



Nr: 10

**M.Sc.
Maximilian Erhard Martin
Flormann
2022**

Kooperative Fahrstrategien für automatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr

Herausgegeben von:
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Kooperative Fahrstrategien für automatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Maximilian Erhard Martin Flormann
aus (Geburtsort): München

eingereicht am: 16.12.2021
mündliche Prüfung am: 13.04.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Henze
Prof. Dr. rer. nat. T. Deserno

Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 10

Maximilian Erhard Martin Flormann

**Kooperative Fahrstrategien für automatisierte
Fahrzeuge im Mischverkehr**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8609-6

ISSN 2700-046X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, dem Leiter des Instituts, für das entgegengebrachte Vertrauen sowie den zahlreichen fachlichen Austauschen und Anregungen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Henze danke ich nicht nur für seine Tätigkeit als Gutachter der Prüfungskommission, sondern in besonderer Weise für das entgegengebrachte Vertrauen, die Förderung sowie die vielen fachlichen und überfachlichen Gespräche. Ferner danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Deserno für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik für die vielseitige Unterstützung. Besonderer Dank gilt dabei den Kolleginnen und Kollegen aus der Werkstatt und den Kolleginnen aus dem Sekretariat. Für die individuellen Beiträge, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich den Kollegen Torben Hegerhorst, Marcel Kascha, Siegfried Scheiermann, Holger Znamiec und insbesondere Adrian Sonka und Thorsten Meister.

Mein Dank richtet sich auch an alle aus meinem familiären und privaten Umfeld für den Zuspruch und das Verständnis. Hierbei danke ich ganz besonders Matthias und meiner Schwester Apollonia für die Unterstützung und die Motivation. Abschließend gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Elisabeth und Reinhard dafür, dass ich mich immer auf sie verlassen konnte und sie mich seit meiner Kindheit stets unterstützt und gefördert haben.

Braunschweig, 27. April 2022

Maximilian Flormann

Kooperative Fahrstrategien für automatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr

Kurzfassung

Die Weiterentwicklung automatisierter Fahrzeuge in Bezug auf Funktionalität und Sicherheit hängt maßgeblich von der Vernetzung mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur über V2X-Kommunikation ab. Durch den Austausch von Informationen zwischen Verkehrsteilnehmern ermöglicht diese Technologie eine erweiterte Prädiktion und effizientere Verkehrssteuerung. In der vorliegenden Dissertation wird auf Basis dieser Technologie eine Methodik zu kooperativer Fahrt von automatisierten Fahrzeugen im Mischverkehr erarbeitet sowie in Simulation und Realversuch erprobt.

Einführend werden die notwendigen V2X-Kommunikationsschnittstellen beschrieben und entsprechend eines kooperativen Ansatzes erweitert. Anschließend werden die für den vorgestellten Modellierungsansatz notwendigen mathematischen Verfahren vorgestellt. Als zentrales Element der entwickelten Methodik werden verschiedene Modellierungsverfahren auf Basis der Graphen- und Spieltheorie entwickelt und bewertet. Mit den so erstellten Modellen ist eine universelle Repräsentation beliebiger Konfliktszenarien, unabhängig von geometrischen Bedingungen und der Anzahl der Verkehrsteilnehmer, als Kooperationsszenario möglich. Die so modellierten Szenarien werden als Optimierungsproblem formuliert. Diese Methodik ermöglicht die Lösung kooperativer Fahrtszenarien entweder als verteilter Algorithmus oder durch eine zentrale Steuerung. Zum Auffinden der optimalen Lösung werden verschiedene Heuristiken, sowohl aus den Bereichen der konventionellen Lösungsalgorithmen, als auch Ansätze der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens, verglichen. Zur Bewertung der Heuristiken in der Simulation wird das Verhalten aufgrund von verschiedenen Gütemaßen bei steigender Modellkomplexität betrachtet. Hierfür wird ein repräsentativer Szenarienkatalog verwendet. Abschließend wird das Kooperationsverfahren auf Basis der optimalen Kombination aus Modellierung und Lösungsverfahren in einem repräsentativen Realversuch validiert. In diesen Bewertungen zeigt sich, dass das vorgestellte Kooperationsverfahren in sehr kurzer Rechenzeit deutlich effizientere kooperative Fahrstrategien als konventionelle infrastrukturgesteuerte Ansätze ermöglicht und dabei garantiert konfliktfrei ist.

Strategies for Cooperative Driving of Automated Vehicles in Mixed Traffic

Abstract

The development of automated vehicles with regard to functionality and safety is highly relying on connectivity with other traffic participants and infrastructure via V2X-Communication. By exchanging information, the traffic participants are enabled to a better prediction and a more efficient traffic control. Based on this technology, a methodology for cooperative driving of automated vehicles in mixed traffic scenarios is presented and tested in simulation and reality.

Initially, the required V2X-Communication interfaces are described and extended with regard to a cooperative use. Furthermore, the mathematical methods for the introduced modelling are introduced. Different models based on graph- and game-theoretic approaches are being developed and detailed as a central element of the described methodology. The hereby created models are a universal representation of conflict scenarios, independent of geometric constraints or number of involved traffic participants. The modelled scenarios are reformulated as an optimisation problem. The presented methodology in this thesis is either useable as a distributed algorithm, or for centralised coordination. Different optimisation heuristics are being compared, ranging from traditional approaches to artificial intelligence and machine learning algorithms. The methods' behaviour with regard to increasing model complexities is evaluated based on a representative catalogue of scenarios. Finally, the cooperation methodology is validated in a real-world test scenario. These validations show that the introduced methodology provides significantly more efficient cooperation strategies compared to traditional, infrastructure controlled approaches. Additionally, the presented approach is conflict-free by design.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	III
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung und Ziel	1
1.2. Aufbau der Arbeit	2
2. Stand der Technik	5
2.1. Automatisiertes Fahren	5
2.2. V2X-Kommunikation	13
2.2.1. 802.11p: ETSI ITS G5	16
2.2.2. Erweiterung der ETSI ITS G5 Norm	20
2.2.3. Zellulare Mobilfunkdienste (4G, 5G)	21
2.3. Stand der Technik kooperativer Fahrmanöver	22
2.4. Identifizierter Forschungsbedarf und Einordnung der eigenen Arbeit	26
3. Grundlagen	29
3.1. Grundbegriffe der Algorithmik	29
3.2. Graphentheorie	31
3.2.1. Formale Beschreibung und Graphentypen	32
3.2.2. Adjazenzmatrix	35
3.2.3. Algorithmische Probleme der Graphentheorie	36
3.3. Spieltheorie	39
3.3.1. Spieltypen und Spieldarstellung	40
3.3.2. Spieltheoretische Probleme	42
3.3.3. Lösungskonzepte spieltheoretischer Modelle	44
3.4. Optimierungsprobleme	47
3.4.1. Algorithmische Lösung von Optimierungsproblemen . . .	48
3.4.2. Künstliche Intelligenz zur Lösung von Optimierungspro- blemen	52

3.5. Maschinelles Lernen	57
3.5.1. Grundbegriffe	58
3.5.2. Bestärkendes Lernen	61
4. Kooperatives Fahren durch V2X	65
4.1. Graphenbasierte Kooperation	65
4.2. Spieltheoretische Kooperation	69
4.3. Zielfunktion und Modellierung der Optimierung kooperativer Fahr- manöver	71
4.3.1. Fahrdynamische Betrachtung und Grenzwerte	71
4.3.2. Zielfunktion der Optimierung	75
4.4. Kooperationsverhandlung und -kommunikation	75
4.4.1. Cooperation and Conflict Message	77
5. Implementierung und Simulation der Kooperationsalgorithmen	81
5.1. Kooperationsszenarien	81
5.1.1. Kooperation automatisierter Fahrzeuge	82
5.1.2. Kooperation von Rettungs- und Einsatzfahrzeugen mit au- tomatisierten Fahrzeugen im Mischverkehr	84
5.2. Simulation kooperativer Fahrszenarien	85
6. Validierung im Realfahrzeug	93
6.1. Versuchsträger und Testszenario	93
6.2. Realversuch im Mischverkehr zwischen automatisierten- und Ein- satzfahrzeugen	96
7. Zusammenfassung und Ausblick	101
A. Anhang	115

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a	Beschleunigung	$[m/s^2]$
a_x, b_y	Aktionen	$[-]$
A	spieltheoretische Auszahlung	$[-]$
E_{xy}	Graphenkante	$[-]$
f	Frequenz	$[Hz]$
F_{xy}	resultierende Reifenkraft	$[N]$
F_{ZF}	Zentrifugalkraft	$[N]$
G	Graph	$[-]$
H	Hamiltonpfad	$[-]$
m	Fahrzeugmasse	$[kg]$
$\mathcal{O}$	Komplexitätsklasse	$[-]$
p	Optimum	$[-]$
p	Wahrscheinlichkeit	$[-]$
Q	Bewertungsfunktion	$[-]$
r	Zufallsvariable	$[-]$
$\mathcal{R}$	reelle Zahlen	$[-]$
S	Zustandsmenge	$[-]$
t	Zeit	$[s]$
v	Geschwindigkeit	$[m/s]$
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit	$[m/s]$
V_x	Graphenknoten	$[-]$
w	Steuerparameter	$[-]$
x	x-Koordinate	$[m]$
$\ddot{x}$	Längsbeschleunigung	$[m/s^2]$
y	y-Koordinate	$[m]$

$\ddot{y}$

Querbeschleunigung

 $[m/s^2]$

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
α	Steuerparameter	[-]
β	Steuerparameter	[-]
γ	Steuerparameter	[-]
ϵ	Fehler	[-]
ρ	Kurvenradius	$[m]$
ρ'	Schwundfaktor des Pheromonwerts des AA	[-]
τ	Pheromonwert des Ameisenalgorithmus	[-]

Indizes

Index	Bedeutung
1	linkes Vorderrad
2	rechtes Vorderrad
3	linkes Hinterrad
4	rechtes Hinterrad
argmax	Argument des Maximums
diff	Differenz
end	Endpunkt
Fzg	Fahrzeug
ges	gesamt
i	Zählervariable
max	Maximum
min	Minimum
start	Startpunkt
kmax	Kurvenmaximum
opt	optimal
soll	Sollverhalten

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AA	Ameisenalgorithmus
BF	Brute Force
CAN	Controller Area Network
CAM	Cooperative Awareness Messages
CCH	Control Channel
CCM	Cooperation and Conflict Message
CM	Cooperation Messages
C-V2X	Cellular Vehicle to X /Mobilfunk Fahrzeug zu X Kommunikation
DENM	Decentralized Environmental Notification Messages
DNN	Double Nearest Neighbour
DQL	Double-Q-Learning
DSRC	Dedicated Short Range Communication
dGPS	differential Global Positioning System
GB	Gigabyte
GO	Genetische Optimierung
GPS	Global Positioning System
ITS	Intelligent Transportation Systems
IVIM	Infrastructure to Vehicle Information Messages
KBP	Königsberger Brückenproblem
LO	Lineare Optimierung
LTE-A	Long-Term-Evolution-Advanced
MAPEM	Map Topology Extended Messages
MEP	Markow-Entscheidungsproblem
MFK	Multifunktionskamera
MRR	Mid Range Radar
NP	Nichtdeterministisch Polynomiell
PPO	Proximal Policy Optimization
PSO	Partikelschwarmoptimierung
SAE	Society of Automotive Engineers
SCH	Service Channel
SEF	Sondereinsatzfahrzeug
SON	Self Organizing Network

SPATEM	Signal Phase and Timing Extended Messages
VICS	Vehicle-Intersection Coordination Scheme
VRU	Vulnerable Road Users
V2X	Vehicle to X / Fahrzeug zu X Kommunikation
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

2.1. Automatisierungsstufen automatisierter Fahrsysteme (in Anlehnung an [Hen18] und [Lie17])	6
2.2. Funktionsarchitektur automatisierter Fahrzeuge (in Anlehnung an [Son19a; Son20; Reu20])	8
2.3. Der Versuchsträger TEASY III mit der durch die automatisierten Fahrfunktionen genutzten Sensorik	9
2.4. Laserscannerausstattung des Versuchsfahrzeuges Pluto. In der Front des Fahrzeugs sind außerdem ein Display und LED-Streifen als Mensch-Maschine-Interface (MMI) zu sehen.	11
2.5. Vernetzung und Hardware-Architektur aller Versuchsträger, wobei nicht jedes Fahrzeug über die vollständige Ausstattung verfügt. Die grundlegende Architektur ist hiervon allerdings nicht beeinflusst.	12
2.6. V2X-Kommunikation in einem Beispielszenario. Hier kommunizieren diverse (automatisierte) Fahrzeuge untereinander, mit vernetzten, intelligenten Gebäuden, der Verkehrsinfrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern, wie zum Beispiel Zugleitsysteme. .	13
2.7. Kommunikation zwischen dem automatisierten Versuchsfahrzeug TEASY III und einer intelligenten Kreuzung auf dem Braunschweiger Innenstadtring. Auf dem Bild ist die Anfahrt auf die Kreuzung zu sehen; In der unteren rechten Ecke erkennt man das HMI mit Informationen über den V2X-Empfang, den aktuellen Ampelstatus und die Entfernung zu der angepeilten Haltelinie. .	14
2.8. Kommunikation zwischen dem automatisierten Versuchsfahrzeug TEASY III und dem Forschungsparkhaus. TEASY III kommuniziert sein Parkvorhaben mit dem intelligenten Parkhaus, welches einen entsprechenden Parkplatz zuweist und die Schranke öffnet. .	15

2.9. [a] Darstellung des n-fach Multihopping. Die Botschaft wird 2-fach weitergeleitet. [b] Darstellung des Geocasting. Die Botschaft wird weitergeleitet, bis sie von einem Kommunikationsteilnehmer im Zielgebiet empfangen wird.	17
2.10. 802.11p Frequenzband in der ITS G5 Spezifikation. Da das G5A-Band exklusiv durch ITS-G5 genutzt wird, werden hierüber Dienste zur Verkehrssicherung kommuniziert. Auf dem G5B-Band findet eine parallele Nutzung mit Funkgeräten der Short-Range-Device (SRD) Klasse statt, weswegen dieses Band ausschließlich für Dienste zur Steigerung der Verkehrseffizienz genutzt wird. . .	18
2.11. Übersicht der MAPEM und SPATEM Inhalte in einer aus Laserscanner-Punktwolken erstellten Übersichtskarte der Forschungskreuzung in Braunschweig. Während in der MAPEM die geographischen Informationen relativ zu einem Bezugspunkt übermittelt werden, referenziert die SPATEM die Signalzustände der Lichtsignalanlagen auf diese Spurinformatoren.	19
3.1. Einfacher Graph mit zwei Knoten und einer Kante	32
3.2. Beispieldarstellungen zusammenhängender Graphen. Alle hier gezeigten Graphen weisen das höchste Maß an Zusammenhang auf, sie sind vollständig.	33
3.3. Einfacher gerichteter Graph mit zwei Knoten und einer Kante . .	33
3.4. Einfacher, vollständiger, gerichteter Graph	34
3.5. Baum mit 6 Knoten, wobei Knoten E_1 die Wurzel ist	34
3.6. Pfade und Kreise in einem einfachen Beispielgraphen (links). In der mittigen Darstellung ist ein Beispielpfad mit der Länge $ V_3 + V_4 $ zu sehen, während in dem rechten Graph ein Kreis der Länge $ V_3 + V_4 + V_5 $ markiert ist.	35
3.7. Graphische Darstellung des Königsberger Brückenproblems. Links zu sehen ist die zugrundeliegende Karte von Königsberg mit den drei Landstücken E_1 , E_2 , E_3 und E_4 . Diese sind über die Brücken V_i verbunden. Rechts ist der korrespondierende Graph zu sehen. Die Landflächen werden hierbei als Knoten und die Brücken als Kanten des Graphen repräsentiert.	37

3.8. Darstellung eines Hamiltonpfad in dem Graphen des KBP. (a) zeigt hier den Basisgraphen mit allen Kanten und Knoten. In (b) ist die Kantenreihenfolge zum Durchlaufen eines Hamiltonpfad markiert.	38
3.9. Spiel aus Tabelle 3.3 in Extensivform und Baumdarstellung . . .	41
3.10. 2-Spieler-Problem mit pareto-optimalen Lösungen. Der Gesamtlösungsraum aller Auszahlungen $A(a_1, a_2)$ ist grau dargestellt. Die schwarze Linie bildet die Menge aller pareto-optimalen Auszahlungen.	46
3.11. Beispielhafte Darstellung eines Optimierungsproblems mit einem globalen Minimum a und zwei lokalen Minima b und c	47
3.12. [a] zeigt die graphische Repräsentation von 3.10, [b] zeigt den daraus durch Tiefensuche resultierenden Suchraum als Baumstruktur.	49
3.13. Geometrische Darstellung eines linearen Optimierungsproblems mit dem durch die lineare Zielfunktion und den linearen Randbedingungen definierten Lösungsraum. Die Schnittebene $cx = 0$ wird im Falle dieses Minimierungsproblems von rechts nach links geschoben, um das markierte Optimum zu finden.	51
3.14. Suche eines kürzesten Wegs mittels Nearest-Neighbour Algorithmen. [a] zeigt das zugrundeliegende Graphenproblem. In [b] wird die Lösung mittels Nearest-Neighbour Heuristik der Lösung in [c] mittels Double Nearest-Neighbour Heuristik gegenübergestellt.	52
3.15. Beispielhafter Ablauf der Partikelschwarmoptimierung entsprechend Algorithmus 3	56
3.16. Gegenüberstellung der Struktur konventioneller Algorithmen (auch der künstlichen Intelligenz) mit dem maschinellen Lernen. Die Iterationsschleife zur Anpassung der deterministischen Programmierung anhand des bereits bekannten Wissens stellt den Prozess des Lernens dar.	57
3.17. Unteranpassung, Überanpassung und die ausgeglichene Generalisierung am Beispiel eines Regressionsproblems.	59

3.18. Schematischer Ablauf der Iteration des bestärkenden Lernens. Der Agent erlernt das Systemverhalten durch Variation seiner Aktionen A_t . Auf Basis der Systemzustände S_t und der Auszahlung R_t berechnet sich der Algorithmus sein Wissen als die beim Q-Learning namensgebende Q-Werte.	63
4.1. Graphentheoretische Modellierung eines Kreuzungsszenarios mit vier Verkehrsteilnehmern.	67
4.2. Vereinfachtes Kreuzungsszenario mit Modellierung der Kantengewichte.	67
4.3. Kreisverkehrsszenario auf Basis des Kreisverkehrs Hermann-Blenk-Straße in Braunschweig. Die Kantengewichte finden sich in Tabelle 4.1	68
4.4. Spurwechselszenario mit formaler Beschreibung der Kantengewichte.	69
4.5. Kinematische Größen der gleichmäßig verzögerten Bewegung . .	72
4.6. Kinematische Größen der gleichmäßig beschleunigten Bewegung .	72
4.7. Fahrzeug in der Draufsicht mit den Reifenseitenkräften F_{y1} bis F_{y4} und der Zentrifugalkraft F_{ZF} . [Küc19]	74
4.8. Beispielhafte Darstellung der übertragenen Trajektorien zweier Kommunikationsteilnehmer. Die geplante Trajektorie wird hierbei jeweils durch eine doppelt verkettete Liste als Folge von Koordinatenpunkten übertragen.	78
4.9. Beispielhafte Darstellung einer Konfliktkette, wobei der dunkelgraue Pfad die aktuell gültige, längere Kette und der hellgraue Pfad eine Modifikation durch einen Verkehrsteilnehmer, welche aufgrund von Unvollständigkeit fallen gelassen wird, darstellt. . .	79
5.1. Übersicht der Kreuzungsgeometrie des Basis-Simulationsszenarios	82
5.2. Graph des Kooperationsszenarios mit drei Verkehrsteilnehmern. Links ist die Übersicht des Szenarios mit den sich schneidenden Trajektorien dargestellt. Rechts sind der korrespondierende Graph und die Adjazenzmatrix dargestellt.	83
5.3. Automatisch berechneter Graph aus einem Szenario mit 10 Fahrzeugen. Die Konfliktgruppe umfasst hierbei alle 10 Fahrzeuge gleichzeitig.	84

5.4.	Berechnung einer Kooperationsstrategie mit Priorisierung. Im Gesamtgraphen [a] wird zunächst ein Subgraph genutzt, welcher die zu priorisierenden Verkehrsteilnehmer enthält. In diesem Subgraph [b] wird eine optimale Fahrtreihenfolge gefunden. Diese Teilreihenfolge wird in [c] durch die Restreihenfolge der übrigen Teilnehmer im Gesamtgraphen vervollständigt.	85
5.5.	Berechnungsdauer der verschiedenen Optimierungsalgorithmen in Bezug auf die Modellkomplexität. Ab einer Anzahl von mehr als 12 Fahrzeugen ist das Problem nicht mehr durch Brute Force berechenbar.	89
5.6.	Verfahrensfehler der verglichenen Algorithmen. Als exakte Lösung wird das mittels Brute Force ermittelte Optimum betrachtet. . .	90
5.7.	Verfahrensfehler mit Standardabweichung der als geeignet identifizierten Optimierungsheuristiken über 100 Iterationen.	91
6.1.	Satellitenübersicht des Verkehrsübungsplatzes	93
6.2.	Übersicht der genutzten T-Kreuzung mit möglichen Trajektorien und daraus resultierenden Konfliktbereichen.	94
6.3.	Simulative Darstellung des real umgesetzten Szenarios mit Darstellung der individuellen Trajektorien. Fahrzeug 1 ist dabei TEASY III, Fahrzeug 2 PLUTO und Fahrzeug 3 das Sondereinsatzfahrzeug. 95	95
6.4.	Graph des realen Konfliktszenarios. Die Kantengewichte V_{12} bis V_{32} ergeben sich aus der Adjazenzmatrix 6.1.	95
6.5.	Zeitverläufe des Kooperationsszenarios vor und nach Anpassung durch die optimierte Fahrtreihenfolge.	97
6.6.	Reales Fahrscenario aus Sicht des Versuchsträgers TEASY III vor Eintritt des ersten Fahrzeugs in den Konfliktbereich.	98
6.7.	Reales Fahrscenario aus Sicht des Versuchsträgers TEASY III vor Eintritt in den Konfliktbereich nach Freigabe durch das zweite Fahrzeug.	98
A.1.	Verfahrensfehler mit Standardabweichung aller Optimierungsheuristiken über 100 Iterationen.	115
A.2.	Ansicht der Simulationsumgebung zur automatischen Erstellung der Graphen	116
A.3.	Ansicht der Simulationsumgebung zur Szenarienerstellung	116

A.4. Rettungsmobilitäts-App in Ansicht 1	117
A.5. Rettungsmobilitäts-App in Ansicht 2	117

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich der unterschiedlichen Sensor- und Messtechnikausstattungen der verschiedenen Versuchsträger	10
3.1. Komplexitätsklassen in O-Notation in aufsteigender Komplexität mit Beispiialgorithmen nach [Ern20].	30
3.2. Adjazenzmatrix des Graphen 3.6	35
3.3. Repräsentation eines Spiels mit zwei Teilnehmern in Normalform	40
3.4. Gefangenendilemma in Normalform	43
3.5. Feiglingsspiel in Normalform mit den Auszahlungen Kompromiss, Sieg, Niederlage und Zerstörung.	43
3.6. Hirschjagdmodell in Normalform	44
3.7. Feiglingsspiel in Normalform, die pareto-optimalen Auszahlungen bzw. Strategiekombinationen sind markiert.	46
3.8. Vergleich der notwendigen Berechnungsschritte zwischen Brute Force und Backtrack für einen durchschnittlichen Knotengrad 3 des zugrundeliegenden Graphen.	50
4.1. Adjazenzmatrix des Graphen aus Abbildung 4.3	68
4.2. Spieltheoretische Modellierung der Kooperation zweier Fahrzeuge	70
4.3. Auszug der aus CAM-Botschaften verfügbaren statischen Fahrzeuginformationen nach [ETS11]	76
4.4. Auszug der aus CAM-Botschaften verfügbaren dynamischen Fahrzeuginformationen	77
4.5. Definition der feingranularen Fahrmanöver im Rahmen derer eine Kooperation stattfinden kann.	78
5.1. Rechenzeit der einzelnen Lösungsverfahren in Sekunden in Abhängigkeit von der Modellkomplexität	88