4 km/h)
Fahrmodus	2
Gewicht des Fahrradfahrers	60,25 kg
Gewicht der Ladung des Fahrrades	0 kg
Startgeschwindigkeit des Fahrrades	0 m/s
Fahrertyp	Normal
Fahrradtyp	City
E-Bike	X
Pkw	
Länge des Autos	5 m
Maximale Geschwindigkeit	13,89 m/s (= 50 km/h)
Fahrmodus	2
Startgeschwindigkeit	0 m/s
Maximale Beschleunigung	0,73 m/s ²
Maximale Verzögerung	1,67 m/s ²

Tabelle 5.2.6.: Simulationsparameter für die Simulationen für die Untersuchung der Forschungsfragen

Zu allen durchgeführten Simulationen ist anzumerken, dass das Überholen weder von Fahrradfahrern noch von Pkws durchgeführt werden kann. Dies kann die Ergebnisse dahingehend beeinflussen, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit geringer ausfällt, als sie mit der Möglichkeit zu Überholen wäre. Für eine abschließende Bewertung müssen die Fragen nach der Hinzunahme dieser Funktion neu untersucht werden.

²In Summe werden etwa 10% der simulierten Agenten eines Durchlaufs analysiert.

Wie muss ein geeignetes Radfahrer-Modell aussehen? Welche Unterschiede hat ein Fahrrad-Verkehrsmodell zu einem Verkehrsmodell für Autos? Welche Parameter sind für das Fahrrad-Modell zu wählen? Welche Anpassungen an bestehenden Verhaltensmodellen sind für Fahrräder vorzunehmen? Welche Routen nutzen Radfahrer im Gegensatz zu Autofahrern?

Die oben genannten Fragen sind bereits ausführlich in den Kapiteln 3 und 4 betrachtet worden und deshalb werden hier lediglich kurz die Ergebnisse zusammen gefasst.

Ein geeignetes Modell für Fahrradfahrer weicht hinsichtlich des Verhaltens bereits durch die unterschiedliche Antriebsart ab und ähnelt damit eher dem Verhalten von motorisierten Fahrzeugen während eines Staus. Der gravierendste Unterschied ist wohl die maximal mögliche Beschleunigung von normalen Fahrrädern im Vergleich zu Personenkraftwagen. Entsprechend muss mindestens dieser Parameter angepasst werden. Durch die geringere Geschwindigkeit ergeben sich ebenfalls Änderungen beim Sicherheitsabstand. Andere Veränderungen hängen stark vom gewählten Verhaltensmodell ab.

Hinsichtlich der Routen gibt es sowohl Routen, welche von Fahrradfahrern nicht genutzt werden dürfen, wie Autobahnen, aber auch Wege, welche nur für Fahrradfahrer freigegeben sind (wie beispielsweise Radwege). Programmatisch unterscheidet sich dies momentan allerdings nur durch Nutzung der Layer. So können Radfahrer auf dem BicycleLayer Radwege nutzen. Jedoch können diese, sofern sie auf dem CarLayer fahren, derzeit auch Autobahnen nutzen.

Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf der Fahrbahn fahren? Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf dem Radweg fahren?

Erwartete Ergebnisse

Es wird davon ausgegangen, dass Fahrradfahrer mit anderen Verkehrsteilnehmern auf der Straße langsamer vorankommen als auf dem Radweg. Fahren lediglich Radfahrer, ist die Annahme, dass die Geschwindigkeit auf beiden Wegarten ähnlich ausfällt. Dies liegt daran, dass in Städten auch Radwege Kreuzungen queren und entsprechend an Ampeln halten müssen.

Durchgeführte Simulationen und Ergebnisse

Um zu untersuchen, wie sich die Nutzung der Straße allein beziehungsweise zusammen mit Personenkraftwagen auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit einhergehend Reisezeit von Fahrradfahrern auswirkt, werden unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Im ersten Schritt wird betrachtet, wie sich das Fahren auf der Straße allein beziehungsweise mit einer gewissen Anzahl von Pkws auswirkt. Abbildung 5.2.38 zeigt

1000 Fahrräder mit und ohne Pkws auf der Straße.

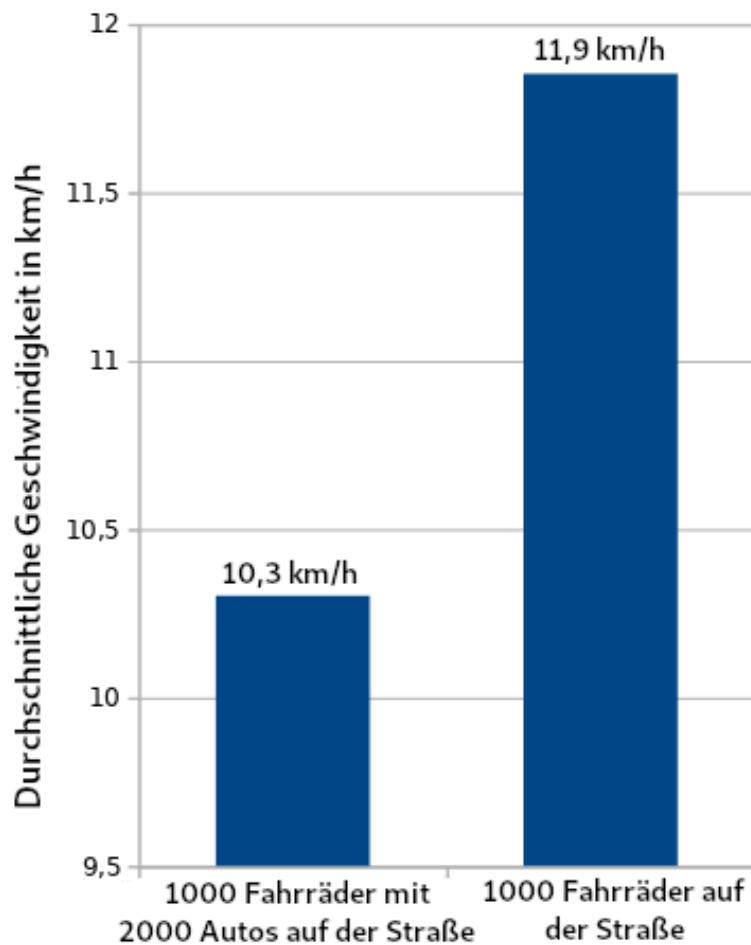


Abbildung 5.2.38.: Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Fahrrädern und 2000 Autos mit 1000 Fahrrädern ohne Autos auf der Straße

Es zeigt sich, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit von 1000 Radfahrern bei der gemeinsamen Nutzung der Straße mit 2000 Autos zu einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $10,3 \text{ km/h}$ führt. Sind die Radler allein auf der Straße, können sie im Mittel $11,9 \text{ km/h}$ erreichen.

Diese Beeinflussung durch Pkws zeigt sich ebenfalls in nachfolgender Abbildung 5.2.40. Hier wird ein einzelner Fahrradfahrer gemeinsam mit 0, 1000, 1500, 1800, 2000, 2200 und 2500 Autos simuliert. Für diese Simulationen weicht der gewählte DriveMode der Fahrradfahrer von dem oben genannten ab. Es wird mit DriveMode 3 ein fixer Start- und Endpunkt (Abbildung 5.2.39) angegeben.

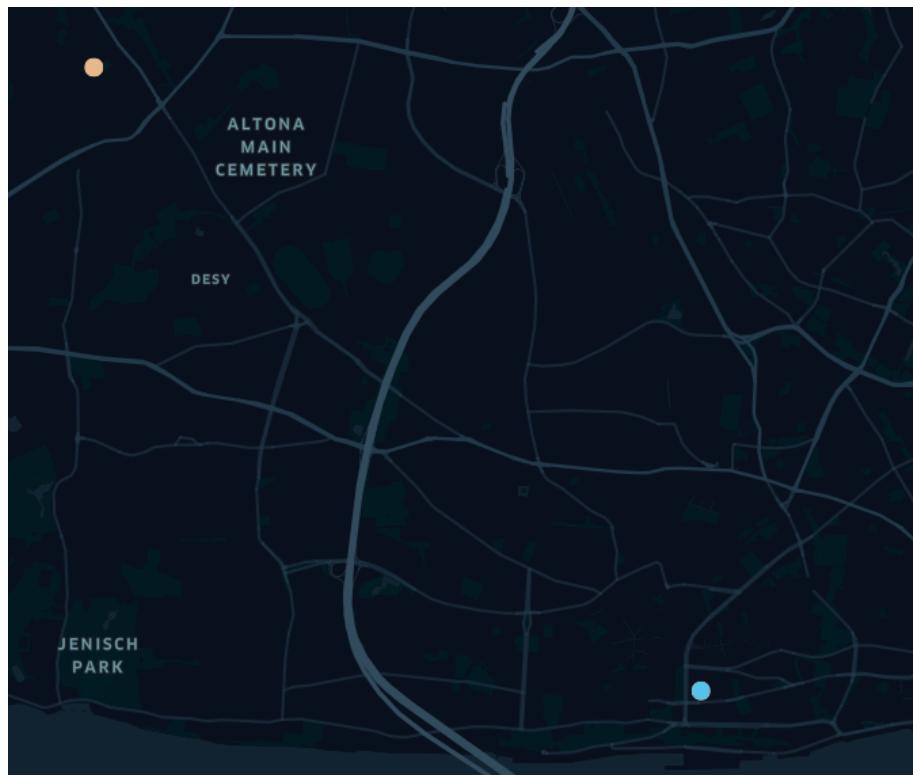


Abbildung 5.2.39.: Start- (gelb) und Endpunkt (blau) der Fahrradfahrer

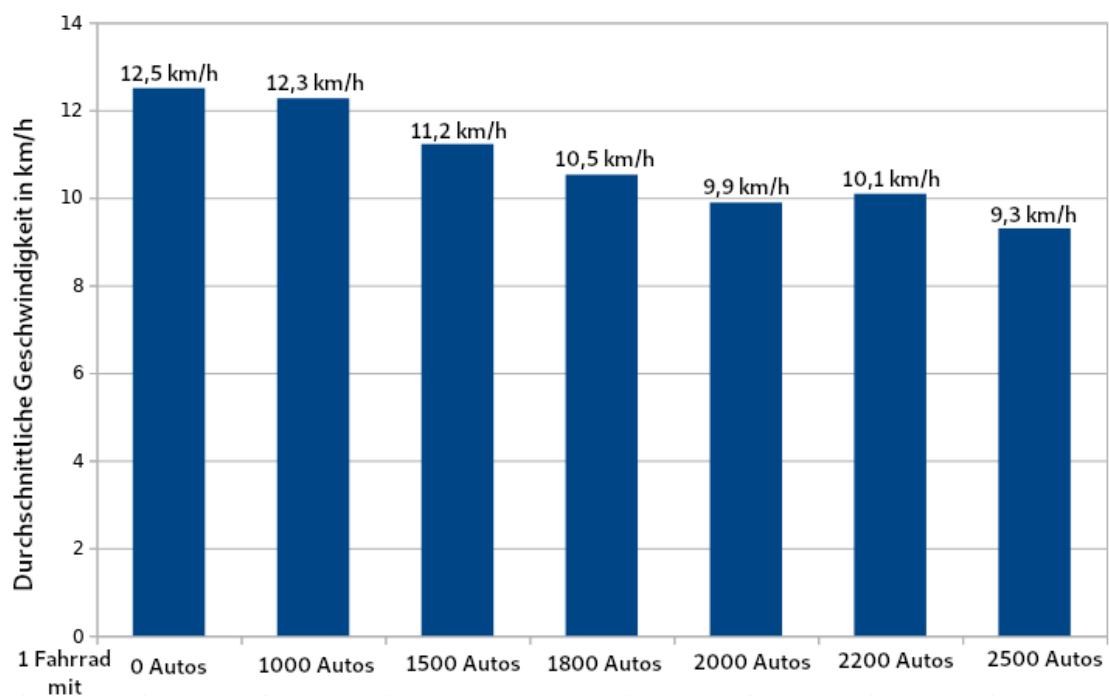


Abbildung 5.2.40.: Vergleich der Geschwindigkeit eines Fahrrades mit 0 bis 2500 Autos auf der Straße

Fährt der Radfahrer allein auf der Straße, erreicht er eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $12,5 \text{ km/h}$. Je mehr Pkws hinzukommen, desto langsamer kommt dieser voran. Dabei ist die Veränderung jeweils eher gering in Schritten von maximal $1,1 \text{ km/h}$. Zuletzt wird untersucht, ob Fahrradfahrer allein auf der Straße schneller oder langsamer vorankommen im Vergleich zu Radwegen. Dazu werden jeweils 1000 Radler auf der Straße und auf dem Fahrradweg simuliert. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 5.2.41 dargestellt.

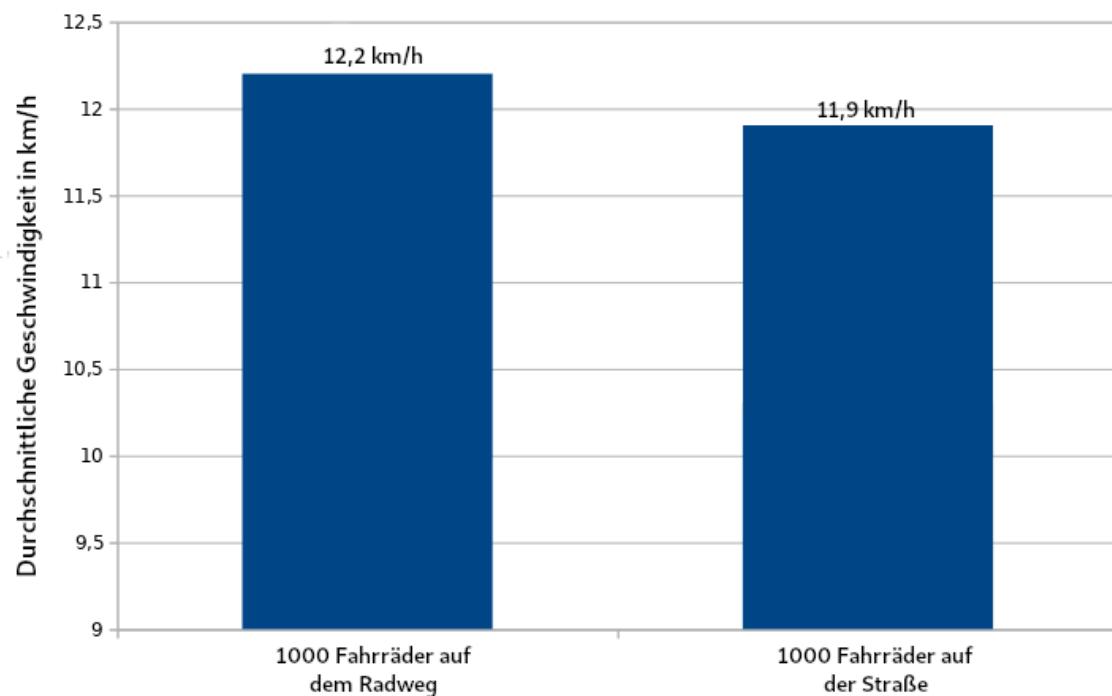


Abbildung 5.2.41.: Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Fahrrädern und 2000 Autos mit 1000 Fahrrädern ohne Autos auf der Straße

Dabei kann man erkennen, dass in diesem Fall die Geschwindigkeiten im Vergleich sehr nah beieinander liegen.

Beurteilung der Ergebnisse

In allen durchgeführten Experimenten zeigt sich, dass es für Fahrradfahrer kaum einen Unterschied macht, ob diese ohne andere Verkehrsteilnehmer auf der Fahrbahn oder auf dem Radweg fahren. In einem realistischeren Szenario unter Zunahme einer gewissen Anzahl von Personenkraftwagen zeigt sich, dass Radfahrer beim Fahren auf der Straße sehr stark durch die anderen Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden und die Reisezeit sich durch die Reduzierung der durchschnittlichen Geschwindigkeit erhöht. Entsprechend ist die Geschwindigkeit auf dem Radweg im Vergleich zur Geschwindigkeit auf der Straße mit anderen Verkehrsteilnehmern höher³.

³Bei 1000 Fahrrädern mit 2000 Pkws auf der Straße: $10,3 \text{ km/h}$, 1000 Fahrräder auf dem Radweg $12,2 \text{ km/h}$

Die starke Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer und die geringe Abweichung bei der Nutzung von Radweg und Straße entsprechen dem erwarteten Verhalten.

Welche Auswirkungen auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit hat die Verwendung von ausschließlich Fahrrädern auf der Straße? Wie verändert sich die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Radfahrern, wenn es mehr Radfahrer auf der Straße gibt?

Erwartete Ergebnisse

Fahren Radfahrer allein auf der Straße, werden diese lediglich durch die Umgebung und andere Fahrradfahrer beeinflusst. Dadurch wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit höher ausfällt als bei gemeinsamer Nutzung mit anderen Verkehrsteilnehmern aber mit zunehmender Anzahl Fahrradfahrer wieder abnimmt.

Durchgeführte Simulationen und Ergebnisse

Wie oben bereits erwähnt, macht es bei gleicher Anzahl von Fahrrädern lediglich einen minimalen Unterschied zwischen der Nutzung der Straße und des Radweges. Wie sich jedoch die Anzahl von Fahrrädern als Alleinnutzer auf der Fahrbahn auf die Fortbewegung auswirkt, wird nachfolgend untersucht. Dazu werden unterschiedliche Zahlen von Fahrrädern simuliert und die durchschnittliche Geschwindigkeit ermittelt. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 5.2.42 dargestellt.

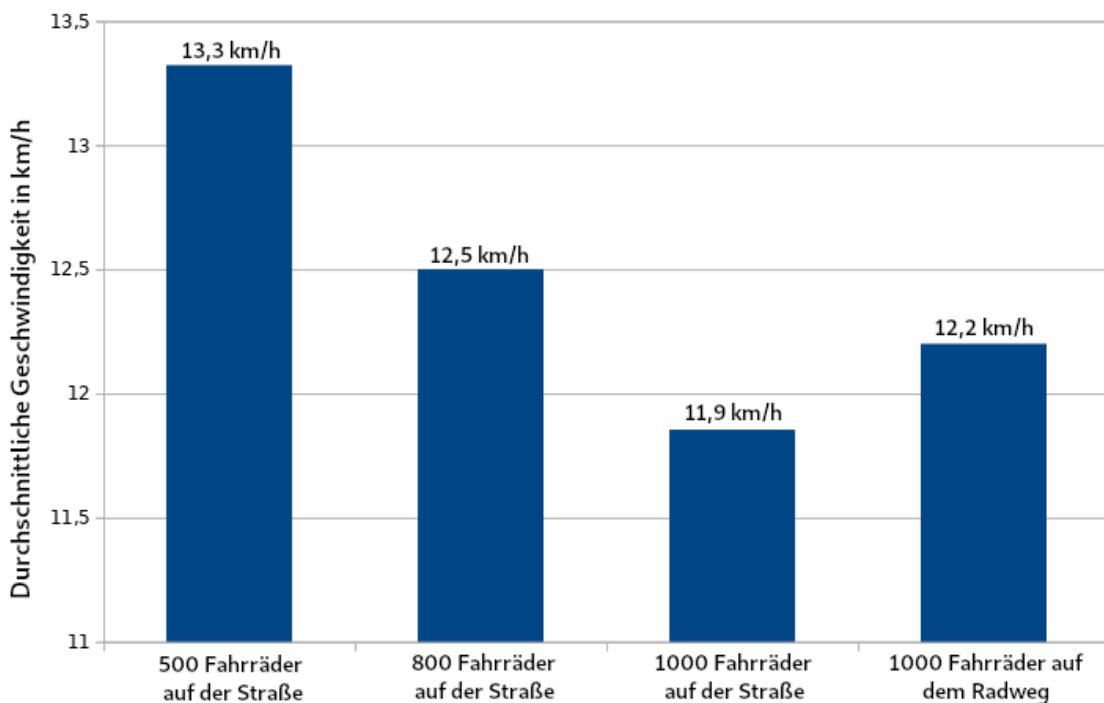


Abbildung 5.2.42.: Vergleich der Geschwindigkeit von 500, 800 und 1000 Fahrrädern auf der Straße mit 1000 Radfahrern auf dem Radweg

Die Grafik zeigt deutlich, dass eine Erhöhung des Fahrradverkehrs zu einer Beeinflussung der Geschwindigkeiten der Radler führt. So verringert sich die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrradfahrer bereits bei einer Verdopplung (von 500 auf 1000) zu einer Reduktion von durchschnittlich $1,4 \text{ km/h}$.

Beurteilung der Ergebnisse

Es lässt sich erkennen, dass auch Fahrradfahrer untereinander zu einer Beeinflussung der Geschwindigkeit führen und eine Erhöhung des Radverkehrs bei ausschließlicher Nutzung der Straße in diesem Szenario ebenfalls problematisch sein kann. Nichtsdestotrotz fällt die Geschwindigkeit immer noch größer aus, als bei der gemeinsamen Nutzung mit Pkws.

Auch hier zeigt sich das erwartete Verhalten: Die Radfahrer beeinflussen sich gegenseitig bei ihrem Vorankommen und so führt eine Erhöhung des Radverkehrs zu einer Verschlechterung der Reisezeit.

Dazu ist jedoch anzumerken, dass das Szenario gemäß Straßenverkehrsordnung erfolgt. Heißt, es können nicht beliebig viele Radfahrer nebeneinander auf der Straße fahren. Dies erscheint in einem Szenario ohne andere Verkehrsteilnehmer unrealistisch. Entsprechend sind die Ergebnisse nicht aussagekräftig genug.

Führt eine Erhöhung des Fahrradverkehrs mit einer Reduktion des Pkw-Verkehrs zu einer Verbesserung der durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit der verbleibenden Autos?

Erwartete Ergebnisse

Die Erwartungshaltung ist, dass es sich einerseits positiv auf die Geschwindigkeit der Pkws auswirkt, wenn es weniger davon gibt allerdings die Fahrradfahrer durch ihre langsamere Geschwindigkeit die Autos negativ beeinflussen. Somit sollte die Geschwindigkeit von einer moderaten Anzahl Pkws mit vielen Fahrradfahrern im Vergleich zu vielen Pkws allein immer noch schlechter ausfallen als die Geschwindigkeit bei vielen Pkws und mit einer moderaten Anzahl Fahrradfahrer.

Durchgeführte Simulationen und Ergebnisse

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, kann es im Rahmen der Bekämpfung des Klimawandels sinnig sein, die Anzahl an Personenkraftwagen zu reduzieren und im Zuge dessen beispielsweise den Fahrradverkehr zu erhöhen. Nachfolgend wird untersucht, wie sich solche Änderungen sowohl auf den Rad- als auch auf den Pkw-Verkehr auswirken.

Für die Untersuchung des Verkehrs der Autofahrer werden vier verschiedene Szenarien hinsichtlich der durchschnittlichen Geschwindigkeit miteinander verglichen. Bei den Szenarios handelt es sich um die Folgenden: 5000 beziehungsweise 2500 Personenkraftwagen fahren allein auf der Straße, 2000 Pkws fahren gemeinsam mit 1000 Fahrrädern

auf der Straße und 1000 Autos fahren auf der Straße, während 2000 Fahrradfahrer auf dem Radweg fahren.

Bei den Fahrradfahrern werden zunächst zwei von den oben genannten Szenarien untersucht: 2000 Fahrräder auf dem Radweg während 1000 Pkws auf der Straße fahren und 1000 Fahrräder welche gemeinsam mit 2000 Personenkraftwagen auf der Straße fahren. Beim dritten untersuchten Szenario werden 1000 Fahrräder ohne anderweitigen Verkehr auf der Fahrbahn simuliert.

Abbildung 5.2.43 zeigt die Auswirkung auf den Pkw Verkehr und Abbildung 5.2.44 die Auswirkung auf Fahrräder.

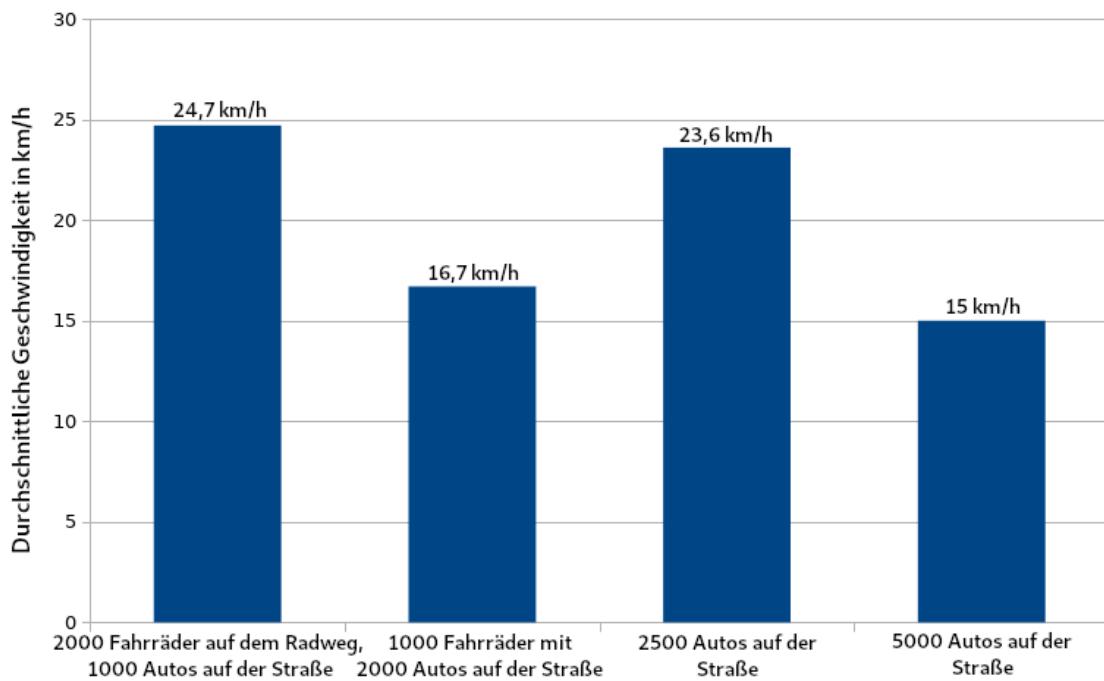


Abbildung 5.2.43.: Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 Pkws während 2000 Fahrrädern auf dem Radweg fahren mit 2000 Pkws gemeinsam mit 1000 Radfahrern auf der Straße und 2500 beziehungsweise 5000 Pkws allein auf der Straße

Bei Betrachtung der Auswirkungen auf die Geschwindigkeit der Autos fällt auf, dass die Geschwindigkeit von 2000 Pkws bei gemeinsamer Nutzung der Straße mit 1000 Fahrrädern stark von 1000 Autos auf der Straße mit 2000 Fahrrädern auf dem Radweg beziehungsweise 2500 Autos allein auf der Straße mit 8 km/h beziehungsweise 6,9 km/h abweicht. Damit liegt die Geschwindigkeit in diesem Fall ähnlich niedrig wie die von 5000 Pkws allein auf der Straße. Dies deutet an, dass eine Erhöhung des Fahrradverkehrs vor allem bei Nutzung des Radweges durch die Radfahrer zu einer Verbesserung für die Autofahrer führt.

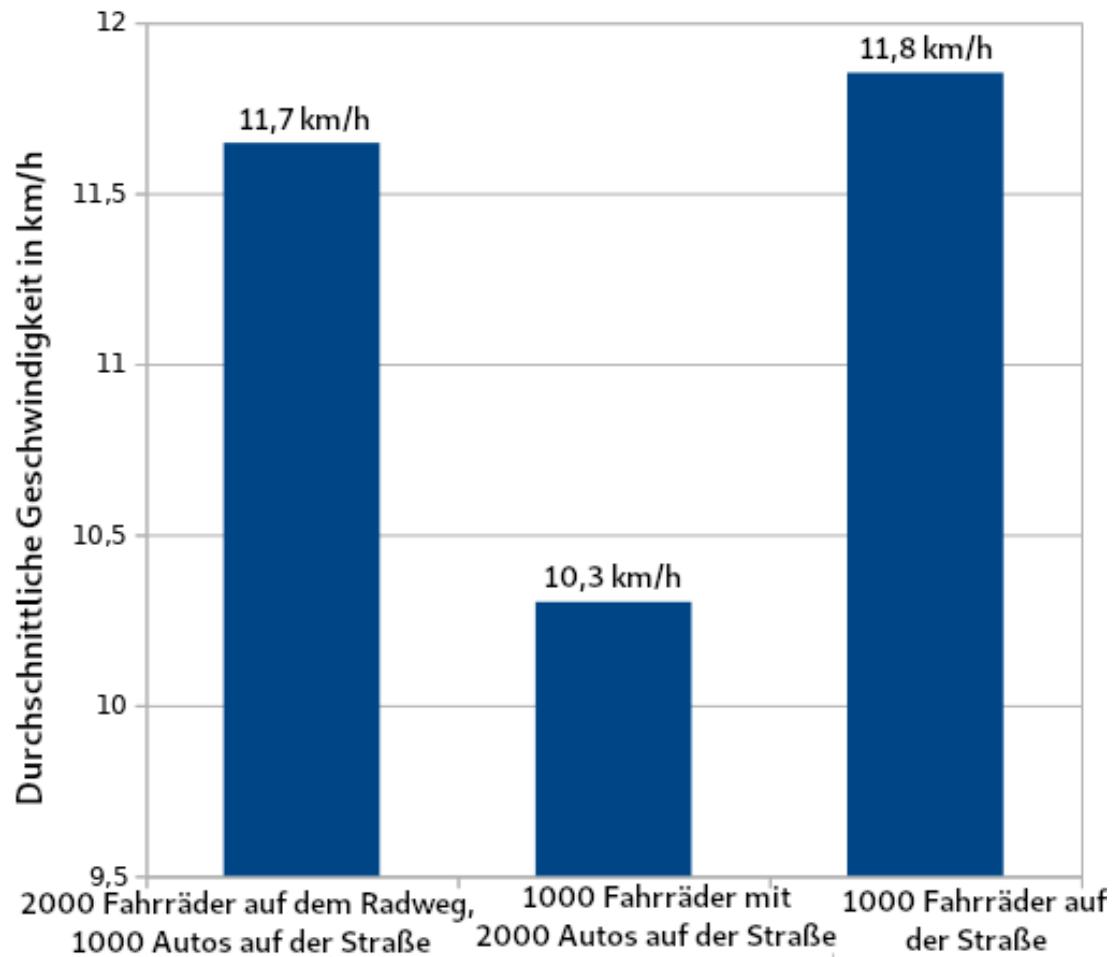


Abbildung 5.2.44.: Vergleich der Geschwindigkeit von 2000 Fahrradfahrern auf dem Radweg während 1000 Autos auf der Straße fahren mit 1000 Fahrrädern welche gemeinsam mit 2000 Pkws auf der Straße fahren und 1000 Radfahrern allein auf der Straße

Bei den Fahrradfahrern fällt die Beeinflussung durch die Pkws geringer aus, zeigt in Summe allerdings das gleiche Bild: Teilen sich Radfahrer und Pkws die Straße, erreichen beide im Mittel geringere Geschwindigkeiten als bei einer alleinigen Nutzung eines beliebigen Weges.

Es fällt auch auf, dass die Geschwindigkeit von 1000 Pkws (mit 2000 Fahrrädern auf dem Radweg) und 2500 Pkws mit 1 km/h nur minimal voneinander abweicht. Vergleicht man die Geschwindigkeit von 2000 Radlern auf dem Radweg mit der Geschwindigkeit von 1000 Fahrradfahrern (siehe Abbildung 5.2.42), zeigt sich mit einer Abweichung von 0,5 km/h ein ähnliches Bild. Dies kann möglicherweise an den besonders positiven beziehungsweise negativen Bewegungsprofilen der ausgewerteten Stichproben liegen oder an jeweils gewählten Routen der Agenten. Für eine endgültige Erklärung sind allerdings weiterführende und gegebenenfalls ausführlichere Untersuchungen nötig.

Beurteilung der Ergebnisse

Erwartet wurde, dass sich eine Reduktion der Pkws positiv aber eine Zunahme von Fahrrädern negativ auswirkt. Dies zeigt sich in Ansätzen auch in den durchgeführten Simulationen. Es lässt sich klar erkennen, dass eine Reduktion der Pkws positiv auswirkt aber eine Zunahme von Fahrrädern diese Verbesserung aufhebt. In diesem Fall kann die Nutzung von Radwegen Abhilfe schaffen und die Geschwindigkeit für alle Verkehrsteilnehmer verbessern. Dies lässt vermuten, dass ein Ausbau von Radwegen sich positiv auf die Nutzung und damit die Reisezeit auswirkt.

Auffällig ist auch, dass die Geschwindigkeit der Pkws in allen Fällen weit unter 50 km/h liegt. Dies erscheint als deutlich zu gering. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die Auswertung der Ergebnisse und die Ermittlung der Reisezeit fehlerhaft sind. Da jedoch, unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Geschwindigkeiten in Kapitel 3 Tabelle 3.1.12, auch die Radfahrer zu langsam zu sein scheinen, wird dies hier vernachlässigt.

Welche Auswirkungen haben Radfahrer auf den Straßenverkehr? Wie verändert sich die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Autofahrern, wenn Radfahrer auf der Fahrbahn fahren?

Erwartete Ergebnisse

Generell wird davon ausgegangen, dass sich Fahrradfahrer, sofern sie auf der Straße fahren, negativ auf die Reisezeit von Autos auswirken. Dies liegt unter anderem daran, dass Radler in der Regel keine 50 km/h fahren und das Überholen nicht immer möglich ist.

Durchgeführte Simulationen und Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung der oben stehenden Forschungsfragen wurde die Beeinflussung von Personenkraftwagen durch Fahrräder bereits häufig angedeutet beziehungsweise festgestellt. Nachfolgend wird diese allerdings noch einmal beleuchtet. Dazu wird die Geschwindigkeit von Personenkraftwagen mit und ohne Fahrräder untersucht. In Abbildung 5.2.45 werden die Ergebnisse von 1000 beziehungsweise 2500 Pkws allein und jeweils 2000 Pkws gemeinsam mit 500 beziehungsweise 1000 Fahrrädern auf der Straße dargestellt.

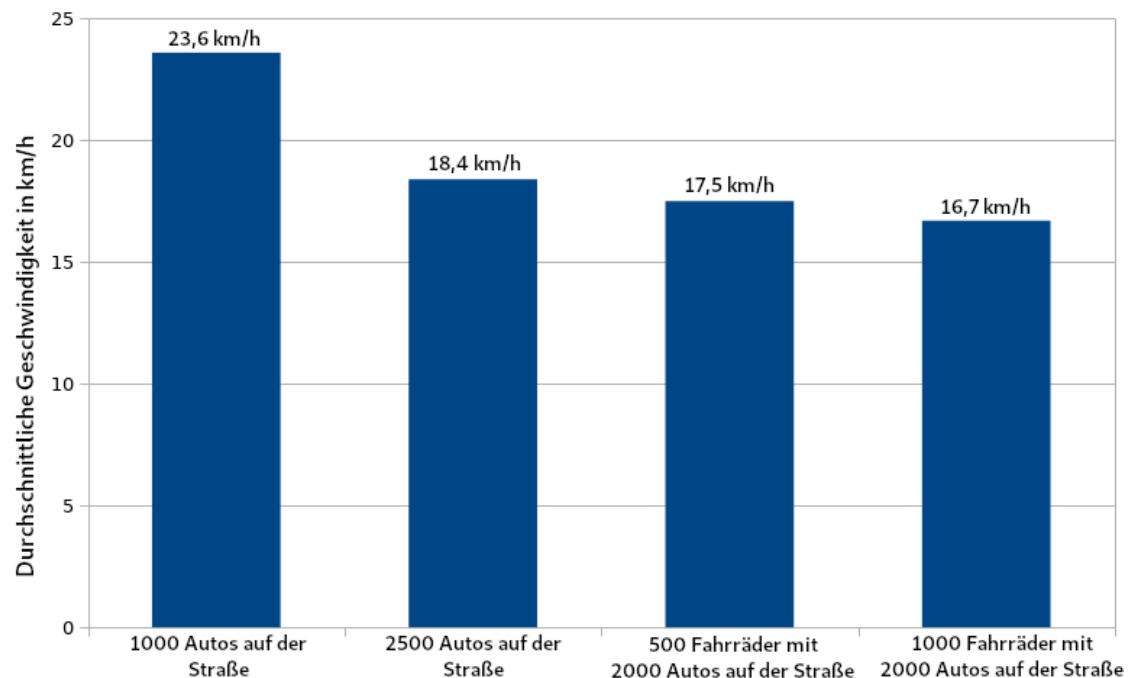


Abbildung 5.2.45.: Vergleich der Geschwindigkeit von 1000 beziehungsweise 2500 Pkws allein auf der Straße mit 2000 Personenkraftwagen gemeinsam mit 500 beziehungsweise 1000 Fahrradfahrern

Es zeigt sich deutlich, dass bereits 500 Fahrräder die Geschwindigkeit von Personenkraftwagen negativ beeinflussen und zu einer Verschlechterung führen.

Beurteilung der Ergebnisse

Wie oben bereits erwähnt, verschlechtert sich, wie erwartet, die Reisezeit von Personenkraftwagen, sofern sie sich die Straße mit Fahrradfahrern teilen müssen. Jedoch ist diese Beeinflussung im Vergleich geringer als vermutet. So führt eine Hinzunahme von 1000 Fahrrädern lediglich zu einer geringen Verzögerung. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben. Es ist beispielsweise möglich, dass die Pkws und Fahrradfahrer sich selten die gleichen Wege geteilt haben und somit nur geringe Beeinflussungen vorliegen können. Zum anderen könnte es Fehler bei den Interaktionen geben. Ein Beispiel dafür wäre, dass Autos die Fahrräder nicht geeignet berücksichtigen. Da oben unter 1.8.2 das Auto geeignet auf ein Rad reagiert hat, wird davon ausgegangen, dass es andere Ursachen hat als eine fehlerhafte Interaktion. Dadurch lässt sich allerdings nur mutmaßen, dass das erwartete Verhalten zutrifft.

Welche Auswirkungen haben Radschnellspuren, auch Radschnellweg oder Fast Lane genannt, auf den Radverkehr? Wie wird die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit von Fahrradfahrern beeinflusst, wenn diese auf einem Radschnellweg fahren? Welche Auswirkung auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und damit die Reisezeit hat das Hinzufügen eines Radschnellweges?

Die Auswirkungen von Radschnellspuren wurden im Rahmen des Projektes nicht untersucht. Dies liegt daran, dass zur Zeit in der Metropolregion Hamburg lediglich Machbarkeitsstudien für Radschnellwege durchgeführt werden und mit einer Umsetzung erst nach Abschluss dieser zu rechnen ist [rad]. Zudem sind die Unterschiede zwischen Radwegen und Radschnellwegen in Deutschland gering: Die Wege sind länger, möglicherweise mehrspurig, besser ausgebaut und in gut befahrbarem Zustand gehalten [Ace13]. Da das Überholen aber, wie in 1.4 beschrieben, derzeit nicht funktioniert, ist die Mehrspurigkeit für die Evaluation derzeit zu vernachlässigen. Auch wenn sich die Fahrbahnbeschaffenheit in der Realität stark auf das Vorankommen auswirkt, wird dies im SmartOpenHamburg Projekt (noch) nicht berücksichtigt. Entsprechend ist dies ebenfalls nicht relevant für die Geschwindigkeit beziehungsweise Reisezeit. Die Länge kann sich positiv auswirken, sofern dies so gelöst ist, dass Fahrradfahrer konsequent Vorfahrt haben und entsprechend nicht an Kreuzungen halten müssen.

Um eine Einschätzung auf die Frage geben zu können, werden 1000 Fahrradfahrer auf der Straße ohne Hinzunahme von Lichtsignalgeber simuliert. Die Ergebnisse weichen mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $12,4 \text{ km/h}$ allerdings nur minimal von der Geschwindigkeit mit Lichtsignalgebern ab ($11,9 \text{ km/h}$). Ob dies realistisch ist, muss in weiteren Simulationen untersucht werden.

3. Diskussion

In diesem Abschnitt wird auf Basis der Ergebnisse der Forschungsfragen mit Rückgriffen auf die bisherigen Kapitel die Erfüllung der Hypothesen, vorgestellt in Kapitel 1 Abschnitt 2, betrachtet.

Hypothese Eins: Das Verhalten von Radfahrern weicht im Verkehr von dem von Fußgängern und Personenkraftwagen ab

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an vielen Stellen untersucht, wie sich Fahrradfahrer im Verkehr verhalten. Dabei wurden sowohl Ähnlichkeiten zu Personenkraftwagen deutlich, wie beispielsweise die verschiedenen Fahrertypen, als auch Unterschiede. Jedoch sind diese Unterschiede nuancierter, als man zunächst erwarten mag. So zeigte sich, dass durch den nicht motorisierten Antrieb die Beschleunigungskurve, die Höhe der maximalen Beschleunigung, die maximale Geschwindigkeit und auch die maximale Verzöge-

rung abweichen. Zudem können Fahrradfahrer weit mehr Wege befahren, wie Radwege, Waldwege und Parks. Jedoch unterliegen beide der Straßenverkehrsordnung, welche bei Nutzung der Straße weitestgehend identisch ausfällt. In diesem Fall können Fahrradfahrer jedoch bei vielen Straßen aufgrund der geringen Breite und des häufig zu geringen Seitenabstandes innerhalb der gleichen Spur überholt werden und überholen. Durch die Nutzung von zusätzlichen Wegen interagieren Fahrradfahrer auch mit mehr Verkehrsteilnehmern wie beispielsweise Fußgängern bei einem Radweg direkt neben dem Fußweg.

Ob und inwiefern das Verhalten von Fahrradfahrern von dem von Fußgängern abweicht, wurde hier nicht untersucht. Jedoch ist davon auszugehen, dass das Verhalten ebenfalls unterschiedlich ist. Dies liegt unter anderem daran, dass Fußgänger sich sehr viel langsamer aber durch die geringeren Ausmaße flexibler bewegen können. So können diese sich einfach an Hindernissen vorbei „wurschteln“ ohne dabei eine Spur wechseln zu müssen beziehungsweise bestimmten Regeln zu folgen. Zudem dürfen Fußgänger nebeneinander gehen, während Radfahrer dies in der Regel nicht dürfen.

Abschließend ist die Hypothese zu mindestens 50 Prozent erfüllt: Das Verhalten von Fahrradfahrern mit normalen Fahrrädern weicht von dem von Personenkraftwagen und anderen motorisierten Fahrzeugen ab. Eine Abweichung zum Verhalten von Fußgängern wird vermutet, wurde allerdings nicht näher untersucht. Ob dies für alle Fahrradarten zutrifft oder nur für normale, nicht motorisierte Fahrräder kann auch nicht beurteilt werden.

Hypothese Zwei: Die Hinzunahme von Fahrradfahrer-Agenten hat Auswirkungen auf den Verkehrsfluss

Im obigen Abschnitt 2 zeigte sich in diversen Simulationen, dass die Hinzunahme von Fahrradfahrer-Agenten eine teils große Auswirkung auf den Verkehrsfluss der anderen Verkehrsteilnehmer hat. Zugleich hat sich ebenfalls herausgestellt, dass diese Beeinflussung wechselseitig ist und der Verkehrsfluss der Fahrradfahrer durch andere Agenten „gestört“ wird. Jedoch lässt die im Schnitt zu geringe Geschwindigkeit der Agenten an der Messmethode zweifeln und deutet auf Messfehler hin. Da diese jedoch sowohl bei Rad- als auch Autofahrern auftreten, kann diese Hypothese mit Vorbehalt als erfüllt betrachtet werden. Für eine abschließende Beurteilung müssen allerdings die Ergebnisse geprüft und gegebenenfalls ein anderes Verfahren gewählt werden.

Hypothese Drei: Das Hinzufügen von Schnellspuren wirkt sich auf Fahrradfahrer aus

Wie bereits bei der Untersuchung der zugehörigen Forschungsfragen erwähnt, wird die Auswirkung von Radschnellwegen hier nicht untersucht. Eine erste Untersuchung von Fahrradfahrern auf Straßen ohne Lichtsignalgeber deutet auf eine geringe Auswirkung hin. Diese Untersuchung ist allerdings nicht aussagekräftig genug, um die Hypothese

belegen oder widerlegen zu können. Für das Finden einer Antwort sind zum einen weitere Überprüfungen nötig und zum anderen müssen weitere Einflussfaktoren auf das Vorankommen des Radverkehrs hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht werden.

4. Technischer Ausblick

Im nachfolgenden Abschnitt werden einige mögliche Verbesserungen beziehungsweise Erweiterungen des umgesetzten Fahrradfahrer-Modells aufgezeigt.

Einbau bzw. Reparatur des Überholens

Obwohl die Evaluation des Modells in vieler Hinsicht eine gemäß Straßenverkehrsordnung zufriedenstellende Realisierung zeigt, fehlt eine funktionierende Umsetzung des Überholens. Dieses Problem ist bereits in Abschnitt 1.4 vorgestellt. Für die Durchführung von realistischen Simulationen ist es vonnöten, dass langsamere Fahrzeuge überholt werden können. Ein wichtiger nächster Schritt ist es entsprechend, das Überholen mit einem geeigneten Entscheidungsmodell, beispielsweise wie in Kapitel 3 Abschnitt 1.4.1 für Fahrradfahrer vorgestellt, zu realisieren und zu überprüfen. Dabei ist es nur ein erster Schritt, das Überholen durch Spurwechsel zu realisieren. Konsequenterweise muss auch das Überholen innerhalb einer (breiten) Spur mit geeignetem Seitenabstand eingeführt werden.

Erweiterung der Radfahrer

Im Rahmen des Konzeptes (Kapitel 3) wurde an diversen Stellen angedeutet, dass es hinsichtlich der Geschwindigkeit und des Verhaltens Unterschiede zwischen den Geschlechtern beziehungsweise Altersgruppen gibt. Damit die Simulationen realistisch sind, auch unter der Berücksichtigung von Tagesabläufen der Agenten, kann es sinnvoll sein, Fahrradfahrer um diese beiden Attribute zu erweitern. Zudem zeigte sich in Studien [Wal07], dass das Geschlecht einen Einfluss auf den Abstand beim Überholen hat.

Zusätzlich kann die Einführung von Helmen ein sinnvoller Schritt sein. So ließe sich eine Beeinflussung des Verhaltens von Radfahrern und anderen Verkehrsteilnehmern durch das Tragen eines Helmes darstellen. So zeigt eine Studie der Universität Jena, dass Fahrradfahrer mit Helm riskanter fahren als die ohne [Sch+19]. Zudem zeigen andere Studien [Wal07], dass auch das Tragen eines Helmes Einfluss auf den Seitenabstand beim Überholen von Fahrradfahrern hat.

Erweiterung der Fahrräder

Auch das Modell der Fahrräder kann erweitert werden. So ist eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Gänge eine denkbare Erweiterung. Diese können zu einem höheren Geschwindigkeitspotenzial führen [fah17] und somit das Fahren beeinflussen. Ebenfalls ist zu untersuchen und gegebenenfalls einzuführen, dass sich die Rahmengröße des Ra-

des auf die Geschwindigkeit auswirkt.

Eine weitere Möglichkeit ist die Implementierung von Pedelecs und E-Bikes. Dabei muss bei E-Bikes das Vorgehensmodell den motorisierten Antrieb berücksichtigen und die höhere Maximalgeschwindigkeit. Auch für Pedelecs muss das Beschleunigungsverhalten durch die Motorunterstützung und potenziell auch das Verzögerungsverhalten abweichend von normalen Fahrrädern modelliert werden.

Erweiterung des Verhaltens

Wie oben bereits erwähnt, halten sich die modellierten Fahrradfahrer an die Straßenverkehrsordnung. Beobachtet man Fahrradfahrer in der Realität, entsteht das Gefühl, dass dies nicht immer zutrifft. So fahren Radfahrer zeitweise auf der falschen Seite der Fahrbahn (entgegen der Fahrtrichtung), fahren über Rot oder kreuzen die Straße quer. Dieses abweichende Verhalten ist allerdings schwierig zu modellieren und sollte zunächst ausführlich in der echten Welt untersucht werden.

Auswirkungen auf das Verhaltensmodell

In der momentanen Realisierung wirkt sich vor allem der Typ des Fahrradfahrers auf das Verhaltensmodell aus. Denkbar ist jedoch auch, dass sich der Typ des Rades auf die maximale Geschwindigkeit und auch auf Parameter des Verhaltensmodells auswirkt. Beispielsweise fährt der Fahrer eines Lastenrades möglicherweise langsamer und vorsichtiger fährt als der Fahrer eines Rennrades.

Zusätzlich sollte durch geeignete Untersuchungen evaluiert werden, ob noch weitere Parameter des Wiedemann 99 Modells beeinflusst werden sollten und so das Verhalten noch realistischer gestaltet.

6. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Verkehrssimulations-Awendung des SmartOpenHamburg Projektes der MARS Arbeitsgruppe um die Möglichkeit Fahrradfahrer zu simulieren zu erweitern. Ein wesentlicher Bestandteil war dabei die Auswahl und Anpassung eines geeigneten Verhaltensmodells.

Bei Beginn des Projektes wurden einige Forschungsfragen im Kontext der Simulation von Fahrradfahrern definiert und daraus drei Hypothesen abgeleitet: Das Verhalten von Radfahrern weicht im Verkehr von dem von Fußgängern und Personenkraftwagen ab, die Hinzunahme von Fahrradfahrer-Agenten hat Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und das Hinzufügen von Schnellspuren wirkt sich auf Fahrradfahrer aus.

Anschließend folgte die Erstellung einer Übersicht von sechs populären Verhaltensmodellen für Personenkraftwagen, da es nach derzeitigem Kenntnisstand der Projektbeteiligten keine Verhaltensmodelle explizit für Fahrräder gibt: Follow-the-Leader, Optimal-Velocity, Fritzsche, Intelligent-Driver, Wiedemann 74 und Wiedemann 99. Anschließend erfolgte eine Beurteilung dieser hinsichtlich ihrer Eignung für die Verwendung bei Fahrradfahrern. Auf Basis dieser Einschätzung wurde das Wiedemann 99 Modell ausgewählt. Um festzustellen, ob und welche Anpassungen an dem Vorgehensmodell erfolgen mussten, wurden Charakteristika von Fahrradfahrern und Fahrrädern erfasst. Dabei handelt es sich bei den Radfahrern um unterschiedliche Typen von Fahrern, wichtige Kennzahlen wie Leistung, Masse und Maße eines Menschen sowie Angaben zur Nutzung des Fahrrades von verschiedenen Nutzergruppen. Die Fahrräder selber werden in Typen unterteilt und deren Eigenschaften wie Gewicht, Ladung, Maße und Geschwindigkeit erfasst. Zudem wurden E-Bikes beziehungsweise Pedelecs betrachtet. Es folgte eine Untersuchung, wie es sich mit der Verfügbarkeit von Fahrrädern bzw. E-Bikes unterschiedlicher Personengruppen beziehungsweise in unterschiedlichen Bundesländern verhält.

Nach der Betrachtung von Fahrrädern und deren Fahrern wurde das Verhalten von Radfahrern untersucht. Dies beinhaltete die geltende Straßenverkehrsordnung und die Wege, welche von diesen genutzt werden, wie beispielsweise Radwege, Straßen oder Einbahnstraßen entgegen der Fahrtrichtung.

Darauf folgte eine Übersicht über die Interaktionen mit der Umwelt beziehungsweise anderen Verkehrsteilnehmern. Hinsichtlich anderer Verkehrsteilnehmer handelt es sich zum einen um das Überholen und zum anderen um das Überholtwerden. Für Ersteres wird eine Entscheidungslogik, ob der Radler versuchen wird zu überholen, vorgestellt. Die Interaktionen mit der Umwelt erfolgen mit der Straße selbst in Form von Spurwechseln oder mit Lichtsignalanlagen.

Nach Sammlung der Eigenschaften und Verhaltensweisen erfolgte die Implementierung des Modells. Im Zuge dessen wurde das Wiedemann 99 Modell analysiert, näher erläutert und für die Nutzung für Fahrradfahrer angepasst. Dazu zählen die Veränderung der Berechnung der maximalen Beschleunigung, die Auswahl geeigneter Parameter und die Beeinflussung dieser durch Eigenschaften des Radlers wie den drei Fahrertypen: Normal, Aggressiv und Defensiv. Anschließend wurden Vergleiche zwischen der originalen Wiedemann 99 Umsetzung, der Implementierung im Rahmen des SUMO Projektes und der hier angepassten Variante durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die drei Varianten sich in verschiedenen Situation (ohne beziehungsweise mit stehendem / fahrendem Vordermann) unterscheiden aber die durchgeführten Anpassungen sich positiv auswirken. Des Weiteren erfolgte eine Beschreibung der Attribute der Modelle, von der Auswirkung bestimmter Eigenschaften wie dem Typ des Fahrers auf das Wiedemann 99 Modell und der verwendeten Konstanten wie beispielsweise die durchschnittliche und maximale Verzögerung.

Nachdem die Umsetzung durchgeführt wurde, folgte die Evaluation. Diese bestand zum einen aus der Durchführung von diversen Unit-Tests, welche das korrekte Verhalten der Fahrradfahrer-Agenten in verschiedenen Situationen belegen sollten. Im Rahmen dieser wurden das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, das Verhalten an Kreuzungen mit und ohne Lichtsignalangeber, Spurwechsel und Veränderungen an der Geschwindigkeitsbegrenzung betrachtet. Alle bis auf die Spurwechsel-Tests zeigten das erwartete Verhalten. Auf diese Tests einzelner Verhaltensweisen folgten Tests bezüglich der Interaktionen mit anderen Fahrradfahrern aber auch mit Personenkraftwagen. Ziel dieser Tests war zu erkennen, ob ein Fahrradfahrer-Agent geeignet auf seinen Vordermann reagiert und keinen Auffahrunfall verursacht. Zuletzt erfolgte eine isochrone Analyse, bei welcher geprüft wurde, ob die Fahrradfahrer-Agenten innerhalb von 300, 500, 700 und 900 Sekunden eine realistische Strecke zurückgelegt haben. In Summe zeigen die Tests, dass das gewählte Verhaltensmodell den weitestgehend Ansprüchen genügt.

Zuletzt wurde die Laufzeit eines Simulationsschrittes von Fahrradfahrern mit Personenkraftwagen beziehungsweise von Fahrradfahrern mit dem Wiedemann 99 und dem Intelligent Driver Modell verglichen. Es zeigt sich, dass die Laufzeiten sehr ähnlich sind aber die des Fahrrades etwas besser als die des Pkws.

Nachdem die Funktionalität des Modells als hinreichend bewertet wurde, wurden die Forschungsfragen mit der Durchführung von geeigneten Simulationen untersucht. Bei allen Forschungsfragen konnte das erwartete Verhalten festgestellt werden. Aus Basis der Ergebnisse wurden die drei aufgestellten Hypothesen untersucht. Dabei zeigte sich, dass zwei der drei, unter Vorbehalt der zu geringen Geschwindigkeit aller Agenten, zutreffen und die dritte aufgrund der fehlenden Realisierung von Radschnellwegen in Hamburg und der unklaren Differenzierung zwischen Radwegen und Radschnellwegen hier nicht untersucht werden konnte.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die multimodale Simulation von Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern hoch komplex ist aber für die effiziente Verkehrsplanung von Vorteil. Diese Arbeit bietet lediglich einen initialen Überblick über die Möglichkeiten in diesem Gebiet und dementsprechend viele Optionen für Weiterentwicklungen.

1. Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich vielfältige Optionen zu weiterer Entwicklung. Viele konkrete Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der gegenwärtigen Implementierung wurden bereits in Kapitel 5 Abschnitt 4 aufgezeigt. Obwohl das Wiedemann 99 Verhaltensmodell als geeignet erscheint, kann eine ausführliche Untersuchung anderer Verhaltensmodelle sinnvoll sein. Im Rahmen dieser können die Modelle auf Fahrradfahrer angepasst werden und anschließend Vergleichssimulationen in unterschiedlichen Szenarien durchgeführt werden. Auf diese Art kann das Vorgehensmodell ausgewählt werden, welches das realistischste Verhalten zeigt.

Eine aufwendige Alternative dazu ist das Entwickeln eines eigenen, maßgeschneiderten Vorgehensmodells. Mit diesem ließen sich realistische Simulation von Fahrradfahren durchführen. Dazu ist eine weitreichende Studie dieser, sowohl in „freier Wildbahn“ als auch in konstruierten Szenarien in kontrollierter Umgebung durchzuführen. Ein Teil davon ist die Erfassung von Verkehrszahlen an verschiedenen Standorten zu unterschiedlichen Tageszeiten und Wochentagen. Des Weiteren muss das Fahrverhalten in verschiedenen Situationen erfasst werden. Beispiele dafür sind die Geschwindigkeit und der Radius bei Kurvenfahrten, die Distanz, ab der auf Hindernisse reagiert wird, wie diese Reaktion ausfällt und wann Fahrradfahrer andere Radler überholen und wie sie dies bewerkstelligen. Selbiges Vorgehen ist auch für eine Simulation von E-Bikes beziehungsweise Pedelecs denkbar. Zusätzlich lassen sich auf Basis dieser Erkenntnisse auch die Attribute von Fahrradfahrern und Fahrrädern innerhalb der Simulation korrigieren, sofern nötig.

Abseits von Veränderungen hinsichtlich des Vorgehensmodells können Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern ausführlich untersucht und somit potentielle Wechselwirkungen aufgedeckt werden. Daraus ergibt sich möglicherweise auch eine Anpassung der Logik für das Überholen, da Hindernisse auf gemeinsamen Fuß- und Radwegen nicht zwangsläufig links überholt werden.

Neben den Interaktionen eines Verkehrsmittels mit einem anderen lässt sich auch der Modalsplit im Rahmen realistischer Tagesabläufe untersuchen. Dabei könnte ein Agent für das Erreichen seiner unterschiedlichen Ziele unterschiedliche Verkehrsmittel nutzen. Dabei ist das Einführen eines Präferenzsystems, wann welches Verkehrsmittel genutzt wird, denkbar.

Zudem lassen sich auf Basis der aktuellen Implementierung Radverleihstationen integrieren und die Nutzung dieser untersuchen.

A. Anhang

1. Wiedemann 99 Implementierung für Fahrradfahrer

```
1 double StandstillDistance = 0,2;           // CC0
2 double HeadwayTime = 1,5;                  // CC1
3 double FollowingVariation = 2;             // CC2
4 double EnteringFollowingThreshold = -20;   // CC3
5 double NegativeFollowingThreshold = -0,25; // CC4
6 double PositiveFollowingThreshold = 0,25;  // CC5
7 double OscillationSpeedDependency = 1;     // CC6
8 double OscillationAcceleration = 0,20;    // CC7
9 double MaxDecelFactor = -5;
10 double DriverRand = 0,5;
```

Listing A.1: Auswahl der Parameter für das Wiedemann 99 Modell für einen normalen Fahrer

```
1 double CalculateSpeedChange(double speed, double predSpeed,
2     double gap2pred, double predAccel, double accel, double maxSpeed,
3     double gradient, double power, double weight) {
4     double dx = gap2pred + StandstillDistance;
5     double dv = predSpeed - speed;
6     double sdxc;
7     if (predSpeed <= 0) {
8         sdxc = StandstillDistance;
9     } else {
10        sdxc = StandstillDistance + HeadwayTime * speed;
11    }
12
13    double sdxo = FollowingVariation + sdxc;
14    double sdv = OscillationSpeedDependency * dx * dx;
15    double sdvc;
16    double sdvo = sdv;
17    if (predSpeed > 0) {
18        sdvc = NegativeFollowingThreshold - sdv;
19    } else {
20        sdvc = 0;
21    }
22}
```

```

23     if (speed > PositiveFollowingThreshold) {
24         sdvo += PositiveFollowingThreshold;
25     }
26
27     double acceleration = 0;
28     if (dx <= sdxc && dv <= sdvo) {
29         if (speed > 0) {
30             if (dv < 0) {
31                 if (dx > StandstillDistance) {
32                     acceleration = Math.Min(predAccel + (dv * dv)
33                         / (StandstillDistance - dx), accel);
34                 } else {
35                     acceleration = Math.Min(predAccel + 0,5
36                         * (dv - sdvo), accel);
37                 }
38
39                 if (acceleration > (-OscillationAcceleration)) {
40                     acceleration = (-OscillationAcceleration);
41                 } else {
42                     acceleration = Math.Max(acceleration, (MaxDecelFactor
43                         + 0,5 * Math.Sqrt(speed)));
44                 }
45
46                 if (speed + acceleration < predSpeed) {
47                     acceleration = dv - DriverRand;
48                 }
49             }
50         }
51     } else if (dv < sdvc && dx < (sdxo + EnteringFollowingThreshold
52         * (dv - NegativeFollowingThreshold))) {
53         acceleration = 0,5 * dv * dv / (sdxc - dx - 0,1);
54         acceleration = Math.Max(acceleration, MaxDecelFactor
55             + Math.Sqrt(speed));
56     } else if (dv < sdvo && dx < sdxo) {
57         if (accel <= 0) {
58             if (speed + accel < predSpeed) {
59                 acceleration = Math.Min(dv, (-OscillationAcceleration));
60             } else {
61                 acceleration = Math.Min(accel, (-OscillationAcceleration));
62             }
63
64             if (speed + acceleration < 0) {
65                 acceleration = -speed;
66             }
67         } else {
68             acceleration = Math.Max(accel, OscillationAcceleration);

```

```

69     }
70 } else {
71     if (dx > sdxo) {
72         double maxAcceleration =
73             CalcMaxAcceleration(power, weight, speed, maxSpeed, gradient);
74         if (dx < sdxo) {
75             acceleration = Math.Min(dv * dv / (sdxo - dx),
76                                     maxAcceleration);
77         } else {
78             acceleration = maxAcceleration;
79         }
80     }
81 }
82
83 return acceleration;
84 }
```

Listing A.2: Berechnung der neuen Beschleunigung mit dem angepassten Wiedemann 99 Modell

```

1 double CalcMaxAcceleration(double power, double weight,
2     double velocity, double maxSpeed, double gradient) {
3     double Efficiency = 0,95;
4     double MaxAccelerationFactor = 3;
5     double speed = Math.Abs(velocity);
6     double currentMaxAccelerationFactor = NormalDist.NormalDistRandom(
7         MaxAccelerationFactor, MaxAccelerationFactor * 0,1);
8     double adjustedPower = power * Efficiency;
9     double epsilon = adjustedPower
10    / (weight * currentMaxAccelerationFactor);
11    double t1 = adjustedPower / weight;
12    double t2 = 1 / (speed + epsilon);
13    double t3 = Math.Pow(speed, 2) / Math.Pow(maxSpeed, 3);
14    double t4 = 0,0;
15    if (gradient > 0,0) {
16        t4 = 9,81 * (gradient / 100);
17    }
18
19    return (t1 * (t2 - t3) - t4);
20 }
```

Listing A.3: Berechnung der aktuell maximal möglichen Beschleunigung

```

1 double NormalDistRandom(double mean, double stdDeviation) {
2     Random rand = new Random();
3     double u1 = 1,0 - rand.NextDouble();
4     double u2 = 1,0 - rand.NextDouble();
```

```

5   double randStdNormal = Math.Sqrt (-2, 0 * Math.Log (u1)) *
6       Math.Sin (2, 0 * Math.PI * u2);
7   return (mean + stdDeviation * randStdNormal);
8 }
```

Listing A.4: Bestimmung einer standardnormalverteilten Zufallsvariable

2. Wiedemann 99 Implementierung vs SUMO

	Wiedemann 99 Notizen	SUMO
1	double dx = x(i-1) - x(i) - length(i-1);	double dx = gap2pred + CC0;
2	double dv = v(i-1) - v(i);	double dv = v(i-1) - v(i);
3		double rand(i) = v(i) > 0 ? new Random().NextDouble(0, 1) - 0,5 : 0,5;
4	double sdxc = CC0;	double sdxc = CC0;
5	if (v(i-1) > 0)	if (v(i) > 0) {
6	double VIJ;	double v-slower;
7	if (dv >= 0 a(i-1) < -1) {	if (dv >= 0 a(i-1) < 1) {
8	VIJ = v(i);	v-slower = v(i);
9	} else {	} else {
10	VIJ = v(i-1) - dv * (0,5 - rand(i))	v-slower = v(i-1) + dv * rand(i);
11	}	}
12	sdxc += CC1 * VIJ;	sdxc += CC1 * max(0, v-slower);
13	}	}
14	double sdxo = sdxc + CC2;	double sdxo = sdxc + CC2;
15		double sdvx = sdxo + CC3 * (dv - CC4);
16	double sdv = CC6 * dx * dx;	double sdv = CC6 * dx * dx / 10000;
17	double sdvc;	
18	double sdvo;	
19	if (v(i-1) > 0) {	if (v(i) > 0) {
20	sdvc = CC4 - sdv;	sdvc = CC4 - sdv;
21	} else {	} else {
22	sdvc = 0;	sdvc = 0;
23	}	}
24	if (v(i) > CC5) {	if (v(i-1) > CC5) {
25	sdvo = sdv + CC5;	sdvo = sdv + CC5;
26	} else {	} else {
27	sdvo = sdv;	sdvo = sdv;
28	}	}
29	double acceleration = 0;	double accel = 0;
30	if (dv <= sdvo && dx <= sdxc) {	if (dv < sdvo && dx <= sdxc) {
31	if (v(i) > 0) {	if (v(i-1) > 0) {

<pre> 32 if (dv < 0) { 33 if (dx > CC0) { 34 acceleration = min(a(i-1) + (dv * 35 dv) / (CC0 - dx), a(i)); 36 } else { 37 acceleration = min(a(i-1) + 0,5 * 38 (dv - sdvo), a(i)); 39 } 40 if (acceleration > -CC7) { 41 acceleration = (-CC7); 42 } else { 43 acceleration = max(acceleration, 44 (-10 + 0,5 * sqrt(v(i))))}; 45 } 46 } else { 47 acceleration = 0; 48 } 49 } else if (dv < sdvc && dx < (sdxo + CC3 50 * (dv - CC4))) { 51 acceleration = 0,5 * dv * dv / (sdxc - dx 52 - 0,01); 53 acceleration = max(acceleration, -10 + 54 sqrt(v(i))); 55 } else if (dv < sdvo && dx < sdxo) { 56 if (a(i) <= 0) { 57 acceleration = min(a(i), -CC7); 58 } else { 59 acceleration = max(a(i), CC7); 60 if (length(i) >= 6,5) { 61 acceleration = 0,5 * acceleration; 62 } 63 acceleration = min(acceleration, W(i) 64 - v(i)); 65 } 66 } else { 67 if (dx > sdxc) { 68 double amax = CC8 + CC9 * min(v(i), 69 22,2) + rand(i); 70 } 71 if (dv < 0) { 72 if (dx > CC0) { 73 accel = min(a(i-1) + (dv * dv) / 74 (CC0 - dx), 0,0); 75 } else { 76 accel = min(a(i-1) + 0,5 * (dv - 77 sdvo), 0,0); 78 } 79 if (accel > -CC7) { 80 accel = -CC7; 81 } else { 82 accel = max(accel, -10 + 0,5 * 83 sqrt(v(i)))); 84 } 85 } else if (dv < sdvc && dx < sdvx) { 86 accel = 0,5 * dv * dv / (sdxc - dx - 0,1); 87 } 88 } else if (dv < sdvo && dx < sdxo) { 89 if (a(i) <= 0) { 90 accel = min(a(i), -CC7); 91 } else { 92 accel = max(a(i), CC7); 93 } 94 } 95 } else { 96 if (dx > sdxc) { 97 double amax = CC8 + CC9 * min(v(i), 98 80 / 3,6) + new Random().NextDouble(0, 99 1); 100 } 101 } 102 } 103 } 104} </pre>	
--	--

<pre> 63 if (dx < sdxo) { 64 acceleration = min(dv * dv / (sdxo - dx), amax); 65 } else { 66 acceleration = amax; 67 } 68 } else { 69 acceleration = 0; 70 } 71 }</pre>	<pre> if (dx < sdxo) { accel = min(dv * dv / (sdxo - dx), amax); } else { accel = amax; } }</pre>
--	--

Tabelle A.2.1.: Vergleich zwischen dem originalen Wiedemann 99 [Wie96] und der SUMO Implementierung [Ins] (beides zur Vergleichbarkeit angepasst)

3. Eigene Implementierung vs SUMO

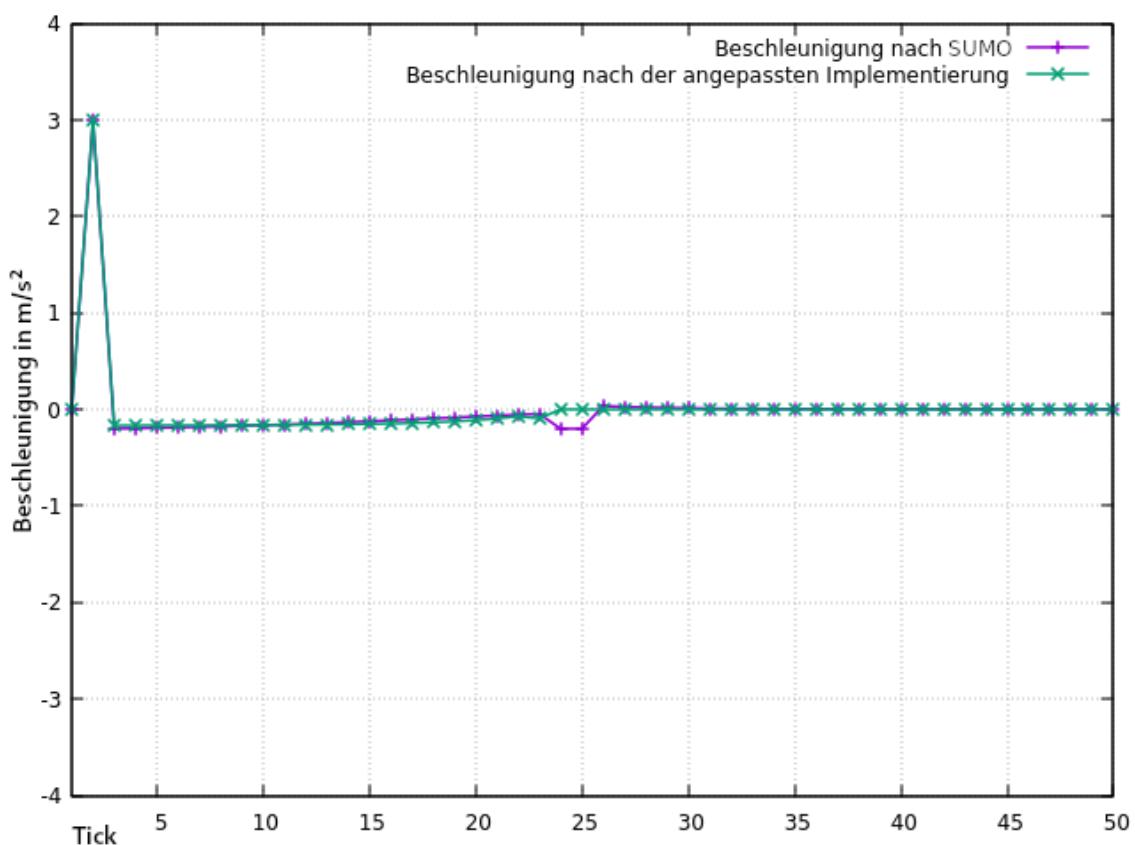


Abbildung A.3.1.: Vergleich des Verhaltens bei einem stehenden Vordermann zwischen SUMO und der eigenen Implementierung

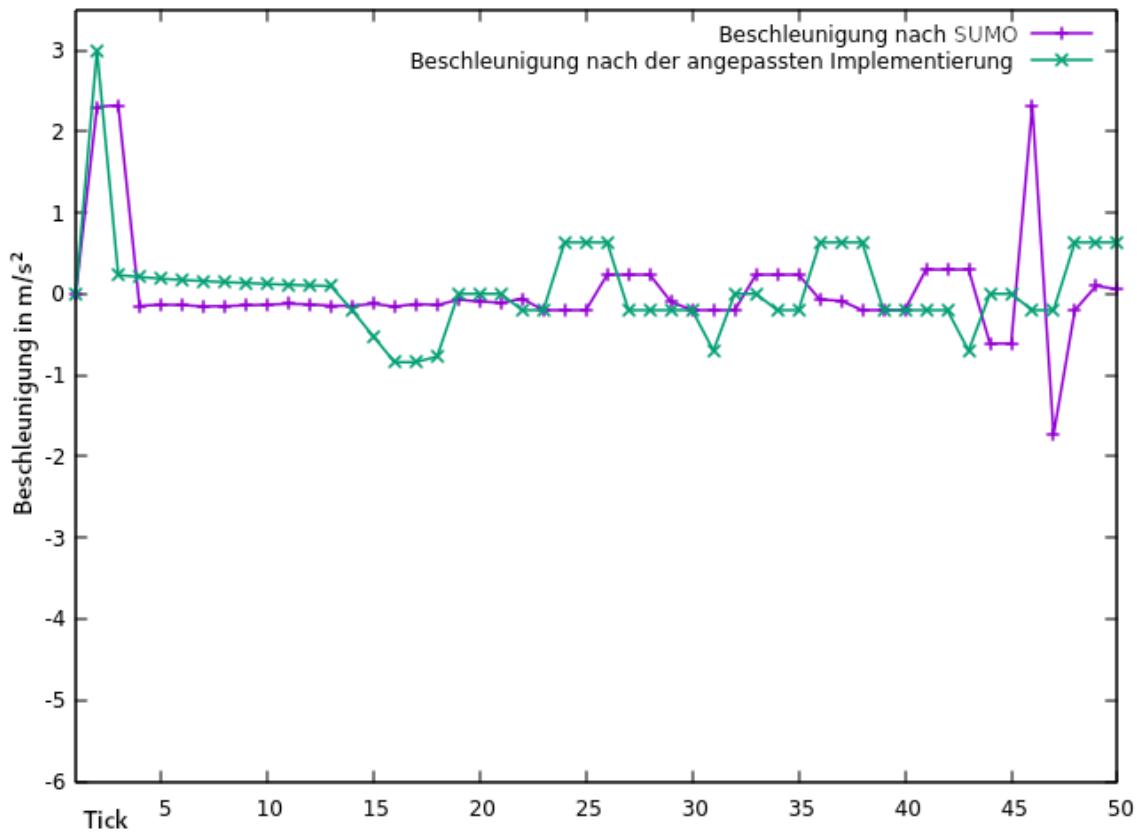


Abbildung A.3.2.: Vergleich des Verhaltens bei einem vorausfahrenden Fahrzeuges zwischen SUMO und der eigenen Implementierung

Literatur

- [Ace13] Acel Springer SE. *Was ist ein Fahrradschnellweg?* 8. Dez. 2013. URL: <https://www.welt.de/print/wams/nrw/article122686128/Was-ist-ein-Fahrradschnellweg.html>.
- [adfa] adfc. *Verkehrsrecht für Radfahrende.*
- [adfb] adfc Hamburg Online-Redaktion. *Fahrradbarometer*. URL: <https://hamburg.adfc.de/verkehr/themen-a-z/gute-beispiele/fahrradbarometer/>.
- [adfc] adfc Hamburg Online-Redaktion. *Zahlen und Statistik rund um die Themen Fahrrad und Verkehr*. URL: <https://hamburg.adfc.de/verkehr/themen-a-z/zahlen-und-statistik/zahlen-und-statistik-rund-um-die-themen-fahrrad-und-verkehr/>.
- [adfd] adfc Kreisverband Bottrop e.V. *Was ist beim Überholen von Radfahrern zu beachten?* URL: <https://www.adfc-nrw.de/kreisverbaende/kv-bottrop/radverkehr/verkehrsregeln/ueberholen-von-radfahrern.html>.
- [Agh+13] Kayvan Aghabayk u. a. „A novel methodology for evolutionary calibration of vissim by multi-threading“. In: *Australasian Transport Research Forum, ATRF 2013 - Proceedings* (Jan. 2013).
- [Ahl] Andreas Ahlswede. *Anzahl der Pkw in privaten Haushalten in Deutschland bis 2020*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/483781/umfrage/pkw-bestand-in-privaten-haushalten-in-deutschland/>.
- [aho] ahoi.digital. *Forschungsprojekte*. URL: https://ahoi-digital.informatik.uni-hamburg.de/?page_id=431.
- [Akta] Aktueller Bußgeldrechner für das deutsche Verkehrsrecht. *Auf dem Fahrrad ein Kind falsch transportiert?* URL: <https://www.bussgeldrechner.org/fahrrad/personenbefoerderung.html>.
- [Aktb] Aktueller Bußgeldrechner für das deutsche Verkehrsrecht. *Fahrrad-Geschwindigkeit: Existieren Limits für Radfahrer?* URL: <https://www.bussgeldrechner.org/fahrrad/geschwindigkeit.html>.
- [Al18] Andreas und lucky-bike.de. *Alles zum Fahrradreifen - Teil 3: Welche Reifenbreite beim Rennrad, Trekkingbike, E-Bike oder MTB?* 26. Jan. 2018. URL: <https://www.lucky-bike.de/blog/alles-zum-fahrradreifen-teil-3-welche-reifenbreite-beim-rennrad-trekkingbike-e-bike-oder-mtb/>.

- [All] Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club. *Für lebenswerte Städte und für die Verkehrswende*. URL: <https://www.xn--mehrplatzfrsrad-8vb.de/>.
- [Amb13] Julia Maria Amberger. *Weg da, ihr Arschlöcher!* 26. Apr. 2013. URL: <https://taz.de/Kampfradler-in-Staedten/!5068608/>.
- [Bar10] Jaume Barceló. *Fundamentals of Traffic Simulation*. Bd. 145. Springer Science + Business Media LLC, Jan. 2010. ISBN: 978-1-4419-6141-9. DOI: 10.1007/978-1-4419-6142-6.
- [Bas] Basil. *Häufig gestellte Fragen. 7 Maximale Tragfähigkeit*. URL: <https://www.basil.com/de/service/>.
- [BB] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz. *Straßenverkehrs-Ordnung*. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/.
- [Beh+11] Michael Behrisch u. a. „SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview“. In: Bd. 2011. Okt. 2011. ISBN: 978-1-61208-169-4.
- [Bie+17] Laura Bieker-Walz u. a. „Evaluation of car-following-models at controlled intersections“. In: Okt. 2017.
- [Bie12] Carsten Bielmeier. *Thema: Fahrradphysik*. März 2012.
- [Bie13] Lasse Bienzeisler. „Verkehrssimulation von Abschnitten eines innerstädtischen Straßennetzes mit Lichtsignalanlagensteuerung und Bevorrechtigung des ÖP-NV“. Bachelor Thesis. Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, März 2013.
- [BLW] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, W. Lange und A. Windel. „Kleine Ergonomische Datensammlung“. In: () .
- [Buna] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)*. § 41 Bremsen und Unterlegkeile. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/_41.html.
- [Bunb] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Mobilität in Deutschland. Mobilität in Tabellen (MIT 2017)*. URL: <https://www.mobilitaet-in-tabellen.de/>.
- [Bunc] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. „Radverkehr in Deutschland. Zahlen, Daten, Fakten“. In: () .
- [Bun13] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. *Radverkehr in Zahlen. Daten, Fakten und Stimmungen*. Aug. 2013.
- [Bun17] Die Bundesregierung. *Allgemeine Verwaltungsforschrit zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO)*. 29. Mai 2017. URL: http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm.

- [Bun18] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Mobilität in Deutschland - MiD. Ergebnisbericht*. Dez. 2018. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile.
- [Bun19] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. „Mobilität in Deutschland Kurzreport. Verkehrsaufkommen - Struktur - Trends“. In: (Sep. 2019). URL: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas_Mobilitaet_in_Deutschland_2017_Kurzreport.pdf.
- [bus19] bussgeldkatalog.org. *Auf der Bundesstraße mit dem Fahrrad fahren: Dürfen Radfahrer das?* 6. Dez. 2019. URL: <https://www.bussgeldkatalog.org/bundesstrasse-fahrrad/>.
- [Col] Colliseum. *Geschwindigkeit von Radfahrern im Stadtverkehr*. URL: https://www.colliseum.net/wiki/Geschwindigkeit_von_Radfahrern_im_Stadtverkehr.
- [Col19] Colliseum. *Bremsverzögerungen von modernen Fahrrädern*. 1. Apr. 2019. URL: https://www.colliseum.net/wiki/Bremsverz%C3%B6gerungen_von_modernen_Fahrr%C3%A4dern.
- [Dal14] Jörg Dallmeyer. *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt. Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen*. Springer Verlag, 2014. ISBN: 978-3-658-05206-5.
- [Dal18] Jan Dalski. „Design and Implementation of a Generic 3D Visualization Pipeline for Large-Scale Simulations on the MARS Platform“. Master Thesis. HAW Hamburg, 5. Okt. 2018. Kap. 1.2 MARS - Multi-Agent Research and Simulation.
- [Deua] Deutsche Bahn AG. *Darauf fährt Hamburg ab*. URL: <https://stadtrad.hamburg.de/de>.
- [Deub] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*. URL: https://www.dlr.de/DE/Home/home_node.html.
- [Diaa] Diamant-Blog. *Fahrradstadt Kopenhagen*. URL: <https://www.diamantrad.com/blog/fahrradstadt-kopenhagen/>.
- [Diab] Diamant-Blog. *Radschnellwege in Deutschland*. URL: https://www.diamantrad.com/blog/radschnellwege-deutschland/#Radschnellverbindungen_als_Reaktion_auf_steigende_Pendlerzahlen.
- [DIN06] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN-Taschenbuch 345. Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM*. Beuth Verlag GmbH, 2006. Kap. NA.1 Bremsen. ISBN: 978-3-410-16342-8.
- [ela] e-lastenrad.de. *Lastenrad Vergleich*. URL: <https://www.e-lastenrad.de/lastenraeder-vergleich>.

- [Faha] Fahrrad XXL. *Die E-Bike Akkus in der Übersicht*. URL: <https://www.fahrrad-xxl.de/beratung/e-bike/akku/>.
- [Fahb] Fahrrad XXL. *Was ist der Unterschied zwischen E-Bikes und Pedelecs?* URL: <https://www.fahrrad-xxl.de/beratung/e-bike/unterschied-e-bike-pedelec/>.
- [fah] fahrrad.de. *E-Bike Typen: Welches E-Bike passt zu dir?* URL: <https://www.fahrrad.de/ueber-e-bikes-typen.html>.
- [fah17] fahrradreparaturNET. *Übersetzung und Entfaltung*. 1. Dez. 2017. URL: <https://www.fahrradreparatur.net/uebersetzung-und-entfaltung/>.
- [Fed] Federal Highway Administration. TRANSIMS. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/resources/transims/index.cfm>.
- [Fra18] Emelie Fransson. „Driving behavior modeling and evaluation of merging control strategies - A microscopic simulation study on Sirat Expressway“. In: 16. Feb. 2018.
- [Gei] Dr. Michael Geiler. *Radeln unter Strom*. URL: <https://www.bgn-branchenwissen.de/daten/bgn/akzente/akzente14/ebike.htm>.
- [Ges20] Gesundheitsberichterstattung des Bundes. *Durchschnittliche Körpermaße der Bevölkerung (Größe in m, Gewicht in kg). Gliederungsmerkmale: Jahre, Deutschland, Alter, Geschlecht*. 22. Jan. 2020. URL: http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/dboowasys921.xwdevkit/xwd_init?gbe.isgbetol/xs_start_neu/&p_aid=3&p_aid=5824913&nummer=223&p_sprache=D&p_indsp=&p_aid=81990226.
- [Gol19] Ines Gollnick. *Willkommen im Autoland Deutschland*. 8. Juli 2019. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/karriere/willkommen-im-autoland-deutschland/>.
- [gre] greenbike-shop.de. *Lastenfahrrad privat*. URL: <https://www.greenbike-shop.de/lastenfahrrad/privat/>.
- [HAM11] Bryan Higgs, Montasir M. Abbas und Alejandra Medina. „Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data“. In: Sep. 2011.
- [Hel] Helsinki University of Technology. *HUTSIM*. URL: <http://www.intelligentmodelling.org.uk/Projects/hutsim/index.htm>.
- [HS a] H&S Bike-Discount. *Fahrradkörbe - die praktischen Begleiter für Ihren Alltag*. URL: <https://www.bike-discount.de/de/fahrradkorb/l-24/o-preisa>.
- [HS b] H&S Bike-Discount. *Gepäckträgertaschen mit ausreichend Stauraum*. URL: <https://www.bike-discount.de/de/shop/gepaektraegertaschen-333?l=24>.

- [Ins] Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center. *Eclipse SUMO - Simulation of Urban Mobility*. URL: <https://github.com/eclipse/sumo>.
- [ITS] ITS Lab. *MITSIMLab. Technical Information*. URL: <https://its.mit.edu/software/mitsimlab/technical-information>.
- [JCO08] M. Johnson, J. Charlton und J. Oxley. „Cyclists and red lights - a study of behaviour of commuter cyclists in Melbourne“. In: 2008 Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference. Adelaide, South Australia, 2008.
- [Kar] Igor Karni. *How Much Does Electric Bike Weigh? Are E-bikes Heavy?* URL: <https://easyebiking.com/how-much-does-an-e-bike-weigh/>.
- [Kra] Kraftfahrt-Bundesamt. *Bestand in den Jahren 1960 bis 2019 nach Fahrzeugklassen*. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html.
- [Kra+12] Daniel Krajzewicz u. a. „Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility“. In: Bd. 3&4. Dez. 2012.
- [Kra+14] Daniel Krajzewicz u. a. „Including Pedestrian and Bicycle Traffic into the Traffic Simulation SUMO“. In: Jan. 2014.
- [Kra17] Gernot Kramper. *Bei Rot über die Ampel? Das ist keine Spezialität von Kampfrädern*. 29. Nov. 2017. URL: <https://www.stern.de/auto/news/bei-rot-ueber-die-ampel--das-ist-keine-spezialitaet-von-kampfradlern-7767444.html>.
- [kur19] kurbelix.de. *Montage des hinteren Gepäckträgers am Fahrrad. Läßt sich ein Gepäckträger an jedem Fahrrad anbringen?* 28. Jan. 2019. URL: <https://www.kurbelix.de/blog/anleitungen/gepaektraeger/montage-des-hinteren-gepaektraegers-am-fahrrad>.
- [Lan] Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung. *Verkehrsportal*. URL: <https://geoportal-hamburg.de/verkehrsportal/?layerIDs=717,10220&visibility=true,true&transparency=0,0¢er=567351.3344368761,5934599.644529826&zoomlevel=5>.
- [Lan03] Sabine Landau. *Weg da - die Straße gehört mir!* 31. Mai 2003. URL: <https://www.abendblatt.de/vermisches/journal/article106685540/Weg-da-die-Strasse-gehoert-mir.html>.
- [LE11] Jacob Larsen und Ahmed El-Geneidy. „A travel behavior analysis of urban cycling facilities in Montréal, Canada“. In: *Transportation Research Part D-transport and Environment - TRANSP RES PT D-TRANSP ENVIRO* 16 (März 2011). DOI: 10.1016/j.trd.2010.07.011.

- [Löf19] Andreas Löffler. „Smart Rescue im urbanen Raum: Ein agentenbasiertes Modell mit MARS zur Bestimmung der Helferanzahl innerhalb Hamburgs“. Master Thesis. HAW Hamburg, 19. Sep. 2019.
- [MARa] MARS. SMARTOPENHAMBURG.DE. URL: <https://www.smartopenhamburg.de/>.
- [MARb] MARS Group. *About us*. URL: <https://mars-group.org/about-us/>.
- [MAT] MATSim Community. *MATSim Multi-Agent Transport Simulation*. URL: <https://matsim.org/>.
- [mei19] mein-fahrradhaendler.de. *Fahrrad-Gepäckträger – Alles Wissenswerte zum Kauf*. 23. Juni 2019. URL: <https://www.mein-fahrradhaendler.de/rund-ums-rad/ratgeber/fahrrad-gepaektraeger-alles-wissenswerte-zum-kauf/>.
- [Mül12] Stephan Müller. „Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik. Eine Methodenarbeit und Beispielumsetzung mit Cooperative Adaptive Cruise Control Systemen im Güterverkehr“. Diss. Technische Universität Berlin, 20. Apr. 2012.
- [Neu00] Lutz Neubert. „Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsuss mittels zellularer Automaten“. Diss. Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 23. Mai 2000.
- [onl18] Focus online. *Parkgebühren: Deutsche geben 4,4 Milliarden Euro für ungenutzte Parkzeit aus*. 21. Sep. 2018. URL: https://www.focus.de/auto/news/stuttgart-verteilt-die-meisten-knoellchen-41-stunden-jaehrlich-suchen-deutsche-durchschnittlich-einen-parkplatz_id_9633099.html.
- [OT04] Johan Janson Olstam und Andreas Tapani. *Comparison of Car-following models*. Swedish National Road and Transport Research Institute, 2004.
- [Par] Paramics Microsimulation SYSTRA Ltd. *Paramics Microsimulation*. URL: <https://www.paramics.co.uk/en/>.
- [Peta] Stefan Petersen. *Gewichte der Fahrräder*. URL: <https://www.hamburg-anders-erfahren.de/fahrradgewichte.html>.
- [Petb] Thomas Petersen. *Ein Land der Autofahrer*. URL: <https://www.faz.net/aktuell/stil/drinnen-draussen/allensbach-untersuchung-ein-land-der-autofahrer-15152162.html>.
- [PM] PM Greenstorm. *Aktuelle Tipps zum Transport von Pedelecs & E-Bikes*. URL: <https://pedelec-elektro-fahrrad.de/ratgeber/aktuelle-tipps-zum-transport-von-pedelecs-e-bikes/259015/>.
- [PR10] John Parkin und Jonathon Rotheram. „Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal“. In: *Transport Policy* 17 (Sep. 2010), S. 335–341. DOI: 10.1016/j.tranpol.2010.03.001.

- [Pro] Profirad.de. *Crossbike Vergleich und Test* 2020. URL: <https://www.profirad.de/fahrrad/crossbike/>.
- [PTV] PTV Group. *Warum PTV Vissim? Weil es das einzige Simulationstool ist, mit dem sich sämtliche Verkehrsmittel und deren Interaktionen abbilden lassen.* URL: <https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-vissim/warum-ptv-vissim/>.
- [Rad] Radio Hamburg. *Hamburger stehen 6 Tage pro Jahr im Stau.* URL: <https://www.radiohamburg.de/Nachrichten/Hamburg-aktuell/Verkehr/2019/Februar/Platz-3-in-Bundes-Statistik-Hamburger-stehen-6-Tage-pro-Jahr-im-Stau>.
- [rad] radschnellnetz, Geschäftsstelle der Metropolregion Hamburg. „Der Weg zum Radschnellnetz. Fakten und Wissenswertes“. In: (). URL: <https://metropolregion.hamburg.de/contentblob/12604202/f0adf41364ea05a32abf33ce7dc45785/data/190515-flyerradschnellwege.pdf>.
- [Rei07] Michael Reimann. „Simulationsmodelle im Verkehr“. In: (2007).
- [REP19] DIE REPORTAGE. *Klimawandel: Daten, Fakten, Quellen*. 27. Mai 2019. URL: <https://www.ndr.de/ratgeber/klimawandel/Fakten-und-Daten-zum-Klimawandel,klimawandel322.html>.
- [sB19] sinus Markt- und Sozialforschung und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Fahrrad-Monitor Deutschland 2019*. 30. Sep. 2019.
- [Sch+19] Barbara Schmidt u. a. „Wearing a bike helmet leads to less cognitive control, revealed by lower frontal midline theta power and risk indifference“. In: Bd. 56. Aug. 2019. DOI: 10.1111/psyp.13458.
- [Sch04] Andreas Schadschneider. „Physik des Straßenverkehrs“. In: (23. Apr. 2004).
- [Sch16] Mike Schlink. *Hamburgs Problem mit den Abgasen So giftig ist unsere Luft wirklich*. 19. März 2016. URL: <https://www.mopo.de/hamburg/hamburgs-problem-mit-den-abgasen-so-giftig-ist-unsere-luft-wirklich-23750740>.
- [SH] Sinus Institut und Jan Hecht. *Radfahren wird immer beliebter: Ergebnisse Fahrradmonitor 2017*. URL: <https://www.sinus-institut.de/veroeffentlichungen/meldungen/detail/news/radfahren-wird-immer-beliebter-ergebnisse-fahrradmonitor-2017/news-a/show/news-c/NewsItem/>.
- [Shi07] Takashi Shinzato. „Box Muller Method“. In: (27. Jan. 2007).
- [Sor10] Irene S. Soria. „Assessment of Car-Following Models Using Field Data“. Master Thesis. University of Florida, 2010.
- [Spi12] Spiegel Mobilität. *Vorsicht vor dem schwarzen BMW*. 31. Aug. 2012. URL: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/bmw-fahrer-laut-adac-umfrage-besonders-aggressiv-a-853206.html>.

- [Sto16] Angela Stoll. *Die Wut in der Blechkiste: Warum Autofahrer so oft aggressiv sind.* 27. Juni 2016. URL: <https://www.augsburger-allgemeine.de/wissenschaft/Die-Wut-in-der-Blechkiste-Warum-Autofahrer-so-oft-aggressiv-sind-id38273517.html>.
- [TA13] Niels Tørslev und Rasmus Albrink. *Micro simulation of cyclists.* 2013.
- [Tan18] Jens Tanz. *Rad ab!?* 5. Feb. 2018. URL: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/aggressive-radfahrer-gewalt-auf-zwei-raedern-a-1189123.html>.
- [Tau16] Andre Tauber. *Welche Risiken E-Autos für die Umwelt bedeuten.* 26. Sep. 2016. URL: <https://www.welt.de/wirtschaft/article158385448/Welche-Risiken-E-Autos-fuer-die-Umwelt-bedeuten.html>.
- [Tes] Testberichte.de. *Fitnessräder. Die besten Fitnessräder.* URL: https://www.testberichte.de/testsieger/level3_fahrrad_fitnessraeder_845.html.
- [TGB16] Heather Twaddle, Georgios Grigoropoulos und Fritz Busch. „Integration of an External Bicycle Model in SUMO“. In: Mai 2016.
- [Tre16] Tretwerk. *Fahrrad fahren im Wald – Was ist erlaubt und was nicht?* 26. Juli 2016. URL: <https://tretwerk.net/blog/fahrrad-fahren-im-wald-was-ist-erlaubt-und-was-nicht/>.
- [Umw19] Umwelt Bundesamt. *Straßenverkehrslärm.* 23. Okt. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm/strassenverkehrslaerm#gerauschbelastung-im-strassenverkehr>.
- [Umw20] Umwelt Bundesamt. *Emissionen des Verkehrs.* 17. Feb. 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglicher>.
- [Uni] University of Florida. *CORSIM.* URL: <https://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/version5/corsim.htm>.
- [ver] vergleich.org. *Crossbikes-Vergleich* 2020. URL: <https://www.autobild.de/vergleich/crossbike-test/>.
- [Ver13] Unfallforschung der Versicherer. *Rotlichverstöße.* 7. Nov. 2013. URL: <https://udv.de/de/node/50860>.
- [VR12] Jelena Vasic und Heather J. Ruskin. „Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles“. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391 (Apr. 2012), S. 2720–2729. DOI: 10.1016/j.physa.2011.12.018.
- [Wal07] Ian Walker. „Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender“. In: *Accident; analysis and prevention* 39 (Apr. 2007), S. 417–25. DOI: 10.1016/j.aap.2006.08.010.

- [Wei18] Ingrid Weidner. *Mit dem Fahrrad um den Kreisel*. 14. Juni 2018. URL: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-06/vorfahrtsregel-fahrrad-auto-stadt-radwege-kreisverkehr-stvo>.

[Wey19] Julius Weyl. „Developing a generic multi-agent car model to simulate road traffic with MARS“. Master Thesis. HAW Hamburg, 19. Juni 2019.

[Wie96] Rainer Wiedemann. *Traffic Flow Model*. Feb. 1996.

[Wik] Wikipedia.org. *Größenordnung (Beschleunigung)*. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BC%C3%BCB6%C3%9Cenordnung_\(Beschleunigung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BC%C3%BCB6%C3%9Cenordnung_(Beschleunigung)).

[zan] zanias. *Autofahren in der Großstadt: Die wichtigsten Vor- und Nachteile*. URL: <https://www.auto-tipps.de/blog/2017/12/06/autofahren-in-der-grossstadt-die-wichtigsten-vor-und-nachteile/>.

[ZZ17] Yongxiang Zhao und H.M. Zhang. „A unified follow-the-leader model for vehicle, bicycle and pedestrian traffic“. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 105 (Nov. 2017), S. 315–327. DOI: 10.1016/j.trb.2017.09.004.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Hamburg, den _____ Unterschrift: _____