

Agentengestützte Verkehrssteuerung an Straßenkreuzungen unter Berücksichtigung der Wertschätzung der Fahrer

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Heiko Schepperle

aus Heilbronn

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Juli 2011

Erster Gutachter: Prof. Dr. Klemens Böhm

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Werner Rothengatter

Vorwort und Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Arbeit am Institut für Programmstrukturen und Datenorganisation (IPD) der Universität Karlsruhe (TH), heute Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Am Lehrstuhl von Prof. Dr. Peter Lockemann und später von Prof. Dr. Klemens Böhm arbeitete ich zunächst im Verbundprojekt OVID (Stärkung der SelbstOrganisationsfähigkeit im Verkehr durch I+K-gestützte Dienste) (2003 - 2005) und anschließend im Projekt DAMAST (Driver Assistance using Multi-Agent Systems in Traffic) (2005 - 2008), das in einer Kooperation mit der INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH durchgeführt wurde. In dieser Zeit war ich auch Kollegiat am Graduiertenkolleg Information Management und Market Engineering (IME). Im Rahmen von DAMAST ist diese Dissertation entstanden.

Zum Gelingen dieser Dissertation haben viele Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte. Zunächst danke ich meinem Erstgutachter Prof. Dr. Klemens Böhm. Er ließ mir die Freiheit, meine eigenen Ideen im Projekt DAMAST zu untersuchen, unterstützte mich bei all meinen Veröffentlichungen besonders intensiv und trug damit wesentlich dazu bei, dass meine eingereichten Veröffentlichungen auch akzeptiert wurden. Ich danke Prof. Dr. Peter Lockemann, der mich an seinem Lehrstuhl eingestellt und bis zu seiner Emeritierung betreut hat. Die Kooperation mit der INIT GmbH entstand aufgrund seiner Initiative. Mein Dank gilt auch Dr. Gottfried Greschner, dem Geschäftsführer der INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH. Die Mitfinanzierung des Forschungsprojekts DAMAST durch die INIT GmbH ist insbesondere für ein mittelständisches Unternehmen nicht selbstverständlich und wäre ohne sein persönliches Engagement und sein Vertrauen nicht möglich gewesen. Prof. Dr. Werner Rothengatter danke ich für die Übernahme des Korreferats und sein großes Interesse an meiner Arbeit.

Daneben danke ich natürlich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für das angenehme Arbeitsklima und die angeregten und konstruktiven Diskussionen, die insbesondere bei Probenvorträgen sehr wertvoll waren. Jens Nimis brachte mich als Betreuer meiner Studienarbeit erstmals mit Softwareagententechnologie in Berührung. In meinem ersten Forschungsprojekt OVID arbeitete ich gemeinsam mit Jutta Mülle, die auch meine Diplomarbeit betreute, und Philipp Bender. Von ihnen lernte ich viel über die Arbeit an einem interdisziplinären Forschungsprojekt. Patricia Krakowski, Antje Dietrich und Yue Jing Zhi verdanke ich lehrreiche Einblicke in die Herausforderungen bei der Verbindung von Familie und dem Schreiben einer Dissertation. Für die wertvollen Hinweise zu meiner Arbeit danke ich zudem besonders Björn-Oliver Hartmann, Clemens Heidinger, Frank Eichinger, Michael Klein und Stephan Schosser.

Ich danke allen Professoren, Stipendiaten und Kollegiaten am Graduiertenkolleg Information Management und Market Engineering für das konstruktive Feedback zu meinen Präsentationen. Dieses war insbesondere für ökonomische und rechtliche Fragestellungen besonders hilfreich.

Ich möchte mich auch bei allen Studierenden bedanken, die als Diplomarbeiter, Studienarbeiter oder wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen von DAMAST beigetragen haben. Herauszuheben sind Oliver Forster, der in seiner Diplomarbeit den Grundstein für das DAMAST-Simulationswerkzeug legte, Simone Forster, in deren Diplomarbeit der Zeitslottausch entstand, und Natalja Pulter, die in ihrer Diplomarbeit die Auswirkung der agentengestützten Mechanismen auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen untersuchte.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die immer an mich geglaubt haben, und bei meiner Frau Stephanie und meinen Söhnen Paul und Tim für ihr großes Verständnis und ihre Unterstützung beim Schreiben dieser Arbeit.

Karlsruhe, im Juli 2011

Heiko Schepperle

Inhaltsverzeichnis

I. Einführung	1
1. Einleitung	2
2. Grundlagen	5
2.1. Verkehrliche Begriffsdefinitionen	5
2.1.1. Wartezeit	5
2.1.2. Verkehrsaufkommen	6
2.1.3. Lichtsignalanlagen	7
2.1.4. Verkehrssteuerungssystem	7
2.1.5. Fahrerassistenzsysteme	8
2.1.6. Kreuzungssteuerung	10
2.2. Verwandte Forschungsvorhaben zu innovativen Fahrerassistenzsystemen .	10
2.2.1. Verbesserung der Verkehrssicherheit	10
2.2.2. Verbesserung der Verkehrseffizienz	12
2.2.3. Einsatz autonomer Fahrzeuge	13
2.3. Verkehrssimulation	14
2.3.1. Simulation	14
2.3.2. Verkehrsflussmodelle	15
2.3.3. Verkehrssimulationswerkzeuge	16
2.3.4. Eignung für die Simulation eines wertschätzungssensitiven ITC- Systems	17
2.4. Agententechnologie	18
2.4.1. Definition und Eigenschaften	18
2.4.2. Eignung für ein wertschätzungssensitives ITC-System	19
3. Herausforderungen	21
3.1. Verkehrstechnische Herausforderungen	21
3.2. Informationstechnische Herausforderungen	25
3.3. Ökonomische Herausforderungen	27
3.4. Verkehrsteilnehmerspezifische Herausforderungen	29
3.5. Rechtliche Herausforderungen	31
4. Simulationswerkzeug	32
4.1. Architektur	32
4.1.1. Verkehrssimulationsmodul	32

Inhaltsverzeichnis

4.1.2.	Fahrersimulationsmodul	34
4.1.3.	Fahrerassistenzmodul	34
4.1.4.	Verkehrssteuerungsmodul	34
4.2.	Simulationseinheit	35
4.3.	Umweltmodell	35
4.3.1.	Netzmodell	36
4.3.2.	Kreuzungsmodell	37
4.3.3.	Kraftstoffverbrauchsmodell	40
 II. Verfahren		 42
 5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem		 43
5.1.	Formale Problembeschreibung	43
5.1.1.	Verkehrssteuerung an Kreuzungen als MSP	43
5.1.2.	Formulierung des Maschinen-Scheduling-Problems	48
5.1.3.	Komplexität	52
5.2.	Entwicklung heuristischer Verfahren	53
5.2.1.	Optimale polynomiale Lösung für ein vereinfachtes MSP	53
5.2.2.	Vorbereitung der heuristischen Verfahren	55
5.2.3.	Heuristisches Verfahren 1: Tatsächliche Bearbeitungszeit	56
5.2.4.	Heuristisches Verfahren 2: Minimierung der Verzögerungskosten	57
5.2.5.	Komplexität	58
 6. Mechanismen		 60
6.1.	Entwurf der Mechanismen	60
6.1.1.	Begriffsbestimmung	60
6.1.2.	Annahmen	62
6.1.3.	Wünschenswerte Eigenschaften	62
6.2.	Erstpreisauktion und Zweitpreisauktion	64
6.2.1.	Erstpreisauktion	64
6.2.2.	Zweitpreisauktion	65
6.2.3.	Erstpreisauktion mit Unterstützung	65
6.2.4.	Zweitpreisauktion mit Unterstützung	66
6.2.5.	Eigenschaften	66
6.3.	Verzögerungskostenminimierung	67
6.3.1.	Allokationsregel	67
6.3.2.	Zahlungsregel	67
6.3.3.	Eigenschaften	68
6.3.4.	Bildung von Koalitionen	69
6.3.5.	Varianten	70
6.4.	Zeitslottausch	70
6.4.1.	Ablauf	71
6.4.2.	Tauschbedingungen	72

Inhaltsverzeichnis

6.4.3. Eigenschaften	73
6.5. Zeitslotanfrage	73
6.6. Ablauf der Verhandlung und Kontaktaufnahme	73
6.6.1. Kontaktaufnahme	73
6.6.2. Allokation	75
6.6.3. Erlaubte Grade der nebenläufigen Kreuzungsüberquerungen	75
7. A3C-System	79
7.1. Zustände	79
7.2. Parameter	80
7.3. Berechnung der A3C-Geschwindigkeit	80
7.4. Fahrstrategien	80
7.4.1. Unbeeinflusst	80
7.4.2. Nähernd ohne Zeitslot	81
7.4.3. Nähernd mit Zeitslot	81
7.4.4. Überquerend	82
7.4.5. Eigenschaften	83
III. Evaluation und Anwendung	84
8. Evaluation	85
8.1. Methodik	85
8.1.1. Attribute und Kennzahlen	85
8.1.2. Ausführung	85
8.2. Verifikation und Validierung	87
8.2.1. Verifikationstechniken	87
8.2.2. Verifikation	88
8.2.3. Validierung	88
8.3. Experimentaufbau	88
8.3.1. Kreuzung	88
8.3.2. Verkehr	93
8.3.3. Simulation	96
8.4. Mechanismenvergleich	97
8.4.1. Beschreibung des Experiments	97
8.4.2. Ergebnisse des Mechanismenvergleichs	98
8.4.3. Zusammenfassung und Bewertung	107
8.5. Kreuzungslayoutvergleich	108
8.5.1. Beschreibung des Experiments	108
8.5.2. Ergebnisse des Kreuzungslayoutvergleichs	109
8.5.3. Zusammenfassung und Bewertung	112
8.6. Kraftstoffverbrauchsminimierung	112
8.6.1. Beschreibung des Experiments	112
8.6.2. Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsminimierung	113

Inhaltsverzeichnis

8.6.3. Zusammenfassung und Bewertung	114
8.7. Zeitslottausch	116
8.7.1. Beschreibung der Varianten	116
8.7.2. Ergebnisse des Zeitslottauschs	118
8.7.3. Zusammenfassung	119
8.8. ITSA Valuation ohne und mit Unterstützung	120
8.8.1. Untersuchte Mechanismen	120
8.8.2. Ergebnisse	120
8.8.3. Auswirkung auf Fahrzeuge mit geringer Wertschätzung	122
8.8.4. Zusammenfassung	122
8.9. Clocked vs. Free Choice	122
8.9.1. Auktionsintervall	122
8.9.2. Free Choice	123
8.9.3. Clocked	124
8.9.4. Evaluation	125
8.9.5. Bewertung	129
9. Anwendung	130
9.1. Anwendungen in abgeschlossenen Verkehrsbereichen	130
9.2. Anwendungen mit Engpass und Alternativen	132
9.3. Erweiterungsmöglichkeiten	133
9.3.1. Umgang mit Heterogenität	134
9.3.2. Vermeidung des Verhungerns	135
10. Zusammenfassung und Ausblick	136
IV. Anhang	137
A. Verzögerungskostenminimierung	138
A.1. Wohlfahrt	138
A.2. Individuelle Rationalität	139
A.3. Anreizkompatibilität	140
A.4. Budget-Balancierung	141
B. Einstellungen	143
C. Daten	145
C.1. Mechanismenvergleich	145
C.2. Kreuzungslayoutvergleich	160
C.3. Kraftstoffverbrauchsminimierung	169
Literaturverzeichnis	174

Abbildungsverzeichnis

4.1. Architektur des DAMAST-Simulationswerkzeugs	33
4.2. Netzmodell in DAMAST [For06a]	36
4.3. Kreuzungsmodell in DAMAST	38
4.4. Aufspaltende, kreuzende und zusammenführende Konfliktbereiche	39
4.5. Sichtbare Nachbarschaft	41
5.1. Spuraufteilung und -zusammenführung	46
5.2. Kreuzungslayouts mit unterschiedlicher Anzahl ausgehender Spuren	52
6.1. Beispiel für die Bildung von Koalitionen	69
6.2. Tauschpartner des Fahrzeugs 6 [SBF08]	72
6.3. Reservierungsbeispiel eines linksabbiegenden Fahrzeugs für verschiedene Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung	76
7.1. Zustandsübergangsdiagramm für das A3C-System im Modus A3C.	79
8.1. Evaluiertes Kreuzungslayout	89
8.2. Kreuzung mit linker Geradeausspur (Kreuzung IV)	91
8.3. Kreuzung ohne linke Geradeausspur (Kreuzung V)	92
8.4. Kreuzung ohne linke Geradeausspur und mit einer ausgehenden inneren Kreuzungsspur (Kreuzung VI)	92
8.5. Durchschnittlicher gemessener Kreuzungsdurchsatz	99
8.6. Relative Zunahme der sich in der Nachbarschaft befindlichen Fahrzeuge	99
8.7. Obere Schranken der erzeugten Gesamtverkehrsstärken für die einzelnen Messreihen	101
8.8. Durchschnittliche gewichtete Wartezeit	101
8.9. Signifikante Unterschiede der gewichteten Wartezeit gegenüber dem Re- ferenzmechanismus Ampel	102
8.10. Durchschnittliche Wartezeit	104
8.11. Signifikante Unterschiede der Wartezeit gegenüber dem Referenzmecha- nismus Ampel	105
8.12. Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	107
8.13. Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuz- ungslayout V und Kreuzungslayout VI	109
8.14. Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI zwi- schen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)	110

Abbildungsverzeichnis

8.15. Durchschnittliche Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI	111
8.16. Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI zwischen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)	111
8.17. Durchschnittlicher gemessener Durchsatz	113
8.18. Vergleich der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit für die Kraftstoffverbrauchsminimierung	114
8.19. Vergleich der durchschnittlichen Wartezeit für die Kraftstoffverbrauchsminimierung	115
8.20. Vergleich des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs für die Kraftstoffverbrauchsminimierung	115
8.21. Untersuchte Varianten des Zeitslottaustauschs [SBF08]	117
8.22. Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für <i>CAE</i>	127
8.23. Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für <i>LE</i>	128
8.24. Clocked vs. Free Choice	128
9.1. Hamburger Hafen: Luftbild des HHLA Container Terminal Altenwerder, Quelle: Hamburger Hafen und Logistik AG	131
9.2. Hamburger Hafen: Führerlose Fahrzeuge (AGVs) vor Containerbrücken in Altenwerder, Quelle: Hamburger Hafen und Logistik AG	131
C.1. Mechanismenvergleich: Gemessener Kreuzungsdurchsatz	146
C.2. Mechanismenvergleich: Gewichtete Wartezeit	147
C.3. Mechanismenvergleich: Wartezeit	148
C.4. Mechanismenvergleich: Kraftstoffverbrauch	149
C.5. Mechanismenvergleich: Gemessener Kreuzungsdurchsatz mit Konfidenzintervall	150
C.6. Mechanismenvergleich: Gewichtete Wartezeit mit Konfidenzintervall	151
C.7. Mechanismenvergleich: Wartezeit mit Konfidenzintervall	152
C.8. Mechanismenvergleich: Kraftstoffverbrauch mit Konfidenzintervall	153
C.9. Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit im Vergleich zur Ampel	154
C.10. Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit im Vergleich zur Ampel	155
C.11. Relative Unterschiede des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zur Ampel	156
C.12. Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit im Vergleich zu TSR	157
C.13. Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit im Vergleich zu TSR	158
C.14. Relative Unterschiede des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu TSR	159

Abbildungsverzeichnis

C.15.Kreuzungslayoutvergleich: Gemessener Kreuzungsdurchsatz mit Konfidenzintervall	161
C.16.Kreuzungslayoutvergleich: Gewichtete Wartezeit mit Konfidenzintervall	162
C.17.Kreuzungslayoutvergleich: Wartezeit mit Konfidenzintervall	163
C.18.Kreuzungslayoutvergleich: Kraftstoffverbrauch mit Konfidenzintervall	164
C.19.Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit gegenüber TSR (CAE) für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI	165
C.20.Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit gegenüber Kreuzungslayout IV für TSR (CAE), ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)	166
C.21.Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit gegenüber TSR (CAE) für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI	167
C.22.Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit gegenüber Kreuzungslayout IV für TSR (CAE), ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)	168
C.23.Kraftstoffverbrauchsminimierung: Gemessener Durchsatz mit Konfidenzintervall	170
C.24.Kraftstoffverbrauchsminimierung: Gewichtete Wartezeit mit Konfidenzintervall	171
C.25.Kraftstoffverbrauchsminimierung: Wartezeit mit Konfidenzintervall	172
C.26.Kraftstoffverbrauchsminimierung: Kraftstoffverbrauch mit Konfidenzintervall	173

Tabellenverzeichnis

3.1. Verkehrstechnische, informationstechnische und ökonomische Herausforderungen	22
3.2. Verkehrsteilnehmerspezifische und rechtliche Herausforderungen	23
8.1. Übersicht der Kreuzungsparameter für die verschiedenen Kreuzungslayouts	91
8.2. Beispielhafte OD-Matrix bei einer Gesamtverkehrsstärke von 1600 Fzg./h	93
8.3. Verteilung der Verkehrsstärke und Abbiegeverteilung relativ zur Gesamtverkehrsstärke	95
8.4. Absolute und relative Differenzen für die vier Varianten des Zeitslottaustauschs	119
8.5. <i>TSR</i> vs. <i>ITSA</i> ⁻	121
8.6. <i>TSR</i> vs. <i>ITSA</i> ⁺	121
8.7. Ergebnisse für die 10% aller Fahrzeuge mit der geringsten Wertschätzung	122
B.1. Fahrzeugklassen	143
B.2. Fahrzeugtypen	144

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
A3C	Adaptive Cruise and Crossing Control
ACC	Adaptive Cruise Control
AGV	Automated Guided Vehicle
BUS	Bus
CAE	Conflict Area Exclusive
CAR	Personenkraftwagen
CL	Clocked
DAA	Driver-Assistance Agent
DAMAST	Driver Assistance using Multi-Agent Systems in Traffic
DC	Delay Cost
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FC	Free Choice
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
HGV	Lastkraftwagen (Heavy Goods Vehicle)
HiL	Hardware-in-the-Loop
IA	Intersection Agent
IE	Intersection Exclusive
ITC	Intelligent Traffic Control
ITS	Intelligentes Transportsystem
IDM	Intelligent Driving Model
IME	Information Management and Market Engineering
ITSA	Initiale Zeitslotauktion

LE	Lane Exclusive
LS	Lane Shared
MAS	Multi-Agentensystem
MSP	Maschinen-Scheduling-Problem
RSU	Road Side Unit
SiL	Software-in-the-Loop
TSE	Time-Slot Exchange
TSR	Time-Slot Request
OD-Matrix	Quelle-Ziel-Matrix (Origin-Destination Matrix)
PTA	Personal-Travel Assistant
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
Val	Valuation
VCG	Vickrey-Clarke-Groves

Teil I.

Einführung

1. Einleitung

Die Beförderungsleistung des Güterverkehrs in Deutschland nahm in den letzten Jahren stetig zu [DES08]. Für die Zukunft werden weitere starke Anstiege für den Personen- und Güterverkehr erwartet [DES06]. Dieser Anstieg der Verkehrsnachfrage, insbesondere im Bereich des Straßenverkehrs, verursacht u. a. negative ökologische Effekte [BFKS01]. Beispielsweise ist in Deutschland der Verkehr für 29% des gesamten Energiebedarfs und für 20% der CO₂-Emissionen verantwortlich [DES06]. Zudem erschweren überlastete Straßen und unvorhergesehene Staus eine zuverlässige Schätzung der Reise- bzw. Transportzeit.

Darunter leiden insbesondere Verkehrsteilnehmer mit einer besonders hohen Wertschätzung für eine geringe Reisezeit. Dies betrifft nicht nur den Personen-, sondern auch den Güterverkehr. Beispiele für Verkehrsteilnehmer mit besonders hoher Wertschätzung sind Verkehrsteilnehmer auf dem Weg zum Flughafen, die befürchten, ihren gebuchten Flug zu verpassen, oder zu einem Vorstellungsgespräch, zu dem sie keinesfalls zu spät erscheinen möchten. Auch Geschäftsreisende mit einem wichtigen Kundentermin besitzen eine hohe Wertschätzung rechtzeitig anzukommen. Bei der Just-in-time-Produktion verursacht eine verspätete Lieferung von Komponenten unter Umständen sehr hohe Kosten, da dadurch die gesamte Produktion verzögert werden könnte. Deswegen besitzen Gütertransporte, die Teil einer solchen Logistikkette sind, ebenfalls eine hohe Wertschätzung für geringe oder zumindest schwankungsarme Transportzeiten.

Verkehrsteilnehmer mit einer hohen Wertschätzung haben bislang nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten, ihre Reise- bzw. Ankunftszeit zu beeinflussen. Neben der Wahl eines geeigneten und zuverlässigen Verkehrsmittels kann der Verkehrsteilnehmer noch den Zeitpunkt der Abfahrt wählen. Ein früher Abfahrtszeitpunkt reduziert zwar das Risiko einer Verspätung, führt aber auch häufig zu einer ungewünschten verfrühten Ankunft. In vielen Fällen hat der Verkehrsteilnehmer aber auch keine Möglichkeit mehr, das Verkehrsmittel zu wechseln oder die Abfahrt vorzulegen, da unvorhergesehene Störungen erst während der Fahrt auftreten.

Deshalb werden innovative Verkehrssteuerungssysteme (ITC-Systeme) benötigt, die die Wertschätzung der Verkehrsteilnehmer berücksichtigen. Zudem sollen diese Systeme dem steigenden Bedarf an Mobilität besser als bisher gerecht werden.

Aus diesen Gründen ist die Entwicklung effektiver, wertschätzungssensitiver Mechanismen für ein solches ITC-System das Ziel dieser Arbeit. Wertschätzungssensitive Mechanismen erlauben Verkehrsteilnehmern mit einer hohen Wertschätzung für eine geringe Reisezeit, ihre Reisezeit auch noch während der Fahrt zu beeinflussen, ohne dass die übrigen Verkehrsteilnehmer über Gebühr in Mitleidenschaft gezogen werden. Effektive Mechanismen reduzieren die durchschnittliche, mit der Wertschätzung der einzelnen Verkehrsteilnehmer gewichtete Wartezeit.

1. Einleitung

Bislang existieren ausschließlich Ansätze, die nicht wertschätzungssensitiv sind, wie z. B. klassische Lichtsignalanlagen oder das agentengestützte Reservierungssystem von Dresner und Stone [DS08], oder die nur bestimmten Verkehrsteilnehmern, wie z. B. dem öffentlichen Nahverkehr, höhere Prioritäten erlauben [GG00]. Außerdem konzentrieren sich aktuelle Forschungsvorhaben überwiegend auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit und nicht unbedingt auf die Verbesserung der Verkehrseffizienz.

Da der Straßenverkehr den größten Anteil am Gesamtverkehr besitzt, konzentriere ich mich in dieser Arbeit auf den Straßenverkehr. Ich betrachte dabei Verkehrsknotenpunkte, da diese die Reisezeit besonders stark beeinflussen, und zeige später, wie sich das entwickelte ITC-System auch in alternativen Anwendungsszenarien einsetzen lässt.

Jedes System, das den Verkehr an Knotenpunkten steuert, vermittelt zwischen Verkehrsteilnehmern mit konkurrierenden Zielen. Verkehrsteilnehmer erhalten Zeitslots, d. h. das Recht, die Kreuzung für ein bestimmtes Zeitintervall in einer bestimmten Richtung zu überqueren. Ein wertschätzungssensitiver Mechanismus beschreibt, wie Verkehrsteilnehmer Zeitslots aushandeln. Da die Wertschätzung für eine geringe Reisezeit eine private Information ist, sind marktbasierende Ansätze, wie z. B. Auktionen, geeignet [Kri02]. Auktionen ermöglichen insbesondere, den Akteur mit der höchsten Wertschätzung zu bestimmen [Kri02]. Die verlässliche Vergabe von Zeitslots ermöglicht den Fahrzeugen zudem, ihre Fahrweise frühzeitig anzupassen und damit weniger Kraftstoff zu verbrauchen.

In einem ITC-System agiert eine große Anzahl an Akteuren in einer komplexen, sich hoch dynamisch verändernden Umgebung. Da Softwareagenten ihre besonderen Stärken in solchen Anwendungen zeigen [Par99], ist die Modellierung eines ITC-Systems mit Hilfe von Softwareagenten naheliegend.

Aus diesen Gründen entwickle ich in dieser Arbeit neuartige wertschätzungssensitive Mechanismen. Diese Mechanismen basieren auf Auktionen und sind agentengestützt. Jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit wird durch einen sogenannten Fahrerassistentenagenten und jede Kreuzungssteuerungseinheit durch einen Kreuzungsagenten unterstützt.

Ich vergleiche die entwickelten Mechanismen mit klassischen Lichtsignalanlagen, aber auch mit anderen nicht-wertschätzungssensitiven Mechanismen, wie z. B. einem einfachen FIFO-Mechanismus, bezüglich Durchsatz, Effektivität, Wartezeit und Kraftstoffverbrauch.

Die Herausforderungen bei der Entwicklung eines effektiven, wertschätzungssensitiven ITC-Systems sind vielfältig [SB09]. Sie sind sowohl technischer als auch ökonomischer Natur. Die Gewährleistung der Verkehrssicherheit und der Umgang mit einer heterogenen Ausstattung sind verkehrstechnische Herausforderungen. Neben informationstechnischen Herausforderungen, wie z. B. der notwendigen drahtlosen Kommunikation, gibt es auch ökonomische Herausforderungen. Insbesondere muss beim Entwurf der Mechanismen sehr sorgfältig vorgegangen werden, da der Mechanismus die Strategien der Akteure und damit den Erfolg des gesamten Systems beeinflusst [RZ94]. Darüberhinaus dürfen auch die menschlichen Akteure, d. h. die Verkehrsteilnehmer, nicht vernachlässigt werden. Ein wertschätzungssensitives ITC-System muss von den Verkehrsteilnehmern akzeptiert werden und darf keine negativen Auswirkungen auf das Fahrverhalten haben. Schließlich müssen auch noch rechtliche Fragestellungen beachtet werden.

1. Einleitung

Simulationen sind ein nützliches und leistungsstarkes Werkzeug für den Entwurf und den Betrieb von Verkehrssystemen [Law07]. Aus diesem Grund werden die verschiedenen Mechanismen mit Hilfe eines eigens entwickelten Simulationswerkzeugs evaluiert und untereinander verglichen. Der Vergleich mit Lichtsignalanlagen zeigt, dass bei ausreichend hohen Graden der nebenläufigen Kreuzungsüberquerung agentengestützte Mechanismen Lichtsignalanlagen deutlich überlegen sind. Bereits nicht-wertschätzungssensitive, aber agentengestützte Mechanismen reduzieren sowohl die gewichtete als auch die ungewichtete Wartezeit teilweise um über 70%. Bei wertschätzungssensitiven Mechanismen wird die gewichtete und die ungewichtete Wartezeit teilweise um über 90% reduziert. Darüberhinaus sind die positiven Effekte beim Durchsatz und beim Kraftstoffverbrauch sehr deutlich.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts DAMAST (Driver Assistance using Multi-Agent Systems in Traffic) [DAM] erstellt. Von Juli 2005 bis Oktober 2008 kooperierten in DAMAST die Universität Karlsruhe (TH) und die INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH [INI].

Das Ziel von DAMAST ist die Untersuchung des Potenzials von Agententechnologie im Straßenverkehr. Dabei steht vor allem die Koordination der Verkehrsteilnehmer im Fokus. Im Rahmen von DAMAST wurde das DAMAST-Simulationswerkzeug entwickelt, mit dem die agentengestützte Verkehrssteuerung simuliert und visualisiert werden kann.

Der weitere Aufbau dieser Arbeit ist wie folgt: In Kapitel 2 beschreibe ich zunächst verkehrliche Grundlagen und diskutiere verwandte Forschungsvorhaben. Anschließend gehe ich näher auf die Grundlagen der Verkehrssimulation und der Agententechnologie ein. Kapitel 3 beschreibt die vielfältigen Herausforderungen, die ein solches System stellt. Das entwickelte Simulationswerkzeug beschreibe ich in Kapitel 4.

In Kapitel 5 übertrage ich das Kreuzungssteuerungsproblem auf ein Maschinen-Scheduling-Problem und entwickle daraus in Kapitel 6 mehrere Lösungen für das Kreuzungssteuerungsproblem. Das dabei verwendete Fahrerassistenzsystem stelle ich in Kapitel 7 vor.

Die verschiedenen Mechanismen vergleiche ich in Kapitel 8. In Kapitel 9 zeige ich alternative Anwendungsszenarien auf, in denen das in dieser Arbeit entworfene ITC-System ebenfalls realisiert werden kann. Abschließend folgt in Kapitel 10 die Zusammenfassung und ein Ausblick.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel beschreibe ich die für diese Arbeit benötigten Grundlagen. Zunächst definiere ich die wichtigen verkehrlichen Begriffe und diskutiere für diese Arbeit relevante Forschungsvorhaben. Anschließend beschreibe ich wesentliche Aspekte der Verkehrssimulation. Abschließend gehe ich auf die Grundzüge der Agententechnologie ein.

2.1. Verkehrliche Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt definiere ich die für diese Arbeit wesentlichen verkehrlichen Begriffe.

Um die Beschreibung nicht unnötig zu komplizieren, verwende ich im Folgenden den Begriff *Fahrer* stellvertretend für alle Verkehrsteilnehmer, obwohl sich das System nicht zwangsläufig auf den Kraftfahrzeugverkehr beschränken muss. Da sich ein Fahrer üblicherweise innerhalb eines Fahrzeugs befindet, verwende ich aus demselben Grund den Begriff *Fahrzeug* stellvertretend für die gesamte Fahrer-Fahrzeug-Einheit.

2.1.1. Wartezeit

Ein Fahrzeug beginnt seine Fahrt zum Zeitpunkt t_b (*Fahrtbeginn*) und beendet sie zum Zeitpunkt t_e (*Fahrtende*). Während der Fahrt überquert es möglicherweise eine Kreuzung. In diesem Fall fährt es in die Kreuzung zum Zeitpunkt c_b (*Überquerungsbeginn*) ein und verlässt die Kreuzung zum Zeitpunkt c_e (*Überquerungsende*). Seine *Reisezeit* T_d ist dann die Zeitspanne zwischen Fahrtbeginn t_b und Fahrtende t_e . Die *Überquerungszeit* T_c der Kreuzung ist dann die Zeitspanne zwischen Überquerungsbeginn c_b und Überquerungsende c_e .

Definition 2.1 (Minimale Reisezeit $\min T_d$). *Ein Fahrzeug benötigt eine minimale Reisezeit $\min T_d$, falls es während der Fahrt auf kein anderes Fahrzeug achten muss und das Fahrzeug immer mit Wunschgeschwindigkeit fährt.*

Dies bedeutet, dass das Fahrzeug sich zwar an alle menschlich, technisch und rechtlich bedingten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbeschränkungen hält, aber sich nicht um andere Fahrzeuge, Vorfahrtsregeln oder Lichtsignalanlagen kümmert. Die minimale Reisezeit entspricht der Reisezeit eines Fahrzeugs in einem ansonst leeren Verkehrsnetz. In verwandten Arbeiten wird dies teilweise als Overpass-Strategie bezeichnet [DS05].

Definition 2.2 (Wartezeit T_w). *Die Wartezeit T_w ist die Differenz zwischen tatsächlicher Reisezeit T_d und minimaler Reisezeit $\min T_d$.*

Die Wartezeit entspricht also der Zeitspanne, die für eine Fahrt länger benötigt wird, weil sich auch andere Fahrzeuge im Verkehrsnetz befinden. [DS05] verwendet dafür den

2. Grundlagen

Begriff *Verzögerung* (engl. *delay*). Damit unterscheidet sich die Wartezeit von der Stillstandszeit eines Fahrzeugs, also der Zeitspanne, die ein Fahrzeug tatsächlich steht.

Definition 2.3 (Frühestmöglicher Überquerungsbeginn $\min c_b$). *Der frühestmögliche Überquerungsbeginn $\min c_b$ ist der Überquerungsbeginn einer Fahrt, bei der das Fahrzeug auf kein anderes Fahrzeug Rücksicht nehmen muss und das Fahrzeug immer mit der maximal möglichen Geschwindigkeit fährt (analog zu Definition 2.1).*

Unter der Annahme, dass der Verkehr auf und nach der Kreuzung ungehindert abfließen kann (Annahme 1: *Verkehr kann auf und nach einer Kreuzung ungehindert abfließen*), lässt sich die Wartezeit eines Fahrzeugs auch alternativ definieren.

Definition 2.4 (Alternative Definition der Wartezeit T_w). *Die Wartezeit T_w ist die Differenz des tatsächlichen und des frühestmöglichen Überquerungsbeginns: $T_w = c_b - \min c_b$.*

Fahrzeuge besitzen eine bestimmte Wertschätzung für eine geringe Reisezeit.

Definition 2.5 (Wertschätzung). *Die Wertschätzung (engl. valuation) $v^j(t)$ des Fahrzeugs j ist der Betrag, den das Fahrzeug j zu bezahlen bereit ist, wenn seine Reisezeit t beträgt.*

Im Falle einer linearen Wertschätzung bezeichnet v^j die Wertschätzung pro Sekunde, also den Betrag, den das Fahrzeug für eine um eine Sekunde geringere Reisezeit zu bezahlen bereit ist. Dann gilt $v^j(t-1) - v^j(t) = v^j$ für jede beliebige Reisezeit t .

Da das in dieser Arbeit entwickelte System insbesondere die Wartezeit für Fahrzeuge mit hoher Wertschätzung reduzieren soll, betrachte ich auch die wertschätzungsgewichtete Wartezeit eines Fahrzeugs.

Definition 2.6 (Wertschätzungsgewichtete Wartezeit). *Die wertschätzungsgewichtete Wartezeit vT_w^j eines Fahrzeugs j ist das Produkt aus der Wertschätzung pro Zeiteinheit und der Wartezeit eines Fahrzeugs: $vT_w^j = v^j \cdot T_w^j$.*

2.1.2. Verkehrsaufkommen

Um das Verkehrsaufkommen zu modellieren, wird der Untersuchungsraum häufig in sogenannte Verkehrszellen eingeteilt. Eine Verkehrszelle kann sowohl als Verkehrsquelle als auch als Verkehrssenke fungieren.

Definition 2.7 (Verkehrsquellen, Verkehrssenken). *Eine Verkehrsquelle ist eine Verkehrszelle, in der Verkehr entsteht. Eine Verkehrssenke ist eine Verkehrszelle, die Verkehr aufnimmt.*

Das Verkehrsaufkommen lässt sich damit in Form einer Quelle-Ziel-Matrix (engl. *origin-destination matrix*, OD-Matrix) beschreiben.

Definition 2.8 (OD-Matrix). *Die OD-Matrix beschreibt die Anzahl an Fahrzeugen, die in einem bestimmten Zeitabschnitt (üblicherweise eine Stunde) von einer bestimmten Verkehrsquelle zu einer bestimmten Verkehrssenke fahren möchten.*

2. Grundlagen

Die Summe aller Zellen einer OD-Matrix ist die Gesamtverkehrsstärke.

Definition 2.9 (Gesamtverkehrsstärke). *Die Gesamtverkehrsstärke entspricht der Anzahl an Fahrzeugen, die in einer bestimmten Zeit durch Verkehrsquellen erzeugt wird.*

Der Kreuzungsdurchsatz beschreibt das Verkehrsaufkommen an einer Kreuzung. Der Kreuzungsdurchsatz kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt gemessen werden.

Definition 2.10 (Kreuzungsdurchsatz). *Der Kreuzungsdurchsatz bezeichnet die Anzahl an Fahrzeugen, die eine Kreuzung pro Zeiteinheit überquert.*

Der Kreuzungsdurchsatz entspricht damit dem Verkehrsfluss bzw. der Verkehrsstärke an einer Kreuzung. Er ist durch die Kreuzungskapazität nach oben beschränkt.

Definition 2.11 (Kreuzungskapazität). *Der maximale Kreuzungsdurchsatz einer Kreuzung wird als Kreuzungskapazität bezeichnet.*

Der gemessene Kreuzungsdurchsatz ist natürlich durch die erzeugte Gesamtverkehrsstärke nach oben beschränkt, d. h. es können niemals mehr Fahrzeuge die Kreuzung überqueren als Fahrzeuge erzeugt werden. Unterschreitet der Kreuzungsdurchsatz die (erzeugte) Gesamtverkehrsstärke deutlich, so ist dies ein Indiz, dass die Warteschlangen vor der Kreuzung und damit auch die Wartezeit zunehmen.

2.1.3. Lichtsignalanlagen

Die Steuerung einer Kreuzung erfolgt häufig mittels Lichtsignalanlagen. Eine Lichtsignalanlage wird auch als Ampel bezeichnet. Bei der Steuerung werden an die verschiedenen Verkehrsströme eines Verkehrsknotenpunkts abwechselnd sogenannte Freigabezeiten vergeben.

Definition 2.12 (Freigabezeit, Grünzeit). *Die Freigabezeit bezeichnet die Zeit, in der ein bestimmter Verkehrsstrom einen Verkehrsknotenpunkt überqueren darf. Bei einem lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt wird dies durch die Farbe Grün angezeigt. Aus diesem Grund wird die Freigabezeit auch Grünzeit genannt.*

2.1.4. Verkehrssteuerungssystem

Um das in dieser Arbeit entwickelte intelligente Verkehrssteuerungssystem beschreiben zu können, werden zunächst die Begriffe Kontext und kontextsensitiv eingeführt.

Definition 2.13 (Kontext). *Kontext ist jede Information, die verwendet werden kann, um die Situation einer Entität zu charakterisieren. Entitäten sind Personen, Orte oder Objekte, die für die Interaktion zwischen einem Benutzer und einer Anwendung als relevant erachtet werden, einschließlich des Benutzers und der Anwendung selbst [Dey01].*

Definition 2.14 (kontextsensitiv). *Ein System ist kontextsensitiv (engl. context-aware), wenn es den Kontext verwendet, um einem Benutzer relevante Informationen oder Dienstleistungen bereitzustellen, wobei die Relevanz von der Aufgabe des Benutzers abhängt [Dey01].*

2. Grundlagen

Damit lässt sich nun ein intelligentes Verkehrssteuerungssystem definieren.

Definition 2.15 (Intelligentes Verkehrssteuerungssystem, ITC-System). *Ein intelligentes Verkehrssteuerungssystem (engl. intelligent traffic-control system, ITC-System) ist ein kontextsensitives System zur Verkehrssteuerung.*

Dabei entsprechen die Verkehrsteilnehmer den Benutzern und das ITC-System der Anwendung. Ein ITC-System ist ein spezielles intelligentes Transportsystem, das den Schwerpunkt auf die Verkehrssteuerung legt, und besitzt damit auch dessen wesentliche Eigenschaften.

Definition 2.16 (Intelligentes Transportsystem, ITS). *Ein intelligentes Transportsystem (ITS) verwendet automatische entscheidungsunterstützende Systeme zur Steuerung und Koordinierung (Automatisierung). Es ist flexibel und bietet den Verkehrsteilnehmern eine große Auswahl (Flexibilität). Es stellt aktuelle und präzise Informationen zur Verfügung (Hohe Informationsqualität). Verkehrsteilnehmer und zu transportierende Güter sind mit eigenen Recheneinheiten ausgestattet (Ausstattung mit Recheneinheiten). Ein ITS verwendet asynchrone, verteilte Algorithmen für die Steuerung und Koordinierung sowie für das Ressourcenmanagement (Verteilte Algorithmen). Dazu müssen die Recheneinheiten der Verkehrsteilnehmer und der zu transportierenden Güter eindeutig identifiziert werden. Die Recheneinheiten agieren asynchron und nebenläufig und kommunizieren miteinander. Die verwendeten Algorithmen müssen robust, performant und stabil sein [GL00].*

Die meisten ITC-Systeme ermitteln den nötigen Kontext mit Hilfe von stationären Sensoren. In dieser Arbeit wird jedoch ein ITC-System entwickelt, das auch den Kontext berücksichtigt, der nicht durch stationäre Sensoren ermittelt werden kann, wie z. B. die Wertschätzung der einzelnen Verkehrsteilnehmer für eine geringe Reisezeit. Ein ITC-System, das auch die Wertschätzung berücksichtigen kann, wird im Folgenden als wertschätzungssensitiv bezeichnet.

Definition 2.17 (wertschätzungssensitiv). *Ein kontextsensitives System ist wertschätzungssensitiv (engl. valuation-aware), wenn es auch die Wertschätzung eines Benutzers berücksichtigen kann.*

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines effektiven wertschätzungssensitiven ITC-Systems.

Definition 2.18 (effektiv). *Ein ITC-System ist effektiv, wenn es die durchschnittliche wertschätzungsgewichtete Wartezeit im Vergleich zu einem traditionellen Verkehrssteuerungssystem reduziert.*

2.1.5. Fahrerassistenzsysteme

Heutige Fahrzeuge sind bereits serienmäßig mit verschiedenen Fahrerassistenzsystemen ausgestattet.

2. Grundlagen

Definition 2.19 (Fahrerassistenzsystem). *Ein Fahrerassistenzsystem (engl. driver-assistance system) erfasst Umfeldinformation mit Hilfe von Sensoren und verarbeitet diese, um den menschlichen Fahrer bei der Führung seines Kraftfahrzeugs zu unterstützen [Sti05].*

Fahrerassistenzsysteme werden zur *Erhöhung der Verkehrssicherheit* [Eva99], zur *Erhöhung der Verkehrseffizienz* und zur *Erhöhung des Fahrkomforts* eingesetzt. Dabei wirken sich Fahrerassistenzsysteme nicht immer nur auf eines dieser drei Ziele aus.

Bekannte Beispiele für Fahrerassistenzsysteme, die insbesondere zur Erhöhung der Verkehrssicherheit eingesetzt werden, sind Antiblockiersysteme (ABS), elektronische Stabilitätsprogramme (ESP) und Bremsassistenten. Vor allem zur Erhöhung des Fahrkomforts dienen z. B. Navigationssysteme oder Tempomaten.

Ein prominentes Beispiel für ein Fahrerassistenzsystem, das vor allem den Fahrkomfort erhöht, aber darüber hinaus auch die Verkehrseffizienz [MMB01] und die Verkehrssicherheit [Kno06] positiv verbessern soll, ist der Abstandsregeltempomat [IC93, MMB01, BFP⁺03, Kno06].

Definition 2.20 (Abstandsregeltempomat, ACC-System). *Ein Abstandsregeltempomat (engl. adaptive cruise-control system, ACC-System) ist ein Fahrerassistenzsystem, das die Geschwindigkeit des Fahrzeugs automatisch so regelt, dass ein gewünschter Zeitabstand zwischen dem Fahrzeug und seinem direkten Vorgänger eingehalten wird [BFP⁺03]. Falls das Fahrzeug keinen Vorgänger besitzt oder der Vorgänger weit genug entfernt ist, regelt das ACC-System die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf eine gewünschte Reisegeschwindigkeit.*

ACC-Systeme wurden zunächst für höhere Geschwindigkeiten auf Autobahnen entwickelt und später so erweitert, dass sie auch in geringem oder stockendem Verkehr eingesetzt werden können [PBHJ99, VNA00, Kno06]. In jüngerer Zeit wird versucht, die Verkehrseffizienz dadurch zu verbessern, dass ACC-Systeme miteinander kommunizieren [vAvDV06]. Solche sogenannten kooperativen ACC-Systeme sollen geringere Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen erlauben [LHD02]. Weitere mögliche Erweiterungen sind die Kombination eines ACC-Systems mit einem Navigationssystem [Kno06] oder den Fahrer neben der Wahl der Reisegeschwindigkeit auch noch ein bestimmtes Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten wählen zu lassen [MNK06].

In dieser Arbeit stelle ich eine neuartige Erweiterung eines klassischen Abstandsregeltempomaten vor. Ich bezeichne dieses erweiterte ACC-System als Abstandsregel- und Kreuzungsquerungstempomat.

Definition 2.21 (Abstandsregel- und Kreuzungsquerungstempomat, A3C-System). *Ein Abstandsregel- und Kreuzungsquerungstempomat (engl. adaptive cruise and crossing control system, A3C-System) ist ein ACC-System, das zusätzlich noch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs so regelt, dass das Fahrzeug eine Kreuzung zu einem gewünschten Zeitpunkt mit einer gewünschten Geschwindigkeit betritt und die Geschwindigkeit während der Kreuzungsüberquerung wie gewünscht regelt.*

2.1.6. Kreuzungssteuerung

Das in dieser Arbeit entwickelte ITC-System basiert auf der Interaktion von Fahrerassistenzsystemen mit sogenannten *Road Side Units* (RSU).

Definition 2.22 (Road Side Unit, RSU). *Eine Road Side Unit (RSU) ist eine fest installierte Rechen- und Kommunikationseinheit, die zum Betrieb eines ITS benötigt wird.*

Wenn man von Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur spricht, so meint man eigentlich die Kommunikation von fahrzeuggebundenen Fahrerassistenzsystemen und stationären RSUs.

In dem in dieser Arbeit entwickelten ITC-System kommunizieren A3C-Systeme mit besonderen RSUs, im folgenden Kreuzungssteuerungseinheiten genannt.

Definition 2.23 (Kreuzungssteuerungseinheit). *Eine Kreuzungssteuerungseinheit (engl. intersection control unit) ist eine an einer Kreuzung installierte RSU, die zudem Überfahrtsrechte über die Kreuzung an einzelne Verkehrsteilnehmer vergeben kann.*

2.2. Verwandte Forschungsvorhaben zu innovativen Fahrerassistenzsystemen

Die Verbesserung bestehender und die Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme ist das Ziel vieler Forschungsvorhaben. In diesem Abschnitt stelle ich eine Auswahl der für diese Arbeit wichtigen Vorhaben vor und diskutiere deren Ziele und wie sie die vorliegende Arbeit beeinflussen.

2.2.1. Verbesserung der Verkehrssicherheit

Die Europäische Kommission hat sich zum Ziel gesetzt, die Anzahl der Verkehrstoten bis 2010 zu halbieren [Com01]. Um dieses Ziel zu erreichen, fördert die EU entsprechende Forschungsvorhaben.

Ein solches Vorhaben ist das Projekt PReVENT (Programm zur Verbesserung der aktiven Sicherheit). In PReVENT arbeitete die europäische Automobilindustrie zusammen, um die Verkehrssicherheit durch neuartige präventive Systeme und Technologien zu erhöhen [PRe08]. Das Teilprojekt INTERSAFE widmete sich speziell der Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Vermeidung schwerer Kollisionen an Straßenkreuzungen [FL05]. Dazu werden Fahrzeuge mit verschiedenen Sensoren ausgestattet. Zudem erhalten die Fahrzeuge eine Kommunikationseinheit, mit der sie entweder mit der Verkehrsinfrastruktur direkt oder über die Verkehrsinfrastruktur indirekt mit anderen Fahrzeugen kommunizieren können. Dabei werden z. B. Fahrzeugpositionen zwischen Fahrzeugen ohne direkten Sichtkontakt oder Informationen über die aktuelle Wetterlage oder den aktuellen Straßenzustand ausgetauscht [INT07].

PReVENT konnte dazu auch auf die Ergebnisse nationaler Forschungsvorhaben aufbauen, wie z. B. auf die vom BmBF geförderte Forschungsinitiative INVENT (Intelligenten Verkehr und nutzergerechte Technik), welche sich von 2001 bis 2005 der Erhöhung der

2. Grundlagen

Verkehrssicherheit und der Verbesserung der Verkehrseffizienz widmete [INV, INV05]. Dazu wurden neuartige Fahrerassistenzsysteme entwickelt, wie z. B. ein Kreuzungs-, ein Querführungs- und ein Stauassistent. Zur Verbesserung der Verkehrseffizienz wurden u. a. kooperative Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die Verkehrszustände zwischen Fahrzeugen und Verkehrsleitzentralen kommunizieren [BK05], und die Routenplanung in Lieferverkehren optimiert.

Einen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit sollen intelligente Fahrzeugsicherheitssysteme leisten. Deshalb verfolgt die EU zusammen mit europäischen Unternehmen die sogenannte eSafety-Initiative [Eur11, Eur08]. Im Rahmen von CVIS (Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems) [(CV08)] arbeiten über 60 europäische Partner zusammen, um die Technologie voranzutreiben, mit der Fahrzeuge und Verkehrsinfrastruktur über ein drahtloses Funknetzwerk kooperieren können. Die beteiligten Partner versprechen sich davon sowohl die Verbesserung der Verkehrseffizienz als auch die Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Momentan fördert die EU unter anderem die Projekte COOPERS, SAFESPOT und SEVECOM. Im Projekt COOPERS (CO-OPERative SystEms for Intelligent Road Safety) [COO] werden innovative Telematikanwendungen mit dem langfristigen Ziel entwickelt, ein kooperatives Verkehrsmanagement zwischen Fahrzeug und Infrastruktur zu entwickeln. Durch den Austausch aktueller Verkehrsinformationen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur soll die Verkehrssicherheit erhöht werden. SAFESPOT [SAF] entwickelt dazu eine Kommunikationsplattform, mit der Fahrzeuge und Infrastruktur untereinander sicherheitsrelevante Informationen austauschen können. Dazu werden Fahrzeuge mit kooperativen Fahrerassistenzsystemen und die Infrastruktur mit RSUs ausgestattet. Sowohl Fahrerassistenzsysteme als auch RSUs können mit Verkehrssicherheits- und Verkehrsleitzentralen kommunizieren. Das Projekt SEVECOM (Secure Vehicle Communication) [SEV] kümmert sich um die sichere Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur.

Die Bestrebungen, die Verkehrssicherheit durch intelligente Fahrzeugsicherheitssysteme zu erhöhen, sind nicht auf Europa beschränkt. Dies zeigt z. B. die Intelligent Vehicle Initiative (IVI) [ITS05], die bis 2005 durch das Verkehrsministerium der USA gefördert wurde. Die IVI verfolgte das Ziel, die Anzahl und Schwere von Verkehrsunfällen zu reduzieren. Dabei konzentrierten sich die beteiligten Partner darauf, die Entwicklung und den kommerziellen Einsatz fahrzeuggebundener Fahrerassistenzsysteme voranzutreiben, die in der Lage sind, mit der Verkehrsinfrastruktur zu kooperieren. In Japan wurde dazu VICS (Vehicle Information and Communication System) entwickelt. VICS soll sowohl die Verkehrssicherheit als auch den Fahrkomfort verbessern [VIC].

Alle bislang vorgestellten Vorhaben konzentrieren sich auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit. Die Verbesserung der Verkehrseffizienz oder des Fahrkomforts werden zwar in einigen Vorhaben ebenfalls angestrebt, aber auch nur, weil man sich davon zusätzlich die Verbesserung der Verkehrssicherheit erhofft. Die meisten aktuellen Vorhaben entwickeln oder unterstellen eine geeignete Kommunikationsinfrastruktur, mit der Fahrzeuge untereinander oder mit Verkehrsinfrastruktur kommunizieren können. Auch die Automobilindustrie erkennt deren Bedeutung. Dies zeigt sich u. a. an den Kooperationen verschiedener Automobilhersteller und -zulieferer wie dem Car 2 Car Communica-

2. Grundlagen

tion Consortium [C2C, NOW] oder der bereits erwähnten Intelligent Vehicle Initiative [ITS05].

Damit auch Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller miteinander kommunizieren können, bedarf es einer standardisierten Kommunikationsinfrastruktur. Deren Entwicklung wird durch die Zusammenarbeit der Automobilindustrie in öffentlich geförderten Projekten erleichtert. Gleichzeitig konkretisieren sich die Standardisierungsbemühungen für Erweiterungen des Standards für drahtlose Kommunikation IEEE 802.11 für die Anwendung im Verkehr [WAV10]. Dieser Schritt ist notwendig, da die bislang in Serienfahrzeugen angebotenen Fahrerassistenzsysteme nicht in der Lage sind, mit Fahrerassistenzsystemen anderer Fahrzeuge zu kooperieren.

Die Beteiligung der Automobilindustrie an diesen Vorhaben zeigt, dass auch sie es für wahrscheinlich hält, dass zukünftige Serienfahrzeuge mit einer Technologie ausgestattet sein werden, die es Fahrerassistenzsystemen erlaubt, mit Systemen anderer Hersteller zu kooperieren. Auf solch eine Technologie kann auch das von mir entwickelte wertschätzungssensitive ITC-System aufbauen.

2.2.2. Verbesserung der Verkehrseffizienz

Bislang wird die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur nur in wenigen Vorhaben mit dem Primärziel der Verbesserung der Verkehrseffizienz untersucht. Eines der wenigen Beispiele ist das Projekt Travolution: Von 2006 bis 2008 arbeiteten die Stadt Ingolstadt, die Audi AG, die TU München und die GEVAS software GmbH gemeinsam am Projekt Travolution [Tra]. Die Projektpartner verfolgten dabei zwei verschiedene Ansätze: Einerseits wurden genetische Algorithmen zur Optimierung der Verkehrssteuerung an Straßenkreuzungen verwendet. Andererseits wurden drei Straßenkreuzungen in Ingolstadt mit RSUs ausgestattet. Diese RSUs sind in der Lage mit Fahrzeugen zu kommunizieren, die dafür mit speziellen Fahrerassistenzsystemen ausgestattet wurden. Die RSUs bestimmen die Wahrscheinlichkeit der nächsten Freigabezeit einer Lichtsignalanlage für eine bestimmte Richtung und teilen diese den Fahrzeugen mit, die sich aus der entsprechenden Richtung der Kreuzung nähern. Die Fahrerassistenzsysteme berechnen daraus eine empfohlene Reisegeschwindigkeit und schlagen diese dem Fahrer vor [MB06]. Laut [GEV11] können diese Fahrzeuge damit die Kreuzung überqueren, ohne vorher anhalten zu müssen. Sie sparen damit Kraftstoff und reduzieren die Umweltbelastung.

Der Ansatz aus Travolution berücksichtigt nicht die aktuelle Verkehrssituation an einer Kreuzung. Deswegen kann damit nicht der spezielle Kontext der auf die Kreuzung zufahrenden Fahrzeuge betrachtet werden, wie z. B. die Wertschätzung des Fahrers für eine geringe Reisezeit.

Aus demselben Grund können auch nicht die Fahrzeuge berücksichtigt werden, die sich vor einem bestimmten Fahrzeug einer Kreuzung nähern. Diese Fahrzeuge verhindern möglicherweise, dass sich das Fahrzeug mit der empfohlenen Reisegeschwindigkeit der Kreuzung nähern kann, da sie selbst erst zu Beginn der Grünphase die Kreuzung überqueren können. Deshalb ist der erwartete Beginn der nächsten Freigabezeit nur der frühestmögliche Überquerungszeitpunkt und die empfohlene Reisegeschwindigkeit nur

2. Grundlagen

eine obere Schranke. Möglicherweise sind die Fahrzeuge gezwungen, langsamer zu fahren.

In meiner Arbeit tritt dieses Problem nicht auf, da ich auch das Vergabeverfahren der Überfahrtsrechte an einer Kreuzung so anpasse, dass alle Fahrzeuge, die sich einer Kreuzung nähern, und die Reihenfolge, in der sie die Kreuzung überqueren können, berücksichtigt werden. Dabei werden die Überfahrtsrechte individuell vergeben, so dass das Zeitintervall eines Überfahrtsrechts garantiert werden kann und nicht auf einer Prognose basiert.

Im Reservierungsverfahren von Dresner und Stone [DS08] sind Fahrzeuge und Kreuzungen mit Softwareagenten ausgestattet. Die Fahreragenten der Fahrzeuge kommunizieren mit dem Kreuzungsagenten einer Kreuzung. Der Kreuzungsagent vergibt Überfahrtsrechte gemäß einer bestimmten Strategie. Sobald sich Fahrzeuge einer Kreuzung nähern, versuchen die Fahreragenten, zeitlich befristete Überfahrtsrechte beim Kreuzungsagenten zu reservieren. Falls eine Reservierung möglich ist, bestätigt der Kreuzungsagent das angefragte Überfahrtsrecht. Andernfalls schlägt der Kreuzungsagent dem Fahreragent ein geeignetes Überfahrtsrecht vor. Der Kreuzungsagent verfolgt dabei eine einfache FIFO-Strategie. Es zeigt sich trotzdem, dass dieses Reservierungsverfahren klassischen Lichtsignalanlagen bezüglich der durchschnittlichen Wartezeit deutlich überlegen ist [DS08]. Aus diesem Grund verwende ich das Reservierungsverfahren als Referenzmechanismus. In dieser Arbeit bezeichne ich den Referenzmechanismus als Zeitslotanfrage (siehe Abschnitt 6.5).

[DS08] betrachtet allerdings keine Fahrerassistenzsysteme, sondern autonome Fahrzeuge. Es lässt sich jedoch leicht auf meine Arbeit übertragen. In meiner Arbeit sind Fahrzeuge nicht grundsätzlich autonom, sondern mit einem Fahrerassistenzsystem ausgestattet, das autonom in das Fahrverhalten eingreifen kann. Das Fahrerassistenzsystem kann jedoch vom Fahrer übersteuert werden.

Das Reservierungsverfahren ist ausschließlich darauf ausgerichtet, die Wartezeit zu minimieren. Die Wertschätzung der einzelnen Verkehrsteilnehmer für eine geringe Reisezeit bleibt unberücksichtigt. Außerdem unterscheiden die Autoren ausschließlich autonome, führerlose Fahrzeuge und Fahrzeuge mit einem menschlichen Fahrer. Fahrzeuge mit einem menschlichen Fahrer können nicht am Reservierungssystem teilnehmen und müssen besonders berücksichtigt werden (siehe dazu auch Abschnitt 9.3).

2.2.3. Einsatz autonomer Fahrzeuge

Der Einsatz autonom agierender Fahrzeuge (engl. *Automated Guided Vehicle*, AGV) geht weit über das hinaus, was in den bisher vorgestellten Forschungsprojekten untersucht wird. Die Forschung in dieser Richtung wird stark von militärischen Aspekten getrieben. Dies belegen unter anderem die von der DARPA initiierten Wettbewerbe DARPA Grand Challenge 2004 [DARa], DARPA Grand Challenge 2005 [DARb, SRT05] und DARPA Urban Challenge 2007 [DARc, SRT].

Allerdings lassen sich führerlose Fahrzeuge bereits jetzt auch für den zivilen Bereich sinnvoll einsetzen, wie z. B. im Container Terminal Altenwerder [HHLa, HHLb] (siehe auch Kapitel 9). Weitere Möglichkeiten der zivilen Anwendung werden u. a. in von der

2. Grundlagen

EU geförderten Projekten (z. B. CityMobil [Cit]) untersucht. In diesen Projekten steht wieder die Erhöhung der Verkehrssicherheit und die Verbesserung der Verkehrseffizienz im Vordergrund [IB99, WBS06]. Technologien für den Einsatz autonomer Fahrzeuge können grundsätzlich auch in das entwickelte ITC-System integriert werden. Ein ITC-System kann jedoch immer auch ohne den Einsatz von autonomen Fahrzeugen betrieben werden.

2.3. Verkehrssimulation

Ich verwende Simulationen, um die Eigenschaften des in dieser Arbeit entwickelten wertschätzungssensitiven ITC-Systems zu untersuchen. Bevor ich einen Überblick über bestehende Verkehrssimulationsmodelle und -werkzeuge gebe, zeige ich, warum Simulationen für diese Arbeit geeignet sind. Anschließend bewerte ich, inwiefern die existierenden Modelle und Werkzeuge für meine Untersuchung verwendet werden können.

2.3.1. Simulation

Die Entwicklung eines neuen oder verbesserten Systems ist mit bestimmten Erwartungen verknüpft. Es ist nicht immer sicher, ob die Erwartungen auch tatsächlich erfüllt werden können. Da frühe Änderungen deutlich günstiger sind als späte Änderungen, möchte man so früh wie möglich, die tatsächlichen Eigenschaften eines Systems bestimmen [Law07].

In manchen Fällen ist es kostengünstig möglich, ein System vollständig zu erstellen oder zu ändern und die tatsächlichen Eigenschaften des Systems erst im Nachhinein zu ermitteln.

Meistens ist dies jedoch nicht möglich, wenn man mehrere Alternativen miteinander vergleichen möchte, weil die Erstellung eines Systems üblicherweise sehr teuer ist. In diesem Fall kann man ein physikalisches Modell anfertigen. Mit physikalischen Modellen lassen sich z. B. aerodynamische Eigenschaften untersuchen.

Für viele Fragestellungen kann man jedoch auch kein physikalisches Modell verwenden. Eine gängige Alternative ist die Erstellung eines *mathematischen Modells*. Dazu werden Annahmen über das zu untersuchende System in Form von mathematischen oder logischen Beziehungen formuliert. Falls ein mathematisches Modell nicht zu komplex ist, kann es analytisch untersucht werden. Man erhält in diesem Fall eine exakte Lösung für die zu untersuchende Fragestellung. Allerdings sind die meisten realistischen Modelle zu komplex, als dass sie analytisch gelöst werden können. In diesem Fall müssen die mathematischen Modelle mit Hilfe von Simulationen untersucht werden [Law07].

Definition 2.24 (Simulation). *In einer Simulation werden Modelle numerisch evaluiert und aus den entstandenen Daten die tatsächlichen Eigenschaften des Modells berechnet [Law07].*

Mathematische Modelle, die mit Hilfe von Simulationen untersucht werden, bezeichnet man als Simulationsmodelle. Sie lassen sich anhand dreier Dimensionen klassifizieren [Law07]. *Statische Simulationsmodelle* beschreiben ein System zu einer bestimmten Zeit.

2. Grundlagen

Dynamische Simulationsmodelle beschreiben die Entwicklung eines Systems über die Zeit.

Deterministische Simulationsmodelle besitzen keine probabilistischen Komponenten. Andernfalls spricht man von *stochastischen Simulationsmodellen*.

In *diskreten Simulationsmodellen* sind Zustandsänderung nur zu bestimmten Zeiten (zeitdiskret) möglich oder die Zustände können nur diskrete Werte annehmen (wertdiskret). In *kontinuierlichen Simulationsmodellen* können Zustandsänderungen jederzeit auftreten und Zustände kontinuierliche Werte annehmen.

Simulationen werden u. a. für den Entwurf und die Analyse von Produktionsanlagen, für die Bestimmung von Protokollen in Kommunikationsnetzwerken, aber auch für den Entwurf und Betrieb von Verkehrssystemen verwendet [Law07]. Dies liegt daran, dass die Änderung der Verkehrsinfrastruktur sehr teuer ist und realistische Verkehrsmodelle sich nur selten analytisch lösen lassen. Aus diesen Gründen verwende auch ich in meiner Arbeit Simulationen.

2.3.2. Verkehrsflussmodelle

Bestehende Verkehrssimulationsmodelle werden ständig weiterentwickelt und in verschiedenen Simulationswerkzeugen implementiert. Im Folgenden gehe ich zunächst auf eine Auswahl wichtiger Modelle für die Verkehrssimulation ein und diskutiere, inwiefern sie für meine Untersuchung geeignet sind.

Aufgrund der Vielzahl existierender Verkehrssimulationsmodelle ist eine vollständige Aufzählung nicht möglich. Aus diesem Grund konzentriere ich mich auf Klassen von Simulationsmodellen und nenne prominente Vertreter.

Für die Modellierung der Dynamik des Straßenverkehrs werden vor allem *Verkehrsflussmodelle* verwendet [Bra00]. [Bie02] unterscheidet bei den Verkehrsflussmodellen zwischen High-Fidelity- und Low-Fidelity-Modellen. *High-Fidelity-Modelle* beschreiben die Verkehrsdynamik sehr detailliert und eignen sich deshalb auch für sehr detaillierte Untersuchungen. Sie sind jedoch nicht für die Echtzeitsimulation großer Verkehrsnetze oder Fahrzeugmengen geeignet.

Im Gegensatz dazu beschreiben *Low-Fidelity-Modelle* nur die wesentlichsten Charakteristika. Sie eignen sich demnach nicht für detaillierte Untersuchungen, erlauben aber die Simulation großer Verkehrsnetze und Fahrzeugmengen. Die Unterscheidung in High-Fidelity- und Low-Fidelity-Modelle ist eine Unterscheidung hinsichtlich des gewünschten *Anwendungsprofils* [Bra00].

Desweiteren lassen sich Verkehrsmodelle aufgrund der Auflösung der zu modellierenden Elemente klassifizieren. Dies führt zu einer Einteilung in makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Verkehrsmodelle [Bra00, Bie02].

Mikroskopische Modelle betrachten einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten [Bie02]. Dabei wird nochmals zwischen raumkontinuierlichen und raumdiskreten mikroskopischen Modellen unterschieden. Alle mikroskopischen Modelle sind zeitdiskret, d. h. die Simulation erfolgt in diskreten Zeitschritten. In *raumkontinuierlichen* mikroskopischen Modellen reagieren die einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten auf Abstand und Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Das psycho-physische Folgemodell

2. Grundlagen

von Wiedemann [Wie74] ist ein wichtiger Vertreter dieser Simulationsmodelle. Es berücksichtigt zudem die Wahrnehmung der einzelnen Fahrer und ist sehr detailliert. Da es damit zu den High-Fidelity-Modellen gehört, ist es nicht für die Simulation großer Verkehrsnetze oder Fahrzeugmengen in Echtzeit geeignet [Bie02].

Im Gegensatz dazu basieren die *raumdiskreten* mikroskopischen Modelle auf sogenannten zellulären Automaten. In diesem Fall werden die einzelnen Streckenelemente in Zellen unterteilt. In jeder Zelle kann sich maximal ein Fahrzeug befinden. Modelle, die auf zellulären Automaten basieren, gehören zu den Low-Fidelity-Modellen [Bra00]. Das von Nagel und Schreckenberg [NS92] beschriebene Modell gehört zu den ersten, die zelluläre Automaten in der Verkehrssimulation aufgreifen.

In *submikroskopischen Modellen* werden die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten weiter aufgebrochen und zusätzlich einzelne Fahrzeugkomponenten betrachtet. Sie werden vor allem für fahrzeugtechnische und regelungstechnische Untersuchungen verwendet, können aber auch für die Simulation von Verkehrstelematikkomponenten verwendet werden [Bra00], z. B. für Software-in-the-Loop (SiL) oder für Hardware-in-the-Loop (HiL), wie es beim Rapid Control Prototyping verwendet wird [AB06]. Dabei wird in der Entwicklungsphase von Software- bzw. Hardware-Komponenten die Umgebung simuliert, in der diese Komponenten später verwendet werden sollen.

Makroskopische Modelle abstrahieren von den einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und verwenden stattdessen aggregierte Parameter, wie z. B. Verkehrsdichte oder die mittlere Geschwindigkeit. Sie gehören damit zu den Low-Fidelity-Modellen.

2.3.3. Verkehrssimulationswerkzeuge

Simulationswerkzeuge werden für unterschiedlichste Anwendungsszenarien entwickelt. Sie implementieren eine geeignete Auswahl verschiedener Simulationsmodelle für unterschiedliche Aufgaben.

PELOPS

Das Verkehrssimulationswerkzeug PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) [fkaa] kombiniert submikroskopische fahrzeugtechnische und mikroskopische verkehrstechnische Modelle [fkab]. Damit behandelt PELOPS Fahrer und Fahrzeug nicht mehr als Einheit. Mit PELOPS können die Wechselwirkungen von Fahrzeugkomponenten untereinander und mit dem Fahrer berücksichtigt werden.

Dazu implementiert PELOPS ein Umweltmodell, ein Fahrzeugmodell und ein Fahrermodell. Das *Umweltmodell* umfasst neben der Geometrie der Verkehrswege auch Verkehrszeichen und bestimmte Umweltbedingungen.

Das *Fahrzeugmodell* berechnet die Bewegungsdynamik aus den Stellparametern des Fahrzeugs. Es beinhaltet auch ein *Sensormodell*, mit dem die Lage, die Erfassungsgeometrie und Erfassungsfehler eines Sensors modelliert werden können.

Das *Fahrermodell* besteht aus einem Verhaltens- und einem Handlungsmodell. Im *Verhaltensmodell* wird aus dem aktuellen Zustand des Fahrzeugs und der Fahrzeugumge-

2. Grundlagen

bung eine Fahrstrategie abgeleitet. Im *Handlungsmodell* wird diese Strategie auf die Stellparameter des Fahrzeugs übertragen. Das Verhaltensmodell besteht wiederum aus zwei Komponenten, nämlich einem Folgemodell und einem Spurwechselmodell. Das *Folgemodell* beschreibt, wie sich ein menschlicher Fahrer gegenüber vorausfahrenden Fahrzeugen verhält. Das *Spurwechselmodell* modelliert das Spurwechselverhalten eines menschlichen Fahrers.

PELOPS verwendet eine Weiterentwicklung des psycho-physischen Folgemodells von Wiedemann [Wie74] als Folgemodell und ein selbst entwickeltes Spurwechselmodell.

VISSIM

Das Verkehrssimulationswerkzeug VISSIM (Verkehr In Städten - SIMulation) [PTV] unterstützt multimodalen Verkehr, d. h. nicht nur den Straßen-, sondern auch den Schienen- und Fußgängerverkehr. Es verwendet ein mikroskopisches Verkehrssimulationsmodell. Im Gegensatz zu PELOPS werden in VISSIM Fahrer und Fahrzeug als Einheit betrachtet. Aus diesem Grund unterscheidet VISSIM nicht zwischen Fahrzeug- und Fahrermodell. VISSIM verwendet ebenfalls eine Erweiterung des Folgemodells von Wiedemann [Wie74] und unterstützt ebenfalls den Spurwechsel. Es ermöglicht auch die detaillierte Visualisierung der Bewegungsabläufe der einzelnen Fahrzeuge.

Weitere Werkzeuge

Neben PELOPS und VISSIM gibt es noch eine Vielzahl weiterer Verkehrssimulationswerkzeuge [ABB⁺97, ITS00], z. B. das kommerzielle Simulationswerkzeug AIMSUN [BFGG98, TSS, XAHM05] oder die universitären Simulationswerkzeuge der University of Leeds (DRACULA) [LVW99], der TU Dresden [Tre09, Tre11] und der University of Texas [DS08]. Einige dieser Systeme sind nicht frei verfügbar. Zum Teil deckt sich der Funktionsumfang auch mit dem von PELOPS bzw. VISSIM. Aus diesem Grund gehe ich nicht auf weitere Details dieser Werkzeuge ein.

2.3.4. Eignung für die Simulation eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems

Die Interaktion von Fahrerassistenzsystemen mit Kreuzungssteuerungseinheiten ist ein wesentlicher Aspekt eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems. Aber Fahrerassistenzsysteme interagieren nicht nur mit Kreuzungssteuerungseinheiten, sondern auch noch mit ihrem Fahrer und dem Fahrzeug. Um die tatsächliche Funktionalität des Fahrerassistenzsystems von der Simulation des Fahrers und des Fahrzeugs zu separieren, benötige ich ein Werkzeug, das nicht nur Fahrer-Fahrzeug-Einheiten als Ganzes betrachtet, sondern eine Trennung von Fahrerassistenzsystem, Fahrzeug und Fahrer erlaubt. Dies ermöglicht die Betrachtung eines Fahrerassistenzsystems innerhalb eines submikroskopischen Simulationsmodells als Softwarekomponente im Sinne von Software-in-the-Loop (SiL).

Da nur PELOPS erlaubt, Fahrzeugkomponenten direkt zu beeinflussen, sind die übrigen Werkzeuge ungeeignet. Leider war es im Rahmen von DAMAST nicht möglich, eine

2. Grundlagen

Lizenz für PELOPS zu erwerben. Zudem haben die in existierenden Simulationswerkzeugen eingesetzten Modelle für die Simulation eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems einen entscheidenden Nachteil. Sie beschreiben das Verhalten eines menschlichen Fahrers. Bereits durch die Verwendung eines ACC-Systems, das die Geschwindigkeit des Fahrzeugs automatisch anpasst, verhält sich eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit nicht mehr unbedingt wie ein menschlicher Fahrer. Dies gilt erst recht bei Verwendung eines A3C-Systems. In diesen Fällen bestimmen die eingesetzten Fahrerassistenzsysteme das Fahrverhalten des Fahrzeugs, solange der menschliche Fahrer die Systeme nicht übersteuert.

Für meine Arbeit bedeutet dies, dass ich nicht einfach ein von den Werkzeugherstellern angebotenes Fahrerfolgmodell übernehmen kann. Zukünftig wird der vermehrte Einsatz solcher Systeme auch die Anbieter von Verkehrssimulationswerkzeugen dazu zwingen, die von ihnen eingesetzten Modelle zu erweitern.

Aus den genannten Gründen und da ich zudem nur einzelne Kreuzungen betrachte, verwende ich in dieser Arbeit ein selbst entwickeltes Simulationswerkzeug, welches in Kapitel 4 beschrieben wird.

2.4. Agententechnologie

In diesem Abschnitt stelle ich die Grundzüge der Agententechnologie vor und begründe, warum ich diese Technologie in meinem ITC-System verwende.

2.4.1. Definition und Eigenschaften

Nicht jeder versteht unter dem Begriff Agent bzw. Softwareagent dasselbe. In dieser Arbeit verwende ich die Definition aus [Woo02]:

„An *agent* is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives.“

Ein Agent ist also ein rechnergestütztes System, das in seiner Umgebung autonom agiert, um seine eigenen Ziele zu erreichen. Ein Agent agiert *autonom*, wenn er ohne Zutun eines Menschen oder eines anderen Systems agieren kann und deshalb zu einem gewissen Grad seinen inneren Zustand und sein Verhalten kontrolliert [Wei99]. Damit ein Agent sinnvoll agieren kann, benötigt er *Sensoren*, mit denen er seine Umgebung wahrnehmen kann und *Aktuatoren*, mit denen er Aktionen in seiner Umgebung ausführen kann [RN03].

Ein Agent muss nicht zwangsläufig intelligent sein. Ein simpler Thermostat erfüllt bereits diese Eigenschaften. Ein intelligenter Agent ist zusätzlich reaktiv (engl. *reactivity*) und proaktiv (engl. *pro-activeness*) und besitzt die Fähigkeit, mit anderen Agenten oder mit Menschen zu interagieren (engl. *social ability*), um seine Ziele zu erreichen [Woo02]. *Reaktiv* bedeutet, dass ein intelligenter Agent seine Umgebung wahrnehmen und in akzeptabler Zeit auf deren Veränderung reagieren kann. Ein *proaktiver* Agent ist in der Lage, zielorientiert zu agieren, d. h. aus eigenem Antrieb Aktionen auszuführen.

2. Grundlagen

Ein Agent muss das richtige Verhältnis zwischen reaktiv und proaktiv finden. Ein ausschließlich reaktiver Agent erreicht möglicherweise nicht sein Ziel, weil er ständig damit beschäftigt ist, sich der veränderten Umgebung anzupassen. Ein vollständig proaktiver Agent läuft Gefahr, sein Ziel nicht zu erreichen, weil er auftretende Schwierigkeiten ignoriert und nicht berücksichtigt.

In einem *Multi-Agentensystem* (MAS) agieren mehrere Agenten mit- oder gegeneinander. Mehrere Agenten arbeiten zusammen an der Lösung einer Aufgabe (engl. *cooperation*) oder konkurrieren mit anderen Agenten um Ressourcen und versuchen, ihre eigenen Interessen bestmöglichst durchzusetzen (engl. *competition*).

In beiden Fällen müssen Agenten miteinander kommunizieren bzw. interagieren. Eine MAS-Plattform stellt die Schnittstellen zur Verfügung, die Agenten benötigen, um ihre sozialen Fähigkeiten einzusetzen. Die FIPA (engl. *Foundation for Intelligent Physical Agents*) [FIP] ist eine Standardisierungsorganisation, die sich – seit 2005 unter dem Dach von IEEE – der Standardisierung der Agententechnologie widmet. Die FIPA entwickelte unter anderem das FIPA-Referenzmodell [FIP05], welches die wesentlichen Dienste einer MAS-Plattform beschreibt.

2.4.2. Eignung für ein wertschätzungssensitives ITC-System

Softwareagenten zeigen ihre besonderen Stärken in Anwendungen mit den folgenden Eigenschaften [Par99]: Eine Anwendung kann ein Problem *modular* lösen, wenn es sich leicht in einfachere Aufgaben aufteilen lässt. Eine *dezentralisierte* Anwendung erfordert, dass die einzelnen Teilaufgaben sich zumindest teilweise unabhängig voneinander lösen lassen. Eine modulare und dezentralisierte Anwendung lässt sich leichter an veränderte Gegebenheiten anpassen, sie ist also *änderbar*. In industriellen Anwendungen sind häufig nicht alle relevanten Informationen im Voraus bekannt. Manchmal sind die vorliegenden Informationen unvollständig oder widersprüchlich. In solchen Fällen spricht man von einer *unvollkommenen* Umgebung (engl. *ill-structured*). Wenn eine Umgebung eine sehr große Anzahl an möglichen Zuständen, also einen sehr großen Problemraum, besitzt und die Anzahl der möglichen Reaktionen ebenfalls sehr groß ist, also der Lösungsraum ebenfalls sehr groß ist, so spricht man von einem *komplexen* Anwendungsszenario. [LN04] folgert zusätzlich, dass Agenten insbesondere Vorteile bieten, wenn die Größe des Lösungsraum mit der Größe des Problemraums vergleichbar ist.

Agententechnologie ist insbesondere für das von mir entwickelte wertschätzungssensitive ITC-System sehr gut geeignet: Das ITC-System betrachtet sowohl alle Fahrer-Fahrzeug-Einheiten als auch alle Verkehrskreuzungen als separate Einheiten. Die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten besitzen agentengestützte Fahrerassistenzsysteme. Kreuzungen sind mit agentengestützten Kreuzungssteuerungseinheiten ausgestattet. Das ITC-System ist also modular aus sogenannten Fahrerassistenz- und Kreuzungsagenten aufgebaut.

Definition 2.25 (Fahrerassistenzagent). *Der Agent, mit dem ein A3C-System ausgestattet ist, wird im Folgenden Fahrerassistenzagent (engl. driver-assistance agent, DAA) genannt.*

2. Grundlagen

Definition 2.26 (Kreuzungsagent). *Der Agent, mit dem eine Kreuzungssteuerungseinheit ausgestattet ist, wird im Folgenden Kreuzungsagent (engl. intersection agent, IA) genannt.*

Die Modularisierung erfolgt also aufgrund physischer Eigenschaften. Dies bietet gegenüber einer Modularisierung aufgrund funktionaler Eigenschaften zudem den Vorteil, dass die Zustände der einzelnen Einheiten sich kaum überlappen [Par99]. Das ITC-System berechnet nicht einen globalen Plan, nach dem die Überfahrtsrechte für alle Fahrzeuge an allen Verkehrskreuzungen vergeben werden, sondern ermittelt dezentral für jedes Fahrzeug an einer Verkehrskreuzung ein geeignetes Überfahrtsrecht. Das ITC-System ist leicht änderbar. Ändert sich z. B. die Verkehrsführung an einer Straßenkreuzung oder soll der Vergabemechanismus geändert werden, so ist ausschließlich der Kreuzungsagent der betroffenen Kreuzung anzupassen. Alle übrigen Kreuzungsagenten und alle Fahrerassistenzagenten bleiben davon unberührt. Dies gilt ebenso für die einzelnen Fahrerassistenzsysteme, bei denen ausschließlich der betroffene Fahrerassistenzagent angepasst werden muss. Das ITC-System besitzt keine globale Sicht auf das gesamte Verkehrsnetz. Es kennt z. B. nicht zu jedem Zeitpunkt die Position, die Route und die Wertschätzung aller Fahrzeuge. Das ITC-System benötigt auch keine vollständigen Informationen über das gesamte Verkehrsnetz. Ihm genügen die partiellen Informationen über die Fahrzeuge an der entsprechenden Kreuzung, die ihm von den Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden. Das ITC-System bewältigt damit ein komplexes Problem, da sehr viele Fahrzeuge um begrenzte Ressourcen konkurrieren und es viele Möglichkeiten gibt, Überfahrtsrechte an die verschiedenen Fahrzeuge zu vergeben.

Der Einsatz von Agententechnologie bietet nicht nur für das in dieser Arbeit entwickelte ITC-System Vorteile, sondern ist auch für andere intelligente Transportsysteme sinnvoll. Dies zeigt der Vergleich mit den zuvor aufgeführten Eigenschaften eines intelligenten Transportsystems (siehe Definition 2.16). Agentengestützte Kreuzungssteuerungseinheiten ermöglichen die automatische Steuerung und Koordinierung des Verkehrs. Agentengestützte Fahrerassistenzsysteme sind sehr flexibel und können mit einer sich rasch verändernden Umgebung umgehen. Dadurch, dass die Fahrerassistenzsysteme die Informationen, die sie über ihre Fahrzeugsensoren erhalten, untereinander austauschen können, stehen aktuellere und genauere Informationen zur Verfügung, als wenn ausschließlich stationäre Sensoren und Erfahrungen aus der Vergangenheit zur Verfügung stünden. Jedes Fahrzeug ist mit einer eigenen Recheneinheit, nämlich dem agentengestützten Fahrerassistenzsystem ausgestattet. Die Agenten stellen ein verteiltes System dar. Sie kommunizieren untereinander asynchron. Durch die starke Modularisierung und Dezentralisierung sind Agentensysteme weniger anfällig gegenüber lokalen Störungen und damit robust und stabil.

3. Herausforderungen

In diesem Kapitel gehe ich auf die Herausforderungen ein, die das von mir entworfene neuartige wertschätzungssensitive ITC-System stellt und diskutiere für die einzelnen Herausforderungen Lösungsansätze aus der Literatur oder verweise auf eigene Lösungen in weiterführenden Kapiteln dieser Arbeit. Dieses Kapitel ist eine Überarbeitung der bereits von mir in [SB09] veröffentlichten Herausforderungen.

Ich unterscheide zwischen *verkehrstechnischen*, *informationstechnischen*, *ökonomischen*, *verkehrsteilnehmerspezifischen* und *rechtlichen Herausforderungen*. Nicht alle Herausforderungen lassen sich eindeutig einer dieser Kategorien zuordnen. In diesem Fall ordne ich sie der Kategorie zu, in der sie die größte Bedeutung haben.

Die Tabellen 3.1 und 3.2 listen alle Anforderungen tabellarisch auf, die in diesem Kapitel aufgeführt werden. Die Tabellen enthalten zusätzlich Verweise auf die Abschnitte, in denen beschrieben wird, wie diese Anforderungen erfüllt werden können.

3.1. Verkehrstechnische Herausforderungen

Aus Sicht der Verkehrstechnik müssen bei der Entwicklung eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems vor allem die physikalischen Randbedingungen, die Verkehrssicherheit, die heterogene Ausstattung der Verkehrsteilnehmer sowie die erzielte Wartezeit berücksichtigt werden.

Physikalische Randbedingungen. Verkehrsteilnehmer und ihre verwendeten Fahrzeuge unterliegen physikalischen Randbedingungen. Diese müssen sowohl in einer Simulation als auch im Realeinsatz berücksichtigt werden (Meta-Anforderung A: *Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen*). Geschwindigkeit und Beschleunigung sind beschränkt (Anforderung A1: *Einhaltung der Beschränkungen bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung*). Verkehrsteilnehmer bzw. ihre Fahrzeuge haben eine Ausdehnung und müssen deswegen immer Abstände zueinander einhalten (Anforderung A2: *Einhaltung von Abständen zwischen Fahrzeugen*). Dies bedeutet, dass Fahrzeuge sich nicht beliebig überfahren bzw. überholen können und dass die Reihenfolge, in der sie sich einer Kreuzung nähern, berücksichtigt werden muss (Anforderung A3: *Berücksichtigung der Ankunftsreihenfolge*).

In den Abschnitten 7.3 und 7.4 zeige ich, wie das in dieser Arbeit entwickelte wertschätzungssensitive ITC-System gewährleistet, dass die Beschränkungen bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung (Anforderung A1) sowie die Abstände zu den Fahrzeugen (Anforderung A2) eingehalten werden. Die Abschnitte 6.1.1 und 6.6.1 beschreiben, wie die verwendeten Mechanismen die Ankunftsreihenfolge der Fahrzeuge einhalten (Anforderung A3).

3. Herausforderungen

Verkehrstechnische Herausforderungen		
A	Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen	
A1	Einhaltung der Beschränkung bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung	Abschnitt 7.4
A2	Einhaltung von Abständen zwischen Fahrzeugen	Abschnitt 7.3
A3	Berücksichtigung der Ankunftsreihenfolge	Abschnitte 6.1.1, 6.6.1
B	Vermeidung von Unfällen	Abschnitt 9.1
B1	Überlappungsfreiheit der Überfahrtsrechte	Abschnitt 6.6.2
B2	Überquerung nur mit gültigem Überfahrtsrecht	Abschnitt 7.4
C	Umgang mit Heterogenität	Abschnitte 9.1, 9.2, 9.3
C1	Berücksichtigung verschiedener Typen von Verkehrsteilnehmern	Abschnitte 9.1, 9.2, 9.3
C2	Umgang mit nicht vorhandener oder veralteter Ausstattung	Abschnitte 9.1, 9.2, 9.3
D	Minimierung der Reisezeit	Abschnitt 8.4
D1	Minimierung der Wartezeit	Abschnitt 8.4
D2	Hohe Einfahrtsgeschwindigkeit	Abschnitt 7.4
D3	Verwendung eines geeigneten Mechanismus zur Kreuzungssteuerung	Abschnitt 8.4
E	Minimierung der gewichteten Reisezeit	Abschnitt 8.4
E1	Minimierung der gewichteten Wartezeit	Abschnitt 8.4
E2	Verwendung eines geeigneten wertschätzungssensitiven Mechanismus zur Kreuzungssteuerung	Abschnitt 8.4
E3	Keine höhere durchschnittliche Wartezeit	Abschnitt 8.4
Informationstechnische Herausforderungen		
F	Unterstützung drahtloser Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation	Abschnitt 9.1
F1	Unterstützung verspäteter Nachrichten	Abschnitte 6.6.2, 7.4
F2	Überprüfbarkeit einer Nachricht auf Übertragungsfehler	Annahme 4
F3	Schutz vor Manipulation	Annahme 5, Abschnitt 9.1
Ökonomische Herausforderungen		
G	Auswahl und Gewährleistung der gewünschten Eigenschaften	Kapitel 6, Abschnitt 9.1
H	Verwendung geeigneter Bezahlssysteme	Abschnitt 9.1
H1	Unterstützung des Mikropayments	Abschnitt 9.1
H2	Geringe technische Transaktionskosten	Abschnitt 9.1
H3	Geringe mentale Transaktionskosten	Abschnitt 9.1
I	Ausreichend hohe Marktdurchdringung	Abschnitte 9.1, 9.2, 9.3

Tabelle 3.1.: Verkehrstechnische, informationstechnische und ökonomische Herausforderungen

3. Herausforderungen

Verkehrsteilnehmerspezifische Herausforderungen		
J	Gewährleistung einer ausreichend hohen Benutzerakzeptanz	Abschnitt 9.1
J1	Erzielung eines ausgeglichenen Budgets	Kapitel 6
J2	Beschränkung der Belastung der Verkehrsteilnehmer mit geringer Wertschätzung	Abschnitt 8.4
J3	Vermeidung des Verhungerns	Abschnitt 8.8.3
K	Keine negativen Auswirkungen auf das Fahrverhalten	Abschnitt 9.1
K1	Ausreichend hohes Situationsbewusstsein	Abschnitt 9.1
K2	Vermeidung der Risikokompensation	Abschnitt 9.1
K3	Minimierung der Interaktion während der Fahrt	Abschnitte 7.4, 9.1
Rechtliche Herausforderungen		
L	Klärung aller rechtlichen Fragestellungen	Abschnitt 9.1
L1	Klärung der Haftungsfrage	Abschnitt 9.1
L2	Vereinbarkeit mit bestehendem Recht	Abschnitt 9.1
L3	Schutz personenbezogener Daten	Abschnitt 9.1
L4	Garantie der Anonymität der Verkehrsteilnehmer	Abschnitt 9.1

Tabelle 3.2.: Verkehrsteilnehmerspezifische und rechtliche Herausforderungen

Verkehrssicherheit. Ein ITC-System muss verkehrssicher sein. Durch Unfälle können Verkehrsteilnehmer getötet oder verletzt werden und auch großer Sachschaden entstehen. Ein ITC-System muss Unfälle so weit wie möglich vermeiden (Meta-Anforderung B: *Vermeidung von Unfällen*). Insbesondere darf das Risiko eines Unfalls nicht höher sein als bei traditionellen Kreuzungssteuerungssystemen. Unfälle auf einer Kreuzung entstehen, wenn Verkehrsteilnehmer zur gleichen Zeit gemeinsame Bereiche einer Kreuzung verwenden. Aus diesem Grund muss das System einerseits gewährleisten, dass Verkehrsteilnehmer keine sich zeitlich und räumlich überlappenden Überfahrtsrechte erhalten (Anforderung B1: *Überlappungsfreiheit der Überfahrtsrechte*). Dies schließt die benötigten Sicherheitsabstände mit ein. Andererseits müssen Verkehrsteilnehmer immer in der Lage sein, die Überquerung einer Kreuzung ohne gültiges Überfahrtsrecht zu vermeiden (Anforderung B2: *Überquerung nur mit gültigem Überfahrtsrecht*). D. h., sie können immer die Kreuzung innerhalb der ihnen zugewiesenen zeitlich und räumlichen Schranken überqueren oder vor der Kreuzung anhalten. Dies bedeutet allerdings nicht, dass das System die unrechtmäßige Überquerung einer Kreuzung verhindern können muss. Auch Lichtsignalanlagen verhindern nicht die mutwillige und verkehrswidrige Einfahrt in eine Kreuzung bei Rot.

Abschnitt 9.1 beschreibt Anwendungsszenarien für geschlossene Verkehrsbereiche, in denen Unfälle leichter vermieden werden können, da nur bestimmte Verkehrsteilnehmer Zugang zu diesen Verkehrsbereichen haben. Wie das ITC-System gewährleistet, dass Überfahrtsrechte nur überlappungsfrei vergeben werden (Anforderung B1), erläutere ich in Abschnitt 6.6.2. Die vorgeschlagenen Fahrstrategien in Abschnitt 7.4 verhindern, dass Fahrzeuge die Kreuzung ohne gültiges Überfahrtsrecht überqueren (Anforderung B2).

3. Herausforderungen

Heterogene Ausstattung. Verkehrsteilnehmer an einer Straßenkreuzung sind im Allgemeinen heterogen. Das ITC-System muss gewährleisten, dass Verkehrsteilnehmer unabhängig von ihrer Ausstattung eine Kreuzung überqueren können (Meta-Anforderung C: *Umgang mit Heterogenität*). Es gibt z. B. Fußgänger, Radfahrer, Motorradfahrer, Pkw- und Lkw-Fahrer. Möglicherweise befahren auch Schienenfahrzeuge die Kreuzung. Diese unterscheiden sich alle in Bezug ihrer möglichen und tatsächlichen Ausstattung. Assistenzsysteme für Fußgänger oder Radfahrer werden sich in ihrer Ausstattung deutlich von Assistenzsystemen in anderen Fahrzeugen unterscheiden, z. B. aufgrund beschränkter Energieversorgung, beschränkter Transportkapazität oder auch beschränkter finanzieller Mittel. Das ITC-System muss trotzdem allen verschiedenen Typen von Verkehrsteilnehmern die Überquerung der Kreuzung ermöglichen (Anforderung C1: *Berücksichtigung verschiedener Typen von Verkehrsteilnehmern*).

Aufgrund der Lebensdauer von Straßenfahrzeugen wird es allerdings auch unvermeidlich sein, dass ältere Fahrzeuge, aber auch andere Typen von Verkehrsteilnehmern, noch nicht über die nötige Ausstattung verfügen oder nur eine veraltete Ausstattung besitzen. Auch diesen Fahrzeugen muss die Überquerung ermöglicht werden (Anforderung C2: *Umgang mit nicht vorhandener oder veralteter Ausstattung*). Dies bedeutet allerdings nicht, dass alle Verkehrsteilnehmer mit verschiedenen Ausstattungsgraden gleich behandelt werden müssen. Es kann also sein, dass Verkehrsteilnehmer mit veralteter Fahrzeugausstattung unter Umständen länger an einer Kreuzung warten müssen als andere.

In Abschnitt 9.3 beschreibe ich Erweiterungen eines ITC-Systems, die den Umgang mit Heterogenität ermöglichen (Meta-Anforderung C). Mit den in den Abschnitten 9.1 und 9.2 vorgeschlagenen Anwendungsszenarien kann die Heterogenität künstlich reduziert werden.

Wartezeit. Das Ziel traditioneller Kreuzungssteuerungssysteme ist, die Zeit zu minimieren, die Fahrzeuge im Netz verbringen [Pap99] (Meta-Anforderung D: *Minimierung der Reisezeit*). Angenommen die Nachfrage über die Zeit wird nicht von der Verkehrssteuerung beeinflusst (Annahme 2: *Nachfrage unabhängig von der verwendeten Verkehrssteuerung*), dann wird dieses Ziel erreicht, indem der Zeitpunkt minimiert wird, zu dem Fahrzeuge das Netz verlassen. Im Falle einer isolierten Kreuzung (Annahme 3: *Isolierte Kreuzung*) wird dieser Zeitpunkt ausschließlich davon bestimmt, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Geschwindigkeit ein Fahrzeug in die Kreuzung einfahren kann. Dies wiederum bedeutet, die Wartezeit eines Fahrzeugs zu minimieren (Anforderung D1: *Minimierung der Wartezeit*) und die Einfahrtsgeschwindigkeit hoch zu halten (Anforderung D2: *Hohe Einfahrtsgeschwindigkeit*). Die Wartezeit wird von der tatsächlichen Nachfrage, die nicht von der Art der Kreuzungssteuerung abhängt (siehe Annahme 2), von den baulichen Gegebenheiten der Kreuzung und von dem verwendeten Mechanismus zur Kreuzungssteuerung bestimmt. Ein geeigneter Mechanismus erhöht somit den Durchsatz und reduziert damit die Wartezeit (Anforderung D3: *Verwendung eines geeigneten Mechanismus zur Kreuzungssteuerung*). Andererseits beeinflusst er auch die mögliche Einfahrtsgeschwindigkeit.

3. Herausforderungen

Ein wertschätzungssensitives ITC-System verfolgt zusätzliche Ziele: Anstatt einfach die Zeit zu minimieren, die Fahrzeuge im Netz verbringen, muss ein solches System die Zeit, die Fahrzeuge im Netz verbringen, mit der Wertschätzung des Verkehrsteilnehmers für eine geringe Reisezeit gewichten und diese gewichtete Reisezeit minimieren (Meta-Anforderung E: *Minimierung der **gewichteten** Reisezeit*). Dies bedeutet im Falle einer isolierten Kreuzung (siehe Annahme 3) insbesondere auch die Minimierung der gewichteten Wartezeit (Anforderung E1: *Minimierung der **gewichteten** Wartezeit*). Die Wahl eines geeigneten wertschätzungssensitiven Mechanismus (Anforderung E2: *Verwendung eines geeigneten **wertschätzungssensitiven** Mechanismus zur Kreuzungssteuerung*) erlaubt sowohl die Minimierung der gewichteten Wartezeit als auch eine hohe Einfahrtsgeschwindigkeit. Zusätzlich soll die durchschnittliche ungewichtete Wartezeit die durchschnittliche Wartezeit traditioneller Kreuzungssteuerungssysteme nicht übersteigen (Anforderung E3: *Keine höhere durchschnittliche Wartezeit*).

Der Vergleich mit den Referenzmechanismen Ampel und Zeitslotanfrage (Abschnitt 8.4) zeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelten wertschätzungssensitiven Mechanismen effektiv sind und damit die gewichtete Wartezeit reduzieren (Anforderung E1). Darüberhinaus wird gezeigt, dass auch die Wartezeit reduziert wird (Anforderung D1) und sich damit insbesondere nicht erhöht (Anforderung E3). Dies bedeutet, dass die entwickelten Mechanismen für die Kreuzungssteuerung geeignet sind (Anforderung D3, Anforderung E2). Die in Abschnitt 7.4 empfohlenen Fahrstrategien bewirken, dass Fahrzeuge mit einer ausreichend hohen Geschwindigkeit die Kreuzung betreten (Anforderung D2).

3.2. Informationstechnische Herausforderungen

Ein traditionelles Kreuzungssteuerungssystem erhält die benötigten Informationen üblicherweise über stationäre Sensoren, wie z. B. für Fahrzeuge mit Hilfe von Induktionsschleifen oder für Fußgänger mit Hilfe von Tastern oder Infrarot-Detektoren [Sch01]. Nur in der Forschung werden bislang auch fahrzeuggebundene Sensoren betrachtet, also Sensoren, die sich in Fahrzeugen befinden [FL05, PRe, INV]¹. Bestimmte Informationen müssen allerdings direkt von den einzelnen Verkehrsteilnehmern erfragt werden. Insbesondere die Wertschätzung für eine geringe Reisezeit lässt sich nicht mit stationären oder fahrzeuggebundenen Sensoren ermitteln.

Drahtlose Kommunikation. Aus diesem Grund müssen Verkehrsteilnehmer zumindest ihre Wertschätzung kommunizieren. In dieser Arbeit kommunizieren die Verkehrsteilnehmer ihre Wertschätzung an das Kreuzungssteuerungssystem. Man spricht dabei von sogenannter Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (engl. *vehicle-to-infrastructure communication*) im Gegensatz zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (engl. *inter-vehicle*

¹Eine Ausnahme bildet der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV), in dem bereits fahrzeuggebundene Sensoren zur Fahrgastzählung eingesetzt werden. Die aktuellen Fahrgastzahlen lassen sich auch für die Priorisierung öffentlicher Verkehrsmittel verwenden [GG00].

3. Herausforderungen

communication, vehicle-to-vehicle communication) (Meta-Anforderung F: *Unterstützung drahtloser Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation*).

Die Kommunikation im Verkehrsbereich erfolgt üblicherweise drahtlos und ist – wie bereits erwähnt – Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben [FHM05] (siehe auch Abschnitt 2.2). Sie wird bereits im öffentlichen Verkehr zur Kommunikation mit Ampeln eingesetzt [GG00].

Für die drahtlose Kommunikation stehen eine Vielzahl verschiedener Technologien zur Verfügung, z. B. W-LAN-Technologie oder UMTS [Tan03]. Es zeichnet sich noch keine einheitliche Technologie ab, die in Zukunft für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur flächendeckend zur Verfügung stehen wird. Aus diesem Grund lege ich mich zum jetzigen Zeitpunkt nicht auf eine bestimmte Technologie fest.

Momentan ist eine ausreichend schnelle und verlässliche drahtlose Kommunikation im Verkehrsbereich noch nicht überall möglich und es existieren einige offene Herausforderungen [TMKH05, Mor07]. Aus diesem Grund muss das System berücksichtigen, dass Nachrichten nicht rechtzeitig oder überhaupt nicht ankommen können (Anforderung F1: *Unterstützung verspäteter Nachrichten*). Außerdem muss gewährleistet werden, dass der Empfänger einer Nachricht überprüfen kann, ob die Nachricht durch die Übertragung verfälscht wurde (Anforderung F2: *Überprüfbarkeit einer Nachricht auf Übertragungsfehler*).

Die beschriebenen Anstrengungen im Bereich drahtloser Kommunikation im Verkehr machen eine Lösung der noch offenen Probleme in der Zukunft sehr wahrscheinlich. Aus diesem Grund nehme ich in dieser Arbeit an, dass die Überprüfbarkeit der Korrektheit einer Nachricht immer gewährleistet ist (Annahme 4: *Korrektheit einer Nachricht ist immer überprüfbar*). Nachrichten können beispielsweise durch Ergänzung der Nachricht um geeignete redundante Informationen auf Übertragungsfehler überprüft werden [Tan03]. Im Falle des Empfangs einer nicht korrekt übertragenen Nachricht kann der Empfänger sich so verhalten, als ob die Nachricht nicht angekommen sei.

Die Abschnitte 6.6.2 und 7.4 beschreiben, wie sich Kreuzungsagent und Fahrerassistentenagent so verhalten, dass Nachrichten verspätet ankommen oder verloren gehen können, ohne dass Fahrzeuge fälschlicherweise die Kreuzung überqueren.

Sicherheit. Das System muss auch gegen Manipulation geschützt werden (Anforderung F3: *Schutz vor Manipulation*). Besonders die Unterstützung drahtloser Kommunikation erhöht das Gefährdungspotenzial. Die übrigen Komponenten, die nicht zur Kommunikation genutzt werden, unterliegen demselben Gefährdungspotenzial wie klassische Lichtsignalanlagen.

Da bereits drahtlose Kommunikationssysteme in einigen Verkehrsbereichen eingesetzt werden [GG00] und die Automobilindustrie große Anstrengungen unternimmt, die Sicherheit solcher Kommunikationssysteme zu gewährleisten [FHM05, ABD⁺06, NOW] (siehe auch Abschnitt 2.2), gehe ich im weiteren Verlauf dieser Arbeit davon aus, dass das System nicht bewusst manipuliert wird (Annahme 5: *Nachrichten und Systeme werden nicht bewusst manipuliert*). Dies verhindert allerdings nicht, dass Verkehrsteilnehmer falsche Informationen kommunizieren.

3. Herausforderungen

In einigen Anwendungsszenarien wird eine bewusste Manipulation zudem dadurch erschwert, dass der entsprechende Bereich einer Zugangskontrolle unterliegt (siehe Abschnitt 9.1).

3.3. Ökonomische Herausforderungen

Die Entwicklung eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems ist auch eine ökonomische Herausforderung. Insbesondere muss beim Entwurf der eingesetzten Mechanismen sehr sorgfältig vorgegangen werden, da der Mechanismus die Strategien der Akteure und damit den Erfolg des gesamten Systems beeinflusst [RZ94].

Neben den mechanismenspezifischen Herausforderungen lassen sich aber auch noch das verwendete Bezahlssystem und die benötigte Marktdurchdringung nennen.

Mechanismenentwurf. Ein wertschätzungssensitiver Mechanismus für die Kreuzungssteuerung lässt sich mit Hilfe des Mechanismenentwurfs (engl. *mechanism design*) entwickeln. Der Mechanismenentwurf hat zum Ziel, gute Verfahren zu entwerfen, wenn mehrere egoistische Agenten mit unterschiedlichen Interessen miteinander interagieren [Par01].

Der Mechanismenentwurf soll sicherstellen, dass ein Mechanismus die richtige Auswahl an gewünschten Eigenschaften erhält (Meta-Anforderung G: *Auswahl und Gewährleistung der gewünschten Eigenschaften*). Allerdings lassen sich nicht immer alle Eigenschaften gleichzeitig erzielen [Par01]. Auf den Mechanismenentwurf und die einzelnen wünschenswerten Eigenschaften gehe ich in Kapitel 6 detailliert ein.

Bezahlssystem. Damit Verkehrsteilnehmer ihre Wertschätzung für eine geringe Reisezeit nicht höher angeben als sie tatsächlich ist, müssen sie damit rechnen, dass sie entsprechend ihrer Wertschätzung eine Gegenleistung erbringen müssen. In dieser Arbeit erfolgt die Gegenleistung mit Hilfe eines Zahlungsmittels. Verkehrsteilnehmer übermitteln deswegen ihre Wertschätzung in Form eines Geldbetrags, nämlich des Betrags, den sie zu bezahlen gewillt wären, wenn sie ein bestimmtes Überfahrtsrecht tatsächlich erhielten und damit ihre Reisezeit verringerten.

Dazu muss ein kontextsensitives ITC-System geeignete Bezahlssysteme unterstützen (Meta-Anforderung H: *Verwendung geeigneter Bezahlssysteme*). Diese müssen neben den klassischen Sicherheitsaspekten wie Abhörsicherheit, Authentizität, Datenintegrität, Absicherung im Schadensfall und Anonymität auch das Mikropayment unterstützen (Anforderung H1: *Unterstützung des Mikropayments*). Unter Mikropayment versteht man die elektronische Bezahlung von Kleinstbeträgen unterhalb von 5 € [DU04]. Bislang ist das Mikropayment vor allem im sogenannten Paid-Content-Bereich üblich, also beim Bezahlen für Inhalte im Internet. Die Beträge, die für eine bevorzugte Behandlung an einer Kreuzung gehandelt werden, werden sich auch in diesem Bereich bewegen.

Mikropayment ist eine besondere Herausforderung, weil die technischen Transaktionskosten sehr gering sein müssen, um die Bezahlung von Kleinstbeträgen überhaupt zu rechtfertigen (Anforderung H2: *Geringe technische Transaktionskosten*). Neben den

3. Herausforderungen

technischen Transaktionskosten gilt es auch noch die sogenannten mentalen Transaktionskosten zu berücksichtigen. Unter mentalen Transaktionskosten versteht man die kognitiven Kosten, die für einen Benutzer anfallen, um das verwendete Bezahlssystem und die Eigenschaften eines Produkts zu bewerten [Sza99]. In [Sza99] werden die mentalen Transaktionskosten als ein Grund dafür angegeben, dass die bislang im Internet verwendeten Beträge noch deutlich über dem Bereich von wenigen Cent liegen. Aus diesem Grund müssen im verwendeten Bezahlssystem auch die mentalen Transaktionskosten berücksichtigt werden (Anforderung H3: *Geringe mentale Transaktionskosten*).

Grundsätzlich wäre natürlich auch ein künstliches Zahlungsmittel vorstellbar, bei dem Verkehrsteilnehmer einen bestimmten Betrag pro Zeit zur Verfügung gestellt bekommen und das außerhalb des ITC-Systems nicht verwendet und auch nicht gekauft oder verkauft werden kann. Eine Gleichbehandlung aller Verkehrsteilnehmer wäre allerdings nicht zielführend, da beispielsweise ein Lkw einer Spedition aufgrund seiner höheren Fahrleistung auch einen deutlich höheren Bedarf hätte. Eine Einteilung der Verkehrsteilnehmer in bestimmte Klassen ist ebenfalls schwierig vorzunehmen. Aus diesem Grund gehe ich im Folgenden davon aus, dass das verwendete Zahlungsmittel einen realen Gegenwert außerhalb des ITC-Systems besitzt und dort auch gekauft bzw. verkauft werden kann (Annahme 6: *Verwendung eines Zahlungsmittels mit realem Gegenwert*). Der Einfachheit halber verwende ich im Folgenden € als Währungseinheit und als Einheit der Wertschätzung für eine geringe Reisezeit. In diesem Fall ist es auch nicht nötig, dass z. B. jeder Verkehrsteilnehmer einen bestimmten Betrag für die Verwendung innerhalb des ITC-Systems automatisch erhält. Man könnte genauso gut die Kraftfahrzeugsteuer pauschal um den entsprechenden Betrag senken.

Falls alle beteiligten Verkehrsteilnehmer gemeinsame Interessen verfolgen, weil sie z. B. einem einzigen Unternehmen gehören, kann auf das Mikropayment verzichtet werden (siehe Abschnitt 9.1). Darüberhinaus berücksichtigte ich in dieser Arbeit das Mikropayment nicht weiter.

Marktdurchdringung. Das ITC-System setzt voraus, dass Verkehrsteilnehmer ein geeignetes Assistenzsystem besitzen und einsetzen können. Selbst wenn das ITC-System mit einigen wenigen Ausnahmen umgehen kann, wie sie aufgrund der anzunehmenden heterogenen Ausstattung unvermeidlich sind (siehe Meta-Anforderung C), so ist die Ausstattung einer ausreichend hohen Anzahl an Fahrzeugen für den Erfolg des Systems unerlässlich (Meta-Anforderung I: *Ausreichend hohe Marktdurchdringung*).

In Abschnitt 9.1 wird ein Anwendungsszenario vorgeschlagen, indem alle Verkehrsteilnehmer demselben Unternehmen gehören. Dadurch kann ein solches Unternehmen natürlich die vollständige Marktdurchdringung gewährleisten. In Anwendungsszenarien, in denen für Verkehrsteilnehmer ohne geeignete Ausstattung Alternativen angeboten werden, ist eine hohe Marktdurchdringung nicht unbedingt nötig (siehe Abschnitt 9.2). In Abschnitt 9.3 werden mobile Endgeräte der Verkehrsteilnehmer als mögliche Alternative für Fußgänger, Radfahrer, aber auch für Fahrzeuge ohne geeignete festinstallierte Ausstattung vorgeschlagen. Mobile Endgeräte sind heute sehr weit verbreitet. Die Un-

terstützung solcher mobilen Endgeräte in einem wertschätzungssensitiven ITC-Systems würde es erleichtern, die nötige Marktdurchdringung frühzeitig zu erreichen.

3.4. Verkehrsteilnehmerspezifische Herausforderungen

Die Einführung eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems stellt auch einige Herausforderungen direkt an die Verkehrsteilnehmer.

Benutzerakzeptanz. Ein neues wertschätzungssensitives ITC-System muss von den Verkehrsteilnehmern akzeptiert werden. Eine hohe Benutzerakzeptanz erleichtert Entscheidungen, wie z. B. kommunalen Verkehrsbehörden oder privaten Investoren, den Entschluss, ein solches System einzuführen (Meta-Anforderung J: *Gewährleistung einer ausreichend hohen Benutzerakzeptanz*).

Der Benutzerakzeptanz abträglich wäre eine wahrgenommene Erhöhung der Mobilitätskosten, insbesondere in Staaten, wie z. B. Deutschland, in denen Mautsysteme unüblich sind oder erst vor kurzem eingeführt wurden [Tol]. Wenn der Mechanismus ein ausgeglichenes Budget besitzt, z. B. indem er die erzielten Einnahmen wieder an die Verkehrsteilnehmer zurückgibt, erhöhen sich allerdings die durchschnittlichen Mobilitätskosten nicht. Aus diesem Grund sollte der Mechanismus ein ausgeglichenes Budget haben (Anforderung J1: *Erzielung eines ausgeglichenen Budgets*).

Die Bezahlung für eine bevorzugte Behandlung an einer Kreuzung könnte zusätzlich die Befürchtung hervorrufen, dass damit ausschließlich reiche Personen sich ihre Vorfahrt kaufen können. Dies würde sicher als unfair und unsozial eingestuft werden. Bereits ein ausgeglichenes Budget würde den Mechanismus fairer erscheinen lassen. Zusätzlich sollte aber noch gezeigt werden, dass die Belastung der übrigen Fahrer durch die Bevorzugung anderer Fahrer beschränkt ist bzw. immer nur sehr gering ausfällt (Anforderung J2: *Beschränkung der Belastung der Verkehrsteilnehmer mit geringer Wertschätzung*). Insbesondere muss das System die Befürchtung entkräften, dass dadurch Verkehrsteilnehmer mit geringer Wertschätzung manchmal stark befahrene Kreuzungen überhaupt nicht überqueren können, also an der Kreuzung „verhungern“ (engl. *starvation*), da alle Verkehrsteilnehmer mit höherer Wertschätzung bevorzugt werden (Anforderung J3: *Vermeidung des Verhungerns*).

Die Erzielung eines ausgeglichenen Budgets ist ebenfalls eine der gewünschten Eigenschaften beim Mechanismenentwurf. Für welche Mechanismen ein ausgeglichenes Budget erzielt werden kann, erkläre ich in Kapitel 6. Die Belastung der Verkehrsteilnehmer mit geringer Wertschätzung ist beschränkt. In Abschnitt 8.4 sieht man, dass die untersuchten wertschätzungssensitiven Mechanismen die durchschnittliche Wartezeit nur geringfügig erhöhen, meistens sogar ebenfalls reduzieren. In Abschnitt 8.8.3 wird beschrieben, dass die Auswirkungen auf Fahrzeuge mit sehr geringer Wertschätzung begrenzt sind.

Auswirkungen auf das Fahrverhalten. Der Einsatz neuartiger Fahrzeugtechnologie sollte natürlich keine negativen Auswirkungen auf den Fahrer und das Fahrverhalten haben (Meta-Anforderung K: *Keine negativen Auswirkungen auf das Fahrverhalten*). Wie

3. Herausforderungen

sich solche Technologie tatsächlich auf das Fahrverhalten auswirkt, ist Untersuchungsgegenstand einer Vielzahl an Forschungsprojekten: Ein Aspekt, der dabei untersucht wird, ist das sogenannte *Situationsbewusstsein* (engl. *situation awareness*). Unter Situationsbewusstsein versteht man die bewusste Wahrnehmung der Umgebungsinformationen, die für das Fahren relevant sind, und die Fähigkeit, zukünftige Verkehrszustände korrekt vorherzusehen [War00]. Grundsätzlich ist ein ausreichend hohes Situationsbewusstsein erwünscht (Anforderung K1: *Ausreichend hohes Situationsbewusstsein*). Durch vorausschauendes Fahren kann ein Verkehrsteilnehmer z. B. eine gefährliche Situation erkennen, die sich mehrere Fahrzeuge vor ihm abzeichnet, und bereits jetzt damit rechnen, dass die Fahrzeuge vor ihm abrupt bremsen werden. In diesem Fall zeigt der Verkehrsteilnehmer ein hohes Maß an Situationsbewusstsein.

Wenn Verkehrsteilnehmer Erfahrung mit neuartiger Fahrzeugtechnologie sammeln und sich an sie gewöhnen, kann dies das Situationsbewusstsein verringern oder gar zu einem kompletten Verlust des Situationsbewusstseins führen, beispielsweise in gefährlichen Situationen [War00, FSIW03, BTK05]. Dies gilt insbesondere für Fahrzeugtechnologie, die die Fahrtätigkeit zunehmend automatisiert, wie z. B. ACC-Systeme. Auf der anderen Seite kann neuartige Fahrzeugtechnologie den Verkehrsteilnehmer entlasten und dadurch zusätzliche mentale Ressourcen freilegen, so dass der Verkehrsteilnehmer bei der Fahrt eine höhere Vigilanz zeigt. Das Situationsbewusstsein kann sich also auch erhöhen [MK05, BTK05]. Es gibt jedoch auch Fahrzeugtechnologie, deren Ziel nicht die Automatisierung der Fahrtätigkeit und damit die Entlastung des Fahrers ist, sondern die das Fahrverhalten oder den Fahrer beobachtet, um ihn darauf aufmerksam zu machen, wenn seine Aufmerksamkeit gerade nachlässt [Kop05].

Sehr eng mit dem Situationsbewusstsein hängt der Aspekt der *Risikokompensation* zusammen. Wenn Verkehrsteilnehmer einer Technologie, die die Sicherheit erhöhen soll, zu sehr vertrauen, neigen manche von ihnen dazu, risikofreudiger zu fahren [IST00]. Für das in dieser Arbeit betrachtete System könnten Verkehrsteilnehmer die Abstände zu ihren vorausfahrenden Fahrzeugen zu stark verringern oder sich der Kreuzung mit zu hoher Geschwindigkeit nähern. Aus diesem Grund muss das System so entworfen werden, dass Risikokompensation vermieden wird (Anforderung K2: *Vermeidung der Risikokompensation*).

Neuartige Fahrzeugtechnologie muss in vielen Fällen auch von den Verkehrsteilnehmern bedient werden. Die Bedienung erfordert eine Interaktion zwischen Fahrer und beispielsweise Fahrerassistenzsystem. Dies kann dazu führen, dass der Verkehrsteilnehmer überlastet wird. Beispielsweise können Fahrer überlastet werden, wenn sie während der Fahrt gleichzeitig mit einem Navigationssystem und mit einem ACC-System interagieren müssen. Das bedeutet, dass durch eine Minimierung der Interaktionen während der Fahrt die Überlastung des Fahrers vermieden wird (Anforderung K3: *Minimierung der Interaktion während der Fahrt*).

Der tatsächliche Einfluss auf das Fahrverhalten lässt sich erst nach der Entwicklung eines ersten Prototyps des Fahrerassistenzsystems untersuchen. Mit diesem Prototyp ließen sich dann beispielsweise Experimente in einem Fahrsimulator durchführen. Da dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, betrachte ich die Auswirkungen auf das Situationsbewusstsein und die Risikokompensation nicht weiter. In Szenarien mit füh-

3. Herausforderungen

rerlosen Fahrzeugen können negative Auswirkungen ausgeschlossen werden (siehe Abschnitt 9.1). Die in Abschnitt 7.4 vorgeschlagenen Fahrstrategien erfordern durch den Einsatz von Softwareagententechnologie nur sehr geringe Interaktion des Fahrers mit dem Fahrerassistenzsystem.

3.5. Rechtliche Herausforderungen

Die Einführung neuartiger ITC-Systeme und insbesondere neuartiger Fahrerassistenzsysteme berührt auch etliche rechtliche Fragestellungen [Bew05, SBB⁺06]. Diese müssen bereits beim Entwurf eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems berücksichtigt werden (Meta-Anforderung L: *Klärung aller rechtlichen Fragestellungen*). Insbesondere die Frage der Haftung (engl. *liability*) (Anforderung L1: *Klärung der Haftungsfrage*) und die Frage nach der Vereinbarkeit mit bestehendem Recht (Anforderung L2: *Vereinbarkeit mit bestehendem Recht*) sind bedeutsam [Bew05]. Da mit diesem System aber auch die Möglichkeit besteht, lückenlose Bewegungsprofile einzelner Verkehrsteilnehmer zu erstellen, und auch Bezahlungen abgewickelt werden, muss auch der Schutz personenbezogener Daten gewährleistet werden (Anforderung L3: *Schutz personenbezogener Daten*). Ein weiterer Schutz gegen die Erstellung der Bewegungsprofile wäre die Garantie der Anonymität der Verkehrsteilnehmer (Anforderung L4: *Garantie der Anonymität der Verkehrsteilnehmer*).

Die absolute Anonymität der Verkehrsteilnehmer ist allerdings bereits heute bewusst nicht gewünscht, z. B. durch die Verwendung von eindeutigen Kennzeichen, und steht wahrscheinlich in Konflikt mit dem Wunsch, Verkehrsdelikte verfolgen zu können und Missbrauch bei der Verwendung eines Bezahlsystems zu verhindern. Grundsätzlich sollte der Zugriff für beliebige Personen jedoch nicht möglich sein.

In abgeschlossenen Verkehrsbereichen sind die rechtlichen Herausforderungen teilweise weniger gravierend (siehe Abschnitt 9.1).

4. Simulationswerkzeug

Wie bereits diskutiert, sind existierende Simulationswerkzeuge für diese Arbeit ungeeignet, um die Wirkung von wertschätzungssensitiven ITC-Systemen zu bewerten, oder stehen nicht zur Verfügung. Deswegen habe ich – im Rahmen des Projekts DAMAST – gemeinsam mit Studierenden [For06a, Haa06, For06b, Den06, Mas06, Ahm07, Wal07, Yue07, Pul07, Muk07, Beu08, Pul08, Sch08, Rei08, AL08] ein eigenes Simulationswerkzeug entwickelt. In diesem Kapitel stelle ich die Architektur, die Simulationseinheit und das verwendete Umweltmodell des DAMAST-Simulationswerkzeugs vor.

4.1. Architektur

Bei der Architektur des DAMAST-Simulationswerkzeugs unterscheide ich Simulationsmodule und Anwendungsmodule [For06a]. *Anwendungsmodule* repräsentieren Softwarekomponenten, die auch im späteren Realeinsatz benötigt werden. *Simulationsmodule* simulieren die von den Anwendungsmodulen benötigte Umgebung. Dies entspricht dem bereits erwähnten Software-in-the-Loop (SiL) [AB06].

Die strikte Trennung bietet viele Vorteile: Einerseits können die Softwarekomponenten der Anwendungsmodule später durch geeignete Hardwarekomponenten ersetzt werden (Hardware-in-the-Loop, HiL). Andererseits können damit Simulationsmodule leichter gegen andere Simulationswerkzeuge, wie z. B. PELOPS oder VISSIM, ausgetauscht werden, ohne dass dazu die Anwendungsmodule angepasst werden müssten.

Die Simulationsmodule besitzen nur die Funktionalität, die für eine realistische Simulation eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems unerlässlich ist.

Das DAMAST-Simulationswerkzeug besteht aus zwei Simulationsmodulen, dem Verkehrssimulationsmodul und dem Fahrersimulationsmodul, sowie aus zwei Anwendungsmodulen, dem Fahrerassistenzmodul und dem Verkehrssteuerungsmodul (Abbildung 4.1) [For06a].

4.1.1. Verkehrssimulationsmodul

Das *Verkehrssimulationsmodul* besteht aus der eigentlichen Simulationseinheit, dem Aktionskoordinator, dem Fahrzeugmodell und dem Umweltmodell.

Die *Simulationseinheit* ist für die Bewegung der Fahrzeuge innerhalb des Straßennetzes verantwortlich. Sie berechnet in jedem Simulationsschritt für jedes Fahrzeug aus der aktuellen Position, der Geschwindigkeit und der Route eines Fahrzeugs die neue Position des Fahrzeugs. Die Simulationseinheit wird in Abschnitt 4.2 näher beschrieben.

Der *Aktionskoordinator* ersetzt das Handlungsmodell aus PELOPS und stellt die Schnittstelle des Verkehrssimulationsmoduls zu den beiden Modulen dar, die aktiv in

4. Simulationswerkzeug

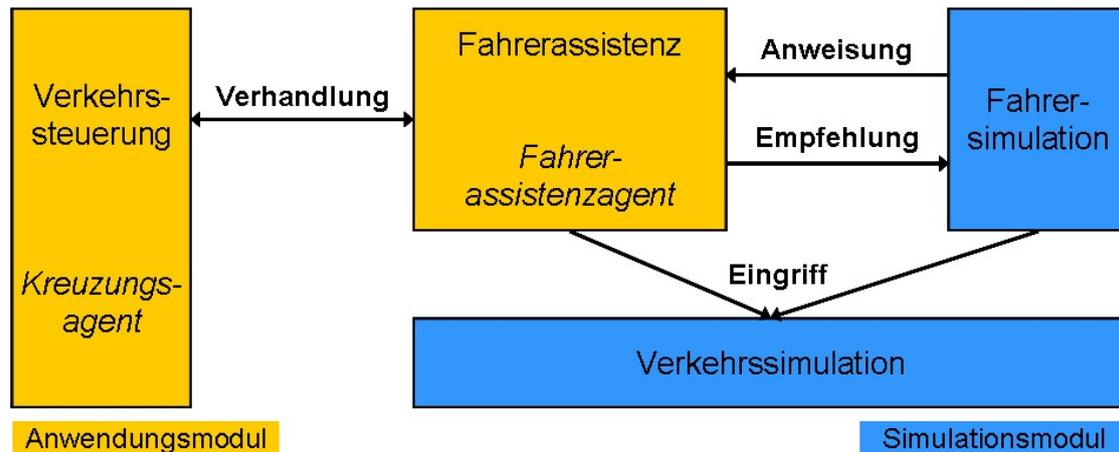


Abbildung 4.1.: Architektur des DAMAST-Simulationswerkzeugs

das Fahrverhalten eingreifen können, dem Fahrerassistenz- und dem Fahrersimulationsmodul. Aus beiden Modulen können Aktionen an den Aktionskoordinator übergeben werden. Eine *Aktion* beschreibt eine Anweisung eines Fahrers bzw. eines Fahrerassistenzsystems an das zugehörige Fahrzeug. Mögliche Aktionen sind z. B. die Änderung der Geschwindigkeit oder der Fahrtrichtung. Der Aktionskoordinator bestimmt aus den vom Fahrer bzw. vom Fahrerassistenzsystem übergebenen Aktionen die Aktionen, die tatsächlich ausgeführt werden. Für die Dauer des nächsten Simulationsschritts bewegt sich das Fahrzeug gemäß der vom Aktionskoordinator bestimmten Aktionen.

Auf welche Weise der Aktionskoordinator die tatsächlichen Aktionen auswählt, wird vom Fahrer festgelegt. Der Fahrer macht dies im Allgemeinen vor Fahrtantritt. Er kann sich jedoch auch während der Fahrt umentscheiden. Der Fahrer kann entweder dem Fahrerassistenzsystem voll vertrauen oder es vollständig abschalten. Im ersten Fall werden immer die Aktionen des Fahrerassistenzsystems befolgt, solange der Fahrer das Fahrerassistenzsystem nicht übersteuert. Im zweiten Fall werden die Aktionen des Fahrerassistenzsystems durchgehend ignoriert. Eine Mischform ist ebenfalls möglich. In diesem Fall wählt der Aktionskoordinator immer die jeweils defensivere Aktion aus.

Das verwendete Fahrzeugmodell des Verkehrssimulationsmoduls prüft lediglich, ob die gewünschte Geschwindigkeitsänderung und die daraus resultierende Beschleunigung die fahrzeugbedingten Maximalwerte überschreiten und passt die Geschwindigkeitsänderung gegebenenfalls an. Das Sensormodell bestimmt die Werte aller Fahrzeugsensoren zum Ende eines Simulationsschritts und stellt diese dann dem Fahrerassistenzmodul bzw. dem Fahrersimulationsmodul zur Verfügung.

Das Verkehrssimulationsmodul enthält auch ein Umweltmodell. Es besteht aus einem Netzmodell, einem Kreuzungsmodell und einem Kraftstoffverbrauchsmodell. Das Umweltmodell wird in Abschnitt 4.3 genauer beschrieben.

4.1.2. Fahrersimulationsmodul

In DAMAST ist das Fahrerassistenzsystem von herausragendem Interesse, da es für den Betrieb eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems benötigt wird. Alle übrigen Fahrzeugkomponenten werden nur simuliert. Durch die Auslagerung des Fahrerassistenzsystems in ein eigenes Modul kann das Fahrersimulationsmodul stark vereinfacht werden.

Das Fahrersimulationsmodul verwendet ein einfaches Verhaltensmodell. Da das DAMAST-Simulationswerkzeug bislang keinen Spurwechsel benötigt, besteht das Verhaltensmodell ausschließlich aus einem Folgemodell. In [For06a] wurde für das DAMAST-Simulationswerkzeug das sogenannte Intelligent Driving Model (IDM) [THH00] als Folgemodell implementiert. Dieses Modell ist weniger komplex als das Modell von Wiedemann [Wie74]. Das Folgemodell ermittelt einen Geschwindigkeitswunsch und übergibt diese Aktion an den Aktionskoordinator.

Es ist nicht bekannt, wie sich Fahrer tatsächlich verhalten, wenn ihr Fahrzeug mit einem ACC-System bzw. einem A3C-System ausgestattet ist, also z. B. in welchen Situationen sie übersteuernd eingreifen oder das System sogar ganz abschalten. Mögliche Auswirkungen auf das Fahrverhalten wurden bereits in Abschnitt 3.4 diskutiert. In [MMB01] wird beobachtet, dass Fahrer ihr ACC-System in bestimmten Verkehrsbedingungen abschalten. Dies liegt möglicherweise daran, dass die damaligen ACC-Systeme nicht für alle Verkehrsbedingungen geeignet waren. Da das A3C-System aber gerade für die Überquerung einer Kreuzung konzipiert wird, nehme ich im Folgenden an, dass die Fahrer in der Nähe einer Kreuzung ihrem Fahrerassistenzsystem vertrauen und dieses nicht übersteuern (Annahme 7: *Keine Übersteuerung des A3C-Systems*). In diesem Fall wird überhaupt kein Fahrerfolgemodell benötigt, da das Fahrverhalten ausschließlich durch das Fahrerassistenzsystem bestimmt wird.

4.1.3. Fahrerassistenzmodul

Das Fahrerassistenzmodul entspricht einem besonderen Fahrerassistenzsystem, das jedem Fahrer zur Verfügung steht. Das Fahrerassistenzmodul enthält ausschließlich die Funktionalität, die es auch im späteren Realeinsatz benötigt. Neben dem A3C-System besteht es noch aus dem Fahrerassistenzagenten, der während der Fahrt mit den Kreuzungsagenten die Überfahrtsrechte aushandelt. In Kapitel 6 stelle ich Mechanismen für die Verhandlung zwischen Fahrerassistenzagenten und Kreuzungsagenten vor. Kapitel 7 beschreibt die Fahrstrategien des A3C-Systems.

4.1.4. Verkehrssteuerungsmodul

Das *Verkehrssteuerungsmodul* entspricht den Kreuzungssteuerungseinheiten, die für die Steuerung des Verkehrs an einer Kreuzung verantwortlich sind (siehe Abschnitt 2.1.6). Insbesondere enthält jede Kreuzungssteuerungseinheit einen Kreuzungsagenten, der mit Fahrerassistenzagenten Überfahrtsrechte aushandelt. Die Kreuzungssteuerungseinheiten können zwischen verschiedenen Mechanismen zur Kreuzungssteuerung wählen. Ich stelle mögliche Mechanismen in Kapitel 6 vor.

4.2. Simulationseinheit

Die Simulationseinheit ist Teil des Verkehrssimulationsmoduls. Sie arbeitet zeitschritt-basiert. Sei b_i der Beginn und e_i das Ende des i . Simulationsschritts. Dabei gilt $b_{i+1} = e_i$. Während des i . Simulationsschritts führt die Simulationseinheit die folgenden Teilschritte nacheinander aus:

1. Initialisierung neuer Fahrzeuge
Alle Fahrzeuge, die während des i . Simulationsschritts das Netz betreten, werden erzeugt und an die Position gesetzt, die sie zum Zeitpunkt b_i gehabt hätten.
2. Anpassung der Fahrzeugposition
Für jedes Fahrzeug wird ausgehend von der Position zum Zeitpunkt b_i , der im Simulationsschritt i zu fahrenden Geschwindigkeit v_i und der gewünschten Route die neue Fahrzeugposition berechnet.
3. Anpassung der Verkehrszustände vor der Aktualisierung der Sensoren
Alle Verkehrszustände, die von den Sensoren bis zum Zeitpunkt e_i erkannt werden sollen, werden vor der Aktualisierung der Sensoren angepasst. Beispielsweise werden die Zustände einer Verkehrsampel angepasst, bevor ein entsprechender Sensor diese beobachtet.
4. Aktualisierung der Sensoren
Die Sensoren werden aktualisiert, so dass sie den Zustand zum Zeitpunkt e_i beschreiben.
5. Visualisierung der Fahrzeuge und Zustände
Die Situation zum Zeitpunkt e_i wird visualisiert.
6. Warten
Falls die Bearbeitungszeit kleiner als die gewünschte Mindestdauer eines Simulationsschritts ist, wird die Simulation angehalten, bis die Mindestdauer erreicht ist.

Alle Fahrzeuge sind mit Sensoren ausgestattet, mit denen die Fahrerassistenzsysteme die Abstände zu den in der Nähe befindlichen Fahrzeugen ermitteln können. Daraus berechnen die Fahrerassistenzsysteme die gewünschte Geschwindigkeit so, dass Unfälle vermieden werden. Die Mindestdauer eines Simulationsschritts erleichtert die Synchronisation der zeitgleich aktiven Fahrerassistenz- und Kreuzungsagenten.

4.3. Umweltmodell

Das Umweltmodell in DAMAST ist Teil des Verkehrssimulationsmoduls. Es besteht aus dem Netzmodell, dem Kreuzungsmodell und dem Kraftstoffverbrauchsmodell.

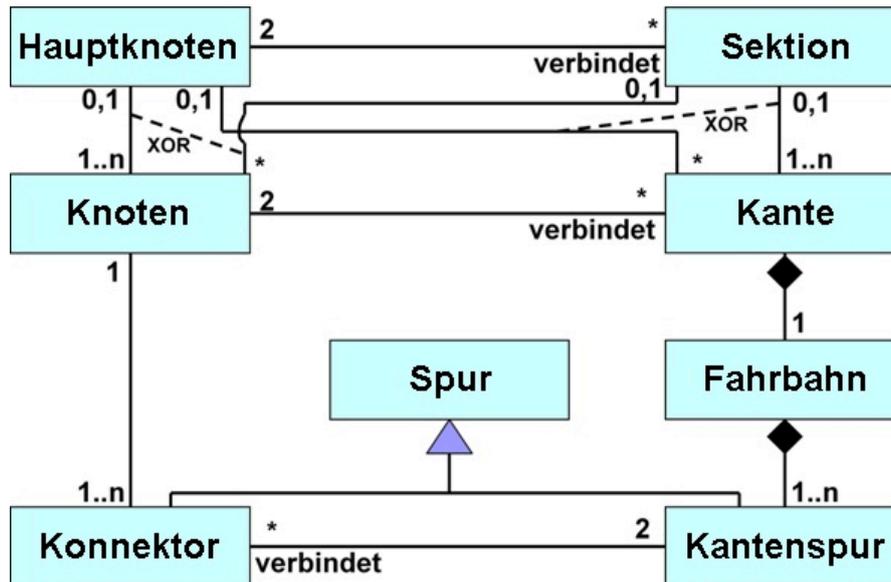


Abbildung 4.2.: Netzmodell in DAMAST [For06a]

4.3.1. Netzmodell

Das folgende Netzmodell wird in dieser Arbeit durchgehend verwendet. Es wurde für das Projekt DAMAST im Rahmen einer Diplomarbeit [For06a] entwickelt (siehe Abbildung 4.2). Die Entwicklung erfolgte dabei in Anlehnung an die Netzmodelle der Simulationssysteme DRACULA [LVW99], AIMSUN [BFGG98, TSS] und VISSIM [PTV].

Im DAMAST-Netzmodell werden die *abstrakte Ebene* und die *Detailebene* unterschieden. Die abstrakte Ebene besteht aus *Hauptknoten* (engl. *main node*) und *Sektionen* (engl. *section*). Eine Sektion ist gerichtet und verbindet immer einen *Anfangs-* mit einem *Endhauptknoten*. Ein Hauptknoten kann Anfangs- und Endhauptknoten für beliebig viele Sektionen sein. Die abstrakte Ebene erlaubt die Beschreibung einer Fahrtroute wie in einem Navigationssystem.

Die Detailebene besteht aus *Knoten* (engl. *node*) und *Kanten* (engl. *link*). Eine Kante ist gerichtet und verbindet einen Anfangs- mit einem Endknoten. Jeder Knoten kann *Anfangs-* und *Endknoten* für beliebig viele Kanten sein. Ein Knoten gehört entweder zu einem Hauptknoten oder zu einer Sektion. Eine Kante gehört ebenfalls entweder zu einem Hauptknoten oder zu einer Sektion. Desweiteren besteht die Detailebene aus *Spuren* (engl. *lane*). Es gibt zwei verschiedene Arten von Spuren, nämlich *Konnektoren* (engl. *connector*) und *Kantenspuren* (engl. *link lane*). Ein Konnektor gehört zu genau einem Einzelknoten, während eine Kantenspur zu genau einer Kante gehört. Einzelknoten können aus mehreren Konnektoren bestehen. Kanten können aus mehreren Kantenspuren bestehen. Ein Konnektor ist gerichtet und verbindet genau zwei Kantenspuren. Eine Kantenspur kann mehrere *eingehende* (engl. *incoming*) und mehrere *ausgehende* (engl. *outgoing*) *Konnektoren* haben.

4. Simulationswerkzeug

Ein Fahrzeug bewegt sich grundsätzlich auf Spuren. Die *Route* eines Fahrzeugs besteht deswegen immer aus einer Abfolge von Kantenspuren und Konnektoren. Dabei beginnt und endet jede Route mit einer Kantenspur.

Netzelemente der Detailebene können sich überlappen. Im Normalfall überlappen sich jedoch nur Konnektoren. Ansonsten sind es Über- bzw. Unterführungen, die keine Konflikte verursachen.

Definition 4.1 (Konfliktbereich). *Ein zusammenhängender Bereich, in dem sich zwei Konnektoren überlappen, wird als Konfliktbereich (engl. conflict area) bezeichnet. Der Konfliktbereich besteht aus zwei sich überlappenden Konnektor-Konfliktbereichen (engl. connector conflict area), also ein Konnektor-Konfliktbereich für jeden beteiligten Konnektor.*

Die Definition eines Konfliktbereichs betrachtet immer nur zwei Konnektoren. Falls sich beispielsweise eine Kantenspur in vier Konnektoren aufspaltet, so entstehen sechs verschiedene Konfliktbereiche, nämlich für jedes Paar von Konnektoren ein Konfliktbereich (siehe auch Definition 4.5).

4.3.2. Kreuzungsmodell

Das folgende Kreuzungsmodell beschreibt den Aufbau der künstlichen Kreuzungen, die in dieser Arbeit untersucht werden (siehe Abbildung 4.3). Die Begrifflichkeiten lassen sich jedoch auch auf real existierende Verkehrsknotenpunkte abbilden.

Dabei umfasst das Kreuzungsmodell nicht nur die eigentliche Kreuzung selbst, sondern auch die Nachbarschaft einer Kreuzung.

Definition 4.2 (Kreuzung). *Eine Kreuzung besteht aus einem Knoten, dessen Konnektoren innere eingehende Kantenspuren mit inneren ausgehenden Kantenspuren verbinden.*

Die eigentliche Kreuzung ist Teil der Nachbarschaft.

Definition 4.3 (Nachbarschaft). *Die Nachbarschaft einer Kreuzung enthält neben der eigentlichen Kreuzung die Netzelemente der verschiedenen Richtungen, die auf die Kreuzung zu- bzw. von der Kreuzung wegführen. Für jede Richtung gibt es zwei eingehende (engl. incoming) und zwei ausgehende (engl. outgoing) Kanten. Dabei lässt sich jeweils eine äußere (engl. outer) und eine innere (engl. inner) Kante unterscheiden. Jede Kante besteht aus einer oder mehreren Kantenspuren. Für jede Richtung verbinden Konnektoren die äußeren eingehenden mit den inneren eingehenden Kantenspuren und die inneren ausgehenden mit den äußeren ausgehenden Kantenspuren.*

Die inneren eingehenden Kantenspuren werden im Folgenden auch als *Aufstellspuren* (engl. *turning lane*) bezeichnet; die Konnektoren einer Kreuzung auch als *Kreuzungsspuren* (engl. *intersection lane*).

Ein ITC-System vergibt Überfahrtsrechte an die verschiedenen Fahrzeuge. Diese Überfahrtsrechte werden im Folgenden Zeitslot genannt.

4. Simulationswerkzeug

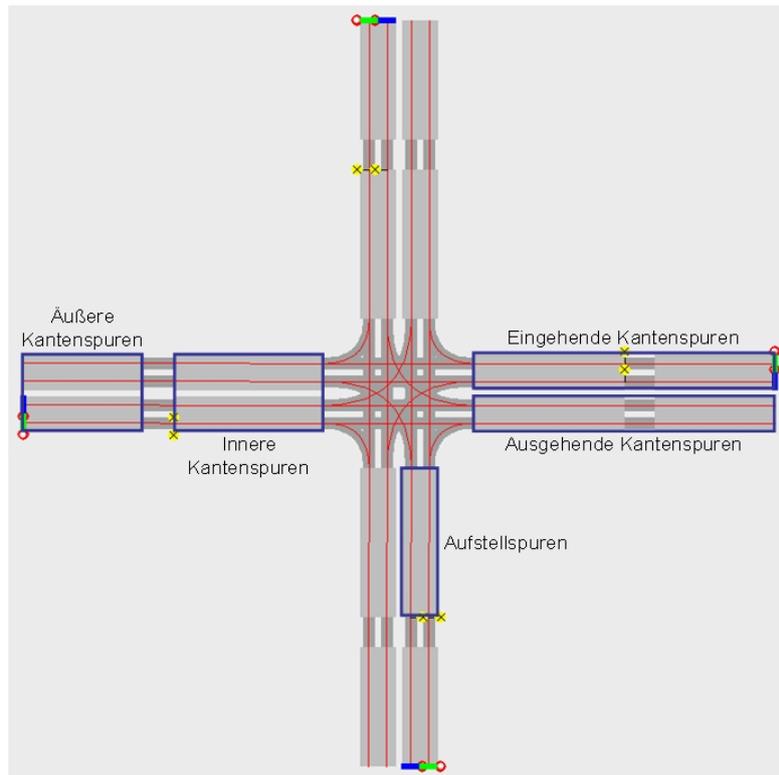


Abbildung 4.3.: Kreuzungsmodell in DAMAST

4. Simulationswerkzeug

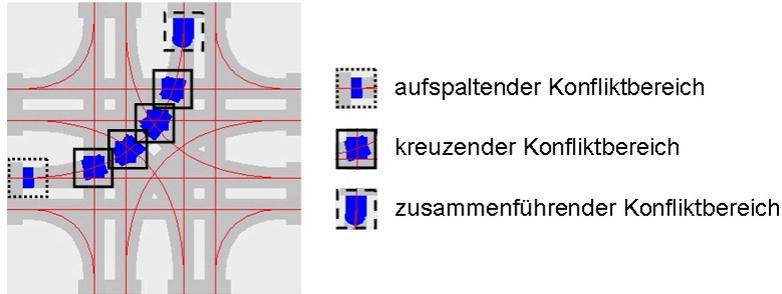


Abbildung 4.4.: Aufspaltende, kreuzende und zusammenführende Konfliktbereiche

Definition 4.4 (Zeitslot). *Ein Zeitslot bezeichnet das Recht eines Fahrzeugs, eine Kreuzung für eine bestimmte Zeit auf einer festgelegten Kreuzungsspur zu überqueren.*

Die Zeit, in der das Fahrzeug die Kreuzung überqueren kann, wird durch die Einfahrzeit und die Ausfahrzeit bestimmt. Die *Einfahrzeit* s_e (engl. *entrance time*) bezeichnet dabei den Zeitpunkt, zu dem ein Fahrzeug frühestens in die Kreuzung einfahren kann, die *Ausfahrzeit* s_l (engl. *leaving time*) den Zeitpunkt, zu dem ein Fahrzeug die Kreuzung spätestens verlassen haben muss. Für die Überquerung gelten bestimmte Geschwindigkeiten. Die *Einfahrtsgeschwindigkeit* v_e (engl. *entrance speed*) bezeichnet die Mindestgeschwindigkeit, mit der das Fahrzeug in die Kreuzung einfahren muss. Die *Überquerungsgeschwindigkeit* v_c (engl. *crossing speed*) bezeichnet die Maximalgeschwindigkeit, die ein Fahrzeug auf der Kreuzung haben darf. Die *Ausfahrtsgeschwindigkeit* v_l (engl. *leaving speed*) ist die Mindestgeschwindigkeit, die das Fahrzeug beim Verlassen der Kreuzung haben muss.

Damit ein Fahrzeug einen Zeitslot einhalten kann, müssen die folgenden Eigenschaften zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein:

- Das Intervall des Zeitslots muss groß genug sein, um die Kreuzung vollständig zu überqueren: $T_c \leq (s_l - s_e)$.
- Das Fahrzeug muss in der Lage sein, den Anfang des Zeitslots einzuhalten, d. h. der frühestmögliche Überquerungsbeginn $\min c_b$ muss kleiner oder gleich dem Beginn des Zeitslots sein: $\min c_b \leq s_e$.

Die Konfliktbereiche einer Kreuzung lassen sich in drei Klassen unterteilen [SB09] (siehe Abbildung 4.4).

Definition 4.5 (aufspaltende, zusammenführende und kreuzende Konfliktbereiche). *Ein aufspaltender Konfliktbereich (engl. *diverging conflict area*) ist ein Konfliktbereich einer Kreuzung, indem sich eine Kantenspur in zwei Kreuzungsspuren aufspaltet. Ein zusammenführender Konfliktbereich (engl. *merging conflict area*) ist ein Konfliktbereich einer Kreuzung, in dem zwei Kreuzungsspuren zu einer Kantenspur zusammengeführt werden. Alle übrigen Konfliktbereiche einer Kreuzung werden als kreuzende Konfliktbereiche (engl. *crossing conflict area*) bezeichnet.*

4. Simulationswerkzeug

Das hier beschriebene Kreuzungsmodell ist so aufgebaut, dass ein Fahrzeug, das eine Nachbarschaft betritt, immer sieben Elemente überfährt. Zunächst betritt jedes Fahrzeug die Nachbarschaft auf einer äußeren eingehenden Kantenspur und wechselt dann über einen Konnektor auf eine Aufstellspur, also eine innere eingehende Kantenspur. Anschließend überquert es die Kreuzung über eine Kreuzungsspur und wechselt dann auf eine innere ausgehende Kantenspur. Danach wechselt es über einen Konnektor auf eine äußere ausgehende Kantenspur und verlässt anschließend die Nachbarschaft der Kreuzung.

Falls die Kreuzung mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten agentengestützten ITC-Systems gesteuert wird, müssen Fahrzeuge über die Art der Kreuzungssteuerung informiert werden, während sie sich der Kreuzung nähern. Dies wird durch ein spezielles Verkehrsschild „Agentengesteuerte Kreuzung“ modelliert. Erst nachdem ein Fahrzeug dieses Verkehrsschild passiert hat, kann es, falls nötig, mit der Kreuzungssteuerungseinheit interagieren. Der Bereich, in dem die Interaktion möglich ist, wird als sichtbare Nachbarschaft bezeichnet, da dies der Bereich ist, den die Kreuzungssteuerungseinheit überblickt.

Definition 4.6 (Sichtbare Nachbarschaft). *Die sichtbare Nachbarschaft ist der Teil der Nachbarschaft, den Fahrzeuge befahren, die das Schild „Agentengesteuerte Kreuzung“ passiert, aber die Kreuzung noch nicht vollständig überquert haben.*

Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft den sichtbaren Bereich der Nachbarschaft, wenn das Schild „Agentengesteuerte Kreuzung“ gleich am Anfang jeder inneren eingehenden Kante aufgestellt wird.

4.3.3. Kraftstoffverbrauchsmodell

Zur Messung des Kraftstoffverbrauchs bei der Überquerung einer Kreuzung wurde in [Pul08, PSB11] das Momentanmodell von [BAB85] in das DAMAST-Simulationswerkzeug integriert.

Das Momentanmodell von [BAB85] berechnet den Kraftstoffverbrauch aus der Kraftstoffmenge, die im Leerlauf benötigt wird, aus der nötigen Kraftstoffmenge für die Fortbewegung und aus der benötigten Kraftstoffmenge für die positive Beschleunigung [PSB11].

4. Simulationswerkzeug

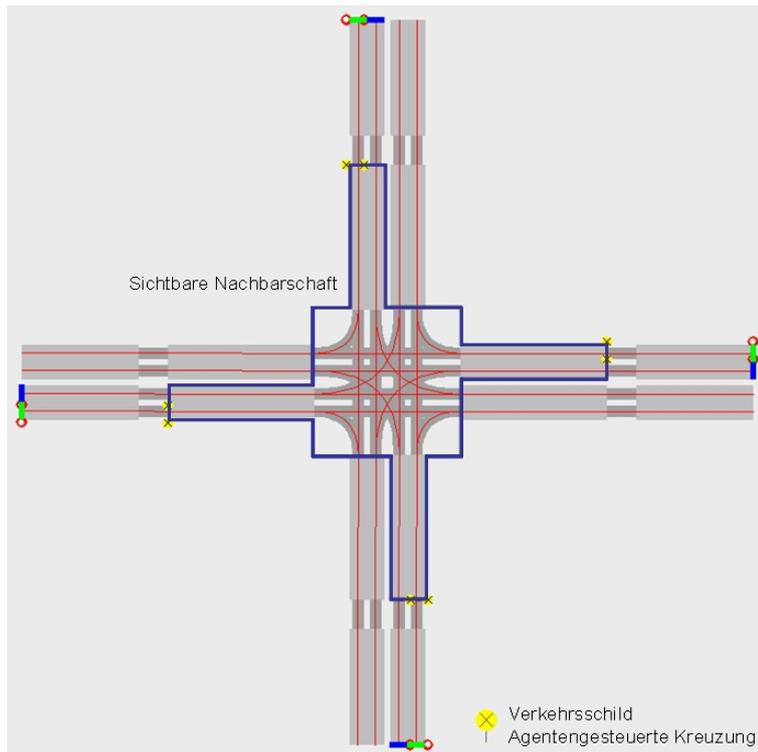


Abbildung 4.5.: Sichtbare Nachbarschaft

Teil II.

Verfahren

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Die Steuerung des Verkehrs an einer Straßenkreuzung lässt sich sowohl als Maschinen-Scheduling-Problem (MSP) [Pin02, Bru04] als auch mit Hilfe der Warteschlangentheorie (engl. *queueing theory*) [Sti02] beschreiben.

In der Warteschlangentheorie wird üblicherweise ein unendlicher Strom von Kunden abgefertigt [Pin02]. Das Ziel der Warteschlangentheorie ist, Verfahren zu finden, die bestimmte Zielgrößen asymptotisch minimieren [Pin02]. Auch an einer Straßenkreuzung begegnet man einem quasi unendlichen Strom an Fahrzeugen. Aus diesem Grund wird zur Modellierung des Straßenverkehrs häufig auf die Warteschlangentheorie zurückgegriffen, z. B. in [Leh72, Sti02].

Im Gegensatz zur Warteschlangentheorie wird beim Maschinen-Scheduling ein optimaler Belegungsplan für eine endliche Menge von Aufträgen gesucht.

Die Wertschätzung eines Verkehrsteilnehmer kann nur ermittelt werden, indem die Verkehrsteilnehmer mit der Kreuzungssteuerung kommunizieren. Dadurch sind bereits alle Fahrzeuge der Kreuzungssteuerung bekannt. Dies kann für ein dynamisches Verfahren genutzt werden, das sich an die aktuelle Verkehrslage kurzfristig anpasst und diese optimal steuert, indem es die optimale Reihenfolge bestimmt, in der die wartenden Fahrzeuge die Kreuzung überqueren. Dafür ist das Maschinen-Scheduling besser geeignet.

Deshalb modelliere ich das in dieser Arbeit betrachtete Kreuzungssteuerungsproblem als MSP. Genauer gesagt, wird in diesem Kapitel das Kreuzungssteuerungsproblem auf zwei verschiedene MSPs übertragen, die sich nur bezüglich ihres Optimierungskriteriums unterscheiden. Da diese MSPs jeweils NP-schwer sind, entwickle ich anschließend heuristische Verfahren mit polynomialer Laufzeit für diese MSPs.

5.1. Formale Problembeschreibung

Zunächst beschreibe ich, wie die Begrifflichkeiten aus der Kreuzungssteuerung auf das Maschinen-Scheduling übertragen werden können. Anschließend formuliere ich zwei MSPs, die das Kreuzungssteuerungsproblem repräsentieren, und beschreibe deren Komplexität.

5.1.1. Verkehrssteuerung an Kreuzungen als Maschinen-Scheduling-Problem

Das in dieser Arbeit betrachtete Kreuzungssteuerungsproblem lässt sich auch formal als MSP beschreiben. Beim Maschinen-Scheduling wird üblicherweise eine Menge von

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Aufträgen (engl. *job, task, activity*) auf eine Menge von *Maschinen* (engl. *machine, processor*) so verteilt, dass ein bestimmtes Kriterium optimiert wird (siehe [Bru04]). Eine solche Verteilung wird im Folgenden als *Maschinenbelegungsplan* (engl. *schedule*) bezeichnet.

Auftrag, Maschine

Betrachtet man die Verkehrssteuerung an einer Straßenkreuzung als ein MSP, so entspricht ein Auftrag der Überquerung einer Kreuzung durch ein einzelnes Fahrzeug. Im Falle einer isolierten Kreuzung lässt sich jedem Fahrzeug genau ein Auftrag zuordnen. Die Straßenkreuzung entspricht dann der Maschine, auf der Aufträge ausgeführt werden können.

Maschinenbelegungsplan

Der Maschinenbelegungsplan entspricht der Kreuzungsbelegung. Die Elemente des Maschinenbelegungsplans werden im Folgenden analog als Zeitslot (siehe Definition 4.4) bezeichnet. Beginn und Ende des Zeitslots entsprechen dann Beginn und Ende der Bearbeitung eines Auftrags.

Präzedenzgraph

Fahrzeuge können die Kreuzung erst überqueren, wenn alle Fahrzeuge, die vor ihnen warten, die Kreuzung bereits überquert haben. Dies lässt sich durch einen azyklischen gerichteten Graphen beschreiben, hier *Präzedenzgraph* (engl. *precedence graph*) [Bru04] genannt. Jeder Auftrag wird als Knoten modelliert. Eine gerichtete Kante von Knoten i nach Knoten j beschreibt, dass Auftrag i auf jeden Fall vor Auftrag j ausgeführt werden muss bzw. dass Fahrzeug i die Kreuzung auf jeden Fall vor Fahrzeug j überqueren muss.

Der Präzedenzgraph für ein Kreuzungssteuerungssystem umfasst alle Fahrzeuge, die die sichtbare Nachbarschaft betreten haben. Die Art des Präzedenzgraphen wird vom Layout der Kreuzung bestimmt (siehe Abschnitt 4.3.2). Bei einer Kreuzung mit n Richtungen besteht der Präzedenzgraph aus einer Menge von n disjunkten Teilpräzedenzgraphen, da kein Fahrzeug vor einem Fahrzeug aus einer anderen Richtung die Kreuzung überqueren muss.

Die einzelnen Teilpräzedenzgraphen hängen von den eingehenden Kantenspuren und den entsprechenden Konnektoren ab. Dabei lassen sich folgende drei Fälle unterscheiden:

- Fahrzeuge, die die Nachbarschaft auf verschiedenen äußeren Kantenspuren derselben Richtung betreten, können die Kreuzung über dieselbe Aufstellspur betreten (*Spurzusammenführung*) (Beispiel: Abbildungen 5.1a und 5.1c). Damit sind die Teile der möglichen Routen vor einer Kreuzung nicht disjunkt.
- Fahrzeuge, die auf derselben äußeren Kantenspur die Nachbarschaft betreten, können über verschiedene Aufstellspuren die Kreuzung betreten (*Spuraufteilung*) (Beispiel: Abbildungen 5.1b und 5.1c). Damit sind die Teile der möglichen Routen vor einer Kreuzung ebenfalls nicht disjunkt.

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

- Alle Fahrzeuge, die die Nachbarschaft einer Kreuzung auf derselben Kantenspur betreten, besitzen eine eindeutige Route bis sie die Kreuzung betreten (Beispiel: Abbildung 5.1d). Die Teile der möglichen Routen vor der Kreuzung sind dann disjunkt, d. h. es gibt weder eine Spuraufteilung noch eine Spurzusammenführung.

Im letzten Fall muss kein Fahrzeug, das sich auf einer bestimmten Route der Kreuzung nähert, vor einem Fahrzeug einer anderen Route die Kreuzung überqueren. Damit sind alle Teilpräzedenzgraphen sowie der Präzedenzgraph selbst eine Menge von Ketten (engl. *chains*). Jede Kette steht für die Fahrzeuge, die die Kreuzung über eine bestimmte Aufstellspur überqueren möchten. In jeder Kette ist der Knoten eines jeden Fahrzeugs mit dem Knoten seines direkten Nachfolgers verbunden.

Um eine häufige Änderung der Struktur des Präzedenzgraphen zu vermeiden, fordere ich, dass der für ein Fahrzeug relevante Teil des Präzedenzgraphen stabil bleibt, solange das Fahrzeug sich in der sichtbaren Nachbarschaft befindet.

Den für ein bestimmtes Fahrzeug relevanten Teil des Präzedenzgraphen erhält man, indem man alle Fahrzeuge außer dem entsprechenden Fahrzeug aus dem Präzedenzgraphen entfernt, die die Kreuzung nicht vor dem entsprechenden Fahrzeug überqueren müssen. Es bleiben also ausschließlich die Knoten des Präzedenzgraphen übrig, für die ein gerichteter Pfad zu dem Knoten existiert, der die Überfahrt des entsprechenden Fahrzeugs repräsentiert.

Im Fall einer Spuraufteilung könnte es passieren, dass sich Fahrzeuge auf einer Aufstellspur so rückstauen, dass andere Fahrzeuge daran gehindert werden, ihre eigene, eigentlich nicht überfüllte Aufstellspur zu erreichen. In diesem Fall könnte sich also auch der für ein Fahrzeug relevante Teil des Präzedenzgraphen ändern, sobald ein Fahrzeug seine Aufstellspur erreicht hat. Der entsprechende Teilpräzedenzgraph wäre in diesem Fall nicht mehr unbedingt eine Menge von Ketten.

Um diesen Effekt ausschließen zu können, wird in dieser Arbeit angenommen, dass es in der sichtbaren Nachbarschaft keine Spuraufteilung gibt (Annahme 8: *Keine Spuraufteilung in der sichtbaren Nachbarschaft*).

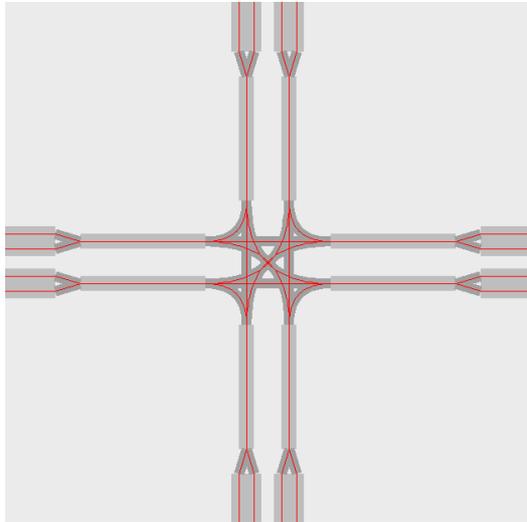
Im Fall einer Spurzusammenführung könnte sich der relevante Teil des Präzedenzgraphen ebenfalls ändern.

Beispiel 5.1. *Eine Kreuzung besteht für jede Richtung aus zwei äußeren Kantenspuren, die zu einer Aufstellspur zusammengeführt werden (siehe Abbildung 5.1a). Der Teilpräzedenzgraph lässt sich nun wie folgt beschreiben: Alle Fahrzeuge auf der Aufstellspur bilden eine Kette und alle Fahrzeuge auf den beiden äußeren Kantenspuren jeweils eine eigene Kette. Zusätzlich muss das letzte Fahrzeug auf der Aufstellspur – und damit alle Fahrzeuge auf der Aufstellspur – vor allen Fahrzeugen auf den äußeren Kantenspuren die Kreuzung überqueren. Damit ist das letzte Fahrzeug der Aufstellspur mit allen ersten Fahrzeugen der äußeren Kantenspuren verbunden².*

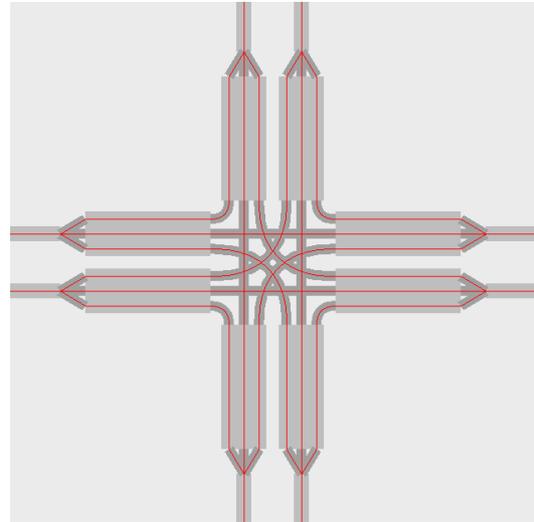
Sobald ein Fahrzeug von den äußeren Kantenspuren auf die Aufstellspur wechselt, würde sich der relevante Teil des Präzedenzgraphen für die Fahrzeuge auf den anderen

²Der Teilpräzedenzgraph ist in diesem Fall ein gewurzelter Baum (engl. *rooted tree*), genauer ein Out-Tree, also ein gewurzelter Baum, bei dem die Kanten von der Wurzel wegführen.

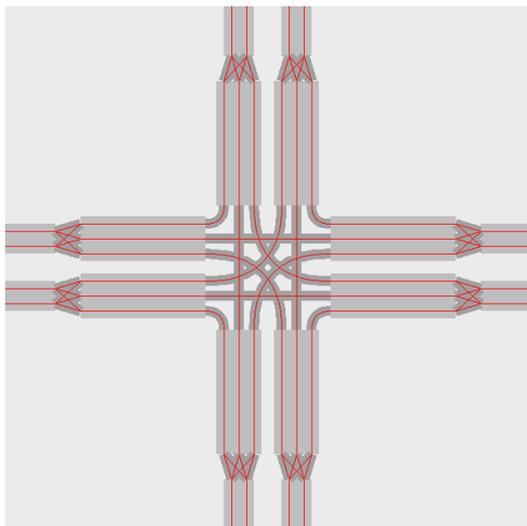
5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem



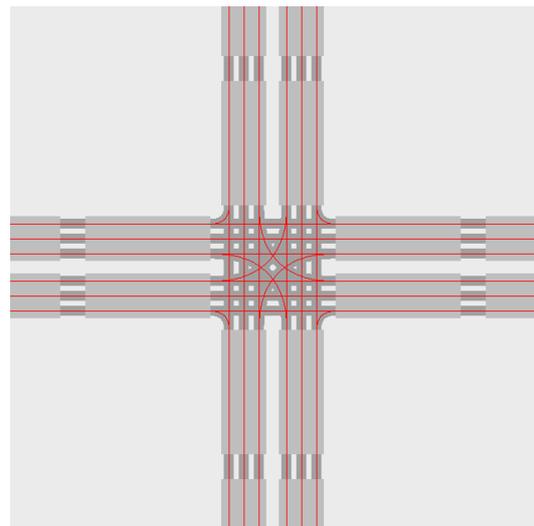
(a) mit Spurzusammenführung



(b) mit Spuraufteilung



(c) mit Spuraufteilung und -zusammenführung



(d) ohne Spuraufteilung und -zusammenführung

Abbildung 5.1.: Spuraufteilung und -zusammenführung

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

äußeren Kantenspuren ändern, weil dieses Fahrzeug nun nicht nur vor allen Fahrzeugen auf der eigenen äußeren Kantenspur die Kreuzung überqueren müsste, sondern auch vor allen Fahrzeugen der anderen äußeren Kantenspur.

Um eine Änderung relevanter Teile des Präzedenzgraphen zu vermeiden, schließe ich innerhalb der sichtbaren Nachbarschaft eine Spurzusammenführung aus (Annahme 9: *Keine Spurzusammenführung innerhalb der sichtbaren Nachbarschaft*).

Wenn in der sichtbaren Nachbarschaft Spuraufteilung und -zusammenführung ausgeschlossen sind, ist jeder Teilpräzedenzgraph und damit auch der gesamte Präzedenzgraph selbst eine Menge von Ketten.

Diese Annahme ermöglicht trotzdem, dass Fahrzeuge auf ihrer Route zwischen verschiedenen Aufstellspuren wählen können. In diesem Fall darf das Verkehrsschild „Agentengesteuerte Kreuzung“ allerdings erst auf den Aufstellspuren positioniert werden (siehe Definition 4.6). Dann erfolgt die Spurzusammenführung außerhalb der sichtbaren Nachbarschaft.

Auch wenn Spuraufteilung und -zusammenführung in der sichtbaren Nachbarschaft ausgeschlossen wird, ändert sich der Präzedenzgraph über die Zeit. Sobald ein neues Fahrzeug die sichtbare Nachbarschaft betritt, wird das Fahrzeug an die entsprechende Kette gehängt. Der neue Knoten erhält also eine eingehende Kante vom zuvor letzten Fahrzeug der Kette. Damit bleibt jedoch der für alle übrigen Fahrzeuge der sichtbaren Nachbarschaft relevante Teil des Präzedenzgraphen unverändert.

Auftragsbeginn

Der frühestmögliche Überquerungsbeginn $\min c_b^j$ eines Fahrzeugs j entspricht dem frühestmöglichen Auftragsbeginn (engl. *release date*) r_j .

Bearbeitungszeit

Die Überquerungszeit T_c^j eines Fahrzeugs j ist äquivalent zur Bearbeitungszeit p_j (engl. *processing time*) und hängt von den Eigenschaften der Kreuzung, des Fahrzeugs und des Fahrers ab. Beispiele für solche Eigenschaften sind die Länge und der Kurvenradius der gewünschten Kreuzungsspur sowie die fahrzeugbedingten Grenzen und die fahrerabhängigen Präferenzen bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung. Aus diesem Grund sind verschiedene Werte für die Bearbeitungszeit p_j möglich.

Auftragsunterbrechung

Ein Fahrzeug unterbricht die Kreuzungsüberquerung, wenn es z. B. zum Linksabbiegen in eine Kreuzung einfährt, den Gegenverkehr passieren lässt und anschließend die restliche Kreuzung überquert. Die Unterbrechung kann jedoch nicht beliebig lange dauern, da möglicherweise der querende Verkehr blockiert wird. Außerdem können nicht beliebig viele Fahrzeuge ihre Überquerung unterbrechen, da der zum Warten zur Verfügung stehende Raum auf der Kreuzung beschränkt ist. Aufgrund dieser Einschränkungen betrachte ich diesen Fall nicht weiter (Annahme 10: *Keine Unterbrechung der Kreuzungsüberquerung*).

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Die Überquerung einer Kreuzung kann also nicht unterbrochen werden. Aufträge müssen als Ganzes ausgeführt werden. Es ist also keine *Auftragsunterbrechung* (engl. *preemption, job splitting*) erlaubt.

Fälligkeitstermin

Beim Scheduling können Aufträge auch einen sogenannten Fälligkeitstermin d_j (engl. *due date, deadline*) besitzen. Die Kosten eines Auftrags hängen dann nicht ausschließlich von seinem Fertigstellungstermin, sondern auch von der Dauer der Überschreitung des Fälligkeitstermins ab. Das Ziel ist dann, die Dauer oder die Anzahl der Überschreitungen zu minimieren.

Bei der Planung einer Fahrt ist es nicht ungewöhnlich, dass man nur daran interessiert ist, zu einem Termin pünktlich oder mit minimaler Verspätung zu erscheinen. Da eine Reise allerdings im Allgemeinen die Überquerung mehrerer Kreuzungen umfasst, wird im Folgenden die vereinfachende Annahme gemacht, dass die Reisezeit an einer einzelnen Kreuzung minimiert werden soll (Annahme 11: *Reisezeit soll an jeder einzelnen Kreuzung minimiert werden*). Selbst wenn das Ziel der gesamten Fahrt nicht lautet, möglichst früh anzukommen, so wird an jeder einzelnen Kreuzung dennoch versucht, die Reisezeit bzw. die Wartezeit zu minimieren. Durch diese Annahme müssen Fälligkeitstermine nicht weiter berücksichtigt werden.

Die Erwartung des Fahrers für den weiteren Reiseverlauf bestimmt die Wertschätzung für eine geringe Reisezeit an jeder Kreuzung. Damit ändert sich die Wertschätzung eines Fahrers nicht, wenn er sich vor einer bestimmten Kreuzung befindet, sie kann sich jedoch von der einen zur nächsten Kreuzung ändern.

Bündelung

Manchmal werden beim Scheduling mehrere Aufträge gebündelt. Dies entspräche im Straßenverkehr der Bildung einer Kolonne. Außer bei Militärkolonnen ist der Erhalt einer Kolonne nicht verpflichtend. Deshalb wird die Bündelung (engl. *batching*) im weiteren nicht betrachtet. Dies macht Kolonnenbildung (engl. *platooning*) bei der Kreuzungssteuerung aber nicht unmöglich. Kolonnen werden allerdings nur dann gebildet, wenn es für das Optimierungskriterium besser ist, bestimmte Fahrzeuge zu Kolonnen zusammenzufassen. Falls dennoch Kolonnen erzwungen werden müssen, kann die Überquerung der gesamten Kolonne als ein Auftrag betrachtet werden.

5.1.2. Formulierung des Maschinen-Scheduling-Problems

Zur formalen Beschreibung von MSPs wird in dieser Arbeit die Notation aus [Bru04] verwendet. Das verwendete Klassifikationsschema geht zurück auf [GLLK79]: Ein MSP lässt sich als Tripel $\alpha|\beta|\gamma$ beschreiben. α beschreibt den Maschinentyp, β den Aufgabentyp und γ das Optimierungskriterium.

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Maschinentyp

Da für die Überquerung einer bestimmten Kreuzung auch nur diese Kreuzung verwendet werden kann, steht die zu verwendende Kreuzung für jedes Fahrzeug fest. Aus diesem Grund erhalten wir für den Maschinentyp α den Wert 1, also gilt $\alpha = 1$.

Aufgabentyp

Der Aufgabentyp β wird als 6-Tupel beschrieben $\beta = \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5\beta_6$. β_1 zeigt an, ob die Bearbeitung einer Aufgabe unterbrochen werden kann. Wie bereits ausgeführt, ist eine solche Unterbrechung bei der Überquerung einer Kreuzung nicht möglich. β_1 erhält also den leeren Wert \circ . Der Wert β_2 beschreibt die Art des Präzedenzgraphen, also gilt $\beta_2 = \text{chains}$. Da Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeiten die Kreuzung erreichen, gibt es für jeden Auftrag einen frühestmöglichen Auftragsbeginn. β_3 erhält also den Wert r_j . Wie bereits erwähnt, ist die Bearbeitungszeit p_j beliebig: Es gilt also $\beta_4 = \circ$. Da keine Fälligkeitstermine und auch keine Bündelung benötigt werden, erhalten b_5 und b_6 jeweils den leeren Wert \circ . Also gilt $\beta = \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5\beta_6 = \text{chains}; r_j$.

Optimierungskriterium

Das Ziel eines Scheduling-Verfahrens ist die Minimierung einer Kostenfunktion. Die Kostenfunktion kann von verschiedenen Größen abhängig sein. Sehr häufig ist sie abhängig vom Fertigstellungstermin C_j (engl. *completion time*) oder von der Verspätung $L_j = C_j - d_j$ (engl. *lateness*). Beim Scheduling sind gängige Kostenfunktionen die maximale Produktionsdauer (engl. *makespan*) $\max_{j \in V} C_j = C_{\max}$, die Gesamtdurchlaufzeit (engl. *total flow time*) $\sum_{j \in V} C_j$ und die gewichtete Gesamtdurchlaufzeit (engl. *total weighted flow time*) $\sum_{j \in V} w_j C_j$ mit nicht negativen Gewichten w_i [Bru04]. V bezeichnet in allen Fällen die Menge aller Fahrzeuge.

An einer Kreuzung möchte man üblicherweise die Wartezeit minimieren. In dieser Arbeit betrachte ich darüber hinaus erstmals auch die Wartezeit gewichtet mit der Wertschätzung für eine geringe Wartezeit. Sinnvolle Kostenfunktionen sind also die maximale Wartezeit ($\max T_w^j$), die maximale gewichtete Wartezeit ($\max w_j T_w^j$), die durchschnittliche Wartezeit ($\frac{\sum_{j \in V} T_w^j}{|V|}$) und die durchschnittliche gewichtete Wartezeit ($\frac{\sum_{j \in V} w_j T_w^j}{|V|}$).

Nach der alternativen Definition der Wartezeit (siehe Definition 2.4) gilt: $T_w^j = c_b^j - \min c_b^j = c_e^j - T_c^j - \min c_b^j$. Durch Verwendung der eingeführten Notation aus dem Maschinen-Scheduling erhält man $T_w^j = C_j - p_j - r_j$. Da nur der Fertigstellungstermin C_j vom tatsächlichen Maschinenbelegungsplan abhängt und die Bearbeitungszeit p_j und der frühestmögliche Auftragsbeginn r_j unabhängig vom tatsächlichen Maschinenbelegungsplan sind, ist eine Minimierung der Wartezeit äquivalent zur Minimierung des Fertigstellungstermins (siehe hierzu auch [Pin02]). Dies gilt allerdings nur für die Summe der Wartezeiten und für die Summe der gewichteten Wartezeiten und nicht für die maximale Wartezeit und die maximale gewichtete Wartezeit.

Da die Anzahl der betrachteten Fahrzeuge $|V|$ ebenfalls unabhängig vom tatsächlich verwendeten Maschinenbelegungsplan ist (siehe Annahme 2), ist eine Minimierung der

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Summe der (gewichteten) Wartezeiten äquivalent zur Minimierung der durchschnittlichen (gewichteten) Wartezeit.

Daraus folgt, dass die Minimierung der durchschnittlichen (gewichteten) Wartezeit äquivalent zur Minimierung der Summe der (gewichteten) Fertigstellungstermine $\sum C_i$ bzw. $\sum w_i C_i$ ist. Da dies aber für die maximale (gewichtete) Wartezeit nicht gilt, betrachte ich nur die durchschnittliche Wartezeit und die durchschnittliche gewichtete Wartezeit.

Endgültige Formulierung des Problems

Das üblicherweise betrachtete Kreuzungssteuerungsproblem entspricht also dem MSP

$$1|chains;r_j|\sum C_i \quad (5.1)$$

und das in dieser Arbeit erstmals betrachtete Kreuzungssteuerungsproblem entspricht dem MSP

$$1|chains;r_j|\sum w_i C_i. \quad (5.2)$$

Sowohl das MSP 5.1 als auch das MSP 5.2 sind eine Generalisierung des MSPs

$$1|r_j|\sum C_i \quad (5.3)$$

und damit NP-schwer [LKB77, Bru04, BK09].

Auch unter der Annahme, dass die Bearbeitungszeit für alle Aufträge konstant ist, wäre das MSP für die gewichtete Wartezeit $1|chains;r_j;p_i = p|\sum w_i C_i$ immer noch NP-schwer [LK80, Bru04, BK09]. Nur für die ungewichtete Wartezeit wäre das MSP $1|chains;r_j;p_i = p|\sum C_i$ in polynomialer Zeit lösbar [Bru04, BK09].

Online-Scheduling

Bislang wurde das MSP als *offline* MSP betrachtet. Beim Offline-Scheduling wird unterstellt, dass alle zu bearbeitenden Aufträge zu Anfang bereits vollständig bekannt sind, auch wenn sie frühestens zu einem späteren Zeitpunkt bearbeitet werden können [IL03]. Für das hier betrachtete Kreuzungssteuerungsproblem ist das jedoch im Allgemeinen nicht der Fall. Auch nachdem Fahrzeuge einen Zeitslot erhalten haben, können neue Fahrzeuge die sichtbare Nachbarschaft einer Kreuzung erreichen. Wenn im Voraus nichts über diese neuen Fahrzeuge bekannt ist, dann handelt es sich um ein *online* MSP [IL03].

Selbst wenn die Route und die Wertschätzung aller Fahrzeuge im Voraus bekannt wären, ließe sich der frühestmögliche Überquerungsbeginn immer noch nicht bestimmen, da die Reisezeit nicht bekannt ist, die das Fahrzeug benötigt, bis es die Nachbarschaft der Kreuzung erreicht. Aus diesem Grund handelt es sich hier auch um ein *stochastisches* MSP [Pin02], bei dem zumindest der frühestmögliche Überquerungsbeginn zufällig verteilt ist. Beim stochastischen Scheduling werden Ankunftszeit und Bearbeitungszeit als Zufallsprozess modelliert. Die Art der Verteilung wird dann beim stochastischen Scheduling berücksichtigt. Das Ziel ist dann beispielsweise, den Erwartungswert einer

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Zielfunktion zu minimieren [Pin02]. Wie bereits erwähnt, suche ich in dieser Arbeit allerdings ein Verfahren, das sich an die aktuelle Verkehrslage kurzfristig anpasst und diese optimal steuert. Eine Minimierung des Erwartungswertes ist deswegen nicht ausreichend. Daher betrachte ich im Folgenden nur online MSPs.

Die Einteilung von Verfahren, wie sie für das stochastische Scheduling in [Pin02] vorgeschlagen wird, kann dennoch verwendet werden. *Verfahren, die eine statische Liste verwenden*, (engl. *static list policies*) erstellen bei Beginn eine Liste, nach der die zu bearbeitenden Aufträge abgearbeitet werden. Diese Liste bleibt über die gesamte Bearbeitungszeit unverändert. Diese Verfahren sind also nur für das Offline-Scheduling geeignet. *Dynamische Verfahren* (engl. *dynamic policies*) dagegen erlauben die Änderung der Liste während der gesamten Bearbeitungszeit und können für das Online-Scheduling verwendet werden. Unabhängig davon lassen sich *präemptive* (engl. *preemptive policies*) und *nicht-präemptive* Verfahren (engl. *non-preemptive policies*) unterscheiden. Bei präemptiven Verfahren kann die Bearbeitung eines Auftrags unterbrochen werden, bei nicht-präemptiven Verfahren ist dies nicht möglich.

Da im Laufe der Zeit neue Fahrzeuge hinzukommen, die zu Anfang noch gar nicht eingeplant werden konnten, ist für die Kreuzungssteuerung ein dynamisches Verfahren nötig. Da wie bereits erwähnt, ein Fahrzeug die Überquerung einer Kreuzung nicht unterbrechen kann, muss das Verfahren nicht-präemptiv sein. Es wird also ein dynamisches, nicht-präemptives Verfahren für das Online-Scheduling gesucht. Bei Verwendung eines solchen Verfahrens, kann die Überquerungsreihenfolge vor jeder neuen Überquerung angepasst werden.

Einschränkungen

Bislang blieb folgende Eigenschaft unberücksichtigt: Beim Maschinen-Scheduling wird davon ausgegangen, dass auf einer Maschine gleichzeitig nur eine Aufgabe erledigt werden kann. Eine Kreuzung kann jedoch von mehreren Fahrzeugen gleichzeitig überquert werden. Damit kann eine Maschine also nebenläufig benutzt werden. Die Überquerung eines Fahrzeugs beeinflusst allerdings die zusätzlich noch möglichen gleichzeitigen Überquerungen anderer Fahrzeuge.

Dies lässt sich mittels eines Konfliktgraphen [IL03] modellieren. Ein Knoten entspricht dabei einer Aufstellspur, auf der beliebig viele Fahrzeuge warten können. Wenn Fahrzeuge zweier Aufstellspuren nicht gleichzeitig die Kreuzung überqueren können, werden die zugehörigen Knoten mit einer Kante verbunden. Eine Kante im Konfliktgraphen zeigt also an, welche Aufstellspuren miteinander in Konflikt stehen. Der Konfliktgraph wird ausschließlich durch das Layout der Kreuzung bestimmt.

[IL03] betrachtet bipartite Konfliktgraphen für das MSP $1|chains; r_j; p_i = p|C_{\max}$. Für diesen Fall zeigen die Autoren, dass die maximale Wartezeit beim Online-Scheduling von der maximale Wartezeit beim Offline-Scheduling abhängt und geben dafür obere und untere Schranken an. Für die Kreuzung aus Abbildung 5.2a lässt sich der Konfliktgraph auf den vollständigen bipartiten Graphen $K_{2,2}$ reduzieren [IL03]. Für $K_{2,2}$ beträgt beim Online-Scheduling die maximale Wartezeit höchstens den doppelten Wert der maximalen Wartezeit beim Offline-Scheduling plus eine additive Konstante [IL03].

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

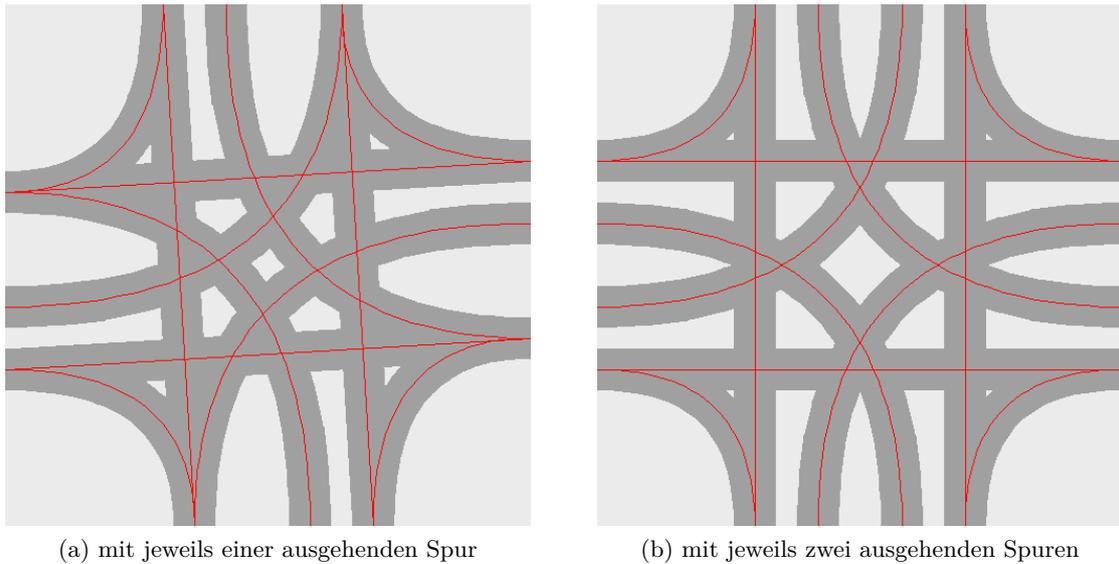


Abbildung 5.2.: Kreuzungslayouts mit unterschiedlicher Anzahl ausgehender Spuren

Der Konfliktgraph ist jedoch nicht für jede Kreuzung bipartit. Die Kreuzung aus Abbildung 5.2b lässt sich bereits nicht mehr durch einen bipartiten Konfliktgraphen modellieren. Das in [IL03] betrachtete MSP ist in polynomialer Zeit lösbar [Law73, Bru04, BK09]. Betrachtet man jedoch nicht nur die maximale oder die summierte Wartezeit sondern die summierte gewichtete Wartezeit so erhält man das MSP $1|chains; r_j; p_i = p | \sum w_i C_i$. Wie bereits erwähnt, ist dieses MSP jedoch NP-schwer. Das von den Autoren beschriebene polynomiale Verfahren ist also nicht auf das in dieser Arbeit betrachtete MSP 5.2 übertragbar. Sowohl im Maschinen-Scheduling als auch in der Warteschlangentheorie gibt es nach meinem Kenntnisstand keine Ansätze, die das MSP 5.2 mit Konfliktgraphen kombinieren.

5.1.3. Komplexität

Man erhält eine optimale Lösung für alle hier betrachteten NP-schweren MSPs, indem man jeden theoretisch möglichen Plan bewertet und dann den besten Plan wählt. Da es bei n Aufträgen $n!$ mögliche Maschinenbelegungspläne gibt, beträgt der Aufwand für dieses Verfahren $O(n!)$, sofern die Bewertung eines einzelnen Maschinenbelegungsplanes mit konstanten Aufwand möglich ist.

Im Falle eines Präzedenzgraphen, der aus einer Menge von Ketten besteht, ist der Aufwand von der Anzahl der Ketten abhängig. Sei Γ die Menge aller Ketten. Γ enthalte g Ketten. Im Falle der beiden MSPs 5.1 und 5.2 gibt es dann $O(g^n)$ verschiedene Maschinenbelegungspläne, da für den nächsten einzuplanenden Auftrag jeweils nur der erste noch nicht vergebene Auftrag jeder Kette in Frage kommt. Damit beträgt der Aufwand für dieses Verfahren dann $O(g^n)$. Es kann effizientere Verfahren geben. Da die

Probleme jedoch NP-schwer sind, gehe ich davon aus, dass es kein Verfahren gibt, das nur polynomialen Aufwand benötigt.

5.2. Entwicklung heuristischer Verfahren

Aufgrund der Komplexität der MSPs und der trotzdem nicht berücksichtigten Einschränkungen, wäre die Berechnung einer optimalen Lösung im Allgemeinen zu aufwändig. Deswegen werden in diesem Abschnitt heuristische Verfahren für die MSPs 5.1 und 5.2 entwickelt, die polynomiale Laufzeit besitzen. Die entwickelten heuristischen Verfahren basieren auf den optimalen Lösungen von [Hor72] und [Sid75] für ein vereinfachtes, aber in P liegendes MSP.

In [SBB⁺06] habe ich bereits gemeinsam mit Kollegen aus dem Graduiertenkolleg IME [IME11] dieses Verfahren ohne Anpassungen auf ein einfaches Kreuzungssteuerungsszenario angewendet. Es wurde mit zwei weiteren Verfahren verglichen. Das erste Verfahren vergibt Zeitslots nach dem FIFO-Prinzip. Das zweite Verfahren vergibt Zeitslots ebenfalls nach dem FIFO-Prinzip, ermöglicht anschließend allerdings den Tausch von Zeitslots zwischen Fahrzeugen. Eine numerische Simulation zeigt, dass das Verfahren von [Hor72] beiden untersuchten Alternativen bezüglich der gewichteten Wartezeit deutlich überlegen ist. Aus diesem Grund entwerfe ich auch in dieser Arbeit verbesserte heuristische Verfahren, die auf [Hor72] und [Sid75] basieren.

5.2.1. Optimale polynomiale Lösung für ein vereinfachtes Maschinen-Scheduling-Problem

[Sid75] beschreibt ein Verfahren, mit dem in polynomialer Zeit eine optimale Lösung für die Minimierung der Summe der gewichteten Bearbeitungszeit auf einer einzelnen Maschine bei einer Menge von Ketten als Präzedenzgraphen gefunden wird (siehe auch [Pin02]). Im Gegensatz zu den bisher betrachteten MSPs, können alle Aufträge sofort bearbeitet werden. Das betrachtete MSP lautet:

$$1|chains| \sum w_i C_i \tag{5.4}$$

Für das MSP 5.4 beschreiben [Hor72] und [Sid75] dieselbe Lösung. Da die Notation von [Sid75] jedoch leichter verständlich ist, beziehe ich mich im Folgenden nur noch auf [Sid75]. Das Verfahren von [Sid75] erweitert die Regel von Smith [Smi56] auf MSPs mit einer Menge von Ketten als Präzedenzgraphen: Gegeben sei eine Menge von Aufträgen J , die alle auf einer einzelnen Maschine bearbeitet werden müssen, und ein Präzedenzgraph Γ in Form einer Menge von Ketten Γ . J enthalte $n = |J|$ Aufträge. Γ enthalte $g = |\Gamma|$ Ketten.

Jeder Auftrag $j \in J$ kann zum Zeitpunkt $r_j = 0$ bearbeitet werden. Die Aufträge einer Kette sind geordnet. Der erste Auftrag einer Kette, ist der Auftrag, der als erstes bearbeitet werden muss.

Definition 5.1 (Bearbeitungszeit, Gewicht, Anfangskette). (γ, i) bezeichnet den i . Auftrag in Kette γ . (γ, i) hat die Bearbeitungszeit $p_{\gamma,i}$ und das Gewicht $w_{\gamma,i}$. Die Anfangs-

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Kette $\gamma_i = \{(\gamma, 1), \dots, (\gamma, i)\}$ ist die Kette mit den ersten $i \geq 0$ Aufträgen der Kette $\gamma \in \Gamma$. γ_0 ist die leere Anfangskette der Kette γ .

Für jede Anfangskette γ_i lässt sich nun das Verhältnis $\rho_{\gamma,i}$ aus der Summe der Bearbeitungszeiten und der Summe der Gewichte der Aufträge der Anfangskette γ_i bestimmen:

$$\rho_{\gamma,i} = \frac{\sum_1^i p_{\gamma,i}}{\sum_1^i w_{\gamma,i}} \quad (5.5)$$

Mit Hilfe von $\rho_{\gamma,i}$ lassen sich ρ -minimale und ρ^* -minimale Anfangsketten einer Kette γ bestimmen.

Definition 5.2 (ρ -minimale Anfangskette). *Eine Anfangskette γ_i mit $|\gamma|$ Aufträgen ist ρ -minimal, falls*

$$\rho_{\gamma,i} = \min_{k=1}^{|\gamma|} \rho_{\gamma,k}.$$

Definition 5.3 (ρ^* -minimale Anfangskette). *Eine Anfangskette γ_i ist ρ^* -minimal, falls γ_i ρ -minimal ist und alle Anfangsketten γ_k der Kette γ für $k < i$ nicht ρ -minimal sind.*

Jede Kette γ besitzt mindestens eine ρ -minimale Anfangskette und genau eine ρ^* -minimale Anfangskette.

Um die nächsten einzuplanenden Aufträge zu bestimmen, schlägt [Sid75] folgendes Vorgehen vor:

- A.1. Bestimme die Kette γ , deren ρ^* -minimale Anfangskette γ_k das geringste Verhältnis $\rho_{\gamma,k}$ besitzt.
- A.2. Plane alle Aufträge der Anfangskette γ_k ein.
- A.3. Entferne alle eingeplanten Aufträge aus der Kette γ .
- A.4. Wiederhole die Schritte A.1, A.2 und A.3 solange es noch Ketten gibt, die Aufträge enthalten.

Der damit erreichte vollständige Maschinenbelegungsplan ist optimal für das MSP 5.4 und besitzt den Aufwand $O(n^2)$. Das MSP 5.4 liegt somit in P . Beides wird in [Sid75] gezeigt. Dieses Verfahren kann nicht nur für das offline MSP, sondern auch für das entsprechende online MSP verwendet werden [Pin02].

Es können alle Aufträge aus γ_k eingeplant werden, da eine Neuberechnung nach jedem Auftrag zum selben Ergebnis führen würde: Entfernt man nur den ersten Auftrag aus der entsprechenden ρ^* -minimalen Kette γ_k , so erniedrigt sich für diese Kette zwangsläufig das Verhältnis $\rho_{\gamma',k'}$ für die neue ρ^* -minimale Anfangskette $\gamma'_{k'}$, also $\rho_{\gamma',k'} < \rho_{\gamma,k}$. Andernfalls wäre $\rho_{\gamma,1} < \rho_{\gamma,k}$ und γ_k somit nicht ρ^* -minimal gewesen. Da sich die ρ^* -minimalen Anfangsketten der übrigen Ketten nicht verändern, ist es am besten, als nächstes die übrigen Elemente der ρ^* -minimalen Anfangskette γ_k einzuplanen (siehe dazu auch [Pin02]).

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Das MSP 5.4 ist eine Vereinfachung des MSPs 5.2, da alle Aufträge sofort bearbeitet werden können ($r_j = 0$) [Bru04, BK09]. Es ist auch eine Vereinfachung des MSPs 5.1, wenn man alle Gewichte auf eins setzt ($w_j = 1$) [Bru04, BK09]. Diese Vereinfachung ist bedeutsam, da die MSPs 5.1, 5.2 und 5.3 NP-schwer sind und das MSP 5.4 aber in P liegt.

5.2.2. Vorbereitung der heuristischen Verfahren

Die folgenden heuristischen Verfahren mit polynomialem Aufwand übertragen das Verfahren von [Sid75] auf die MSPs 5.1 und 5.2. Sofern man $P \neq NP$ unterstellt, führen diese Verfahren demnach nicht immer zu einem optimalen Maschinenbelegungsplan. Bevor die heuristischen Verfahren vorgestellt werden, müssen jedoch zuvor einige grundlegende Begriffe eingeführt werden.

Beste geeignete Zeitslots

Im Gegensatz zu dem MSP 5.4 kann nun nicht jeder Auftrag sofort begonnen werden. Damit erhält der nächste einzuplanende Auftrag nicht unbedingt den Zeitslot, der direkt an den Zeitslot des zuletzt eingeplanten Auftrags anschließt, sondern den für den nächsten einzuplanenden Auftrag am besten geeigneten Zeitslot.

Definition 5.4 (Bester geeigneter Zeitslot). *Der beste geeignete Zeitslot eines Auftrags ist der früheste noch verfügbare Zeitslot, der nicht vor dem frühestmöglichen Auftragsbeginn beginnt.*

Der beste geeignete Zeitslot kann sowohl vor als auch nach dem Zeitslot des zuletzt eingeplanten Auftrags liegen. Falls der bisherige Maschinenbelegungsplan eine geeignete Lücke aufweist, kann der nächste einzuplanende Auftrag in diese Lücke eingereiht werden. Damit ist die Reihenfolge, in der die Aufträge eingeplant werden, nicht unbedingt die Reihenfolge, in der die Aufträge bearbeitet werden. Solche Lücken können entstehen, wenn der als nächstes einzuplanende Auftrag nicht direkt nach dem Ende des Zeitslots des zuletzt eingeplanten Auftrags beginnen kann und beide Aufträge aus verschiedenen Ketten stammen.

Im Folgenden mache ich die vereinfachende Annahme, dass für eine gute Lösung der nächste einzuplanende Auftrag jeweils seinen besten geeigneten Zeitslot erhält (Annahme 12: *Eine gute Lösung setzt sich nur aus den jeweils besten geeigneten Zeitslots zusammen*). Damit ist für jeden Auftrag, der als nächstes eingeplant wird, der zu vergebende Zeitslot eindeutig. Dadurch werden jedoch Lücken im Maschinenbelegungsplan nicht verhindert.

Verzögerung der restlichen Aufträge

Da im vereinfachten MSP 5.4 jeder Auftrag sofort begonnen werden kann, bedeutet die Bearbeitungszeit p_j eines Auftrags j , dass sich die Bearbeitung für alle anderen Aufträge, die nicht vor Auftrag j eingeplant werden, um die Bearbeitungszeit des Auftrags j verzögert. Dies ist im Falle von Aufträgen mit $r_j > 0$ nicht mehr unbedingt der Fall.

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Beispiel 5.2. *Angenommen die Bearbeitung eines Auftrags j mit frühestmöglichem Auftragsbeginn $r_j = 1$ beginnt zum Zeitpunkt 1 und benötigt 4 Sekunden. Ein Auftrag k mit $r_k = 3$ würde sich in diesem Fall nicht um 4 Sekunden, sondern nur um 2 Sekunden verzögern.*

Die Verzögerung, die für Auftrag k entsteht, wenn ein Auftrag j vor ihm eingeplant wird, hängt also nicht nur von Auftrag j ab, sondern auch von Auftrag k .

Sei S der aktuelle Maschinenbelegungsplan. Neben einem von S unabhängigen frühestmöglichsten Auftragsbeginn r_j besitzt ein Auftrag j auch einen frühestmöglichsten Auftragsbeginn r_j^S , der vom aktuellen Maschinenbelegungsplan S abhängt. Dabei gilt immer $r_j \leq r_j^S$.

Definition 5.5 (Verzögerung eines Auftrags). *Sei S_{γ_k} der Maschinenbelegungsplan, der aus dem Maschinenbelegungsplan S entsteht, wenn als nächstes die Aufträge der Anfangskette γ_k eingeplant werden. $d_{\gamma',v}^{\gamma_k}$ bezeichnet in diesem Fall den Wert, um den sich die Bearbeitung für den Auftrag (γ', v) mindestens verzögert. $r_{\gamma',v}^S$ bezeichnet den frühestmöglichsten Auftragsbeginn des Auftrags (γ', v) für den bisherigen Maschinenbelegungsplan S . Die Verzögerung des Auftrags (γ', v) kann nun wie folgt berechnet werden:*

$$d_{\gamma',v}^{\gamma_k} = r_{\gamma',v}^{S_{\gamma_k}} - r_{\gamma',v}^S$$

Der Maschinenbelegungsplan, bei dem zunächst alle Aufträge der Anfangskette γ_{v-1} eingeplant werden und direkt danach der Auftrag (γ, v) selbst eingeplant wird, ist für den Auftrag (γ, v) der günstigste. Aus diesem Grund verzögert sich auch die Bearbeitung für einen Auftrag (γ, v) nicht, wenn die eingeplanten Aufträge aus der Anfangskette γ_k derselben Kette γ wie der Auftrag (γ, v) stammen:

$$d_{\gamma,v}^{\gamma_0} = d_{\gamma,v}^{\gamma_0} = r_{\gamma,v}^{S_{\gamma_0}} - r_{\gamma,v}^S = r_{\gamma,v}^S - r_{\gamma,v}^S = 0 \quad (5.6)$$

Daraus folgt insbesondere auch:

$$d_{\gamma,v}^{\gamma_v} = d_{\gamma,v}^{\gamma_{v-1}} = 0 \quad (5.7)$$

5.2.3. Heuristisches Verfahren 1: Tatsächliche Bearbeitungszeit

Wenn nicht jeder Auftrag sofort begonnen werden kann, ist es nicht sinnvoll, für die Berechnung des Verhältnisses $\rho_{\gamma,i}$ die Bearbeitungszeiten einer Anfangskette γ_i einfach aufzusummieren.

Beispiel 5.3. *Angenommen die Bearbeitung eines Auftrags (γ, v) mit frühestmöglichem Auftragsbeginn $r_{\gamma,v} = 1$ beginnt zum Zeitpunkt 1 und benötigt 4 Sekunden. Ein Auftrag $(\gamma, v + 1)$ mit $r_{\gamma,v+1} = 7$ kann trotzdem nicht bereits nach 4 Sekunden bearbeitet werden, sondern erst nach 6 Sekunden. Falls die Bearbeitung ebenfalls 4 Sekunden dauert, benötigen die beiden Aufträge für die Bearbeitung zusammen nun 10 Sekunden statt 8 Sekunden.*

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

Aus diesem Grund wird statt der Summe der Bearbeitungszeiten $\sum_1^i p_{\gamma,i}$ die tatsächliche Bearbeitungszeit $P_{\gamma,i}$ verwendet.

Definition 5.6 (Tatsächliche Bearbeitungszeit). *Die tatsächliche Bearbeitungszeit $P_{\gamma,i}$ einer Anfangskette γ_i ist die Differenz zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die Bearbeitung des Auftrags (γ, i) beendet ist, und dem Zeitpunkt, zu dem die Bearbeitung des Auftrags $(\gamma, 1)$ begonnen wird. Die tatsächliche Bearbeitungszeit lässt sich wie folgt berechnen:*

$$P_{\gamma,i} = r_{\gamma,i}^{S_{y_i}} + p_{\gamma,i} - r_{\gamma,1}^{S_{y_i}}$$

Mit der tatsächlichen Bearbeitungszeit, lässt sich das Verhältnis $\rho_{\gamma,i}$ (siehe Formel 5.5) neu formulieren:

$$\rho_{\gamma,i} = \frac{P_{\gamma,i}}{\sum_1^i w_{\gamma,i}} \quad (5.8)$$

Die angepasste Formel 5.8 für $\rho_{\gamma,i}$ kann nun zur Bestimmung ρ -minimaler und ρ^* -minimaler Anfangsketten verwendet werden. Das Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 muss nur leicht angepasst werden, um das Online-Scheduling zu unterstützen. Anstatt gleich alle Aufträge der entsprechenden ρ^* -minimalen Anfangskette einzuplanen (Schritt A.2) und danach zu entfernen (Schritt A.3), wird nur der erste Auftrag der entsprechenden ρ^* -minimalen Anfangskette eingeplant und entfernt:

- B.1. Bestimme die Kette γ , deren ρ^* -minimale Anfangskette γ_k das geringste Verhältnis $\rho_{\gamma,k}$ besitzt.
- B.2. Plane nur den ersten Auftrag $(\gamma, 1)$ der Anfangskette γ_k ein.
- B.3. Entferne den eingeplanten Auftrag aus der Kette γ .
- B.4. Wiederhole die Schritte B.1, B.2 und B.3 solange es noch Ketten gibt, die Aufträge enthalten.

Die Anpassung ist nötig, da möglicherweise zwischenzeitlich weitere Aufträge bekannt geworden sein könnten (siehe Online-Scheduling in Abschnitt 5.1.2), die Einfluss auf die Bestimmung der ρ^* -minimalen Anfangsketten haben könnten.

Dieses Verfahren ist eine Heuristik und liefert deswegen nicht immer einen besten Maschinenbelegungsplan. Es berücksichtigt zudem nicht die mögliche nebenläufige Nutzung einer Maschine (siehe Einschränkungen in Abschnitt 5.1.2).

5.2.4. Heuristisches Verfahren 2: Minimierung der Verzögerungskosten der übrigen Aufträge

Sowohl in dem Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 als auch in dem gerade eingeführten heuristischen Verfahren (Abschnitt 5.2.3) wird nach der Anfangskette gesucht, für die der Quotient aus Bearbeitungszeit und Summe der Gewichte minimiert wird (siehe Formeln 5.5

5. Übertragung auf ein Maschinen-Scheduling-Problem

und 5.8). Durch die Einplanung der entsprechenden Aufträge wird das maximale Gewicht pro Zeiteinheit aus der Menge der noch einzuplanenden Aufträge entfernt.

Da nun aber die Aufträge einer Kette nicht immer nahtlos nacheinander ausgeführt werden können und die nebenläufige Nutzung einer Maschine möglich ist, ist nicht klar, welche Konsequenzen so ein Vorgehen für die Aufträge aus den anderen Ketten tatsächlich hat. Aus diesem Grund entwickle ich auch ein alternatives heuristisches Verfahren, bei dem nach der Anfangskette γ_k gesucht wird, deren Einplanung die geringsten Verzögerungskosten für alle anderen Fahrzeuge verursacht.

Definition 5.7 (Verzögerungskosten eines Auftrags). *Die Verzögerungskosten eines Auftrags (γ, v) betragen durch die Einplanung der Anfangskette γ'_k immer $w_{\gamma,v} d_{\gamma,v}^{\gamma'_k}$.*

Durch diese Definition geht nicht immer die gesamte Bearbeitungszeit der eingeplanten Aufträge ein, sondern die aus der Bearbeitung resultierende individuelle Verzögerung aller übrigen Aufträge. Dies bedeutet insbesondere, dass für alle Aufträge aus der Kette, deren erste Aufträge eingeplant werden, keine Verzögerungskosten anfallen. Deshalb kann auch statt der Berechnung der Verzögerungskosten der Aufträge aller anderen Ketten die Verzögerungskosten für alle Fahrzeuge berechnet werden. Dazu wird das Verhältnis $\rho_{\gamma,i}$ erneut umformuliert:

$$\rho_{\gamma,i} = \sum_{\gamma'' \in \Gamma} \sum_{v=1}^{|\gamma''|} w_{\gamma'',v} d_{\gamma'',v}^{\gamma''} \quad (5.9)$$

Die Verzögerungskosten ersetzen damit die Summe der Gewichte. Da die Verzögerungskosten indirekt die Bearbeitungsdauer der eingeplanten Aufträge berücksichtigen, müssen sie nicht mehr in $\rho_{\gamma,i}$ betrachtet werden. Damit $\rho_{\gamma,i}$ weiterhin minimiert werden kann, erscheinen die Verzögerungskosten statt im Nenner nun im Zähler. Somit erlaubt die Formel 5.9 für $\rho_{\gamma,i}$ weiter die Verwendung der Begriffe ρ -minimal und ρ^* -minimal. Streng genommen handelt es sich bei $\rho_{\gamma,i}$ nun nicht mehr um ein Verhältnis. Um aber nicht alle Formulierungen anpassen zu müssen, wird auch diese Variante von $\rho_{\gamma,i}$ weiterhin als Verhältnis bezeichnet. Damit kann das Verfahren aus Abschnitt 5.2.3 (Schritte B.1–B.4) unverändert übernommen werden.

5.2.5. Komplexität

Die heuristischen Verfahren unterscheiden sich in der Definition des Verhältnisses $\rho_{\gamma,i}$ und im Schritt B.2.

Die Anpassung im Schritt B.2 war wegen des Online-Schedulings nötig. Pro Durchlauf wird immer nur noch ein Fahrzeug eingeplant. Dadurch kann sich zwar der tatsächliche Aufwand des Verfahrens erhöhen, aber es ändert sich nicht dessen Komplexitätsklasse. Denn auch beim Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 ist es möglich, dass in jedem Durchlauf immer nur ein Fahrzeug eingeplant wird.

Darüberhinaus hat nur noch die geänderte Berechnung des Verhältnisses $\rho_{\gamma,i}$ Einfluss auf die gesteigerte oder verringerte Komplexität der heuristischen Verfahren.

Komplexität des heuristischen Verfahrens 1

Im Unterschied zum Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 wurde im ersten heuristischen Verfahren (siehe Abschnitt 5.2.3) die Berechnung der Bearbeitungszeit (siehe Formel 5.8) für jede der $O(n^2)$ zu betrachtenden Anfangsketten angepasst. Da der frühestmögliche Auftragsbeginn und die Bearbeitungszeit aller Aufträge einer Kette feststehen, kann auch hier die Berechnung der tatsächlichen Bearbeitungszeit einer Anfangskette vernachlässigt werden. Der Aufwand des ersten heuristischen Verfahrens besitzt demnach die gleiche Komplexität wie das Verfahren aus Abschnitt 5.2.1, nämlich $O(n^2)$.

Komplexität des heuristischen Verfahrens 2

Beim zweiten heuristischen Verfahren (siehe Abschnitt 5.2.4) ist die Berechnung des Verhältnisses $\rho_{\gamma,i}$ aufwändiger. Für jede Anfangskette muss die Verzögerung für jeden anderen, noch nicht eingeplanten Auftrag bestimmt werden. Damit sind für die Berechnung von $\rho_{\gamma,i}$ immer n Operationen nötig. Damit steigt der Gesamtaufwand für das zweite heuristische Verfahren auf $O(n^3)$.

6. Mechanismen

Die Aufgabe einer Kreuzungssteuerungseinheit ist die Vergabe von Überfahrtsrechten an Fahrzeuge³. Die Art der Vergabe bestimmt der von der Kreuzungssteuerungseinheit eingesetzte Mechanismus. In einem wertschätzungssensitiven, intelligenten Verkehrssteuerungssystem (ITC-System) sind diese Mechanismen wertschätzungssensitiv. In diesem Kapitel schlage ich dazu mehrere geeignete Mechanismen vor und bewerte deren Eigenschaften.

6.1. Entwurf der Mechanismen

Beim Entwurf der Mechanismen verfolge ich das Ziel, gute Lösungen für die Vergabe von Überfahrtsrechten zu erzielen, wenn mehrere eigennützige Fahrzeuge miteinander interagieren.

In einem wertschätzungssensitiven ITC-System müssen Kreuzungssteuerungseinheiten und Fahrzeuge miteinander interagieren. Zum einen ist die Wertschätzung der Fahrzeuge nur den Fahrzeugen selbst bekannt. Deswegen sind wertschätzungssensitive Mechanismen darauf angewiesen, dass die Fahrzeuge den Kreuzungssteuerungseinheiten ihre Wertschätzung übermitteln. Zum anderen muss die Kreuzungssteuerungseinheit die Fahrzeuge über ihr Überfahrtsrecht informieren.

6.1.1. Begriffsbestimmung

Ein Mechanismus richtet sich an alle Fahrzeuge aus der sichtbaren Nachbarschaft. Wie in Kapitel 5 bereits diskutiert, bilden Fahrzeuge an einer Kreuzung eine Menge von Ketten. Für jede Aufstellspur gibt es eine Kette. Die Kette enthält alle Fahrzeuge der sichtbaren Nachbarschaft, die die Kreuzung über diese Aufstellspur überqueren werden. Bei der Vergabe der Überfahrtsrechte muss die Reihenfolge innerhalb jeder Kette erhalten bleiben (Anforderung A3). Damit gehört jedes Fahrzeug zu genau einer Kette und besitzt innerhalb der Kette eine bestimmte Position.

Definition 6.1 (Fahrzeug). *Sei Γ die Menge aller Ketten (=Aufstellspuren) einer Kreuzung. (γ, j) beschreibt das j . Fahrzeug, das die Kreuzung über die Kette $\gamma \in \Gamma$ überqueren möchte.*

Um die richtige Reihenfolge der Überquerung innerhalb einer Kette zu gewährleisten, erhalten die Fahrzeuge auch ihre Überfahrtsrechte entsprechend der Position in

³Ich verwende in diesem Kapitel den Begriff „Fahrzeuge“ stellvertretend für die gesamte Fahrer-Fahrzeug-Einheit und stellvertretend für alle übrigen Verkehrsteilnehmer.

6. Mechanismen

ihrer Kette. Damit besteht der erste Teil jeder Kette aus Fahrzeugen, die bereits ein Überfahrtsrecht besitzen, und der zweite Teil jeder Kette aus Fahrzeugen, die noch kein Überfahrtsrecht erhalten haben.

Definition 6.2 (Kandidat). *Ein Fahrzeug der Kette γ wird als Kandidat bezeichnet, wenn es selbst noch kein Überfahrtsrecht besitzt, aber alle Fahrzeuge, die sich vor diesem Fahrzeug in der Kette γ befinden, bereits ein Überfahrtsrecht besitzen. Jede Kette besitzt höchstens einen Kandidaten. c_γ bezeichnet die Position des Kandidaten innerhalb der Kette γ . Falls eine Kette keinen Kandidaten besitzt, so wird $c_\gamma = |\gamma| + 1$ gesetzt.*

Damit gilt, dass alle Fahrzeuge (γ, j) mit $j < c_\gamma$ bereits ein Überfahrtsrecht besitzen. Alle Fahrzeuge (γ, j) mit $j \geq c_\gamma$ besitzen dagegen noch kein Überfahrtsrecht.

Kandidaten sind die einzigen Fahrzeuge, denen ein Mechanismus das nächste freie Überfahrtsrecht zuteilen kann. Unter Umständen können aber Fahrzeuge mit hoher Wertschätzung, die hinter Kandidaten mit geringer Wertschätzung fahren, durch diese unnötig lange aufgehalten werden. Um dies zu vermeiden, erlauben *Mechanismen mit Unterstützung* solchen Fahrzeugen, ihre vorausfahrenden Fahrzeuge zu unterstützen.

Definition 6.3 (unterstützende Fahrzeuge). *Alle Fahrzeuge aus der sichtbaren Nachbarschaft, die sich hinter ihrem Kandidaten in der Kette befinden, also alle Fahrzeuge (γ, j) mit $j > c_\gamma$, werden als unterstützende Fahrzeuge bezeichnet.*

Im Folgenden übertrage ich die Notation des Mechanismenentwurfs aus [Kri02] auf Mechanismen zur Vergabe von Überfahrtsrechten an Fahrzeuge.

\mathcal{N} bezeichnet die Menge aller Fahrzeuge, die sich an einem Mechanismus beteiligen. Da sich nur Fahrzeuge aus der sichtbaren Nachbarschaft beteiligen können, gilt $\mathcal{N} \subseteq \bigcup_{\gamma \in \Gamma} \bigcup_{j=1}^{|\gamma|} (\gamma, j)$. Es gibt damit $N = |\mathcal{N}| \leq \sum_{\gamma \in \Gamma} |\gamma|$ verschiedene Fahrzeuge, die sich an einem Mechanismus beteiligen.

\mathcal{X} ist die Menge aller möglichen Wertschätzungen $\mathcal{X}_{\gamma,j}$ für jedes Fahrzeug $(\gamma, j) \in \mathcal{N}$. Dann bezeichnet $x_{\gamma,j} \in \mathcal{X}_{\gamma,j}$ die Wertschätzung des Fahrzeugs (γ, j) und $\mathbf{x} = (x_{\gamma,j})_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}}$ die Wertschätzungen aller teilnehmenden Fahrzeuge.

\mathcal{B} ist die Menge aller möglichen Nachrichten $\mathcal{B}_{\gamma,j}$ für jedes Fahrzeug $(\gamma, j) \in \mathcal{N}$. Dann bezeichnet $b_{\gamma,j} \in \mathcal{B}_{\gamma,j}$ die Nachricht bzw. das Gebot des Fahrzeugs (γ, j) und $\mathbf{b} = (b_{\gamma,j})_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}}$ die Gebote aller teilnehmenden Fahrzeuge. Ich schreibe kurz $\mathbf{b} \in \mathcal{B}$, um auszudrücken, dass für alle $b_{\gamma,j}$ gilt: $b_{\gamma,j} \in \mathcal{B}_{\gamma,j}$.

Δ bezeichnet dabei die Menge der Wahrscheinlichkeitsverteilungen über der Menge aller teilnehmenden Fahrzeuge: $\forall \delta = (\delta_{\gamma,j})_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}} \in \Delta$ gilt: $\delta_{\gamma,j} \in [0; 1]$ und $\sum_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}} \delta_{\gamma,j} = 1$.

Ich verwende einen negativen Index bei einer Menge bzw. einem Vektor, um auszudrücken, dass die Menge bzw. der Vektor aus allen Elementen außer dem im Index angegebenen Element besteht.

Zum Beispiel bezeichnet $\mathbf{b}_{-\gamma^*,j} = (b_{\gamma,j})_{(\gamma,j) \in \mathcal{N} \setminus \{(\gamma^*,i)\}}$ die Gebote aller teilnehmenden Fahrzeuge außer dem Fahrzeug (γ^*, i) . Es gilt dann auch $\mathbf{b} = (b_{\gamma^*,i}, \mathbf{b}_{-\gamma^*,i})$.

Ein Mechanismus besteht unter anderem aus einer Allokations- und einer Zahlungsregel.

Definition 6.4 (Allokationsregel). Eine Allokationsregel (engl. allocation rule) $\pi: \mathcal{B} \rightarrow \Delta$ ist eine Funktion, die bei gegebenen Geboten \mathbf{b} für jedes Fahrzeug (γ, j) die Wahrscheinlichkeit $\pi_{\gamma,j}(\mathbf{b})$ bestimmt, dass es das nächste freie Überfahrtsrecht erhält.

Definition 6.5 (Zahlungsregel). Eine Zahlungsregel (engl. payment rule) $\mu: \mathcal{B} \rightarrow \mathbb{R}^N$ ist eine Funktion, die bei gegebenen Geboten \mathbf{b} für jedes Fahrzeug (γ, j) die erwartete Zahlung $\mu_{\gamma,j}(\mathbf{b})$ bestimmt.

Damit lässt sich nun der Begriff Mechanismus definieren, wie ich ihn in dieser Arbeit verwende.

Definition 6.6 (Mechanismus). Ein Mechanismus ist ein Tripel (\mathcal{B}, π, μ) und besteht aus der Menge aller möglichen Nachrichten \mathcal{B} , einer Allokationsregel π und einer Zahlungsregel μ . Ein direkter Mechanismus ist ein Mechanismus, bei dem ausschließlich Wertschätzungen als Nachrichten erlaubt sind. In diesem Fall gilt $\mathcal{B} = \mathcal{X}$.

6.1.2. Annahmen

Beim Entwurf der Mechanismen gehe ich davon aus, dass sich alle Fahrzeuge rational verhalten (Annahme 13: *Rationales Verhalten der Fahrzeuge*), dass alle Fahrzeuge versuchen, ihren Nutzen zu maximieren (Annahme 14: *Nutzenmaximierung der Fahrzeuge*), dass sich alle Fahrzeuge risikoneutral verhalten (Annahme 15: *Risikoneutralität der Fahrzeuge*), dass sie über ein ausreichendes Budget verfügen (Annahme 16: *Ausreichendes Budget der Fahrzeuge*), dass die Wertschätzung der Fahrzeuge unabhängig verteilt ist (Annahme 17: *Unabhängige Verteilung der Wertschätzung der Fahrzeuge*) und dass die Verteilung der Wertschätzung für alle Fahrzeuge gleich ist (Annahme 18: *Gleiche Verteilung der Wertschätzung der Fahrzeuge*). Dies sind alles klassische Annahmen aus dem Mechanismenentwurf [Par01, Kri02].

Ein Fahrzeug, das sich *risikoneutral* verhält, möchte ausschließlich seinen erwarteten Profit maximieren. Dies impliziert eine quasilineare Nutzenfunktion.

Definition 6.7 (quasilineare Nutzenfunktion). Eine quasilineare Nutzenfunktion eines Fahrzeugs (γ, j) hat die Form: $u_{\gamma,j}(\mathbf{b}, \pi, \mu) = \pi_{\gamma,j}(\mathbf{b})x_{\gamma,j} - \mu_{\gamma,j}(\mathbf{b})$.

Der erwartete Nutzen eines Fahrzeugs ist demnach das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit, dass es das nächste freie Überfahrtsrecht erhält, und seiner Wertschätzung für das nächste freie Überfahrtsrecht abzüglich seiner erwarteten Zahlung.

6.1.3. Wünschenswerte Eigenschaften

Beim Entwurf eines Mechanismus können verschiedene Ziele im Vordergrund stehen: Zum einen, kann die *Maximierung des erwarteten Gewinns* das Ziel sein. In diesem Fall steht der Nutzen des Verkäufers im Vordergrund.

Steht jedoch der Nutzen der Gesellschaft im Vordergrund, so kann das Entwurfsziel auch die allokativen Effizienz sein [Kri02].

6. Mechanismen

Definition 6.8 (Allokative Effizienz). *Eine Allokationsregel π^* ist allokativ effizient (engl. allocative efficient), wenn sie die Wohlfahrt maximiert. Ein Mechanismus ist allokativ effizient, wenn er eine allokativ effiziente Allokationsregel verwendet.*

Die Wohlfahrt kann wie folgt definiert werden:

Definition 6.9. *Die Wohlfahrt $W(\mathbf{x})$ (engl. social welfare) ist die Summe der mit der Allokationswahrscheinlichkeit gewichteten Wertschätzungen der einzelnen Fahrzeuge: $W(\mathbf{x}) = \sum_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}} \pi_{\gamma,j}(\mathbf{x}) x_{\gamma,j}$.*

In diesem Fall vergibt ein allokativ effizienter Mechanismus ein Überfahrtsrecht an das Fahrzeug mit der höchsten Wertschätzung für das Überfahrtsrecht. Ein allokativ effizienter Mechanismus maximiert jedoch nicht immer den erwarteten Gewinn der Kreuzung.

Da für eine Straßenkreuzung im Allgemeinen der Steuerzahler aufkommt, ist das Entwurfsziel bei den in dieser Arbeit entwickelten Mechanismen die allokativ Effizienz. In zukünftigen privat finanzierten Straßenbauprojekten könnte jedoch auch die Maximierung des erwarteten Gewinns angestrebt werden.

Eine schwächere Form der allokativen Effizienz ist die sogenannte Pareto-Effizienz.

Definition 6.10 (Pareto-Effizienz). *Eine Allokationsregel π^* ist pareto-effizient, wenn es für jede andere Allokationsregel π , die einem Fahrzeug mehr nützt als die bisherige, immer ein anderes Fahrzeug gibt, dem die bisherige Allokation mehr nützt: $\pi_{\gamma,j}(\mathbf{b}) x_{\gamma,j} > \pi_{\gamma',j}^*(\mathbf{b}) x_{\gamma',j} \Rightarrow \exists (\gamma', i) \in \mathcal{N} : \pi_{\gamma',i}(\mathbf{b}) x_{\gamma',i} < \pi_{\gamma',i}^*(\mathbf{b}) x_{\gamma',i}$. Ein Mechanismus ist pareto-effizient, wenn er eine pareto-effiziente Allokationsregel verwendet.*

Daneben gibt es weitere wünschenswerte Eigenschaften. In jedem Fall sollen Teilnehmer durch einen Mechanismus nicht abgeschreckt werden. Dies gewährleistet die individuelle Rationalität.

Definition 6.11 (Individuelle Rationalität). *Ein Mechanismus ist individuell rational (engl. individually rational), wenn jeder Käufer durch die Teilnahme am Mechanismus einen größeren oder gleichen Nutzen erwartet, als wenn er nicht teilnimmt [DJP03].*

Ein Mechanismus, bei dem Einnahmen und Auszahlungen im Gleichgewicht sind, bezeichnet man als streng budget-balanciert.

Definition 6.12 (Budget-Balancierung). *Ein Mechanismus ist streng budget-balanciert (engl. strictly budget-balanced), wenn für alle $\mathbf{b} \in \mathcal{B}$ gilt: $\sum_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}} \mu_{\gamma,j}(\mathbf{b}) = 0$. Ein Mechanismus ist schwach budget-balanciert (engl. weakly budget-balanced), wenn für alle \mathbf{b} gilt: $\sum_{(\gamma,j) \in \mathcal{N}} \mu_{\gamma,j}(\mathbf{b}) \geq 0$.*

Ein schwach budget-balancierter Mechanismus benötigt also keine Zuwendungen von Außenstehenden, da keine Verluste erwartet werden. Bei einem streng budget-balancierten Mechanismus wird zusätzlich erwartet, dass alle Einnahmen auch wieder ausgezahlt werden. Das bedeutet insbesondere, dass Außenstehende aus dem System keinen Gewinn abschöpfen können.

Die Anreizkompatibilität ist eine wichtige Eigenschaft von direkten Mechanismen.

Definition 6.13 (Anreizkompatibilität). *Ein Mechanismus ist anreizkompatibel (engl. incentive compatible), wenn für jedes Fahrzeug (γ, j) und jedes mögliche Gebot $b_{\gamma,j} \in \mathcal{B}_{\gamma,j}$ gilt: $u_{\gamma,j}((x_{\gamma,j}, \mathbf{x}_{-\gamma,j}), \pi, \mu) \geq u_{\gamma,j}((b_{\gamma,j}, \mathbf{x}_{-\gamma,j}), \pi, \mu)$ [Kri02].*

In anderen Worten ist ein direkter Mechanismus anreizkompatibel, wenn ein Teilnehmer – unter der Voraussetzung, dass alle übrigen Teilnehmer ihre wahre Wertschätzung preisgeben – seinen erwarteten Nutzen maximiert, indem er ebenfalls seine wahre Wertschätzung preisgibt.

6.2. Erstpreisauktion und Zweitpreisauktion

Mechanismen können sowohl für die initiale Zeitslotallokation als auch für die optimierende Zeitslotallokation eingesetzt werden.

Definition 6.14 (Initiale Zeitslotallokation). *Bei der initialen Zeitslotallokation konkurrieren Fahrzeuge, die noch kein Überfahrtsrecht besitzen, um das nächste freie Überfahrtsrecht für Kandidaten.*

Definition 6.15 (Optimierende Zeitslotallokation). *Bei der optimierenden Zeitslotallokation versuchen Fahrzeuge, die bereits ein Überfahrtsrecht besitzen, aber die Kreuzung noch nicht überquert haben, also alle Fahrzeuge (γ, i) mit $i < c_\gamma$, ihren Nutzen weiter zu vergrößern.*

Auktionen werden häufig verwendet, wenn die Wertschätzung der Teilnehmer nicht im Voraus bekannt ist [Kri02]. Dies gilt für die Wertschätzung der Fahrzeuge, die eine Kreuzung überqueren möchten. Um den Kommunikationsaufwand gering zu halten, betrachte ich vor allem Auktionsformate, bei denen die Gebote einmalig und verdeckt übermittelt werden. Die klassischen Vertreter solcher Auktionsformate sind die Erstpreisauktion und die Zweitpreisauktion.

Im Folgenden beschreibe ich, wie ich die Erstpreisauktion und die Zweitpreisauktion für die initiale Zeitslotallokation einsetze. Da in diesem Fall nur der Kandidat einer Kette das nächste freie Überfahrtsrecht erhalten kann, verwende ich die Bezeichnung π_γ für die Wahrscheinlichkeit, dass die Kette γ bzw. der Kandidat (γ, c_γ) das nächste freie Überfahrtsrecht erhält. Die erwartete Zahlung eines Fahrzeuges (γ, j) beschreibt dann $\mu_{\gamma,j}$.

6.2.1. Erstpreisauktion

Bei der *Erstpreisauktion* werden alle Kandidaten aufgefordert, ein Gebot für das nächste freie Überfahrtsrecht abzugeben. Die Kandidaten geben ein verdecktes Gebot ab. Der Kandidat mit dem höchsten Gebot erhält das nächste freie Überfahrtsrecht und bezahlt den gebotenen Preis. Falls mehrere Kandidaten das höchste Gebot abgeben, so erhält jeder dieser Kandidaten das nächste freie Überfahrtsrecht mit der gleichen Wahrscheinlichkeit.

Formel 6.1 beschreibt die Allokationsregel und Formel 6.2 die Zahlungsregel für die Erstpreisauktion.

$$\pi_\gamma(\mathbf{b}) = \begin{cases} \frac{1}{\left| \arg \max_{\gamma' \in \Gamma} b_{\gamma', c_{\gamma'}} \right|} & , \text{ wenn } b_{\gamma, c_\gamma} = \max_{\gamma' \in \Gamma} b_{\gamma', c_{\gamma'}} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.1)$$

$$\mu_{\gamma, j}(\mathbf{b}) = \begin{cases} \pi_\gamma(\mathbf{b}) b_{\gamma, c_\gamma} & , \text{ wenn } j = c_\gamma \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.2)$$

6.2.2. Zweitpreisauktion

Die *Zweitpreisauktion* oder Vickreyauction [Vic61] unterscheidet sich von der Erstpreisauktion nur in der Zahlungsregel. Anstatt das eigene, höchste Gebot bezahlen zu müssen, muss bei der Zweitpreisauktion der Kandidat, der das nächste freie Überfahrtsrecht erhält, nur das zweithöchste Gebot bezahlen.

Bei der Zweitpreisauktion gilt damit dieselbe Allokationsregel wie für die Erstpreisauktion (Formel 6.1). Formel 6.3 beschreibt die Zahlungsregel für die Zweitpreisauktion.

$$\mu_{\gamma, j}(\mathbf{b}) = \begin{cases} \pi_\gamma(\mathbf{b}) \max_{\gamma' \in \Gamma \setminus \{\gamma\}} b_{\gamma', c_{\gamma'}} & , \text{ wenn } j = c_\gamma \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.3)$$

6.2.3. Erstpreisauktion mit Unterstützung

Um unterstützenden Fahrzeugen die Möglichkeit zu geben, die Vergabe der Überfahrtsrechte an Kandidaten zu beeinflussen, kann die Erstpreisauktion wie folgt erweitert werden. Bei der *Erstpreisauktion mit Unterstützung* können auch unterstützende Fahrzeuge ein Gebot abgeben. Damit nehmen alle Fahrzeuge aus der sichtbaren Nachbarschaft teil, die noch kein Überfahrtsrecht besitzen. Die Gebote der unterstützenden Fahrzeuge stellen den Betrag dar, den sie zu zahlen bereit sind, um das Gebot des Kandidaten aufzustocken, der die Kreuzung über dieselbe Aufstellspur wie sie selbst überqueren möchte. Die Gebote des Kandidaten und seiner unterstützenden Fahrzeuge werden aufsummiert. Es erhält der Kandidat mit dem höchsten akkumulierten Gebot das nächste freie Überfahrtsrecht. Falls mehrere Kandidaten das höchste akkumulierte Gebot abgeben, so erhält jeder dieser Kandidaten das nächste freie Überfahrtsrecht mit der gleichen Wahrscheinlichkeit.

Diese Allokationsregel beschreibt Formel 6.4. Der Kandidat, der das nächste freie Überfahrtsrecht erhält, und die Fahrzeuge, die ihn unterstützt haben, bezahlen jeweils ihr eigenes Gebot. Diese Zahlungsregel beschreibt Formel 6.5.

$$\pi_\gamma(\mathbf{b}) = \begin{cases} \frac{1}{\left| \arg \max_{\gamma' \in \Gamma} \sum_{j=c_{\gamma'}}^{|\gamma'|} b_{\gamma', j} \right|} & , \text{ wenn } \sum_{j=c_\gamma}^{|\gamma|} b_{\gamma, j} = \max_{\gamma' \in \Gamma} \sum_{j=c_{\gamma'}}^{|\gamma'|} b_{\gamma', j} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\mu_{\gamma,j}(\mathbf{b}) = \begin{cases} \pi_{\gamma}(\mathbf{b})b_{\gamma,j} & , \text{ wenn } j \geq c_{\gamma} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.5)$$

6.2.4. Zweitpreisauktion mit Unterstützung

Die *Zweitpreisauktion mit Unterstützung* unterscheidet sich von der Erstpreisauktion mit Unterstützung ebenfalls nur durch die Zahlungsregel. Bei der Zweitpreisauktion mit Unterstützung gilt deshalb dieselbe Allokationsregel wie für die Erstpreisauktion mit Unterstützung (Formel 6.4). Das Gebot der Kandidaten und der unterstützenden Fahrzeuge entspricht dem maximalen Betrag, den sie zu zahlen bereit sind. Der Kandidat, der das nächste freie Überfahrtsrecht erhält, teilt sich das zweithöchste akkumulierte Gebot mit seinen unterstützenden Fahrzeugen. Dabei bezahlt jedes dieser Fahrzeuge den relativen Anteil am zweithöchsten akkumulierten Gebot, den sein Gebot $b_{\gamma,j}$ am gemeinsamen, höchsten akkumulierten Gebot $\sum_{j=c_{\gamma}}^{|\gamma|} b_{\gamma,j}$ hat. Diese Zahlungsregel beschreibt die Formel 6.6.

$$\mu_{\gamma,j}(\mathbf{b}) = \begin{cases} \pi_{\gamma}(\mathbf{b}) \frac{b_{\gamma,j}}{\sum_{i=c_{\gamma}}^{|\gamma|} b_{\gamma,i}} \max_{\gamma' \in \Gamma \setminus \{\gamma\}} \sum_{i=c_{\gamma'}}^{|\gamma'|} b_{\gamma',i} & , \text{ wenn } j \geq c_{\gamma} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.6)$$

Sofern nicht explizit anders gesagt, bezeichnet in den folgenden Kapiteln der Begriff *Initiale Zeitslotauktion* (ITSA Valuation) die Zweitpreisauktion mit Unterstützung.

6.2.5. Eigenschaften

Die Erstpreisauktion und die Zweitpreisauktion sind individuell rational [Kri02].

Falls die eigene Wertschätzung nur dem Fahrzeug selbst bekannt ist, so ist die Zweitpreisauktion ohne Unterstützung anreizkompatibel. Dies gilt jedoch nicht für die Erstpreisauktion ohne Unterstützung [Kri02].

Sowohl Zweitpreisauktion mit Unterstützung als auch Erstpreisauktion mit Unterstützung sind nicht anreizkompatibel, da z. B. Fahrzeuge hinter einem Kandidaten verleitet werden, weniger als ihre wahre Wertschätzung zu bieten, um einen geringeren Anteil bezahlen zu müssen.

Betrachtet man ausschließlich Fahrzeuge, so sind Erstpreisauktion und Zweitpreisauktion (mit und ohne Unterstützung) nur schwach budget-balanciert: Da $\pi_{\gamma}(\mathbf{b})$ eine Wahrscheinlichkeit beschreibt, ist $\pi_{\gamma}(\mathbf{b})$ immer nichtnegativ (siehe Formeln 6.1 und 6.4). Da alle vier betrachteten Auktionsformate direkte Mechanismen sind, sind auch alle Gebote nichtnegativ. Das bedeutet, dass auch Produkte und Summen aus nichtnegativen Werten wiederum nichtnegativ sind. Insbesondere sind damit auch alle Zahlungen nichtnegativ (siehe Formeln 6.2, 6.3, 6.5 und 6.6). Da jedoch auch positive Zahlungen vorkommen können, fließt ein Gewinn an die Kreuzung. Damit sind Erstpreisauktion und Zweitpreisauktion (mit und ohne Unterstützung) nur schwach budget-balanciert.

Nach [Kri02] kann man durch einen *Reservationspreis* (engl. *reserve price*) den erwarteten Gewinn bei einer Erstpreisauktion und bei einer Zweitpreisauktion erhöhen. Aus

diesem Grund maximieren die Erstpreisauktion und die Zweitpreisauktion ohne Reservationspreis nicht den erwarteten Gewinn.

Betrachtet man ausschließlich die Durchführung einer einzelnen Auktion, bei der Kandidaten um das nächste freie Überfahrtsrecht konkurrieren, so sind Erstpreisauktion und Zweitpreisauktion ohne Unterstützung allokativ effizient und damit auch pareto-effizient [Kri02].

6.3. Verzögerungskostenminimierung

Eine Alternative zu den klassischen Auktionsformaten Erstpreis- und Zweitpreisauktion, stellt der von mir entwickelte Mechanismus *Verzögerungskostenminimierung* (ITSA Delay Cost) dar. Die Allokation entspricht dabei dem in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen heuristischen Verfahren zur Minimierung der Verzögerungskosten der übrigen Aufträge.

6.3.1. Allokationsregel

Anstatt dem Kandidaten, dessen Gebot inklusive Unterstützungsgebote am höchsten ist, das nächste freie Überfahrtsrecht zu gewähren, erhält der Kandidat das nächste freie Überfahrtsrecht, der durch die Zuteilung des nächsten freien Überfahrtsrechts bei allen anderen Fahrzeugen in Summe die geringsten Verzögerungskosten verursacht. Falls mehrere solcher Kandidaten existieren, erhält jeder dieser Kandidaten das nächste freie Überfahrtsrecht mit der gleichen Wahrscheinlichkeit. Diese Allokationsregel beschreibt Formel 6.7.

Sei C_{min} die Menge aller Kandidaten, die bei allen anderen Fahrzeugen in Summe die geringsten Verzögerungskosten verursachen:

$$C_{min} = \arg \min_{\gamma' \in \Gamma} \sum_{\gamma'' \in \Gamma} \sum_{j=c_{\gamma''}}^{|\gamma''|} b_{\gamma'',j} d_{\gamma'',j}^{\gamma'} \\ \pi_{\gamma}(\mathbf{b}) = \begin{cases} \frac{1}{|C_{min}|} & , \text{wenn } \gamma \in C_{min} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad (6.7)$$

6.3.2. Zahlungsregel

Die Position des Fahrzeuges in einer bestimmte Kette spielt für die Definition der Zahlungsregel der Verzögerungskostenminimierung keine Rolle. Um die Lesbarkeit der Definitionen und Formeln zu erleichtern, verwende ich deswegen im Folgenden einfache Indizes zur Bezeichnung der Fahrzeuge in der sichtbaren Nachbarschaft. In diesem Fall bezeichnet \mathbf{N} die Menge aller Fahrzeuge, die sich in der sichtbaren Nachbarschaft befinden, und $N = |\mathbf{N}|$ die Anzahl aller Fahrzeuge, die sich in der sichtbaren Nachbarschaft befinden.

6. Mechanismen

Im Gegensatz zu vielen anderen Szenarien entstehen bei der Vergabe von Zeitslots an einen Verkehrsteilnehmer im Allgemeinen Verzögerungskosten für die anderen Verkehrsteilnehmer. Dem Verkehrsteilnehmer, der den nächsten Zeitslot erhält, entstehen keine Verzögerungskosten. Der Nutzen eines Verkehrsteilnehmers entsteht also dadurch, dass ein Verkehrsteilnehmer keine Verzögerungskosten erfährt, wenn er den nächsten Zeitslot erhält.

Aus diesem Grund verwende ich für die Verzögerungskostenminimierung die folgende Definition der Wohlfahrt:

Definition 6.16 (Wohlfahrt). *Die Wohlfahrt $W(\mathbf{x})$ ist die negative Summe der Verzögerungskosten, die allen Fahrzeugen der sichtbaren Nachbarschaft entstehen, wenn die beteiligten Fahrzeuge $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ bieten:*

$$W(\mathbf{x}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^N x_i d_i^j$$

Falls das Fahrzeug k als Gebot $b_k = 0$ bietet und alle übrigen Fahrzeuge $j \neq k$ ihre wahre Wertschätzung x_j bieten, so erhält man die Wohlfahrt $W(0, \mathbf{x}_{-k})$:

$$W(0, \mathbf{x}_{-k}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(0, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j \quad (6.8)$$

$W_{-k}(\mathbf{x})$ bezeichnet die Wohlfahrt aller Fahrzeuge, wenn man die Verzögerungskosten des Fahrzeugs k unberücksichtigt lässt:

$$W_{-k}(\mathbf{x}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(\mathbf{x}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j \quad (6.9)$$

Damit lässt sich die Zahlungsregel für die Verzögerungskostenminimierung nun wie folgt definieren:

$$\mu_k(\mathbf{x}) = \begin{cases} W(0, \mathbf{x}_{-k}) - W_{-k}(\mathbf{x}) & , \text{ wenn das Fahrzeug } k \text{ den Zeitslot bekommt} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (6.10)$$

6.3.3. Eigenschaften

Die Verzögerungskostenminimierung ist allokativ effizient (siehe Definition 6.8), weil die verwendete Allokationsregel $\pi(\mathbf{x})$ (Formel 6.7) die geringsten Verzögerungskosten verursacht. Damit maximiert die Verzögerungskostenminimierung die Wohlfahrt.

Die Zahlungsregel entspricht der Zahlungsregel des Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Mechanismus für einen allokativ effizienten Mechanismus [Kri02]. Daraus folgt, dass die

6. Mechanismen

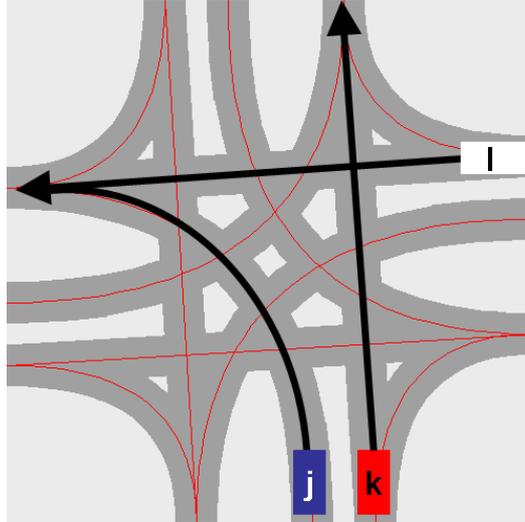


Abbildung 6.1.: Beispiel für die Bildung von Koalitionen

Verzögerungskostenminimierung individuell rational ist: Durch die Teilnahme am Mechanismus muss ein Fahrzeug höchstens so viel bezahlen, wie sich sein Nutzen verringert, wenn es auf die Teilnahme verzichtet. Aus den Eigenschaften des VCG-Mechanismus folgt ebenfalls, dass die Verzögerungskostenminimierung anreizkompatibel ist [Kri02]. Beides zeige ich in Anhang A. Darüberhinaus zeige ich dort, dass die Verzögerungskostenminimierung zudem noch schwach budget-balanciert ist.

6.3.4. Bildung von Koalitionen

Dieser Mechanismus ermöglicht damit indirekt die Bildung von Koalitionen (engl. *coalition forming*). Fahrzeuge aus verschiedenen eingehenden Spuren, die sich nicht gegenseitig behindern, können gegebenenfalls eine Zuteilung an Fahrzeuge verhindern, die diese Fahrzeuge verzögern würden.

Beispiel 6.1. Bei der Kreuzung aus Abbildung 6.1 möchte Fahrzeug (γ, j) mit Wertschätzung $x_{\gamma, j} = 5$ auf der linken Spur aus Süden kommend links (nach Westen) abbiegen. Fahrzeug (γ', k) möchte mit Wertschätzung $x_{\gamma', k} = 4$ auf der rechten Spur aus Süden kommend geradeaus (nach Norden) fahren. Fahrzeug (γ'', l) möchte mit Wertschätzung $x_{\gamma'', l} = 8$ auf der rechten Spur von Osten kommend geradeaus (nach Westen) fahren. Alle drei Fahrzeuge könnten die Kreuzung sofort überqueren. Fahrzeug (γ, j) und Fahrzeug (γ', k) stehen nicht miteinander in Konflikt: $d_{\gamma, j}^{\gamma', k} = d_{\gamma', k}^{\gamma, j} = 0$. Eine Vergabe des nächsten freien Überfahrtsrechts an Fahrzeug (γ'', l) würde jedoch die beiden anderen Fahrzeuge um 3 Sekunden verzögern: $d_{\gamma, j}^{\gamma'', l} = d_{\gamma', k}^{\gamma'', l} = 3$. Umgekehrt würde eine Zuteilung an Fahrzeug (γ, j) oder (γ', k) Fahrzeug (γ'', l) ebenfalls um 3 Sekunden verzögern: $d_{\gamma'', l}^{\gamma, j} = d_{\gamma'', l}^{\gamma', k} = 3$.

6. Mechanismen

Bei einer Erst- oder Zweitpreisauktion erhält Fahrzeug (γ'', l) das nächste freie Überfahrtsrecht. Die übrigen Fahrzeuge erhalten jeweils ein um 3 Sekunden verzögertes Überfahrtsrecht. Die gesamten Verzögerungskosten betragen dann $3 * x_{\gamma, j} + 3 * x_{\gamma', k} = 3 * 5 + 3 * 4 = 27$.

Im Falle der Verzögerungskostenminimierung betragen die Verzögerungskosten bei Vergabe an Fahrzeug (γ, j) oder (γ', k) jeweils $3 * x_{\gamma'', l} = 3 * 8 = 24$. Damit erhält jedes der beiden Fahrzeuge das nächste freie Überfahrtsrecht mit der Wahrscheinlichkeit 0,5.

Angenommen das Fahrzeug (γ, j) erhält zunächst das freie Überfahrtsrecht. Anschließend findet eine neue Vergabe statt, an der nur noch Fahrzeug (γ', k) und Fahrzeug (γ'', l) teilnehmen. Der nächste freie Zeitslot für Fahrzeug (γ', k) ist zeitgleich mit dem Zeitslot von Fahrzeug (γ, j) . Der nächste freie Zeitslot für Fahrzeug (γ'', l) beginnt erst, nachdem Fahrzeug (γ, j) die Kreuzung bereits überquert hat, also 3 Sekunden später. Aus diesem Grund verursacht die Vergabe des nächsten freien Überfahrtsrecht an Fahrzeug (γ', k) keine zusätzlichen Verzögerungskosten bei Fahrzeug (γ'', l) und umgekehrt. Das heißt, jedes der beiden übrigen Fahrzeuge erhält das nächste freie Überfahrtsrecht mit der Wahrscheinlichkeit 0,5. Abschließend erhält das letzte Fahrzeug das nächste freie Überfahrtsrecht.

Das bedeutet, dass bei der Verzögerungskostenminimierung die Fahrzeuge (γ, j) und (γ', k) das frühere Überfahrtsrecht erhalten, obwohl ihre Wertschätzung jeweils geringer ist als die Wertschätzung des Fahrzeugs (γ'', l) . Dies entspricht der Idee einer Koalition von Fahrzeugen mit gemeinsamen Interessen. In diesem Fall besteht das gemeinsame Interesse, die Zuteilung an Fahrzeug (γ'', l) zu verhindern, wodurch sich die gesamten Verzögerungskosten verringern.

6.3.5. Varianten

Das Prinzip der Vermeidung der Verzögerungskosten aller beteiligter Fahrzeuge kann man auch auf andere Optimierungskriterien übertragen.

In [PSB11] wird statt der Verzögerungskosten der zusätzliche Kraftstoffverbrauch betrachtet. Damit erhält das Fahrzeug den nächsten freien Zeitslot, das für die übrigen Fahrzeuge den minimalen zusätzlichen Kraftstoffverbrauch bedeutet. Der entsprechende Mechanismus wird im Folgenden als *Kraftstoffverbrauchsminimierung* (ITSA Fuel Consumption) bezeichnet.

Auch in Szenarien, bei denen die Wertschätzung keine Rolle spielt, kann statt der Verzögerungskosten die Verzögerung, also die ungewichtete Wartezeit, verwendet werden (ITSA Delay) [PSB11]. In diesem Fall erhält das Fahrzeug den nächsten freien Zeitslot, welches für die übrigen Fahrzeuge die geringste zusätzliche Wartezeit verursacht.

6.4. Zeitslottausch

Die bisher beschriebenen Mechanismen verschaffen Fahrerassistenzagenten einen ersten Zeitslot, mit dem sie eine Kreuzung überqueren können. Diese Mechanismen gehören zur initialen Allokation. Der Mechanismus Zeitslottausch (engl. *Time-Slot Exchange*, TSE) beschreibt, wie Fahrerassistenzagenten, die bereits einen Zeitslot erhalten haben,

diesen mit anderen Fahrzeugen tauschen können. Damit gehört der Zeitslottausch zur optimierenden Allokation. Der Zeitslottausch wurde zunächst im Rahmen von DAMAST in einer Diplomarbeit [For06b] vorgeschlagen und in [SBF07, SBF08] weiterentwickelt.

Ein Fahrerassistenzagent, der einen späteren Zeitslot besitzt, kann anderen Fahrerassistenzagenten, die einen früheren Zeitslot besitzen, Geld für einen Tausch der Zeitslots anbieten. Stimmt der andere Fahrerassistenzagent zu, so gibt dieser seinen früheren Zeitslot ab und erhält dafür die Bezahlung und den späteren Zeitslot.

Beispiel 6.2. *Angenommen zwei Fahrerassistenzagenten könnten grundsätzlich ihre Zeitslots tauschen. Der Zeitslot des einen Fahrerassistenzagenten ermöglicht die Überquerung der Kreuzung 12 Sekunden früher als der Zeitslot des anderen Fahrerassistenzagenten. Wenn der Fahrerassistenzagent mit dem späteren Zeitslot $0,01\text{€}$ pro gesparter Sekunde anbietet und der Tausch stattfindet, so muss er $0,01\text{€} \cdot 12 = 0,12\text{€}$ bezahlen.*

6.4.1. Ablauf

Zusätzlich zum Kreuzungsagenten wird ein sogenannter Tauschagent benötigt. Der Tauschagent vermittelt Tauschanfragen an passende Fahrerassistenzagenten.

Die Tauschanfrage eines Fahrerassistenzagenten enthält den eigenen Zeitslot, den frühesten Zeitpunkt bis zu dem ein eingetauschter Zeitslot noch verwendet werden könnte, den Preis, den der Fahrerassistenzagent für jede gesparte Sekunde zu bezahlen bereit wäre und die innere eingehende Kreuzungsspur, auf der sich das Fahrzeug des Fahrerassistenzagenten der Kreuzung nähert.

Der früheste Zeitpunkt, bis zu dem ein getauschter Zeitslot noch verwendet werden könnte, muss übertragen werden, da der Fahrerassistenzagent zu frühe Zeitslots nicht wahrnehmen kann, da das zugehörige Fahrzeug nicht rechtzeitig die Kreuzung erreicht. Der Fahrerassistenzagent muss diese Information jedes Mal neu bestimmen, wenn er eine Tauschanfrage stellt, da der Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug die Kreuzung erreicht, von der aktuellen Geschwindigkeit und dem Abstand zur Kreuzung abhängt.

Nachdem der Tauschagent eine Tauschanfrage erhalten hat, fordert er eine Liste aller Tauschkandidaten beim Kreuzungsagenten an. Der Kreuzungsagent kennt alle bisher vergebenen Zeitslots und kann alle Fahrzeuge mit entsprechenden Zeitslots bestimmen. Er gibt jedoch nicht eine Liste aller dieser Fahrzeuge zurück, sondern entfernt aus der Liste zuvor alle Tauschkandidaten, deren Zeitslots nicht mit dem anfragenden Fahrzeug getauscht werden können (siehe Abschnitt 6.4.2).

Anschließend kontaktiert der Tauschagent alle Tauschkandidaten. Er beginnt mit dem Tauschkandidaten, der den frühesten, aber noch geeigneten Zeitslot besitzt. Abhängig von seiner Wertschätzung wägt der Fahrerassistenzagent ab, ob die angebotene Entschädigung für die durch den Tausch erhöhte Wartezeit ausreicht. Falls ja, so stimmt er dem Tausch zu. Falls nicht, lehnt er ab. In diesem Fall kontaktiert der Tauschagent das nächste Fahrzeug auf seiner Liste.

6.4.2. Tauschbedingungen

Fahrzeuge können sich nicht gegenseitig überholen, während sie auf eine Kreuzung zufahren. Aus diesem Grund muss sowohl der Fahrerassistenzagent, der die Tauschanfrage stellt, als auch jeder Tauschkandidat, der einem Tausch zustimmen möchte, zusätzlich die zwei folgenden Bedingungen beachten:

1. Der neue Zeitslot, den der Fahrerassistenzagent erhalten würde, muss später als der Zeitslot des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs beginnen.
2. Der neue Zeitslot, den der Fahrerassistenzagent erhalten würde, muss früher als der Zeitslot des direkt hinter ihm fahrenden Fahrzeugs beginnen, sofern das dahinter liegende Fahrzeug bereits einen Zeitslot besitzt.

Ansonsten würde der Tausch nicht am Tausch beteiligte Fahrzeuge beeinträchtigen, da diese ihren Zeitslot unter Umständen nicht nutzen könnten. Die beiden Bedingungen garantieren, dass keine unbeteiligten Fahrzeuge beeinträchtigt werden.

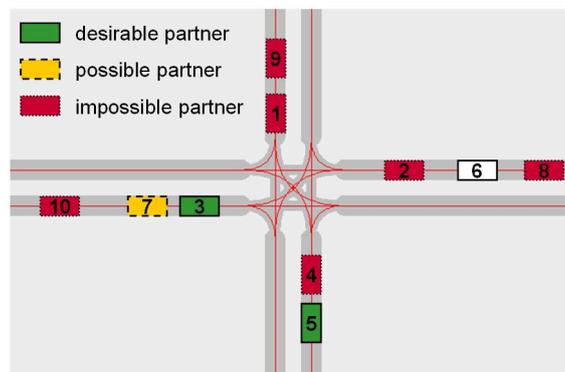


Abbildung 6.2.: Tauschpartner des Fahrzeugs 6 [SBF08]

In Abbildung 6.2 ist ein Kreuzungsszenario dargestellt, in dem das Fahrzeug 6 eine Tauschanfrage stellt. In diesem Beispiel entspricht die Nummer des Fahrzeugs der Reihenfolge, in der die Fahrzeuge momentan die Kreuzung überqueren würden. Dabei werden unmögliche Tauschpartner (engl. *impossible partner*); mögliche, aber unerwünschte Tauschpartner (engl. *possible partner*) und wünschenswerte Tauschpartner (engl. *desirable partner*) unterschieden.

Ein Tausch mit den Fahrzeugen aus der eigenen Richtung (Fahrzeuge 2 und 8) ist grundsätzlich nicht möglich, da Fahrzeuge sich nicht überholen können. Zeitslots kleiner als 2 kommen für einen Tausch nicht in Frage. Andernfalls müsste das anfragende Fahrzeug das direkt vor ihm fahrende Fahrzeug überholen können, um den frühen Zeitslot zu nutzen. Zeitslots größer als 8 kommen nicht in Frage, weil nach einem solchen Tausch das direkt hinter Fahrzeug 6 fahrende Fahrzeug 8 seinen Zeitslot nicht mehr nutzen könnte. Zeitslots größer als 6 sind nicht gewünscht, da das Fahrzeug 6 seine Situation dadurch verschlechtern würde. Damit bleiben nur noch Zeitslots zwischen 2 und 6 übrig. Ein Tausch mit Fahrzeug 4 ist trotzdem nicht erlaubt. Durch einen solchen Tausch würde

das Fahrzeug 4 den Zeitslot 6 erhalten. Das direkt hinter ihm fahrende Fahrzeug besitzt jedoch den Zeitslot 5. Fahrzeug 5 könnte seinen Zeitslot nicht benutzen. Damit bleiben nur noch die Fahrzeuge 3 und 5 übrig. Nur wenn eines dieser beiden Fahrzeuge den angebotenen Preis akzeptiert, kommt ein Tausch zustande.

6.4.3. Eigenschaften

Der Zeitslottausch ist wertschätzungssensitiv. Da weder Kreuzungs- noch Tauschagenten Zahlungen erhalten oder leisten, ist der Zeitslottausch streng budget-balanciert. Der Zeitslottausch ist individuell rational, jedoch nicht anreizkompatibel. Das Fahrzeug, das die Tauschanfrage stellt, hat einen Anreiz, weniger als seine wahre Wertschätzung anzubieten [SBF08].

6.5. Zeitslotanfrage

Klassische Mechanismen zur Kreuzungssteuerung, wie z. B. Rechts-Vor-Links, Vorfahrtsbeschilderung, Lichtsignalanlagen oder Kreisverkehre, berücksichtigen die Wertschätzung der einzelnen Verkehrsteilnehmer nicht. Sie sind daher nicht wertschätzungssensitiv. Im Folgenden stelle ich kurz einen weiteren nicht-wertschätzungssensitiven Mechanismus vor, den ich neben Lichtsignalanlagen auch als Referenz verwende, um wertschätzungssensitive Mechanismen zu bewerten.

Die *Zeitslotanfrage* (engl. *Time-Slot Request*, TSR) [SBF08] vergibt agentengestützt jedem Fahrzeug den nächsten freien Zeitslot in der Reihenfolge, in der die Fahrzeuge mit der Kreuzung Kontakt aufgenommen haben. Das heißt, TSR arbeitet nach dem FIFO-Prinzip und gehört zur initialen Zeitslotallokation.

TSR ignoriert die Wertschätzung der Verkehrsteilnehmer völlig. Deswegen ist TSR nicht wertschätzungssensitiv. Ich verwende TSR jedoch als Referenzmechanismus, um andere wertschätzungssensitive Mechanismen zu bewerten. TSR wurde in einer sehr ähnlichen Form bereits in [DS04, DS05] vorgeschlagen und evaluiert. Dabei zeigte sich TSR klassischen Lichtsignalanlagen bezüglich der durchschnittlichen Wartezeit deutlich überlegen.

6.6. Ablauf der Verhandlung und Kontaktaufnahme

In allen betrachteten Mechanismen läuft die Verhandlung mit dem Kreuzungsagenten aus Sicht des Fahrerassistenzagenten eines Fahrzeugs nach einer festgelegten Schrittfolge ab: 1. Kontaktaufnahme, 2. Allokation und 3. Nutzung [SB09]. Da Fahrzeuge diese Schritte zu unterschiedlichen Zeitpunkten beginnen, muss der Kreuzungsagent mit all diesen Schritten zeitgleich umgehen.

6.6.1. Kontaktaufnahme

Sobald ein Fahrzeug die sichtbare Nachbarschaft einer Kreuzung betritt, kann der Fahrerassistenzagent Kontakt mit dem Kreuzungsagenten aufnehmen. Die Nachricht an den

6. Mechanismen

Kreuzungsagent enthält alle Informationen, die der Kreuzungsagent benötigt, um mögliche Zeitslots zu berechnen: eine eindeutige Fahrzeugkennung, die gewünschte Kreuzungsspur, die gewünschte Einfahrzeit, die Fahrzeuglänge, die gewünschte Geschwindigkeit auf der Kreuzung, die bevorzugte Beschleunigung und die Kennung des vorausfahrenden Fahrzeugs, das sich direkt vor dem kontaktaufnehmenden Fahrzeug befindet und die Kreuzung noch nicht überquert hat.

Die Kennung des kontaktaufnehmenden Fahrzeugs ist notwendig, um Zeitslots eindeutig diesem Fahrzeug zuzuordnen zu können. Die gewünschte Kreuzungsspur beschreibt den Bereich der Kreuzung, den das Fahrzeug befahren möchte. Die gewünschte Einfahrzeit ist der früheste Zeitpunkt, zu dem ein Fahrzeug in die Kreuzung einfahren kann. Zeitslots, die früher begännen, könnte das Fahrzeug nicht nutzen. Die Fahrzeuglänge, die gewünschte Geschwindigkeit auf der Kreuzung und die bevorzugte Beschleunigung bestimmen die Dauer eines Zeitslots, also die Zeit zwischen Einfahrzeit und Ausfahrzeit. Z. B. benötigt ein Lkw im Allgemeinen deutlich länger als ein Pkw, um eine Kreuzung zu überqueren. Das liegt u. a. an der Fahrzeuglänge und dem geringeren Beschleunigungsvermögen.

Alle benötigten Informationen müssen dem Fahrerassistenzsystem bekannt sein oder zumindest während der Fahrt gemessen werden können. Die unveränderlichen Fahrzeugeigenschaften können bereits vom Hersteller einmalig in das Fahrerassistenzsystem eingegeben werden. Aus dem Navigationssystem kann die zu befahrende Route und damit auch die zu befahrenden Kreuzungsspuren entnommen werden. Die persönlichen Präferenzen des Fahrers muss der Fahrer manuell eingeben. Dabei könnte man dem Fahrer ermöglichen, bestimmte Profile zu definieren, so dass er bei Fahrtantritt nur das gerade geeignete Profil auswählen und nur noch wenige Informationen neu eingeben muss.

Da Fahrzeuge sich in der Nachbarschaft einer Kreuzung nicht überholen können, muss der Kreuzungsagent garantieren, dass ein Fahrzeug einen späteren Zeitslot als das vorausfahrende Fahrzeug erhält. Da der Zeitpunkt der Kontaktaufnahme vom Fahrerassistenzagenten frei gewählt werden kann, kann der Kreuzungsagent im Allgemeinen nicht davon ausgehen, dass die Reihenfolge, in der die Nachrichten der kontaktaufnehmenden Fahrerassistenzagenten eintreffen, immer der Reihenfolge entspricht, in der sich die Fahrzeuge der Kreuzung nähern. Deshalb muss der Kreuzungsagent selbst dafür Sorge tragen, diese Reihenfolge beizubehalten (siehe Anforderung A3). Dazu verwendet der Kreuzungsagent die Kennung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Ein Fahrzeug erhält grundsätzlich immer nur einen Zeitslot, der nach dem Zeitslot seines vorausfahrenden Fahrzeugs liegt.

Die Kennung des vorausfahrenden Fahrzeugs muss das Fahrerassistenzsystem des Fahrerassistenzagenten jedoch ständig während der Fahrt bestimmen. Bisher messen ACC-Systeme nur den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

[DS08] beschreibt eine Alternative, mit der die Kennung des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht gemessen werden muss. In dem heuristischen Verfahren wird für jede Aufstellungsspur eine sogenannte Reservierungsdistanz aus gewünschter Einfahrzeit und -geschwindigkeit bestimmt. Sobald ein Zeitslot storniert wird, da er nicht eingehalten werden kann, wird die Reservierungsdistanz verringert und nur noch Reservierungen angenommen, deren Fahrzeug eine geringere Reservierungsdistanz aufweisen. Sobald es keine Stornierung

mehr gibt, wird die Reservierungsdistanz wieder vergrößert. Dadurch werden zwar Reservierungen in falscher Reihenfolge nicht verhindert, aber sie treten nun seltener auf und werden auch schneller aufgelöst.

Da der Einfluss des heuristischen Verfahrens auf das Gesamtsystem unklar ist, gehe ich im Folgenden davon aus, dass die Bestimmung der Kennung für vorausfahrende Fahrzeuge möglich ist (Annahme 19: *Möglichkeit der Bestimmung der Kennung eines vorausfahrenden Fahrzeugs*).

6.6.2. Allokation

Der Kreuzungsagent vergibt freie Zeitslots an Fahrerassistenzagenten, die bereits Kontakt aufgenommen haben, aber noch keinen Zeitslot besitzen (initiale Allokation). Anschließend können Fahrerassistenzagenten versuchen, ihre Zeitslots weiter zu verbessern (optimierende Allokation). Dieser Schritt ist allerdings optional. Sowohl für die initiale als auch für die optimierende Allokation kann der Kreuzungsagent verschiedene Mechanismen mit unterschiedlichen Eigenschaften verwenden (siehe auch Abschnitt 6.1). In jedem Fall muss der Kreuzungsagent dafür sorgen, dass er nur Zeitslots vergibt, die nicht zu Unfällen führen.

Um Unfälle auf der Kreuzung zu vermeiden, muss gewährleistet werden, dass Fahrzeuge niemals denselben Bereich einer Kreuzung gleichzeitig befahren. Dazu wird die Kreuzung in Zonen eingeteilt. Anschließend wird berechnet, welche Zonen ein Fahrzeug mit einem bestimmten Zeitslot wie lange belegt. Die befahrenen Zonen werden dann für den entsprechenden Zeitraum allokiert, d. h. sie können in dieser Zeit nur von diesem Fahrzeug befahren werden. Andere Zonen, die währenddessen nicht befahren werden sollen, werden für denselben Zeitraum blockiert. Eine bereits allokierte Zone kann nicht mehr für andere Fahrzeuge allokiert oder blockiert werden. Eine blockierte Zone kann allerdings mehrfach blockiert werden.

Eine Reservierung eines Zeitslots ist erfolgreich, wenn alle nötigen Zonen allokiert bzw. blockiert werden können. Schlägt die Reservierung fehl, wird der Zeitslot nicht vergeben und ein geeigneterer Zeitslot neu berechnet. Das bedeutet, dass sich Zeitslots zwar zeitlich überlappen können, aber Fahrzeuge bei der Nutzung ihrer Zeitslots niemals dieselben Zonen zur gleichen Zeit befahren. Diese Art der Allokation gewährleistet, dass die Überfahrtsrechte nicht überlappend vergeben werden (Anforderung B1). Sobald die Allokation erfolgreich durchgeführt werden konnte, geht der Kreuzungsagent davon aus, dass dieser Zeitslot verwendet wird. Dies bedeutet insbesondere, dass der Kreuzungsagent nicht wartet, bis der Fahrerassistenzagent den übertragenen Zeitslot bestätigt, bevor er den Zeitslot allokiert. Damit ist garantiert, dass eine verspätete Bestätigung des Fahrerassistenzagenten niemals dazu führen kann, dass ein Zeitslot mehrfach vergeben wird (Anforderung F1).

6.6.3. Erlaubte Grade der nebenläufigen Kreuzungsüberquerungen

Dresner und Stone [DS08] teilen ihre Kreuzung in ein quadratisches $n \times n$ -Gitter ein. Die Wahl der Granularität n bestimmt dabei, aus wie vielen Zonen die Kreuzung besteht und

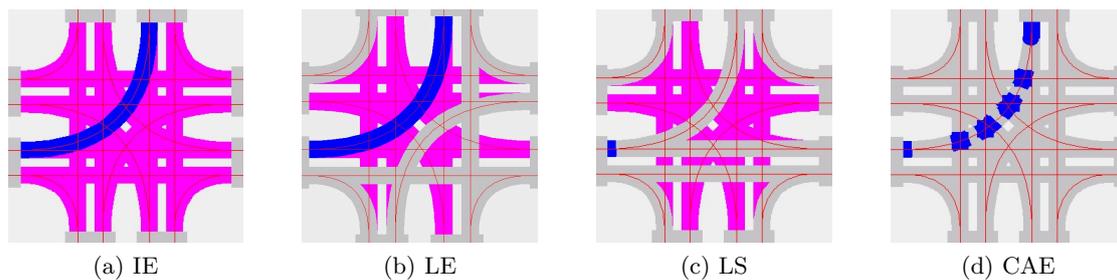


Abbildung 6.3.: Reservierungsbeispiel eines linksabbiegenden Fahrzeugs für verschiedene Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung

welche Fläche eine Zone besitzt. Je feiner die Granularität desto mehr Zonen mit kleinerer Fläche gibt es. Da diese Zonen nichts mit dem tatsächlichen Verlauf der Kreuzungsspuren zu tun haben, kann durch eine feinere Granularität der Durchsatz sogar verschlechtert werden, z. B. wenn bestimmte Kacheln nun auch von der Gegenfahrbahn berührt werden [DS08].

Aus diesem Grund teile ich die Kreuzung in Zonen abhängig von der Lage der Kreuzungsspuren ein. Ich unterscheide dabei vier verschiedene Einteilungen, die jeweils den Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerungen erhöhen: exklusive Nutzung der Kreuzung (IE), exklusive Nutzung der Kreuzungsspur (LE), gemeinsame Nutzung derselben Kreuzungsspur (LS) und exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) [SB09].

Abbildung 6.3 zeigt für die vier verschiedenen Nebenläufigkeitsgrade beispielhaft die Belegung der Zonen für ein linksabbiegendes Fahrzeug, das von links in die Kreuzung einfährt. Die schwarzen Bereiche sind allokiert, die dunkelgrauen blockiert und die hellgrauen frei befahrbar.

Exklusive Nutzung der Kreuzung

Bei der *exklusiven Nutzung der Kreuzung* (engl. *intersection exclusive*, IE) ist keine Nebenläufigkeit erlaubt (siehe auch Abbildung 6.3a). Erst wenn ein Fahrzeug die Kreuzung vollständig verlassen hat, kann das nächste Fahrzeug die Kreuzung betreten.

Dazu wird die zu befahrene Kreuzungsspur für die gesamte Überquerungsdauer allokiert und alle übrigen Kreuzungsspuren für denselben Zeitraum blockiert.

Exklusive Nutzung der Kreuzungsspur

Um Kreuzungsspuren nicht zu blockieren, die mit der zu befahrenden Kreuzungsspur keine Konfliktbereiche haben, kann auch eine *exklusive Nutzung der Kreuzungsspur* (engl. *lane exclusive*, LE) erfolgen (siehe auch Abbildung 6.3b).

In diesem Fall wird zwar immer noch die zu befahrene Kreuzungsspur für die gesamte Überquerungsdauer allokiert, allerdings werden für diesen Zeitraum nur die Kreuzungs-

spuren blockiert, die mit der zu befahrenen Kreuzungsspur Konfliktbereiche haben. Alle übrigen Kreuzungsspuren bleiben frei.

Gemeinsame Nutzung derselben Kreuzungsspur

Der Nachteil bei *LE* ist, dass Fahrzeuge aus demselben Verkehrsstrom nicht hintereinander die Kreuzung überqueren können, sondern erst warten müssen, bis das vorausfahrende Fahrzeug die Kreuzung verlassen hat. Dies ist bei der *gemeinsamen Nutzung derselben Kreuzungsspur* (engl. *lane shared*, LS) nicht mehr der Fall (siehe auch Abbildung 6.3c).

Die zu befahrende Kreuzungsspur wird nun nicht mehr für die gesamte Dauer der Kreuzungsüberquerung vollständig allokiert. Zunächst werden nur die aufspaltenden Konfliktbereiche der zu befahrenden Kreuzungsspur betrachtet. Der zugehörige Konnektor-Konfliktbereich der Kreuzungsspur wird allokiert, der Konnektor-Konfliktbereich der anderen Kreuzungsspur wird blockiert. Beides erfolgt nur solange, bis das Fahrzeug den entsprechenden aufspaltenden Konfliktbereich verlassen hat.

Falls keine aufspaltenden Konfliktbereiche existieren, weil die befahrene Aufstellungsspur nur in eine Kreuzungsspur übergeht, muss trotzdem der Eingangsbereich der zu befahrenen Kreuzungsspur für eine kurze Zeit allokiert werden. Dies ist nötig, da aufeinanderfolgende Fahrzeuge Abstände einhalten müssen. Der Eingangsbereich muss mindestens so lange allokiert werden wie der zeitliche Abstand hintereinander fahrender Fahrzeuge beträgt. Falls aufspaltende Konfliktbereiche zu kurz allokiert bzw. blockiert werden würden, muss auch die Allokation dieser Konfliktbereiche entsprechend angepasst werden.

Abgesehen von den erwähnten aufspaltenden Konfliktbereichen werden nicht mehr alle Kreuzungsspuren, die Konfliktbereiche mit der zu befahrenen Kreuzungsspur haben, sondern nur die Kreuzungsspuren mit kreuzenden oder zusammenführenden Konfliktbereichen vollständig für die gesamte Überquerungsdauer blockiert.

Exklusive Nutzung der Konfliktbereiche

Bei der *exklusiven Nutzung der Konfliktbereiche* (engl. *conflict area exclusive*, CAE) werden ausschließlich Konfliktbereiche betrachtet (siehe auch Abbildung 6.3d). Jeder Konnektor-Konfliktbereich auf der befahrenden Kreuzungsspur wird für den Zeitraum allokiert, in dem das Fahrzeug den entsprechenden Konfliktbereich überquert. Die zugehörigen Konnektor-Konfliktbereiche der anderen Kreuzungsspur werden für denselben Zeitraum blockiert.

Diskussion

Der Grad der Nebenläufigkeit nimmt von der exklusiven Nutzung der Kreuzung bis zur exklusiven Nutzung der Konfliktbereiche stetig zu. Dies bedeutet, dass sich damit auch der mögliche Durchsatz erhöht. Allerdings steigt durch die zunehmende Nebenläufigkeit auch das Unfallrisiko. Die exklusive Nutzung der Kreuzung und der Kreuzungsspur erlauben nur sehr geringe Nebenläufigkeit und besitzen deswegen ein geringes Unfallrisiko.

Die gemeinsame Nutzung derselben Kreuzungsspur entspricht der Situation an einer heutigen, durch Lichtsignalanlagen gesteuerten Kreuzung. Verkehrsströme aus derselben

6. Mechanismen

Richtung bzw. Aufstellspur dürfen hintereinander die Kreuzung überqueren, während damit in Konflikt stehende Verkehrsströme die Kreuzung nicht befahren dürfen. Ein Wechsel der erlaubten Verkehrsströme erfolgt erst nach einer Übergangszeit, nach der die Kreuzung spätestens geräumt ist. Damit ist dieser Grad der Nebenläufigkeit als bereits heute realisierbar anzusehen.

Die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) stellt dagegen einige Herausforderungen an den Fahrer. Er muss bei der Überquerung die Allokationszeiten für die entsprechenden Konfliktbereiche genau einhalten. Da dies nicht von jedem Fahrer erwartet werden kann bzw. ansonsten zu große Sicherheitsabstände nötig wären, wird bei diesem Nebenläufigkeitsgrad unterstellt, dass der Fahrer auf ein A3C-System zurückgreifen kann, das ihn sowohl beim Eintritt in die Kreuzung als auch bei der Überquerung der Kreuzung unterstützt. In allen anderen Fällen ist ein A3C-System zwar hilfreich, aber nicht erforderlich.

7. A3C-System

Verkehrsteilnehmer, deren Fahrzeuge mit A3C-Systemen ausgestattet sind, werden dadurch bei der Teilnahme an einem der beschriebenen Kreuzungssteuerungsmechanismen unterstützt. In diesem Kapitel beschreibe ich kurz den Aufbau und die Einsatzmöglichkeiten eines A3C-Systems.

7.1. Zustände

Ein A3C-System besitzt drei verschiedene Modi [SB09]. Es kann ausgeschaltet (*aus*) sein, nur den Abstandsregeltempomaten zur Verfügung stellen (*ACC*) oder auch zusätzlich den Kreuzungsquerungstempomaten verwenden (*A3C*).

Im Modus *A3C* unterscheide ich die Zustände *Unbeeinflusst*, *Nähernd ohne Zeitslot*, *Nähernd mit Zeitslot* und *Überquerend*. Abbildung 7.1 zeigt das zugehörige Zustandsübergangsdiagramm. Außerhalb der Nachbarschaft einer Kreuzung befindet sich das A3C-System im Zustand *Unbeeinflusst* (engl. *unaffected*, *U*), da das Fahrzeug sich unbeeinflusst von einer nahen Kreuzung bewegen kann. Sobald das Fahrzeug die sichtbare Nachbarbarschaft einer Kreuzung betritt, wechselt das A3C-System in den Zustand *Nähernd ohne Zeitslot* (engl. *approaching without time slot*, *A-*). Nachdem das A3C-System einen gültigen Zeitslot erhalten hat, wechselt es in den Zustand *Nähernd mit Zeitslot* (engl. *approaching with time slot*, *A+*). Durch das Passieren der Haltelinie einer Kreuzung wechselt das A3C-System dann in den Zustand *Überquerend* (engl. *crossing*, *C*). Nach dem Verlassen der Kreuzung kehrt das A3C-System wieder in den Zustand *U* zurück. Falls das A3C-System seinen Zeitslot im Zustand *A+* zurückgeben muss, kehrt es zu *A-* zurück.

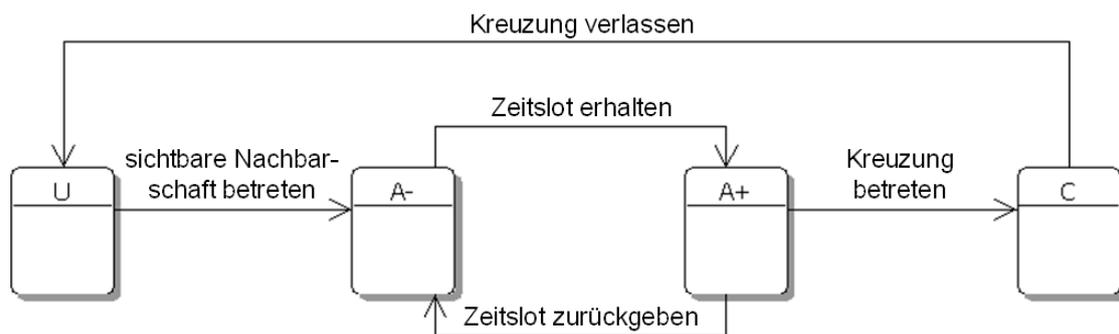


Abbildung 7.1.: Zustandsübergangsdiagramm für das A3C-System im Modus *A3C*.

7.2. Parameter

Der Fahrer legt das Verhalten seines A3C-Systems fest, in dem er es über die folgenden Parameter konfiguriert. Ein Fahrer bevorzugt die *gewünschte Geschwindigkeit* v_{desire} und einen *gewünschten Mindestabstand* g_{desire} zu seinem vorausfahrenden Fahrzeug. Er bevorzugt die *sanfte Beschleunigung* a_s und die *sanfte Verzögerung* d_s , akzeptiert aber auch Werte bis zu einer *starken Beschleunigung* a_h bzw. einer *starken Verzögerung* d_h . Diese Parameter hängen vom Fahrer ab und können abhängig vom jeweiligen Zustand des A3C-Systems belegt werden.

7.3. Berechnung der A3C-Geschwindigkeit

Mit diesen Parametern berechnet das A3C-System in jedem Zustand die *A3C-Geschwindigkeit* v_{A3C} aus dem Minimum der *Abstandsregeltempomatgeschwindigkeit* v_{ACC} und der *Kreuzungsquerungstempomatgeschwindigkeit* v_{CC} . v_{ACC} ist die notwendige Geschwindigkeit, um den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten (Anforderung A2). v_{CC} ist die notwendige Geschwindigkeit, um eine bestimmte Position, z. B. die Haltelinie einer Kreuzung, zu einer bestimmten Zeit mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu erreichen. In jedem Fall darf die A3C-Geschwindigkeit v_{A3C} nicht höher als die geltende Geschwindigkeitsbegrenzung v_{limit} und die vom Fahrer gewünschte Geschwindigkeit v_{desire} ausfallen. Es gilt daher $v_{A3C} = \min(v_{ACC}, v_{CC}, v_{limit}, v_{desire})$.

Da die Abstandsregeltempomatgeschwindigkeit für die Berechnung der A3C-Geschwindigkeit verwendet wird, werden die Abstände zwischen den Fahrzeugen immer eingehalten (Anforderung A2).

7.4. Fahrstrategien

Um einen sicheren und effizienten Verkehrsfluss zu gewährleisten, schlage ich die folgenden Fahrstrategien für das A3C-System vor. Diese Strategien beschreiben, wie die Kreuzungsquerungstempomatgeschwindigkeit v_{CC} in jedem Zustand berechnet werden kann.

Trotzdem können Automobilzulieferer natürlich andere Strategien für ihre eigenen A3C-Systeme einsetzen.

7.4.1. Unbeeinflusst

Solange das Fahrzeug sich außerhalb der sichtbaren Nachbarschaft einer Kreuzung befindet, ist das A3C-System im Zustand U . Es ist also noch unbeeinflusst von einer Kreuzung. In diesem Zustand fährt das Fahrzeug mit der gewünschten Geschwindigkeit $v_{desired}$. Es gilt also $v_{CC} = \min(v_{limit}, v_{desire})$. Dies entspricht in diesem Fall auch dem Verhalten eines ACC-Systems.

7.4.2. Nähernd ohne Zeitslot

Sobald ein Fahrzeug die sichtbare Nachbarschaft betritt, wechselt das A3C-System in den Zustand $A-$. Während das A3C-System sich in diesem Zustand befindet, muss das Fahrzeug unter allen Umständen vor der Kreuzung anhalten. Zu jedem Zeitpunkt i kann das A3C-System die *nötige Verzögerung* d_i berechnen, mit der das Fahrzeug genau vor der Haltelinie der Kreuzung anhält, wenn es jetzt beginnt zu verzögern. Solange die nötige Verzögerung d_i kleiner als die sanfte Verzögerung ist ($d_i < d_s$), behält das A3C-System jedoch die gewünschte Geschwindigkeit v_{desire} des Fahrers bei. In diesem Fall gilt also immer noch $v_{CC} = \min(v_{limit}, v_{desire})$.

Dies gilt auch, wenn sich die nötige Verzögerung weiter erhöht ($d_s \leq d_i \leq d_h$). Jedoch nur solange bis die notwendige Verzögerung beim nächsten Reaktionszeitpunkt $i + 1$ die harte Verzögerung übersteigen würde ($d_h < d_{i+1}$). In diesem Fall beginnt das A3C-System bereits zum Zeitpunkt i mit der notwendigen Verzögerung d_i zu bremsen. In diesem Fall gilt immer noch $d_i \leq d_h$ ⁴. Diese Strategie des späten Bremsens bezeichne ich als *späte Verzögerung* (engl. *late deceleration*).

7.4.3. Nähernd mit Zeitslot

Wenn ein Fahrzeug einen Zeitslot erhält, wechselt es nicht sofort von $A-$ nach $A+$, sondern berechnet zunächst ein sogenanntes Beschleunigungsprofil.

Definition 7.1 (Beschleunigungsprofil). *Ein Beschleunigungsprofil (v_0, B) beschreibt eine Folge von linearen Bewegungen. v_0 bezeichnet die Anfangsgeschwindigkeit und $B = (b_1, \dots, b_{|B|})$ einen Vektor von Beschleunigungsschritten. Ein Beschleunigungsschritt b_i beschreibt eine lineare Bewegung, also eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung. Deswegen lässt sich ein Beschleunigungsschritt b_i auch als Paar (a^i, t^i) beschreiben. a^i bezeichnet die Beschleunigung der Bewegung und t^i die Dauer der Bewegung.*

Für jeden Beschleunigungsschritt b_i eines Beschleunigungsprofils B lässt sich der Beginn t_b^i , das Ende t_e^i , die Anfangsgeschwindigkeit v_b^i und die Endgeschwindigkeit v_e^i bestimmen. Für die Endgeschwindigkeit v_e^B eines Beschleunigungsprofils B gilt dann $v_e^B = v_e^{|B|}$. Für die Dauer t^B eines Beschleunigungsprofils B gilt dann $t^B = \sum_{b_i \in B} t^i$.

Definition 7.2 (Erlaubtes Beschleunigungsprofil). *Ein Beschleunigungsprofil ist erlaubt, wenn für jeden Beschleunigungsschritt b_i die folgenden Bedingungen erfüllt sind: Die Beschleunigung ist kleiner oder gleich der starken Beschleunigung ($a^i \leq a_h$) und größer oder gleich der starken Verzögerung $a^i \geq d_h$. Die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit übersteigen nicht die geltende Geschwindigkeitsbeschränkung und die vom Fahrer gewünschte Geschwindigkeit ($v_b^i \leq \min(v_{limit}, v_{desire})$, $v_e^i \leq \min(v_{limit}, v_{desire})$).*

Im Folgenden werden jedoch Beschleunigungsprofile benötigt, die nicht nur erlaubt, sondern auch gültig sind.

⁴Bei der Wahl der Dauer der Abstände zwischen den Reaktionszeitpunkten bzw. der Länge eines Simulationsschritts muss darauf geachtet werden, dass die notwendige Verzögerung nicht zu einem Zeitpunkt kleiner als die sanfte Beschleunigung und im nächsten Zeitpunkt bereits größer als die harte Beschleunigung sein kann.

7. A3C-System

Definition 7.3 (Gültiges Beschleunigungsprofil). *Für ein Fahrzeug, das bereits einen Zeitslot besitzt, ist ein erlaubtes Beschleunigungsprofil gültig, wenn die Anfangsgeschwindigkeit des Beschleunigungsprofils der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht, die Endgeschwindigkeit des Beschleunigungsprofils zwischen Einfahrtgeschwindigkeit und Überquerungsgeschwindigkeit des Zeitslots liegt und die Dauer des Beschleunigungsprofils der Zeit bis zur angestrebten Einfahrzeit entspricht.*

Das A3C-System versucht, ein gültiges Beschleunigungsprofil zu berechnen, indem bevorzugt die sanfte Beschleunigung a_s bzw. die sanfte Verzögerung d_s verwendet wird. Falls das nicht möglich ist, werden möglichst sanfte Beschleunigungen bzw. Verzögerungen verwendet. Falls das A3C-System jedoch kein gültiges Beschleunigungsprofil berechnen kann, lehnt das A3C-System den angebotenen Zeitslot ab und verbleibt im Zustand $A-$. Ansonsten wechselt das A3C-System in den Zustand $A+$. Ich bezeichne die Strategie des frühzeitigen Anpassens der Geschwindigkeit mittels sanfter Beschleunigungs- und Verzögerungswerte als *frühe Verzögerung* (engl. *early deceleration*).

Falls der Fahrerassistenzagent jedoch, nachdem er einen Zeitslot erhalten hat, diesen Zeitslot weiter verbessern möchte, z. B. durch Tausch mit anderen Fahrerassistenzagenten (siehe Abschnitt 6.4), berechnet das A3C-System ein Beschleunigungsprofil, mit dem man möglichst früh die Haltelinie der Kreuzung erreicht. Dies entspricht dann der Strategie der späten Verzögerung. Im Extremfall führt dies dazu, dass das Fahrzeug vor der Kreuzung anhält, einige Zeit wartet und erst dann so anfährt, dass es in die Kreuzung zur richtigen Zeit einfährt. Diese geänderte Strategie ist notwendig, um möglichst wenig Gelegenheiten zur Optimierung zu verpassen.

Während der Fahrt im Zustand $A+$ kann es geschehen, dass das A3C-System nicht mehr das ursprüngliche Beschleunigungsprofil verwenden kann, z. B. weil das Fahrzeug durch die Abstandsregeltempomatgeschwindigkeit langsamer fahren muss als ursprünglich vorgesehen. Deswegen berechnet das A3C-System in regelmäßigen Abständen ein neues Beschleunigungsprofil. Falls es kein gültiges Beschleunigungsprofil mehr berechnen kann, gibt der Fahrerassistenzagent den Zeitslot zurück und kehrt in den Zustand $A-$ zurück. Das bedeutet, dass das A3C-System wieder auf Zeitslotangebote wartet und nötigenfalls an der Kreuzung anhält. Falls das Fahrzeug durch die Rückgabe des Zeitslots jedoch nicht mehr rechtzeitig vor der Haltelinie der Kreuzung anhalten kann, muss es die Kreuzung verspätet passieren. Aus diesem Grund muss die Toleranz bei der Einfahrzeit so gewählt werden, dass ein Fahrzeug – sobald es nicht mehr vor der Kreuzung anhalten kann – immer ein gültiges Bewegungsprofil berechnen kann.

7.4.4. Überquerend

Sobald das Fahrzeug die Kreuzung betritt, wechselt das A3C-System in den Zustand C . Während der Überquerung beschleunigt das Fahrzeug auf die vorgegebene Überquerungsgeschwindigkeit. Nachdem es die Kreuzung verlassen hat, wechselt das A3C-System zurück in den Zustand U .

7.4.5. Eigenschaften

Die beschriebene Fahrstrategie stellt sicher, dass Fahrzeuge die Kreuzung nur mit einem gültigen Beschleunigungsprofil überqueren. Dadurch wird gewährleistet, dass Fahrzeuge ein gültiges Überfahrtsrecht besitzen (Anforderung **B2**) und dass die Geschwindigkeits- und die Beschleunigungsbeschränkungen eingehalten werden (Anforderung **A1**). Zusätzlich wird eine ausreichend hohe Einfahrtsgeschwindigkeit gewährleistet (Anforderung **D2**).

Verspätete Nachrichten werden unterstützt (Anforderung **F1**), so dass das Fahrzeug erst die Kreuzung überquert, wenn es den Zeitslot tatsächlich erhalten hat. Erreicht eine Nachricht verspätet das Fahrzeug, so hat dieses Fahrzeug möglicherweise bereits verzögert, um vor der Kreuzung anhalten zu können. Falls dadurch kein gültiges Beschleunigungsprofil mehr möglich ist, kann das Fahrzeug den Zeitslot zwar nicht wahrnehmen, aber in keinem Fall fährt das Fahrzeug ohne Zeitslot in die Kreuzung ein.

Der eingesetzte Fahrerassistentenagent kann die Fahrstrategie autonom umsetzen. Diese Eigenschaft eines Softwareagenten macht es möglich, die notwendige Interaktion mit dem Fahrer auf ein Minimum zu beschränken (Anforderung **K3**).

Teil III.

Evaluation und Anwendung

8. Evaluation

Die in dieser Arbeit vorgestellten Mechanismen werden in diesem Kapitel evaluiert. Zunächst erläutere ich die verwendete Methodik zur Evaluation. Anschließend zeige ich, wie das Simulationswerkzeug verifiziert und validiert wurde. Danach erkläre ich den grundsätzlichen Aufbau der durchgeführten Experimente. Abschließend beschreibe ich die Ergebnisse der durchgeführten Experimente „Mechanismenvergleich“, „Kreuzungslayoutvergleich“, „Kraftstoffverbrauchsminimierung“ sowie die Ergebnisse aus früheren Experimenten.

8.1. Methodik

Die Evaluation erfolgt mit Hilfe von Simulationen. Da eine sofortige Realisierung von Prototypen im Verkehrsbereich zu kostenintensiv wäre, werden Mechanismen oder Infrastrukturmaßnahmen zunächst simuliert. Dies ist gängige Praxis in der Verkehrstechnik, was unter anderem [DS04, FL05, HES05] bzw. die Vielzahl an existierenden Mikrosimulationswerkzeuge für den Verkehr (siehe Abschnitt 2.3.3) zeigen.

8.1.1. Attribute und Kennzahlen

Eine Vielzahl an Attributen $a \in \mathcal{A}$ bestimmt den Verlauf einer Simulation. Es lassen sich deterministische und stochastische Attribute unterscheiden. *Deterministische Attribute* werden vor Beginn der Simulation festgelegt. Beispiele für deterministische Attribute sind der Durchmesser einer Verkehrskreuzung, die durchschnittliche Verkehrsmenge einer Verkehrsquelle oder der verwendete Mechanismus zur Verkehrssteuerung an einer Straßenkreuzung.

Stochastische Attribute hingegen entstehen im Verlauf der Simulation zufällig. Beispiele für stochastische Attribute sind der gewünschte Startzeitpunkt eines einzelnen Fahrzeuges oder die gewählte Route eines Fahrzeuges.

Während einer Simulation lassen sich verschiedene *Kennzahlen* $m \in \mathcal{M}$ beobachten. Die Ausprägungen der deterministischen und stochastischen Attribute bestimmen die Kennzahlen einer Simulation. Beispiele für Kennzahlen sind die durchschnittliche Wartezeit $\overline{T_w}$ oder die durchschnittliche gewichtete Wartezeit $\overline{vT_w}$ an einer Kreuzung.

8.1.2. Ausführung

Um die Auswirkung eines deterministischen Attributs a zu untersuchen, vergleicht man die Kennzahl m zweier Simulationsläufe mit unterschiedlicher Ausprägung des Attributs a , also $m^{a=x}$ und $m^{a=y}$, wobei x und y mögliche Ausprägungen des Attributs a sind.

8. Evaluation

Alle übrigen deterministischen Attribute bleiben unverändert. Führt man eine Simulation wiederholt aus, so unterscheiden sich im Allgemeinen die einzelnen Simulationsläufe auch bezüglich ihrer stochastischen Attribute. Das bedeutet aber, dass sich auch die stochastischen Attribute in den beiden zu vergleichenden Simulationsläufen unterscheiden. Damit beeinflusst nicht nur das geänderte deterministische Attribut a , sondern auch die verschiedenen Ausprägungen der stochastischen Attribute den Vergleich der Kennzahlen.

In einer Computersimulation entstehen die stochastischen Attribute nicht echt zufällig. Stattdessen werden sie mit Hilfe eines Pseudozufallsfolgenerators erzeugt (siehe dazu z. B. [Knu98, Ros06]). Ein Pseudozufallsfolgenerator wird mit einer sogenannten *Saat* initialisiert.

Damit ist die Saat ein optionales deterministisches Attribut, das alle stochastischen Attribute vorherbestimmt. Diese Eigenschaft wird für den Vergleich der Simulationsläufe genutzt. Beide Simulationsläufe werden mit der gleichen Saat initialisiert. In diesem Fall unterscheiden sich die beiden Simulationsläufe nur noch durch die unterschiedlichen Ausprägungen des deterministischen Attributs a . Für eine Kennzahl m , die in beiden Simulationsläufen beobachtet wird, erhält man also zwei verschiedene Werte $m^{a=x}$ und $m^{a=y}$. Diese beiden Werte lassen sich nun sinnvoll vergleichen.

Definition 8.1. *Seien $a \in \mathcal{A}$ ein Attribut mit mindestens zwei verschiedenen Ausprägungen x und y und $m^{a=x}$ und $m^{a=y}$ die in zwei Simulationsläufen beobachteten Werte einer Kennzahl $m \in \mathcal{M}$, wobei die beiden Simulationsläufe mit der gleichen Saat initialisiert wurden und sich deswegen nur in der Ausprägung des Attributs a unterscheiden. Dann bezeichnet Δm^a oder kurz Δm die absolute Differenz dieser Werte, also $\Delta m^a = m^{a=x} - m^{a=y}$, und Λm^a die relative Differenz dieser Werte: $\Lambda m^a = \frac{m^{a=x} - m^{a=y}}{m^{a=x}} = \frac{\Delta m^a}{m^{a=x}}$.*

Dadurch schließt man allerdings immer noch nicht aus, dass der Vergleich der Kennzahlen von der willkürlich gewählten Saat beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird der Vergleich mit jeweils unterschiedlicher Saat mehrmals ausgeführt. Aus Sicht der Statistik handelt es sich dabei also um den paarweisen Vergleich zweier abhängiger Messreihen [HEK02]. Die Messreihen sind von einander abhängig, da jeweils zwei Simulationsläufe, die mit gleicher Saat initialisiert wurden, paarweise verglichen werden.

Bei n Vergleichen erhält man also n verschiedene absolute Δm_i^a bzw. relative Λm_i^a Differenzen für $1 \leq i \leq n$. Die Verteilung dieser Differenzen kann anschließend untersucht werden. Im Einzelnen umfasst das den Mittelwert der absoluten $\overline{\Delta m^a}$ bzw. der relativen Differenzen $\overline{\Lambda m^a}$, die Varianz der absoluten $\sigma_{\Delta m^a}^2$ bzw. der relativen Differenzen $\sigma_{\Lambda m^a}^2$ und das jeweilige $(1 - \alpha)$ -Konfidenzintervall des Mittelwertes.

Die Mittelwerte der absoluten und der relativen Differenzen lassen sich direkt berechnen.

Definition 8.2. *Sei n die Anzahl der durchgeführten Vergleiche. Für den Mittelwert der absoluten Differenzen $\overline{\Delta m^a}$ gilt: $\overline{\Delta m^a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_i^a$. Für den Mittelwert der relativen Differenzen $\overline{\Lambda m^a}$ gilt analog: $\overline{\Lambda m^a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Lambda m_i^a$.*

Da die Varianz $\sigma_{\Delta m^a}^2$ nicht im Voraus bekannt ist, muss die Varianz aus den einzelnen Beobachtungen geschätzt werden.

8. Evaluation

Definition 8.3. Für die geschätzte Varianz $s_{\Delta m^a}^2$ gilt: $s_{\Delta m^a}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_i^a - \overline{\Delta m^a})^2$ [HEK02].

Die geschätzte Varianz kann nun für die Bestimmung des $(1 - \alpha)$ -Konfidenzintervall verwendet werden.

Definition 8.4. Sei $s_{\Delta m^a}^2$ die geschätzte Varianz und $t_{n-1;1-\alpha/2}$ das $1 - \alpha/2$ -Quantil der t_{n-1} -Verteilung. Das $(1 - \alpha)$ -Konfidenzintervall lautet dann wie folgt [HEK02]:

$$\left[\overline{\Delta m^a} - \frac{s_{\Delta m^a}}{\sqrt{n}} t_{n-1;1-\alpha/2}; \overline{\Delta m^a} + \frac{s_{\Delta m^a}}{\sqrt{n}} t_{n-1;1-\alpha/2} \right] \quad (8.1)$$

8.2. Verifikation und Validierung

In diesem Abschnitt zeige ich, wie ich das entwickelte Simulationswerkzeug verifiziert und validiert habe. Verifikation und Validierung sind wesentliche Schritte einer Simulationsstudie [Law07].

8.2.1. Verifikationstechniken

[Law07, Kapitel 5.3] schlägt acht Techniken vor, mit denen Software für eine Simulation verifiziert, d. h. auf Fehler untersucht werden kann: Ein Simulationsmodell sollte modular entwickelt und getestet werden (*Technik 1: Modulares Vorgehen*). Dies bedeutet insbesondere, dass man zunächst das Hauptprogramm entwickelt und testet und anschließend zusätzliche Module ergänzt und diese separat testet.

In großen Simulationsmodellen sollte der entwickelte Code von mehreren Personen begutachtet werden (*Technik 2: Code Review durch mehrere Personen*). Dies kann auch bedeuten, dass man für bedeutende Code-Teile diese gemeinsam Statement für Statement bespricht. Erst wenn alle Beteiligten der Meinung sind, dass ein Statement korrekt ist, wird das nächste Statement besprochen.

Die Simulation sollte unter verschiedenen Einstellungen durchgeführt werden (*Technik 3: Variation der Einstellungen*). Für bestimmte Einstellungen kann man eventuell sogar das korrekte Ergebnis anderweitig berechnen und mit dem Ergebnis der Simulation vergleichen.

Wenn man zu jeder Zeit die Zwischenergebnisse protokolliert, so kann man jeden Schritt für sich auf Korrektheit untersuchen, in dem man die durchgeführten Berechnungen manuell durchführt (*Technik 4: Tracing*). Eine weitere Möglichkeit ist, die Simulation zunächst mit vereinfachenden Annahmen durchzuführen, für die man die tatsächlichen Ergebnisse im Voraus kennt bzw. leichter berechnen kann (*Technik 5: Test mit vereinfachenden Annahmen*).

Die Animation des Simulationsergebnisses erleichtert unter Umständen das Auffinden von Fehlern (*Technik 6: Animation*). Die Verteilung der erhaltenen Simulationsergebnisse kann mit den eingegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen verglichen werden (*Technik 7: Vergleich der Eingabewahrscheinlichkeitsverteilung mit den tatsächlich erhaltenen Verteilungen*).

Die Verwendung eines kommerziellen Simulationswerkzeuges reduziert den eigenen Programmieraufwand und damit auch die Wahrscheinlichkeit eigener Fehler (*Technik 8: Verwendung eines kommerziellen Simulationswerkzeugs*). Natürlich kann das verwendete Simulationswerkzeug selbst Fehler enthalten, die unter Umständen deutlich schwieriger zu entdecken sind.

8.2.2. Verifikation

Ich habe das Simulationsmodell und das entwickelte Simulationswerkzeug mit Hilfe der Techniken 1, 3, 4, 5 und 6 verifiziert. Die Entwicklung des Simulationswerkzeuges erfolgte stufenweise. Zunächst wurde das Werkzeug ohne die Verwendung von Softwareagenten entwickelt und getestet [For06a]. Anschließend wurden schrittweise bestimmte Agentenkomponenten bzw. Mechanismen integriert und separat getestet.

Im Rahmen von DAMAST wurde das Simulationswerkzeug für unterschiedliche Verkehrsszenarien eingesetzt. Das Simulationswerkzeug ermöglicht, den Zustand jedes einzelnen Fahrzeugs zu jedem Simulationsschritt auszugeben. Dies ermöglicht, die Simulation eines Fahrzeuges schrittweise nachzuvollziehen und die Korrektheit zu prüfen.

Im Rahmen der Entwicklung wurde zunächst mit vereinfachenden Annahmen gearbeitet. Anfänglich wurde ausschließlich die exklusive Nutzung der Kreuzung (IE) untersucht. Das Simulationswerkzeug war von Anfang an darauf ausgelegt, die Simulation zu visualisieren. Die Visualisierung erleichtert, die Mechanismen zu erklären und vorzuführen. Zusätzlich kann man damit auch Fehler in der Simulation leicht erkennen, wie z. B. Fahrzeugkollisionen oder stehen gebliebene Fahrzeuge.

8.2.3. Validierung

Die Validierung der Simulationsergebnisse [Law07] erfolgte einerseits durch eine Plausibilitätsprüfung. Die erhaltenen Kennzahlen wurden – soweit möglich – mit Kennzahlen aus der Realität verglichen. Die Visualisierung durch das Simulationswerkzeug erleichtert ebenfalls die Validierung, indem z. B. eine erwartete Kolonnenbildung visuell überprüft werden kann.

8.3. Experimentaufbau

In diesem Abschnitt beschreibe ich den Aufbau, der allen ausgeführten Experimente zugrunde liegt.

8.3.1. Kreuzung

Layout

In allen Experimenten verwende ich eine Kreuzung, deren Layout bis auf wenige Ausnahmen der Kreuzung aus Abbildung 8.1 entspricht.

8. Evaluation

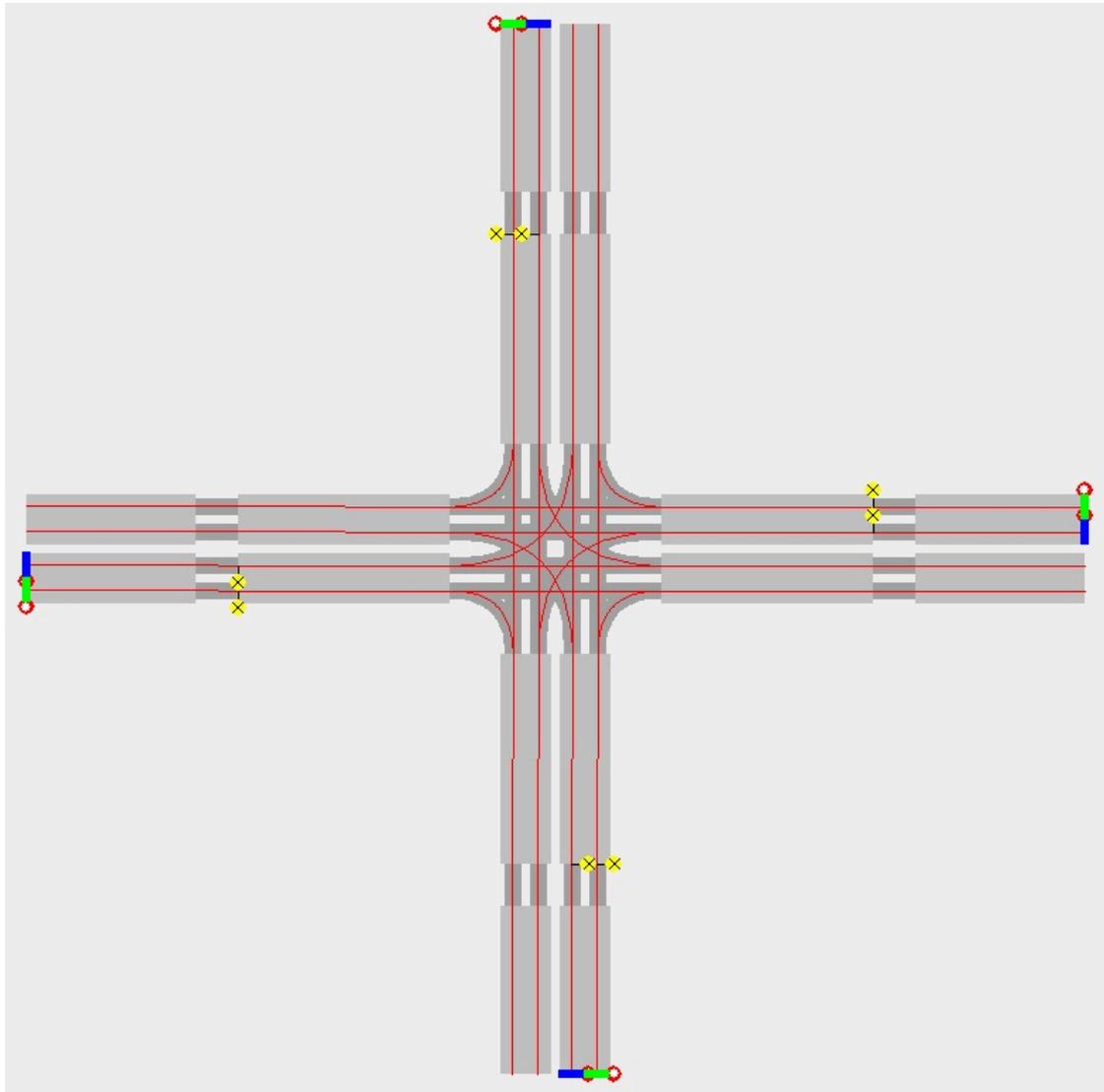


Abbildung 8.1.: Evaluiertes Kreuzungslayout

8. Evaluation

Bei der Beschreibung der Kreuzung verwende ich das Kreuzungsmodell aus Abschnitt 4.3.2. In jeder Kreuzung betreten Fahrzeuge aus vier verschiedenen Himmelsrichtungen die Nachbarschaft und überqueren die Kreuzung. Jede Richtung besitzt sowohl zwei äußere und zwei innere eingehende als auch zwei äußere und zwei innere ausgehende Kantenspuren (siehe auch Abbildung 4.3). Die linke äußere Kantenspur ist jeweils nur mit der entsprechenden linken inneren Kantenspur durch einen Konnektor verbunden, die rechte äußere nur mit der entsprechenden rechten inneren Kantenspur. Jede linke innere eingehende Kantenspur ermöglicht das Linksabbiegen und das Geradeausfahren auf die jeweils entsprechende linke innere ausgehende Kantenspur. Jede rechte innere eingehende Kantenspur ermöglicht das Rechtsabbiegen und das Geradeausfahren auf die jeweils entsprechende rechte innere ausgehende Kantenspur. Die äußeren Kantenspuren sind 40m lang, die inneren Kantenspuren 950m. Der Übergang zwischen den beiden ist 10m lang. Der Kreuzungsradius beträgt 25m. Das bedeutet, dass ein Fahrzeug, das die Kreuzung geradeaus überquert, bis zur Mitte der Kreuzung 1025m und bis zum Verlassen der Nachbarschaft 2050m zurücklegt. Auf jeder äußeren eingehenden Kantenspur befindet sich jeweils eine Verkehrsquelle an der Position 0m. Auf jeder inneren eingehenden Kantenspur befindet sich jeweils ein Verkehrsschild „Agentengesteuerte Kreuzung“ auf der Position 0m. Dies bedeutet, dass jedes Fahrzeug das Verkehrsschild „Agentengesteuerte Kreuzung“ nach einer Fahrstrecke von 50m passiert und ab diesem Zeitpunkt der Fahrerassistenzagent mit dem Kreuzungsagenten kommunizieren kann.

Um den Einfluss des Layouts einer Kreuzung zu untersuchen, vergleiche ich in einigen Experimenten verschiedene Kreuzungslayouts⁵.

Kreuzung IV Die Kreuzung IV entspricht der zuvor beschriebenen Kreuzung (siehe Abbildung 8.2a und Abbildung 8.2b).

Kreuzung V Die Kreuzung V unterscheidet sich von der Kreuzung IV nur dadurch, dass auf den linken inneren eingehenden Kantenspuren nicht geradeaus gefahren werden kann (siehe dazu Abbildung 8.3a und Abbildung 8.3b). Alle übrigen Parameter bleiben unverändert.

Kreuzung VI Die Kreuzung VI unterscheidet sich von der Kreuzung V dadurch, dass es nur eine innere ausgehende Kantenspur gibt (siehe dazu Abbildung 8.4a und Abbildung 8.4b). Damit müssen alle Fahrzeuge, die eine Kreuzung in eine bestimmte Richtung verlassen, dieselbe innere ausgehende Kantenspur befahren. Alle übrigen Parameter bleiben unverändert.

Um eine bessere Darstellung zu gewährleisten, sind die inneren Kantenspuren in den Abbildungen 8.1, 8.2a, 8.3a und 8.4a jeweils stark verkürzt dargestellt.

Tabelle 8.1 zeigt eine Übersicht der Kreuzungsparameter für die verschiedenen Kreuzungslayouts.

⁵In dieser Arbeit werden nur die Kreuzungen IV bis VI betrachtet. Ich habe die Bezeichnungen dieser Kreuzungen nicht angepasst, damit die Konsistenz mit den Evaluationsdaten gewahrt bleibt. Die Kreuzungen I bis III unterscheiden sich von den Kreuzungen IV bis VI nur bezüglich der Länge der inneren Kantenspuren.

8. Evaluation

		IV	V	VI
Anzahl	Richtungen	4	4	4
	Äußere Kantenspuren	2	2	2
	Innere eingehende Kantenspuren	2	2	2
	Abbiegerichtungen linke Spur	2	1	1
	Abbiegerichtungen rechte Spur	2	2	2
	Innere ausgehende Kantenspuren	2	2	1
	Distanzen	Äußere Kantenspurlänge	40m	40m
	Übergang	10m	10m	10m
	Innere Kantenspurlänge	900m	900m	900m
	Kreuzungsradius	25m	25m	25m
Verkehrsquellen	Anzahl Verkehrsquellen	8	8	8
	Position	0m	0m	0m
	Mittlere Wertschätzung [€/s]	0,01	0,01	0,01
Verkehrsstärke		{200, 400, ..., 3200}		
Position Verkehrsschild				
„Agentengesteuerte Kreuzung“		50m	50m	50m

Tabelle 8.1.: Übersicht der Kreuzungsparameter für die verschiedenen Kreuzungslayouts

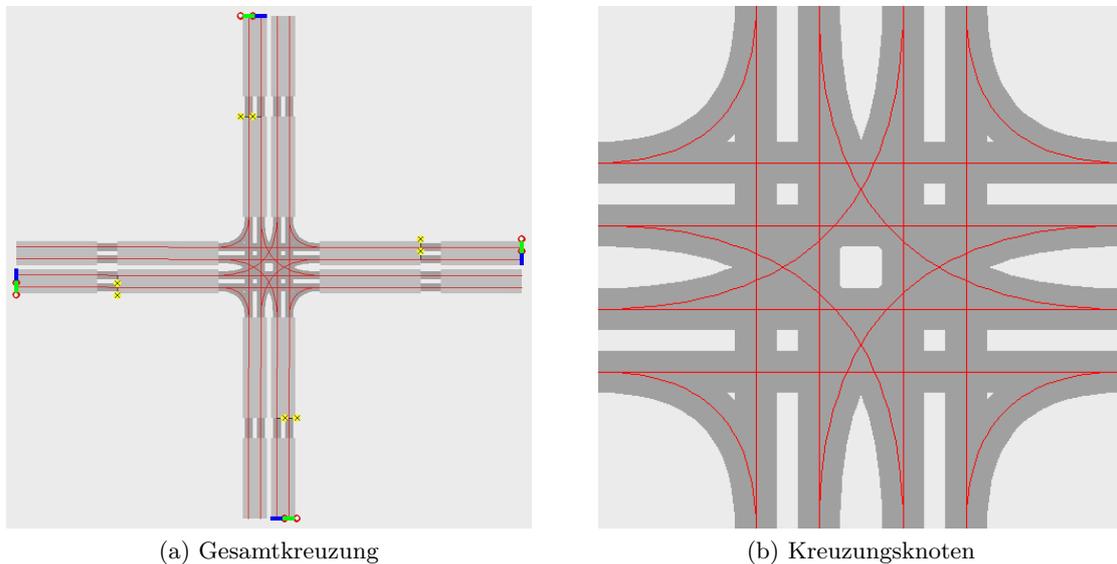
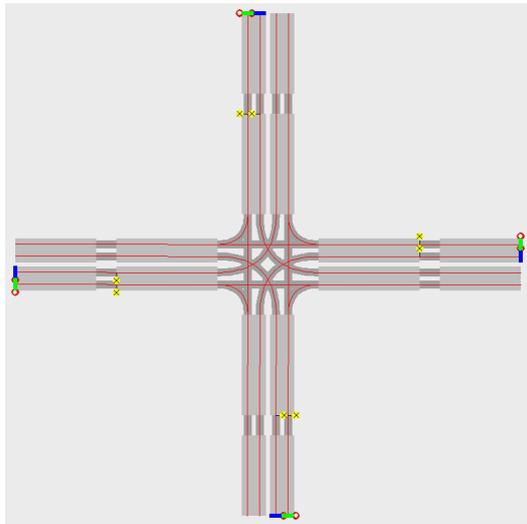
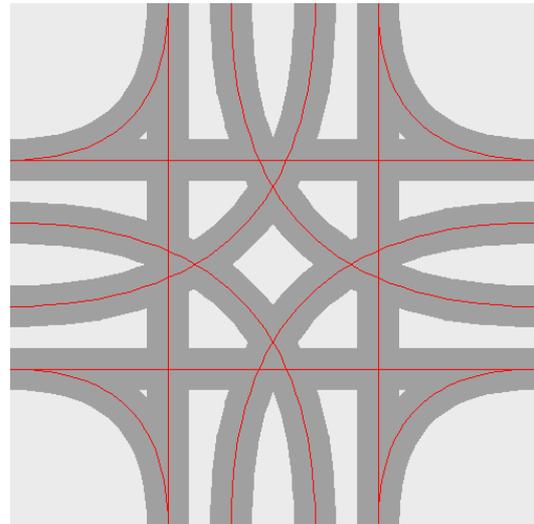


Abbildung 8.2.: Kreuzung mit linker Geradeauspur (Kreuzung IV)

8. Evaluation

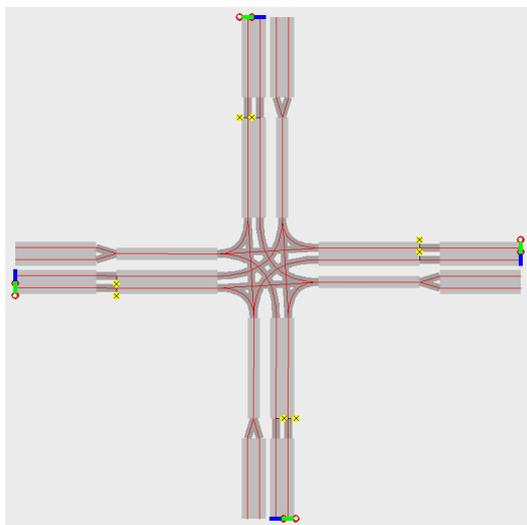


(a) Gesamtkreuzung

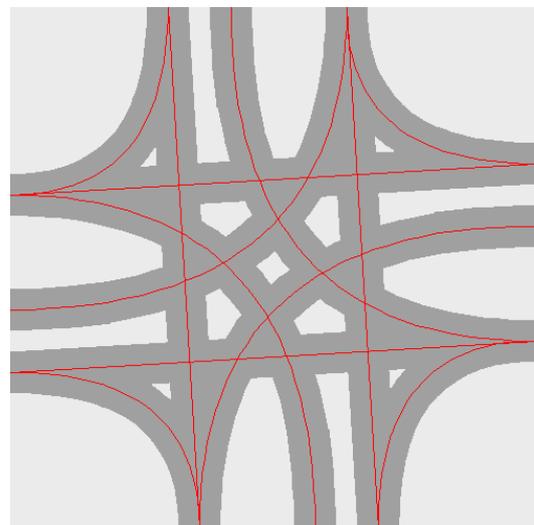


(b) Kreuzungsknoten

Abbildung 8.3.: Kreuzung ohne linke Geradeauspur (Kreuzung V)



(a) Gesamtkreuzung



(b) Kreuzungsknoten

Abbildung 8.4.: Kreuzung ohne linke Geradeauspur und mit einer ausgehenden inneren Kreuzungsspur (Kreuzung VI)

Geschwindigkeit

Alle Fahrzeuge betreten die Nachbarschaft mit 50 km/h. Dies entspricht der Höchstgeschwindigkeit in Deutschland innerhalb geschlossener Ortschaften. Deswegen verwende ich dies auch als Höchstgeschwindigkeit in der gesamten Nachbarschaft. Auf der eigentlichen Kreuzung wurde die Höchstgeschwindigkeit auf 45 km/h reduziert.

8.3.2. Verkehr

Verkehrsaufkommen

Zur Beschreibung des Verkehrsaufkommen einer Kreuzung mit vier Richtungen unterstelle ich der Einfachheit halber, dass sich in jeder der entsprechenden Richtungen eine Verkehrszone befindet. Ich bezeichne diese Verkehrsquellen entsprechend ihrer Lage mit den Himmelsrichtungen Norden, Süden, Westen und Osten. Mit Hilfe dieser vier Verkehrszonen modelliere ich das Verkehrsaufkommen in Form einer Quelle-Ziel-Matrix (OD-Matrix) (siehe Definition 2.8).

OD-Matrix In den bisher beschriebenen Kreuzungen betreten Fahrzeuge aus vier verschiedenen Himmelsrichtungen die Nachbarschaft und verlassen diese ebenfalls in vier verschiedene Himmelsrichtungen. Für jede Richtung existieren zwei eingehende äußere Kantenspuren, auf der sich jeweils eine eigene Verkehrsquelle befindet. Da jedoch ein Fahrzeug im Allgemeinen die Spur außerhalb der Nachbarschaft wechseln kann, fasse ich in der OD-Matrix diese beiden Verkehrsquellen zusammen. Anschließend erkläre ich, wie sich der Verkehr aus einer Richtung auf die beiden Verkehrsquellen verteilt.

Eine OD-Matrix sagt nichts darüber aus, welche Route ein Fahrzeug zwischen einer Verkehrsquelle und einer Verkehrssenke wählt. Dies bedeutet, dass für jede OD-Beziehung, d. h. für jede Kombination einer Verkehrsquelle und einer Verkehrssenke der OD-Matrix mehrere Routen existieren können.

Im Folgenden werden ausschließlich symmetrische OD-Matrizen betrachtet. Das heißt, die Verkehrsstärke aus jeder Richtung (Zeilensumme) und in jede Richtung (Spaltensumme) ist gleich. Dabei wird immer unterstellt, dass 0% der Fahrzeuge wenden, 25% der Fahrzeuge links- bzw. rechtsabbiegen und die restlichen 50% der Fahrzeuge geradeaus fahren. Tabelle 8.2 zeigt eine solche Matrix am Beispiel der Gesamtverkehrsstärke von 1600 Fzg./h.

	Ziel	N	O	S	W	Σ
Quelle						
N		0	100	200	100	400
O		100	0	100	200	400
S		200	100	0	100	400
W		100	200	100	0	400
Σ		400	400	400	400	1600

Tabelle 8.2.: Beispielhafte OD-Matrix bei einer Gesamtverkehrsstärke von 1600 Fzg./h

Verkehrsverteilung und Routenwahl In den betrachteten Kreuzungen gibt es immer zwei mögliche Verkehrsquellen pro Richtung. Je nach Kreuzung muss die Verkehrsstärke jedoch unterschiedlich auf die beiden Verkehrsquellen aufgeteilt werden, um eine bestimmte OD-Matrix korrekt abzubilden. Verkehrsquellen, die sich auf einer linken bzw. rechten äußeren eingehenden Kantenspur befinden, bezeichne ich als linke bzw. rechte Verkehrsquelle.

Jedes Fahrzeug wird durch eine Verkehrsquelle auf einer äußeren eingehenden Kantenspur erzeugt und verlässt die Nachbarschaft über eine äußere ausgehende Kantenspur. In der Kreuzung IV gibt es für jedes Fahrzeug immer zwei mögliche äußere ausgehende Kantenspuren, über die ein Fahrzeug die Nachbarschaft in einer bestimmten Richtung verlassen kann (Abbildung 8.2a). Jedem Fahrzeug stehen also immer zwei Routen zur Auswahl.

In der Kreuzung V steht Fahrzeugen aus linken Verkehrsquellen jedoch nur noch eine Route zur Verfügung. Alle Fahrzeuge biegen in diesem Fall links ab. Fahrzeuge aus einer rechten Verkehrsquelle können immer noch zwischen zwei Routen wählen. Mit der einen Route fahren sie geradeaus; mit der anderen biegen sie rechts ab (Abbildung 8.3a).

In der Kreuzung VI steht Fahrzeugen aus linken Verkehrsquellen zwei Routen zur Verfügung. Für beide Routen müssen diese Fahrzeuge jedoch links abbiegen. Fahrzeugen aus einer rechten Verkehrsquelle stehen vier äußere ausgehenden Kantenspuren, und damit auch vier Routen, zur Verfügung. Bei zwei Routen fahren die Fahrzeuge geradeaus. Bei den anderen zwei biegen die Fahrzeuge rechts ab (Abbildung 8.4a).

Um eine bestimmte OD-Matrix korrekt abzubilden, muss zunächst die Verkehrsstärke aus einer Richtung auf die beiden Verkehrsquelle verteilt werden. Da die Routenwahl zufällig bestimmt wird, muss zusätzlich die Wahrscheinlichkeit jeder zur Verfügung stehenden Routen für jede Verkehrsquelle bestimmt werden.

In der Kreuzung IV wird der Geradeausverkehr gleichmäßig auf beide Verkehrsquellen verteilt. Dies bedeutet, dass auf beiden Verkehrsquellen einer Richtung dieselbe Verkehrsstärke erzeugt wird, also jeweils 12,5% der Gesamtverkehrsstärke und jede der möglichen zwei Routen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit gewählt wird. Dies führt dazu, dass 25% aller Fahrzeuge links bzw. rechts abbiegen und 50% aller Fahrzeuge geradeaus fahren.

Da in den Kreuzungen V und VI Fahrzeuge aus linken Verkehrsquellen nur links abbiegen können, erzeugen in diesem Fall linke Verkehrsquellen nur 25% der Verkehrsstärke einer Richtung, also 6,25% der Gesamtverkehrsstärke. In der Kreuzung VI werden die beiden möglichen Routen jeweils mit gleicher Wahrscheinlichkeit gewählt.

Um die Verkehrsstärke einer Richtung korrekt abzubilden, erzeugen rechte Verkehrsquellen in den Kreuzungen V und VI in diesem Fall 75% der Verkehrsstärke einer Richtung, also 18,75% der Gesamtverkehrsstärke. In der Kreuzung V wird die mögliche Geradeausroute mit der Wahrscheinlichkeit $2/3$ gewählt, die mögliche Rechtsabbiegeroute mit der Wahrscheinlichkeit $1/3$. In der Kreuzung VI werden die beiden möglichen Geradeausrouten jeweils mit der Wahrscheinlichkeit $1/3$ und die beiden möglichen Rechtsabbiegerouten jeweils mit der Wahrscheinlichkeit $1/6$ gewählt. Damit wird die OD-Matrix korrekt abgebildet.

Tabelle 8.3 fasst die prozentuale Verteilung der Gesamtverkehrsstärke auf die verschiedenen Routen zusammen.

8. Evaluation

		Verkehrsstärke	links	geradeaus	rechts
Kreuzung IV	links	12,50%	6,25%	6,25%	0,00%
Kreuzung IV	rechts	12,50%	0,00%	6,25%	6,25%
Kreuzung V	links	6,25%	6,25%	0,00%	0,00%
Kreuzung V	rechts	18,75%	0,00%	12,50%	6,25%
Kreuzung VI	links	6,25%	6,25%	0,00%	0,00%
Kreuzung VI	rechts	18,75%	0,00%	12,50%	6,25%

Tabelle 8.3.: Verteilung der Verkehrsstärke und Abbiegeverteilung relativ zur Gesamtverkehrsstärke

Beispiel 8.1. Sei die Gesamtverkehrsstärke 1600 Fzg./h. Dann beträgt die Verkehrsstärke aus jeder Richtung 400 Fzg./h. Für die Kreuzung IV erzeugt jede Verkehrsquelle im Mittel 200 Fzg./h. Für die übrigen Kreuzungen erzeugt die jeweils linke Verkehrsquelle 100 Fzg./h und die jeweils rechte Verkehrsquelle 300 Fzg./h. In allen Fällen biegen damit 100 Fahrzeuge aus jeder Richtung links ab. 200 Fahrzeuge fahren geradeaus und 100 Fahrzeuge biegen rechts ab.

Zufallsparameter

Zwischenankunftszeit Jede Verkehrsquelle berechnet die Zwischenankunftszeit, also die Zeit, die vergeht, bevor das nächste Fahrzeug die Nachbarschaft betritt, mit einer Exponentialverteilung mit gegebenem Mittelwert $\frac{1}{\lambda}$. Die Exponentialverteilung wird sowohl in der Warteschlangentheorie als auch beim Maschinen-Scheduling für Ankunftsprozesse sehr häufig verwendet [Pin02].

Der Mittelwert für die Zwischenankunftszeit einer Verkehrsquelle entspricht dem Kehrwert ihrer Verkehrsstärke.

Beispiel 8.2. Sei die Verkehrsstärke einer Verkehrsquelle 300 Fzg./h. Dann beträgt der Mittelwert für die Zwischenankunftszeit $\frac{1h}{300Fzg.} = \frac{3600s}{300Fzg.} = 12s/Fzg.$

Für jedes Fahrzeug einer Verkehrsquelle bestimmt sich damit die Startzeit als Summe der Startzeit des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs und der zufällig ermittelten Zwischenankunftszeit.

Routenwahl Für jedes Fahrzeug werden die möglichen Verkehrssenken, also ausgehende äußere Kantenspurten zufällig gewählt. Die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Verkehrssenke berechnet sich aus der OD-Matrix wie zuvor beschrieben. Falls für eine ausgehende Richtung mehrere Verkehrssenken existieren, wird jede dieser Verkehrssenken mit gleicher Wahrscheinlichkeit gewählt. Falls mehrere Routen zwischen einer Verkehrsquelle und einer Verkehrssenke existieren, so wird jede dieser Routen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit gewählt. Dies ist jedoch in den Kreuzungsszenarien IV, V und VI nicht der Fall.

Fahrzeugtyp, Fahrertyp Für jedes Fahrzeug wird die Fahrzeugklasse, der Fahrzeugtyp und der Fahrertyp ebenfalls zufällig bestimmt. Die Tabelle B.1 beschreibt die Eigenschaften der verschiedenen Fahrzeugklassen. Die Spalte „Relative Häufigkeit“ beschreibt die relative Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Fahrzeugklasse erzeugt wird. Tabelle B.2 beschreibt die Eigenschaften der einzelnen Fahrzeugtypen. Die Spalte „Relative Häufigkeit“ beschreibt die relative Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Fahrzeugtyp einer bestimmten Fahrzeugklasse erzeugt wird (siehe Anhang B).

Grundsätzlich können verschiedene Fahrertypen verwendet werden. Um die verschiedenen Experimente jedoch nicht auch noch mit unterschiedlichen Fahrertypen zu belasten, wurde nur ein einziger Fahrertyp verwendet (siehe Anhang B). Dieser Fahrer verlässt sich auf sein A3C-System und greift nicht übersteuernd ins Fahrverhalten ein.

Wertschätzung pro Sekunde Die Wertschätzung eines Fahrzeugs für eine reduzierte Wartezeit wird ebenfalls mit Hilfe einer Exponentialverteilung mit Mittelwert $\frac{1}{\lambda} = 0.01 \text{ €/s}$ zufällig bestimmt. Dieser Wert wurde willkürlich gewählt, da noch keine empirischen Daten über die Verteilung der Wertschätzung für eine geringe Wartezeit vorliegen.

Bietstrategie Solange ich noch keine realistischen Bietstrategien und ihre Verteilung kenne, unterstelle ich die klassischen Annahmen aus dem Mechanismenentwurf (siehe Abschnitt 6.1.2): Risikoneutralität (Annahme 15), ausreichend hohes Budget (Annahme 16), unabhängige (Annahme 17) und gleiche Verteilung der Wertschätzung (Annahme 18). Außerdem nehme ich an, dass jedes Fahrzeug auch seine tatsächliche Wertschätzung bietet (Annahme 20: *Fahrzeuge bieten ihre tatsächliche Wertschätzung*), auch wenn der Mechanismus nicht anreizkompatibel ist. Frühere Experimente [SB08a] haben gezeigt, dass geringere Gebote als die tatsächliche Wertschätzung keinen signifikanten Unterschied bewirken. Aus diesem Grund betrachte ich geringere Gebote in den folgenden Experimenten nicht.

8.3.3. Simulation

In einem Simulationslauf werden die Daten aller Fahrzeuge ausgewertet, die die Nachbarschaft verlassen. Jeder Simulationslauf simuliert 23 Minuten. Die Fahrzeuge, die innerhalb der ersten drei Minuten die Nachbarschaft verlassen, werden jedoch ignoriert, um Starteffekte zu vermeiden. D. h., dass in jedem Simulationslauf die Fahrzeuge über einen Zeitraum von 20 Minuten beobachtet werden.

Wie bereits erwähnt, verwende ich ein zeitdiskretes Simulationsmodell. Eine Simulation besteht also aus aufeinanderfolgenden Schritten. In jedem Schritt wird die Veränderung des Verkehrs für die Dauer des Simulationsschritts simuliert. In früheren Experimenten hat sich als Dauer eines Simulationsschritts der Wert $400ms$ bewährt. Deswegen verwende ich diesen Wert auch in den folgenden Experimenten.

Die Mindestrealzeit pro Simulationsschritt beschreibt die Zeit, die mindestens vergehen muss, bevor der nächste Simulationsschritt begonnen werden kann. Die Mindestrealzeit ist damit eine untere Schranke für die tatsächliche Ausführungsdauer eines Simulationsschritts. Dies stellt sicher, dass den einzelnen Fahrerassistenzagenten genügend

8. Evaluation

Zeit zur Reaktion bleibt. Für die folgenden Experimente wurden abhängig vom Verkehrsaufkommen $200ms$, $300ms$ oder $400ms$ als Mindestrealzeit pro Simulationsschritt gewählt.

Simulationsläufe

Aufgrund der vielen zufällig gewählten Simulationsparametern, wiederhole ich jede Simulation fünf Mal. Für jeden dieser fünf Simulationsläufe verwende ich eine unterschiedliche Saat. Alle übrigen Einstellungen bleiben gleich.

Jedoch verwende ich immer wieder dieselben fünf Werte für die Saat. Damit sind bei gleichem Kreuzungsszenario und gleichem Verkehrsaufkommen alle zufällig gewählten Eigenschaften eines Fahrzeugs in jedem i . Simulationslauf gleich. Dies erleichtert den Vergleich unterschiedlicher Simulationen, in dem ich die i . Simulationsläufe jeweils paarweise vergleiche.

Referenzmechanismus

Lichtsignalanlagen sind eine gängige Art der Kreuzungssteuerung bei Kreuzungen. Bei einer Kreuzung, die durch Lichtsignalanlagen gesteuert wird, werden die Phasen abhängig vom erwarteten Verkehr aus den einzelnen Richtungen berechnet. Die Dauer der einzelnen Phasen lässt sich z. B. mit Hilfe des sogenannten AKF-Schema [Gle72, PSB11] errechnen.

Beim AKF-Schema werden sogenannte kritische Verkehrsströme bestimmt, die miteinander in Konflikt stehen und deshalb die Kreuzung nacheinander überqueren müssen. Z. B. stehen Fahrzeuge, die sich einer Kreuzung auf der linken Spur nähern und links abbiegen möchten, in Konflikt mit entgegenkommenden Fahrzeugen, die geradeaus fahren möchten.

Ich verwende einen auf dem AKF-Schema basierenden Mechanismus als Referenzmechanismus. Ich bezeichne diesen Mechanismus im Folgenden als Referenzmechanismus Ampel.

8.4. Mechanismenvergleich

In diesem Experiment untersuche ich die Zeitslotanfrage (TSR), die Zweitpreisauktion mit Unterstützung (ITSA Valuation) und die Verzögerungskostenminimierung (ITSA Delay Cost) bezüglich gemessenem Kreuzungsdurchsatz, Effektivität, Wartezeit und Kraftstoffverbrauch.

8.4.1. Beschreibung des Experiments

Ich vergleiche TSR, ITSA Valuation und ITSA Delay Cost sowohl gegen den Referenzmechanismus Ampel als auch untereinander. Dabei wird immer das Kreuzungslayout IV (siehe Abschnitt 8.3.1) verwendet.

TSR, ITSA Valuation und ITSA Delay Cost werden jeweils für alle eingeführten Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung untersucht, also für die exklusive Nutzung der Kreuzung (IE), die exklusive Nutzung der Kreuzungsspur (LE), die gemeinsame Nutzung derselben Kreuzungsspur (LS) und für die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) (siehe Abschnitt 6.6.3).

Beim Referenzmechanismus Ampel ist der Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung fest. Während einer Grünphase dürfen Fahrzeuge der entsprechenden Aufstellspur die Kreuzung überqueren. Die Fahrzeuge müssen dazu nicht warten bis vorausfahrende Fahrzeuge die Kreuzung vollständig überquert haben. Diese Nutzung ist der gemeinsamen Nutzung derselben Kreuzungsspur (LS) sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass bei LS keine festen Umschaltzeiten vorliegen und dass für das Kreuzungslayout IV beim Referenzmechanismus Ampel immer beide Spuren einer Richtung gleichzeitig ihre Grünphase beginnen, so dass in dieser Zeit keine Fahrzeuge aus anderen Richtungen die Kreuzung überqueren dürfen. Bei LS kann dies durchaus der Fall sein, wenn Spuren keine gemeinsamen Konfliktbereiche besitzen.

Damit ergeben sich die folgenden 13 Messreihen: TSR (IE), TSR (LE), TSR (LS), TSR (CAE), ITSA Valuation (IE), ITSA Valuation (LE), ITSA Valuation (LS), ITSA Valuation (CAE), ITSA Delay Cost (IE), ITSA Delay Cost (LE), ITSA Delay Cost (LS), ITSA Delay Cost (CAE) und Ampel.

Dabei wird jeweils die Gesamtverkehrsstärke beginnend von 200 Fzg./h schrittweise um 200 Fzg./h bis auf 3200 Fzg./h erhöht. Noch höhere Gesamtverkehrsstärken wurden nicht untersucht, da der Referenzmechanismus Ampel spätestens ab einer Gesamtverkehrsstärke von 2600 Fzg./h die erzeugte Gesamtverkehrsstärke nicht mehr bewältigen kann. Ich begründe dies in Abschnitt 8.4.2 ausführlich.

8.4.2. Ergebnisse des Mechanismenvergleichs

Der Mechanismenvergleich führt zu den folgenden Ergebnissen.

Gemessener Kreuzungsdurchsatz

Abbildung 8.5 beschreibt den durchschnittlichen gemessenen Kreuzungsdurchsatz für die 13 untersuchten Messreihen. Dabei wurden in jedem Simulationslauf die Fahrzeuge gezählt, die die Nachbarschaft in den relevanten 20 Minuten eines Simulationslaufes verlassen haben. Unter der Annahme 1 ist dies äquivalent zur Definition 2.10.

Solange die Kreuzung nicht überlastet ist, kann man erwarten, dass der gemessene Kreuzungsdurchsatz ungefähr der erzeugten Gesamtverkehrsstärke entspricht. Das heißt, im Mittel verlassen gleich viele Fahrzeuge die Nachbarschaft wie sie betreten. Die Anzahl der Fahrzeuge, die sich in der Nachbarschaft befinden, bleibt im Mittel konstant.

Sobald in Abbildung 8.5 der gemessene Kreuzungsdurchsatz nicht mehr linear mit der erzeugten Gesamtverkehrsstärke wächst, sondern abflacht, beginnen die Schlangen vor der Kreuzung zu wachsen. Mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke nähert sich der gemessene Kreuzungsdurchsatz der Kapazität der Kreuzung an.

8. Evaluation

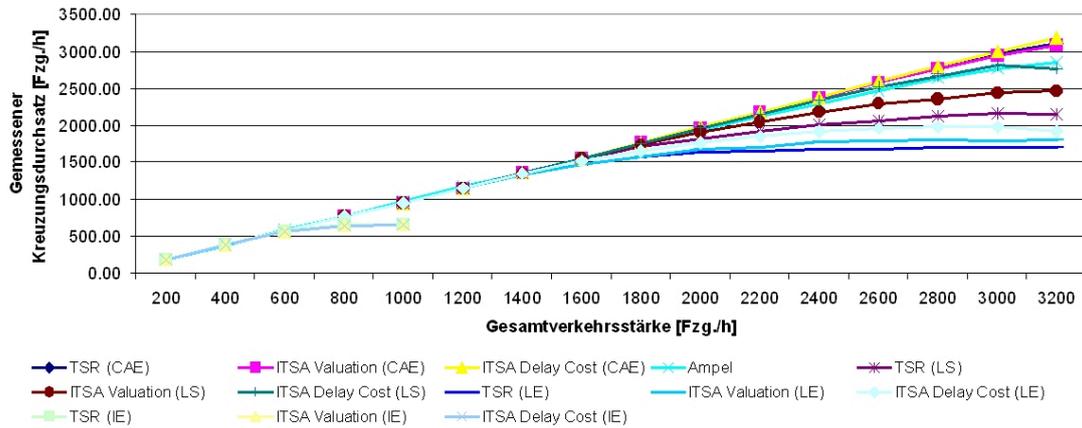


Abbildung 8.5.: Durchschnittlicher gemessener Kreuzungsdurchsatz

Abbildung 8.6 zeigt für alle 13 Messreihen die Differenz zwischen erzeugter Gesamtverkehrsstärke und gemessenem Kreuzungsdurchsatz in Relation zur erzeugten Gesamtverkehrsstärke. Dies entspricht der relativen Zunahme der sich in der Nachbarschaft befindlichen Fahrzeuge.

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampel	0.0670	0.0715	0.0310	0.0258	0.0250	0.0245	0.0331	0.0365	0.0357	0.0307	0.0335	0.0413	0.0527	0.0576	0.0790	0.1064
TSR (CAE)	0.0940	0.0365	0.0540	0.0348	0.0478	0.0400	0.0284	0.0303	0.0213	0.0115	0.0081	0.0108	0.0070	0.0085	0.0118	0.0269
ITSA Valuation (CAE)	0.0940	0.0365	0.0540	0.0348	0.0478	0.0410	0.0289	0.0295	0.0237	0.0139	0.0089	0.0117	0.0086	0.0098	0.0182	0.0361
ITSA Delay Cost (CAE)	0.0940	0.0365	0.0540	0.0348	0.0478	0.0415	0.0289	0.0295	0.0217	0.0118	0.0062	0.0095	0.0033	0.0021	0.0012	0.0034
TSR (LS)	0.0940	0.0365	0.0530	0.0355	0.0514	0.0435	0.0357	0.0400	0.0460	0.0871	0.1243	0.1620	0.2055	0.2416	0.2794	0.3265
ITSA Valuation (LS)	0.0910	0.0355	0.0520	0.0355	0.0508	0.0400	0.0336	0.0351	0.0367	0.0490	0.0705	0.0935	0.1194	0.1617	0.1864	0.2279
ITSA Delay Cost (LS)	0.0940	0.0365	0.0530	0.0355	0.0496	0.0415	0.0297	0.0306	0.0263	0.0196	0.0193	0.0240	0.0289	0.0490	0.0622	0.1347
TSR (LE)	0.0940	0.0365	0.0530	0.0355	0.0508	0.0450	0.0494	0.0763	0.1267	0.1958	0.2484	0.2993	0.3518	0.3897	0.4304	0.4652
ITSA Valuation (LE)	0.0910	0.0355	0.0520	0.0363	0.0508	0.0455	0.0486	0.0763	0.1240	0.1609	0.2260	0.2593	0.3093	0.3559	0.4044	0.4334
ITSA Delay Cost (LE)	0.0940	0.0365	0.0530	0.0363	0.0502	0.0435	0.0391	0.0513	0.0630	0.1204	0.1608	0.1963	0.2417	0.2944	0.3422	0.4008
TSR (IE)	0.0940	0.0355	0.0550	0.1765	0.3362											
ITSA Valuation (IE)	0.0910	0.0355	0.0560	0.1960	0.3448											
ITSA Delay Cost (IE)	0.0940	0.0355	0.0560	0.1870	0.3394											

Abbildung 8.6.: Relative Zunahme der sich in der Nachbarschaft befindlichen Fahrzeuge

Im Idealfall wäre der gemessene Kreuzungsdurchsatz gleich der erzeugten Gesamtverkehrsstärke. Dies ist nicht der Fall, da auch nach den ersten drei Simulationsminuten die Verkehrsdichte in der Nachbarschaft immer noch zunimmt, ohne dass die Kreuzung dadurch unbedingt überlastet wäre. Die Nachbarschaft kann also mehr Fahrzeuge aufnehmen, ohne dass der Verkehrsfluss dadurch zum Erliegen käme.

Für höhere Gesamtverkehrsstärken schwächt sich dieser Effekt zunächst ab, d. h. die relative Differenz wird geringer (siehe Abbildung 8.6). Steigt die Gesamtverkehrsstärke jedoch weiter an, erhöht sich auch wieder die relative Differenz. Spätestens, wenn dieser Fall eintritt, wachsen die Fahrzeugschlangen vor der Kreuzung dauerhaft. Der verwendete Mechanismus kommt dann nicht mehr mit der erzeugten Gesamtverkehrsstärke zurecht.

Betrachtet man die einzelnen Messreihen, so zeigt sich, dass bei *IE* der gemessene Kreuzungsdurchsatz für TSR, ITSA Valuation und ITSA Delay Cost bereits bei

8. Evaluation

800 Fzg./h im Vergleich zu *LE*, *LS* und *CAE* deutlich zurückfällt. Bei 1000 Fzg./h erhöht sich der gemessene Kreuzungsdurchsatz nur noch unwesentlich (siehe Abbildung C.1). Dies bedeutet, dass bereits bei 800 Fzg./h die Warteschlangen vor der Kreuzung immer länger werden. Deswegen wurde *IE* nur bis zur Gesamtverkehrsstärke von 1000 Fzg./h untersucht.

Bis zur erzeugten Gesamtverkehrsstärke von 1200 Fzg./h unterscheidet sich der gemessene Kreuzungsdurchsatz für *LE* nur unwesentlich von den Messreihen für *LS* und *CAE*. Ab 1400 Fzg./h fällt der gemessene Kreuzungsdurchsatz zurück, das heißt, die Menge der Fahrzeuge in der Nachbarschaft nimmt zu. TSR (*LE*) und ITSA Valuation (*LE*) unterscheiden sich ab 1800 Fzg./h und ITSA Delay Cost (*LE*) ab 2000 Fzg./h signifikant vom gemessenen Kreuzungsdurchsatz des Referenzmechanismus Ampel. Spätestens ab dann kommen diese Mechanismen nicht mehr mit der erzeugten Gesamtverkehrsstärke zurecht.

Im Vergleich zur Ampel zeigt sich für *LS* und *CAE*, dass TSR (*LS*) ab 2000 Fzg./h und ITSA Valuation (*LS*) ab 2400 Fzg./h signifikant hinter den Referenzmechanismus Ampel zurückfallen. ITSA Delay Cost (*LS*) unterscheidet sich bis zur maximalen betrachteten Gesamtverkehrsstärke nicht signifikant vom Referenzmechanismus Ampel. Für TSR (*CAE*) und ITSA Delay Cost (*CAE*) ist der gemessene Durchsatz ab 2600 Fzg./h und für ITSA Valuation (*CAE*) ab 2800 Fzg./h signifikant besser als für den Referenzmechanismus Ampel.

Ab einer Gesamtverkehrsstärke von 3200 Fzg./h liegt die relative Differenz für die Ampel und für ITSA Delay Cost (*LS*) bereits über 10%. Das heißt, dass die Ampel und ITSA Delay Cost (*LS*) spätestens ab dann mit der erzeugten Gesamtverkehrsstärke nicht mehr zurecht kommen.

TSR (*CAE*), ITSA Valuation (*CAE*) und ITSA Delay Cost (*CAE*) kommen mit höheren Gesamtverkehrsstärken deutlich besser als die Ampel zurecht. Die relative Differenz wächst für TSR (*CAE*) und ITSA Valuation (*CAE*) erst ab 3200 Fzg./h über 2%. Für ITSA Delay Cost (*CAE*) beginnt die relative Differenz erst ab 3200 Fzg./h anzusteigen und liegt bei 3200 Fzg./h immer noch deutlich unter 1%.

Wenn der gemessene Kreuzungsdurchsatz sich signifikant von der Ampel unterscheidet bzw. wenn über 10% der erzeugten Fahrzeugmengen in der Nachbarschaft verbleiben, ist eine sinnvolle Bewältigung des erzeugten Verkehrs nicht mehr möglich. Abbildung 8.7 listet für die einzelnen Messreihen sinnvolle obere Schranken der erzeugten Gesamtverkehrsstärke auf. Für höhere Gesamtverkehrsstärken kann ausgeschlossen werden, dass der Mechanismus die Gesamtverkehrsstärke noch dauerhaft bewältigen kann.

Fasst man die bisherigen Ergebnisse zusammen, so zeigt sich, dass alle Mechanismen bei höheren Graden der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung auch höhere erzeugte Gesamtverkehrsstärken bewältigen können. Vier Mechanismen können mit dem Referenzmechanismus Ampel bezüglich Kreuzungsdurchsatz auch für hohe Gesamtverkehrsstärken konkurrieren, nämlich ITSA Delay Cost (*LS*), TSR (*CAE*), ITSA Valuation (*CAE*) und ITSA Delay Cost (*CAE*). ITSA Delay Cost führt jeweils zu besseren Ergebnissen als TSR und ITSA Valuation.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für den gemessenen Kreuzungsdurchsatz findet sich im Anhang: In Abbildung C.1 werden die

8. Evaluation

Messreihe	Gesamtverkehrsstärke
Ampel	3000 Fzg./h
TSR (CAE)	3200 Fzg./h
ITSA Valuation (CAE)	3200 Fzg./h
ITSA Delay Cost (CAE)	3200 Fzg./h
TSR (LS)	1800 Fzg./h
ITSA Valuation (LS)	2200 Fzg./h
ITSA Delay Cost (LS)	3000 Fzg./h
TSR (LE)	1600 Fzg./h
ITSA Valuation (LE)	1600 Fzg./h
ITSA Delay Cost (LE)	1800 Fzg./h
TSR (IE)	600 Fzg./h
ITSA Valuation (IE)	600 Fzg./h
ITSA Delay Cost (IE)	600 Fzg./h

Abbildung 8.7.: Obere Schranken der erzeugten Gesamtverkehrsstärken für die einzelnen Messreihen

durchschnittlichen Messwerte grafisch und tabellarisch dargestellt. Abbildung C.5 enthält neben den einzelnen Durchschnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle.

Effektivität

Abbildung 8.8 visualisiert die durchschnittliche gewichtete Wartezeit der 13 untersuchten Messreihen.

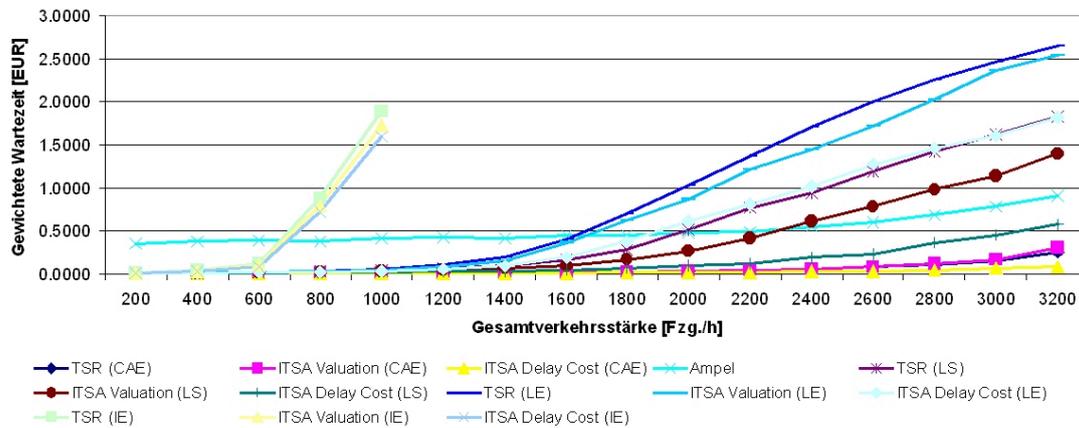


Abbildung 8.8.: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit

Die 13 Messreihen unterscheiden sich bezüglich der gewichteten Wartezeit stark. Die zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle (siehe Abbildung C.6) zeigen, dass diese Unterschiede signifikant sind. Abbildung 8.9 beschreibt die signifikanten Unterschiede der

8. Evaluation

12 Messreihen gegenüber der Messreihe des Referenzmechanismus Ampel bezüglich der gewichteten Wartezeit. Signifikante Reduzierungen werden mit (+) und signifikante Erhöhungen mit (-) dargestellt. Falls die Unterschiede nicht signifikant sind, bleibt die Zelle leer. Gemäß Definition 2.18 bedeutet eine signifikante Reduzierung der gewichteten Wartezeit, dass ein ITC-System, das den untersuchten Mechanismus einsetzt, für die entsprechende Gesamtverkehrsstärke effektiv ist. In diesem Fall kann man auch davon sprechen, dass der untersuchte Mechanismus effektiv ist.

Grad	Mech.	Gesamtverkehrsstärke							
		200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
IE	TSR	+	+	+	-	-	-	-	-
	Val	+	+	+	-	-	-	-	-
	DC	+	+	+	-	-	-	-	-
LE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	
	Val	+	+	+	+	+	+	+	
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
LS	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
CAE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
		1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
IE	TSR	-	-	-	-	-	-	-	-
	Val	-	-	-	-	-	-	-	-
	DC	-	-	-	-	-	-	-	-
LE	TSR	-	-	-	-	-	-	-	-
	Val	-	-	-	-	-	-	-	-
	DC			-	-	-	-	-	-
LS	TSR	+		-	-	-	-	-	-
	Val	+	+					-	-
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
CAE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+

Abbildung 8.9.: Signifikante Unterschiede der gewichteten Wartezeit gegenüber dem Referenzmechanismus Ampel

Alle 12 Messreihen reduzieren die gewichtete Wartezeit im Vergleich zur Messreihe des Referenzmechanismus Ampel für eine Gesamtverkehrsstärke von 200 Fzg./h bis 600 Fzg./h signifikant. Alle drei in dieser Arbeit entwickelten Mechanismen sind daher in diesem Bereich effektiv.

Für höhere Gesamtverkehrsstärken führt die exklusive Nutzung der Kreuzung (TSR (IE), ITSA Valuation (IE), ITSA Delay Cost (IE)) zu einer signifikanten Erhöhung der gewichteten Wartezeit. *IE* ist damit für höhere Gesamtverkehrsstärken nicht mehr

8. Evaluation

effektiv. Dies lässt sich auch mit dem gemessenen Kreuzungsdurchsatz erklären (siehe Abbildung 8.5).

Die anderen 9 Messreihen zeigen für Gesamtverkehrsstärken zwischen 800 Fzg./h und 1400 Fzg./h immer noch eine signifikante Reduktion der gewichteten Wartezeit. Für *LE*, *LS* und *CAE* bleiben in diesem Bereich also TSR, ITSA Valuation und ITSA Delay Cost effektiv.

Ab einer Gesamtverkehrsstärke von 1600 Fzg./h ändert sich das Bild: Bis zur höchsten untersuchten Gesamtverkehrsstärke von 3200 Fzg./h bleiben TSR (*CAE*), ITSA Valuation (*CAE*), ITSA Delay Cost (*CAE*) und ITSA Delay Cost (*LS*) effektiv. Für die übrigen Messreihen ergeben sich bis auf wenige Ausnahmen entweder keine signifikanten Unterschiede oder sogar eine signifikante Erhöhung der gewichteten Wartezeit.

Bei der Betrachtung der relativen Unterschiede zweier Messreihen berechne ich zunächst den Durchschnitt und das 95%-Konfidenzintervall der absoluten Differenzen. Anschließend teile ich den Durchschnittswert sowie die obere und die untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls jeweils durch den Durchschnittswert der Referenzmessreihe. Das dadurch berechnete Intervall ist kein Konfidenzintervall mehr.

Die relativen Unterschiede zum Referenzmechanismus Ampel (Abbildung C.9) sind deutlich. Im Vergleich zur Ampel reduziert bereits der nicht wertschätzungssensitive Mechanismus TSR für *CAE* die gewichtete Wartezeit bei der höchsten untersuchten Gesamtverkehrsstärke von 3200 Fzg./h um 72% (60%; 84%). Für alle anderen Gesamtverkehrsstärken ist der relative Unterschied noch größer. Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fzg./h ist die Reduktion z. B. 93% (83%; 102%)⁶.

ITSA Valuation (*CAE*) führt bei 3200 Fzg./h zu einer Reduktion von 67% (54%; 80%) und bei 2000 Fzg./h zu einer Reduktion von 93% (84%; 102%).

ITSA Delay Cost (*CAE*) führt bei 3200 Fzg./h zu einer Reduktion von 90% (87%; 94%) und bei 2000 Fzg./h zu einer Reduktion von 95% (86%; 104%). ITSA Delay Cost (*LS*) reduziert die gewichtete Wartezeit bei 3200 Fzg./h immerhin noch um 36% (16%; 58%) und bei 2000 Fzg./h um 79% (71%; 86%).

Vergleicht man die beiden wertschätzungssensitiven Mechanismen ITSA Valuation und ITSA Delay Cost gegen den einfachen, nicht wertschätzungssensitiven Mechanismus TSR, so ergeben sich die folgenden Unterschiede (siehe Abbildung C.12).

Die Unterschiede zwischen TSR und ITSA Valuation sind nur für *LS* in den meisten Fällen signifikant. Beispielsweise reduziert ITSA Valuation (*LS*) die gewichtete Wartezeit gegenüber TSR bei 2000 Fzg./h um 48% (28%, 68%).

Die Unterschiede zwischen TSR und ITSA Delay Cost sind jedoch in den meisten Fällen signifikant. Bei 2000 Fzg./h reduziert ITSA Delay Cost (*LE*) die gewichtete Wartezeit um 41% (29%, 53%), ITSA Delay Cost (*LS*) um 81% (54%, 108%) und ITSA Delay Cost (*CAE*) um 33% (24%, 42%). Bei 3200 Fzg./h liegt die Reduktion für ITSA Delay Cost (*CAE*) bei 66% (35%, 96%).

⁶Durch die Art der Berechnung des Intervalls kann die obere Schranke des Intervalls auch über 100% liegen.

8. Evaluation

Diese Ergebnisse zeigen, dass sowohl ITSA Delay Cost als auch ITSA Valuation effektiv sind und damit die wertschätzungsgewichtete Wartezeit reduzieren (Anforderung E1) und für die Kreuzungssteuerung geeignet sind (Anforderung E2).

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für die gewichtete Wartezeit findet sich im Anhang: In Abbildung C.2 sind zusätzlich zur grafischen Darstellung die einzelnen Datenpunkte aufgeführt. Abbildung C.6 enthält neben den einzelnen Durchschnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle. Abbildung C.9 bzw. Abbildung C.12 zeigen die relativen Unterschiede im Vergleich zur Ampel bzw. zu TSR.

Wartezeit

Betrachtet man nicht die gewichtete Wartezeit sondern die (ungewichtete) Wartezeit, so ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 8.10) wie für die gewichtete Wartezeit.

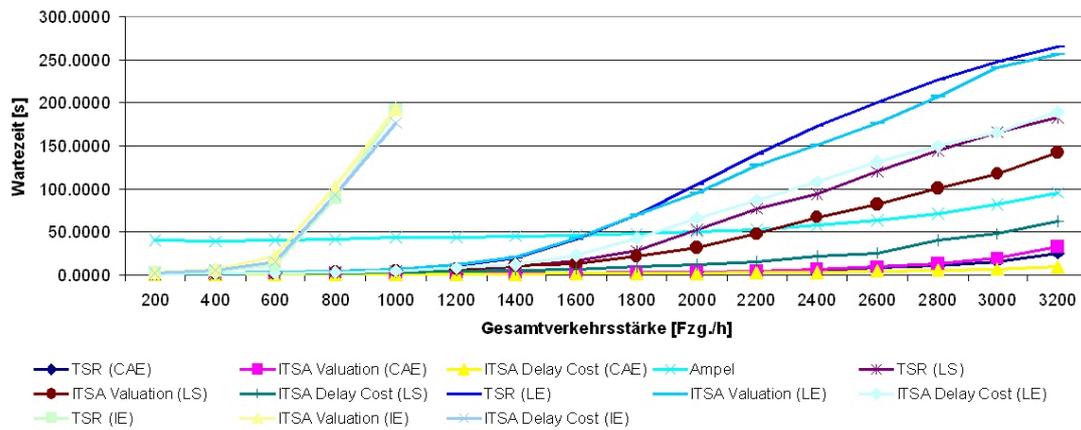


Abbildung 8.10.: Durchschnittliche Wartezeit

Abbildung 8.11 beschreibt die signifikanten Unterschiede der 12 Messreihen gegenüber der Messreihe des Referenzmechanismus Ampel bezüglich der Wartezeit.

Die Betrachtung der signifikanten Unterschiede zeigt, dass sowohl TSR (CAE) als auch ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE) für alle untersuchten Gesamtverkehrsstärken die Wartezeit signifikant reduzieren. Bei LS gilt dies – wie für die gewichtete Wartezeit – auch für ITSA Delay Cost. Für die übrigen Messreihen ergibt sich nur für geringere Gesamtverkehrsstärken eine signifikante Reduktion der durchschnittlichen Wartezeit.

Auch bei den relativen Unterschieden (Abbildung C.10) ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der gewichteten Wartezeit. Im Vergleich zur Ampel reduziert TSR (CAE) die Wartezeit um mindestens 74%. Für ITSA Delay Cost (CAE) ist die Reduktion mindestens 90%, für ITSA Delay Cost (LS) immer noch mindestens 35%.

8. Evaluation

Grad	Mech.	Gesamtverkehrsstärke							
		200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
IE	TSR	+	+	+	-	-	-	-	-
	Val	+	+	+	-	-	-	-	-
	DC	+	+	+	-	-	-	-	-
LE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	
	Val	+	+	+	+	+	+	+	
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
LS	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
CAE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+

Grad	Mech.	Gesamtverkehrsstärke							
		1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
IE	TSR	-	-	-	-	-	-	-	-
	Val	-	-	-	-	-	-	-	-
	DC	-	-	-	-	-	-	-	-
LE	TSR	-	-	-	-	-	-	-	-
	Val	-	-	-	-	-	-	-	-
	DC	-	-	-	-	-	-	-	-
LS	TSR	+		-	-	-	-	-	-
	Val	+	+						
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+
CAE	TSR	+	+	+	+	+	+	+	+
	Val	+	+	+	+	+	+	+	+
	DC	+	+	+	+	+	+	+	+

Abbildung 8.11.: Signifikante Unterschiede der Wartezeit gegenüber dem Referenzmechanismus Ampel

8. Evaluation

Vergleicht man die beiden wertschätzungssensitiven Mechanismen ITSA Valuation und ITSA Delay Cost gegen den einfachen, nicht wertschätzungssensitiven Mechanismus TSR so ergeben sich die folgenden Unterschiede (siehe Abbildung C.13).

ITSA Valuation (CAE) und ITSA Valuation (IE) führen im Vergleich zu TSR fast immer zu einer signifikant höheren Wartezeit. Für ITSA Valuation (LS) ist der Unterschied erst ab 1600 Fzg./h signifikant. In diesen Fällen führt ITSA Valuation jedoch zu einer signifikant geringeren Wartezeit (z. B. 39% (21%, 49%) bei 2000 Fzg./h). Bis 600 Fzg./h führt ITSA Valuation (LE) zu einer signifikant höheren Wartezeit, ab 2000 Fzg./h zu einer signifikant niedrigeren Wartezeit.

ITSA Delay Cost reduziert die Wartezeit für CAE ab 1600 Fzg./h und für LS und LE ab 1200 Fzg./h signifikant. Bei ITSA Delay Cost (IE) sind die Unterschiede meist nicht signifikant. Bei 2000 Fzg./h reduziert ITSA Delay Cost (CAE) die Wartezeit um 19% (14%, 21%), ITSA Delay Cost (LS) um 76% (67%, 82%) und ITSA Delay Cost (LE) um 37% (30%, 42%).

Diese Ergebnisse belegen, dass sowohl ITSA Delay Cost als auch ITSA Valuation die Wartezeit gegenüber der Ampel reduzieren (Anforderung D1) und insbesondere nicht erhöhen (Anforderung E3). Deshalb sind sie für die Kreuzungssteuerung geeignet (Anforderung D3). Die Reduktion der Wartezeit ist ebenfalls ein Indiz dafür, dass auch Fahrzeuge mit geringer Wertschätzung nicht über Gebühr belastet werden (Anforderung J2).

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für die Wartezeit findet sich im Anhang: In Abbildung C.3 sind zusätzlich zur grafischen Darstellung die einzelnen Datenpunkte aufgeführt. Abbildung C.7 enthält neben den einzelnen Durchschnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle. Abbildung C.10 bzw. Abbildung C.13 zeigen die relativen Unterschiede im Vergleich zur Ampel bzw. zu TSR.

Kraftstoffverbrauch

Die untersuchten Messreihen unterscheiden sich auch bezüglich des Kraftstoffverbrauchs (Abbildung 8.12).

Solange die Gesamtverkehrsstärke die Kreuzungskapazität für einen Mechanismus nicht überschreitet (siehe Abbildung 8.7), zeigt sich beim Kraftstoffverbrauch ein etwas anderes Bild. Im Gegensatz zu den vorigen Kennzahlen ist TSR für den Kraftstoffverbrauch allen anderen Mechanismen signifikant überlegen. Dies zeigen die relativen Unterschiede der Messreihen im Vergleich zu TSR (siehe Abbildung C.14).

Einzig die Messreihe ITSA Delay Cost (LS) zeigt ab einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fzg./h sogar einen signifikant niedrigeren Kraftstoffverbrauch als TSR (LS). Dies ist ein weiterer Beleg, dass der Mechanismus ITSA Delay Cost bereits für LS sehr günstige Eigenschaften besitzt.

Für Gesamtverkehrsstärken unterhalb der Kreuzungskapazität gilt fast immer, dass TSR den geringsten Kraftstoffverbrauch aufweist. Danach folgen ITSA Delay Cost, ITSA Valuation und erst dann der Referenzmechanismus Ampel (siehe Abbildung C.11). Beispielsweise bei einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fzg./h benötigen TSR (CAE), ITSA

8. Evaluation

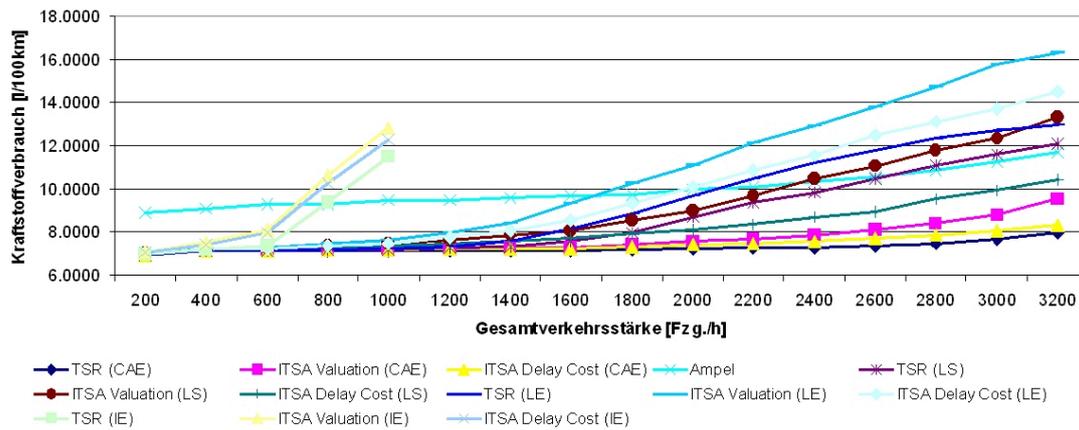


Abbildung 8.12.: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch

Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE) durchschnittlich mindestens 24% weniger Kraftstoff als der Referenzmechanismus Ampel. Für TSR (LS) und ITSA Delay Cost (LS) werden immer noch mindestens 12% weniger Kraftstoff benötigt.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für den Kraftstoffverbrauch findet sich im Anhang: In Abbildung C.4 sind zusätzlich zur grafischen Darstellung die einzelnen Datenpunkte aufgeführt. Abbildung C.8 enthält neben den einzelnen Durchschnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle. Abbildung C.11 bzw. Abbildung C.14 zeigen die relativen Unterschiede im Vergleich zur Ampel bzw. zu TSR.

8.4.3. Zusammenfassung und Bewertung

Es überrascht nicht, dass der Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung einen hohen Einfluss auf die Effektivität der untersuchten Mechanismen hat. Wie erwartet nimmt die Effektivität mit zunehmendem Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung zu. Die geringste Effektivität erhält man demnach für die exklusive Nutzung der Kreuzung (IE) und die größte Effektivität entsteht durch die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE).

Der Vergleich mit dem Referenzmechanismus Ampel zeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelten Mechanismen für die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) effektiv sind, d. h. sie reduzieren die gewichtete Wartezeit im Vergleich zur Ampel für fast alle betrachteten Gesamtverkehrs

Für den Durchsatz, für die (ungewichtete) Wartezeit und für den Kraftstoffverbrauch sind die Ergebnisse ähnlich. Die Mechanismen kommen bei CAE deutlich besser mit höheren Gesamtverkehrsstärken zurecht als die Ampel. ITSA Delay Cost (LS) kann dieselben Gesamtverkehrsstärken wie die Ampel bewältigen. Für die übrigen Mechanismen gilt dies nur bis zu einer bestimmten Gesamtverkehrsstärke.

Solange der Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung mit einer bestimmten Gesamtverkehrsstärke noch zurecht kommt, reduziert die untersuchten Mechanismen auch die Wartezeit deutlich.

Da Fahrzeuge erst kurz vor einer roten Ampel anhalten, kommen sie bei einer Ampel deutlich häufiger zum Stehen als bei den übrigen Mechanismen. Dies wirkt sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch aus. Deswegen reduzieren alle untersuchten Mechanismen den Kraftstoffverbrauch gegenüber der Ampel deutlich.

Wie erwartet, reduzieren die wertschätzungssensitiven Mechanismen die gewichtete Wartezeit gegenüber TSR. Dies gelingt ITSA Delay Cost jedoch deutlich besser als ITSA Valuation. Teilweise erzielt TSR bezüglich der ungewichteten Wartezeit bessere Werte als ITSA Valuation. ITSA Delay Cost reduziert die Wartezeit gegenüber TSR jedoch in vielen Fällen deutlich. Beim Kraftstoffverbrauch spielt TSR seine Stärken aus. Dadurch, dass bei TSR die Fahrzeuge sehr früh über ihren Zeitslot informiert werden, können sie ihr Fahrverhalten sehr früh anpassen. Dies wirkt sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Deswegen fällt der Kraftstoffverbrauch der wertschätzungssensitiven Mechanismen teilweise deutlich höher als bei TSR aus. Der Kraftstoffverbrauch ist in diesen Fällen jedoch immer noch geringer als bei der Ampel.

Beim Vergleich zwischen TSR und ITSA Valuation fallen die Ergebnisse insbesondere für *CAE* weniger deutlich aus, als dies frühere Experimente [SB07, SB08b] vermuten lassen. TSR scheint besonders bei *CAE* durch die Anpassungen bezüglich des Fahrverhaltens vor und während der Überquerung der Kreuzung gegenüber ITSA Valuation aufzuholen (siehe Kapitel 7 und Tabelle B.2) .

Dieses Experiment hat gezeigt, dass es sich lohnen kann, ein ITC-System mit Mechanismen auszustatten, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt werden. Mit diesen Mechanismen können nicht nur die gewichtete Wartezeit, sondern auch die ungewichtete Wartezeit und der Kraftstoffverbrauch bereits für *LS* deutlich verringert werden. Sie erfüllen damit die Anforderungen zur Minimierung der ungewichteten (Meta-Anforderung D) und der gewichteten Reisezeit (Meta-Anforderung E).

8.5. Kreuzungslayoutvergleich

In Abschnitt 8.3.1 habe ich verschiedene Kreuzungslayouts vorgestellt. Im folgenden Experiment untersuche ich, wie sich die Zeitslotanfrage (TSR), die Zweitpreisauktion mit Unterstützung (ITSA Valuation) und die Verzögerungskostenminimierung (ITSA Delay Cost) für diese Kreuzungslayouts verhalten.

8.5.1. Beschreibung des Experiments

Ich vergleiche TSR, ITSA Valuation und ITSA Delay Cost für die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) für das Kreuzungslayout IV (Abbildung 8.2a), für das Kreuzungslayout V (Abbildung 8.3a) und für das Kreuzungslayout VI (Abbildung 8.4a). Wie bereits in Abschnitt 8.3.1 beschrieben, bleibt die zugrunde liegende OD-Matrix (Tabelle 8.2) bei allen drei Kreuzungslayouts unverändert. Die Gesamtverkehrsstärke wird

8. Evaluation

jedoch abhängig vom Kreuzungslayout auf die verschiedenen Routen verteilt (Tabelle 8.3).

Damit ergeben sich die folgenden neun Messreihen: TSR (CAE, IV), TSR (CAE, V), TSR (CAE, VI), ITSA Valuation (CAE, IV), ITSA Valuation (CAE, V), ITSA Valuation (CAE, VI), ITSA Delay Cost (CAE, IV), ITSA Delay Cost (CAE, V) und ITSA Delay Cost (CAE, VI).

Wie bisher wird jeweils die Gesamtverkehrsstärke beginnend von 200 Fzg./h schrittweise um 200 Fzg./h bis auf 3200 Fzg./h erhöht.

8.5.2. Ergebnisse des Kreuzungslayoutvergleichs

Abbildung 8.13 bestätigt die Ergebnisse aus Abschnitt 8.4 im Wesentlichen auch für das Kreuzungslayout V und für das Kreuzungslayout VI. Die Unterschiede zwischen TSR (CAE) und ITSA Valuation (CAE) sind bezüglich der gewichteten Wartezeit unabhängig von der Wahl des Kreuzungslayouts gering, zwischen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE) jedoch deutlich erkennbar (siehe auch Abbildung C.16).

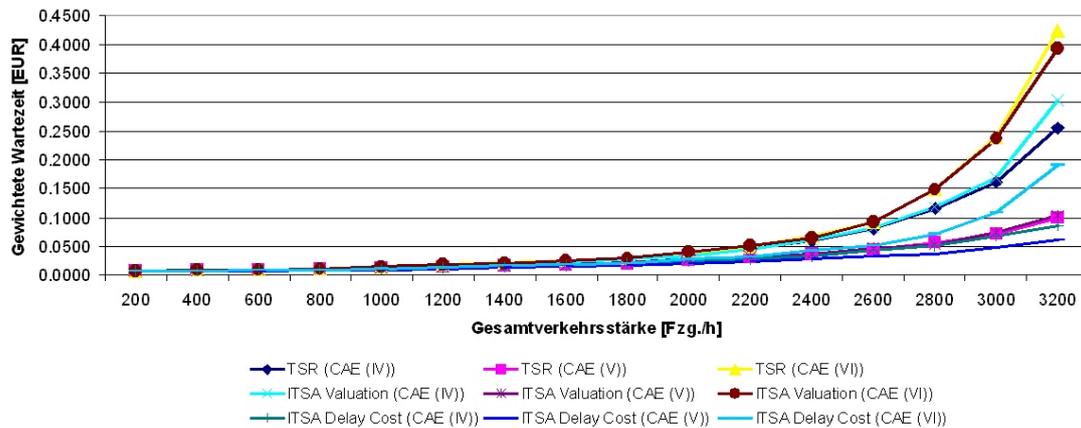


Abbildung 8.13.: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI

Gleichzeitig belegt Abbildung 8.13, dass das Kreuzungslayout V unabhängig vom betrachteten Mechanismus deutlich günstigere Werte für die gewichtete Wartezeit zeigt, als das Kreuzungslayout IV und das Kreuzungslayout VI.

Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 3200 Fzg./h reduziert das Kreuzungslayout V die gewichtete Wartezeit gegenüber dem Kreuzungslayout IV für TSR um 61% (34%, 87%), für ITSA Valuation um 66% (42%, 90%) und für ITSA Delay Cost um 29% (1%, 58%) (siehe Abbildung C.20). Das Kreuzungslayout VI erhöht die gewichtete Wartezeit gegenüber dem Kreuzungslayout IV teilweise deutlich. Die Unterschiede sind jedoch für die gewichtete Wartezeit häufig nicht signifikant. Bei einer Gesamtverkehrsstärke von

8. Evaluation

3200 Fzg./h beträgt die Erhöhung für TSR 67% (17%, 117%), für ITSA Valuation 30% (-10%, 69%) und für ITSA Delay Cost 119% (-10%, 274%).

Betrachtet man die Unterschiede zwischen TSR (CAE), ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE) für die gewichtete Wartezeit, so ergibt sich Folgendes: Die Unterschiede zwischen TSR (CAE) und ITSA Valuation (CAE) sind für keines der untersuchten Kreuzungslayouts signifikant (siehe Abbildung C.19).

Dies gilt jedoch nicht für die Unterschiede zwischen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE). Spätestens bei einer Gesamtverkehrsstärke von 800 Fzg./h reduziert ITSA Delay Cost (CAE) die gewichtete Wartezeit signifikant. Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fzg./h beträgt die Reduktion für das Kreuzungslayout IV 33% (24%, 42%), für das Kreuzungslayout V 26% (14%, 38%) und für das Kreuzungslayout VI 31% (21%, 41%). Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 3200 Fzg./h beträgt die Reduktion für das Kreuzungslayout IV 66% (35%, 96%), für das Kreuzungslayout V 39% (21%, 56%) und für das Kreuzungslayout VI 55% (39%, 72%).

Abbildung 8.14 zeigt, dass die Reduktion durch ITSA Delay Cost (CAE) beim Kreuzungslayout V auch für andere Gesamtverkehrsstärken deutlich geringer als bei den beiden anderen Kreuzungslayouts ausfällt. Die Unterschiede zwischen Kreuzungslayout IV und VI sind im Allgemeinen gering.

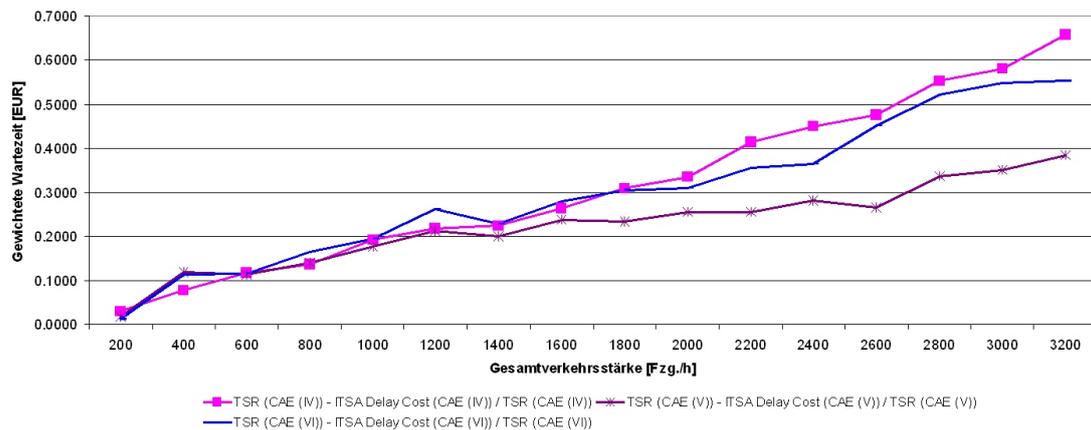


Abbildung 8.14.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI zwischen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)

Für die (ungewichtete) Wartezeit ergeben sich ähnliche Ergebnisse (siehe Abbildungen 8.15 und 8.16). Die geringen Unterschiede zwischen TSR und ITSA Valuation verschieben sich etwas zugunsten von TSR. Die Unterschiede zwischen TSR und ITSA Delay Cost bleiben deutlich, fallen aber etwas geringer aus.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für den Durchsatz, die gewichtete Wartezeit, die Wartezeit und den Kraftstoffverbrauch findet sich im Anhang: Für den Durchsatz enthält Abbildung C.15 neben den einzelnen Durch-

8. Evaluation

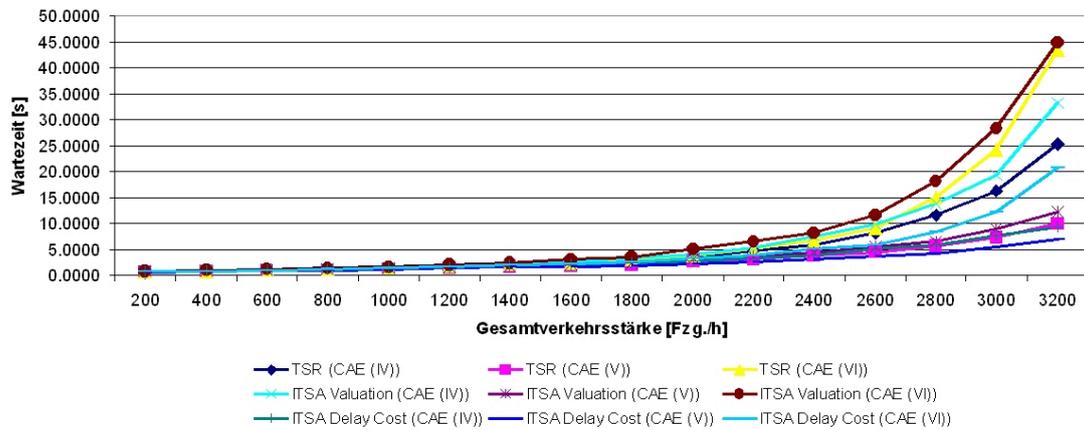


Abbildung 8.15.: Durchschnittliche Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI

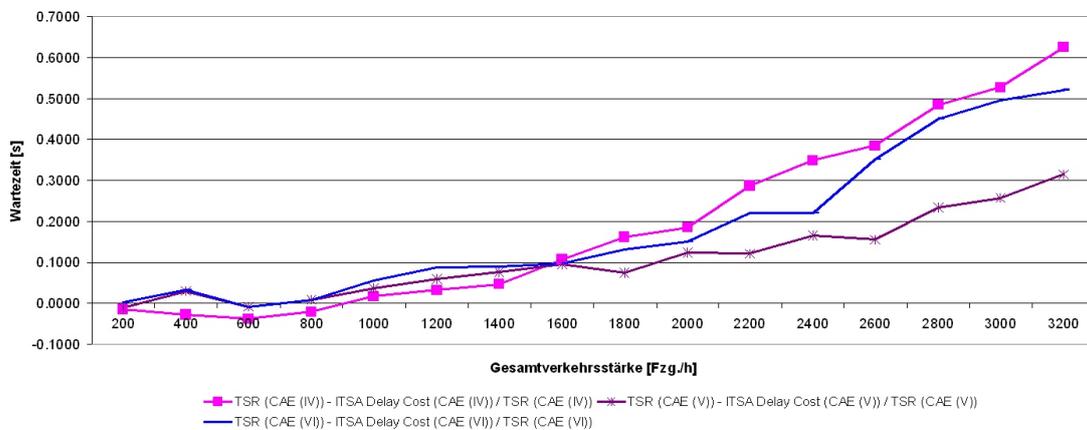


Abbildung 8.16.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI zwischen TSR (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)

schnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle. Abbildung C.16 enthält dies für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.17 für die Wartezeit und Abbildung C.18 für den Kraftstoffverbrauch. Abbildung C.19 bzw. Abbildung C.20 zeigen die relativen Unterschiede im Vergleich zu TSR bzw. zum Kreuzungslayout IV für die gewichtete Wartezeit und Abbildung C.21 bzw. Abbildung C.22 für die Wartezeit.

8.5.3. Zusammenfassung und Bewertung

Das Experiment zeigt, dass die Wahl des Kreuzungslayouts großen Einfluss auf die untersuchten Kennzahlen hat. Das Kreuzungslayout V ist für die unterstellte OD-Matrix und die gewählte Verteilung der Nachfrage auf die Routen dem Kreuzungslayout IV und dem Kreuzungslayout VI überlegen.

Der negative Effekt, der durch die notwendige ungleichmäßige Verteilung auf linke (25%) und rechte Verkehrsquelle (75%) entstehen hätte können, scheint durch andere positive Effekte überlagert zu werden. Durch die Wegnahme der linken Geradeausspur von Kreuzungslayout IV zu Kreuzungslayout V verringert sich die Anzahl der Konfliktbereiche für Linksabbieger (25%) von 8 auf 4 und für Geradeausfahrer (50%) von 8 auf 6. Dies ist eine Erklärung für das gute Abschneiden des Kreuzungslayouts V, da eine geringere Anzahl an Konfliktbereichen sich positiv auf den gemessenen Durchsatz und auf die übrigen Kennzahlen auswirkt.

Wie erwartet, führt das Kreuzungslayout VI zu schlechteren Kennzahlen. Die innere ausgehende Kantenspur stellt in diesem Fall den Flaschenhals dar, da allen Fahrzeugen, die die Kreuzung in einer bestimmten Richtung verlassen, nur eine innere ausgehende Kantenspur zur Verfügung steht. Beim Kreuzungslayout IV und beim Kreuzungslayout V stehen jeweils zwei innere ausgehende Kantenspuren zur Verfügung.

8.6. Kraftstoffverbrauchsminimierung

Im folgenden Experiment untersuche ich, wie sich die Kraftstoffverbrauchsminimierung (ITSA Fuel Consumption) [PSB11] (siehe Abschnitt 6.3.5) gegenüber der Ampel, der Zeitslotanfrage (TSR) und der Verzögerungskostenminimierung (ITSA Delay Cost) verhält.

8.6.1. Beschreibung des Experiments

Ich vergleiche Ampel, TSR, ITSA Delay Cost und ITSA Fuel Consumption sowohl für die exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (CAE) als auch für die gemeinsame Nutzung derselben Kreuzungsspur (LS) bezüglich gemessenem Durchsatz, gewichteter Wartezeit, Wartezeit und Kraftstoffverbrauch.

Daraus ergeben sich die folgenden sieben Messreihen: Ampel, TSR (CAE), ITSA Delay Cost (CAE), ITSA Fuel Consumption (CAE), TSR (LS), ITSA Delay Cost (LS) und ITSA Fuel Consumption (LS).

8. Evaluation

Dabei wird wie bisher jeweils die Gesamtverkehrsstärke beginnend von 200 Fzg./h schrittweise um 200 Fzg./h bis auf 3200 Fzg./h erhöht. Für alle Messreihen wird das Kreuzungslayout IV verwendet.

Außer den beiden Messreihen ITSA Fuel Consumption (CAE) und ITSA Fuel Consumption (LS) wurden alle Messreihen bereits in vorigen Experimenten verwendet. Ich führe diese Messreihen hier nur deswegen noch einmal auf, um ITSA Fuel Consumption leichter einordnen zu können.

8.6.2. Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsminimierung

Abbildung 8.17 beschreibt den gemessenen Durchsatz für alle Messreihen. Da der Durchsatz für ITSA Fuel Consumption (CAE) bei Gesamtverkehrsstärken über 2200 Fzg./h und für ITSA Fuel Consumption (LS) bei Gesamtverkehrsstärken über 1800 Fzg./h deutlich zurückfällt, beschränke ich mich im Folgenden auf Gesamtverkehrsstärken bis 2200 Fzg./h.

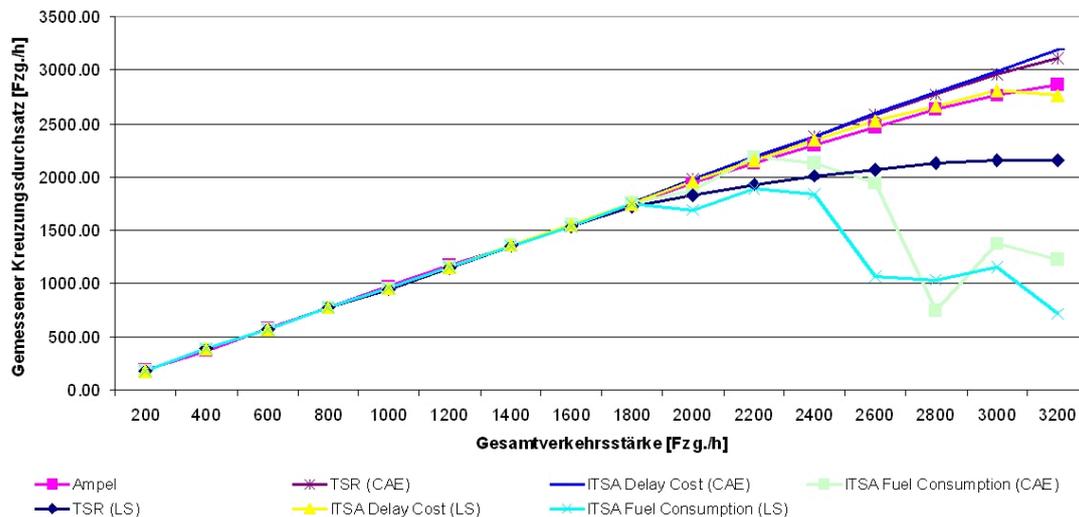


Abbildung 8.17.: Durchschnittlicher gemessener Durchsatz

Eine mögliche Ursache für den frühen Einbruch des gemessenen Durchsatzes könnte die Allokationsregel der Kraftstoffverbrauchsminimierung sein. Es ist grundsätzlich möglich, dass ein Fahrzeug mit hohem Kraftstoffverbrauch vor der Kreuzung vollständig zum Stillstand kommt. Da insbesondere für Fahrzeuge mit hohem Kraftstoffverbrauch der Kraftstoffverbrauch in einer Leerlaufphase relativ gering im Vergleich zum Kraftstoffverbrauch für die Anfahrphase ist, kann es sich in diesem Fall lohnen, dieses Fahrzeug und die dahinter wartenden Fahrzeuge länger warten zu lassen, und Fahrzeuge aus anderen Spuren dauerhaft zu bevorzugen. In diesem Fall kämen Fahrzeuge aus dieser Richtung niemals zum Zuge. Beobachtungen der grafischen Simulation legen diese Möglichkeit ebenfalls nahe.

8. Evaluation

Abbildung 8.18 visualisiert die gewichtete Wartezeit für die untersuchten Messreihen. Die gewichtete Wartezeit ist für ITSA Fuel Consumption leicht höher als für ITSA Delay Cost, aber immer noch deutlich geringer als für TSR. Dies gilt sowohl für *CAE* als auch für *LS*.

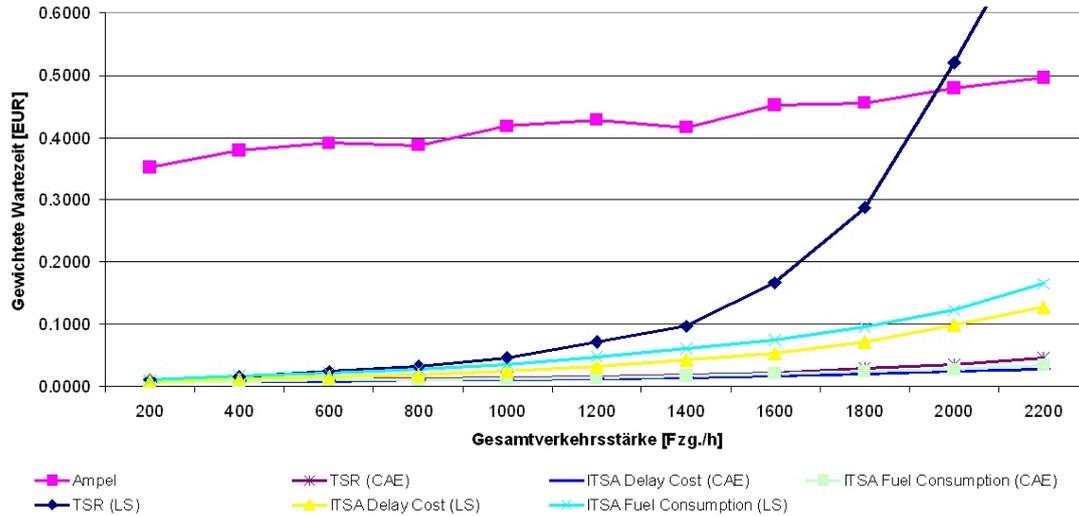


Abbildung 8.18.: Vergleich der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit für die Kraftstoffverbrauchsminimierung

In Abbildung 8.19 ist die Wartezeit für die untersuchten Messreihen aufgeführt. Die Wartezeit bei ITSA Fuel Consumption unterscheidet sich kaum von der Wartezeit für ITSA Delay Cost. Dies gilt ebenfalls sowohl für *CAE* als auch für *LS*.

Abbildung 8.20 stellt den Kraftstoffverbrauch der untersuchten Messreihen in grafischer Form dar. Der Kraftstoffverbrauch ist für ITSA Fuel Consumption etwas geringer als für ITSA Delay Cost, aber immer noch deutlich höher als für TSR. Selbst die Ausrichtung auf die Kraftstoffverbrauchsminimierung scheint die Vorteile von TSR bezüglich des Kraftstoffverbrauchs nicht aufzuwiegen. Dies mag daran liegen, dass bei TSR alle Fahrzeuge frühzeitig ihren Zeitslot erhalten und sich deswegen sehr früh auf eine ökonomische Fahrweise einstellen können.

8.6.3. Zusammenfassung und Bewertung

Im Vergleich zur Verzögerungskostenminimierung (ITSA Delay Cost) reduziert die Kraftstoffverbrauchsminimierung (ITSA Fuel Consumption) den Kraftstoffverbrauch geringfügig. Sie führt zu einer vergleichbaren Wartezeit und zu einer leicht erhöhten gewichteten Wartezeit. Die Vor- und Nachteile von TSR kann sie jedoch nicht ausgleichen.

Der Einsatz von ITSA Fuel Consumption ist deswegen nur dann sinnvoll, wenn man einen Kompromiss zwischen gewichteter Wartezeit und Kraftstoffverbrauch erreichen möchte. Falls man sich nur auf die gewichtete Wartezeit konzentriert, empfiehlt sich die

8. Evaluation

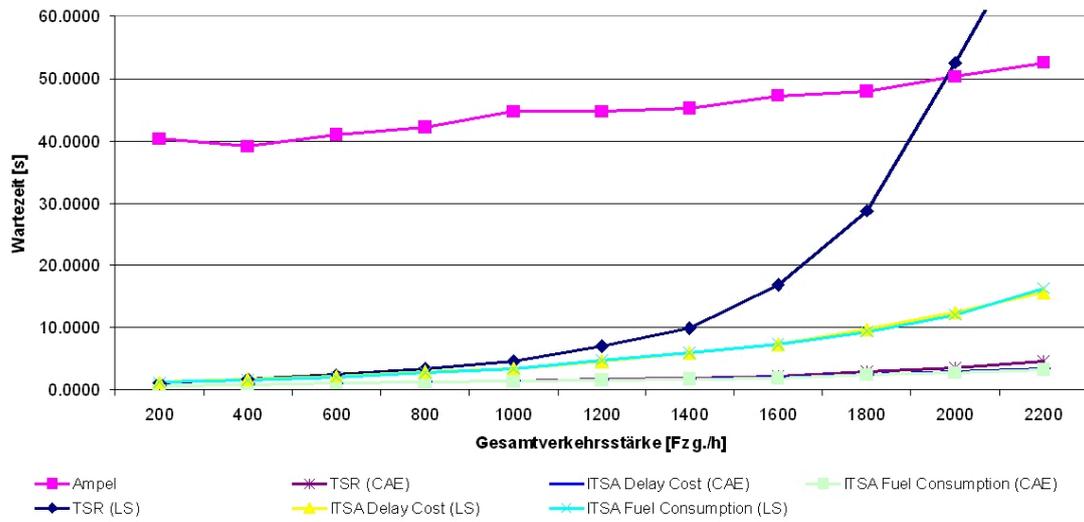


Abbildung 8.19.: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeit für die Kraftstoffverbrauchsminimierung

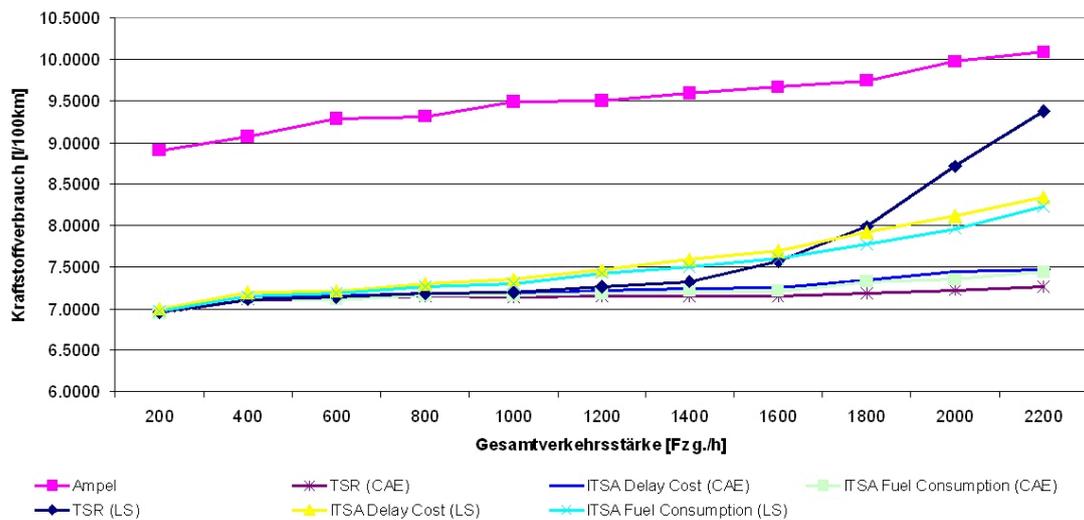


Abbildung 8.20.: Vergleich des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs für die Kraftstoffverbrauchsminimierung

Verwendung von ITSA Delay Cost und falls man ausschließlich den Kraftstoffverbrauch reduzieren möchte, sollte man TSR verwenden.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messreihen für den Durchsatz, die gewichtete Wartezeit, die Wartezeit und den Kraftstoffverbrauch findet sich im Anhang: Für den Durchsatz enthält Abbildung C.23 neben den einzelnen Durchschnittswerten zusätzlich noch die obere und die untere Schranke der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle. Abbildung C.24 enthält dies für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.25 für die Wartezeit und Abbildung C.26 für den Kraftstoffverbrauch.

8.7. Zeitslottausch

Im Folgenden beschreibe ich weitere Experimente, die ich im Rahmen des Projekts DAMAST durchgeführt und veröffentlicht habe. Diesen Experimenten lagen zum Teil vereinfachende Annahmen zugrunde, die ich im Folgenden jeweils erläutere.

Der Zeitslottausch (siehe Abschnitt 6.4) war der erste im Rahmen von DAMAST untersuchte Mechanismus [SBF07, SBF08]. In diesem Experiment wurde ausschließlich die exklusive Nutzung der Kreuzung (IE) betrachtet. Das Layout der Kreuzung entspricht im Wesentlichen der Kreuzung IV (siehe Abbildung 8.2a).

8.7.1. Beschreibung der Varianten

Es wurden innerhalb des Experiments jedoch vier verschiedene Varianten miteinander verglichen (Abbildung 8.21). Die vier Varianten unterscheiden sich bezüglich der durchschnittlichen Wertschätzung und der maximalen Interaktionsdistanz.

Durchschnittliche Wertschätzung \bar{v}

Jede Verkehrsquelle erzeugt für jedes Fahrzeug die Wertschätzung mit Hilfe einer Exponentialverteilung zufällig. Der Mittelwert der Exponentialverteilung ist jedoch fest vorgegeben. Durch die Änderung des Mittelwerts der Exponentialverteilung für Fahrzeugquellen aus nördlicher und südlicher Richtung lässt sich der Einfluss unterschiedlich verteilter Wertschätzungen untersuchen.

Interaktionsdistanz s

Das Verkehrsschild „Agentengesteuerte Kreuzung“ markiert für Fahrzeuge aus dieser Richtung die maximale Distanz zur Interaktion mit dem Kreuzungsagenten. Erst nachdem ein Fahrzeug dieses Schild passiert hat, kann es mit dem Kreuzungsagenten kommunizieren. Um Fahrzeuge zu simulieren, die sehr spät mit der Kreuzung interagieren, wurden die Schilder für Fahrzeuge aus nördlicher und südlicher Richtung näher an der Kreuzung positioniert. Daraus resultieren die folgenden vier untersuchten Varianten.

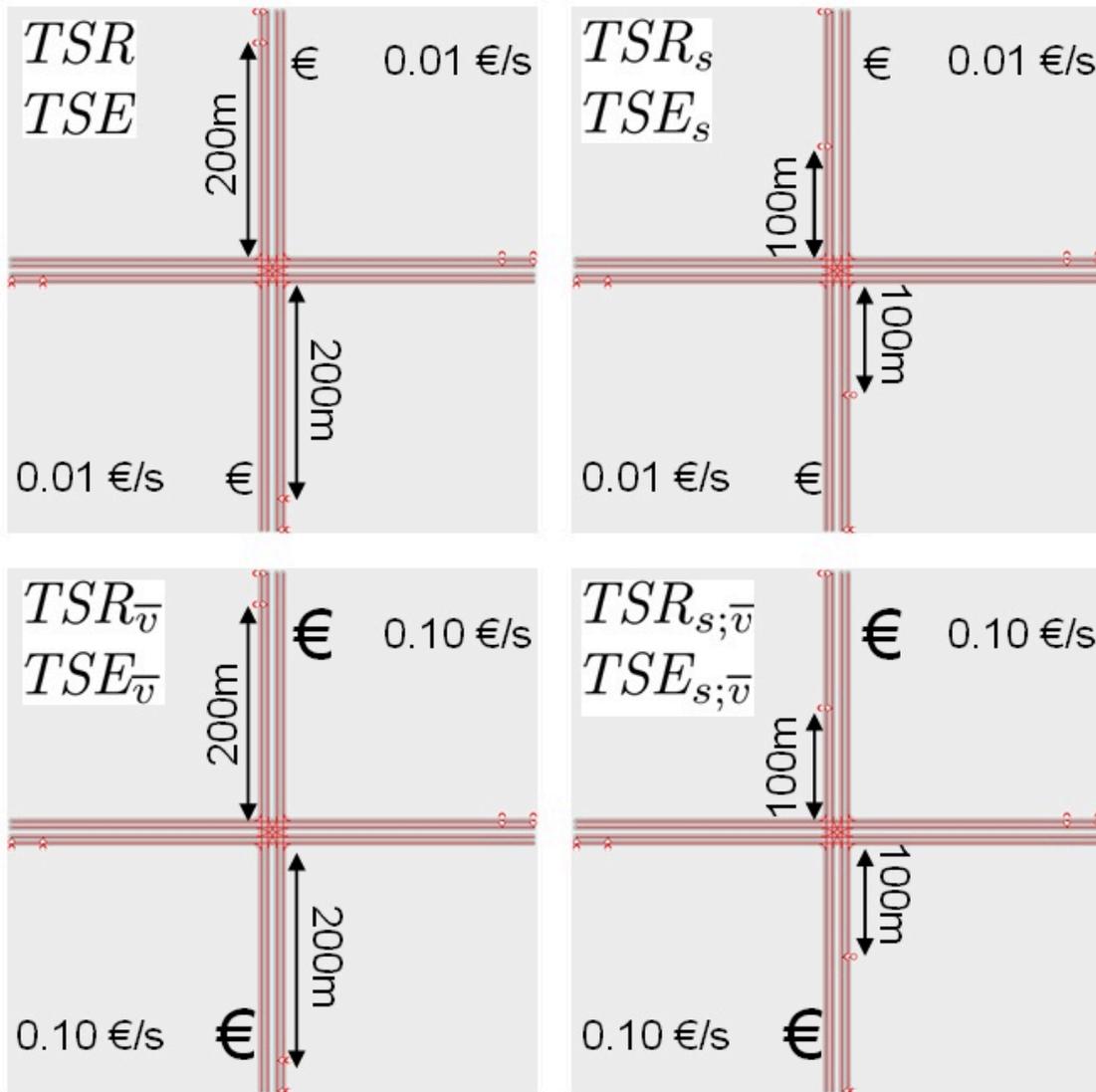


Abbildung 8.21.: Untersuchte Varianten des Zeitslottausschs [SBF08]

Variante 1: TSR

Der Abstand des Schildes „Agentengesteuerte Kreuzung“ zur Kreuzung beträgt für alle vier Himmelsrichtungen 200m. Die durchschnittliche Wertschätzung liegt für alle vier Himmelsrichtungen bei 0,01 €/s.

Variante 2: TSR_s

Der Abstand des Schildes „Agentengesteuerte Kreuzung“ zur Kreuzung wird für die nördliche und südliche Richtung von 200m auf 100m verkürzt. Ansonsten bleiben im Vergleich zur Variante 1 alle Parameter unverändert.

Variante 3: $TSR_{\bar{v}}$

Die durchschnittliche Wertschätzung für Fahrzeuge aus der nördlichen und südlichen Richtung wird auf 0,10 €/s verzehnfacht. Ansonsten bleiben im Vergleich zur Variante 1 alle Parameter unverändert.

Variante 4: $TSR_{s,\bar{v}}$

Für Fahrzeuge, die sich aus nördlicher oder südlicher Richtung der Kreuzung nähern, wird der Abstand des Schildes „Agentengesteuerte Kreuzung“ zur Kreuzung von 200m auf 100m verkürzt und die durchschnittliche Wertschätzung von 0,01 €/s auf 0,10 €/s verzehnfacht. Ansonsten bleiben im Vergleich zur Variante 1 alle Parameter unverändert.

8.7.2. Ergebnisse des Zeitslottauschs

Die Erwartung war, dass sich Fahrzeuge, die die Kreuzung sehr spät erreichen und eine hohe Wertschätzung besitzen, besonders vom Zeitslottausch profitieren. Aus diesem Grund wurde jede Variante einmal ausschließlich mit Hilfe der Zeitslotanfrage (TSR) und einmal mit einer Kombination aus Zeitslotanfrage und Zeitslottausch (TSE) simuliert. Im letzten Fall erhielten alle Fahrzeuge zunächst ihren initialen Zeitslot durch die Zeitslotanfrage und konnten diesen Zeitslot anschließend mit anderen Fahrzeugen tauschen.

Tabelle 8.4 zeigt die absoluten und relativen Unterschiede für jede Variante. Dabei werden sowohl die durchschnittliche ungewichtete als auch die durchschnittliche gewichtete Wartezeit inklusive der zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle dargestellt.

TSE reduziert die durchschnittliche gewichtete Wartezeit $\overline{vT_w}$ um 0,010€ im Mittel verglichen mit TSR , also um 7,3%. Die relative Differenz liegt zwischen 5,6% und 9,1% in 95% aller Fälle. TSE hat einen geringeren, aber immer noch positiven Einfluss auf die durchschnittliche Wartezeit. Die durchschnittliche Wartezeit wird um 0,567s verringert, d. h. um 4,0% im Vergleich zu TSR .

Im Vergleich zur Variante mit TSR und TSE führen die Varianten, bei denen sich nur jeweils ein Parameter für die nördliche und südliche Richtung ändert, nur zu einer leicht höheren Verbesserung als Variante 1.

Tabelle 8.4.: Absolute und relative Differenzen für die vier Varianten des Zeitslottaustauschs

	Variante		T_w	95% CI	vT_w	95% CI
absolute Differenz	TSR	TSE	0,567	[0,431;0,703]	0,010	[0,008;0,012]
	TSR_s	TSE_s	0,658	[0,451;0,866]	0,013	[0,010;0,015]
	$TSR_{\bar{v}}$	$TSE_{\bar{v}}$	0,626	[0,439;0,814]	0,066	[0,050;0,082]
	$TSR_{s,\bar{v}}$	$TSE_{s,\bar{v}}$	1,150	[0,856;1,444]	0,154	[0,131;0,177]
relative Differenz	TSR	TSE	0,040	[0,028;0,052]	0,073	[0,056;0,091]
	TSR_s	TSE_s	0,041	[0,029;0,053]	0,083	[0,067;0,099]
	$TSR_{\bar{v}}$	$TSE_{\bar{v}}$	0,045	[0,031;0,058]	0,089	[0,067;0,112]
	$TSR_{s,\bar{v}}$	$TSE_{s,\bar{v}}$	0,072	[0,055;0,090]	0,157	[0,130;0,184]

Die Verbesserung entsteht durch eine höhere Zahl an durchgeführten Tauschvorgängen bei TSE_s und in einem höheren Gewinn pro Tauschvorgang bei $TSE_{\bar{v}}$. Dies überrascht nicht, da TSE_s die Wahrscheinlichkeit erhöht, das ein Fahrzeug einen späten Zeitslot erhält, aber die Kreuzung viel früher überqueren könnte. Durch $TSE_{\bar{v}}$ erhöht sich im Allgemeinen die Differenz der Wertschätzungen zweier Tauschpartner.

Betrachtet man jedoch $TSR_{s,\bar{v}}$, also die Variante, bei der sich für die nördliche und südliche Richtung beide Parameter ändern, so ist die Verbesserung deutlich. Im Mittel wird die durchschnittliche gewichtete Wartezeit um 15,7% und die durchschnittliche Wartezeit um 7,2% reduziert.

Der Zeitslottaustausch reduziert sowohl die durchschnittliche Wartezeit als auch die durchschnittliche gewichtete Wartezeit, obwohl für TSE oder $TSE_{\bar{v}}$ nur 7,4% der Fahrzeuge ihren Zeitslot tauschen. Für TSE_s erhöht sich der Wert auf 8,7%. Für $TSE_{s,\bar{v}}$ erhöht sich der Wert sogar auf 14,2%.

Eine Erklärung dafür ist, dass aus Norden oder Süden kommende Fahrzeuge, die kurzfristig die Kreuzung erreichen und eine hohe Wertschätzung besitzen, eine deutlich größere Chance haben, einen passenden Tauschkandidaten zu finden.

8.7.3. Zusammenfassung

Die deutliche Verbesserung der durchschnittlichen Wartezeit bei $TSR_{s,\bar{v}}$ and $TSE_{s,\bar{v}}$ zeigt, dass in einem heterogenen Szenario wertschätzungssensitive Mechanismen ihre Stärken besonders zur Geltung bringen können. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge, die kurzfristig eine Kreuzung erreichen und eine hohe Wertschätzung besitzen.

Im Rahmen meines Graduiertenkollegs IME [IME11] wurde mit Hilfe einer numerischen Simulation ein Verfahren untersucht, das dem Zeitslottaustausch sehr ähnelt [SBB⁺06]. Im Vergleich zu TSR reduzierte dieses Verfahren die durchschnittliche gewichtete Wartezeit um 5,2%. Dies entspricht im Wesentlichen der Verbesserung, die auch mit TSE erreicht wurde.

8.8. ITSA Valuation ohne und mit Unterstützung

In [SB07] habe ich die initiale Zeitslotauktion ohne Unterstützung mit der initialen Zeitslotauktion mit Unterstützung verglichen.

8.8.1. Untersuchte Mechanismen

Für dieses Experiment wurde die initiale Zeitslotauktion *ITSA Valuation* erstmals in zwei Varianten implementiert: Die initiale Zeitslotauktion ohne Unterstützung ($ITSA^-$) und die initiale Zeitslotauktion mit Unterstützung ($ITSA^+$). Beide Mechanismen wurden mit der Zeitslotanfrage *TSR* verglichen.

In diesem Experiment wurde nur die exklusive Nutzung der Kreuzung (IE) betrachtet. Das Layout der Kreuzung entsprach der Kreuzung, die beim Zeitslottausch in Variante 1 verwendet wurde (siehe Abschnitt 8.7). Die Dauer eines Zeitslots betrug für jedes Fahrzeug 4s. Dadurch ist die Kapazität der Kreuzung auf $3600s/4s = 900$ Fzg./h beschränkt. Aus diesem Grund wurde das Experiment mit einer Gesamtverkehrsstärke von 800 Fzg./h durchgeführt. Die Zuteilung der Zeitslots erfolgte sowohl für $ITSA^-$ als auch für $ITSA^+$ jeweils 12s im Voraus. D. h., jeder Zeitslot wurde 12 Sekunden vor seinem Beginn versteigert. Dies entspricht der dreifachen Dauer eines Zeitslots.

In jeder Auktion berechneten Kandidaten und unterstützende Fahrzeuge ihr Gebot als Produkt ihrer Wertschätzung pro Sekunde und der Dauer des Zeitslots, also 4s. Die Dauer entsprach der maximalen Zeit, die ein Fahrzeug benötigte, um die Kreuzung zu überqueren.

8.8.2. Ergebnisse

Das Experiment führte zu folgenden Ergebnissen.

$T_w^{(TSR)}$ bezeichnet die durchschnittliche Wartezeit für die Zeitslotanfrage (*TSR*), $T_w^{(ITSA^-)}$ für die initiale Zeitslotauktion ohne Unterstützung $ITSA^-$ und $T_w^{(ITSA^+)}$ die initiale Zeitslotauktion mit Unterstützung $ITSA^+$.

$vT_w^{(TSR)}$ bezeichnet die durchschnittliche gewichtete Wartezeit für die Zeitslotanfrage (*TSR*), $vT_w^{(ITSA^-)}$ für die initiale Zeitslotauktion ohne Unterstützung $ITSA^-$ und $vT_w^{(ITSA^+)}$ die initiale Zeitslotauktion mit Unterstützung $ITSA^+$.

Beim Vergleich von *TSR* und $ITSA^-$ beschreibt $\Delta\overline{T_w} = \overline{T_w^{(TSR)}} - \overline{T_w^{(ITSA^-)}}$ die absolute Differenz der durchschnittlichen Wartezeit und $\Delta\overline{vT_w} = \overline{vT_w^{(TSR)}} - \overline{vT_w^{(ITSA^-)}}$ die absolute Differenz der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit.

$\Delta\overline{T_w}/\overline{T_w^{(TSR)}}$ bzw. $\Delta\overline{vT_w}/\overline{vT_w^{(TSR)}}$ beschreiben die entsprechende relative Differenz der durchschnittlichen Wartezeit bzw. der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit.

Für den Vergleich von *TSR* und $ITSA^+$ erfolgt die Notation analog.

8. Evaluation

Tabelle 8.5.: TSR vs. $ITSA^-$

	Durchschnitt	σ	99% CI
$\overline{\Delta T_w}$	-0,045	0,296	[-0,210;0,121]
$\frac{\overline{\Delta T_w}}{T_w^{(TSR)}}$	-0,005	0,024	[-0,019;0,008]
$\overline{\Delta v T_w}$	0,048	0,024	[0,034;0,062]
$\frac{\overline{\Delta v T_w}}{vT_w^{(TSR)}}$	0,306	0,077	[0,263;0,349]

Tabelle 8.6.: TSR vs. $ITSA^+$

	Durchschnitt	σ	99% CI
$\overline{\Delta T_w}$	-0,232	0,245	[-0,369;-0,095]
$\frac{\overline{\Delta T_w}}{T_w^{(TSR)}}$	-0,018	0,018	[-0,028;-0,008]
$\overline{\Delta v T_w}$	0,067	0,025	[0,053;0,081]
$\frac{\overline{\Delta v T_w}}{vT_w^{(TSR)}}$	0,430	0,044	[0,406;0,455]

TSR vs. $ITSA^-$

Tabelle 8.5 beschreibt sowohl die absolute als auch die relative Differenz der durchschnittlichen Wartezeit $\overline{T_w}$ und der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit $\overline{vT_w}$ für TSR und $ITSA^-$. $ITSA^-$ reduziert die durchschnittliche gewichtete Wartezeit $\overline{vT_w}$ um 0,048 €, d. h. um 30,6% im Mittel. Das 99%-Konfidenzintervall zeigt, dass dieses Ergebnis sehr zuverlässig ist. Die relative Differenz liegt zwischen 26,3% und 34,9% in 99% aller Fälle. Verglichen mit TSR erhöht $ITSA^-$ die durchschnittliche Wartezeit nur geringfügig um 0,5% im Mittel. Deshalb ist $ITSA^-$ effektiv.

TSR vs. $ITSA^+$

Tabelle 8.6 beschreibt sowohl die absolute als auch die relative Differenz der durchschnittlichen Wartezeit und der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit für TSR und $ITSA^+$. $ITSA^+$ reduziert die durchschnittliche gewichtete Wartezeit $\overline{vT_w}$ um 0,067 €, d. h. um 43,0% im Mittel. Das 99%-Konfidenzintervall zeigt die Verlässlichkeit dieses Ergebnisses. Die relative Differenz liegt zwischen 40,6% und 45,5% in 99% aller Fälle. Verglichen mit TSR erhöht $ITSA^+$ die durchschnittliche Wartezeit $\overline{T_w}$ nur geringfügig um 1,8% im Mittel. Mit anderen Worten ist $ITSA^+$ sehr effektiv bezüglich der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit.

Tabelle 8.7.: Ergebnisse für die 10% aller Fahrzeuge mit der geringsten Wertschätzung

	<i>TSR</i> vs. <i>ITSA</i> ⁻	<i>TSR</i> vs. <i>ITSA</i> ⁺
$\overline{\Delta T_{w;10\%}}$	-23,402	-14,454
$\frac{\overline{\Delta T_{w;10\%}}}{\overline{\Delta T_{w;10\%}^{(TSR)}}$	-1,518	-0,970

8.8.3. Auswirkung auf Fahrzeuge mit geringer Wertschätzung

Ebenfalls in [SB07] habe ich untersucht, wie sich die initiale Zeitslotauktion mit und ohne Unterstützung auf die 10% der Fahrzeuge mit der geringsten Wertschätzung auswirkt.

Tabelle 8.7 beschreibt sowohl die absolute als auch die relative Differenz der durchschnittlichen Wartezeit $\overline{T_{w;10\%}}$ zwischen *TSR* und *ITSA*⁻ und zwischen *TSR* und *ITSA*⁺. *ITSA*⁻ erhöht die Wartezeit um den Faktor 2,518, *ITSA*⁺ um den Faktor 1,970. Diese Erhöhung ist nicht überraschend, weil die Auktion natürlich die Teilnehmer mit geringer Wertschätzung negativ beeinflusst. Obwohl grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein Fahrzeug die Kreuzung nicht überqueren kann, zeigt dies jedoch, dass der negative Effekt beschränkt ist.

8.8.4. Zusammenfassung

Der Vergleich der beiden Auktionen zeigt, dass die initiale Zeitslotauktion mit Unterstützung zu besseren Ergebnissen führt als die initiale Zeitslotauktion ohne Unterstützung. Dies gilt auch für den negativen Einfluss auf die 10% der Fahrzeuge mit der geringsten Wertschätzung. Dieses Experiment hat ebenfalls gezeigt, dass es sinnvoll ist, alle Fahrzeuge der sichtbaren Nachbarschaft im verwendeten Mechanismus zu berücksichtigen.

8.9. Clocked vs. Free Choice

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorigen Experiments habe ich in [SB08b] zwei verschiedene Varianten von ITSA Valuation miteinander verglichen. Der Vergleich zeigt, dass die Variante *Free Choice* fast immer der Variante *Clocked* deutlich überlegen ist.

8.9.1. Auktionsintervall

In einer Auktion dürfen keine beliebigen Zeitslots vergeben werden. Ein Zeitslot, der zum Zeitpunkt der Auktion beginnen würde, könnte von keinem Fahrzeug eingehalten werden, da jedes Fahrzeug eine bestimmte Reaktionszeit benötigt.

Ein Fahrzeug, das einen Zeitslot erhält, benötigt eine gewisse Zeit, um zu reagieren. Dies bedeutet im Allgemeinen, dass ein Fahrzeug – gegebenenfalls aus dem Stillstand – auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigen muss, um die Kreuzung zu erreichen. Die maximale Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um aus dem Stillstand zu beschleunigen und die Kreuzung zu erreichen, bezeichne ich als die maximale Reaktionszeit $t_{react,max}$.

8. Evaluation

Die maximale Reaktionszeit beschreibt die minimale Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Ausführung einer Auktion und dem frühesten Beginn des Zeitslots, der in einer Auktion vergeben werden kann.

In jeder Auktion wird höchstens ein Zeitslot vergeben. Solange die Ausführungsdauer einer Auktion vernachlässigbar ist, muss man vermeiden, dass Auktionen vorwiegend mit einem einzigen Fahrzeug als Teilnehmer ausgeführt werden. Ansonsten würde die Auktion zur Zeitslotanfrage degenerieren.

Beispiel 8.3. *Die Fahrzeuge a, b, c, d, e kontaktieren die Kreuzung in alphabetischer Reihenfolge. Zwischen jeder Kontaktaufnahme vergehen jeweils $0,1$ Sekunden. Sobald das Fahrzeug a die Kreuzung kontaktiert hat, wird eine Auktion ausgeführt, an der ausschließlich Fahrzeug a teilnimmt. Das Fahrzeug a erhält seinen gewünschten Zeitslot. Da die Ausführung der Auktion weniger als $0,1$ Sekunden gedauert hat, ist die Auktion zu Ende, bevor Fahrzeug b die Kreuzung kontaktiert. Sobald Fahrzeug b die Kreuzung kontaktiert, wird erneut eine Auktion ausgeführt, in der Fahrzeug b alleine teilnimmt, und deswegen die Auktion gewinnt und sich den gewünschten Zeitslot aussuchen kann. Dies geht für die Fahrzeuge c, d und e analog weiter. Das daraus resultierende Ergebnis entspricht genau dem der Zeitslotanfrage.*

Um dies zu verhindern, sind Zeitslots nicht beliebig weit in der Zukunft möglich. Das bedeutet, dass Fahrzeuge eine Kreuzung nicht beliebig früh zu kontaktieren brauchen. Sie erhalten frühestens einen geeigneten Zeitslot, wenn sie nicht zu weit von der Kreuzung entfernt sind.

Aus diesem Grund werden in einer Auktion nur Zeitslots vergeben, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls liegen, das heißt der frühest mögliche Beginn eines zu vergebenden Zeitslots ist nach unten und das spätest mögliche Ende eines Zeitslots ist nach oben beschränkt. Dieses Intervall bezeichne ich als Auktionsintervall $[T_{auct_b}, T_{auct_e}]$. Das Auktionsintervall beginnt zum Zeitpunkt T_{auct_b} und endet zum Zeitpunkt T_{auct_e} . Das Fahrzeug, das in der Auktion den Zuschlag erhält, bekommt den frühest möglichen Zeitslot innerhalb des Auktionsintervalls. Neben anderen Bedingungen wird der frühest mögliche Zeitslot vor allem durch die aktuelle Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt.

Beim Entwurf eines Auktionsmechanismus muss man festlegen, wie das Auktionsintervall in Abhängigkeit vom Ausführungszeitpunkt einer Auktion bestimmt wird.

Aus diesem Grund vergleiche ich zwei Varianten von ITSA Valuation, die sich bei der Berechnung des Auktionsintervalls unterscheiden, nämlich *Free Choice* und *Clocked*.

8.9.2. Free Choice

In der Auktionsvariante *Free Choice* ist das Auktionsintervall ein Fenster, das auf der Zeitachse verschoben wird. Das Ende des Auktionsintervalls $T_{auct,e}$ bewegt sich entlang der Zeitachse in Schritten fester Dauer (t_{step}). Durch diese Diskretisierung ist es wahrscheinlich, dass sich bei dichtem Verkehr mehrere Fahrzeuge in der sichtbaren Nachbarschaft der Kreuzung befinden, die alle an der nächsten Auktion teilnehmen können, da für sie ein geeigneter Zeitslot innerhalb des Auktionsintervalls existiert.

8. Evaluation

Die unten aufgeführte Formel 8.3 beschreibt, wie bei *Free Choice* das Ende des Auktionsintervalls in Abhängigkeit des Ausführungsbeginns der Auktion berechnet wird.

Die Dauer des Auktionsintervall ist nicht fest, da der Beginn des Intervalls $T_{auct,b}$ sich kontinuierlich verändert. Formel 8.2 beschreibt, wie der Beginn des Intervalls berechnet wird. Das Auktionsintervall besitzt eine maximale Dauer, die ich als $t_{int,min}$ bezeichne.

Ich unterscheide zwischen *erfolgreichen* und *erfolglosen Auktionen*. Eine Auktion ist erfolglos, wenn der Kreuzungsagent ausschließlich Absagen erhält oder wenn das Fahrzeug, dem der Zeitslot zugeteilt wird, den Zeitslot ablehnen muss. Andernfalls ist eine Auktion erfolgreich. Der *minimale Auktionsabstand* ist der minimale Abstand zwischen dem Ausführungsbeginn T_{start} zweier aufeinanderfolgender Auktionen. Dieser Abstand beschränkt die Anzahl von unnötigen Auktionen, in denen kein Kandidat gefunden wird.

Wenn die letzte Auktion A_i erfolgreich war, wird die nächste Auktion A_{i+1} sofort ausgeführt. Andernfalls wird die nächste Auktion A_{i+1} erst nach Ablauf des minimalen Auktionsabstandes begonnen. Wegen der maximalen Reaktionszeit $t_{react,max}$ berechnet sich der Beginn des Auktionsintervalls wie folgt:

$$T_{auct,b} = T_{start} + t_{react,max} \quad (8.2)$$

Dies bedeutet, dass sich $T_{auct,b}$ für jede Auktion verändert.

Das Ende des Auktionsintervalls $T_{auct,e}$ muss innerhalb des Intervalls $[T_{auct,b}; T_{auct,b} + t_{approach,min}]$ liegen. Es bleibt solange unverändert bis t_{step} vergangen ist. Anschließend wird das Ende des Auktionsintervalls sofort um t_{step} gemäß der folgenden Formel erhöht.

$$T_{auct,e} = (\lfloor T_{start}/t_{step} \rfloor + 1) \times t_{step} + t_{int,min} \quad (8.3)$$

Dies bedeutet, dass das Auktionsintervall mit der Zeit von $t_{step} + t_{int,min} - t_{react,max}$ auf $t_{int,min} - t_{react,max}$ schrumpft und anschließend wieder auf $t_{step} + t_{int,min} - t_{react,max}$ gesetzt wird.

Beispiel 8.4. Sei das minimale Auktionsintervall $t_{int,min} = 30s$, $t_{step} = 10s$ und $t_{react,max} = 5s$. Wenn die Auktion zum Zeitpunkt $T_{start} = 0s$ ausgeführt wird, so beginnt das Auktionsintervall bei $5s$ und endet bei $40s$. In diesem Fall beträgt die Dauer des Auktionsintervalls $35s$. Fünf Sekunden später hat sich der Beginn des Auktionsintervalls auf $10s$ erhöht. Das Ende des Auktionsintervalls bleibt jedoch unverändert. Die Dauer des Auktionsintervalls ist auf $30s$ zurückgegangen. Wenn die Auktion zum Zeitpunkt $10s$ ausgeführt wird, ändert sich der Beginn des Auktionsintervalls auf $15s$ und das Ende zu $50s$. Die Dauer des Auktionsintervall hat sich damit wieder auf $35s$ erhöht.

8.9.3. Clocked

In der Variante *Clocked* bleibt die Dauer des Auktionsintervalls fest. Sie wird immer auf die *maximale Zeitslotdauer* gesetzt, d. h. die Zeit, die ein Fahrzeug mit der geringsten Beschleunigung aus dem Stillstand benötigt, um die Kreuzung auf der längsten Kreuzungsspur zu überqueren. Sobald keine Kandidaten mehr verfügbar sind, wird das Auktionsintervall angepasst. Der Beginn des neuen Auktionsintervalls wird auf das Ende

8. Evaluation

des vorigen Auktionsintervalls gesetzt. Das Ende des neuen Auktionsintervalls berechnet sich aus dem Beginn und der maximalen Zeitslotdauer.

Bei *Clocked* können Zeitslots nur überlappen, wenn beide Zeitslots innerhalb einer Auktion mit demselben Auktionsintervall vergeben wurden. Dies ist eine deutliche Einschränkung. Ich untersuche *Clocked* trotzdem. Möglicherweise sind die Auswirkungen nicht so gravierend. Insbesondere, wenn man *Clocked* mit dem Zeitslottausch [SBF08] kombiniert, könnte sich gerade diese Eigenschaft vorteilhaft erweisen.

Clocked wird durch einen weiteren Parameter konfiguriert: Der *maximale Abstand* $t_{offset,max}$ zwischen T_{start} und $T_{auct,b}$.

Verwendet man *Clocked*, so wird die Auktion A_{i+1} sofort ausgeführt, nachdem die letzte Auktion A_i erfolgreich beendet wurde. In diesem Fall bleibt das Auktionsintervall unverändert. Andernfalls wird das Auktionsintervall wie beschrieben angepasst.

Es kann passieren, dass bei großer Kandidatenzahl das Auktionsintervall zu früh nach dem Ausführungszeitpunkt der Auktion beginnt:

$$T_{auct,b} < T_{start} + t_{react,max} \quad (8.4)$$

In diesem Fall wird der Beginn des Auktionsintervalls auf $T_{start} + t_{react,max}$ gesetzt. Eine Auktion ist zu weit in der Zukunft, wenn gilt:

$$T_{auct,b} > T_{start} + t_{offset,max} \quad (8.5)$$

In diesem Fall führt der Kreuzungsagent keine Auktionen aus und wartet, bis die Ungleichung nicht mehr gilt.

Ich bezeichne diesen Mechanismus als *Clocked*, weil Zeitslots mit der maximalen Zeitslotdauer getaktet werden. Dies bedeutet, dass Fahrzeuge die Kreuzung zur selben Zeit überqueren können, solange die Zeitslots innerhalb des Auktionsintervalls liegen. Dies bedeutet nicht, dass alle Zeitslots zur selben Zeit beginnen müssen. Obwohl die Dauer des Auktionsintervalls fest bleibt, degeneriert *Clocked* nicht zur Zeitslotanfrage, weil der Beginn und das Ende des Auktionsintervalls sich nicht kontinuierlich mit jeder Auktion ändern.

Beispiel 8.5. Sei die maximale Zeitslotdauer 12s. Wenn das Auktionsintervall von $T_{auct,b}=00:10:00$ bis $T_{auct,e}=00:10:12$ reicht, kann ein abbiegendes Fahrzeug einen Zeitslot von 00:10:06 bis 00:10:09 erhalten.

8.9.4. Evaluation

Beide Mechanismen wurden mit Unterstützung untersucht, weil ich bereits in [SB07] gezeigt habe, dass durch die Unterstützung die durchschnittliche gewichtete Wartezeit reduziert wird.

Einstellungen

In allen durchgeführten Experimenten entsprach das Layout der Kreuzung im Wesentlichen der beim Zeitslottausch in Variante 1 verwendeten Variante (siehe Abschnitt 8.7).

8. Evaluation

Nachdem alle Fahrzeuge das Verkehrsschild „Agentengestützte Kreuzung“ passiert haben, können sie mit der Kreuzung Kontakt aufnehmen. Bis zur tatsächlichen Kreuzung muss jedes Fahrzeug jeweils noch 800m zurücklegen.

Kalibrierung von Free Choice

Free Choice bietet vier Parameter, deren Einstellung angepasst werden können: Die Zeit, nach der sich das Ende des Auktionsintervalls jeweils ändert (t_{step}), die minimale Dauer des Auktionsintervalls ($t_{int,min}$), die maximale Reaktionszeit ($t_{react,max}$) und der minimale Zeitabstand (T_{gap}) für zwei aufeinanderfolgende Auktionen. Der minimale Zeitabstand T_{gap} wird auf die Dauer eines Simulationsschritts, also auf $400ms$, gesetzt. Vorläufige Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass $5s$ für $t_{react,max}$ ausreichend sind und dass *Free Choice* sich am günstigsten für $t_{int,min} = 54s$ und $t_{step} = 13.5s$ verhält [SB08a].

Kalibrierung von Clocked

Clocked bietet zwei anzupassende Parameter: die maximale Reaktionszeit $t_{react,max}$ und die maximale Differenz zwischen Beginn der Ausführung einer Auktion und dem Beginn des Auktionsintervalls $t_{offset,max}$. Aufgrund früherer Experimente verwende ich $t_{react,max} = 5s$ und $t_{offset,max} = 13.5s$ in den folgenden Experimenten [SB08a].

Experimente

Free Choice und *Clocked* wurden zunächst jeweils gegenüber der Zeitslotanfrage *TSR* für die folgenden Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung verglichen: exklusive Nutzung der Kreuzung (*IE*), exklusive Nutzung der Kreuzungsspur (*LE*) und exklusive Nutzung der Konfliktbereiche (*CAE*). Der Vergleich erfolgte für verschiedene Gesamtverkehrsstärken jeweils von 200 Fzg./h in Schritten von 200 Fzg./h bis zu 600 Fzg./h für *IE*, bis zu 1800 Fzg./h für *LE* und bis zu 2400 Fzg./h für *CAE*.

Für *CAE* sollten sowohl *Free Choice* als auch *Clocked* zur geringsten durchschnittlichen gewichteten Wartezeit führen. Neben den absoluten Differenzen werden auch die relativen Differenzen der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit gegenüber *TSR* verglichen.

Free Choice vs. TSR. Abbildung 8.22 beschreibt die durchschnittliche gewichtete Wartezeit für *CAE* und Abbildung 8.23 für *LE*. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurde in allen Abbildungen zusätzlich noch für die jeweils anderen untersuchten Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung die durchschnittliche gewichtete Wartezeit von *TSR* aufgenommen. Für die exklusive Nutzung der Kreuzung (*IE*) ist der Unterschied nicht sinnvoll in einer gemeinsamen Abbildung darzustellen. Aus diesen Grund wurde auf eine eigene Abbildung für (*IE*) verzichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die durchschnittliche Wartezeit für *Free Choice* (FC) geringer als für *TSR* für alle Grade der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung und für jede untersuchte Gesamtverkehrs

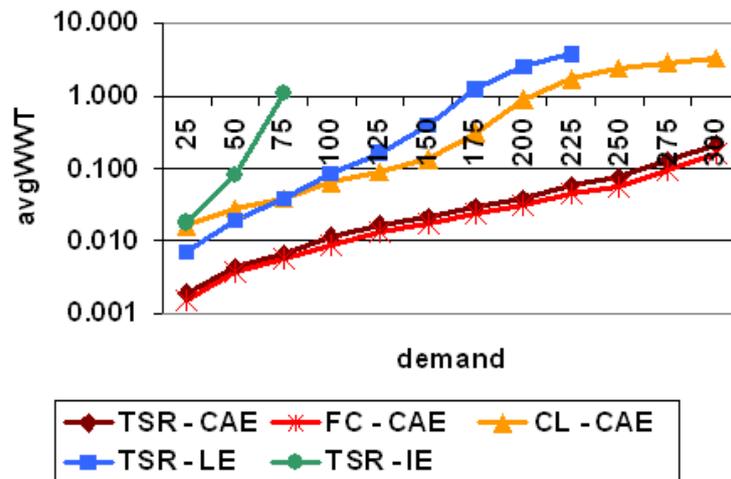


Abbildung 8.22.: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für CAE

Die höchste relative Differenz für CAE ergab sich für die Nachfrage von 2000 Fzg./h. In diesem Fall wurde die durchschnittliche gewichtete Wartezeit im Mittel um 27,8% bei einem 95%-Konfidenzintervall von [22,6%;31,8%] reduziert. Für LE ergab sich die höchste Differenz für die Gesamtverkehrsstärke von 1200 Fzg./h (38,1%, [37,8%;38,3%]). Bei IE ergab sich die höchste relative Differenz bei einer Gesamtverkehrsstärke von 480 Fzg./h (34,5%, [22,0%;40,5%]). Im letzten Fall wurden alle Gesamtverkehrsstärken von 200 Fzg./h bis 600 Fzg./h in Schritten von 40 Fzg./h untersucht.

Auch wenn die maximale relative Differenz für CAE geringer ausgefallen ist als für LE und IE, so bedeutet dies nicht, dass LE z. B. für eine Gesamtverkehrsstärke von 1200 Fzg./h zu einer geringeren durchschnittlichen Wartezeit als für CAE führt. Die relative Differenz wird nämlich immer im Vergleich mit TSR für denselben Grad der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung berechnet. Dies bedeutet, dass CAE immer den übrigen Graden der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung überlegen ist.

Die durchschnittliche Wartezeit für Free Choice ist im ungünstigsten Fall nur geringfügig höher als für TSR. Eine leichte Erhöhung der durchschnittlichen Wartezeit ist akzeptabel, weil dabei die durchschnittliche gewichtete Wartezeit trotzdem reduziert wird.

Clocked vs. TSR. Die Abbildungen 8.22 und 8.23 zeigen die durchschnittliche gewichtete Wartezeit von Clocked (CL) und TSR sowohl für CAE als auch für LE. Für CAE ist die durchschnittliche gewichtete Wartezeit bei Clocked immer höher als bei TSR. Dies bedeutet, dass Clocked nicht effektiv für CAE ist. Für LE ist Clocked effektiv bei einer Gesamtverkehrsstärke von 800 Fzg./h bis 1800 Fzg./h. Für IE ist Clocked nur für eine Gesamtverkehrsstärke von 400 Fzg./h bis 600 Fzg./h effektiv.

Die höchste relative Differenz ergibt sich für LE bei einer Gesamtverkehrsstärke von 1200 Fzg./h. In diesem Fall reduziert sich die durchschnittliche Wartezeit im Mittel

8. Evaluation

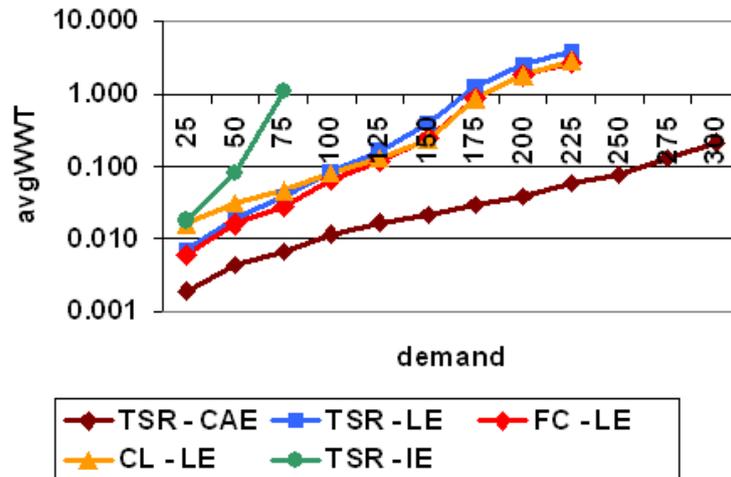


Abbildung 8.23.: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit für *LE*

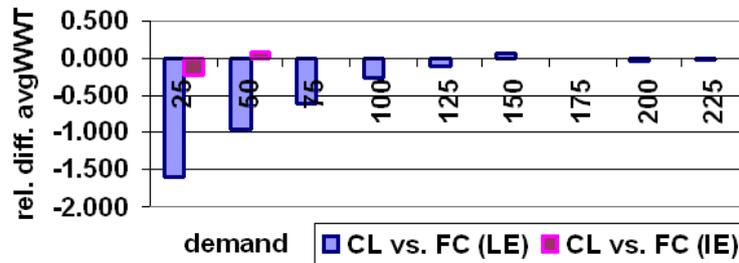


Abbildung 8.24.: Clocked vs. Free Choice

um 41,8% bei einem 95%-Konfidenzintervall von [16,9%;53,2%]. Bei Verwendung von *IE* tritt die höchste relative Differenz bei einer Gesamtverkehrsstärke von 480 Fzg./h auf. Im Mittel reduziert sich die durchschnittliche gewichtete Wartezeit um 40,0% [31,7%;44,0%].

Clocked vs. Free Choice. Abbildung 8.24 zeigt den direkten Vergleich der relativen Differenzen der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit zwischen *Clocked* und *Free Choice*. Weil *Clocked* zu schlechte Resultate für *CAE* liefert, habe ich die entsprechenden Werte nicht in die Abbildung aufgenommen.

Für *LE* zeigt die Abbildung, dass *Free Choice Clocked* für Gesamtverkehrsstärken unterhalb 1200 Fzg./h überlegen ist. Für höhere Gesamtverkehrsstärken sind die Unterschiede nicht signifikant. Für *IE* ist *Free Choice* signifikant besser bei einer Gesamtverkehrsstärke von 200 Fzg./h (-23,3%, [-75,2%;-6,6%]). Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 400 Fzg./h übertrifft *Clocked* jedoch *Free Choice* (7,0%, [3,9%;9,0%]). Bei einer Gesamtverkehrsstärke von 600 Fzg./h sind die Unterschiede nicht signifikant.

8.9.5. Bewertung

Wie erwartet reduziert sich die durchschnittliche gewichtete Wartezeit bei höheren Graden der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung. Die Einschränkung, dass sich Zeitslots aus unterschiedlichen Auktionsintervallen nicht überlappen dürfen, wirkt sich bei höheren Graden der erlaubten nebenläufigen Kreuzungsüberquerung deutlicher aus.

Bei höheren Gesamtverkehrsstärken werden die Unterschiede zwischen *Free Choice* und *Clocked* jedoch geringer. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei *Free Choice* öfters Lücken entstehen können, die zu klein sind, als dass sie noch von Fahrzeugen verwendet werden könnten.

Da *Clocked Free Choice* meistens deutlich unterlegen ist, wurde für weitere Experimente mit ITSA Valuation immer die Variante *Free Choice* verwendet.

9. Anwendung

Bislang habe ich mich in dieser Arbeit auf eine normale Straßenkreuzung konzentriert. Es gibt jedoch auch speziellere Anwendungsszenarien, in denen bestimmte Anforderungen leichter erfüllt werden können und deswegen ein effektives, wertschätzungssensitives ITC-System frühzeitiger realisiert werden kann.

In diesem Kapitel stelle ich solche Anwendungsszenarien vor. Dabei unterscheide ich Anwendungsszenarien in abgeschlossen Verkehrsbereichen und Anwendungsszenarien mit Engpass und Alternativen.

9.1. Anwendungen in abgeschlossenen Verkehrsbereichen

Der Zugang zu einem abgeschlossenen Verkehrsbereich ist im Allgemeinen beschränkt. Durch die Beschränkung kann der Zugang nur bestimmten Typen von Verkehrsteilnehmern gewährt werden bzw. nur bestimmten Fahrzeugen bzw. Fahrern.

Es gibt eine Vielzahl von Beispielen solcher abgeschlossenen Verkehrsbereiche. Ein Beispiel ist das HHLA Container Terminal Altenwerder im Hamburger Hafen [HHLa] (Abbildung 9.1). In diesem Container Terminal arbeiten halbautomatische Containerbrücken mit führerlosen Fahrzeugen (AGVs) (siehe Abbildung 9.2) und computergesteuerten Lagerkränen zusammen [HHLb].

In einem solchen Container Terminal ist ein wertschätzungssensitives ITC-System besonders vorteilhaft. Die autonomen Fahrzeuge bewegen sich auf engstem Raum. Ihre Routen schneiden sich häufig. An den Schnittpunkten (=Kreuzungen) könnten Fahrzeuge bevorzugt werden, die mit besonders eiligen Containern beladen sind.

Die besonderen Eigenschaften solcher Terminals erleichtern die Erfüllung einiger Anforderungen bzw. machen einige Anforderungen sogar obsolet. Die Verkehrssicherheit (Meta-Anforderung B) muss zwar immer noch gewährleistet werden, jedoch können Personenschäden ausgeschlossen werden, da ausschließlich führerlose Fahrzeuge eingesetzt werden und sich auch keine anderen Verkehrsteilnehmer, wie z. B. Fußgänger, Fahrradfahrer oder Motorradfahrer, in diesem Bereich befinden. Dadurch entfällt auch die Anforderung, verschiedene Typen von Verkehrsteilnehmern berücksichtigen zu müssen (Anforderung C1). Da alle Fahrzeuge dem Betreiber des Container Terminals gehören, ist eine homogene Ausstattung aller Fahrzeuge leichter durchsetzbar. Es muss damit nicht mit fehlender oder veralteter Ausstattung gerechnet werden. Damit entfällt die Anforderung C2.

Die Unterstützung drahtloser Kommunikation (Meta-Anforderung F) ist leichter, da sich die Fahrzeuge nur in einem fest definierten Gelände bewegen. Damit kann die drahtlose Kommunikation durch besondere Infrastrukturmaßnahmen unterstützt werden. Da

9. Anwendung



Abbildung 9.1.: Hamburger Hafen: Luftbild des HHLA Container Terminal Altenwerder, Quelle: Hamburger Hafen und Logistik AG



Abbildung 9.2.: Hamburger Hafen: Fahrerlose Fahrzeuge (AGVs) vor Containerbrücken in Altenwerder, Quelle: Hamburger Hafen und Logistik AG

9. Anwendung

das Gelände gegen Zugriff Fremder besonders geschützt wird, wird die Manipulation des Systems (Anforderung **F3**) erschwert. Die Annahme, dass Nachrichten und Systeme nicht bewusst manipuliert werden (Annahme **5**) ist daher besonders gerechtfertigt.

Durch die Verwendung autonomer, führerloser Fahrzeuge kann der Betreiber erzwingen, dass alle Fahrzeuge an den Mechanismen teilnehmen und ihre wahre Wertschätzung kommunizieren. In diesem Fall werden individuelle Rationalität, Anreizkompatibilität und Budget-Balancierung nicht benötigt. Der Mechanismus muss vor allem allokativ effizient sein (Meta-Anforderung **G**).

Da alle Fahrzeuge demselben Betreiber gehören, kann auf die Verwendung eines geeigneten Bezahlsystems (Meta-Anforderung **H**) verzichtet werden und die Bezahlung ausschließlich virtuell erfolgen. Dadurch wird kein Mikropayment benötigt (Anforderung **H1**). Es entstehen nur geringe technische Transaktionskosten (Anforderung **H2**). Die mentalen Transaktionskosten entfallen, da keine menschlichen Fahrer involviert sind (Anforderung **H3**).

Eine ausreichend hohe Marktdurchdringung (Meta-Anforderung **I**) kann durch den Betreiber leicht gewährleistet werden, da ihm alle eingesetzten Fahrzeuge gehören. Durch den Einsatz autonomer, führungsloser Fahrzeuge entfällt die Notwendigkeit, eine hohe Benutzerakzeptanz (Meta-Anforderung **J**) zu gewährleisten. Aus demselben Grund können negative Auswirkungen auf das Fahrverhalten (Meta-Anforderung **K**) ausgeschlossen werden.

Da es sich beim Container Terminal um ein Privatgelände handelt, bei dem nur ein eingeschränkter Personenkreis Zugang erhält, findet die StVO keine Anwendung. Deshalb wäre dort ein wertschätzungssensitives ITC-System mit bestehendem Recht vereinbar (Anforderung **L2**). Andernfalls wäre auch bereits jetzt der Einsatz führerloser Fahrzeuge nicht möglich. Aus denselben Gründen erhöht sich das Haftungsrisiko durch den Einsatz eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems nur unwesentlich (Anforderung **L1**). Da die Fahrzeuge führerlos betrieben werden, fallen keine personenbezogenen Daten an (Anforderung **L3**) und muss Anonymität nicht gewährleistet werden (Anforderung **L4**).

9.2. Anwendungen mit Engpass und Alternativen

Bislang mussten alle Fahrzeuge über ein A3C-System verfügen, weil sie keine Möglichkeit hatten, eine Kreuzung zu umfahren, die einen wertschätzungssensitiven Mechanismus einsetzt. Falls jedoch mindestens eine Alternative existiert, die auch für Fahrzeuge ohne A3C-System offen steht, müssen nicht alle Fahrzeuge mit einem A3C-System ausgestattet sein.

Der Einsatz eines wertschätzungssensitiven ITC-Systems ist insbesondere in Szenarien vielversprechend, in denen es zusätzlich zu Alternativen auch noch einen Engpass gibt, da sich in diesem Fall sehr viele oder eventuell sogar zu viele Fahrzeuge um eine Ressource streiten. Beispiele für solche Szenarien können Tunnel oder Brücken sein, für die es weniger attraktive Alternativen gibt, wie z. B. einen Gebirgspass oder weiter entfernte Brücken.

9. Anwendung

Als konkretes Beispiel könnte ein Betreiber eine neue Brücke über den Rhein bauen und den Zugang zu dieser Brücke mit einem wertschätzungssensitiven ITC-System versehen. Fahrzeuge ohne geeignetes A3C-System müssten auf andere Brücken ausweichen und damit unnötige Umwege in Kauf nehmen. Darüberhinaus könnte der Betreiber zusätzlich die Anzahl der Fahrzeuge beschränken, die in bestimmten Zeiten die Brücke überqueren dürfen. Dies würde möglicherweise Reisezeiten verlässlicher machen, da Zeitverluste durch ein zu hohes Verkehrsaufkommen vermieden werden könnten. In diesem Fall würden alle Fahrzeuge mit einem geeigneten A3C-System Zeitslots für die Überquerung der Brücke analog zum bisherigen Kreuzungsszenario aushandeln. Fahrzeuge, die keine geeigneten Zeitslots erhalten, müssten zusammen mit Fahrzeugen ohne A3C-System auf alternative Routen ausweichen.

Engpässe können auch temporär oder spontan entstehen, z. B. bei einer Wanderbaustelle oder einem Verkehrsunfall, bei dem sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Spuren für ein bestimmtes Teilstück einer Autobahn verringert. Normalerweise reichen die dann noch zur Verfügung stehenden Spuren in Stoßzeiten nicht aus und alle Verkehrsteilnehmer müssen – entweder durch Stau auf der Autobahn oder durch längere Reisezeiten auf den vorgeschlagenen Umgehungen – mit entsprechenden Verzögerungen rechnen.

Die Benutzung der noch zur Verfügung stehenden Spuren könnte jedoch auch durch ein wertschätzungssensitives ITC-System geregelt werden. Fahrzeuge mit einem A3C-System würden die Benutzung der verfügbaren Spuren untereinander aushandeln. Fahrzeuge, die keinen geeigneten Zeitslot erhalten, müssen zusammen mit Fahrzeugen ohne A3C-System die Umgehung benutzen. In diesem Fall könnten Fahrzeuge, die einen Zeitslot erhalten, ohne Verzögerung den Engpass passieren.

In Szenarien mit Engpass und Alternativen können ebenfalls einige Anforderungen leichter erfüllt werden. Insbesondere der Umgang mit Heterogenität (Meta-Anforderung **C**) wird erleichtert. In den aufgeführten Beispielen sind häufig nur bestimmte Typen von Verkehrsteilnehmern zugelassen, d. h. Fußgänger und Radfahrer müssen nicht betrachtet werden (Anforderung **C1**). Fahrzeuge, die kein geeignetes A3C-System besitzen, können auf Alternativen ausweichen. Mit veralteter Ausstattung (Anforderung **C2**) kann also umgegangen werden.

In diesem Fall reicht auch eine geringere Marktdurchdringung (Meta-Anforderung **I**) aus. Insbesondere stellen Szenarien mit Engpass und Alternativen einen Anreiz für Verkehrsteilnehmer dar, in ein geeignetes A3C-System für ihr Fahrzeug zu investieren, d. h. solche Szenarien sind eine Möglichkeit, die Marktdurchdringung schrittweise zu erhöhen.

9.3. Erweiterungsmöglichkeiten

Das bisher vorgestellte wertschätzungssensitive ITC-System kann erweitert werden. So sind z. B. Erweiterungen vorstellbar, die einen besseren Umgang mit Heterogenität erlauben oder die ein Verhungern von Verkehrsteilnehmern ausschließen.

9.3.1. Umgang mit Heterogenität

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit der Heterogenität der Verkehrsteilnehmer umzugehen (Meta-Anforderung C). Der Fußgängerverkehr kann mit Hilfe von *stationären Detektoren* unterstützt werden [Sch01]. Diese Detektoren erkennen, ob Fußgänger an einer Kreuzung warten, um die Kreuzung zu überqueren. Ein Beispiel für ein solches System sind die bereits in Großbritannien eingesetzten PUFFIN-Anlagen [fTS06]. Die detektierten Informationen werden für die dynamische Berechnung der Freigabezeiten für Fußgängerübergänge verwendet. Für die Verwendung innerhalb eines ITC-Systems könnten diese Informationen jedoch einem Fußgängerassistenten zur Verfügung gestellt werden, der – stellvertretend für alle Fußgänger – mit dem Kreuzungsagenten Zeitslots für Fußgänger aushandelt. Dieser Ansatz erfordert zwar Investitionen in die Infrastruktur, die Technik steht aber bereits heute zur Verfügung.

Zukünftig könnten Fußgänger und Radfahrer auch auf fortgeschrittene *mobile Endgeräte* zurückgreifen, wie z. B. auf ein Mobiltelefon oder auf einen mobilen Reisebegleiter (engl. *personal-travel assistant*, PTA). Auf solchen mobilen Endgeräten könnten auch entsprechende Assistenten eingesetzt werden, die analog zu den bisherigen Fahrerassistenten Zeitslots für ihren Besitzer aushandeln. Dieser Ansatz hängt vom technischen Fortschritt und der zukünftigen Verbreitung solcher mobiler Endgeräte ab.

Es gibt auch eine Möglichkeit, mit Fahrzeugen umzugehen, die über kein geeignetes oder ein defektes Fahrerassistenzsystem verfügen. Grundsätzlich müssen solche Fahrzeuge ähnlich wie bei der Einfahrt in eine Vorfahrtstraße vor der Kreuzung warten, bis der Verkehr auf der Kreuzung eine Einfahrt zulässt. Zusätzlich können Fahrzeuge, die hinter einem solchen Fahrzeug auf die Kreuzung zufahren, einbezogen werden. Entweder erkennen diese Fahrzeuge, dass sie sich hinter einem Fahrzeug ohne geeignetem Fahrerassistenzsystem befinden, oder sie teilen dem Kreuzungsagenten mit, dass sie ihren zugewiesenen Zeitslot nicht wahrnehmen können, weil vor ihnen ein Fahrzeug wartet. Der Kreuzungsagent kann dann für solche Fahrzeuge einen ausreichend großen Zeitslot zur Verfügung stellen und dies – je nach Ausstattung der Kreuzung – dem Fahrzeug gegebenenfalls durch spezielle Lichtsignale mitteilen. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine hohe Verbreitung geeigneter Fahrerassistenzsysteme, da ansonsten die Effektivität der Kreuzung zu stark in Mitleidenschaft gezogen würde.

[DS08] kombiniert ein klassisches Ampelverfahren mit TSR. Alle Fahrzeuge dürfen entsprechend ihrer Freigabezeiten die Kreuzung überqueren. Abhängig vom gewählten Ampelverfahren sind damit bestimmte Kreuzungsspuren während der gesamten Freigabezeit freigegeben. Fahrzeuge, die von einem autonomen Agenten gesteuert werden, können darüberhinaus auch aus anderen Richtungen Zeitslots anfragen. Der Kreuzungsagent vergibt allerdings nur Zeitslots für Kreuzungsspuren, die mit den während der Freigabezeit freigegebenen Kreuzungsspuren keine gemeinsamen Konfliktbereiche haben. Wie erwartet, wird durch das kombinierte Verfahren die Effektivität im Vergleich zu einem reinen Ampelverfahren erhöht, im Vergleich zu einem reinen TSR jedoch verringert [DS08].

9. Anwendung

Dieser Ansatz lässt sich auch auf ein wertschätzungssensitives ITC-System übertragen. Fahrzeuge mit einem geeigneten Fahrerassistenzsystem können auch außerhalb der Freigabezeiten Zeitslots für die Kreuzungsüberquerung erhalten.

Dieses Verfahren setzt jedoch voraus, dass die klassische Infrastruktur mit Lichtsignalanlagen erhalten bleibt. Die Effektivität wird im Vergleich zu einer ausschließlichen Verwendung von TSR verringert. Es ermöglicht aber einen sanften Übergang in einer Phase, in der die Verbreitung geeigneter Fahrerassistenzsysteme noch nicht ausreichend hoch ist.

In einer solchen Übergangszeit können natürlich auch die zuvor beschriebenen Ansätze für Fußgänger und Radfahrer verwendet werden, also entweder stationäre Detektoren und spezielle Assistenzagenten oder mobile Endgeräte der Fahrer. In diesem Fall erleichtert die Unterstützung mobiler Endgeräte auch, die notwendige Marktdurchdringung frühzeitig zu erreichen (Meta-Anforderung I).

Alternativ kann die Heterogenität der Verkehrsteilnehmer vermieden werden, in dem das ITC-System nur in bestimmten Szenarien eingesetzt wird, wie z. B. in geschlossenen Verkehrsbereichen (Abschnitt 9.1) oder auf Autobahnen, auf denen Fußgänger und Radfahrer nicht fahren dürfen (Abschnitt 9.2).

9.3.2. Vermeidung des Verhungerns

Das in dieser Arbeit entwickelte wertschätzungssensitive ITC-System schließt nicht mit Sicherheit aus, dass Fahrzeuge an einer Kreuzung verhungern, d. h. vor der Kreuzung warten und die Kreuzung nicht überqueren können. In [SB07] (siehe auch Abschnitt 8.8.3) zeige ich jedoch, dass der Effekt für Fahrzeuge mit geringer Wertschätzung nicht gravierend ist.

Im Übrigen ist auch bei einer klassischen Vorfahrtsstraße das Verhungern nicht ausgeschlossen. Bei sehr hohem Verkehrsaufkommen auf einer Vorfahrtsstraße kann es passieren, dass Fahrzeuge aus einer Nebenstraße niemals in die Vorfahrtsstraße einfahren können.

Das entwickelte ITC-System kann jedoch so erweitert werden, dass ein Verhungern ausgeschlossen wird. Dazu muss der Kreuzungsagent die bisherige Wartezeit aller Fahrzeuge der Nachbarschaft berücksichtigen. Sobald die Wartezeit eines Kandidaten eine obere Schranke überschreitet, wird der verwendete Mechanismus ausgesetzt und dem Kandidaten der nächste freie Zeitslot zugeteilt. Eine solche Erweiterung beeinflusst aber auch das Verhalten der beteiligten Fahrerassistenzagenten.

10. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit stelle ich ein agentengestütztes ITC-System vor. Dazu entwickle ich neuartige wertschätzungssensitive Mechanismen, mit denen sich der Verkehr an Straßenkreuzungen effektiver bewältigen lässt. Diese Mechanismen sind die ersten Mechanismen, die die individuelle Wertschätzung aller Verkehrsteilnehmer bei der Überquerung einer Straßenkreuzung berücksichtigen.

Ich zeige, wie man den damit verbundenen ökonomischen und technischen Herausforderungen begegnet, die ein solches ITC-System stellt.

Die initiale Zeitslotauktion mit Unterstützung (ITSA Valuation) und die Verzögerungskostenminimierung (ITSA Delay Cost) erfüllen wichtige Eigenschaften. So ist beispielsweise die Verzögerungskostenminimierung allokativ effizient, individuell rational, schwach budget-balanciert und anreizkompatibel. Dies führt dazu, dass Verkehrsteilnehmer einen Anreiz haben, an der Verzögerungskostenminimierung teilzunehmen und dabei ihre wahre Wertschätzung preiszugeben.

Mit Hilfe des eigens entwickelten Simulationswerkzeug evaluiere ich die entwickelten Mechanismen mittels Simulationen: Agentengestützte Mechanismen sind klassischen Mechanismen, wie z. B. Lichtsignalanlagen, deutlich überlegen. Ich zeige, dass bereits die Zeitslotanfrage (TSR) die gewichtete Wartezeit bei exklusiver Nutzung der Konfliktbereiche um mindestens 70% und die Verzögerungskostenminimierung sogar um mindestens 90% reduziert. Dies gilt ebenfalls für die ungewichtete Wartezeit. Auch der Kraftstoffverbrauch wird deutlich reduziert.

Der Vergleich agentengestützter Mechanismen untereinander zeigt, dass die Verzögerungskostenminimierung mit zunehmender Verkehrsstärke der Zeitslotanfrage überlegen ist. Dabei werden sowohl die gewichtete Wartezeit als auch die Wartezeit um bis zu 60% reduziert.

Für zukünftige Untersuchungen sollte man das bestehende Verkehrsmodell weiter verfeinern, um weitere fahrzeugtechnische Gegebenheiten zu berücksichtigen. Dann könnte man die entwickelten Mechanismen auf geeigneter Hardware umsetzen, um damit den Übergang von SiL (Software-in-the-Loop) zu HiL (Hardware-in-the-Loop) zu erreichen.

Parallel dazu sollte man sich um Kooperationspartner bemühen, mit denen man erste prototypische Umsetzungen verwirklichen kann. Als Kooperationspartner kommen sowohl Anbieter von Verkehrsinfrastruktur als auch Anbieter von Fahrzeugtechnik und Verkehrstelematik in Frage.

Auf Anbieterseite könnte man z. B. mit bestimmten Städten und Gemeinden, aber auch mit Anbietern von privat bewirtschafteter Verkehrsinfrastruktur kooperieren. Dasselbe gilt natürlich auch für Unternehmen, die eigene geschlossene Verkehrsbereiche betreiben, wie z. B. an Häfen oder Flughäfen.

Teil IV.

Anhang

A. Verzögerungskostenminimierung

In diesem Abschnitt zeige ich die folgenden Eigenschaften der Verzögerungskostenminimierung: individuelle Rationalität, Anreizkompatibilität und schwache Budget-Balancierung.

Um diese Eigenschaften zu zeigen, verwende ich die für die Verzögerungskostenminimierung angepasste Definition der Wohlfahrt.

A.1. Wohlfahrt

Im Falle der Verzögerungskostenminimierung entstehen dem Fahrzeug, das den nächsten Zeitslot erhält, keine Verzögerungskosten. Erhält das Fahrzeug nicht den nächsten Zeitslot, so können dem Fahrzeug Verzögerungskosten entstehen. Die Verzögerungskosten sind sogar abhängig vom Fahrzeug, das den nächsten Zeitslot erhält.

Aus diesem Grund verwende ich für die Verzögerungskostenminimierung die Definition 6.16 für die Wohlfahrt:

Definition A.1 (Wohlfahrt). *Die Wohlfahrt $W(\mathbf{x})$ ist die negative Summe der Verzögerungskosten, die allen Fahrzeugen der sichtbaren Nachbarschaft entstehen, wenn die beteiligten Fahrzeuge $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ bieten:*

$$W(\mathbf{x}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^N x_i d_i^j$$

Falls das Fahrzeug k als Gebot b_k bietet, während alle anderen Fahrzeuge $j \neq k$ ihre wahre Wertschätzung x_j bieten, so ändert sich die Wohlfahrt wie folgt:

$$W(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(b_k, \mathbf{x}_{-k}) (b_k d_k^j + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j)$$

Falls das Fahrzeug k als Gebot $b_k = 0$ bietet und alle übrigen Fahrzeuge $j \neq k$ ihre wahre Wertschätzung x_j bieten, so erhält man die Wohlfahrt $W(0, \mathbf{x}_{-k})$:

$$W(0, \mathbf{x}_{-k}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(0, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j$$

$W_{-k}(\mathbf{x})$ bezeichnet die Wohlfahrt aller Fahrzeuge, wenn man die Verzögerungskosten des Fahrzeugs k unberücksichtigt lässt:

A. Verzögerungskostenminimierung

$$W_{-k}(\mathbf{x}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(\mathbf{x}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j$$

Damit ergibt sich für die Zahlungsregel der Verzögerungskostenminimierung (siehe Gleichung 6.10):

$$\mu_k(\mathbf{x}) = \begin{cases} W(0, \mathbf{x}_{-k}) - W_{-k}(\mathbf{x}) & , \text{ wenn das Fahrzeug } k \text{ den Zeitslot bekommt} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

A.2. Individuelle Rationalität

Die Verzögerungskostenminimierung ist individuell rational, falls der erwartete Nutzen eines Teilnehmers durch die Abgabe eines Gebotes höher ist als der erwartete Nutzen, wenn er kein Gebot abgibt (siehe Definition 6.11).

Ich nehme im Folgenden an, dass das Fahrzeug k den zu vergebenden Zeitslot erhält, wenn es das Gebot b_k abgibt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit erhält das Fahrzeug m den nächsten Zeitslot, wenn das Fahrzeug k das Gebot $b_k = 0$ abgibt und alle anderen Fahrzeuge außer Fahrzeug k ihre wahre Wertschätzung preisgeben. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit erhält das Fahrzeug l den nächsten Zeitslot, wenn alle Fahrzeuge ihre wahre Wertschätzung preisgeben.

Bei einer allokativ effizienten Allokationsregel π gilt dann:

$$\begin{aligned} \pi_m(0, \mathbf{x}_{-k}) = 1 & \Rightarrow \forall t \in \mathbf{N} : - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^m \geq - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^t \\ & = \forall t \in \mathbf{N} : \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^m \leq \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^t \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} \pi_l(\mathbf{x}) = 1 & \Rightarrow \forall t \in \mathbf{N} : - \sum_{i=1}^N x_i d_i^l \geq - \sum_{i=1}^N x_i d_i^t \\ & = \forall t \in \mathbf{N} : \sum_{i=1}^N x_i d_i^l \leq \sum_{i=1}^N x_i d_i^t \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} \pi_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = 1 & \Rightarrow \forall t \in \mathbf{N} : -(b_k d_k^k + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k) \geq -(b_k d_k^t + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^t) \\ & = \forall t \in \mathbf{N} : (b_k d_k^k + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k) \leq (b_k d_k^t + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^t) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

A. Verzögerungskostenminimierung

Falls das Fahrzeug k als Gebot b_k bietet, während alle anderen Fahrzeuge $j \neq k$ ihre wahre Wertschätzung x_j bieten, so gilt für die Wohlfahrt aller Fahrzeuge außer Fahrzeug k :

$$W_{-k}(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = - \sum_{j=1}^N \pi_j(b_k, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j$$

Das bedeutet für die Kosten, die einem Fahrzeug k bei einem Gebot b_k entstehen, wenn es den Zeitslot erhält:

$$\begin{aligned} \mu_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) &= W(0, \mathbf{x}_{-k}) - W_{-k}(b_k, \mathbf{x}_{-k}) \\ &= - \sum_{j=1}^N \pi_j(0, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j - \left(- \sum_{j=1}^N \pi_j(b_k, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j \right) \\ &= - \sum_{j=1}^N \pi_j(0, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j + \sum_{j=1}^N \pi_j(b_k, \mathbf{x}_{-k}) \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^j \\ &\stackrel{\text{Annahmen}}{=} - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^m + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k \tag{A.4} \\ &= - \sum_{i=1}^N x_i d_i^m + \sum_{i=1}^N x_i d_i^k + x_k d_k^m - \underbrace{x_k d_k^k}_{=0} \\ &\stackrel{\text{(A.2)}}{\leq} - \sum_{i=1}^N x_i d_i^l + \sum_{i=1}^N x_i d_i^k + x_k d_k^m \end{aligned}$$

Falls das Fahrzeug k seine wahre Wertschätzung bietet ($b_k = x_k$), so gilt $k = l$. Daraus folgt dann:

$$\mu_k(x_k, \mathbf{x}_{-k}) = \mu_k(\mathbf{x}) \leq x_k d_k^m$$

Das bedeutet, dass, wenn das Fahrzeug k seine wahre Wertschätzung bietet, es immer höchstens so viel bezahlen muss, wie sich sein Nutzen verringert, wenn es an der Zeitslotvergabe nicht teilnimmt, indem es $b_k = 0$ bietet. Damit ist die Verzögerungskostenminimierung individuell rational.

A.3. Anreizkompatibilität

Ein Mechanismus ist anreizkompatibel, wenn ein Teilnehmer seinen Nutzen maximiert, wenn er seine wahre Wertschätzung preisgibt (Definition 6.13), solange alle übrigen Teilnehmer ihre wahre Wertschätzung preisgeben.

Wenn das Fahrzeug k den Zeitslot bekommt, so beträgt seine Zahlung:

$$\mu_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = W(0, \mathbf{x}_{-k}) - W_{-k}(b_k, \mathbf{x}_{-k})$$

Da das Fahrzeug k in diesem Fall keine Verzögerungskosten erfährt, gilt in diesem Fall:

$$u_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = -\mu_k(b_k, \mathbf{x}_{-k})$$

A. Verzögerungskostenminimierung

Wenn nicht das Fahrzeug k , sondern das Fahrzeug l den Zeitslot bekommt, so muss das Fahrzeug k nichts bezahlen. Es erfährt jedoch Verzögerungskosten. In diesem Fall gilt:

$$u_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) = -x_k d_k^l$$

Ausgehend von (A.4) gilt:

$$\begin{aligned}
 \mu_k(b_k, x_{-k}) &= - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^m + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k \\
 &\stackrel{(A.1)}{\geq} - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^l + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k \\
 &= -x_k d_k^l - \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^l + x_k d_k^k + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k + x_k d_k^l - \underbrace{x_k d_k^k}_{=0} \\
 &= - \underbrace{\sum_{i=1}^N x_i d_i^l + \sum_{i=1}^N x_i d_i^k}_{\geq 0 \text{ (A.2)}} + x_k d_k^l \\
 &\geq x_k d_k^l
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

Falls das Fahrzeug k durch das Gebot b_k den Zeitslot erhält, so lassen sich ausgehend von (A.5) zwei Fälle unterscheiden:

$b_k = x_k$. Falls das Fahrzeug k seine wahre Wertschätzung preisgibt, so gilt $l = k$. Dies bedeutet, dass die Zahlung von Fahrzeug k auf jeden Fall nicht negativ ist:

$$\mu_k(b_k, x_{-k}) \geq 0$$

$b_k > x_k$. Falls das Fahrzeug k nicht seine wahre Wertschätzung preisgibt, so muss das Fahrzeug k mindestens so viel bezahlen, wie es verloren hätte, wenn es seine wahre Wertschätzung geboten hätte:

$$\mu_k(b_k, x_{-k}) \geq x_k d_k^l$$

Aus diesen beiden Fällen folgt, dass alle Fahrzeuge ihren Nutzen maximieren, wenn sie ihre wahre Wertschätzung preisgeben. Aus diesem Grund ist die Verzögerungskostenminimierung anreizkompatibel.

A.4. Budget-Balancierung

Die Verzögerungskostenminimierung ist schwach budget-balanciert, wenn ausschließlich nicht negative Zahlungen zu leisten sind. Da nur Fahrzeuge eine Zahlung leisten müssen,

A. Verzögerungskostenminimierung

die einen Zeitslot erhalten, muss man bei jeder Zeitslotvergabe nur solche Fahrzeuge betrachten.

Ausgehend von (A.4) gilt:

$$\begin{aligned}\mu_k(b_k, \mathbf{x}_{-k}) &= - \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^m + \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i d_i^k}_{\geq 0 \text{ (A.1)}} \\ &\geq 0\end{aligned}$$

Damit ist die Verzögerungskostenminimierung schwach budget-balanciert.

B. Einstellungen

Bei der Evaluation werden drei Fahrzeugklassen unterschieden: Personenkraftwagen (CAR), Lastkraftwagen (HGV) und Busse (BUS). Tabelle B.1 beschreibt die Eigenschaften und relative Häufigkeit dieser Fahrzeugklassen.

Name	Relative Häufigkeit	a	a_{max}	d	d_{max}
CAR	0,900	1,96	1,96	2,75	7,00
HGV	0,050	0,62	0,62	1,25	4,61
BUS	0,050	1,00	1,00	0,85	7,00

Tabelle B.1.: Fahrzeugklassen

Innerhalb von Fahrzeugklassen werden einzelne Fahrzeugtypen unterschieden. Tabelle B.2 beschreibt die Eigenschaften der Fahrzeugtypen und die relative Häufigkeit innerhalb ihrer Fahrzeugklassen.

B. Einstellungen

Name	Klasse	Relative Häufigkeit	$v_{m,ax}$	Länge	Breite	Höhe	Kraftstofftyp	Hubraum	Frontfläche
VISSIM ONE	CAR	0,260	250,0	4,11	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM TWO	CAR	0,180	250,0	4,55	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM THREE	CAR	0,180	250,0	4,61	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM FOUR	CAR	0,180	250,0	4,76	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM FIVE	CAR	0,160	250,0	4,40	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM SIX	CAR	0,020	250,0	4,34	1,50	1,50	Benzin	2,000	2,00
VISSIM SCANIA	HGV	0,330	80,0	10,21	2,50	3,65	Diesel	14,200	6,50
VISSIM MAN	HGV	0,670	80,0	10,21	2,50	3,65	Diesel	12,400	6,50
VISSIM CITARO LE	BUS	1,000	100,0	11,54	2,50	3,08	Diesel	11,967	7,84

Tabelle B.2.: Fahrzeugtypen

C. Daten

In diesem Kapitel stelle ich die vollständigen Messergebnisse aus den Experimenten vor.

C.1. Mechanismenvergleich

Dieser Abschnitt enthält die vollständigen Messergebnisse aus dem Experiment „Mechanismenvergleich“ aus Abschnitt 8.4.

Die Abbildungen C.1 bis C.4 beschreiben zu jeder der 13 Messreihen den ermittelten Durchschnitt sowohl in grafischer Form als auch in einer Datentabelle. Abbildung C.1 enthält die Ergebnisse für den gemessenen Kreuzungsdurchsatz, Abbildung C.2 für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.3 für die Wartezeit und Abbildung C.4 für den Kraftstoffverbrauch.

Die Abbildungen C.5 bis C.8 beschreiben für die untersuchten Gesamtverkehrsstärken den ermittelten Durchschnitt und die untere und obere Schranke der 95%-Konfidenzintervalle zu jeder der 13 Messreihen. Abbildung C.5 enthält die Ergebnisse für den gemessenen Kreuzungsdurchsatz, Abbildung C.6 für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.7 für die Wartezeit und Abbildung C.8 für den Kraftstoffverbrauch.

Die Abbildungen C.9 bis C.11 beschreiben für die untersuchten Gesamtverkehrsstärken den relativen Unterschied zum Referenzmechanismus Ampel. Abbildung C.9 enthält die Ergebnisse für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.10 für die Wartezeit und Abbildung C.11 für den Kraftstoffverbrauch.

Die Abbildungen C.12 bis C.14 beschreiben für die untersuchten Gesamtverkehrsstärken den relativen Unterschied zu TSR. Abbildung C.12 enthält die Ergebnisse für die gewichtete Wartezeit, Abbildung C.13 für die Wartezeit und Abbildung C.14 für den Kraftstoffverbrauch.

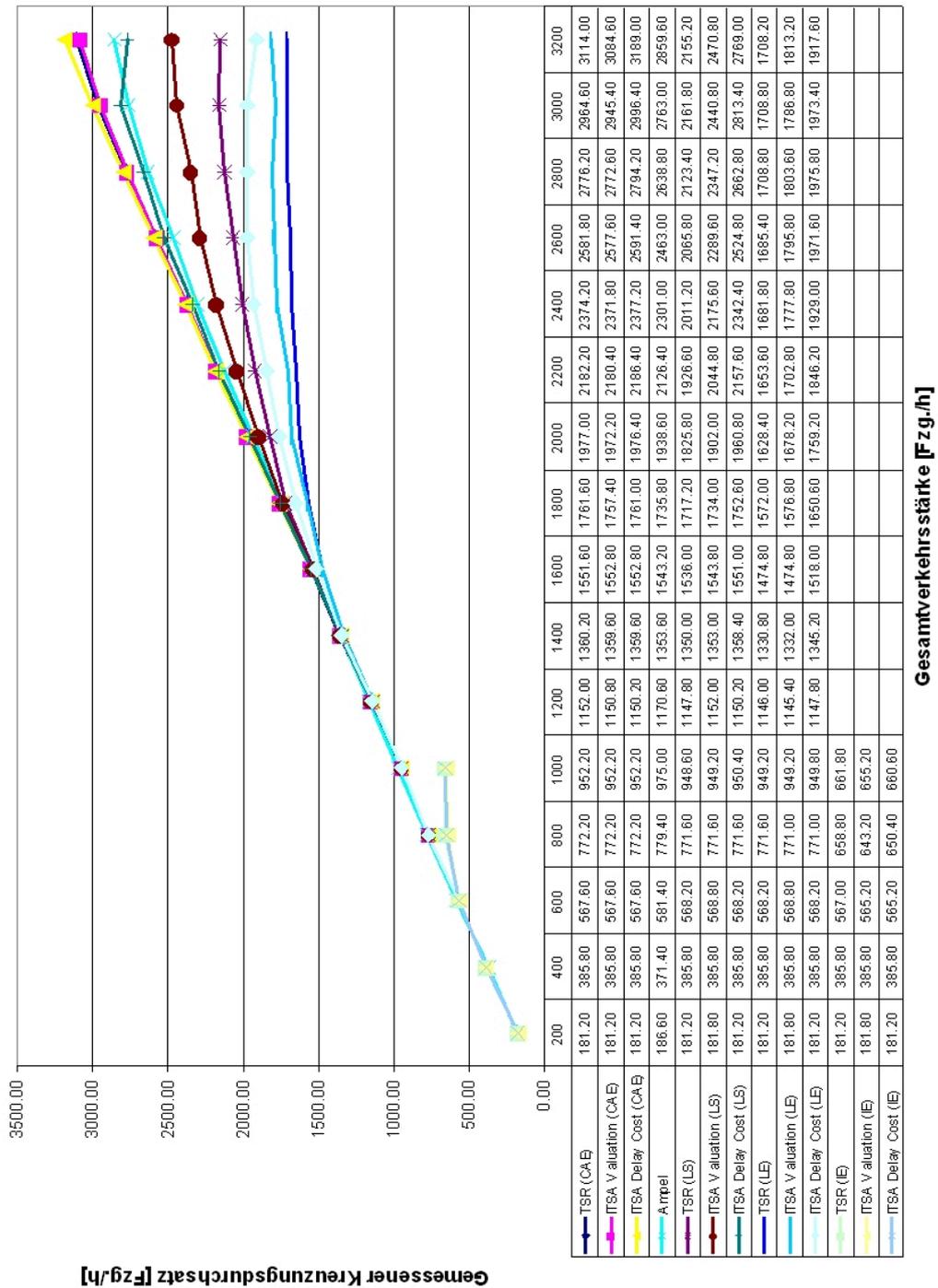


Abbildung C.1.: Mechanismenvergleich: Durchschnittlicher gemessener Kreuzungsdurchsatz [Fzg./h]

C. Daten

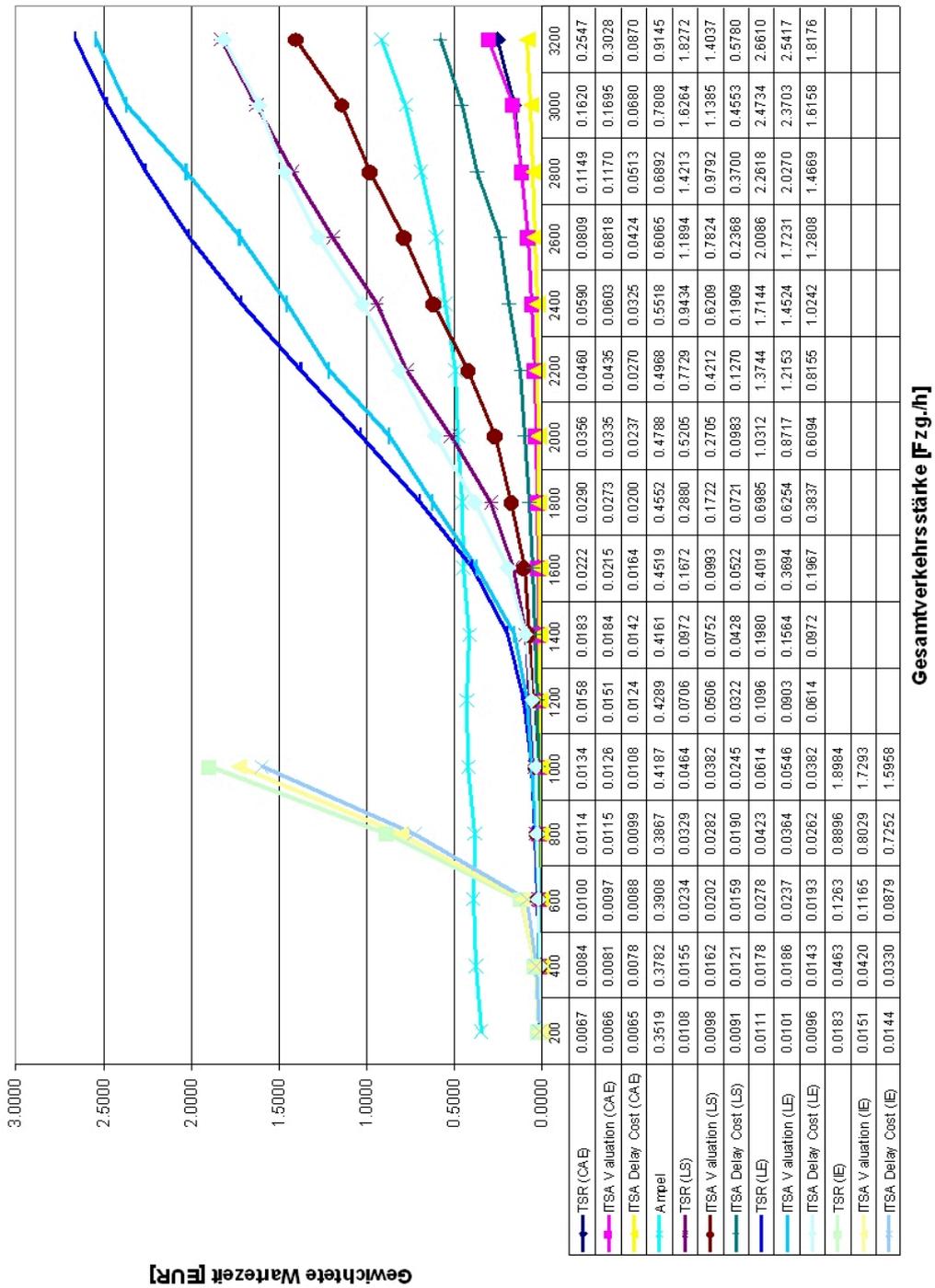


Abbildung C.2.: Mechanismenvergleich: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit [€]

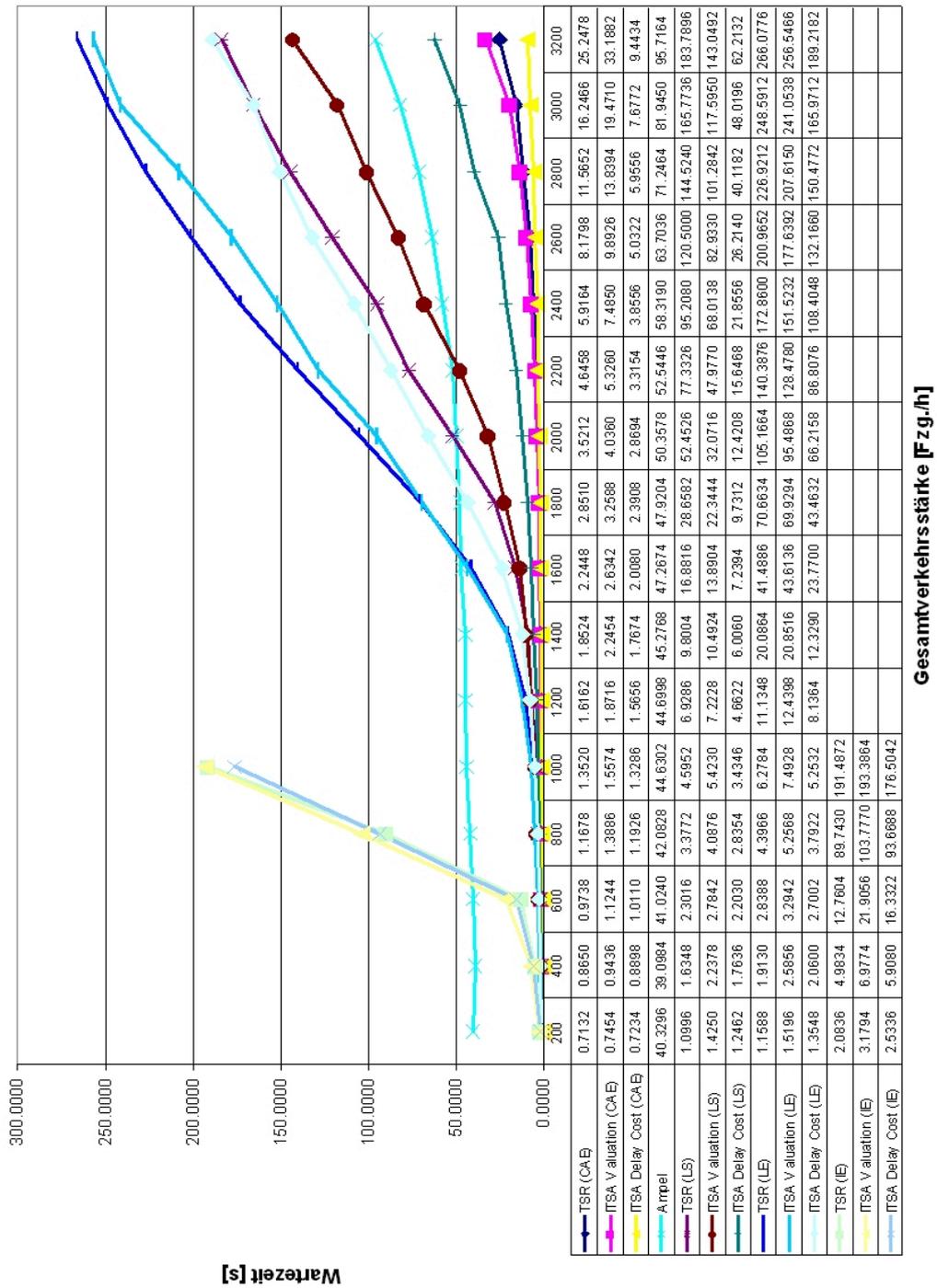


Abbildung C.3.: Mechanismenvergleich: Durchschnittliche Wartezeit [s]

C. Daten

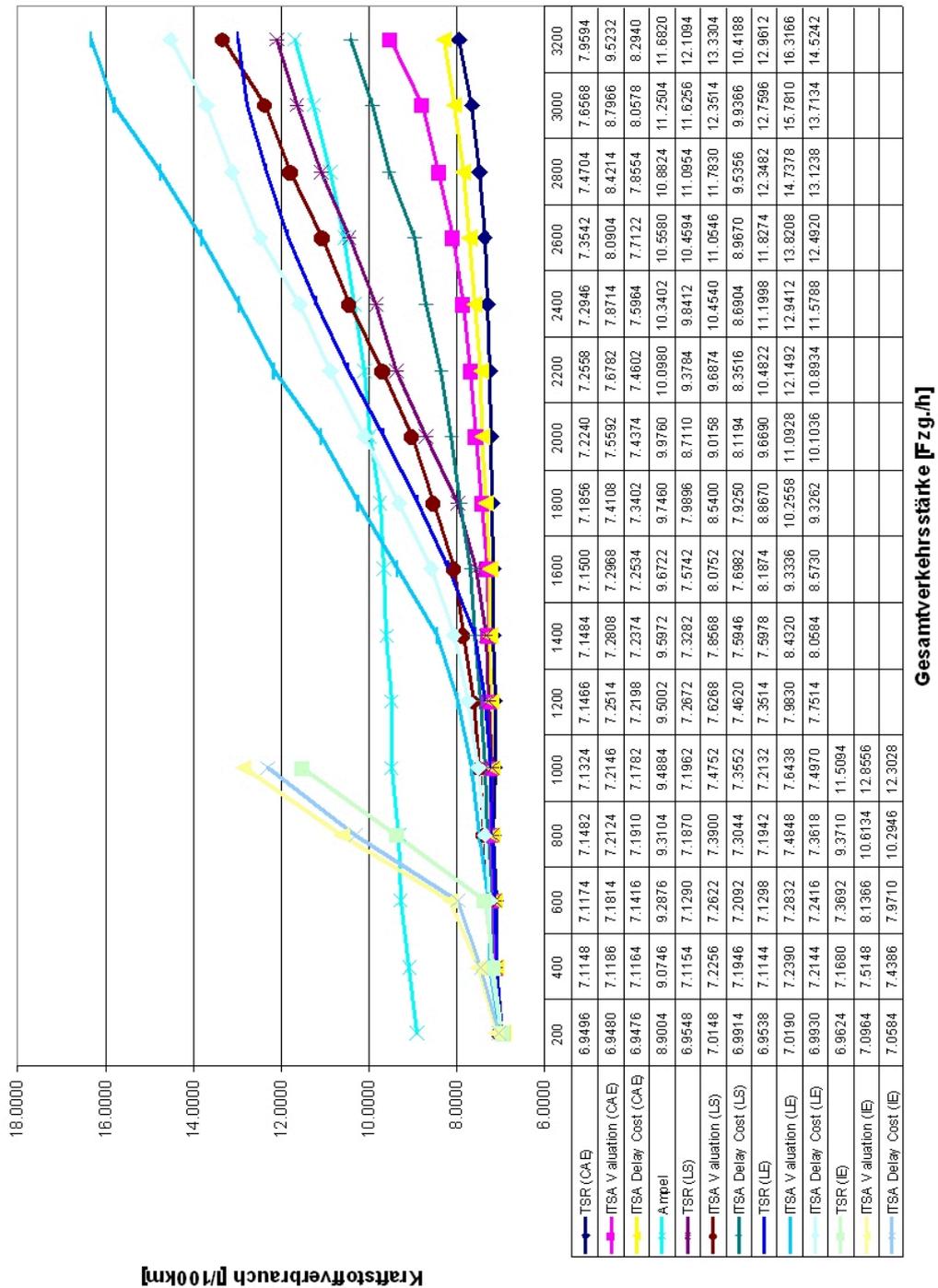


Abbildung C.4.: Mechanismenvergleich: Durchschnittlicher Kraftverkehrsstärke [Fzg./h] Kraftstoffverbrauch [l/100km]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Annpel low	56.42	115.59	181.59	238.38	302.09	364.26	428.32	496.57	564.21	632.45	698.32	752.36	809.22	868.37	905.97	943.37
Annpel	62.20	123.80	193.80	259.80	325.00	390.20	451.20	514.40	578.60	646.20	708.80	767.00	821.00	879.60	921.00	963.20
Annpel high	67.98	132.01	206.01	281.22	347.91	416.14	474.08	532.23	592.99	659.96	719.28	781.64	832.78	890.83	936.03	963.03
ITSA (CAE) low	56.23	122.36	174.45	238.01	296.01	362.05	430.25	494.54	560.58	635.40	704.15	761.25	833.59	895.79	960.60	1004.09
ITSA (CAE)	60.40	128.60	189.20	257.40	317.40	383.40	453.40	517.20	587.20	659.00	727.40	791.40	860.60	925.40	988.20	1036.00
ITSA (CAE) high	64.57	134.84	203.95	276.60	338.79	405.95	476.55	539.86	613.82	682.60	750.55	821.55	887.61	955.01	1015.80	1071.91
ITSA Valuation (CAE) low	56.23	122.36	174.45	238.01	296.01	362.05	430.25	494.54	560.58	635.40	704.15	761.25	833.59	895.79	960.60	1004.09
ITSA Valuation (CAE)	60.40	128.60	189.20	257.40	317.40	383.40	453.40	517.20	587.20	659.00	727.40	791.40	860.60	925.40	988.20	1036.00
ITSA Valuation (CAE) high	64.57	134.84	203.95	276.60	338.79	405.95	476.55	539.86	613.82	682.60	750.55	821.55	887.61	955.01	1015.80	1071.91
ITSA Valuation (CAE)	60.40	128.60	189.20	257.40	317.40	383.40	453.40	517.20	587.20	659.00	727.40	791.40	860.60	925.40	988.20	1036.00
ITSA Delay Cost (CAE) low	56.23	122.36	174.45	238.01	296.01	362.05	430.25	494.54	560.58	635.40	704.15	761.25	833.59	895.79	960.60	1004.09
ITSA Delay Cost (CAE)	60.40	128.60	189.20	257.40	317.40	383.40	453.40	517.20	587.20	659.00	727.40	791.40	860.60	925.40	988.20	1036.00
ITSA Delay Cost (CAE) high	64.57	134.84	203.95	276.60	338.79	405.95	476.55	539.86	613.82	682.60	750.55	821.55	887.61	955.01	1015.80	1071.91
ITSA Delay Cost (CAE)	60.40	128.60	189.20	257.40	317.40	383.40	453.40	517.20	587.20	659.00	727.40	791.40	860.60	925.40	988.20	1036.00
Annpel low	56.42	115.59	181.59	238.38	302.09	364.26	428.32	496.57	564.21	632.45	698.32	752.36	809.22	868.37	905.97	943.37
Annpel	62.20	123.80	193.80	259.80	325.00	390.20	451.20	514.40	578.60	646.20	708.80	767.00	821.00	879.60	921.00	963.20
Annpel high	67.98	132.01	206.01	281.22	347.91	416.14	474.08	532.23	592.99	659.96	719.28	781.64	832.78	890.83	936.03	963.03
ITSA (LS) low	56.23	122.36	174.96	237.21	295.68	358.12	428.27	491.36	546.93	587.87	618.39	642.72	672.02	689.03	706.81	698.52
ITSA (LS)	60.40	128.60	189.40	257.20	316.20	382.60	450.00	512.00	572.40	608.60	642.20	670.40	688.60	707.80	720.60	718.40
ITSA (LS) high	64.57	134.84	203.84	277.19	336.72	407.08	471.73	532.64	597.87	629.33	666.01	698.08	705.18	726.57	734.39	736.28
ITSA Valuation (LS) low	56.25	122.36	174.64	237.52	295.17	358.65	430.00	492.84	551.48	607.88	646.13	700.96	744.30	766.63	781.71	805.58
ITSA Valuation (LS)	60.60	128.60	189.60	257.20	316.40	384.00	451.00	514.60	578.00	634.00	681.60	725.20	762.20	782.40	813.60	823.60
ITSA Valuation (LS) high	64.95	134.84	204.56	276.88	337.63	409.36	472.00	536.36	604.52	660.12	717.07	749.44	782.10	797.97	845.49	841.62
ITSA Valuation (LS)	60.40	128.60	189.40	257.20	316.80	383.40	452.80	517.00	584.20	653.60	719.20	780.80	841.60	867.60	937.80	923.00
ITSA Delay Cost (LS) low	56.23	122.36	174.96	237.52	294.78	359.46	429.19	494.29	557.98	626.66	687.13	752.31	799.93	856.41	898.21	888.46
ITSA Delay Cost (LS)	60.40	128.60	189.40	257.20	316.80	383.40	452.80	517.00	584.20	653.60	719.20	780.80	841.60	867.60	937.80	923.00
ITSA Delay Cost (LS) high	64.57	134.84	203.84	276.88	338.82	407.34	476.41	539.71	610.42	680.54	751.27	809.29	863.27	918.79	977.39	957.54
ITSA Delay Cost (LS)	60.40	128.60	189.40	257.20	316.80	383.40	452.80	517.00	584.20	653.60	719.20	780.80	841.60	867.60	937.80	923.00
Annpel low	56.42	115.59	181.59	238.38	302.09	364.26	428.32	496.57	564.21	632.45	698.32	752.36	809.22	868.37	905.97	943.37
Annpel	62.20	123.80	193.80	259.80	325.00	390.20	451.20	514.40	578.60	646.20	708.80	767.00	821.00	879.60	921.00	963.20
Annpel high	67.98	132.01	206.01	281.22	347.91	416.14	474.08	532.23	592.99	659.96	719.28	781.64	832.78	890.83	936.03	963.03
ITSA (LE) low	56.23	122.36	174.96	237.21	296.35	357.62	425.47	472.04	502.88	521.11	534.51	542.24	536.83	548.23	552.30	552.94
ITSA (LE)	60.40	128.60	189.40	257.20	316.40	382.00	443.60	491.60	524.00	542.80	551.20	560.60	561.80	569.60	569.60	569.40
ITSA (LE) high	64.57	134.84	203.84	277.19	336.45	406.18	461.73	511.16	545.12	564.49	567.89	578.96	586.77	590.97	586.90	586.86
ITSA Valuation (LE) low	56.25	122.36	174.64	236.62	295.67	355.80	423.45	470.61	498.34	540.81	546.18	573.32	582.33	588.05	576.32	589.31
ITSA Valuation (LE)	60.60	128.60	189.60	257.00	316.40	381.80	444.00	491.60	525.60	559.40	567.60	592.60	598.60	601.20	595.60	604.40
ITSA Valuation (LE) high	64.95	134.84	204.56	277.38	337.13	407.80	464.55	512.59	552.86	577.99	589.02	611.88	614.87	614.36	614.88	619.49
ITSA Valuation (LE)	60.40	128.60	189.40	257.00	316.60	382.60	448.40	506.00	560.20	596.40	615.40	643.00	667.20	668.60	657.80	639.20
ITSA Delay Cost (LE) low	56.23	122.36	174.96	237.35	295.83	358.68	427.78	483.19	522.55	562.57	592.00	618.45	638.16	648.30	643.77	623.22
ITSA Delay Cost (LE)	60.40	128.60	189.40	257.00	316.60	382.60	448.40	506.00	560.20	596.40	615.40	643.00	667.20	668.60	657.80	639.20
ITSA Delay Cost (LE) high	64.57	134.84	203.84	276.65	337.37	406.52	469.02	528.81	577.85	610.23	638.80	667.55	676.24	668.90	671.83	665.18
ITSA Delay Cost (LE)	60.40	128.60	189.40	257.00	316.60	382.60	448.40	506.00	560.20	596.40	615.40	643.00	667.20	668.60	657.80	639.20
Annpel low	56.42	115.59	181.59	238.38	302.09	364.26	428.32	496.57	564.21	632.45	698.32	752.36	809.22	868.37	905.97	943.37
Annpel	62.20	123.80	193.80	259.80	325.00	390.20	451.20	514.40	578.60	646.20	708.80	767.00	821.00	879.60	921.00	963.20
Annpel high	67.98	132.01	206.01	281.22	347.91	416.14	474.08	532.23	592.99	659.96	719.28	781.64	832.78	890.83	936.03	963.03
ITSA (IE) low	56.23	122.36	176.96	216.48	218.52											
ITSA (IE)	60.40	128.60	189.00	219.60	220.60											
ITSA (IE) high	64.57	134.84	201.04	222.72	222.68											
ITSA Valuation (IE) low	56.25	122.36	177.66	209.39	214.82											
ITSA Valuation (IE)	60.60	128.60	188.40	214.40	218.40											
ITSA Valuation (IE) high	64.95	134.84	199.14	219.41	221.98											
ITSA Delay Cost (IE) low	56.23	122.36	177.66	212.12	218.36											
ITSA Delay Cost (IE)	60.40	128.60	188.40	216.80	220.20											
ITSA Delay Cost (IE) high	64.57	134.84	199.14	221.48	222.04											

Abbildung C.5.: Mechanismenvergleich: Durchschnittlicher gemessener Kreuzungsdurchsatz mit 95%-Konfidenzintervall [F_{zg}./h]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Annpel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Annpel	0.3519	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4151	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5816	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Annpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
TSR (CAE) low	0.0053	0.0073	0.0085	0.0092	0.0123	0.0151	0.0170	0.0194	0.0242	0.0278	0.0385	0.0445	0.0571	0.0815	0.1138	0.1617
TSR (CAE)	0.0067	0.0084	0.0100	0.0114	0.0134	0.0158	0.0183	0.0220	0.0290	0.0356	0.0460	0.0590	0.0809	0.1149	0.1620	0.2547
TSR (CAE) high	0.0082	0.0095	0.0115	0.0136	0.0144	0.0165	0.0196	0.0251	0.0338	0.0436	0.0565	0.0735	0.1047	0.1484	0.2103	0.3476
ITSA Valuation (CAE) low	0.0051	0.0066	0.0086	0.0100	0.0109	0.0137	0.0158	0.0196	0.0244	0.0247	0.0333	0.0492	0.0638	0.0890	0.1388	0.2006
ITSA Valuation (CAE)	0.0066	0.0081	0.0097	0.0115	0.0126	0.0151	0.0184	0.0215	0.0273	0.0336	0.0436	0.0603	0.0818	0.1170	0.1695	0.3028
ITSA Valuation (CAE) high	0.0082	0.0097	0.0108	0.0130	0.0144	0.0165	0.0210	0.0234	0.0302	0.0423	0.0536	0.0715	0.0998	0.1450	0.2062	0.4051
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.0052	0.0069	0.0080	0.0080	0.0100	0.0114	0.0131	0.0150	0.0178	0.0184	0.0219	0.0260	0.0328	0.0372	0.0516	0.0617
ITSA Delay Cost (CAE)	0.0065	0.0078	0.0088	0.0099	0.0108	0.0124	0.0142	0.0164	0.0200	0.0237	0.0270	0.0325	0.0424	0.0513	0.0680	0.0870
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.0079	0.0087	0.0096	0.0118	0.0116	0.0133	0.0152	0.0178	0.0222	0.0289	0.0320	0.0390	0.0521	0.0655	0.0845	0.1122
Annpel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Annpel	0.3519	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4151	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5816	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Annpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
TSR (LS) low	0.0060	0.0130	0.0201	0.0247	0.0300	0.0515	0.0737	0.1460	0.2415	0.3737	0.6057	0.7591	1.0328	1.7590	1.9952	1.5098
TSR (LS)	0.0108	0.0155	0.0234	0.0329	0.0464	0.0706	0.0972	0.1672	0.2880	0.5205	0.7729	0.9434	1.1894	1.4213	1.6284	1.8272
TSR (LS) high	0.0155	0.0181	0.0266	0.0411	0.0628	0.0898	0.1207	0.1884	0.3346	0.6674	0.9402	1.1277	1.3461	1.6836	1.8596	2.1446
ITSA Valuation (LS) low	0.0066	0.0113	0.0177	0.0218	0.0286	0.0439	0.0700	0.0830	0.1295	0.2042	0.3116	0.4528	0.5881	0.7073	0.9883	1.1408
ITSA Valuation (LS)	0.0098	0.0162	0.0202	0.0282	0.0382	0.0506	0.0752	0.0993	0.1722	0.2705	0.4212	0.6209	0.7824	0.9792	1.1386	1.4037
ITSA Valuation (LS) high	0.0130	0.0212	0.0227	0.0346	0.0478	0.0574	0.0804	0.1156	0.2149	0.3368	0.5308	0.7890	0.9767	1.2512	1.2886	1.6666
ITSA Delay Cost (LS) low	0.0063	0.0096	0.0142	0.0150	0.0206	0.0282	0.0381	0.0477	0.0638	0.0787	0.1144	0.1548	0.1883	0.2937	0.3925	0.4106
ITSA Delay Cost (LS)	0.0091	0.0121	0.0159	0.0190	0.0245	0.0322	0.0428	0.0522	0.0721	0.0983	0.1270	0.1909	0.2368	0.3700	0.4553	0.5780
ITSA Delay Cost (LS) high	0.0119	0.0145	0.0175	0.0231	0.0283	0.0362	0.0475	0.0566	0.0805	0.1179	0.1397	0.2270	0.2854	0.4463	0.5182	0.7454
Annpel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Annpel	0.3519	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4151	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5816	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Annpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
TSR (IE) low	0.0065	0.0153	0.0260	0.0304	0.0411	0.0847	0.1548	0.3465	0.5823	0.8763	1.2107	1.4964	1.8179	2.0952	2.2874	2.4700
TSR (IE)	0.0111	0.0178	0.0278	0.0423	0.0614	0.1096	0.1980	0.4019	0.6985	1.0312	1.3744	1.7144	2.0086	2.2618	2.4734	2.6610
TSR (IE) high	0.0157	0.0204	0.0295	0.0541	0.0816	0.1344	0.2413	0.4573	0.8148	1.1862	1.5381	1.9324	2.1993	2.4284	2.6594	2.8621
ITSA Valuation (IE) low	0.0071	0.0138	0.0210	0.0269	0.0390	0.0720	0.1330	0.2559	0.5022	0.7357	1.0204	1.3163	1.5537	1.8022	2.0379	2.2796
ITSA Valuation (IE)	0.0101	0.0186	0.0237	0.0364	0.0546	0.0903	0.1564	0.3694	0.6254	0.8717	1.2153	1.4524	1.7231	2.0270	2.3703	2.5417
ITSA Valuation (IE) high	0.0132	0.0235	0.0285	0.0459	0.0703	0.1086	0.1798	0.4828	0.7486	1.0078	1.4102	1.5884	1.8926	2.2519	2.7027	2.8038
ITSA Delay Cost (IE) low	0.0068	0.0125	0.0176	0.0209	0.0315	0.0485	0.0844	0.1648	0.2950	0.4752	0.6836	0.8796	1.1348	1.3410	1.4494	1.6652
ITSA Delay Cost (IE)	0.0096	0.0143	0.0193	0.0262	0.0382	0.0614	0.0972	0.1967	0.3637	0.6084	0.8155	1.0242	1.2808	1.4669	1.6158	1.8176
ITSA Delay Cost (IE) high	0.0125	0.0162	0.0209	0.0315	0.0449	0.0743	0.1099	0.2285	0.4724	0.7435	0.9475	1.1687	1.4267	1.5927	1.7822	1.9701
Annpel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Annpel	0.3519	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4151	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5816	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Annpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
TSR (IE) low	0.0104	0.0314	0.1082	0.1628	0.1590											
TSR (IE)	0.0183	0.0463	0.1263	0.8896	1.8984											
TSR (IE) high	0.0261	0.0611	0.1445	1.1504	2.2018											
ITSA Valuation (IE) low	0.0100	0.0318	0.0996	0.6052	1.4846											
ITSA Valuation (IE)	0.0151	0.0420	0.1165	0.8029	1.7293											
ITSA Valuation (IE) high	0.0202	0.0522	0.1334	1.0006	1.9741											
ITSA Delay Cost (IE) low	0.0091	0.0250	0.0756	0.5857	1.3384											
ITSA Delay Cost (IE)	0.0144	0.0330	0.0879	0.7252	1.5968											
ITSA Delay Cost (IE) high	0.0197	0.0410	0.1002	0.8648	1.8533											

Abbildung C.6.: Mechanismenvergleich: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall $[\Phi]$

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Annpel low	36.4463	36.4961	38.8906	39.5962	42.0553	42.3521	43.3248	45.1276	45.4372	48.0282	50.3508	54.1226	55.6022	66.3883	73.5799	93.0409
Annpel	40.3296	39.0984	41.0240	42.0828	44.6998	45.2768	47.2688	47.2674	47.9204	50.3578	52.5446	58.3190	63.7036	71.2464	81.9450	95.7164
Annpel high	44.2129	41.7007	43.1574	44.5694	47.2051	47.0475	47.2288	49.4072	50.4036	52.6874	54.7384	62.5154	71.8050	76.1045	90.3101	98.3919
TSR (CAE) low	0.6895	0.7866	0.8427	1.0240	1.2238	1.4673	1.7141	1.9861	2.4537	2.8374	3.6386	4.5799	5.8018	6.2466	11.5250	16.6372
TSR (CAE)	0.7132	0.8650	0.9738	1.1678	1.3620	1.6162	1.8524	2.2448	2.6510	3.0814	3.6386	4.5799	5.8018	6.2466	11.5250	16.6372
TSR (CAE) high	0.7569	0.9434	1.1049	1.3116	1.4802	1.7651	1.9907	2.5035	3.2483	4.2110	5.6550	7.2669	10.5578	14.7807	20.9682	33.8684
ITSA Valuation (CAE) low	0.6794	0.8855	1.0746	1.2652	1.4015	1.7916	1.9627	2.4782	3.3694	4.5694	6.4077	7.9887	11.2590	15.7924	24.0574	33.1882
ITSA Valuation (CAE)	0.7454	0.9436	1.1244	1.3686	1.5674	1.8716	2.2454	2.6342	3.2588	4.0360	5.0226	7.4850	9.8926	13.8394	19.4710	33.1882
ITSA Valuation (CAE) high	0.8114	1.0017	1.1742	1.5120	1.7133	1.9516	2.5081	2.7902	4.4674	4.7026	6.0926	8.5623	11.8165	16.4198	23.1496	42.3190
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.6793	0.8079	0.9003	1.0971	1.2268	1.4791	1.6747	1.8900	2.374	2.952	3.736	4.797	6.3966	8.6383	11.8165	16.4198
ITSA Delay Cost (CAE)	0.7234	0.8898	1.0110	1.1926	1.3286	1.6656	1.7674	2.0080	2.3908	2.8684	3.3154	3.8566	5.0322	6.5656	7.6772	9.4434
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.7675	0.9717	1.1217	1.2881	1.4304	1.6521	1.8601	2.1260	2.5442	3.3836	3.7836	4.4206	6.0984	7.1803	9.0259	11.7683
Annpel low	36.4463	36.4961	38.8906	39.5962	42.0553	42.3521	43.3248	45.1276	45.4372	48.0282	50.3508	54.1226	55.6022	66.3883	73.5799	93.0409
Annpel	40.3296	39.0984	41.0240	42.0828	44.6998	45.2768	47.2688	47.2674	47.9204	50.3578	52.5446	58.3190	63.7036	71.2464	81.9450	95.7164
Annpel high	44.2129	41.7007	43.1574	44.5694	47.2051	47.0475	47.2288	49.4072	50.4036	52.6874	54.7384	62.5154	71.8050	76.1045	90.3101	98.3919
TSR (LS) low	0.7277	1.4996	1.9739	2.8936	3.6368	5.7575	7.7929	14.0894	24.0371	37.5011	63.9687	78.4901	107.4990	122.3305	144.8837	157.2693
TSR (LS)	1.0996	1.6348	2.3016	3.3772	4.0876	6.9286	9.8004	16.8816	28.6682	52.4526	77.3226	95.2080	120.5000	144.5240	165.7736	183.7886
TSR (LS) high	1.4715	1.7700	2.6293	3.8609	5.5536	8.0987	11.8079	19.6738	33.2793	67.4041	90.7065	111.9259	133.5010	166.7175	186.8635	210.3099
ITSA Valuation (LS) low	0.8868	1.9855	2.3547	3.8059	4.8746	6.5073	9.6292	12.1284	17.5712	25.4036	39.8342	53.6034	66.8087	76.6353	102.8645	121.3110
ITSA Valuation (LS)	1.4250	2.2378	2.7842	4.0876	5.4230	7.2228	10.4924	13.8904	22.3444	32.0716	47.9770	68.0138	82.9330	101.2842	117.5960	143.0492
ITSA Valuation (LS) high	1.9632	2.4901	3.2137	4.3693	5.9714	7.9383	11.3556	15.6524	27.1176	38.7396	56.1198	82.4242	99.0573	125.9331	132.3255	164.7874
ITSA Delay Cost (LS) low	0.8520	1.7302	2.0086	2.4625	3.1287	4.1096	5.4945	6.6528	8.8145	11.0963	14.6245	18.7514	22.4838	33.6207	42.8362	44.3707
ITSA Delay Cost (LS)	1.2462	1.7636	2.2030	2.8354	3.4346	4.6622	6.0060	7.2394	9.7312	12.4208	15.6468	21.8556	26.2140	40.1182	48.0196	62.2132
ITSA Delay Cost (LS) high	1.6304	1.7970	2.3975	3.2083	3.7405	5.2149	6.5175	7.8260	10.6479	13.7453	16.6691	24.9598	29.9442	46.6157	53.2030	80.0657
Annpel low	36.4463	36.4961	38.8906	39.5962	42.0553	42.3521	43.3248	45.1276	45.4372	48.0282	50.3508	54.1226	55.6022	66.3883	73.5799	93.0409
Annpel	40.3296	39.0984	41.0240	42.0828	44.6998	45.2768	47.2688	47.2674	47.9204	50.3578	52.5446	58.3190	63.7036	71.2464	81.9450	95.7164
Annpel high	44.2129	41.7007	43.1574	44.5694	47.2051	47.0475	47.2288	49.4072	50.4036	52.6874	54.7384	62.5154	71.8050	76.1045	90.3101	98.3919
TSR (IE) low	0.8206	1.7417	2.4558	3.5749	5.1383	9.1440	15.4827	36.1115	59.1183	89.9431	123.0516	150.9594	185.1442	210.4770	232.1193	248.3846
TSR (IE)	1.1588	1.9130	2.8388	4.3966	6.2784	11.1348	20.0864	41.8886	70.6634	105.1664	140.3876	172.8600	200.9652	226.9212	248.5912	266.0776
TSR (IE) high	1.4970	2.0843	3.2218	5.2183	7.4185	13.1256	24.6901	46.8657	82.2085	120.3897	157.7236	194.7806	216.7862	243.3654	265.0641	283.7706
ITSA Valuation (IE) low	0.9938	2.2769	2.8440	4.7015	6.3723	9.9713	18.2586	31.7149	35.4232	53.5647	73.5113	95.4726	117.6408	138.0909	148.2629	166.9605
ITSA Valuation (IE)	1.5196	2.5956	3.2942	5.2568	7.4928	12.4398	20.8516	45.6136	69.9294	95.4868	128.4780	151.5232	177.6392	207.6150	241.0538	256.5466
ITSA Valuation (IE) high	2.0454	2.8943	3.7444	5.8121	8.6133	14.9083	23.4446	55.4889	82.3184	109.8861	150.0550	165.4706	194.4526	232.5700	278.3236	282.1292
ITSA Delay Cost (IE) low	1.3648	2.0600	2.7002	3.7922	5.2532	7.1062	10.0223	19.1719	35.4232	53.5647	73.5113	95.4726	117.6408	138.0909	148.2629	166.9605
ITSA Delay Cost (IE)	1.7637	2.1864	3.0316	4.1861	5.4215	9.1866	14.6357	27.8251	51.5032	78.8689	100.1039	121.3370	146.6912	162.8636	183.6795	211.4759
ITSA Delay Cost (IE) high	36.4463	36.4961	38.8906	39.5962	42.0553	42.3521	43.3248	45.1276	45.4372	48.0282	50.3508	54.1226	55.6022	66.3883	73.5799	93.0409
Annpel low	40.3296	39.0984	41.0240	42.0828	44.6998	45.2768	47.2688	47.2674	47.9204	50.3578	52.5446	58.3190	63.7036	71.2464	81.9450	95.7164
Annpel	44.2129	41.7007	43.1574	44.5694	47.2051	47.0475	47.2288	49.4072	50.4036	52.6874	54.7384	62.5154	71.8050	76.1045	90.3101	98.3919
Annpel high	1.5662	1.1575	10.2411	64.3574	185.9749											
TSR (IE) low	2.0636	4.9834	12.7604	89.7430	191.4872											
TSR (IE) high	2.6010	5.8093	15.2797	115.1286	216.9895											
ITSA Valuation (IE) low	2.2379	5.9600	17.7046	62.6044	174.0735											
ITSA Valuation (IE)	3.1794	6.9774	21.9056	103.7770	193.3664											
ITSA Valuation (IE) high	4.1209	7.9898	26.1086	124.9496	212.8893											
ITSA Delay Cost (IE) low	1.5668	4.9245	13.7034	77.4448	155.8650											
ITSA Delay Cost (IE)	2.5336	5.9080	16.3322	93.6888	176.5042											
ITSA Delay Cost (IE) high	3.4804	6.8915	18.9610	109.5928	197.1434											

Abbildung C.7.: Mechanismenvergleich: Durchschnittliche Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall [s]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Amipel low	8.2940	8.7553	9.1572	9.0794	9.3534	9.2887	9.3907	9.3775	9.5241	9.7484	9.9040	10.1085	10.1828	10.5556	10.7851	11.3800
Amipel	8.9004	9.0746	9.2876	9.3104	9.4884	9.5002	9.4884	9.6722	9.7460	9.9780	10.2930	10.3402	10.5560	10.8824	11.2504	11.6820
Amipel high	9.5068	9.3939	9.4180	9.5414	9.6234	9.7117	9.8037	9.8669	9.9679	10.2036	10.2920	10.5719	10.9332	11.2092	11.7157	11.9840
ITSR (CAE) low	6.5637	6.8529	6.9796	6.9785	7.0623	7.0080	7.0088	7.0125	7.0712	7.1317	7.1872	7.2187	7.2458	7.3271	7.5328	7.7163
ITSR (CAE)	6.9496	7.1148	7.1474	7.1482	7.1324	7.1466	7.1484	7.1500	7.1856	7.2240	7.2568	7.2946	7.3542	7.4704	7.6568	7.9594
ITSR (CAE) high	7.3155	7.3767	7.2562	7.3179	7.2971	7.2862	7.2860	7.2875	7.3000	7.3163	7.3244	7.3705	7.4626	7.6137	7.8088	8.2025
ITSA Valuation (CAE) low	6.5847	6.8548	7.0366	7.0117	7.0135	7.0987	7.1434	7.1517	7.3083	7.4238	7.5088	7.6945	7.8996	8.2322	8.6091	9.0635
ITSA Valuation (CAE)	6.9480	7.1186	7.1814	7.2124	7.2146	7.2514	7.2808	7.2968	7.4108	7.5592	7.6782	7.8714	8.0904	8.4214	8.7966	9.5232
ITSA Valuation (CAE) high	7.3113	7.3824	7.3272	7.4131	7.4157	7.4041	7.4182	7.4419	7.5133	7.6946	7.8476	8.0483	8.2812	8.6106	8.9841	9.9629
ITSA Delay Cost (CAE) low	6.5848	6.8547	6.9770	6.9898	7.0009	7.0725	7.0914	7.1125	7.2494	7.3402	7.3427	7.4535	7.5597	7.6396	7.8653	7.9728
ITSA Delay Cost (CAE)	6.9476	7.1164	7.1416	7.1910	7.1782	7.2198	7.2374	7.2534	7.3402	7.4374	7.4602	7.5964	7.7122	7.8554	8.0578	8.2940
ITSA Delay Cost (CAE) high	7.3104	7.3781	7.3062	7.3922	7.3655	7.3671	7.3834	7.3943	7.4310	7.5725	7.5777	7.7393	7.8647	8.0772	8.2503	8.6152
Amipel low	8.2940	8.7553	9.1572	9.0794	9.3534	9.2887	9.3907	9.3775	9.5241	9.7484	9.9040	10.1085	10.1828	10.5556	10.7851	11.3800
Amipel	8.9004	9.0746	9.2876	9.3104	9.4884	9.5002	9.5972	9.6722	9.7460	9.9780	10.2930	10.3402	10.5560	10.8824	11.2504	11.6820
Amipel high	9.5068	9.3939	9.4180	9.5414	9.6234	9.7117	9.8037	9.8669	9.9679	10.2036	10.2920	10.5719	10.9332	11.2092	11.7157	11.9840
ITSR (LS) low	6.5887	6.8518	6.9990	7.0227	7.0377	7.1423	7.2340	7.5031	7.9244	8.3424	9.0619	9.4330	10.0626	10.5607	11.1338	11.5746
ITSR (LS)	6.9548	7.1154	7.1290	7.1870	7.1962	7.3282	7.5742	7.6986	8.7110	9.3784	9.8412	10.4540	11.0546	11.7830	12.3514	13.3004
ITSR (LS) high	7.3209	7.3790	7.2590	7.3513	7.3547	7.3921	7.4224	7.6453	8.0548	8.0796	8.6949	10.2494	10.8562	11.6101	12.1174	12.6442
ITSA Valuation (LS) low	6.6265	6.9509	7.1391	7.1894	7.3032	7.4332	7.7103	7.8619	8.3436	8.7620	9.3682	9.9921	10.5905	10.9632	11.8518	12.5677
ITSA Valuation (LS)	7.0148	7.2256	7.2622	7.3900	7.4752	7.6288	8.6568	8.0752	8.5400	9.0168	9.6874	10.4540	11.0546	11.7830	12.3514	13.3004
ITSA Valuation (LS) high	7.4031	7.5003	7.3853	7.5906	7.6472	7.8204	8.0033	8.2885	8.7964	9.2696	10.0186	10.9159	11.5587	12.6128	12.8510	14.0831
ITSA Delay Cost (LS) low	6.6115	6.9212	7.0833	7.1188	7.2093	7.3301	7.4519	7.5287	7.8546	7.9801	8.2208	8.4767	8.7744	9.3616	9.6853	9.8775
ITSA Delay Cost (LS)	6.9914	7.1946	7.2092	7.3044	7.3652	7.4620	7.5946	7.6982	7.9250	8.1194	8.3516	8.6904	8.9670	9.5356	9.9366	10.4188
ITSA Delay Cost (LS) high	7.3713	7.4680	7.3351	7.4900	7.5011	7.5939	7.7379	7.8677	7.9954	8.2587	8.4824	8.9041	9.1596	9.7096	10.1879	10.9601
Amipel low	8.2940	8.7553	9.1572	9.0794	9.3534	9.2887	9.3907	9.3775	9.5241	9.7484	9.9040	10.1085	10.1828	10.5556	10.7851	11.3800
Amipel	8.9004	9.0746	9.2876	9.3104	9.4884	9.5002	9.5972	9.6722	9.7460	9.9780	10.2930	10.3402	10.5560	10.8824	11.2504	11.6820
Amipel high	9.5068	9.3939	9.4180	9.5414	9.6234	9.7117	9.8037	9.8669	9.9679	10.2036	10.2920	10.5719	10.9332	11.2092	11.7157	11.9840
ITSR (LE) low	6.5889	6.8509	6.9990	7.0219	7.0487	7.2309	7.5649	8.1290	8.7333	9.4244	10.2087	10.8404	11.6840	12.0474	12.5201	12.6338
ITSR (LE)	6.9538	7.1144	7.1298	7.1942	7.2132	7.3519	7.6307	8.1874	8.6670	9.1936	10.4822	11.1998	11.8274	12.3482	12.7596	12.9612
ITSR (LE) high	7.3187	7.3779	7.2606	7.3665	7.3777	7.4719	7.6307	8.2458	9.0007	9.9136	10.7557	11.5692	11.9708	12.6490	12.9991	13.2886
ITSA Valuation (LE) low	6.6330	6.9668	7.1490	7.2467	7.4705	7.8578	8.2648	9.0106	9.9648	10.7589	11.6313	12.6420	13.3980	13.9933	14.7505	15.6778
ITSA Valuation (LE)	7.0190	7.2390	7.2832	7.4848	7.6438	7.9830	8.4320	9.3336	10.2558	11.0928	12.1492	12.9412	13.8208	14.7378	15.7010	16.3166
ITSA Valuation (LE) high	7.4050	7.5112	7.4184	7.7229	7.8171	8.1082	8.5992	9.6566	10.5468	11.4267	12.6671	13.2404	14.3036	15.4823	16.8115	16.9554
ITSA Delay Cost (LE) low	6.6173	6.9295	7.1060	7.1658	7.3229	7.6161	7.9455	8.5000	9.0035	9.6280	10.5819	11.2485	12.6490	13.1238	13.7134	14.5242
ITSA Delay Cost (LE)	6.9930	7.2144	7.2416	7.3618	7.4970	7.7514	8.0684	8.5730	9.3262	10.1036	10.8934	11.5788	12.4920	13.1238	13.7134	14.5242
ITSA Delay Cost (LE) high	7.3687	7.4993	7.3772	7.5578	7.6711	7.8687	8.1713	8.6460	9.6489	10.3792	11.2049	11.9091	12.9985	13.6012	14.3318	15.2310
Amipel low	8.2940	8.7553	9.1572	9.0794	9.3534	9.2887	9.3907	9.3775	9.5241	9.7484	9.9040	10.1085	10.1828	10.5556	10.7851	11.3800
Amipel	8.9004	9.0746	9.2876	9.3104	9.4884	9.5002	9.5972	9.6722	9.7460	9.9780	10.2930	10.3402	10.5560	10.8824	11.2504	11.6820
Amipel high	9.5068	9.3939	9.4180	9.5414	9.6234	9.7117	9.8037	9.8669	9.9679	10.2036	10.2920	10.5719	10.9332	11.2092	11.7157	11.9840
ITSR (IE) low	6.6023	6.9172	7.2229	8.9650	11.2158											
ITSR (IE)	6.9624	7.1680	7.3692	9.3710	11.5094											
ITSR (IE) high	7.3225	7.4188	7.5155	9.7770	11.8030											
ITSA Valuation (IE) low	6.7073	7.2289	7.9308	10.2719	12.5407											
ITSA Valuation (IE)	7.0964	7.5148	8.1366	10.6134	12.8566											
ITSA Valuation (IE) high	7.4855	7.8007	8.3424	10.9549	13.1705											
ITSA Delay Cost (IE) low	6.7033	7.1892	7.7772	10.0331	11.7937											
ITSA Delay Cost (IE)	7.0584	7.4386	7.9710	10.2946	12.3028											
ITSA Delay Cost (IE) high	7.4135	7.6880	8.1648	10.5561	12.8119											

Abbildung C.8.: Mechanismenvergleich: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch mit 95%-Konfidenzintervall [l/100km]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampep low - TSR (CAE) low / Ampep low	0.7543	0.6336	0.6998	0.6652	0.6636	0.6493	0.6566	0.6518	0.6360	0.6326	0.6068	0.6276	0.7135	0.7457	0.6729	0.6025
Ampep - TSR (CAE) / Ampep	0.9809	0.9778	0.9745	0.9705	0.9690	0.9631	0.9551	0.9508	0.9361	0.9257	0.9073	0.8931	0.8666	0.8332	0.7925	0.7215
Ampep high - TSR (CAE) high / Ampep high	1.2075	1.1219	1.0491	0.9789	0.9633	0.9492	0.9356	0.9247	0.9156	0.9081	0.8918	0.8766	0.8523	0.8197	0.7820	0.7406
Ampep low - ITSA Valuation (CAE) low / Ampep low	0.7522	0.6340	0.6987	0.6729	0.6633	0.6498	0.6535	0.6484	0.6320	0.6248	0.6008	0.6236	0.7126	0.7494	0.6643	0.5957
Ampep - ITSA Valuation (CAE) / Ampep	0.9812	0.9756	0.9751	0.9702	0.9698	0.9648	0.9568	0.9524	0.9400	0.9305	0.9125	0.8947	0.8651	0.8302	0.7829	0.6689
Ampep high - ITSA Valuation (CAE) high / Ampep high	1.2071	1.1229	1.0515	0.9826	0.9673	0.9534	0.9414	0.9310	0.9230	0.9162	0.9007	0.8844	0.8655	0.8411	0.8111	0.7801
Ampep low - ITSA Delay Cost (CAE) low / Ampep low	0.7550	0.6344	0.7010	0.6739	0.6636	0.6508	0.6538	0.6483	0.6318	0.6246	0.6008	0.6236	0.7126	0.7494	0.6643	0.5955
Ampep - ITSA Delay Cost (CAE) / Ampep	0.9815	0.9795	0.9775	0.9745	0.9742	0.9711	0.9659	0.9637	0.9560	0.9506	0.9457	0.9412	0.9300	0.9255	0.9129	0.9049
Ampep high - ITSA Delay Cost (CAE) high / Ampep high	1.2080	1.1245	1.0539	0.9852	0.9748	0.9658	0.9589	0.9542	0.9412	0.9321	0.9157	0.8988	0.8857	0.8652	0.8404	0.8143
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (LS) low / Ampep low	0.7462	0.6165	0.6830	0.6578	0.6485	0.6346	0.6361	0.6301	0.6137	0.6062	0.5823	0.6051	0.6941	0.7310	0.6463	0.5779
Ampep - TSR (LS) / Ampep	0.9694	0.9589	0.9402	0.9149	0.8992	0.8853	0.8764	0.8691	0.8526	0.8460	0.8217	0.8046	0.7763	0.7419	0.7031	0.6749
Ampep high - TSR (LS) high / Ampep high	1.1926	1.1013	1.0174	0.9478	0.9323	0.9183	0.9062	0.8958	0.8864	0.8791	0.8626	0.8466	0.8313	0.8164	0.8011	0.7868
Ampep low - ITSA Valuation (LS) low / Ampep low	0.7487	0.6134	0.6775	0.6524	0.6431	0.6292	0.6329	0.6278	0.6114	0.6042	0.5803	0.6031	0.6921	0.7290	0.6443	0.5759
Ampep - ITSA Valuation (LS) / Ampep	0.9721	0.9571	0.9462	0.9271	0.9167	0.9079	0.9019	0.8973	0.8841	0.8775	0.8531	0.8360	0.8077	0.7733	0.7340	0.7069
Ampep high - ITSA Valuation (LS) high / Ampep high	1.1956	1.1007	1.0249	0.9518	0.9363	0.9223	0.9102	0.9000	0.8910	0.8835	0.8673	0.8513	0.8353	0.8200	0.8049	0.7909
Ampep low - ITSA Delay Cost (LS) low / Ampep low	0.7503	0.6247	0.6894	0.6642	0.6549	0.6410	0.6447	0.6396	0.6232	0.6160	0.5921	0.6149	0.7039	0.7408	0.6561	0.5877
Ampep - ITSA Delay Cost (LS) / Ampep	0.9741	0.9681	0.9594	0.9508	0.9416	0.9290	0.9217	0.9164	0.9032	0.8968	0.8724	0.8553	0.8270	0.7926	0.7533	0.7262
Ampep high - ITSA Delay Cost (LS) high / Ampep high	1.1980	1.1116	1.0369	0.9637	0.9482	0.9342	0.9221	0.9117	0.9026	0.8949	0.8784	0.8624	0.8464	0.8310	0.8159	0.8018
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (IE) low / Ampep low	0.7442	0.6117	0.6844	0.6573	0.6477	0.6338	0.6364	0.6304	0.6140	0.6068	0.5829	0.6057	0.6947	0.7316	0.6469	0.5785
Ampep - TSR (IE) / Ampep	0.9684	0.9529	0.9289	0.8907	0.8756	0.8616	0.8521	0.8456	0.8292	0.8227	0.7983	0.7812	0.7529	0.7185	0.6792	0.6521
Ampep high - TSR (IE) high / Ampep high	1.1927	1.0941	1.0095	0.9400	0.9245	0.9105	0.9000	0.8916	0.8826	0.8751	0.8586	0.8426	0.8266	0.8111	0.7959	0.7807
Ampep low - ITSA Valuation (IE) low / Ampep low	0.7488	0.6066	0.6667	0.6415	0.6322	0.6183	0.6219	0.6168	0.6004	0.5932	0.5693	0.5921	0.6811	0.7180	0.6333	0.5649
Ampep - ITSA Valuation (IE) / Ampep	0.9712	0.9507	0.9392	0.9059	0.8906	0.8766	0.8671	0.8606	0.8442	0.8376	0.8132	0.7961	0.7678	0.7334	0.6941	0.6670
Ampep high - ITSA Valuation (IE) high / Ampep high	1.1956	1.0948	1.0158	0.9463	0.9308	0.9168	0.9047	0.8943	0.8853	0.8780	0.8615	0.8455	0.8295	0.8140	0.7989	0.7848
Ampep low - ITSA Delay Cost (IE) low / Ampep low	0.7474	0.6179	0.6844	0.6573	0.6477	0.6338	0.6364	0.6304	0.6140	0.6068	0.5829	0.6057	0.6947	0.7316	0.6469	0.5785
Ampep - ITSA Delay Cost (IE) / Ampep	0.9726	0.9622	0.9507	0.9322	0.9247	0.9107	0.9032	0.8979	0.8846	0.8782	0.8538	0.8367	0.8084	0.7740	0.7347	0.7076
Ampep high - ITSA Delay Cost (IE) high / Ampep high	1.1979	1.1064	1.0270	0.9585	0.9430	0.9290	0.9185	0.9100	0.9010	0.8935	0.8770	0.8610	0.8450	0.8295	0.8144	0.8003
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (IE) low / Ampep low	0.7268	0.7314	0.6332	-2.0025	-4.2397											
Ampep - TSR (IE) / Ampep	0.9481	0.8776	0.6767	-1.3004	-3.5341											
Ampep high - TSR (IE) high / Ampep high	1.1694	1.0238	0.7203	-0.6983	-2.8296											
Ampep low - ITSA Valuation (IE) low / Ampep low	0.7368	0.7421	0.6533	-1.6311	-3.7553											
Ampep - ITSA Valuation (IE) / Ampep	0.9570	0.8891	0.7019	-1.0761	-3.1303											
Ampep high - ITSA Valuation (IE) high / Ampep high	1.1771	1.0360	0.7505	-0.5211	-2.9053											
Ampep low - ITSA Delay Cost (IE) low / Ampep low	0.7347	0.6932	0.7270	-1.2991	-3.4759											
Ampep - ITSA Delay Cost (IE) / Ampep	0.9592	0.9127	0.7751	-0.8754	-2.1470											
Ampep high - ITSA Delay Cost (IE) high / Ampep high	1.1836	1.0617	0.8231	-0.4926	-2.1470											
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Abbildung C.9.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit im Vergleich zur Ampep

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampep low - TSR (CAE) low / Ampep low	0.8655	0.9109	0.9266	0.9089	0.9137	0.9118	0.9480	0.9170	0.9495	0.9170	0.8908	0.8797	0.8191	0.8027	0.7551	0.6667
Ampep - TSR (CAE) / Ampep	0.8623	0.9779	0.9763	0.9722	0.9697	0.9638	0.9951	0.9525	0.9405	0.9301	0.9116	0.8986	0.8377	0.8191	0.7551	0.7362
Ampep high - TSR (CAE) high / Ampep high	1.0792	1.0259	1.0346	1.0267	1.0169	1.0034	0.9566	0.9499	0.9420	0.9307	0.9149	0.9122	0.8682	0.8397	0.8114	0.8114
Ampep low - ITSa Valuation (CAE) low / Ampep low	0.8843	0.9100	0.9215	0.9068	0.9051	0.9068	0.9432	0.9366	0.9249	0.9139	0.8983	0.8674	0.8050	0.7751	0.7015	0.6113
Ampep - ITSa Valuation (CAE) / Ampep	0.8815	0.9759	0.9726	0.9670	0.9651	0.9681	0.9443	0.9320	0.9199	0.8996	0.8717	0.8447	0.8058	0.7624	0.6533	0.6533
Ampep high - ITSa Valuation (CAE) high / Ampep high	1.0787	1.0418	1.0237	1.0272	1.0251	1.0104	0.9543	0.9463	0.9384	0.9347	0.9155	0.8754	0.8755	0.8325	0.8120	0.7403
Ampep low - ITSa Delay Cost (CAE) low / Ampep low	0.8848	0.9106	0.9263	0.9110	0.9136	0.9138	0.9176	0.9656	0.9462	0.9317	0.9364	0.9240	0.8970	0.9041	0.8988	0.8919
Ampep - ITSa Delay Cost (CAE) / Ampep	0.8821	0.9772	0.9754	0.9717	0.9702	0.9650	0.9610	0.9575	0.9501	0.9430	0.9369	0.9339	0.9210	0.9164	0.9063	0.9013
Ampep high - ITSa Delay Cost (CAE) high / TSR (CAE) high	1.0793	1.0439	1.0254	1.0323	1.0279	1.0162	1.0044	0.9594	0.9536	0.9475	0.9424	0.9396	0.9272	0.9175	0.9103	0.9103
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (LS) low / Ampep low	0.9673	0.9543	0.9446	0.9096	0.8873	0.8159	0.7503	0.6428	0.4020	-0.0416	-0.4718	-0.6325	-0.8916	-1.0285	-1.0230	-0.9201
Ampep - TSR (LS) / Ampep	0.9727	0.9616	0.9432	0.9298	0.9070	0.8712	0.8141	0.6803	0.4886	0.2654	-0.1792	-0.3887	-0.6688	-0.6738	-0.6520	-0.6041
Ampep high - TSR (LS) high / Ampep high	0.9567	0.9418	0.9351	0.8953	0.8747	0.8255	0.7508	0.6931	0.4379	0.2650	-0.1088	-0.4612	-0.6652	-0.6652	-0.7725	-0.7600
Ampep low - ITSa Valuation (LS) low / Ampep low	0.9647	0.9428	0.9321	0.9029	0.8785	0.8384	0.7683	0.7051	0.5537	0.3631	0.0869	-0.1852	-0.3019	-0.4216	-0.4350	-0.4945
Ampep - ITSa Valuation (LS) / Ampep	0.9712	0.9436	0.9294	0.9096	0.8819	0.8500	0.7842	0.7180	0.6201	0.4525	0.2670	0.0892	-0.0289	-0.0346	-0.1601	-0.2377
Ampep high - ITSa Valuation (LS) high / Ampep high	0.9609	0.9518	0.9468	0.9237	0.9210	0.8967	0.8543	0.8468	0.7969	0.7533	0.7022	0.6252	0.6879	0.3342	0.4140	0.3600
Ampep low - ITSa Delay Cost (LS) low / Ampep low	0.9691	0.9549	0.9463	0.9326	0.9230	0.8967	0.8573	0.8468	0.7969	0.7533	0.7022	0.6252	0.6879	0.3342	0.4140	0.3600
Ampep - ITSa Delay Cost (LS) / Ampep	0.9759	0.9576	0.9468	0.9406	0.9242	0.8948	0.8767	0.8482	0.8015	0.7656	0.7156	0.6664	0.6664	0.5285	0.5162	0.5396
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (IE) low / Ampep low	0.9643	0.9461	0.9328	0.8720	0.8467	0.7029	0.4954	-0.0128	-0.7885	-1.4861	-2.0943	-2.5575	-2.7773	-2.8936	-2.8601	-2.0491
Ampep - TSR (IE) / Ampep	0.9773	0.9511	0.9308	0.8956	0.8693	0.7509	0.5954	0.1223	-0.4746	-1.0684	-1.6718	-2.1647	-2.1647	-2.1647	-1.7999	-1.7999
Ampep high - TSR (IE) high / Ampep high	0.9770	0.9536	0.9290	0.9165	0.8968	0.7941	0.6481	0.2456	-0.1916	-0.7441	-1.2831	-1.6503	-1.6726	-1.8284	-1.6047	-1.5253
Ampep low - ITSa Valuation (IE) low / Ampep low	0.9614	0.9338	0.9234	0.8623	0.8101	0.6702	0.5095	-0.2059	-0.8018	-1.2431	-1.9547	-2.0236	-2.3548	-2.4594	-2.7437	-2.0264
Ampep - ITSa Valuation (IE) / Ampep	0.9523	0.9339	0.9197	0.8751	0.8321	0.7217	0.5395	0.0773	-0.4593	-0.9799	-1.4451	-1.5982	-1.7895	-1.9140	-1.9417	-1.6803
Ampep high - ITSa Valuation (IE) high / Ampep high	0.9713	0.9340	0.9164	0.8864	0.7681	0.6691	0.3860	0.1505	-0.5799	-0.9763	-1.2988	-1.3600	-1.4383	-1.2882	-1.3630	-1.3630
Ampep low - ITSa Delay Cost (IE) low / Ampep low	0.9652	0.9442	0.9364	0.8979	0.8770	0.8055	0.6903	0.3938	-0.1311	-0.6091	-0.9713	-1.1961	-1.5022	-1.3814	-1.4749	-1.2678
Ampep - ITSa Delay Cost (IE) / Ampep	0.9664	0.9473	0.9342	0.9099	0.8823	0.8180	0.7271	0.4971	0.0930	-0.3149	-0.6521	-0.6588	-0.7437	-0.8771	-0.6952	-0.7019
Ampep high - ITSa Delay Cost (IE) high / TSR (IE) high	0.9757	0.9500	0.9322	0.9205	0.8670	0.6292	0.5914	0.2951	-0.0467	-0.3584	-0.6688	-0.7437	-0.8771	-0.6952	-0.7019	0.0000
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep low - TSR (IE) low / Ampep low	0.9336	0.8723	0.6737	-1.8669	-4.0591											
Ampep - TSR (IE) / Ampep	0.9483	0.8725	0.6890	-1.1325	-3.2905											
Ampep high - TSR (IE) high / Ampep high	0.9605	0.8727	0.7027	-0.4802	-2.6058											
Ampep low - ITSa Valuation (IE) low / Ampep low	0.8900	0.7956	0.4129	-2.1263	-3.9729											
Ampep - ITSa Valuation (IE) / Ampep	0.9212	0.8215	0.4660	-1.4660	-3.3331											
Ampep high - ITSa Valuation (IE) high / Ampep high	0.9394	0.8416	0.5139	-0.8771	-2.7631											
Ampep low - ITSa Delay Cost (IE) low / Ampep low	0.9076	0.8348	0.5989	-1.7285	-3.6200											
Ampep - ITSa Delay Cost (IE) / Ampep	0.9372	0.8489	0.6194	-1.2568	-2.9548											
Ampep high - ITSa Delay Cost (IE) high / TSR (IE) high	0.9615	0.8154	0.6154	-0.7792	-2.3622											
Ampep low - Ampep low / Ampep low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep - Ampep / Ampep	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ampep high - Ampep high / Ampep high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Abbildung C.10.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit im Vergleich zur Ampep

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
AmpeI low - TSR (CAE) low / AmpeI low	0.1272	0.1696	0.2115	0.2119	0.2243	0.2281	0.2445	0.2452	0.2532	0.2562	0.2778	0.2778	0.2701	0.2648	0.2654	0.2652
AmpeI - TSR (CAE) / AmpeI	0.2192	0.2160	0.2377	0.2493	0.2493	0.2477	0.2552	0.2608	0.2677	0.2759	0.2815	0.2815	0.2731	0.2678	0.2684	0.2682
AmpeI high - TSR (CAE) high / AmpeI high	0.3111	0.2623	0.2558	0.2526	0.2673	0.2673	0.2658	0.2773	0.2812	0.2945	0.3106	0.3106	0.3006	0.2946	0.2952	0.2950
AmpeI low - ITSa Valuation (CAE) low / AmpeI low	0.1277	0.1693	0.2072	0.2046	0.2121	0.2161	0.2282	0.2281	0.2310	0.2393	0.2456	0.2456	0.2377	0.2324	0.2330	0.2328
AmpeI - ITSa Valuation (CAE) / AmpeI	0.2194	0.2155	0.2368	0.2353	0.2396	0.2414	0.2456	0.2456	0.2484	0.2567	0.2630	0.2630	0.2551	0.2498	0.2504	0.2502
AmpeI high - ITSa Valuation (CAE) high / AmpeI high	0.3110	0.2618	0.2464	0.2461	0.2672	0.2673	0.2646	0.2639	0.2674	0.2632	0.2599	0.2599	0.2470	0.2400	0.2406	0.2404
AmpeI low - ITSa Delay Cost (CAE) low / AmpeI low	0.1278	0.1696	0.2080	0.2068	0.2187	0.2193	0.2326	0.2288	0.2390	0.2272	0.2458	0.2438	0.2444	0.2453	0.2461	0.2459
AmpeI - ITSa Delay Cost (CAE) / AmpeI	0.2194	0.2158	0.2311	0.2276	0.2436	0.2400	0.2459	0.2501	0.2468	0.2545	0.2612	0.2654	0.2695	0.2752	0.2758	0.2756
AmpeI high - ITSa Delay Cost (CAE) high / AmpeI high	0.3110	0.2621	0.2541	0.2483	0.2683	0.2607	0.2593	0.2701	0.2639	0.2760	0.2859	0.3023	0.3091	0.3157	0.3165	0.3163
AmpeI low - AmpeI low / AmpeI low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI - AmpeI / AmpeI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI high - AmpeI high / AmpeI high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI low - TSR (LS) low / AmpeI low	0.1365	0.1756	0.2130	0.2131	0.2216	0.2178	0.2228	0.1948	0.1557	0.0733	0.0229	-0.0070	-0.0516	-0.0799	-0.1077	-0.1006
AmpeI - TSR (LS) / AmpeI	0.2902	0.2654	0.2513	0.2424	0.2416	0.2360	0.2364	0.2169	0.1802	0.0713	0.0483	0.0483	0.0093	-0.0196	-0.0333	-0.0366
AmpeI high - TSR (LS) high / AmpeI high	0.3153	0.1678	0.2016	0.1874	0.1902	0.1751	0.1653	0.1372	0.0853	0.0613	-0.0067	-0.0671	-0.1176	-0.1900	-0.1855	-0.2325
AmpeI low - ITSa Valuation (LS) low / AmpeI low	0.2179	0.2038	0.2181	0.2063	0.2122	0.1972	0.1813	0.1651	0.1237	0.0963	0.0407	-0.0100	-0.0470	-0.0828	-0.0979	-0.1411
AmpeI - ITSa Valuation (LS) / AmpeI	0.2786	0.2373	0.2341	0.2242	0.2336	0.2183	0.1957	0.1913	0.1605	0.1286	0.0863	0.0427	0.0187	0.0183	-0.0772	-0.0543
AmpeI high - ITSa Valuation (LS) high / AmpeI high	0.3145	0.1672	0.2028	0.2155	0.2046	0.1962	0.1969	0.1852	0.1661	0.1597	0.1521	0.1375	0.1102	0.0890	0.0573	0.0414
AmpeI low - ITSa Delay Cost (LS) low / AmpeI low	0.2843	0.2445	0.2409	0.2319	0.2445	0.2321	0.2193	0.2218	0.2066	0.2114	0.1930	0.1807	0.1884	0.1602	0.1716	0.1715
AmpeI - ITSa Delay Cost (LS) / AmpeI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI high - AmpeI high / AmpeI high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI low - AmpeI low / AmpeI low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI - AmpeI / AmpeI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI high - AmpeI high / AmpeI high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI low - TSR (IE) low / AmpeI low	0.1367	0.1761	0.2129	0.2127	0.2195	0.2075	0.1908	0.1286	0.0562	-0.0123	-0.0627	-0.1374	-0.1671	-0.1788	-0.1975	-0.1611
AmpeI - TSR (IE) / AmpeI	0.2187	0.2160	0.2323	0.2273	0.2398	0.2262	0.2083	0.1536	0.0902	0.0308	-0.0360	-0.0831	-0.1202	-0.1347	-0.1341	-0.1095
AmpeI high - TSR (IE) high / AmpeI high	0.2902	0.2532	0.2573	0.2472	0.2595	0.2440	0.2251	0.1769	0.1227	0.0720	0.0049	-0.0312	-0.0786	-0.0931	-0.0758	-0.0605
AmpeI low - ITSa Valuation (IE) low / AmpeI low	0.1350	0.1654	0.1991	0.1723	0.1705	0.1804	0.1020	-0.0272	-0.1022	-0.1680	-0.2049	-0.2049	-0.3084	-0.3674	-0.4553	-0.4786
AmpeI - ITSa Valuation (IE) / AmpeI	0.2114	0.2023	0.1580	0.1961	0.1944	0.1597	0.1214	0.0350	-0.0523	-0.1119	-0.2031	-0.2515	-0.3090	-0.3543	-0.4027	-0.3967
AmpeI high - ITSa Valuation (IE) high / AmpeI high	0.2780	0.2366	0.2320	0.2187	0.1716	0.1804	0.1400	0.0936	-0.0017	-0.0584	-0.1306	-0.1972	-0.2361	-0.2592	-0.2713	-0.3179
AmpeI low - ITSa Delay Cost (IE) low / AmpeI low	0.1344	0.1638	0.2031	0.1924	0.1880	0.1636	0.1456	0.0818	0.0045	-0.0597	-0.1303	-0.1737	-0.2598	-0.2708	-0.3232	-0.3297
AmpeI - ITSa Delay Cost (IE) / AmpeI	0.2143	0.2050	0.2203	0.2093	0.2099	0.1841	0.1603	0.1136	0.0431	-0.0138	-0.0788	-0.1198	-0.1832	-0.2080	-0.2189	-0.2453
AmpeI high - ITSa Delay Cost (IE) high / AmpeI high	0.2840	0.2454	0.2370	0.2254	0.2311	0.2037	0.1745	0.1436	0.0885	0.0320	-0.0252	-0.0682	-0.1117	-0.1449	-0.1229	-0.1613
AmpeI low - AmpeI low / AmpeI low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI - AmpeI / AmpeI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI high - AmpeI high / AmpeI high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AmpeI low - TSR (IE) low / AmpeI low	0.1369	0.1724	0.1873	-0.0760	-0.2545											
AmpeI - TSR (IE) / AmpeI	0.2177	0.2101	0.2066	-0.0066	-0.2130											
AmpeI high - TSR (IE) high / AmpeI high	0.2882	0.2452	0.2253	0.0596	-0.1727											
AmpeI low - ITSa Valuation (IE) low / AmpeI low	0.1222	0.1378	0.1028	-0.2015	-0.3696											
AmpeI - ITSa Valuation (IE) / AmpeI	0.2027	0.1719	0.1239	-0.1400	-0.3549											
AmpeI high - ITSa Valuation (IE) high / AmpeI high	0.2729	0.2035	0.1444	-0.0814	-0.3114											
AmpeI low - ITSa Delay Cost (IE) low / AmpeI low	0.1316	0.1466	0.1254	-0.1556	-0.3616											
AmpeI - ITSa Delay Cost (IE) / AmpeI	0.2070	0.1803	0.1418	-0.1057	-0.2966											
AmpeI high - ITSa Delay Cost (IE) high / AmpeI high	0.2727	0.2117	0.1577	-0.0582	-0.2335											
AmpeI low - AmpeI low / AmpeI low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
AmpeI - AmpeI / AmpeI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
AmpeI high - AmpeI high / AmpeI high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											

Abbildung C.11.: Relative Unterschiede des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zur AmpeI

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE) low - ITSA Valuation (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.0445	-0.0468	-0.0691	-0.1388	-0.0102	-0.0456	-0.1412	-0.0508	-0.0424	-0.0682	-0.0538	-0.1640	-0.1254	-0.0750	-0.1800	-0.2970
TSR (CAE) - ITSA Valuation (CAE) / TSR (CAE)	0.0118	0.0322	0.0248	-0.0094	0.0951	0.0475	-0.0067	0.0393	0.0595	0.0574	0.0232	-0.0178	-0.0232	-0.0178	-0.0461	-0.1891
TSR (CAE) high - ITSA Valuation (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0681	0.1133	0.1388	0.1211	0.1203	0.1406	0.1278	0.1174	0.1595	0.1830	0.1653	0.1107	0.1018	0.0392	0.0878	-0.0811
TSR (CAE) low - ITSA Delay Cost (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.0076	-0.0052	0.0001	0.0376	0.1406	0.1620	0.1611	0.1626	0.2101	0.2437	0.2688	0.3005	0.2744	0.3494	0.3199	0.3536
TSR (CAE) - ITSA Delay Cost (CAE) / TSR (CAE)	0.0000	0.0769	0.1170	0.1369	0.1923	0.2163	0.2235	0.2631	0.3099	0.3242	0.4146	0.4493	0.4754	0.5533	0.6802	0.6606
TSR (CAE) high - ITSA Delay Cost (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0671	0.1366	0.2249	0.2342	0.2440	0.2747	0.2869	0.3636	0.4097	0.4248	0.4603	0.5981	0.6764	0.7572	0.8404	0.9635
TSR (CAE) low - Ampel low / TSR (CAE) low	-63.3208	-60.4247	-41.0801	-36.3815	-33.6662	-28.1687	-24.0406	-21.3267	-16.2613	-13.7208	-10.8740	-8.9726	-7.6480	-5.5200	-4.3848	-3.0187
TSR (CAE) - Ampel / TSR (CAE)	-51.4378	-43.9465	-38.1571	-32.9125	-30.2976	-26.0063	-21.7746	-19.3155	-14.6886	-12.4668	-9.7894	-8.3657	-6.4979	-4.9654	-3.8188	-2.8912
TSR (CAE) high - Ampel high / ITSA Valuation (CAE) high	-39.5549	-37.4652	-35.2340	-29.4436	-27.0290	-23.0039	-19.5067	-17.3053	-13.1159	-11.2128	-8.7048	-7.7449	-5.3499	-4.4709	-3.2428	-2.1636
TSR (CAE) low - Ampel low / ITSA Valuation (CAE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) - Ampel / ITSA Valuation (CAE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) high - Ampel high / ITSA Valuation (CAE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) - Ampel high / ITSA Valuation (CAE)	-0.1140	-0.2820	-0.0699	-0.0015	-0.0821	0.0899	0.0347	0.2516	0.3218	0.2776	0.3695	0.2685	0.2980	0.1543	0.1792	0.1568
TSR (LS) low - ITSA Valuation (LS) low / TSR (LS) low	0.0893	-0.0426	0.1343	0.1437	0.1763	0.2831	0.2264	0.4060	0.4020	0.4804	0.4551	0.3419	0.3422	0.3110	0.3000	0.2318
TSR (LS) high - ITSA Valuation (LS) high / TSR (LS) high	0.2925	0.1928	0.1987	0.2680	0.4347	0.4763	0.4180	0.5604	0.4822	0.6832	0.6407	0.4153	0.3865	0.4678	0.4208	0.3048
TSR (LS) low - ITSA Delay Cost (LS) low / TSR (LS) low	-0.1115	0.1463	0.2293	0.2594	0.1000	0.3088	0.3646	0.6754	0.6050	0.5398	0.6251	0.6201	0.8746	0.8780	0.9501	0.8834
TSR (LS) high - ITSA Delay Cost (LS) high / TSR (LS) high	0.1955	0.2244	0.3213	0.4221	0.4730	0.5445	0.5958	0.6880	0.7496	0.8112	0.8356	0.7976	0.8009	0.7396	0.7200	0.6836
TSR (LS) low - Ampel low / ITSA Valuation (LS) low	0.4225	0.3004	0.4133	0.6949	0.8469	0.7802	0.7560	0.9005	0.8941	1.0826	1.0462	0.9752	0.9272	0.9013	0.8491	0.7859
TSR (LS) high - Ampel high / ITSA Valuation (LS) high	-38.9682	-26.7903	-17.0104	-12.0649	-9.2149	-5.9878	-3.8450	-2.0150	-0.9307	-0.2291	0.1220	0.2074	0.3649	0.3442	0.3677	0.3108
TSR (LS) low - Ampel low / ITSA Valuation (LS) low	-31.6580	-23.3263	-15.7202	-10.7477	-8.0215	-5.0718	-3.2808	-1.7031	-0.6905	0.0802	0.3572	0.4151	0.4649	0.5151	0.6199	0.4995
TSR (LS) high - Ampel high / ITSA Valuation (LS) high	-24.3778	-19.8623	-14.4300	-9.4306	-6.8281	-4.1559	-2.7165	-1.3912	-0.3304	0.3894	0.5925	0.6227	0.6154	0.6861	0.6722	0.6882
TSR (LS) low - Ampel low / ITSA Valuation (LS) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) - Ampel / ITSA Valuation (LS)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) high - Ampel high / ITSA Valuation (LS) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) - Ampel high / ITSA Valuation (LS)	-0.1029	-0.2736	0.0617	-0.0567	-0.0506	0.0592	-0.0060	-0.0861	0.0289	0.1104	0.0587	0.0770	0.0591	0.0374	-0.0811	0.0020
TSR (LE) low - ITSA Valuation (LE) low / TSR (LE) low	0.0889	-0.0467	0.1450	0.1393	0.1095	0.1757	0.2101	0.0810	0.1047	0.1547	0.1188	0.1528	0.1421	0.1098	0.0417	0.0448
TSR (LE) high - ITSA Valuation (LE) high / TSR (LE) high	0.2808	0.1802	0.2083	0.3352	0.2699	0.2922	0.4263	0.2420	0.1834	0.1991	0.1929	0.2387	0.2251	0.1701	0.1645	0.2673
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	-0.0662	0.1194	0.2057	0.2079	0.1499	0.3058	0.3060	0.4095	0.2954	0.2861	0.2917	0.2975	0.2962	0.3280	0.3064	0.2623
TSR (LE) high - Ampel high / ITSA Valuation (LE) high	0.1341	0.1966	0.3058	0.3602	0.3770	0.4394	0.5093	0.5107	0.4508	0.4091	0.4067	0.4026	0.3624	0.3515	0.3467	0.3169
TSR (LE) low - ITSA Delay Cost (LE) low / TSR (LE) low	0.3344	0.2737	0.3542	0.5524	0.6041	0.6731	0.7126	0.6120	0.6161	0.5320	0.5216	0.4077	0.4265	0.3749	0.3871	0.3716
TSR (LE) high - ITSA Delay Cost (LE) high / TSR (LE) high	-37.4895	-23.2334	-14.1234	-9.2750	-6.7978	-3.5298	-1.3775	-0.3303	0.1433	0.3622	0.5300	0.5459	0.6098	0.6329	0.6062	0.5724
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	30.6518	20.2359	13.0739	8.1467	5.8238	2.9152	-1.1013	-0.1243	0.2483	0.5357	0.6385	0.6781	0.6881	0.6953	0.6843	0.6563
TSR (LE) high - Ampel high / ITSA Valuation (LE) high	-23.9540	-17.2361	-12.0243	-7.0163	-4.8499	-2.3004	-0.6251	0.0818	0.9533	0.7092	0.4740	0.6104	0.7862	0.7577	0.7624	0.4703
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) high - Ampel high / ITSA Valuation (LE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) - Ampel / ITSA Valuation (LE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) low - ITSA Valuation (IE) low / TSR (IE) low	0.1710	0.0936	0.0779	0.0975	0.0891											
TSR (IE) high - ITSA Valuation (IE) high / TSR (IE) high	0.3657	0.2376	0.1451	0.1956	0.1992											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	0.0681	0.1112	0.2345	0.0232	0.0249											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	0.2128	0.2864	0.3049	0.1648	0.1594											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	0.3575	0.4615	0.3740	0.3463	0.2939											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	-22.5454	-8.3666	-2.2279	0.2601	0.6238											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	-18.2790	-7.1717	-2.0932	0.6605	0.7794											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	-14.0127	-5.9768	-1.9595	0.6705	0.9351											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) - Ampel / ITSA Valuation (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Abbildung C.12.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit im Vergleich zu TSR

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE) low - ITSA Valuation (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.1428	-0.1638	-0.2487	-0.3176	-0.2895	-0.2579	-0.3504	-0.2648	-0.3365	-0.3537	-0.3537	-0.5117	-0.3808	-0.4775	-0.3695	-0.3173
TSR (CAE) - ITSA Valuation (CAE) / TSR (CAE)	-0.0451	-0.0909	-0.1547	-0.1891	-0.1750	-0.1722	-0.1750	-0.1430	-0.1462	-0.2094	-0.2094	-0.2651	-0.1966	-0.1995	-0.1995	-0.1645
TSR (CAE) high - ITSA Valuation (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0525	-0.0179	-0.0606	-0.0606	-0.0144	-0.0581	-0.0740	-0.0759	-0.0571	-0.0182	-0.0131	-0.0571	-0.0433	-0.0465	-0.0465	-0.1569
TSR (CAE) low - ITSA Delay Cost (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.0672	-0.0936	-0.1096	-0.1198	-0.0512	-0.0361	-0.0063	0.0377	0.0578	0.1413	0.1967	0.2790	0.2695	0.3934	0.3633	0.5252
TSR (CAE) - ITSA Delay Cost (CAE) / TSR (CAE)	-0.0143	-0.0287	-0.0382	-0.0212	0.0173	0.0313	0.0459	0.1056	0.1614	0.1561	0.2664	0.3483	0.3848	0.4850	0.5275	0.6260
TSR (CAE) high - ITSA Delay Cost (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0386	0.0383	-0.0124	0.0274	0.0668	0.0967	0.1001	0.1593	0.2321	0.2146	0.3440	0.3920	0.4482	0.5368	0.6067	0.6755
TSR (CAE) low - Ampel low / TSR (CAE) low	61.0239	47.2333	43.2166	37.2637	33.8679	28.0668	24.5246	23.7926	19.6133	17.5292	14.0087	12.4988	11.2698	7.9139	6.6800	4.7987
TSR (CAE) - Ampel / TSR (CAE)	-55.5474	44.2005	41.1277	35.0360	32.0106	26.8573	23.4422	20.0564	15.8083	13.3013	10.3101	8.8572	6.7879	5.1604	4.0438	2.7911
TSR (CAE) high - Ampel high / ITSA Valuation (CAE) high	-60.0709	-41.1676	-39.0370	-32.7682	-30.1631	-25.2178	-22.9598	-17.0886	-13.0087	-10.4586	-7.9317	-6.9609	-4.3140	-3.6055	-2.6498	-1.8046
TSR (CAE) low - Ampel low / ITSA Valuation (CAE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) - Ampel / ITSA Valuation (CAE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) low - ITSA Valuation (LS) low / TSR (LS) low	-0.8848	-0.6141	-0.3563	-0.4169	-0.5303	-0.2390	-0.3272	0.0179	0.1798	0.2126	0.3681	0.2600	0.2715	0.1834	0.1788	0.1733
TSR (LS) - ITSA Valuation (LS) / TSR (LS)	-0.2959	-0.3689	-0.2087	-0.2104	-0.1801	-0.0425	-0.0706	0.1772	0.2203	0.3896	0.3796	0.2656	0.3118	0.2992	0.2906	0.2217
TSR (LS) high - ITSA Valuation (LS) high / TSR (LS) high	-0.1366	-0.1611	-0.1003	-0.0566	0.0492	0.0973	0.0968	0.2912	0.2486	0.4866	0.3877	0.3036	0.3442	0.3842	0.3772	0.2578
TSR (LS) low - ITSA Delay Cost (LS) low / TSR (LS) low	-0.4856	-0.1766	-0.0709	0.0702	-0.0010	0.1698	0.2542	0.6116	0.6186	0.6675	0.7495	0.7347	0.7590	0.6856	0.6758	0.6826
TSR (LS) - ITSA Delay Cost (LS) / TSR (LS)	-0.1333	-0.0769	0.0428	0.1604	0.2528	0.3271	0.3672	0.5712	0.6604	0.7629	0.7977	0.7704	0.7825	0.7224	0.7103	0.6615
TSR (LS) high - ITSA Delay Cost (LS) high / TSR (LS) high	0.0409	0.0057	0.1282	0.2281	0.4186	0.4389	0.4749	0.6198	0.6906	0.8165	0.8317	0.7995	0.8021	0.7494	0.7363	0.6490
TSR (LS) low - Ampel low / ITSA Valuation (LS) low	-59.3743	-26.7407	-20.6230	-14.3060	-11.7556	-7.1187	-4.9337	-2.4206	-1.0453	-0.3603	0.1534	0.2300	0.3914	0.4192	0.4070	0.3779
TSR (LS) - Ampel / ITSA Valuation (LS)	-35.6766	-22.9163	-16.8241	-11.4609	-8.7124	-5.4515	-3.6199	-1.7999	-0.6721	0.0399	0.2025	0.3875	0.4713	0.5070	0.5067	0.4792
TSR (LS) high - Ampel high / ITSA Valuation (LS) high	-23.9578	-19.6764	-13.9722	-9.3266	-6.7195	-4.2663	-2.7528	-1.3554	-0.4026	0.2626	0.4384	0.4979	0.6357	0.5715	0.5621	0.5549
TSR (LS) low - Ampel low / TSR (LS) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) - Ampel / TSR (LS)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) high - Ampel high / TSR (LS) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) low - ITSA Valuation (LE) low / TSR (LE) low	-0.6774	-0.6126	-0.2801	-0.5262	-0.4539	-0.2458	-0.3427	-0.2735	-0.0701	0.0516	0.0200	0.0771	0.0635	0.0203	-0.0680	-0.0124
TSR (LE) - ITSA Valuation (LE) / TSR (LE)	-0.3174	-0.3516	-0.1604	-0.1967	-0.1934	-0.1172	-0.0861	-0.0512	0.0104	0.0920	0.0848	0.1234	0.1161	0.0851	0.0303	0.0588
TSR (LE) high - ITSA Valuation (LE) high / TSR (LE) high	-0.1107	-0.1395	-0.0692	0.0308	-0.0130	-0.0276	0.1529	0.1200	0.0683	0.1223	0.1354	0.1589	0.1609	0.1411	0.1340	0.0780
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	-0.4844	-0.1288	-0.0536	0.0075	-0.0058	0.1759	0.2063	0.3680	0.2653	0.2954	0.3165	0.3232	0.3248	0.3408	0.3204	0.2611
TSR (LE) - Ampel / ITSA Valuation (LE)	-0.1691	-0.0768	0.0488	0.1375	0.1633	0.2693	0.3662	0.4271	0.3849	0.3704	0.3817	0.3729	0.3423	0.3369	0.3324	0.2889
TSR (LE) high - ITSA Delay Cost (LE) high / TSR (LE) high	0.0037	-0.0336	0.1269	0.2265	0.2804	0.3343	0.4990	0.4572	0.4709	0.4264	0.4525	0.4114	0.3574	0.3335	0.3428	0.3131
TSR (LE) low - ITSA Delay Cost (LE) low / TSR (LE) low	-52.6402	-22.8330	-16.3268	-11.4259	-7.9813	-4.0667	-1.9770	-0.3360	0.1634	0.4369	0.5708	0.6006	0.6487	0.6611	0.6243	0.6042
TSR (LE) - ITSA Delay Cost (LE) / TSR (LE)	-33.8029	-19.4393	-13.4512	-8.5717	-6.1086	-3.0144	-1.2541	-0.1393	0.3218	0.5212	0.6257	0.6626	0.6830	0.6860	0.6704	0.6403
TSR (LE) high - Ampel high / ITSA Valuation (LE) high	-23.4775	-16.8017	-11.2593	-6.6164	-4.8114	-2.2681	-0.6008	0.0123	0.4358	0.5649	0.6886	0.7107	0.7123	0.7076	0.7107	0.6776
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) - Ampel / ITSA Valuation (LE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) low - ITSA Valuation (IE) low / TSR (IE) low	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) - ITSA Valuation (IE) / TSR (IE)	-1.1458	-0.6603	-1.1059	-0.3412	-0.0666											
TSR (IE) high - ITSA Valuation (IE) high / TSR (IE) high	-0.5259	-0.4001	-0.7167	-0.1564	-0.0099											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	-0.1527	-0.2140	-0.4558	-0.0531	0.0334											
TSR (IE) - Ampel / ITSA Valuation (IE)	-0.6216	-0.3644	-0.4017	-0.1658	0.0047											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	-0.2160	-0.1855	-0.2759	-0.0437	0.0762											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	0.0283	-0.0576	-0.1983	0.0530	0.1346											
TSR (IE) - Ampel / ITSA Valuation (IE)	-27.1137	-8.7538	-2.9611	0.3325	0.7411											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	-18.3657	-6.8457	-2.2149	0.6311	0.7667											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	-13.0822	-5.4822	-1.7146	0.6421	0.7887											
TSR (IE) - Ampel / ITSA Valuation (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) high - Ampel high / TSR (IE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) low - Ampel low / TSR (IE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) high - Ampel high / TSR (IE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Abbildung C.13.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit im Vergleich zu TSR

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE) low - ITSA Valuation (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.0022	-0.0011	-0.0166	-0.0050	-0.0171	-0.0216	-0.0249	-0.0237	-0.0237	-0.0564	-0.0747	-0.0992	-0.1223	-0.1463	-0.1611	-0.2291
TSR (CAE) - ITSA Valuation (CAE) / TSR (CAE)	0.0002	-0.0001	-0.0090	-0.0090	-0.0147	-0.0147	-0.0196	-0.0205	-0.0313	-0.0454	-0.0592	-0.0791	-0.1001	-0.1273	-0.1488	-0.1995
TSR (CAE) high - ITSA Valuation (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0007	0.0000	-0.0014	-0.0027	-0.0060	-0.0078	-0.0121	-0.0175	-0.0238	-0.0366	-0.0420	-0.0593	-0.0785	-0.1090	-0.1370	-0.1699
TSR (CAE) low - ITSA Delay Cost (CAE) low / TSR (CAE) low	-0.0002	-0.0005	-0.0003	-0.0118	-0.0098	-0.0139	-0.0204	-0.0199	-0.0285	-0.0423	-0.0356	-0.0517	-0.0606	-0.0655	-0.0654	-0.0707
TSR (CAE) - ITSA Delay Cost (CAE) / TSR (CAE)	0.0003	0.0000	-0.0034	-0.0002	-0.0030	-0.0102	-0.0125	-0.0145	-0.0215	-0.0295	-0.0292	-0.0414	-0.0487	-0.0515	-0.0524	-0.0420
TSR (CAE) high - ITSA Delay Cost (CAE) high / TSR (CAE) high	0.0008	0.0000	-0.0034	-0.0000	-0.0004	-0.0066	-0.0060	-0.0067	-0.0167	-0.0172	-0.0209	-0.0313	-0.0371	-0.0381	-0.0388	-0.0450
TSR (CAE) low - Ampel / TSR (CAE) low	-0.3986	-0.3346	-0.3338	-0.3290	-0.3621	-0.3654	-0.3658	-0.3642	-0.3684	-0.4216	-0.4217	-0.4648	-0.5020	-0.5211	-0.5441	-0.5398
TSR (CAE) - Ampel / TSR (CAE)	-0.2807	-0.2755	-0.3049	-0.3025	-0.3303	-0.3293	-0.3428	-0.3528	-0.3563	-0.3810	-0.3917	-0.4175	-0.4366	-0.4567	-0.4693	-0.4677
TSR (CAE) high - Ampel high / ITSA Valuation (CAE) high	-0.1629	-0.2164	-0.2760	-0.2984	-0.3033	-0.3283	-0.3129	-0.3175	-0.3413	-0.3623	-0.3810	-0.3713	-0.3948	-0.3970	-0.3970	-0.3998
TSR (CAE) low - Ampel low / ITSA Valuation (CAE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) - Ampel / TSR (CAE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) high - Ampel high / TSR (CAE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (CAE) low - Ampel low / TSR (CAE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) low - ITSA Valuation (LS) low / TSR (LS) low	-0.0229	-0.0264	-0.0244	-0.0353	-0.0488	-0.0627	-0.0625	-0.0666	-0.0887	-0.0718	-0.0480	-0.0660	-0.0889	-0.1431	-0.1236	-0.1514
TSR (LS) - ITSA Valuation (LS) / TSR (LS)	-0.0086	-0.0155	-0.0187	-0.0282	-0.0388	-0.0496	-0.0721	-0.0661	-0.0689	-0.0329	-0.0623	-0.0569	-0.0620	-0.0623	-0.0669	-0.1008
TSR (LS) high - ITSA Valuation (LS) high / TSR (LS) high	0.0042	-0.0053	-0.0132	-0.0215	-0.0292	-0.0387	-0.0630	-0.0480	-0.0484	-0.0011	-0.0188	-0.0484	-0.0272	0.0119	-0.0624	-0.0646
TSR (LS) low - ITSA Delay Cost (LS) low / TSR (LS) low	-0.0124	-0.0168	-0.0159	-0.0236	-0.0259	-0.0355	-0.0486	-0.0333	-0.0332	0.0274	0.0779	0.0755	0.0955	0.1022	0.1204	0.1204
TSR (LS) - ITSA Delay Cost (LS) / TSR (LS)	-0.0053	-0.0111	-0.0112	-0.0163	-0.0221	-0.0288	-0.0364	-0.0164	-0.0081	0.0679	0.1095	0.1189	0.1427	0.1406	0.1453	0.1396
TSR (LS) high - ITSA Delay Cost (LS) high / TSR (LS) high	0.0012	-0.0059	-0.0068	-0.0122	-0.0184	-0.0184	-0.0244	0.0003	0.0192	0.0151	0.0390	0.0541	0.0827	0.1817	0.1867	0.1572
TSR (LS) low - ITSA Delay Cost (LS) low / TSR (LS) low	-0.1877	-0.3475	-0.3382	-0.3293	-0.3669	-0.3420	-0.3381	-0.3158	-0.2952	-0.2177	-0.1338	-0.1133	-0.0718	-0.0395	-0.0389	-0.0251
TSR (LS) - Ampel / TSR (LS)	-0.2797	-0.2753	-0.3028	-0.3096	-0.3185	-0.3073	-0.3096	-0.2770	-0.2198	-0.1452	-0.0767	-0.0507	-0.0094	0.0192	0.0323	0.0353
TSR (LS) high - Ampel high / ITSA Valuation (LS) high	-0.1547	-0.2084	-0.2687	-0.2631	-0.2818	-0.2737	-0.2818	-0.2369	-0.1841	-0.0797	-0.0234	0.0069	0.0484	0.0727	0.0959	0.0906
TSR (LS) low - Ampel low / ITSA Valuation (LS) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) - Ampel / TSR (LS)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) high - Ampel high / TSR (LS) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LS) low - Ampel low / TSR (LS) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) low - ITSA Valuation (LE) low / TSR (LE) low	-0.0237	-0.0262	-0.0286	-0.0549	-0.0708	-0.0913	-0.1295	-0.1681	-0.1805	-0.1698	-0.1932	-0.1810	-0.2085	-0.2477	-0.3178	-0.2972
TSR (LE) - ITSA Valuation (LE) / TSR (LE)	-0.0094	-0.0175	-0.0215	-0.0404	-0.0597	-0.0869	-0.1088	-0.1400	-0.1566	-0.1473	-0.1590	-0.1555	-0.1685	-0.1995	-0.2368	-0.2569
TSR (LE) high - ITSA Valuation (LE) high / TSR (LE) high	0.0035	-0.0095	-0.0147	-0.0266	-0.0491	-0.0607	-0.0902	-0.1004	-0.1355	-0.1258	-0.0772	-0.0640	-0.0678	-0.0925	-0.0837	-0.1116
TSR (LE) low - ITSA Delay Cost (LE) low / TSR (LE) low	-0.0128	-0.0193	-0.0217	-0.0285	-0.0466	-0.0663	-0.0766	-0.0611	-0.0897	-0.0721	-0.0449	-0.0392	-0.0338	-0.0562	-0.0429	-0.1269
TSR (LE) - ITSA Delay Cost (LE) / TSR (LE)	-0.0056	-0.0141	-0.0157	-0.0233	-0.0393	-0.0544	-0.0606	-0.0471	-0.0518	-0.0143	-0.0158	-0.0019	-0.0208	-0.0628	-0.0748	-0.1039
TSR (LE) high - ITSA Delay Cost (LE) high / TSR (LE) high	0.0008	-0.0092	-0.0099	-0.0184	-0.0324	-0.0429	-0.0448	-0.0332	-0.0150	-0.0143	-0.0149	-0.0304	-0.0319	-0.0529	-0.0487	-0.0766
TSR (LE) low - Ampel / TSR (LE) low	-0.4187	-0.3472	-0.3381	-0.3278	-0.3643	-0.3271	-0.2917	-0.2169	-0.1400	-0.0779	-0.0500	0.0304	0.0716	0.0667	0.0710	0.0574
TSR (LE) - Ampel / TSR (LE)	-0.2799	-0.2755	-0.3026	-0.2942	-0.3154	-0.2933	-0.2632	-0.1814	-0.0991	-0.0318	0.0367	0.0768	0.1073	0.1197	0.1193	0.0987
TSR (LE) high - Ampel high / ITSA Valuation (LE) high	-0.1550	-0.2090	-0.2695	-0.2621	-0.2763	-0.2580	-0.2348	-0.1463	-0.0594	0.0121	0.0752	0.1202	0.1422	0.1452	0.1636	0.1380
TSR (LE) low - Ampel low / ITSA Valuation (LE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (LE) - Ampel / TSR (LE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TSR (IE) low - ITSA Valuation (IE) low / TSR (IE) low	-0.0323	-0.0659	-0.1213	-0.1642	-0.1449											
TSR (IE) - ITSA Valuation (IE) / TSR (IE)	-0.0192	-0.0484	-0.1041	-0.1326	-0.1170											
TSR (IE) high - ITSA Valuation (IE) high / TSR (IE) high	-0.0074	-0.0320	-0.0877	-0.1036	-0.0905											
TSR (IE) low - Ampel / TSR (IE) low	-0.0277	-0.0517	-0.1002	-0.1360	-0.1155											
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	-0.0136	-0.0378	-0.0817	-0.0986	-0.0889											
TSR (IE) high - Ampel high / ITSA Valuation (IE) high	-0.0013	-0.0247	-0.0639	-0.0651	-0.0247											
TSR (IE) low - Ampel low / ITSA Valuation (IE) low	-0.4150	-0.3330	-0.2937	-0.0634	0.1481											
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	-0.2784	-0.2660	-0.2603	0.0065	0.1756											
TSR (IE) high - Ampel high / TSR (IE) high	-0.1551	-0.2035	-0.2282	0.0705	0.2017											
TSR (IE) low - Ampel low / TSR (IE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) high - Ampel high / TSR (IE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) low - Ampel low / TSR (IE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) high - Ampel high / TSR (IE) high	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) low - Ampel low / TSR (IE) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											
TSR (IE) - Ampel / TSR (IE)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000											

Abbildung C.14.: Relative Unterschiede des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu TSR

C.2. Kreuzungslayoutvergleich

Dieser Abschnitt enthält die vollständigen Messergebnisse aus dem Experiment „Kreuzungslayoutvergleich“ aus Abschnitt 8.5.

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low	188,68	367,07	523,34	714,59	888,04	1086,16	1290,74	1483,62	1681,75	1906,19	2112,44	2283,75	2500,77	2687,37	2881,80	3012,28
TSR (CAE (IV))	181,20	395,80	567,60	751,20	952,20	1152,00	1360,80	1561,60	1761,60	1977,00	2182,20	2374,20	2561,80	2776,20	2964,60	3114,00
TSR (CAE (IV)) high	193,72	404,53	611,86	829,81	1016,36	1217,84	1429,66	1619,58	1841,45	2047,81	2251,96	2464,65	2662,83	2865,03	3047,40	3215,72
TSR (CAE (IV)) low	160,20	338,81	511,04	712,97	901,55	1092,59	1257,88	1450,93	1646,61	1858,47	2043,87	2245,53	2427,95	2654,14	2880,28	3086,02
TSR (CAE (IV))	192,60	376,20	580,80	763,80	968,80	1150,80	1341,00	1545,00	1736,80	1963,80	2145,40	2369,80	2571,60	2788,80	2997,60	3199,80
TSR (CAE (IV)) high	225,00	413,59	650,56	814,63	1016,05	1209,01	1424,32	1639,07	1829,79	2067,93	2286,93	2493,27	2715,25	2923,46	3114,92	3313,58
TSR (CAE (VI)) low	160,20	338,81	511,04	713,33	901,55	1092,11	1254,98	1451,40	1645,79	1857,10	2038,33	2237,67	2421,05	2621,11	2816,75	2948,04
TSR (CAE (VI))	192,60	376,20	580,80	763,20	968,80	1150,80	1339,20	1545,60	1737,60	1960,80	2161,20	2365,60	2567,20	2755,50	2916,60	3007,20
TSR (CAE (VI)) high	225,00	413,59	650,56	813,07	1016,05	1209,49	1423,42	1639,80	1829,41	2064,50	2284,07	2487,93	2693,35	2889,29	3016,45	3086,36
ITSA Delay Cost (CAE) low	188,68	367,07	523,34	714,59	888,04	1084,59	1288,62	1482,84	1679,87	1902,97	2111,01	2286,41	2509,15	2699,66	2901,32	3079,21
ITSA Delay Cost (CAE)	181,20	395,80	567,60	772,20	952,20	1150,20	1359,60	1552,80	1761,00	1976,40	2186,40	2377,20	2591,40	2794,20	2996,40	3189,00
ITSA Delay Cost (CAE) high	193,72	404,53	611,86	829,81	1016,36	1215,81	1430,58	1622,76	1842,13	2049,83	2261,79	2467,99	2673,65	2888,74	3091,48	3298,79
ITSA Valuation (CAE (IV)) low	188,68	367,07	523,34	714,59	887,66	1090,84	1289,16	1483,74	1677,81	1899,28	2104,85	2287,75	2492,70	2691,88	2870,24	2988,54
ITSA Valuation (CAE (IV))	181,20	395,80	567,60	772,20	952,20	1150,80	1359,60	1552,80	1757,40	1972,20	2180,40	2371,80	2577,60	2772,60	2945,40	3084,60
ITSA Valuation (CAE (IV)) high	193,72	404,53	611,86	829,81	1016,74	1216,56	1430,04	1621,86	1836,99	2045,12	2256,15	2455,85	2662,52	2853,32	3020,56	3180,66
ITSA Valuation (CAE (V)) low	160,20	338,81	511,04	712,97	901,55	1092,59	1256,44	1449,48	1648,54	1857,01	2042,15	2246,48	2430,41	2659,93	2871,36	3105,80
ITSA Valuation (CAE (V))	192,60	376,20	580,80	763,80	968,80	1150,80	1339,20	1543,80	1738,80	1962,80	2165,40	2370,60	2571,00	2788,80	2994,60	3193,80
ITSA Valuation (CAE (V)) high	225,00	413,59	650,56	814,63	1016,05	1209,01	1421,96	1637,82	1829,06	2068,19	2288,65	2494,72	2711,59	2917,67	3117,85	3281,80
ITSA Valuation (CAE (VI)) low	160,20	338,81	511,04	713,33	901,55	1090,87	1260,63	1450,13	1646,45	1855,07	2041,36	2236,38	2415,18	2625,44	2800,83	2917,57
ITSA Valuation (CAE (VI))	192,60	376,20	580,80	763,20	968,80	1150,20	1338,00	1543,80	1738,80	1960,80	2157,60	2342,40	2524,80	2662,80	2813,40	2769,00
ITSA Valuation (CAE (VI)) high	225,00	413,59	650,56	813,07	1016,05	1209,53	1415,37	1638,67	1831,15	2058,13	2285,84	2488,02	2693,22	2860,96	2968,77	3096,83
ITSA Delay Cost (LS) low	188,68	367,07	524,88	712,57	884,33	1078,39	1287,57	1482,88	1673,93	1879,99	2061,40	2256,93	2399,78	2569,22	2694,64	2865,38
ITSA Delay Cost (LS)	181,20	395,80	568,20	771,60	950,40	1150,20	1358,40	1551,00	1752,60	1960,80	2157,60	2342,40	2524,80	2662,80	2813,40	2769,00
ITSA Delay Cost (LS) high	193,72	404,53	611,52	830,63	1016,47	1222,01	1429,23	1619,12	1831,27	2041,61	2253,80	2427,87	2649,82	2932,16	2972,62	
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	188,68	367,07	523,34	714,59	888,04	1084,59	1288,62	1482,84	1679,87	1902,97	2111,01	2286,41	2509,15	2699,66	2901,32	3079,21
ITSA Delay Cost (CAE (IV))	181,20	395,80	567,60	772,20	952,20	1150,20	1359,60	1552,80	1761,00	1976,40	2186,40	2377,20	2591,40	2794,20	2996,40	3189,00
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	193,72	404,53	611,86	829,81	1016,36	1215,81	1430,58	1622,76	1842,13	2049,83	2261,79	2467,99	2673,65	2888,74	3091,48	3298,79
ITSA Delay Cost (CAE (V)) low	160,20	338,81	511,04	712,97	901,55	1092,59	1257,23	1449,78	1645,79	1856,99	2043,35	2246,15	2429,50	2659,33	2893,20	3112,33
ITSA Delay Cost (CAE (V))	192,60	376,20	580,80	763,80	969,40	1150,80	1340,40	1543,80	1737,60	1963,20	2166,00	2371,20	2571,00	2790,00	3007,80	3211,80
ITSA Delay Cost (CAE (V)) high	225,00	413,59	650,56	814,63	1017,66	1209,01	1423,57	1637,82	1829,41	2069,41	2288,65	2496,25	2712,50	2920,67	3122,40	3311,27
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) low	160,20	338,81	511,04	713,33	901,55	1090,87	1257,73	1450,78	1644,04	1858,42	2042,01	2243,00	2423,58	2638,69	2863,46	3073,86
ITSA Delay Cost (CAE (VI))	192,60	376,20	580,80	763,20	969,40	1150,20	1340,40	1545,00	1737,00	1962,00	2165,40	2367,00	2566,80	2761,00	2976,00	3136,00
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) high	225,00	413,59	650,56	813,07	1017,66	1209,53	1423,07	1639,22	1829,96	2065,58	2288,79	2491,00	2710,02	2923,31	3088,54	3196,14
ITSA Delay Cost (LE) low	188,68	367,07	524,88	712,05	887,50	1076,03	1283,35	1449,58	1657,64	1887,72	1776,00	1855,35	1914,48	1944,91	1931,31	1869,66
ITSA Delay Cost (LE)	181,20	395,80	568,20	771,00	949,80	1147,80	1345,20	1518,00	1650,60	1759,20	1846,20	1929,00	1971,60	1975,80	1973,40	1917,60
ITSA Delay Cost (LE) high	193,72	404,53	611,52	829,95	1012,10	1219,57	1407,05	1586,42	1733,56	1830,68	1916,40	2002,65	2028,72	2006,69	2015,49	1965,54
Ampnel low	189,25	346,78	544,78	715,14	906,28	1092,77	1284,96	1489,71	1692,64	1897,34	2094,97	2257,09	2427,67	2605,12	2717,92	2830,11
Ampnel	186,60	371,40	581,40	779,40	975,00	1170,60	1353,60	1543,20	1735,80	1938,60	2126,40	2301,00	2463,00	2638,80	2763,00	2859,60
Ampnel high	203,95	396,02	618,02	843,66	1043,72	1248,43	1422,24	1596,69	1778,96	1979,86	2157,83	2344,91	2498,33	2672,48	2808,08	2889,09
Ampnel low	189,25	346,78	544,78	715,14	906,28	1092,77	1284,96	1489,71	1692,64	1897,34	2094,97	2257,09	2427,67	2605,12	2717,92	2830,11
Ampnel	186,60	371,40	581,40	779,40	975,00	1170,60	1353,60	1543,20	1735,80	1938,60	2126,40	2301,00	2463,00	2638,80	2763,00	2859,60
Ampnel high	203,95	396,02	618,02	843,66	1043,72	1248,43	1422,24	1596,69	1778,96	1979,86	2157,83	2344,91	2498,33	2672,48	2808,08	2889,09
Ampnel low	189,25	346,78	544,78	715,14	906,28	1092,77	1284,96	1489,71	1692,64	1897,34	2094,97	2257,09	2427,67	2605,12	2717,92	2830,11
Ampnel	186,60	371,40	581,40	779,40	975,00	1170,60	1353,60	1543,20	1735,80	1938,60	2126,40	2301,00	2463,00	2638,80	2763,00	2859,60
Ampnel high	203,95	396,02	618,02	843,66	1043,72	1248,43	1422,24	1596,69	1778,96	1979,86	2157,83	2344,91	2498,33	2672,48	2808,08	2889,09
ITSA Delay Cost (IE) low	188,68	367,07	532,99	715,14	906,28	1092,77	1284,96	1489,71	1692,64	1897,34	2094,97	2257,09	2427,67	2605,12	2717,92	2830,11
ITSA Delay Cost (IE)	181,20	395,80	565,20	760,60	949,80	1147,80	1345,20	1518,00	1650,60	1759,20	1846,20	1929,00	1971,60	1975,80	1973,40	1917,60
ITSA Delay Cost (IE) high	193,72	404,53	597,41	864,43	1066,12	1268,00	1466,00	1661,00	1861,00	1998,00	2157,83	2344,91	2498,33	2672,48	2808,08	2889,09

Abbildung C.15.: Kreuzungslayoutvergleich: Durchschnittlicher gemessener Kreuzungsdurchsatz mit 95%-Konfidenzintervall [Fzg./h]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low	0.0053	0.0073	0.0085	0.0092	0.0123	0.0151	0.0170	0.0194	0.0242	0.0278	0.0355	0.0445	0.0571	0.0815	0.1138	0.1617
TSR (CAE (IV)) high	0.0067	0.0084	0.0100	0.0114	0.0134	0.0166	0.0183	0.0222	0.0308	0.0366	0.0460	0.0590	0.0809	0.1149	0.1620	0.2547
TSR (CAE (IV)) low	0.0082	0.0095	0.0115	0.0136	0.0144	0.0165	0.0196	0.0251	0.0338	0.0436	0.0565	0.0735	0.1047	0.1484	0.2103	0.3476
TSR (CAE (IV)) high	0.0056	0.0068	0.0080	0.0093	0.0106	0.0116	0.0142	0.0171	0.0188	0.0221	0.0285	0.0323	0.0393	0.0451	0.0588	0.0670
TSR (CAE (V)) low	0.0067	0.0083	0.0090	0.0102	0.0121	0.0141	0.0163	0.0188	0.0208	0.0264	0.0309	0.0376	0.0440	0.0561	0.0722	0.0999
TSR (CAE (V)) high	0.0078	0.0097	0.0100	0.0111	0.0135	0.0166	0.0184	0.0205	0.0227	0.0308	0.0354	0.0429	0.0487	0.0611	0.0877	0.1328
TSR (CAE (VI)) low	0.0059	0.0075	0.0089	0.0107	0.0128	0.0146	0.0193	0.0224	0.0263	0.0320	0.0408	0.0571	0.0660	0.0937	0.1422	0.2532
TSR (CAE (VI)) high	0.0070	0.0089	0.0101	0.0118	0.0144	0.0164	0.0214	0.0255	0.0298	0.0390	0.0496	0.0674	0.0923	0.1497	0.2391	0.4252
TSR (CAE (VII)) low	0.0081	0.0102	0.0113	0.0129	0.0160	0.0221	0.0234	0.0286	0.0332	0.0459	0.0584	0.0777	0.1185	0.2056	0.3361	0.5972
TSR (CAE (VII)) high	0.0052	0.0069	0.0080	0.0080	0.0100	0.0114	0.0131	0.0150	0.0178	0.0184	0.0219	0.0260	0.0328	0.0372	0.0516	0.0617
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.0065	0.0078	0.0088	0.0099	0.0108	0.0124	0.0142	0.0164	0.0200	0.0237	0.0270	0.0325	0.0424	0.0513	0.0680	0.0870
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.0079	0.0087	0.0096	0.0118	0.0116	0.0133	0.0152	0.0178	0.0222	0.0289	0.0320	0.0390	0.0521	0.0655	0.0845	0.1122
ITSA Valuation (CAE (IV)) low	0.0051	0.0066	0.0086	0.0100	0.0109	0.0137	0.0158	0.0196	0.0244	0.0247	0.0333	0.0492	0.0638	0.0890	0.1338	0.2006
ITSA Valuation (CAE (IV)) high	0.0082	0.0097	0.0108	0.0130	0.0144	0.0166	0.0210	0.0234	0.0302	0.0423	0.0536	0.0715	0.0998	0.1450	0.2052	0.4051
ITSA Valuation (CAE (V)) low	0.0059	0.0070	0.0080	0.0091	0.0104	0.0126	0.0147	0.0165	0.0184	0.0236	0.0279	0.0338	0.0416	0.0443	0.0585	0.0653
ITSA Valuation (CAE (V)) high	0.0067	0.0081	0.0089	0.0103	0.0120	0.0142	0.0164	0.0189	0.0213	0.0267	0.0311	0.0372	0.0452	0.0539	0.0738	0.1026
ITSA Valuation (CAE (VI)) low	0.0075	0.0091	0.0098	0.0114	0.0136	0.0158	0.0181	0.0212	0.0241	0.0300	0.0344	0.0407	0.0489	0.0634	0.0891	0.1499
ITSA Valuation (CAE (VI)) high	0.0059	0.0077	0.0087	0.0104	0.0128	0.0153	0.0192	0.0215	0.0257	0.0334	0.0413	0.0562	0.0732	0.0801	0.1607	0.2126
ITSA Valuation (CAE (VII)) low	0.0072	0.0084	0.0098	0.0117	0.0143	0.0176	0.0206	0.0251	0.0288	0.0399	0.0507	0.0650	0.0911	0.1482	0.2378	0.3931
ITSA Valuation (CAE (VII)) high	0.0085	0.0091	0.0110	0.0130	0.0159	0.0198	0.0220	0.0287	0.0319	0.0464	0.0601	0.0739	0.1091	0.1683	0.3148	0.5736
ITSA Delay Cost (LS) low	0.0063	0.0096	0.0142	0.0150	0.0206	0.0282	0.0381	0.0477	0.0638	0.0787	0.1144	0.1548	0.1983	0.2937	0.3925	0.6176
ITSA Delay Cost (LS) high	0.0091	0.0121	0.0159	0.0190	0.0245	0.0322	0.0428	0.0522	0.0721	0.0983	0.1270	0.1909	0.2368	0.3700	0.4553	0.5780
ITSA Delay Cost (IV) low	0.0119	0.0145	0.0175	0.0231	0.0283	0.0362	0.0475	0.0566	0.0805	0.1179	0.1397	0.2270	0.2854	0.4463	0.5182	0.7454
ITSA Delay Cost (IV) high	0.0052	0.0069	0.0080	0.0080	0.0104	0.0114	0.0131	0.0150	0.0178	0.0184	0.0219	0.0260	0.0328	0.0372	0.0516	0.0617
ITSA Delay Cost (V) low	0.0065	0.0078	0.0088	0.0099	0.0108	0.0124	0.0142	0.0164	0.0200	0.0237	0.0270	0.0325	0.0424	0.0513	0.0680	0.0870
ITSA Delay Cost (V) high	0.0079	0.0087	0.0096	0.0118	0.0116	0.0133	0.0152	0.0178	0.0222	0.0289	0.0320	0.0390	0.0521	0.0655	0.0845	0.1122
ITSA Delay Cost (VI) low	0.0057	0.0067	0.0072	0.0081	0.0089	0.0097	0.0116	0.0136	0.0153	0.0173	0.0206	0.0253	0.0295	0.0310	0.0387	0.0385
ITSA Delay Cost (VI) high	0.0066	0.0073	0.0080	0.0087	0.0099	0.0111	0.0130	0.0143	0.0159	0.0197	0.0231	0.0271	0.0323	0.0372	0.0469	0.0614
ITSA Delay Cost (VII) low	0.0075	0.0079	0.0088	0.0094	0.0110	0.0126	0.0144	0.0151	0.0165	0.0220	0.0255	0.0288	0.0352	0.0436	0.0562	0.0844
ITSA Delay Cost (VII) high	0.0059	0.0073	0.0079	0.0088	0.0104	0.0115	0.0149	0.0170	0.0193	0.0230	0.0291	0.0377	0.0422	0.0529	0.0599	0.0723
ITSA Delay Cost (VIII) low	0.0069	0.0079	0.0089	0.0098	0.0116	0.0136	0.0165	0.0184	0.0207	0.0269	0.0320	0.0428	0.0506	0.0717	0.1077	0.1902
ITSA Delay Cost (VIII) high	0.0079	0.0085	0.0099	0.0109	0.0128	0.0155	0.0180	0.0197	0.0220	0.0309	0.0348	0.0479	0.0590	0.0905	0.1555	0.3081
ITSA Delay Cost (IX) low	0.0068	0.0125	0.0176	0.0209	0.0315	0.0485	0.0844	0.1648	0.2950	0.4752	0.6836	0.8796	1.1348	1.3410	1.4494	1.6652
ITSA Delay Cost (IX) high	0.0096	0.0143	0.0193	0.0262	0.0382	0.0514	0.0972	0.1967	0.3637	0.6084	0.8155	1.0242	1.2808	1.4669	1.6158	1.8176
ITSA Delay Cost (X) low	0.0125	0.0162	0.0209	0.0315	0.0449	0.0743	0.1099	0.2285	0.4724	0.7435	0.9475	1.1687	1.4267	1.5927	1.7822	1.9701
ITSA Delay Cost (X) high	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Amnpel low	0.3619	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4161	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5118	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Amnpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
Amnpel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Amnpel high	0.3619	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4161	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5118	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Amnpel low	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
Amnpel high	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6488	0.7073	0.8784
Amnpel low	0.3619	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4161	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5118	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Amnpel high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
ITSA Delay Cost (IE) low	0.3619	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4161	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5118	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
ITSA Delay Cost (IE) high	0.4326	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
ITSA Delay Cost (II) low	0.0091	0.0144	0.0330	0.0879	0.7252	1.5968										
ITSA Delay Cost (II) high	0.0197	0.0410	0.1002	0.8648	1.8533											

Abbildung C.16.: Kreuzungslayoutvergleich: Durchschnittliche gewichtete Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall [ϕ]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low	0.6695	0.7866	0.8427	1.0240	1.2238	1.4673	1.7141	1.9661	2.4537	2.9314	3.6366	4.5759	5.8018	8.3497	11.5250	16.6372
TSR (CAE (IV)) high	0.7132	0.8650	0.9738	1.1678	1.3620	1.6162	1.8524	2.2448	2.8510	3.5212	4.6458	5.9178	11.5652	16.2466	25.2478	
TSR (CAE (IV)) low	0.7569	0.9434	1.1049	1.3116	1.4802	1.7651	1.9907	2.5035	3.2483	4.2110	5.6550	7.2669	14.7807	20.9662	33.8584	
TSR (CAE (IV)) high	0.6248	0.6849	0.8083	0.9568	1.0889	1.2303	1.4285	1.7042	1.8718	2.1880	2.5384	3.1516	3.9360	4.7103	5.8562	6.9757
TSR (CAE (V)) low	0.7030	0.8238	0.9270	1.0552	1.2302	1.4472	1.6666	1.9022	2.0824	2.6796	3.1056	3.7866	4.6022	5.6936	7.2862	10.0644
TSR (CAE (V)) high	0.7812	0.9627	1.0457	1.1536	1.3715	1.6641	1.9047	2.1002	2.2930	3.1712	3.6728	4.4216	4.9844	6.6773	8.7202	13.1631
TSR (CAE (VI)) low	0.6488	0.7339	0.8939	1.1021	1.3468	1.6122	1.9336	2.2050	2.5591	3.0772	4.0365	5.4684	6.3683	8.9678	14.2100	25.4517
TSR (CAE (VI)) high	0.7302	0.8944	1.0562	1.2422	1.5052	1.8722	2.1812	2.5470	2.9678	3.9240	5.0014	6.6634	9.1704	15.0990	24.2012	43.4090
TSR (CAE (VII)) low	0.8116	1.0549	1.2185	1.3623	1.6636	2.1322	2.4289	2.8890	3.3765	4.7708	5.9663	7.8684	11.9725	21.2402	34.1924	61.3663
TSR (CAE (VII)) high	0.6793	0.8079	0.9003	1.0971	1.2268	1.4791	1.6747	1.8900	2.2374	2.3562	2.8472	3.2906	3.9660	4.7309	6.3285	7.1175
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.7234	0.8898	1.0110	1.1926	1.3286	1.5656	1.7674	2.0080	2.3908	2.8694	3.3154	3.8556	5.0322	5.9556	7.6772	9.4434
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.7675	0.9717	1.1217	1.2881	1.4304	1.6521	1.8601	2.1260	2.5442	3.3836	3.7836	4.4206	6.0984	7.1803	9.0259	11.7893
ITSA Valuation (CAE (IV)) low	0.6794	0.8855	1.0746	1.2652	1.4015	1.7916	1.9827	2.4782	3.0502	3.3694	4.5594	6.4077	7.9687	11.2590	15.7924	24.0574
ITSA Valuation (CAE (IV)) high	0.7454	0.9436	1.1244	1.3686	1.5674	1.8716	2.2454	2.6342	3.2588	4.0360	5.3280	7.4850	9.8926	13.8394	19.4710	33.1882
ITSA Valuation (CAE (IV)) low	0.8114	1.0017	1.1742	1.5120	1.7133	1.9516	2.5081	2.7902	3.4674	4.7026	6.0926	8.5623	11.8165	16.4198	23.1496	42.3192
ITSA Valuation (CAE (IV)) high	0.6183	0.7384	0.8958	1.0374	1.2206	1.4912	1.6191	1.8761	2.1499	2.7200	3.2858	3.9722	4.9437	5.4207	7.3648	7.3012
ITSA Valuation (CAE (V)) low	0.7013	0.8864	1.0592	1.2092	1.3600	1.6680	1.9178	2.1762	2.4920	3.2550	3.7512	4.4198	5.4606	6.6232	9.0664	12.1766
ITSA Valuation (CAE (V)) high	0.8173	1.0344	1.2226	1.3810	1.5394	1.8448	2.1855	2.4763	2.8341	3.7900	4.2166	4.8674	5.9775	7.8257	10.7680	17.0620
ITSA Valuation (CAE (VI)) low	0.7746	0.9268	1.2234	1.4634	1.7098	2.0944	2.4548	3.0048	3.5668	5.0134	6.4484	8.1992	11.6394	18.1572	28.3968	44.9332
ITSA Valuation (CAE (VI)) high	0.8479	1.0694	1.3962	1.5970	1.8509	2.3386	2.7302	3.4230	3.9380	6.0440	7.7511	9.4116	14.0877	26.4407	36.0542	64.0458
ITSA Delay Cost (LS) low	0.8520	1.7302	2.0086	2.4625	3.1287	4.1096	5.4945	6.6528	8.8145	11.0963	14.6245	18.7514	22.4838	33.6207	42.8362	44.3707
ITSA Delay Cost (LS) high	1.2462	1.7636	2.2030	2.8354	3.4346	4.6622	6.0060	7.2394	9.7312	12.4208	15.6468	21.8556	26.2140	40.1182	48.0196	62.2132
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	1.6304	1.7970	2.3975	3.2083	3.7405	5.2149	6.5175	7.8260	10.6479	13.7463	16.6691	24.9598	29.9442	46.6157	53.2030	80.0557
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	0.6793	0.8079	0.9003	1.0971	1.2268	1.4791	1.6747	1.8900	2.2374	2.3562	2.8472	3.2906	3.9660	4.7309	6.3285	7.1175
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	0.7234	0.8898	1.0110	1.1926	1.3286	1.5656	1.7674	2.0080	2.3908	2.8694	3.3154	3.8556	5.0322	5.9556	7.6772	9.4434
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	0.7675	0.9717	1.1217	1.2881	1.4304	1.6521	1.8601	2.1260	2.5442	3.3836	3.7836	4.4206	6.0984	7.1803	9.0259	11.7893
ITSA Delay Cost (CAE (V)) low	0.6186	0.6964	0.8078	0.9363	1.0775	1.1971	1.4023	1.6321	1.7794	2.0514	2.3190	2.7990	3.3946	3.7526	4.7004	4.5680
ITSA Delay Cost (CAE (V)) high	0.8010	0.9020	1.0614	1.1537	1.2929	1.5277	1.6741	1.8071	2.0710	2.6418	3.1402	3.5218	4.1366	4.9646	6.1266	9.2200
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) low	0.6476	0.7536	0.9156	1.1055	1.3246	1.5001	1.8470	2.0575	2.3172	2.7248	3.3895	4.4700	5.0657	6.6980	7.5615	8.9036
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) high	0.7294	0.8652	1.0556	1.2320	1.4230	1.7078	1.9882	2.2968	2.5768	3.3346	3.8918	5.1960	6.9596	8.3004	12.1868	20.7614
ITSA Delay Cost (CAE (VII)) low	0.8112	0.9768	1.2156	1.3685	1.5214	1.9155	2.1294	2.5361	2.8364	3.9444	4.3941	5.9220	6.8535	9.0028	16.8121	32.6192
ITSA Delay Cost (CAE (VII)) high	0.9459	1.9336	3.3983	5.0849	7.1062	10.0223	19.7149	35.4232	53.5647	73.5113	95.4726	117.6408	138.0909	146.2629	166.9605	
ITSA Delay Cost (LE) low	1.3648	2.0500	2.7002	3.7922	5.2532	8.1364	12.3290	23.7700	43.4632	66.2168	86.8076	108.4048	132.1660	150.4772	165.9712	189.2182
ITSA Delay Cost (LE) high	1.7637	2.1864	3.0316	4.1661	5.4215	9.1866	14.6357	27.8251	51.5032	78.8689	100.1039	121.3370	146.6912	162.8636	183.6795	211.4759

Abbildung C.17.: Kreuzungslayoutvergleich: Durchschnittliche Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall [s]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low	6.5637	6.8529	6.9796	6.9785	6.9677	7.0080	7.0088	7.0125	7.0712	7.1317	7.1872	7.2187	7.2458	7.2711	7.5328	7.7163
TSR (CAE (IV))	6.9496	7.1148	7.1174	7.1482	7.1324	7.1466	7.1484	7.1500	7.1856	7.2240	7.2568	7.2946	7.3542	7.4704	7.6568	7.9594
TSR (CAE (IV)) high	7.3155	7.3767	7.2552	7.3179	7.2971	7.2852	7.2880	7.2875	7.3000	7.3163	7.3244	7.3705	7.4626	7.6137	7.7808	8.2025
TSR (CAE (IV)) low	6.6224	6.9113	6.9452	6.9542	6.9711	6.9513	7.0825	7.0998	7.0993	7.1416	7.1914	7.2272	7.2208	7.2726	7.3268	7.3786
TSR (CAE (IV))	7.0546	7.1508	7.1454	7.1086	7.1188	7.1344	7.1752	7.1836	7.1836	7.2072	7.2372	7.2620	7.2830	7.3480	7.4128	7.5150
TSR (CAE (IV)) high	7.4868	7.3903	7.3466	7.2630	7.2665	7.3175	7.2699	7.2602	7.2679	7.2728	7.2830	7.2968	7.3452	7.4234	7.4998	7.6514
TSR (CAE (VI)) low	6.6233	6.9016	7.0003	7.0149	7.0696	7.0437	7.1503	7.1969	7.1944	7.2648	7.3763	7.4269	7.4944	7.6258	7.8130	8.1816
TSR (CAE (VI))	7.0544	7.1688	7.1966	7.1716	7.1876	7.2156	7.2664	7.2860	7.3050	7.3614	7.4306	7.4802	7.5616	7.7850	8.0878	8.6390
TSR (CAE (VI)) high	7.4855	7.4360	7.3929	7.3283	7.3056	7.3875	7.3825	7.3751	7.4156	7.4580	7.4849	7.5335	7.6288	7.9442	8.3626	9.0964
ITSA Delay Cost (CAE) low	6.5948	6.8547	6.9770	6.9988	7.0009	7.0725	7.0914	7.1125	7.2494	7.3023	7.3427	7.4535	7.5997	7.6396	8.0772	9.7928
ITSA Delay Cost (CAE)	6.9476	7.1164	7.1416	7.1910	7.1782	7.2198	7.2374	7.2534	7.3402	7.4374	7.4602	7.5964	7.7122	7.8554	8.0578	8.2940
ITSA Delay Cost (CAE) high	7.3104	7.3781	7.3062	7.3922	7.3655	7.3671	7.3834	7.3943	7.4310	7.5725	7.5777	7.7993	7.8647	8.0772	8.2503	8.6152
ITSA Valuation (CAE (IV)) low	6.5947	6.8548	7.0356	7.0117	7.0135	7.0987	7.1434	7.1517	7.3083	7.4238	7.5088	7.5985	7.8996	8.2322	8.6091	9.0635
ITSA Valuation (CAE (IV))	6.9480	7.1186	7.1814	7.2124	7.2146	7.2514	7.2808	7.2968	7.4108	7.5592	7.6782	7.8714	8.0904	8.4214	8.7966	9.5232
ITSA Valuation (CAE (IV)) high	7.3113	7.3824	7.3272	7.4131	7.4157	7.4041	7.4182	7.4419	7.5133	7.6946	7.8476	8.0483	8.2812	8.6106	8.9841	9.9629
ITSA Valuation (CAE (V)) low	6.6200	6.9367	6.9631	6.9637	7.0316	7.0254	7.1813	7.2095	7.2702	7.3966	7.4886	7.5568	7.6974	7.8037	8.0687	8.1087
ITSA Valuation (CAE (V))	7.0528	7.1686	7.1684	7.1420	7.1740	7.2072	7.2886	7.3370	7.3900	7.4800	7.5630	7.6692	7.7732	7.9432	8.2396	8.5112
ITSA Valuation (CAE (V)) high	7.4856	7.4005	7.3737	7.3003	7.3164	7.3890	7.3959	7.4645	7.5098	7.5634	7.6375	7.7826	7.8490	8.0827	8.4105	8.9137
ITSA Valuation (CAE (VI)) low	6.5949	6.9685	7.0000	7.0905	7.1490	7.1057	7.2876	7.3772	7.4164	7.5624	7.5666	7.9346	8.1732	8.3914	8.8836	9.4668
ITSA Valuation (CAE (VI))	7.0812	7.1910	7.2110	7.2098	7.2554	7.3030	7.4026	7.5218	7.5624	7.6664	7.8479	7.9766	8.3022	8.5467	9.3292	10.0187
ITSA Valuation (CAE (VI)) high	7.5775	7.4136	7.4220	7.3291	7.3618	7.5003	7.5176	7.6664	7.6884	7.8479	7.9786	8.3022	8.5467	9.3292	10.0187	11.1152
ITSA Delay Cost (LS) low	6.6115	6.9212	7.0833	7.1188	7.2093	7.3320	7.4519	7.5287	7.8546	7.9801	8.2208	8.4767	8.7744	9.3616	9.6853	9.8775
ITSA Delay Cost (LS)	6.9914	7.1946	7.2092	7.3044	7.3652	7.4620	7.5946	7.6982	7.9250	8.1194	8.3516	8.6904	8.9670	9.5356	9.9366	10.4188
ITSA Delay Cost (LS) high	7.3713	7.4680	7.3951	7.4900	7.5011	7.5939	7.7373	7.8677	7.9954	8.2587	8.4824	8.9041	9.1596	9.7096	10.1879	10.9601
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	6.5948	6.8547	6.9770	6.9898	7.0009	7.0725	7.0914	7.1125	7.2494	7.3023	7.3427	7.4535	7.5997	7.6396	8.0772	9.7928
ITSA Delay Cost (CAE (IV))	6.9476	7.1164	7.1416	7.1910	7.1782	7.2198	7.2374	7.2534	7.3402	7.4374	7.4602	7.5964	7.7122	7.8554	8.0578	8.2940
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	7.3104	7.3781	7.3062	7.3922	7.3655	7.3671	7.3834	7.3943	7.4310	7.5725	7.5777	7.7993	7.8647	8.0772	8.2503	8.6152
ITSA Delay Cost (CAE (V)) low	6.6208	6.9352	6.9592	6.9837	7.0038	6.9967	7.1743	7.1877	7.2043	7.3423	7.4041	7.4927	7.5107	7.6361	7.8152	7.8417
ITSA Delay Cost (CAE (V))	7.0532	7.1622	7.1564	7.1316	7.1456	7.1744	7.2640	7.2888	7.3142	7.4096	7.4592	7.5190	7.6184	7.7342	7.9044	8.0914
ITSA Delay Cost (CAE (V)) high	7.4856	7.3892	7.3516	7.2795	7.2874	7.3521	7.3537	7.3899	7.4241	7.4769	7.5143	7.6053	7.7261	7.8323	7.9936	8.3411
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) low	6.6212	6.9666	6.9865	7.0462	7.1052	7.0673	7.3040	7.3040	7.3605	7.5703	7.6380	7.7459	7.9118	8.1415	8.3616	8.5750
ITSA Delay Cost (CAE (VI))	7.0534	7.1940	7.2026	7.1888	7.2200	7.2470	7.3780	7.4700	7.4862	7.6054	7.7258	7.9052	8.0170	8.3104	8.7038	9.3168
ITSA Delay Cost (CAE (VI)) high	7.4856	7.4214	7.4187	7.3314	7.3948	7.4267	7.4520	7.5509	7.6219	7.6405	7.8136	8.0555	8.1222	8.4793	9.0480	10.0586
ITSA Delay Cost (LE) low	6.6173	6.9295	7.1060	7.1658	7.3229	7.6161	7.9455	8.5000	9.0035	10.5819	11.2485	11.9855	12.6464	13.0950	13.8174	
ITSA Delay Cost (LE)	6.9930	7.2144	7.2416	7.3618	7.4970	7.7514	8.0564	8.5730	9.3262	10.1036	10.8934	11.5788	12.4920	13.1238	13.7134	14.5242
ITSA Delay Cost (LE) high	7.3687	7.4993	7.3772	7.5578	7.6711	7.8687	8.1713	8.6460	9.6489	10.3792	11.2049	11.9091	12.9885	13.6012	14.3318	15.2310

Abbildung C.18.: Kreuzungslayoutvergleich: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch mit 95%-Konfidenzintervall [l/100km]

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (V)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	-0,0445	-0,0488	-0,0691	-0,1398	-0,0102	-0,0456	-0,1412	-0,0508	-0,0424	-0,0682	-0,0538	-0,1640	-0,1254	-0,0750	-0,1800	-0,2970
TSR (CAE (V)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0118	0,0322	0,0248	-0,0094	0,0651	0,0475	-0,0067	0,0333	0,0586	0,0674	0,0657	-0,0232	-0,0118	-0,0179	-0,0461	-0,1881
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0691	0,1133	0,1388	0,1211	0,1203	0,1406	0,1278	0,1174	0,1586	0,1830	0,1653	0,1177	0,1018	0,0382	0,0878	-0,0811
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	-0,0076	0,0152	0,0091	0,0376	0,1406	0,1631	0,1611	0,1636	0,2101	0,2437	0,2688	0,3005	0,2744	0,3484	0,3198	0,3638
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0300	0,0769	0,1170	0,1369	0,1923	0,2183	0,2335	0,2631	0,3099	0,3342	0,4146	0,4493	0,4754	0,5533	0,5802	0,6668
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0677	0,1386	0,2249	0,2342	0,2440	0,2747	0,2859	0,3636	0,4097	0,4248	0,5603	0,5881	0,6764	0,7572	0,8404	0,9636
TSR (CAE (V)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	-0,0451	-0,0880	-0,0760	-0,0996	-0,0781	-0,1045	-0,1756	-0,0683	-0,1540	-0,0959	-0,1130	-0,0819	-0,1790	-0,0484	-0,1463	-0,1073
TSR (CAE (V)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0093	0,0263	0,0071	0,0106	0,0951	0,0096	-0,0092	-0,0041	-0,0231	-0,0117	-0,0084	0,0104	0,0378	0,0396	-0,0716	-0,0371
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0537	0,1416	0,0903	0,0893	0,0882	0,0972	0,1672	0,0610	0,1076	0,0724	0,1063	0,1037	0,0676	0,1276	0,1083	0,2682
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	-0,0263	-0,0659	0,0492	0,0795	0,1165	0,1321	0,1307	0,1716	0,1572	0,1380	0,1480	0,1656	0,2165	0,2269	0,2293	0,2892
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0198	0,1190	0,1124	0,1401	0,1757	0,2105	0,2003	0,2370	0,2343	0,2565	0,2590	0,2807	0,2653	0,3363	0,3501	0,3894
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0636	0,2649	0,1795	0,2017	0,2568	0,2306	0,2700	0,3025	0,3174	0,3750	0,3621	0,3946	0,3145	0,4466	0,4661	0,5615
TSR (CAE (V)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	-0,1190	-0,0627	-0,0793	-0,0906	-0,0958	-0,0797	-0,0484	-0,0780	-0,0303	-0,0649	-0,0986	-0,0245	-0,1304	-0,0919	-0,1740	-0,0210
TSR (CAE (V)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0252	0,0660	0,0247	0,0073	0,0028	0,0429	0,0360	0,0148	0,0320	-0,0237	-0,0228	0,0348	0,0122	0,0096	0,0057	0,0796
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0596	0,1687	0,1287	0,0954	0,1013	0,1564	0,1203	0,1077	0,0942	0,0374	0,0510	0,0940	0,1549	0,1116	0,1053	0,1721
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	-0,0126	-0,0267	-0,0131	0,0690	0,1225	0,1484	0,1999	0,1973	0,2233	0,2090	0,2177	0,2563	0,2347	0,2508	0,3410	0,3852
TSR (CAE (V)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / TSR (CAE (V)) low	0,0113	0,1124	0,1143	0,1639	0,1944	0,2624	0,2290	0,2799	0,3096	0,3089	0,3646	0,3521	0,4615	0,5211	0,5495	0,5526
TSR (CAE (V)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / TSR (CAE (V)) high	0,0561	0,2636	0,2417	0,2588	0,2862	0,3764	0,2990	0,3626	0,3879	0,4087	0,4926	0,4709	0,6884	0,7913	0,7580	0,7200

Abbildung C.19.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit gegenüber TSR (CAE) für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low - TSR (CAE (V)) low / TSR (CAE (IV)) low	-0.1653	-0.2423	-0.0121	-0.0512	-0.0136	-0.0402	-0.0036	0.0447	0.0811	-0.0410	0.1189	0.1592	0.2105	0.2996	0.3266	0.3409
TSR (CAE (IV)) high - TSR (CAE (V)) high / TSR (CAE (IV)) high	-0.0045	0.0171	0.0995	0.1079	0.0980	0.1091	0.1099	0.1546	0.2840	0.2564	0.3280	0.3617	0.4559	0.5121	0.5442	0.6077
TSR (CAE (IV)) low - TSR (CAE (V)) low / TSR (CAE (IV)) high	0.1763	0.2765	0.2111	0.2669	0.2095	0.2596	0.2284	0.2645	0.4668	0.5538	0.5371	0.5842	0.7012	0.7246	0.7817	0.8744
TSR (CAE (IV)) high - TSR (CAE (V)) high / TSR (CAE (IV)) low	-0.2120	-0.2988	-0.1501	-0.2338	-0.1978	-0.3950	-0.2695	-0.2171	-0.1803	-0.3479	-0.2727	-0.3166	-0.4236	-0.6669	-0.6910	-1.1739
TSR (CAE (IV)) low - TSR (CAE (V)) low / TSR (CAE (IV)) high	-0.0410	-0.0547	-0.0120	-0.0329	-0.0742	-0.1598	-0.1697	-0.1462	-0.0253	-0.0963	-0.0763	-0.1429	-0.1409	-0.3020	-0.4759	-0.6697
TSR (CAE (IV)) high - TSR (CAE (V)) high / TSR (CAE (IV)) low	0.1289	0.1894	0.1280	0.1880	0.0384	0.0774	-0.0599	-0.0754	0.1297	0.1954	0.1201	0.0388	0.1418	0.0520	-0.1268	-0.1681
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	-0.1675	-0.1985	-0.0388	0.0221	-0.0841	0.0191	-0.0545	0.0734	0.0579	-0.0776	0.0914	0.2078	0.2380	0.3505	0.4289	0.4243
ITSA Valuation (CAE (IV)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / ITSA Valuation (CAE (IV)) high	0.1611	0.0191	0.0531	0.0221	0.0841	0.0191	0.0545	0.0734	0.0579	-0.0776	0.0914	0.2078	0.2380	0.3505	0.4289	0.4243
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) high	-0.1551	-0.1945	-0.0854	-0.1397	-0.0441	0.0590	-0.1072	0.1216	0.2238	0.2819	0.2696	0.4571	0.4571	0.5586	0.5948	0.6910
ITSA Valuation (CAE (IV)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	-0.1892	-0.1693	-0.1464	-0.1297	-0.2747	-0.2970	-0.2494	-0.2761	-0.1693	-0.1693	-0.4633	-0.3129	-0.3413	-0.1619	-0.7634	-0.6342
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) high	-0.0842	-0.0267	-0.0122	-0.0169	-0.1336	-0.1643	-0.1202	-0.1681	-0.0542	-0.1906	-0.1638	-0.0781	-0.1138	-0.2665	-0.4028	-0.2380
ITSA Valuation (CAE (IV)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	-0.1500	-0.0377	0.0548	-0.0262	0.0133	0.0111	0.0418	0.0898	-0.1125	-0.0679	-0.0248	0.0486	0.0212	0.0212	0.0753	0.0063
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	-0.0163	0.0819	0.0948	0.1122	0.0794	0.1014	0.0693	0.1247	0.2056	0.1696	0.1449	0.1684	0.2379	0.2751	0.3088	0.2938
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	-0.1174	0.1615	0.1347	0.2526	0.1831	0.1552	0.2076	0.3212	0.4516	0.3577	0.3975	0.4673	0.5290	0.6290	0.5443	0.5822
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	-0.2070	-0.0821	-0.0799	-0.1381	-0.1299	-0.1926	-0.1862	-0.1256	-0.4253	-0.3569	-0.3569	-0.4639	-0.4639	-0.7132	-1.2560	-2.4723
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	-0.0612	-0.0142	-0.0151	0.0007	-0.0714	-0.0934	-0.1615	-0.1200	-0.0317	-0.1300	-0.1855	-0.3186	-0.1926	-0.3960	-0.5938	-1.1878
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	0.0547	0.0637	0.0497	0.1404	-0.0128	0.0057	-0.0536	0.0623	0.1493	-0.0141	0.0793	-0.0474	0.0793	-0.0788	0.0895	0.0966

Abbildung C.20.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit gegenüber Kreuzungslayout IV für TSR (CAE), ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (VI) low - ITSA Valuation (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.1428	-0.1638	-0.2487	-0.3176	-0.2895	-0.2579	-0.3504	-0.2965	-0.2648	-0.3365	-0.3637	-0.5950	-0.5117	-0.3808	-0.4775	-0.6373
TSR (CAE (VI) high - ITSA Valuation (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0451	-0.0909	-0.1547	-0.1891	-0.1519	-0.1580	-0.2122	-0.1736	-0.1430	-0.1462	-0.1464	-0.2651	-0.2094	-0.1966	-0.1985	-0.3145
TSR (CAE (VI) low - ITSA Delay Cost (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.0525	-0.0179	-0.0606	-0.0605	-0.1144	-0.0581	-0.0740	-0.0759	-0.0511	-0.0182	-0.0131	-0.0571	-0.0433	-0.0926	-0.0451	-0.1559
TSR (CAE (VI) high - ITSA Delay Cost (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0143	-0.0287	-0.0382	-0.0712	0.0173	0.0313	0.0459	0.0377	0.0578	0.1413	0.1967	0.2990	0.2695	0.3634	0.3833	0.5262
TSR (CAE (VI) low - ITSA Valuation (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.0386	-0.0363	-0.0134	0.0774	0.0958	0.0987	0.1001	0.1065	0.2321	0.2146	0.2864	0.3403	0.3848	0.4850	0.5275	0.6260
TSR (CAE (VI) high - ITSA Valuation (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0705	-0.1708	-0.3003	-0.3063	-0.2474	-0.2638	-0.3535	-0.2693	-0.3486	-0.3393	-0.3792	-0.2952	-0.4482	-0.3668	-0.6067	-0.6755
TSR (CAE (VI) low - ITSA Valuation (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.0211	-0.0760	-0.1405	-0.1459	-0.1718	-0.1536	-0.1607	-0.1440	-0.1967	-0.2147	-0.2070	-0.1672	-0.2745	-0.1521	-0.2440	-0.2069
TSR (CAE (VI) high - ITSA Valuation (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0195	-0.0686	-0.0787	-0.0713	-0.0721	-0.0566	-0.0914	-0.0487	-0.0737	-0.1795	-0.0985	-0.0752	-0.1134	0.0013	-0.0725	0.0671
TSR (CAE (VI) low - ITSA Delay Cost (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.0511	-0.0590	-0.0757	-0.0410	-0.0577	-0.0676	-0.0705	-0.0447	-0.0315	0.0369	0.0393	0.0716	0.1222	0.1368	0.1610	0.2021
TSR (CAE (VI) high - ITSA Delay Cost (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0235	0.0259	-0.0682	0.0687	0.0365	0.0586	0.0700	0.0960	0.0795	0.1243	0.1211	0.1654	0.1955	0.2365	0.2573	0.3158
TSR (CAE (VI) low - ITSA Valuation (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	-0.1536	-0.1112	-0.3262	-0.3452	-0.2625	-0.2405	-0.2541	-0.3617	-0.3436	-0.4762	-0.5023	-0.3425	-0.5265	-0.6341	-0.6021	-0.2459
TSR (CAE (VI) high - ITSA Valuation (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0606	-0.0362	-0.1583	-0.1781	-0.1359	-0.1197	-0.1254	-0.1737	-0.1985	-0.2776	-0.2693	-0.2305	-0.2892	-0.2025	-0.1734	-0.0351
TSR (CAE (VI) low - ITSA Delay Cost (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	0.0135	0.0159	-0.0537	-0.0448	-0.0335	-0.0286	-0.0230	-0.0408	-0.0663	-0.1463	-0.1452	-0.1525	-0.1324	-0.0205	0.0048	0.0523
TSR (CAE (VI) high - ITSA Delay Cost (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	-0.0053	-0.0379	-0.1121	-0.0955	-0.0217	0.0386	0.0210	0.0019	0.0694	0.0854	0.1287	0.1384	0.1875	0.2399	0.4647	0.5960
TSR (CAE (VI) low - ITSA Delay Cost (CAE (VI) low) / TSR (CAE (VI) low)	0.0011	0.0326	-0.0089	0.0052	0.0546	0.0678	0.0895	0.0982	0.1317	0.1502	0.2219	0.2202	0.3501	0.4503	0.4964	0.5217
TSR (CAE (VI) high - ITSA Delay Cost (CAE (VI) high) / TSR (CAE (VI) high)	0.0070	0.0617	0.0688	0.0629	0.1164	0.1273	0.1422	0.1717	0.1790	0.1920	0.2842	0.2765	0.4366	0.5390	0.5096	0.4903

Abbildung C.21.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit gegenüber TSR (CAE) für Kreuzungslayout IV, Kreuzungslayout V und Kreuzungslayout VI

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
TSR (CAE (IV)) low - TSR (CAE (V)) low / TSR (CAE (IV)) low	-0.0749	-0.0671	-0.0719	-0.0557	-0.0090	-0.0331	0.0152	0.0732	0.1112	-0.0187	0.1808	0.2163	0.2761	0.3759	0.4341	0.5360
TSR (CAE (IV)) - TSR (CAE (V)) - TSR (CAE (IV))	0.0143	0.0476	0.0481	0.0964	0.0901	0.0446	0.1003	0.1526	0.2096	0.2390	0.3315	0.3600	0.4547	0.5077	0.5514	0.6014
TSR (CAE (IV)) high - TSR (CAE (V)) high / TSR (CAE (IV)) high	0.1035	0.1624	0.1680	0.2485	0.1901	0.2422	0.1824	0.2156	0.3892	0.4123	0.4285	0.4506	0.4518	0.6221	0.6159	0.6335
TSR (CAE (IV)) low - TSR (CAE (V)) low / TSR (CAE (IV)) low	-0.1060	-0.1746	-0.2486	-0.2701	-0.2254	-0.3194	-0.2497	-0.2324	-0.1931	-0.4359	-0.3715	-0.4016	-0.6008	-1.0069	-1.2861	-1.9517
TSR (CAE (IV)) high - TSR (CAE (V)) high / TSR (CAE (IV)) high	-0.0238	-0.0340	-0.0946	-0.0637	-0.1133	-0.1954	-0.1775	-0.1346	-0.0410	-0.1144	-0.0765	-0.1263	-0.1211	-0.3096	-0.4696	-0.7193
TSR (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	0.0683	0.1066	0.0793	0.1427	0.0072	0.0277	-0.1053	-0.0571	0.0739	0.1018	0.1152	0.0473	0.1474	0.1212	0.0518	-0.1138
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	-0.1602	-0.1298	-0.0913	-0.0022	0.0039	0.0272	-0.0235	0.0973	0.1465	-0.0484	0.1822	0.2778	0.3042	0.4788	0.5205	0.6255
ITSA Valuation (CAE (IV)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / ITSA Valuation (CAE (IV)) high	0.0370	0.0598	0.0580	0.1221	0.1139	0.1939	0.1488	0.1739	0.2293	0.1935	0.2672	0.4094	0.4450	0.5214	0.5244	0.6371
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Valuation (CAE (V)) low / ITSA Valuation (CAE (IV)) low	-0.1937	-0.1770	-0.2647	-0.1853	-0.2684	-0.4075	-0.2612	-0.3013	-0.1545	-0.6634	-0.6992	-0.3781	-0.4970	-0.9810	-1.0373	-1.0566
ITSA Valuation (CAE (IV)) high - ITSA Valuation (CAE (V)) high / ITSA Valuation (CAE (IV)) high	-0.0362	0.0178	-0.0880	-0.0538	-0.0979	-0.1190	-0.0933	-0.1407	-0.0914	-0.2422	-0.2107	-0.0564	-0.1788	-0.3120	-0.4584	-0.3639
ITSA Valuation (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	-0.1321	0.0148	-0.0363	-0.0057	0.0383	0.0457	0.1005	0.1054	0.1717	-0.0262	-0.0192	0.0301	0.0610	0.0456	0.1104	0.0012
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	0.0180	0.1018	0.0756	0.1229	0.1079	0.1268	0.1297	0.1436	0.1947	0.1822	0.1767	0.1803	0.2515	0.2662	0.2949	0.2700
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	0.1524	0.1742	0.1653	0.2325	0.1894	0.2051	0.1599	0.1776	0.2150	0.3286	0.3241	0.2921	0.3754	0.4148	0.4243	0.4325
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	-0.1488	-0.0891	-0.2640	-0.2129	-0.1545	-0.2230	-0.1696	-0.2289	-0.1402	-0.4789	-0.3868	-0.6887	-0.5732	-0.8663	-1.4336	-3.1740
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high - ITSA Delay Cost (CAE (V)) high / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) high	-0.0063	0.0276	-0.0540	-0.0300	-0.0711	-0.0008	-0.1249	-0.1438	-0.0778	-0.1621	-0.1739	-0.3477	-0.1843	-0.3937	-0.5974	-1.1866
ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low - ITSA Delay Cost (CAE (V)) low / ITSA Delay Cost (CAE (IV)) low	0.1159	0.1080	0.1145	0.1202	0.0005	0.0275	-0.0647	-0.0662	-0.0229	0.0570	-0.0136	-0.1066	0.0686	-0.0610	0.0059	-0.0038

Abbildung C.22.: Relative Unterschiede der durchschnittlichen Wartezeit gegenüber Kreuzungslayout IV für TSR (CAE), ITSA Valuation (CAE) und ITSA Delay Cost (CAE)

C.3. Kraftstoffverbrauchsminimierung

Dieser Abschnitt enthält die vollständigen Messergebnisse aus dem Experiment „Kraftstoffverbrauchsminimierung“ aus Abschnitt 8.6.

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampel low	169.25	346.78	544.78	715.14	906.28	1092.77	1284.96	1489.71	1692.64	1897.34	2094.97	2257.09	2427.67	2605.12	2717.97	2830.11
Ampel	186.60	371.40	581.40	779.40	975.00	1170.60	1363.60	1543.20	1735.80	1938.60	2126.40	2301.00	2463.00	2636.80	2763.00	2899.60
Ampel high	203.95	396.02	618.02	843.66	1043.72	1248.43	1422.24	1596.69	1778.96	1979.86	2157.83	2344.91	2498.33	2672.48	2808.08	2899.09
TSR (CAE) low	168.68	367.07	523.34	714.59	888.04	1066.16	1290.74	1483.62	1681.75	1906.19	2112.44	2283.75	2500.77	2687.37	2861.80	3012.28
TSR (CAE)	181.20	385.80	567.60	772.20	962.20	1152.00	1360.20	1551.60	1761.60	1977.00	2182.20	2374.20	2581.80	2776.20	2964.60	3114.00
TSR (CAE) high	193.72	404.53	611.86	829.81	1016.36	1217.84	1429.66	1619.68	1841.45	2047.81	2251.96	2464.65	2662.83	2865.03	3047.40	3215.72
ITSA Delay Cost (CAE) low	168.68	367.07	523.34	714.59	888.04	1064.59	1288.62	1482.84	1679.67	1902.97	2111.01	2286.41	2509.15	2699.66	2901.32	3079.21
ITSA Delay Cost (CAE)	181.20	385.80	567.60	772.20	962.20	1150.20	1369.60	1552.80	1761.00	1976.40	2186.40	2377.20	2591.40	2794.20	2996.40	3189.00
ITSA Delay Cost (CAE) high	193.72	404.53	611.86	829.81	1016.36	1215.81	1430.58	1622.76	1842.13	2049.83	2261.79	2467.99	2673.65	2888.74	3091.48	3296.79
ITSA Fuel Consumption (CAE) low	168.68	367.07	523.34	714.59	888.04	1085.75	1290.74	1482.42	1679.19	1625.29	2112.32	1715.90	524.40	-524.25	237.16	497.65
ITSA Fuel Consumption (CAE)	181.20	385.80	567.60	772.20	962.20	1151.40	1360.20	1553.40	1761.00	1867.20	2185.80	2128.20	1937.40	744.60	1372.20	1221.60
ITSA Fuel Consumption (CAE) high	193.72	404.53	611.86	829.81	1016.36	1217.05	1429.66	1624.36	1842.81	2109.11	2259.28	2540.50	3360.40	2013.45	2607.24	1945.55
TSR (LS) low	168.68	367.07	524.88	711.64	887.04	1074.36	1284.80	1474.07	1640.80	1763.61	1895.18	1928.15	2016.07	2067.08	2120.44	2095.57
TSR (LS)	181.20	385.80	568.20	771.60	948.60	1147.80	1350.00	1536.00	1717.20	1825.80	1926.00	2011.20	2065.80	2123.40	2161.80	2155.20
TSR (LS) high	193.72	404.53	611.52	831.56	1010.16	1221.24	1415.20	1597.93	1793.60	1887.99	1998.02	2094.25	2115.53	2179.72	2203.16	2214.83
ITSA Delay Cost (LS) low	168.68	367.07	524.88	712.57	884.33	1078.39	1287.57	1482.88	1673.93	1879.99	2061.40	2256.93	2399.78	2569.22	2694.64	2665.38
ITSA Delay Cost (LS)	181.20	385.80	568.20	771.60	950.40	1150.20	1368.40	1551.00	1752.80	1960.80	2157.60	2342.40	2524.80	2662.80	2813.40	2789.00
ITSA Delay Cost (LS) high	193.72	404.53	611.52	830.63	1016.47	1222.01	1429.23	1619.12	1831.27	2041.61	2253.80	2427.87	2649.82	2756.38	2932.16	2872.62
ITSA Fuel Consumption (LS) low	168.68	367.07	524.88	715.25	886.27	1078.39	1290.44	1463.40	1671.90	989.36	1466.39	940.54	-35.94	578.61	547.86	461.69
ITSA Fuel Consumption (LS)	181.20	385.80	568.20	772.60	951.00	1150.20	1367.20	1536.00	1754.40	1686.60	1893.60	1837.80	1067.40	1036.00	1158.00	712.20
ITSA Fuel Consumption (LS) high	193.72	404.53	611.52	830.35	1016.73	1222.01	1423.96	1608.60	1836.90	2373.84	2320.81	2735.06	2170.74	1491.39	1768.14	962.71

Abbildung C.23.: Vergleich der Kraftstoffverbrauchsminimierung bezüglich des durchschnittlichen gemessenen Durchsatzes mit 95%-Konfidenzintervall

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampel low	0.2713	0.3232	0.3612	0.3493	0.3755	0.3799	0.3741	0.4089	0.4133	0.4396	0.4547	0.5220	0.5321	0.6498	0.7073	0.8784
Ampel	0.3619	0.3782	0.3908	0.3667	0.4187	0.4289	0.4161	0.4519	0.4552	0.4788	0.4968	0.5518	0.6065	0.6892	0.7808	0.9145
Ampel high	0.4328	0.4333	0.4203	0.4242	0.4619	0.4780	0.4580	0.4948	0.4972	0.5181	0.5390	0.5816	0.6808	0.7296	0.8543	0.9507
TSR (CAE) low	0.0053	0.0073	0.0085	0.0092	0.0123	0.0151	0.0170	0.0194	0.0242	0.0276	0.0355	0.0445	0.0571	0.0815	0.1138	0.1617
TSR (CAE)	0.0067	0.0084	0.0100	0.0114	0.0134	0.0158	0.0183	0.0222	0.0290	0.0366	0.0460	0.0590	0.0809	0.1149	0.1620	0.2547
TSR (CAE) high	0.0082	0.0095	0.0115	0.0136	0.0144	0.0165	0.0196	0.0251	0.0338	0.0435	0.0565	0.0735	0.1047	0.1484	0.2103	0.3476
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.0052	0.0069	0.0080	0.0080	0.0100	0.0114	0.0131	0.0150	0.0178	0.0184	0.0219	0.0260	0.0328	0.0372	0.0516	0.0617
ITSA Delay Cost (CAE)	0.0065	0.0078	0.0088	0.0089	0.0108	0.0124	0.0142	0.0164	0.0200	0.0237	0.0320	0.0325	0.0424	0.0513	0.0680	0.0870
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.0079	0.0087	0.0096	0.0118	0.0116	0.0133	0.0152	0.0178	0.0222	0.0289	0.0320	0.0390	0.0521	0.0655	0.0845	0.1122
ITSA Fuel Consumption (CAE) low	0.0049	0.0074	0.0089	0.0083	0.0104	0.0128	0.0151	0.0171	0.0195	0.0204	0.0286	0.0312	0.0188	-0.0129	0.0132	0.0572
ITSA Fuel Consumption (CAE)	0.0069	0.0086	0.0101	0.0109	0.0124	0.0144	0.0173	0.0196	0.0237	0.0270	0.0335	0.0377	0.0388	0.0271	0.0548	0.0785
ITSA Fuel Consumption (CAE) high	0.0088	0.0099	0.0113	0.0136	0.0144	0.0160	0.0196	0.0222	0.0280	0.0336	0.0404	0.0443	0.0608	0.0672	0.0964	0.0899
TSR (LS) low	0.0060	0.0130	0.0201	0.0247	0.0300	0.0515	0.0737	0.1460	0.2415	0.3737	0.6057	0.7891	1.0328	1.1590	1.3932	1.9098
TSR (LS)	0.0108	0.0155	0.0234	0.0329	0.0464	0.0706	0.0972	0.1672	0.2880	0.5205	0.7729	0.9434	1.1894	1.4213	1.6264	1.8272
TSR (LS) high	0.0155	0.0181	0.0266	0.0411	0.0628	0.0988	0.1207	0.1884	0.3346	0.6674	0.9402	1.1277	1.3461	1.6836	1.8596	2.1446
ITSA Delay Cost (LS) low	0.0063	0.0096	0.0142	0.0150	0.0206	0.0282	0.0381	0.0477	0.0638	0.0787	0.1144	0.1548	0.1883	0.2937	0.3925	0.4106
ITSA Delay Cost (LS)	0.0091	0.0121	0.0159	0.0190	0.0245	0.0322	0.0428	0.0522	0.0721	0.0983	0.1270	0.1909	0.2368	0.3700	0.4553	0.5780
ITSA Delay Cost (LS) high	0.0119	0.0145	0.0175	0.0231	0.0283	0.0362	0.0475	0.0566	0.0805	0.1179	0.1397	0.2270	0.2854	0.4463	0.5182	0.7454
ITSA Fuel Consumption (LS) low	0.0064	0.0122	0.0191	0.0199	0.0253	0.0384	0.0513	0.0646	0.0826	0.1015	0.1435	0.1988	0.0445	0.1651	0.2038	0.1829
ITSA Fuel Consumption (LS)	0.0108	0.0163	0.0227	0.0271	0.0352	0.0480	0.0604	0.0752	0.0958	0.1218	0.1645	0.2203	0.1724	0.2401	0.3325	0.2521
ITSA Fuel Consumption (LS) high	0.0152	0.0204	0.0264	0.0343	0.0451	0.0565	0.0695	0.0868	0.1090	0.1421	0.1854	0.2418	0.3002	0.3150	0.4612	0.3213

Abbildung C.24.: Vergleich der Kraftstoffverbrauchsminimierung bezüglich der durchschnittlichen gewichteten Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampel low	36.4463	36.4961	38.8906	39.5962	42.0553	42.3521	43.3248	45.1276	45.4372	48.0282	50.3508	54.1226	55.6022	66.3883	73.5799	93.0409
Ampel	40.3296	39.0984	41.0240	42.0828	44.6302	44.6968	45.2788	47.2674	47.9204	50.3578	52.5446	58.3190	63.7036	71.2464	81.9450	95.7164
Ampel high	44.2129	41.7007	43.1574	44.5694	47.2051	47.0475	47.2288	49.4072	50.4036	52.6874	54.7384	62.5154	71.8050	76.1045	90.3101	98.3919
TSR (CAE) low	0.6695	0.7866	0.8427	1.0240	1.2238	1.4673	1.7141	1.9861	2.4537	2.8314	3.6366	4.5759	5.8018	8.3497	11.5250	16.6372
TSR (CAE)	0.7132	0.8650	0.9738	1.1678	1.3520	1.6162	1.8524	2.2448	2.8510	3.5212	4.6458	5.9164	8.1738	11.5652	16.2466	25.2478
TSR (CAE) high	0.7969	0.9434	1.1049	1.3116	1.4802	1.7851	1.9907	2.5035	3.2483	4.2110	5.8650	7.2989	10.5578	14.7807	20.9662	33.8684
ITSA Delay Cost (CAE) low	0.6793	0.8079	0.9003	1.0971	1.2268	1.4791	1.6747	1.8900	2.2374	2.3552	2.8472	3.2906	3.9660	4.7309	6.3285	7.1175
ITSA Delay Cost (CAE)	0.7234	0.8898	1.0110	1.1926	1.3286	1.5656	1.7674	2.0080	2.3908	2.8694	3.3154	3.8556	5.0322	5.9556	7.6772	9.4434
ITSA Delay Cost (CAE) high	0.7675	0.9717	1.1217	1.2861	1.4304	1.6521	1.8601	2.1260	2.5442	3.3636	3.7836	4.4206	6.0984	7.1803	9.0259	11.7693
ITSA Fuel Consumption (CAE) low	0.6905	0.8232	0.8830	1.0755	1.1922	1.3838	1.6567	1.7325	2.0733	2.2821	2.7542	3.0559	1.4908	-0.9739	1.3285	5.5394
ITSA Fuel Consumption (CAE)	0.7222	0.8836	0.9860	1.1328	1.2750	1.4982	1.7490	1.9176	2.3192	2.6884	3.2572	3.7238	3.8410	2.9608	5.4268	7.8298
ITSA Fuel Consumption (CAE) high	0.7539	0.9440	1.0890	1.1901	1.3578	1.6126	1.8413	2.1027	2.5661	3.0947	3.7602	4.3917	6.1912	6.8955	9.5251	10.1202
TSR (LS) low	0.7277	1.4996	1.9739	2.8935	3.6368	5.7575	7.7929	14.0894	24.0371	37.5011	63.9567	78.4901	107.4990	122.3305	144.6837	157.2693
TSR (LS)	1.0996	1.6348	2.3016	3.3772	4.5952	6.9286	9.8004	16.8816	28.6582	52.4526	77.3326	95.2060	120.5000	144.5240	165.7736	183.7896
TSR (LS) high	1.4715	1.7700	2.6293	3.8609	5.5536	8.0987	11.8079	19.6736	33.2793	67.4041	90.7065	111.9259	133.5010	166.7175	186.8636	210.3099
ITSA Delay Cost (LS) low	0.8620	1.7302	2.0085	2.4625	3.1287	4.1095	5.4945	6.6528	8.8145	11.0963	14.6245	18.7514	22.4838	33.6207	42.8362	44.3707
ITSA Delay Cost (LS)	1.2462	1.7636	2.2030	2.8354	3.4346	4.6622	6.0060	7.2394	9.7312	12.4208	15.6468	21.8566	26.2140	40.1182	48.0196	62.2132
ITSA Delay Cost (LS) high	1.6304	1.7970	2.3975	3.2083	3.7405	5.2149	6.5175	7.8260	10.6479	13.7453	16.6691	24.9598	29.9442	46.6157	53.2030	80.0557
ITSA Fuel Consumption (LS) low	0.7953	1.5025	1.8955	2.4524	3.1078	4.4752	5.2064	6.9404	8.4435	10.5425	14.8728	18.6065	4.9381	19.4143	22.1968	18.3014
ITSA Fuel Consumption (LS)	1.1464	1.8072	2.0814	2.6816	3.3606	4.7234	5.8782	7.3900	9.3426	12.0756	16.3124	21.7102	16.9348	23.8574	34.0574	26.3226
ITSA Fuel Consumption (LS) high	1.4975	1.6999	2.2673	2.9108	3.6534	4.9716	6.5500	7.8396	10.2417	13.6087	17.7520	24.8139	28.9305	28.3005	45.9180	34.3438

Abbildung C.25.: Vergleich der Kraftstoffverbrauchsminimierung bezüglich der durchschnittlichen Wartezeit mit 95%-Konfidenzintervall

C. Daten

	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Ampel low	8.2940	8.7553	9.1572	9.0794	9.3534	9.2887	9.3907	9.3775	9.5241	9.7484	9.9040	10.1085	10.1828	10.5556	10.7851	11.3800
Ampel	8.9004	9.0746	9.2876	9.3104	9.4884	9.5002	9.5972	9.6722	9.7480	9.9760	10.0980	10.3402	10.5580	10.8624	11.2504	11.6820
Ampel high	9.5068	9.3939	9.4180	9.5414	9.6234	9.7117	9.8037	9.9689	9.9679	10.2036	10.2920	10.5719	10.9332	11.2092	11.7157	11.9840
TSR (CAE) low	6.5637	6.8529	6.9796	6.9785	6.9677	7.0080	7.0088	7.0125	7.0712	7.1317	7.1872	7.2187	7.2458	7.3271	7.5328	7.7163
TSR (CAE)	6.9496	7.1148	7.1174	7.1482	7.1324	7.1466	7.1484	7.1500	7.1856	7.2240	7.2558	7.2946	7.3542	7.4704	7.6568	7.9594
TSR (CAE) high	7.3155	7.3767	7.2952	7.3179	7.2971	7.2852	7.2880	7.2875	7.3000	7.3163	7.3244	7.3705	7.4626	7.6137	7.7808	8.2025
ITSA Delay Cost (CAE) low	6.5648	6.8547	6.9770	6.9898	7.0009	7.0725	7.0914	7.1125	7.2494	7.3023	7.3427	7.4535	7.5597	7.6336	7.8663	7.9728
ITSA Delay Cost (CAE)	6.9476	7.1164	7.1416	7.1910	7.1782	7.2188	7.2374	7.2534	7.3402	7.4374	7.4602	7.5964	7.7122	7.8554	8.0578	8.2940
ITSA Delay Cost (CAE) high	7.3104	7.3781	7.3062	7.3922	7.3555	7.3671	7.3834	7.3943	7.4310	7.5725	7.5777	7.7393	7.8647	8.0772	8.2503	8.6152
ITSA Fuel Consumption (CAE) low	6.5635	6.8524	6.9793	6.9828	6.9817	7.0536	7.0731	7.0703	7.2030	7.2150	7.3039	7.3969	7.7729	7.6834	6.2198	8.0540
ITSA Fuel Consumption (CAE)	6.9482	7.1158	7.1114	7.1546	7.1568	7.1894	7.2106	7.2140	7.3270	7.3554	7.4356	7.5206	7.4088	4.4610	6.3330	8.1178
ITSA Fuel Consumption (CAE) high	7.3129	7.3792	7.2435	7.3264	7.3299	7.3262	7.3481	7.3577	7.4510	7.4968	7.5673	7.6443	8.0447	5.2386	6.4462	8.1816
TSR (LS) low	6.5687	6.8518	6.9990	7.0227	7.0377	7.1423	7.2340	7.5031	7.9244	8.3424	9.0619	9.4330	10.0626	10.5807	11.1398	11.5746
TSR (LS)	6.9548	7.1154	7.1290	7.1870	7.1962	7.2672	7.3282	7.5742	7.9896	8.7110	9.3784	9.8412	10.4594	11.0954	11.6256	12.1094
TSR (LS) high	7.3209	7.3790	7.2590	7.3513	7.3547	7.3921	7.4224	7.6453	8.0548	9.0796	9.6949	10.2494	10.8562	11.6101	12.1174	12.6442
ITSA Delay Cost (LS) low	6.6115	6.9212	7.0833	7.1188	7.2093	7.3301	7.4519	7.5287	7.8546	7.9801	8.2208	8.4767	8.7744	9.3616	9.6853	9.8775
ITSA Delay Cost (LS)	6.9914	7.1946	7.2092	7.3044	7.3552	7.4620	7.5946	7.6982	7.9250	8.1194	8.3616	8.6904	8.9670	9.5366	9.9366	10.4188
ITSA Delay Cost (LS) high	7.3713	7.4680	7.3351	7.4900	7.5011	7.5939	7.7373	7.8677	7.9954	8.2587	8.4824	8.9041	9.1596	9.7096	10.1879	10.9601
ITSA Fuel Consumption (LS) low	6.5896	6.8937	7.0492	7.0897	7.1500	7.2995	7.3474	7.4756	7.6271	7.7544	8.1217	8.4007	6.2907	8.2630	8.5564	8.1429
ITSA Fuel Consumption (LS)	6.9650	7.1530	7.1888	7.2616	7.3012	7.4316	7.5034	7.6020	7.7714	7.9606	8.2314	8.4910	6.7576	8.6804	9.0552	8.8304
ITSA Fuel Consumption (LS) high	7.3404	7.4123	7.3284	7.4335	7.4524	7.5637	7.6594	7.7285	7.9157	8.1668	8.3411	8.5813	7.2245	9.0978	9.5540	9.5179

Abbildung C.26.: Vergleich der Kraftstoffverbrauchsminimierung bezüglich des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs mit 95%-Konfidenzintervall

Literaturverzeichnis

- [AB06] Dirk Abel und Alexander Bollig. *Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen*. Springer, 2006.
- [ABB⁺97] Staffan Algers, Eric Bernauer, Marco Boero, Laurent Breheret, Carlo Di Taranto, Mark Dougherty, Ken Fox und Jean-François Gabard. Review of Micro-Simulation Models – SMARTTEST Project Deliverable D3. <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv3f.html>, August 1997. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [ABD⁺06] Amer Aijaz, Bernd Bochow, Florian Dötzer, Andreas Festag, Matthias Gerlach, Rainer Kroh und Tim Leinmüller. Attacks on Inter Vehicle Communication Systems – an Analysis. In *3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006)*, 2006.
- [Ahm07] Mahmoud Reza Ahmadi. *Anwendung von Echtzeitfragestellungen im Umfeld von Agententechnologie im Straßenverkehr*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Januar 2007.
- [AL08] Inna Adragna-Löwen. *Streckenmanagement im Straßenverkehr*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Juli 2008.
- [BAB85] D. P. Bowyer, R. Akçelik und D. C. Biggs. Guide to Fuel Consumption Analysis for Urban Traffic Management. Special Report SR 32, ARRB Transport Research Ltd, Vermont South, Australia, 1985.
- [Beu08] Ingo Beutler. *Verteilte Simulation agentengestützter Fahrerassistenzsysteme*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), März 2008.
- [Bew05] Cornelia Bewersdorf. *Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr*. Schriften zum Technikrecht, Band 8. Duncker & Humblot, 2005.
- [BFGG98] Jaime Barceló, Jose L. Ferrer, David García und Rafael Grau. Microscopic Traffic Simulation for ATIS Systems Analysis. A Parallel Computing Version. In *Contribution to the 25th Anniversary of CRT*. University of Montreal, 1998.
- [BFKS01] Stefan Bornemann, Michael Förster, Barbara Knüppel und Ingo Schmidt. *Mobility and Traffic in the 21st Century*, Kapitel Mobility and Transport in Agglomeration Areas – The Nuremberg Region in the 21st Century as an Example, Seiten 80–186. Springer, 2001.

Literaturverzeichnis

- [BFP⁺03] Zevi Bareket, Paul S. Fancher, Huei Peng, Kangwon Lee und Charbel A. Assaf. Methodology for Assessing Adaptive Cruise Control Behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 4(3):123–131, September 2003.
- [Bie02] Robert Biehl. Verkehrsmodellierung mit zellulären Automaten. *Straßenverkehrstechnik*, 2002(11):603–608, 2002.
- [BK05] Klaus Bogenberger und Peter Konhäuser. Verkehrsmanagement der Zukunft INVENT – Verkehrsmanagement 2010. *Straßenverkehrstechnik*, 2005(4):183–188, 2005.
- [BK09] Peter Brucker und Sigrid Knust. Complexity results for scheduling problems. <http://www.mathematik.uni-osnabrueck.de/research/OR/class/>, 2009. Stand: 29.06.2009.
- [Bra00] Ulrich Brannolte. Simulationsmodelle im Verkehrswesen – Analyse und spezifische Weiterentwicklungen. *Straßenverkehrstechnik*, 2000(6):265–269, 2000.
- [Bru04] Peter Brucker. *Scheduling Algorithms*. Springer, 4. Auflage, 2004.
- [BTK05] Susanne Buld, Heiko Tietze und Hans-Peter Krüger. *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, Kapitel Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren, Seiten 161–187. Springer, 2005.
- [C2C] Car 2 Car Communication Consortium. <http://www.car-to-car.org/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Cit] CityMobil. Towards advanced road transport for the urban environment. <http://www.citymobil-project.eu/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Com01] Commission of the European Communities. WHITE PAPER: European transport policy for 2010: time to decide. http://ec.europa.eu/transport/white_paper/documents/doc/lb_com_2001_0370_en.pdf, September 2001. COM(2001) 370 final.
- [COO] COOPERS. Co-operative Systems for Intelligent Road Safety. <http://www.coopers-ip.eu/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [(CV08] Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS). *CVIS – Cooperating for Mobility*. 2008. http://www.cvisproject.org/download/cvis_brochure_May2008_Final.pdf, Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [DAM] DAMAST. Driver Assistance using Multi-Agent Systems in Traffic. <http://www.ipd.uni-karlsruhe.de/~damast/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [DARa] DARPA. DARPA Grand Challenge 2004. <http://archive.darpa.mil/grandchallenge04/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.

Literaturverzeichnis

- [DARb] DARPA. DARPA Grand Challenge 2005. <http://archive.darpa.mil/grandchallenge05/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [DARc] DARPA. DARPA Urban Challenge 2007. <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Den06] Daniel Dencker. *Mobile Agenten im Straßenverkehr*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), September 2006.
- [DES06] DESTATIS. *Im Blickpunkt: Verkehr in Deutschland 2006*. Statistisches Bundesamt, 2006.
- [DES08] DESTATIS. *Verkehr im Überblick 2007*. Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 1.2. Statistisches Bundesamt, 2008.
- [Dey01] Anind K. Dey. Understanding and Using Context. *Personal and Ubiquitous Computing*, 5(1):4–7, 2001.
- [DJP03] Rajdeep K. Dash, Nicholas R. Jennings und David C. Parkes. Computational-Mechanism Design: A Call to Arms. *IEEE Intelligent Systems*, 18(6):40–47, 2003.
- [DS04] Kurt Dresner und Peter Stone. Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism. In *AAMAS 2004*, Seiten 530–537. IEEE, 2004.
- [DS05] Kurt Dresner und Peter Stone. Multiagent Traffic Management: An Improved Intersection Control Mechanism. In *AAMAS 2005*, Seiten 471–477. ACM, 2005.
- [DS08] Kurt Dresner und Peter Stone. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. *Artificial Intelligence Research*, 31:591–656, 2008.
- [DU04] Marius Dannenberg und Anja Ulrich. *E-Payment und E-Billing*. Gabler, 2004.
- [Eur08] European Commission, Information Society and Media. eSafety – Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien für mehr Sicherheit im Straßenverkehr. http://ec.europa.eu/information_society/doc/factsheets/048-esafety-de.pdf, 2008. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Eur11] European Commission. eSafety. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/, 2011. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Eva99] Leonard Evans. *Handbook of Transportation Science*, Kapitel Transportation Safety, Seiten 63–108. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [FHM05] Walter Franz, Hannes Hartenstein und Martin Mauve, Hrsg. *Inter-Vehicle-Communications Based on Ad Hoc Networking Principles*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.

- [FIP] FIPA. Foundation for Intelligent Physical Agents. <http://www.fipa.org/>.
Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [FIP05] FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA Specifications. <http://www.fipa.org/specifications/index.html>, 2005. Letzter Zugriff:
28. April 2011.
- [fkaa] fka – Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. PELOPS. <http://www.pelops.de>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [fkab] fka – Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. PELOPS White Paper. http://www.pelops.de/pdf/pelops_whitepaper.pdf. Letzter Zugriff:
28. April 2011.
- [FL05] Kai Ch. Fuerstenberg und Ulrich Lages. New European Approach for Intersection Safety - The EC-Project INTERSAFE. In *Proceedings of IV 2005, IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Seiten 177–180. IEEE, Juni 2005.
- [For06a] Oliver Forster. *Konzeption einer Architektur für ein Werkzeug zur Verkehrssimulation unter Berücksichtigung von Fahrerassistenzsystemen*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Januar 2006.
- [For06b] Simone Forster. *Modellierung von Agenten für die Anwendung im Straßenverkehr*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), März 2006.
- [FSIW03] Hiroshi Furukawa, Yasuhiro Shiraishi, Toshiyuki Inagaki und Takayuki Watanabe. Mode Awareness of a Dual-Mode Adaptive Cruise Control System. In *Systems, Man, and Cybernetics, 2003 IEEE International Conference, Band 1*, Seiten 832–837, 2003.
- [fTS06] Department for Transport und County Surveyors' Society. *Puffin Good Practice Guide*, 01. Auflage, 2006. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.dft.gov.uk/pgr/roads/tss/gpg/puffingoodpracticeguide>,
Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [GEV11] GEVAS Software Systementwicklung und Verkehrsinformatik GmbH. GEVAS Software: Travolution. <http://www.gevas.eu/forschung/travolution/>,
2011. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [GG00] Jürgen T. Greschner und Horst E. Gerland. Traffic Signal Priority Tool To Increase Service Quality And Efficiency. In *Proceedings APTA Bus & Paratransit Conference, Houston, TX*, Seiten 138–143, 2000.
- [GL00] Sumit Ghosh und Tony Lee. *Intelligent Transportation Systems*. CRC Press, 2000.
- [Gle72] Axel W. Gleue. Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung signalgeregelter Knotenpunkte. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 136, 1972.

- [GLLK79] R. L. Graham, E. L. Lawler, J. K. Lenstra und A. H. G. Rinnooy Kan. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. In *Discrete optimization II*, Annals of discrete mathematics 5, Seiten 287–326. North-Holland, 1979.
- [GZV06] GZVB, Hrsg. *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel - Beiträge zum gleichnamigen Symposium vom 22. und 23. Februar 2006, DLR Braunschweig*. Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e. V., 2006.
- [Haa06] Alexander Haag. *Konzeption und Bewertung einer zentralen Entscheidungsinstanz zur Verkehrsoptimierung an Kreuzungen*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Februar 2006.
- [HEK02] Joachim Hartung, Bärbel Elpelt und Karl-Heinz Klösener. *Statistik*. Oldenbourg, 13. Auflage, 2002.
- [HES05] M. Hopstock, Dirk Ehmans und Helmut Spannheimer. Development of Advanced Assistance Systems for Intersection Safety. In *AMAA 2005, 9th International Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany*, 2005.
- [HHLa] HHLA Hamburger Hafen und Logistik AG. HHLA Container. http://www.hhla.de/fileadmin/download/HHLA_Container_Brosch09_D.pdf. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [HHLb] HHLA Hamburger Hafen und Logistik AG. HHLA Container – Wie von Geisterhand. <http://www.hhla.de/Umschlag.147.0.html>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Hor72] W. A. Horn. Single-Machine Job Sequencing with Treelike Precedence Ordering and Linear Delay Penalties. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 23(2):189–202, 1972.
- [IB99] Petros Ioannou und Arnab Bose. *Handbook of Transportation Science*, Kapitel Automated Vehicle Control, Seiten 187–232. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [IC93] Petros A. Ioannou und C. C. Chien. Autonomous Intelligent Cruise Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4):657–672, 1993.
- [IL03] Sandy Irani und Vitus Leung. Scheduling with Conflicts on Bipartite and Interval Graphs. *Journal of Scheduling*, 6:287–307, 2003.
- [IME11] Graduate School IME - Universität Karlsruhe (TH) – Interdisciplinary Doctoral Program “Information Management and Market Engineering“. <http://www.ime.uni-karlsruhe.de>, 2011. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [INI] INIT. init innovation in traffic AG. <http://www.init-ka.de/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.

Literaturverzeichnis

- [INT07] INTERSAFE. INTERSAFE Final Report. <http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/INTERSAFE/D40.75%20INTERSAFE%20Final%20Report.pdf>, 2007. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [INV] INVENT. Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik. <http://www.invent-online.de/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [INV05] INVENT. INVENT “erfahren“ – mobil mit 8 Sinnen. <http://www.invent-online.de/de/downloads/INVENT%20Ergebnisbericht.pdf>, 2005. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [IST00] M. Itoh, D. Sakami und K. Tanaka. Dependence of Human Adaptation and Risk Compensation on Modification in Level of Automation for System Safety. In *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference, Band 2*, Seiten 1295–1300, 2000.
- [ITS00] University of Leeds (GB) ITS. The SMARTEST Project Final Report. <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv11f.html>, Januar 2000. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [ITS05] U.S. Department of Transportation Intelligent Transportation Systems. *Saving Lives Through Advanced Vehicle Safety Technology: Intelligent Vehicle Initiative Final Report (FHWA-JPO-05-057)*. 2005.
- [Kno06] Peter M Knoll. Adaptive Cruise Control – Current State and Future Aspects. In *Adaptive Cruise Control*. SAE International, 2006.
- [Knu98] Donald E. Knuth. *The Art of Computer Programming – Band 2 Seminumerical algorithms*. Addison-Wesley, 3. Auflage, 1998.
- [Kop05] Matthias Kopf. *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, Kapitel Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen?, Seiten 117–139. Springer, 2005.
- [Kri02] Vijay Krishna. *Auction Theory*. Academic Press, 2002.
- [Law73] E. L. Lawler. Optimal sequencing of a single machine subject to precedence constraints. *Management Science*, 19(5):544–546, Januar 1973.
- [Law07] Averill M. Law. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, 4. Auflage, 2007.
- [Leh72] J. P. Lehoczky. Traffic Inter Control and Zero-Switch Queues under Conditions of Markov Chain Dependence Input. *Journal of Applied Probability*, 9(2):382–395, Juni 1972.
- [LHD02] Xiao-Yun Lu, J. Karl. Hedrick und Mike Drew. ACC/CACC – Control Design, Stability and Robust Performance. In *Proceedings of the American Control Conference*, 2002.

Literaturverzeichnis

- [LK80] J. K. Lenstra und A. H. G. Rinnooy Kan. Complexity results for scheduling chains on a single machine. *European Journal of Operational Research*, 4(4):270–275, 1980.
- [LKB77] J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan und Peter Brucker. Complexity of machine scheduling problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1:343–362, 1977.
- [LN04] Peter C. Lockemann und Jens Nimis. Flexibility through Multiagent Systems: Solution or Illusion? In P. Van Emde Boas, J. Pokorný, M. Bielikova und J. Stuller, Hrsg., *SOFSEM*, Seiten 41–56. Springer, 2004.
- [LVW99] Ronghui Liu, Dirck Van Vliet und David Watling. DRACULA: a microscopic, day-to-day dynamic framework for modelling traffic networks, 1999. Institute for Transport Studies, University of Leeds.
- [Mas06] Sebastian Mast. *Anwendung von Lernverfahren für Agenten im Verkehr*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Dezember 2006.
- [MB06] Cornelius Menig und Fritz Busch. Innerstädtische Verkehrsoptimierung durch Car-2-X Communication. In GZVB [GZV06].
- [MK05] Ruiqi Ma und David B. Kaber. Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10):939–953, 2005.
- [MMB01] Greg Marsden, Mike McDonald und Mark Brackstone. Towards an understanding of adaptive cruise control. *Transportation Research Part C*, 9(1):33–51, 2001.
- [MNK06] Christoph Mayser, Karl Naab und Walter Kagerer. InterActive Cruise Control - A New Driver Interaction Concept for Adaptive Cruise Control Systems. In Ronald K. Jurgen, Hrsg., *Adaptive Cruise Control*. SAE International, 2006.
- [Mor07] Marc Torrent Moreno. *Inter-Vehicle Communications: Achieving Safety in a Distributed Wireless Environment – Challenges, Systems and Protocols*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2007.
- [Muk07] Selma Mukhtar. *Intelligentes Trassenmanagement zur Steigerung der Verlässlichkeit von Reisezeitprognosen*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Oktober 2007.
- [NOW] NOW: Network on Wheels. <http://www.network-on-wheels.de/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [NS92] Kai Nagel und Michael Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229, Dezember 1992.

- [Pap99] Markos Papageorgiou. *Handbook of Transportation Science*, Kapitel Traffic Control, Seiten 233–267. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Par99] H. Van Dyke Parunak. Industrial and Practical Applications of DAI. In Weiß [Wei99], Seiten 377–421.
- [Par01] David Christopher Parkes. *Iterative Combinatorial Auctions: Achieving Economic and Computational Efficiency*. Dissertation, University of Pennsylvania, 2001. <http://www.eecs.harvard.edu/~parkes/pubs/diss.pdf>, Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [PBHJ99] Mikael Persson, Fredrik Botling, Erik Hesslow und Rolf Johansson. Stop & Go Controller for Adaptive Cruise Control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, 1999.
- [Pin02] Michael Pinedo. *Scheduling – Theory, Algorithms and Systems*. Prentice Hall, 2. Auflage, 2002.
- [PRe] PReVENT. Preventive and Active Safety Applications. <http://www.prevent-ip.org/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [PRe08] PReVENT. Preventive and Active Safety Applications, IP D15: Final Report. http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/IP_Level/PR-04000-IPD-080222-v15_PReVENT_Final_Report_Amendments%20%20May%202008.pdf, 2008. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [PSB11] Natalja Pulter, Heiko Schepperle und Klemens Böhm. How Agents Can Help Curbing Fuel Combustion – a Performance Study of Intersection Control for Fuel-Operated Vehicles. In *Proc. of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications Track (AAMAS 2011)*, Taipei, Taiwan, Mai 2011.
- [PTV] PTV AG. VISSIM. <http://www.ptv.de/software/verkehrsplanung-verkehrstechnik/software-und-system-solutions/vissim/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Pul07] Natalja Pulter. *Visualisierung innovativer Mechanismen zur Verkehrssteuerung an Kreuzungen*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), August 2007.
- [Pul08] Natalja Pulter. *Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei agentengestützten Mechanismen zur Kreuzungssteuerung*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Juni 2008.
- [Rei08] Michael Reimann. *Agentengestützte Verkehrssteuerung in Multi-Kreuzungsszenarien*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Juli 2008.

- [RN03] Stuart Russell und Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 2. Auflage, 2003.
- [Ros06] Sheldon M. Ross. *Simulation*. Academic Press, 4. Auflage, 2006.
- [RZ94] Jeffrey S. Rosenschein und Gilad Zlotkin. *Rules of Encounter*. MIT Press, 1994.
- [SAF] SAFESPOT. Cooperative Vehicles and Road Infrastructure for Road Safety. <http://www.safespot-eu.org/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [SB07] Heiko Schepperle und Klemens Böhm. Agent-Based Traffic Control Using Auctions. In Matthias Klusch, Koen Hindriks, Mike P. Papazoglou und Leon Sterling, Hrsg., *Cooperative Information Agents XI*, LNAI 4676, Seiten 119–133. Springer, 2007.
- [SB08a] Heiko Schepperle und Klemens Böhm. Auction-Based Traffic Management: Towards Effective Concurrent Usage of Road Intersections. Interner Bericht 2008-1, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), 2008. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000007507>.
- [SB08b] Heiko Schepperle und Klemens Böhm. Auction-Based Traffic Management: Towards Effective Concurrent Utilization of Road Intersections. In *IEEE Joint Conference on E-Commerce Technology (CEC'08) and Enterprise Computing, E-Commerce and E-Services (EEE'08), 21–24 July, 2008, Washington, D.C., USA*, Seiten 105–112. IEEE, 2008.
- [SB09] Heiko Schepperle und Klemens Böhm. *Handbook of Research on Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, Kapitel Valuation-Aware Traffic Control – the Notion and the Issues. Information Science Reference, April 2009.
- [SBB⁺06] Heiko Schepperle, Christiane Barz, Klemens Böhm, Jonas Kunze, Carolina M. Laborde, Stefan Seifert und Kendra Stockmar. Auction Mechanisms for Traffic Management. In Stefan Seifert und Christof Weinhardt, Hrsg., *Group Decision and Negotiation (GDN)*, Seiten 214–217. Universitätsverlag Karlsruhe, Juni 2006.
- [SBF07] Heiko Schepperle, Klemens Böhm und Simone Forster. Towards Valuation-Aware Agent-Based Traffic Control. In *The Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2007)*, Seiten 352–354, Honolulu, Hawai'i, USA, Mai 2007.
- [SBF08] Heiko Schepperle, Klemens Böhm und Simone Forster. Traffic Management Based on Negotiations between Vehicles – a Feasibility Demonstration Using Agents. In John Collins, Peyman Faratin, Simon Parsons, Juan A. Rodriguez-Aguilar, Norman M. Sadeh, Onn Shehory und Elizabeth Sklar, Hrsg., *Agent-Mediated Electronic Commerce and Trading Agent Design and Analysis*, LNBIP 13, Seiten 90–104. Springer, 2008.

Literaturverzeichnis

- [Sch01] Gerhard Schirmacher. Einsatz von Detektoren für Fußgänger an Lichtsignalanlagen. *Straßenverkehrstechnik*, 2001(1):19–25, 2001.
- [Sch08] Jan Schneider. *Konzeption einer Verkehrsentologie für agentengestütztes Verkehrsmanagement*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Juni 2008.
- [SEV] SEVECOM. Secure Vehicle Communication. <http://www.sevecom.org/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Sid75] Jeffrey B. Sidney. Decomposition Algorithms for Single-Machine Sequencing with Precedence Relations and Deferral Costs. *Operations Research*, 23(2):283–298, 1975.
- [Smi56] W. E. Smith. Various optimizers for single-stage production. *Naval Research Logistics Quarterly*, 3:59–66, 1956.
- [SRT] Stanford Racing Team. Stanford Racing Team. <http://cs.stanford.edu/group/roadrunner/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [SRT05] Stanford Racing Team. Stanford Racing Team’s Entry In The 2005 DARPA Grand Challenge. <http://archive.darpa.mil/grandchallenge05/TechPapers/Stanford.pdf>, 2005. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Sti02] Shaler Jr. Stidham. Analysis, Design and Control of Queueing Systems. *Operations Research*, 50(1):197–216, 2002.
- [Sti05] Christoph Stiller. *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, Kapitel Fahrerassistenzsysteme – Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr, Seiten 1–20. Springer, 2005.
- [Sza99] Nick Szabo. Micropayments and Mental Transaction Costs. In *2nd Berlin Workshop on Internet Economics*, 1999. <http://szabo.best.vwh.net/berlinmentalmicro.pdf>, Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Tan03] Andrew S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Pearson Education International, 4. Auflage, 2003.
- [THH00] Martin Treiber, Ansgar Hennecke und Dirk Helbing. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. *Physical Review*, E 62:1805–1824, August 2000.
- [TMKH05] Marc Torrent-Moreno, Moritz Killat und Hannes Hartenstein. The Challenges of Robust Inter-Vehicle Communications. *Vehicular Technology Conference, 2005, VTC-2005-Fall, 2005 IEEE 62nd*, 1:319–323, 2005.
- [Tol] Toll Collect GmbH. <http://www.toll-collect.de>, Letzter Zugriff: 28. April 2011.

- [Tra] Travolution. <http://www.travolution-ingolstadt.de/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Tre09] Martin Treiber. Visualizations with the TU Dresden 3d traffic simulator. <http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/movie3d/index.html>, 2009. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Tre11] Martin Treiber. Microsimulation of road traffic. <http://www.traffic-simulation.de/>, 2011. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [TSS] TSS – Transport Simulation Systems. Aimsun. <http://www.aimsun.com/>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [vAvDV06] Bart van Arem, Cornelia J. G. van Driel und Ruben Visser. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4):429–436, 2006.
- [VIC] VICS. Vehicle Information and Communication System. <http://www.vics.or.jp/english/vics/index.html>. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Vic61] William Vickrey. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *Journal of Finance*, 16(1):8–37, März 1961.
- [VNA00] P. Venhovens, K. Naab und B. Adiprasito. Stop and Go Cruise Control. *Journal of Automotive Technology*, 1(2):61–69, 2000.
- [Wal07] Thorsten Walz. *Konzeption und Implementierung eines dezentralen Kreuzungsmanagements mit Hilfe von Projektionen*. Studienarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Februar 2007.
- [War00] Nicholas J. Ward. Automation of task processes: An example of intelligent transportation systems. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10(4):395–408, 2000.
- [WAV10] Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE). http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp_update.htm, 2010. Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [WBS06] Henning Wallentowitz, Ahmed Benmimoun und Dirk Sandkühler. Automatische Fahrzeugführung, eine Technologie mit Zukunft? In GZVB [GZV06].
- [Wei99] Gerhard Weiß, Hrsg. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 1999.
- [Wie74] Rainer Wiedemann. Simulation des Straßenverkehrsflusses. *Schriftenreihe am Institut für Verkehrswesen, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH)*, Heft 8, 1974.
- [Woo02] Michael J. Wooldridge. *An Introduction to Multiagent Systems*. Wiley, 2002.

Literaturverzeichnis

- [XAHM05] Haifeng Xiao, Ravi Ambadipudi, John Hourdakis und Panos Michalopoulos. Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM. Bericht CTS 05-05, Center for Transportation Studies, University of Minnesota, Mai 2005. <http://www.cts.umn.edu/Publications/ResearchReports/pdfdownload.pl?id=596>, Letzter Zugriff: 28. April 2011.
- [Yue07] Jing Zhi Yue. *Robuste Verhandlungen zwischen verteilten, agentenbasierten Fahrerassistenzsystemen*. Diplomarbeit, IPD, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Juni 2007.