

**Ein dezentrales  
Parkrauminformationssystem  
auf Basis der  
Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation  
Konzept, Realisierung und Evaluation**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von  
Murat Caliskan  
aus Kassel

November 2008

Aus dem Institut für Informatik  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gedruckt mit der Genehmigung der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. Martin Mauve, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Koreferent: Prof. Dr. Stefan Conrad, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Tag der mündlichen Prüfung: 08.12.2008



## Danksagung

Jeder Weg beginnt mit dem ersten Schritt. So habe auch ich mir nach meinem Studium die Frage gestellt, welches Ziel am Ende meines Weges stehen soll. Dem Wunsch nach anwendungsorientierter Forschung folgte die Aufnahme in die Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg. Allen voran möchte ich mich daher bei der Volkswagen AG bedanken. Durch das Doktorandenprogramm gab sie mir die Möglichkeit, dezidiert drei Jahre lang an dem Zukunftsthema der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu forschen und meine Ergebnisse internationalem Fachpublikum vorzustellen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Martin Mauve, der mich vor allem in der Anfangsphase meiner Forschungsarbeit unermüdlich unterstützt hat. In unseren zahlreichen Diskussionen hat er meine Sichtweise auf anwendungsorientierte Forschung geprägt. Prof. Dr. Stefan Conrad danke ich für die Übernahme des Koreferats. Jun.-Prof. Dr. Björn Scheuermann, Dr. Wolfgang Kiess, Christian Lochert und Christian Wewetzer danke ich für die vielen inhaltlich sehr wertvollen Diskussionen und die gemeinsam durchgeführten Forschungsarbeiten.

Meinem Vorgesetzten Dr. Bernd Rech danke ich für die immer freundschaftliche und offene Arbeitsatmosphäre. An meinen Mentor Dr. Andreas Lübke gilt großer Dank. Meinen Freunden Amer Aijaz und Ufuk Kefali danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit. Meinen Kollegen aus der Konzernforschung, die hier nicht namentlich aufgezählt sind, danke ich dafür, dass sich das tägliche Arbeiten durch Menschlichkeit, Humor und Professionalität auszeichnet.

Diese Arbeit wäre nicht entstanden, wenn meine ehemaligen Diplomanden nicht wären. Ich möchte Niels Wooschot, René Mosselman, Vinay Mathew und ganz besonders Daniel Graupner und Andreas Barthels für die geleistete exzellente Arbeit danken.

Meinen Geschwistern möchte ich für die stetige Unterstützung danken. Meinen Eltern, die vor Jahren beschlossen haben, dass aus uns mehr werden soll als nur Gastarbeiter, bin ich zu tiefstem Dank verpflichtet. Abschließend möchte ich noch Fatma danken. Sie ist eine wunderbare Person.

---

## Kurzfassung

Die Bewältigung von für den Fahrer immer komplexer und unbeherrschbarer werdenden Verkehrssituationen stellen eine große Herausforderung für den Verkehr der Zukunft dar. Infrastrukturseitige Verkehrsmanagementsysteme und bordautonome Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz sind weitestgehend eingeführt. Fortschritte in Funktechnologien der letzten Jahre zeigen immer hochwertigere Möglichkeiten der Kommunikation mit robusteren Verfahren und steigenden Bandbreiten auf. Durch den intelligenten Einsatz von Funktechnologien im Fahrzeug und in der Infrastruktur bietet sich die Chance die Verkehrssicherheit und die Verkehrseffizienz noch weiter zu erhöhen. Speziell die Funktechnologie IEEE 802.11 Wireless-Local Area Networks (WLAN) erfährt in der Automobilindustrie eine immer größer werdende Bedeutung, so dass auf ihrer Basis Fahrerassistenzfunktionen der nächsten Generation möglich sind.

In dieser Arbeit wird ein auf WLAN-basierendes dezentrales Parkrauminformationssystem zur Reduzierung des Parksuchverkehrs präsentiert. Dieser macht Studien zufolge zu Stoßzeiten bis zu 70% des innerstädtischen Verkehrs aus [Sho06] und stellt ein bisher ungelöstes innerstädtisches Verkehrsproblem dar. Das vorgestellte dezentrale Parkrauminformationssystem informiert den Fahrer über freie Parkplätze am Straßenrand und verhilft Fahrzeugen Bereiche mit hoher Parkwahrscheinlichkeit, auch in nicht einsehbaren Nebenstraßen, frühzeitig zu identifizieren und gezielt anzufahren. Das System wird den vorgegebenen technischen Randbedingungen des eingesetzten Funkmediums WLAN hinsichtlich beschränkter Bandbreite und Kommunikationsreichweite gerecht. Die effiziente Auslastung des Funkkanals erfolgt durch die gebietsweise Aggregation der Belegungsinformation und einer Verteilungsstrategie, über die sich die räumliche Verbreitung von aggregierter und einzelner Parkrauminformation einstellen lässt. Durch die erreichte sehr geringe Netzlast ist es möglich das Parkrauminformationssystem auch bei 100%-Ausstattungsrate zu betreiben. Trotz der für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze typischen Eigenschaft der latenzbehafteten Informationsverbreitung über weite Distanzen, welche durch nicht vorhersehbare Mobilitätsmuster einzelner Fahrzeuge entstehen, erfüllt das System die Anforderungen von Parkplatz-suchenden Fahrzeugen hinsichtlich Aktualität und Zuverlässigkeit von zeitlich instabiler Belegungsinformation. Der zur Aktualisierung der Parkrauminformation erarbeitete Ansatz nutzt ein auf Markov-Ketten basierendes mathematisches Modell, um die Parkplatzzustände am Straßenrand zum individuellen Ankunftszeitpunkt zu prognostizieren. Ein weiterer Aspekt des Systems ist die ökonomische Realisierbarkeit, denen Betreiber von Parkeinrichtungen und Fahrzeughersteller bei

einer Einführung gegenüberstehen. Der Realisierungsaufwand für potentielle Betreiber ist gering. Lediglich existierende Parkautomaten müssen um ein Funkmodul erweitert und Softwareanpassungen durchgeführt werden. Fahrzeughersteller können ihren Kunden bei sehr geringen Ausstattungsraten Mehrwert bieten. Bei bereits 5%-Ausstattungsrate ist das System produktiv und bietet den Fahrzeugen Information über freie Parkplätze. Weil die Information von Fahrzeug-zu-Fahrzeug übertragen wird, steigt die Effektivität des Systems mit steigender Anzahl von ausgestatteten Fahrzeugen.

Das System ermöglicht die Übertragung von Information über freie Parkplätze am Straßenrand und ist damit eine Ergänzung zu existierenden, an Parkhäusern angeschlossenen, Parkleitsystemen.

## Schlagwörter

Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, IEEE 802.11, Wireless-Local Area Networks, Markov-Ketten, Fahrzeug-Fahrzeug-Netze, mobile Ad-Hoc-Netze, Simulatorenkopplung, Parksuchverkehr, Informationsverbreitung

## Abstract

The traffic situation is becoming more and more complex and uncontrollable for the driver, which poses a great challenge for future mobility. In order to improve road safety and traffic efficiency, infrastructure side traffic management and control systems as well as on-board autonomous driver assistance systems have been deployed extensively. Advancements in wireless technologies during the past few years, such as robust and high bandwidth channel performance, have disclosed new possibilities through communication. Intelligent application of wireless technologies in vehicles and infrastructure offers the chance to further improve traffic efficiency and road safety. The automotive industry is currently evaluating next generation driver assistance applications based on the wireless communication standard IEEE 802.11 (also known as Wireless-Local Area Network or WLAN).

This work presents a WLAN-based decentralised Parking Area Information System for reducing parking related traffic on the road. According to relevant studies, as much as 70% [Sho06] of inner-city traffic is searching for parking spaces, which represents an unresolved inner-city traffic problem. The decentralised Parking Area Information System presented here, informs the driver about available parking spaces along the road-side through early detection of spaces with maximum parking possibility even those hidden in side-streets, and guiding the car directly to such available spaces. This system is designed to overcome the technical limitations of the underlying wireless link technology (WLAN), with respect to bandwidth and communication range. Hence an area-based aggregation and distribution strategy is employed, which enables efficient usage of the wireless channel and makes it possible to adjust the spatial distribution of aggregated and individual parking space information. Therefore operation of the system over a single wireless medium is possible, even at penetration rates of 100%. Despite latency issues in information distribution within car-to-car networks, the system provides current and dependable parking information to the driver. The concept employs markov-chains for predicting occupancy status of parking spaces at individual time of arrival, thereby helping the driver to choose the most attractive one. A further aspect of the system is its economical feasibility for both the parking space operators and vehicle manufacturers. The cost for potential operators is low since existing parking meters could easily be extended with a wireless communication module and supporting software upgrades. The vehicle manufacturers could provide their customers with added value even at very low market penetration rates. Even at penetration rates as low as 5%, the system is productive and offers the vehicles information regarding vacant parking spaces. Since information is communicated from car to car, the effectivity

of the system increases as more cars are equipped.

The system makes it possible to distribute information about vacant parking spaces at the roadside and is therefore an extension to existing parking guidance systems already installed in parking garages.

## Keywords

Car-to-car communication, IEEE 802.11, Wireless-Local Area Networks, Markov-Chains, Vehicular Ad-Hoc Networks, mobile Ad-Hoc Networks, Simulator inter-linking, parking search traffic, Information dissemination

Veröffentlichungen über den Inhalt dieser Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung, Anforderungen und Annahmen . . . . .	3
1.3. Wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	3
1.4. Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1. Globale Betrachtung . . . . .	6
2.1.1. Europa . . . . .	6
2.1.2. Japan . . . . .	9
2.1.3. USA . . . . .	11
2.2. Relevante Forschungsprojekte . . . . .	12
2.2.1. Verkehrsmanagement . . . . .	12
2.2.2. Parkraummanagement . . . . .	15
2.3. Relevante Veröffentlichungen . . . . .	16
2.3.1. Verkehrsmanagement . . . . .	17
2.3.2. Parkraummanagement . . . . .	17
2.3.3. Mobile Ad-Hoc-Netze . . . . .	19
2.4. Möglichkeiten der Markteinführung . . . . .	23
<b>3. Informationsverbreitung</b>	<b>25</b>
3.1. Problembeschreibung . . . . .	25
3.2. Funktionsweise . . . . .	25
3.3. Konzept der Informationsverbreitung . . . . .	28
3.4. Beschreibung des Modells . . . . .	29
3.4.1. Informationserzeuger: Infrastruktur und Fahrzeuge . . . . .	29
3.4.2. Virtuelles Topologieunabhängiges Gitternetz . . . . .	29
3.5. Ressourcen . . . . .	31
3.5.1. Atomare Information . . . . .	32
3.5.2. Aggregierte Information . . . . .	32

3.5.3. Vorgehen bei der Erzeugung von Aggregaten . . . . .	32
3.6. Verteilungsstrategie für Atome und Aggregate . . . . .	33
3.7. Datenstrukturen für Atome und Aggregate . . . . .	35
3.8. Broadcast-Intervall . . . . .	37
3.8.1. Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen und Parkautomaten . . . . .	38
3.8.2. Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen . . . . .	38
3.9. Reaktive vs. Proaktive Verfahren . . . . .	39
3.10. Zusammenfassung . . . . .	41
<b>4. Prognose</b>	<b>43</b>
4.1. Problembeschreibung . . . . .	43
4.2. Prognosemethodik . . . . .	43
4.3. Mathematische Grundlagen . . . . .	45
4.3.1. Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	45
4.3.2. Warteschlangentheorie . . . . .	46
4.3.3. Markov-Ketten . . . . .	47
4.4. Modellierung der Ressourcen . . . . .	50
4.4.1. Prognose für Atome . . . . .	50
4.4.2. Prognose für Aggregate . . . . .	51
4.5. Berechnung der Prognose . . . . .	54
4.6. Zusammenfassung . . . . .	55
<b>5. Simulationsmodell</b>	<b>57</b>
5.1. Simulationsumgebung . . . . .	58
5.1.1. Netzwerksimulation . . . . .	58
5.1.2. Vissim . . . . .	60
5.1.3. Future-Navigation . . . . .	61
5.2. Die Kopplung zwischen ns-2 und Vissim . . . . .	61
5.3. Braunschweiger Verkehrsmodell . . . . .	63
5.3.1. Anzahl Fahrzeuge . . . . .	63
5.3.2. Anzahl Aggregate . . . . .	64
5.3.3. Geschwindigkeitsverteilungen . . . . .	65
5.3.4. Konnektivität . . . . .	66
5.4. Modellierung der Parkautomaten . . . . .	67
5.4.1. Parkautomaten auf Vissim-Seite . . . . .	67
5.4.2. Parkautomaten auf ns-2 Seite . . . . .	68
5.4.3. Diskussion der Modellparameter . . . . .	71

---

<b>6. Evaluierung der Informationsverbreitung</b>	<b>77</b>
6.1. Anforderungen, Durchführung und Ziel	77
6.1.1. Anforderungen	77
6.1.2. Durchführung	78
6.1.3. Ziel	78
6.2. Beschreibung der Kenngrößen	78
6.2.1. Informationsqualität	79
6.2.2. Netzlast	80
6.3. Durchführung und Auswertung	81
6.3.1. Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI)	81
6.3.2. Untersuchungen zur Variante mit atomarer Verteilung	87
6.3.3. Untersuchungen zur Variante mit aggregierter Verteilung	97
6.3.4. Netzlast	105
6.4. Zusammenfassung	106
<b>7. Evaluierung der Prognosemethodik</b>	<b>109</b>
7.1. Ermittlung der Prognosezeiten	109
7.1.1. Restfahrzeiten der Fahrzeuge	109
7.1.2. Durchschnittliches Informationsalter	110
7.1.3. Festlegung des Prognoseintervalls	110
7.2. Durchführung und Ergebnisse	111
7.2.1. Atomare Information	111
7.2.2. Aggregierte Information	113
7.3. Zusammenfassung	115
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
<b>A. Ergänzende Information</b>	<b>121</b>
<b>B. Vissim Screenshots</b>	<b>129</b>
<b>C. Veröffentlichungen</b>	<b>131</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>146</b>



# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Weltweite Situation der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation . . . . .	7
2.2.	Architektur der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation . . . . .	8
2.3.	Frequenzspektrum in Europa und den USA . . . . .	9
2.4.	Parkrauminformation im VICS-System (Japan) . . . . .	10
3.1.	Aufteilung des Stadtgebiets mittels Quad-Tree Struktur . . . . .	26
3.2.	2-Dimensionale Darstellung des Gitternetzes . . . . .	30
3.3.	Beispiel Quad-Tree . . . . .	31
3.4.	Nutzenmaximale Informationsverbreitung aus Fahrersicht . . . . .	35
3.5.	Paketformat im dezentralen Parkrauminformationssystem . . . . .	36
3.6.	Proaktive Informationsverbreitung . . . . .	39
4.1.	Darstellung der Prognosemethodik . . . . .	44
4.2.	Zustände und Übergangswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette . . . . .	51
5.1.	Simulationsumgebung für das dezentrale Parkrauminformationssystem . . . . .	59
5.2.	Zustandsdiagramm der ns-2 Knoten . . . . .	62
5.3.	Anzahl der Fahrzeuge . . . . .	64
5.4.	Geschwindigkeitsverteilungen . . . . .	65
5.5.	Konnektivität in Braunschweig bei 20%-Ausstattungsrate . . . . .	67
5.6.	Standorte der Parkplätze in Braunschweig . . . . .	68
5.7.	Belegungssimulation mit unterschiedlichen $N_{ref}$ -Werten . . . . .	73
5.8.	Belegungssimulation mit unterschiedlichen $\sigma_{rel}$ -Werten . . . . .	74
5.9.	Belegungssimulation mit unterschiedlichen $\gamma$ -Werten . . . . .	76
6.1.	FBI-Messung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	83
6.2.	FBI-Messung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	83
6.3.	FBI-Messung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	83
6.4.	AIF- und ADR-Messung bei 1%-Ausstattungsrate . . . . .	89
6.5.	AIF- und ADR-Messung bei 3%-Ausstattungsrate . . . . .	89
6.6.	AIF- und ADR-Messung bei 5%-Ausstattungsrate . . . . .	89

6.7. AIF- und ADR-Messung bei 8%-Ausstattungsrate . . . . .	91
6.8. AIF- und ADR-Messung bei 10%-Ausstattungsrate . . . . .	91
6.9. AIF- und ADR-Messung bei 20%-Ausstattungsrate . . . . .	91
6.10. Entfernungsabhängiges Alter der Parkrauminformation . . . . .	92
6.11. ARE-Messung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	93
6.12. ARE-Messung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	93
6.13. ARE-Messung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	93
6.14. Redundanzgrad empfangener Atome . . . . .	96
6.15. ADRA-Messung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	98
6.16. ADRA-Messung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	98
6.17. ADRA-Messung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	98
6.18. AREA-Messung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	100
6.19. AREA-Messung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	100
6.20. AREA-Messung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	100
6.21. GLE-Messung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	102
6.22. GLE-Messung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	102
6.23. GLE-Messung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	102
6.24. Redundanzgrad empfangener Aggregate . . . . .	105
7.1. Atomare Prognose . . . . .	112
7.2. Aggregat (28, 27, 0) . . . . .	114
7.3. Aggregate (16, 15, 1) und (8, 7, 2) . . . . .	114
7.4. Aggregate (5, 4, 3) und (2, 2, 4) . . . . .	115
7.5. Aggregate (1, 1, 5) und (1, 1, 6) . . . . .	115
A.1. Exemplarischer Verlauf von Parkhausbelegungen in Braunschweig . . . . .	123
A.2. Farbliche Darstellung von Level-0 bis Level-6 Zellen in Braunschweig . . . . .	124
A.3. Konnektivität in Braunschweig bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate . . . . .	125
A.4. Konnektivität in Braunschweig bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate . . . . .	126
A.5. Konnektivität in Braunschweig bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate . . . . .	127
B.1. Visualisierung der Parkautomaten um die Kreuzung Auguststrasse . . . . .	129
B.2. Färbung WLAN-fähiger Fahrzeuge und Hindernisdarstellung . . . . .	129
B.3. Visualisierung der Quad-Tree Struktur auf Level-1 Ebene . . . . .	130
B.4. Parkplätze entlang des Grids auf Level-0 Ebene . . . . .	130

# Tabellenverzeichnis

2.1. Erreichung von Ausstattungsraten nach Markteinführung . . . . .	23
5.1. ns-2 Parameter des simulierten WLAN-Protokollstapels . . . . .	60
5.2. Anzahl vorhandener Aggregate im Braunschweiger Modell . . . . .	65
5.3. Genutzte Parameter zur Belegungssimulation . . . . .	69
6.1. Zusammenhang: FBI-Wert, Informationsalter, Redundanzgrad und Netzlast . . . . .	82
6.2. Simulationsparameter zur Ermittlung von FBI-Werten . . . . .	84
6.3. Festgelegte Werte für das Fahrzeug-Broadcast-Intervall . . . . .	87
6.4. Durchschnittliches Alter der Atome . . . . .	92
6.5. Verbreitung von Parkrauminformation jünger als 300 Sekunden . . . . .	95
6.6. Durchschnittliches Alter der Atome und Aggregate (Sek.) . . . . .	99
6.7. Mittlerer Informationsgehalt der Aggregate . . . . .	104
6.8. Kriterien zur Messung der Netzlast . . . . .	105
6.9. Bandbreitenbedarf der Parkautomaten . . . . .	106
6.10. Bandbreitenbedarf der atomaren Variante . . . . .	107
6.11. Bandbreitenbedarf der Variante mit Aggregation . . . . .	108
6.12. Vergleich der erzeugten Netzlast: atomare Verbreitung vs. Aggregation . . . . .	108
7.1. Restfahrzeiten der Fahrzeuge im Braunschweiger Modell . . . . .	110
7.2. Prognoseintervalle für Atome . . . . .	111
7.3. Prognoseintervalle für Aggregate . . . . .	113
A.1. ID, Name, Kapazität und Parkdauer für Parkplätze in Braunschweig . . . . .	121
A.2. ID, Name, Kapazität und Parkdauer für Parkplätze in Braunschweig . . . . .	122
C.1. Schutzrechanmeldungen . . . . .	131
C.2. Konferenzbeiträge . . . . .	132



# Abkürzungsverzeichnis

$\lambda$	Ankunftsrate
$\mu$	Parkrate
$\rho$	Ausstattungsrate
$\mathcal{C}_{\hat{p}}$	Kapazität der Parkfläche $\hat{p}$
$\mathcal{O}_{\hat{p}}(t)$	Belegung der Parkfläche $\hat{p}$ zum Zeitpunkt $t$
ADR	Alter der Ressourcen
ADRA	Alter der Ressourcen für Aggregate
AIF	Anteil Informierter Fahrzeuge
ARE	Alter der Ressourcen über die Entfernung
AREA	Alter der Ressourcen über die Entfernung für Aggregate
BHR	Broadcast-Hit-Ratio
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ETC	Electronic Toll Collect
FBI	Fahrzeug-Broadcast-Intervall
GLE	Granularität empfangener Information über die Entfernung
MANET	Mobiles Ad-Hoc-Netz
MIA	Mittlerer Informationsgehalt
MTU	Maximum Transfer Unit
OBU	On Board Unit
PBI	Parkautomat-Broadcast-Intervall
$t_{br}$	Sendezeitpunkt für Parkrauminformation
$t_{ia}$	Alter vorhandener Parkrauminformation
$t_{pr}$	Prognoseintervall
$t_{rfz}$	Restfahrzeit zum Zielparkplatz
RSU	Road Side Unit
VICS	Vehicle Information and Communication System
WLAN	Wireless-LAN



# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Fortschritte in Kommunikationstechnologien der letzten Jahre ermöglichen die Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzfunktionen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz. Getrieben durch die Verbreitung des Funkstandards IEEE 802.11 Wireless-Local Area Networks (WLAN) und dessen Weiterentwicklungen führt die Automobilindustrie in den letzten Jahren verstärkt Forschungsarbeiten im Bereich der WLAN-basierten Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation auf nationaler und internationaler Ebene durch [C2C]. Die adressierten Fragestellungen für Einsatzmöglichkeiten von WLAN im automobilen Umfeld sind sehr vielfältig und erstrecken sich von der Entwicklung von Nachrichtenübertragungsverfahren und -protokollen, über Aspekte der Kommunikationssicherheit bis hin zu konkreten Anwendungen und deren Erprobungen im Feld. Als zentrale Anwendungsfelder der Forschung werden die Bereiche Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz und Anwendungen zur Steigerung des Fahrkomforts betrachtet.

Der permanent steigende Anspruch an die Mobilität in der heutigen Gesellschaft führt zu immer mehr Fahrzeugen auf den Straßen. Angesichts dieser steigenden Verkehrslast wird der Straßenverkehr vor immer größere Herausforderungen gestellt. Vor allem das Thema Verkehrseffizienz gewinnt immer mehr an Bedeutung. So sind der Aufbau von Infrastruktur für Verkehr, Energie und elektronische Kommunikation sowie die intelligente Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien Schlüsselbereiche zur Erreichung der im März 2000 EU-weit verabschiedeten Ziele der Lissabon-Agenda [EU]. Diese sieht unter anderem die Erhöhung der Verkehrseffizienz, der Verkehrssicherheit und die damit verbundene Reduktion der durch den Straßenverkehr verursachten Umweltmissionen vor. Als eines der akuten und bisher unzureichend gelösten Verkehrsprobleme in innerstädtischen Bereichen gilt die Suche nach freien Parkplätzen am Straßenrand. Eine in [Para] veröffentlichte Studie schätzt den durch Parksuchverkehr verursachten betriebs- und volkswirtschaftlichen Schaden für Deutschland auf mehrere hundert Millionen Euro pro Jahr. Laut dieser Studie fahren Autofahrer in Schwabing täglich rund 80.000 Kilometer, nur,

um einen Parkplatz zu finden. Der Anteil des Parksuchverkehrs zum Gesamtverkehr liegt hier bei 44%, d.h. jedes zweite Fahrzeug in Schwabing sucht einen freien Parkplatz. Damit kostet der Parksuchverkehr die Autofahrer in Schwabing insgesamt etwa 20 Mio. Euro jährlich. Bei der Suche werden etwa 3 Mio. Liter Treibstoff verfahren. Hinzu kommen Schadstoff- und Lärmemissionen, welche die Umwelt belasten. Jeder Autofahrer, der in Schwabing einen Parkplatz sucht, es wird von etwa 100.000 Personen pro Tag ausgegangen, fährt im Durchschnitt 0,8 km weit, bis er Erfolg hat. Steigende Zulassungszahlen lassen befürchten, dass das Ausmaß dieses Problems in Zukunft zunehmen wird.

In [Sho06] wird ausgehend von Untersuchungen für Städte in den USA, die Suchdauer für einen freien Parkplatz auf 4 bis 14 Minuten geschätzt. Laut dieser Studie beträgt der Anteil des innerstädtischen Parksuchverkehrs zum Gesamtverkehr zu Stoßzeiten über 70%.

Eine Befragung des Instituts für Ingenieurspsychologie an der Humboldt-Universität in Berlin im Rahmen des Projekts „Vernetztes Fahren“ [HUB06] bestätigt ebenfalls das Problem. Fahrer wünschen sich zur Steigerung des Fahrkomforts aktuelle Information über freie Stellflächen am Straßenrand [Wan].

Zahlreiche Maßnahmen, mit denen versucht wird, den Parksuchverkehr zu reduzieren, existieren bereits [SM]. Hierzu zählen:

- Beschränkung der Parkhöchstdauer: Auf diese Weise wird ein höherer Umschlag pro Parkplatz erzielt. So können Parkwünsche verschiedener Interessengruppen erfüllt werden. Kurzparkwillige wie Einkäufer, Besucher oder Lieferanten können mit diesen Beschränkungen gut umgehen. Allerdings eignen sich diese Beschränkungen weniger für Berufspendler.
- Anwohnergaragen: Der Bau privater Anwohnergaragen mildert nur anteilig die Parksituation in Straßen mit hohem Parkdruck. Hier besteht meist das Problem, dass Einfahrten für Gemeinschaftsgaragen von den Anwohnern abgelehnt werden. Als weitere Faktoren werden die nicht ausreichend zur Verfügung stehenden Baugrundstücke und die immensen Kosten, die bei der Unterbauung von Straßen und Plätzen entstehen, genannt.
- Parkleitsysteme: Diese gibt es in vielen Städten nicht. Oft ist es auch nicht möglich, Auskunft über die Kapazität der einzelnen Parkhäuser zu erhalten. Somit wird es zwingend, von Parkhaus-zu-Parkhaus zu fahren, um einen freien Parkplatz zu finden.
- Einführung von Parkdauerbeschränkungen für bestimmte Innenstadtbereiche und Park-and-Ride Parkplätze.

- Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Personennahverkehrs (Bus und Bahn): Diese müssen preiswerter werden. Zudem muss die Frequenz der Busse und Bahnen erhöht werden.

## 1.2. Zielsetzung, Anforderungen und Annahmen

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein dezentrales Parkrauminformationssystem auf Basis der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu entwickeln, welches Fahrzeuge mit aktueller Belegungsinformation über Parkflächen am Straßenrand informiert und es damit ermöglicht, die individuelle Parkwahrscheinlichkeit jedes einzelnen Fahrzeugs im Zielgebiet zu erhöhen. Das System soll bereits in der Einführungsphase der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in der eine geringe Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge zu erwarten ist und wenige Kommunikationspartner für den Informationsaustausch zur Verfügung stehen, funktionsfähig sein. Eine weitere wichtige Anforderung an das Parkrauminformationssystem ist, dass es aus Sicht der Betreiber kostengünstig aufzubauen und zu betreiben sein muss. Ebenfalls müssen die entwickelten Algorithmen hinsichtlich der erzeugten Netzlast effizient sein. Durch die geringe Auslastung des Funkkanals soll der gleichzeitige und störungsfreie Betrieb von weiteren Fahrzeug-Fahrzeug-Anwendungen ermöglicht werden.

## 1.3. Wissenschaftlicher Beitrag

Das entwickelte Parkrauminformationssystem löst die für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze charakteristischen Probleme Netzlast und Latenz im Kontext der Parkplatzsuche.

Im ersten Teil der Arbeit wird eine Verbreitungsmethodik zur Reduzierung der erzeugten Netzlast vorgestellt. Hierzu wird eine Detailanalyse der zeitlichen und räumlichen Informationsverbreitung in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen durchgeführt. Die Umsetzung eines Verfahrens zur Aggregation von Parkrauminformation ermöglicht es, die Netzlast im Vergleich zu Verbreitungsverfahren ohne Aggregation um über 90% zu reduzieren.

Im zweiten Teil der Arbeit wird eine Lösung für den Umgang mit Latenz, welche durch die Informationsweitergabe von Fahrzeug-zu-Fahrzeug entsteht, vorgeschlagen. Durch die erarbeitete Prognosemethodik berechnet jedes Fahrzeug den wahrscheinlichsten Belegungszustand am Zielparkplatz zum Zeitpunkt des Eintreffens.

Das Zusammenführen beider Teilbereiche führt zu dem dezentralen Parkrauminformationssystem, welches sicherstellt, dass die Netzlast möglichst gering und der Nutzen empfangener Parkrauminformation möglichst hoch ist. Abschließend wird in einer detail-

lierten Simulationsstudie an einem realitätsnahen Verkehrsmodell der Stadt Braunschweig nachgewiesen, dass sowohl die Verbreitungs- als auch die Prognosemethodik, bei bereits geringen Ausstattungsraten von ca. 5%, Fahrzeuge bei der Suche nach einem freien Parkplatz am Straßenrand unterstützen.

## 1.4. Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 stellt den Stand der Technik dar, beschreibt die Eigenschaften von Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen und gibt einen Überblick über relevante Projekte wieder. In den Kapiteln 3 und 4 werden die Teilbereiche des Gesamtalgorithmus: Informationsverbreitung, welche von einem topologieunabhängigen, hierarchischen Grid-Konzept ausgeht und Prognose, welche auf zeitkontinuierlichen Markov-Ketten basiert, im Detail beschrieben.

Nach Erläuterung des Simulationsmodells in Kapitel 5 wird das entwickelte dezentrale Parkrauminformationssystem in den Kapiteln 6 und 7 simulativ evaluiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick über weiterführende Forschungsaspekte in Kapitel 8 ab.

## 2. Stand der Technik

Der Begriff der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation definiert die Interaktion eines Fahrzeugs mit seiner Umwelt über Kurzstreckenfunk oder zellularen Mobilfunk zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Verkehrseffizienz und des Fahrkomforts. Obwohl verschiedene Kommunikationstechnologien für den Einsatz denkbar sind, konzentrieren sich die aktuellen Arbeiten auf IEEE 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network) und UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Es werden drei Anwendungskategorien unterschieden: die Verkehrssicherheit (z.B. Kreuzungsassistenten oder Unfallwarnung), die Verkehrseffizienz (z.B. Stauwarnung oder das in dieser Arbeit vorgestellte Parkrauminformationssystem) und Anwendungen aus dem Bereich des Fahrkomforts (z.B. Internetzugang).

Die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation unterliegt Netzeffekten. Dies bedeutet, dass der erste Kunde keinen bis sehr geringen Nutzen hat, der Nutzen aber mit steigenden Ausstattungsraten ansteigt [MML05]. Daraus resultiert die Schwierigkeit, dass die Technologie mit Problemen bei einer Markteinführung konfrontiert sein wird. Eine wirtschaftliche Realisierung kann z.B. sichergestellt werden, wenn neben der reinen WLAN-Kommunikation zwischen Fahrzeugen zusätzliche Infrastrukturpunkte, sogenannte Road-Side-Units (RSU) an Straßen aufgestellt werden. Durch die direkte Kommunikation mit RSU (z.B. Wechselverkehrszeichen) und dem Einsatz von zellularem Mobilfunk, z.B. für Anwendungen des Fahrkomforts oder für Anwendungen der Verkehrseffizienz kann das Anwendungsspektrum erweitert und das Ausmaß von Netzeffekten teilweise kompensiert werden.

In den folgenden Kapiteln wird sich diese Arbeit ausschließlich mit der rein WLAN-basierten Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation beschäftigen. Dabei ist mit der Bezeichnung Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sowohl die Kommunikation zwischen Fahrzeugen als auch die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur eingeschlossen.

Die verschiedenen Anwendungen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation haben unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikationstechnologie. So ist für sicherheitsrelevante Anwendungen charakteristisch, dass diese im Vergleich zu Verkehrseffizienz-Anwendungen weniger tolerant gegenüber Verzögerungen in der Informationsverbreitung (Latenz)

sind. Weiterhin bedürfen diese einer exklusiven für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen dedizierten Frequenz und eines für die Kommunikation im automobilen Umfeld geeigneten Kommunikationsprotokolls. Daher konzentrieren sich die technischen Arbeiten u.a. auf die Schaffung einer standardisierten Variante von IEEE 802.11, dem Standard IEEE 802.11p, zur herstellerunabhängigen, interoperablen Kommunikation der Fahrzeuge im 5.9 GHz-Frequenzband. Die finale Version des Standards IEEE 802.11p hat das Ziel, robust gegenüber Störsignalen im automobilen Umfeld und hohen Relativgeschwindigkeiten zu sein.

Auch wenn bisher durch gemeinsame Arbeiten der Industrie, der öffentlichen Hand und Forschungseinrichtungen viele Aspekte der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation gelöst wurden, stellt der Nachweis der verkehrlichen und sicherheitsrelevanten Wirkung dieser Systeme ein bisher im wesentlichen simulativ bearbeitetes Forschungsgebiet dar. Die Erbringung des Nachweises dieser Effekte unter realen Umweltbedingungen mit vielen ausgestatteten Fahrzeugen und die Erarbeitung geeigneter Betreibermodelle unter Berücksichtigung rechtlich-regulatorischer Rahmenbedingungen zur Markteinführung sind für die nächsten Jahre das Ziel aller beteiligten Interessengruppen in Europa und in den USA.

In den folgenden Abschnitten wird der Entwicklungsstand der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in Europa, in den USA und in Japan erläutert. Weiterhin werden Projekte aus dem Umfeld Parkraummanagement und Verkehrsmanagement, welche im Rahmen des in dieser Arbeit erarbeiteten dezentralen Parkrauminformationssystems von Relevanz sind, vorgestellt.

## 2.1. Globale Betrachtung

Die Entwicklung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in den wichtigen Automobilmärkten Europa, USA und Japan hat unterschiedliche Wege genommen. Obwohl die Themen der Verkehrssicherheit und -effizienz in allen Regionen hohe Priorität haben, sind kontinentale Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu erkennen. In [Abbildung 2.1](#) ist ein Überblick über relevante Projekte und Standardisierungsgremien dargestellt.

### 2.1.1. Europa

Im Rahmen der im Jahr 2000 verabschiedeten Lissaboner-Ziele hat sich die Europäische Union das Ziel gesetzt, die Innovationskraft und das Wachstum der EU innerhalb von 10 Jahren auf eine Ebene mit den USA und Japan zu heben. Eines der Lissabonner-

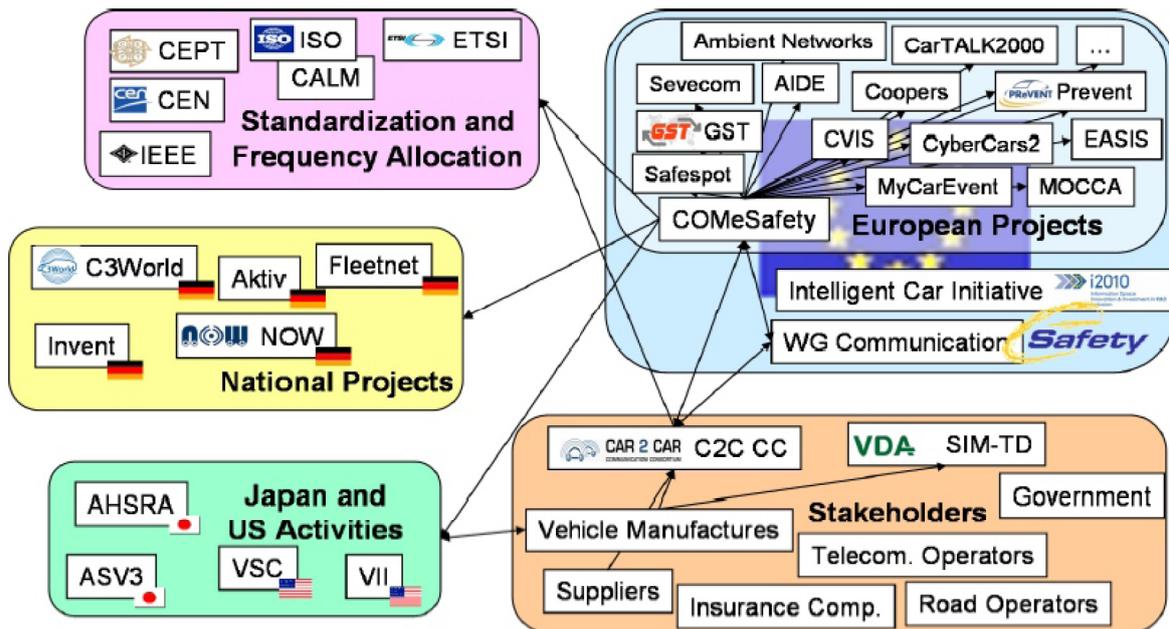


Abbildung 2.1.: Weltweite Situation der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation - Quelle: [Com]

Ziele ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Erhöhung der Verkehrseffizienz und die Reduzierung der durch Fahrzeuge entstehenden Umweltschäden mittels moderner Informations- und Kommunikationstechnologien. Hierfür wurde im Jahr 2006 die Initiative i2010 „intelligentes Fahrzeug“ (KOM(2006)59) gestartet. Diese Initiative soll im 7. Rahmenprogramm (2007-2013) der EU in verschiedenen Projekten bisher erarbeitete Technologien zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in Feldtests gezielt evaluieren und auf ihre Wirkung hinsichtlich Verkehrssicherheit und -effizienz überprüfen [EU].

Eine europaweit harmonisierte Gesamtarchitektur bildet die Grundlage der sicheren, effizienten Kommunikation zwischen Fahrzeugen (siehe dazu Abbildung 2.2). Die europäische Variante der Systemarchitektur unterscheidet sich von der in Japan und den USA im Wesentlichen durch den hybriden Kommunikationsansatz, welche neben dem Betrieb von IEEE 802.11p auch WLAN nach IEEE 802.11a/b/g und weitere Funktechnologien, wie z.B. UMTS vorsieht.

Erst die Verfügbarkeit eines europaweit harmonisierten und geschützten Frequenzspektrums ermöglicht die Umsetzung der Architektur und damit auch die Umsetzung der Anwendungen zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Daher wurde bereits im Jahr 2002 federführend durch die Automobilindustrie (Volkswagen, Audi, Daimler, BMW, Opel,

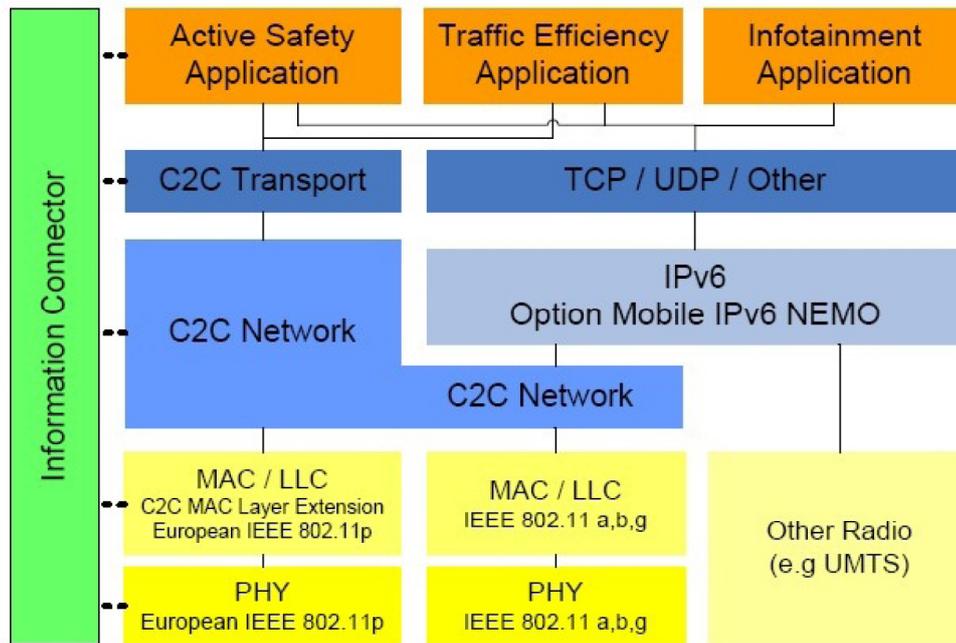


Abbildung 2.2.: Architektur der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation - Quelle: [C2C07]

Fiat, Honda und Renault) das Car-to-Car Communication Consortium (C2CCC) [C2C] gegründet. Vornehmliches Ziel des C2CCC ist die Standardisierung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Das Konsortium ist in die 6 Arbeitsgruppen Physical- und MAC-Layer, Network-Layer, Application, Security, Architecture und Standardization aufgeteilt.

Im Rahmen des Frequenzallokierungsprozesses haben die C2CCC-Mitglieder, der Technical Group 37 (TG37) des European Telecommunications Standardisation Institutes (ETSI) ein System Reference Document (SRDoc) zum gewünschten Frequenzspektrum (siehe dazu Abbildung 2.3) vorgelegt. Zusätzlich zu dem SRDoc wurde eine Kompatibilitätsstudie zur Überprüfung europaweiter Interferenzen eingereicht. Im SRDoc wird das Frequenzband von 5,855 GHz bis 5,925 GHz favorisiert und in drei Bereiche aufgeteilt. Das 20 MHz-Band zwischen 5,885 GHz und 5,905 GHz ist „sicherheitskritischen Anwendungen“ vorbehalten. Im 30 MHz-Band zwischen 5,905 GHz und 5,925 GHz sowie zwischen 5,875 GHz und 5,885 GHz sollen „Anwendungen der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz“ betrieben werden. Weitere 20 MHz im Bereich von 5,855 GHz bis 5,875 GHz sind für „nicht-sicherheitskritische Anwendungen“ vorgesehen. Mittels der durchgeführten Arbeiten wurde erreicht, dass das Electronic Communications Committee (ECC) der europäischen Konferenz der Verwaltung für Post und Telekommunikation (CEPT) im September 2007 einer Frequenzzuweisung von 30 MHz im angestrebten Band

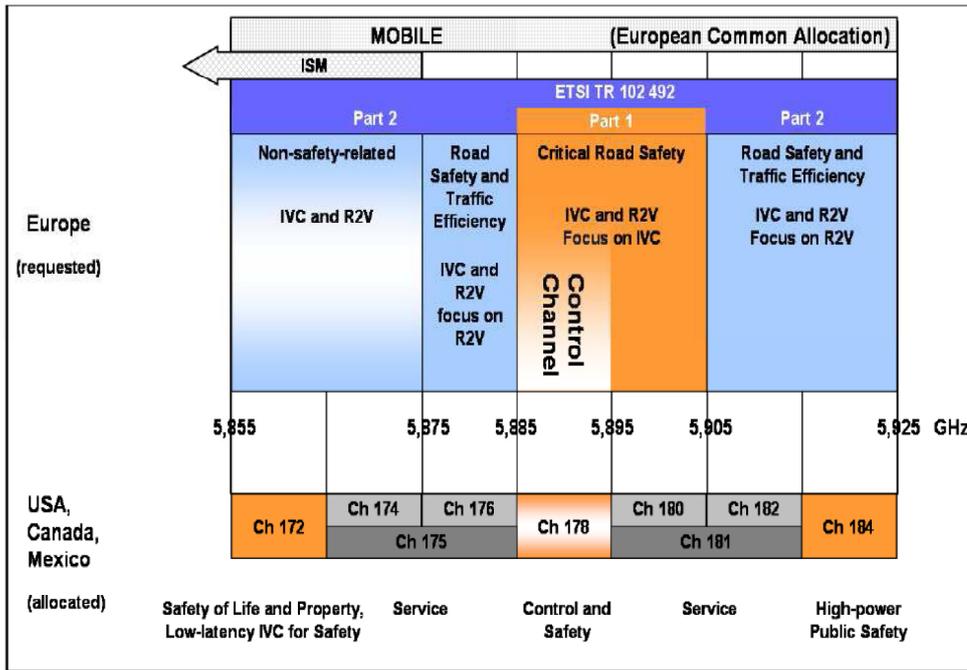


Abbildung 2.3.: Frequenzspektrum in Europa (angefragt) und den USA (zugewiesen) - Quelle: [C2C07]

im Bereich 5,875 GHz bis 5,905 GHz zugestimmt hat. Um die EU-weite Harmonisierung der Standardisierung zu gewährleisten, hat das C2CCC gemeinsam mit weiteren Industriepartnern im Januar 2008 das Technical Committee Intelligent Transportation Systems (ETSI TC ITS) initiiert. Das Ziel des ETSI TC ITS ist es, alle Aspekte zukünftiger Systeme der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation auf EU-Ebene zu bearbeiten. Speziell Themen der Standardisierung, der Frequenzallokation und Arbeiten zur elektromagnetischen Verträglichkeit haben hohe Priorität. Das ETSI TC ITS besteht zur Zeit aus fünf Arbeitsgruppen: 1) User and Application Requirements, 2) Architecture and Cross Layer & Web Services, 3) Transport & Network, 4) Media and Medium related und 5) Security. Damit werden alle notwendigen technischen Teilsysteme einer Architektur zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation abgedeckt.

### 2.1.2. Japan

In Japan wird die Standardisierung der unteren Schichten des Protokollstapels, also die Schichten 1 und 2 des ISO/OSI-Referenzmodells durch die Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) [ARI] und die oberen Schichten durch das Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) und das Japan Automobile Research Institute (JARI) bearbeitet.

**Information on Parking Lots**

It indicates the location of parking lots and sa/pa, telling by collars if it's available or not, and what kind of facilities it has.

▪Parking lot availability by collars

				
<b>Full</b>	<b>Congestion</b>	<b>Empty</b>	<b>Closed</b>	<b>Unknown</b>
more than 90%	70-90%	less than 70%	—	no information

▪Indication example of detailed information on parking lot

VICIS詳細情報	
○	駐車場
満車率	80%
収容台数	500台未満
30分	300円
10:00~	23:00

\* The representational function differs according to the navigation equipment. Please read operation manual for more information.

Abbildung 2.4.: Parkrauminformation im VICIS-System (Japan) - Quelle: [VIC]

Der Standard ARIB STD.T-75 (2001) beschreibt den Aufbau und die Schnittstellen des Kommunikationssystems. Das japanische Kommunikationssystem ist im Standard ARIB STD.T-88 (2004) um die Fähigkeit der TCP/IP-Kommunikation erweitert worden und ermöglicht damit auch den Internetzugriff aus den Fahrzeugen.

In Japan sind bereits zwei Systeme im Einsatz. Diese sind nicht kompatibel mit der geplanten europäischen Variante der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, weisen aber Ähnlichkeiten auf. Zu nennen sind hier das Vehicular Information and Communication System (VICIS) und das Electronic Toll Collect System (ETC) [VIC]. VICIS ist ein zentralisiertes Verkehrsinformationssystem, welches permanent Daten von Autobahnbetreibern und der Polizei sammelt, diese zentral aggregiert und an Fahrzeuge verteilt. Im Kurzstreckenfunkbereich bis zu 70 Metern wird das 2,4 GHz Band und Infrarot-Technologie und zur Verteilung der Information in Bereichen bis zu 50 km wird FM-Multiplex-Broadcast eingesetzt. VICIS bietet den Fahrzeugen neben Verkehrsinformation auch aktuelle Belegungsdaten von Parkplätzen an (siehe dazu Abbildung 2.4). Im September 2004 waren in Japan ca. 11,8 Mio. VICIS-Einheiten in den Fahrzeugen im Einsatz. Die ETC-Technologie basiert auf DSRC-Technologie im 5,8 GHz Band und wird ausschließlich zur Mauterhebung genutzt. Im September 2004 waren in Japan ca. 3,5 Mio. ETC-OBUs (Electronic Toll Collect - On Board Units) im Einsatz.

Als Projekte, die vergleichbar mit den Aktivitäten in Europa und den USA sind, sind Advanced Safety Systems Mounted On Vehicles (ASV) und Advanced Cruise Assist Highway System (AHS) zu nennen. Beide Projekte werden vom Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) koordiniert. Die Ergebnisse der Arbeiten gehen in die Standardisie-

zung der International Organization for Standardization Technical Committee 2004 (ISO TC 204) ein. In Japan ist das Frequenzband von 5,770 GHz bis 5,850 GHz für DSRC-basierte (Dedicated Short Range Communication) Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vorgesehen. Geplante DSRC-Applikationen in Japan sind u.a. Reservierungs- und Bezahl-systeme für Parkflächen, Informationen über Tankstellen sowie der Einsatz von Flotten- und Taximanagementsystemen.

### 2.1.3. USA

Das U.S. Department of Transportation (US DOT) unterstützt mehrere Initiativen zur Etablierung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz. Zu den wichtigsten zählen das Vehicle-Infrastructure-Integration (VII) und das Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS) Projekt. Aus dem VII ist im Jahr 2005 das Vehicle-Infrastructure-Integration Consortium (VI-IC) hervorgegangen. Ziel des VIIC ist es, ein marktfähiges Kommunikationssystem zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu entwickeln und den Nachweis der Machbarkeit durch Funktions- und Systemtests in einem großen Feldversuch zu erbringen. Das im Jahr 2006 gestartete CICAS-Projekt konzentriert sich auf das Vermeiden von Stoppschild- und Ampel-Verstößen und untersucht damit auch Möglichkeiten der Unfallvermeidung an Kreuzungen. Beide Initiativen basieren als Schlüsseltechnologie auf DSRC-Kommunikation (Dedicated Short Range Communication) [Arm] nach dem Standard IEEE 802.11p.

Seit 1997 ist in den USA das Frequenzband zwischen 5,850 GHz und 5,925 GHz für DSRC-basierte Intelligent Transportation Systeme (ITS) durch die Federal Communications Commission (FCC) allokiert. Der Frequenzbereich ist in 7 Kanäle aufgeteilt (siehe dazu Abbildung 2.3). Nach erfolgter Synchronisation auf dem Kontrollkanal werden Nutzdaten auf einem der Servicekanäle ausgetauscht. Die in den USA existierenden Standards sind:

- IEEE 802.11p : Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)
- IEEE P1609.1 : WAVE Resource Manager
- IEEE P1609.2 : WAVE Security
- IEEE P1609.3 : WAVE Networking Services
- IEEE P1609.4 : WAVE Multi-Channel Operations
- SAE J2735 : DSRC Message Set Dictionary

Diese zueinander komplementären Standards bestimmen die Systemarchitektur des in den USA geplanten Protokollstapels zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Hierbei sind IEEE P1609.4 und IEEE 802.11p der physikalischen und der MAC-Schicht, IEEE P1609.3 der Netzwerk- und Transportschicht, SAE J2735 und IEEE P1609.2 den der Transportschicht übergeordneten Schichten des ISO/OSI-Referenzmodell zuzuordnen.

## 2.2. Relevante Forschungsprojekte

### 2.2.1. Verkehrsmanagement

Auf europäischer und auf nationaler Ebene wurden bereits verschiedene Forschungsprojekte im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation durchgeführt. Auf EU-Ebene sind die im 6. Rahmenprogramm der EU (2002 - 2006) geförderten Projekte Coopers [Coo], COMeSafety [Com], SAFESPOT [Saf] und CVIS [Cvi] zu nennen. Zahlreiche technische Fragestellungen sind in den nationalen Förderprojekten, wie z.B. Fleetnet [Fle] der NOW [NOW] bearbeitet worden. Zu den aktuellen nationalen Forschungsaktivitäten sind die Projekte Aktiv [Akt] und SIM-TD (Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland) zu nennen. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick der komplexen Projektlandschaft auf EU-Ebene wieder.

#### EU-Projekte

**Coopers** In COOPERS (Cooperative Systems for Intelligent Road Safety (2006 - 2009)) liegt der Fokus auf der Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr und der effizienteren Ausnutzung der Straßenkapazität durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Ebenfalls sollen Empfehlungen als Grundlagen für Direktiven der EU erarbeitet werden. Dem Projekt stehen drei europäische Straßenkorridore als Testfelder zur Verfügung. Diese sind die Strecken von Nürnberg bis Verona (einschließlich der Brenner-Autobahn), von Rotterdam bis Antwerpen und die Berliner Autobahntrassen. Es ist geplant, zusätzlich zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation auch IP-basierte Technologien und DAB (Digital-Audio-Broadcast) in definierten Anwendungen der Verkehrssicherheit (z.B. Gefahrenwarnungen) und der Verkehrseffizienz (z.B. Wetter-/Straßenzustandswarnungen) zu erproben [Coo].

**COMeSafety** Die Schwerpunkte des Projekts COMeSafety, organisiert als „Specific Support Action“ der EU (2006 - 2009), liegen u.a. in der weltweiten Harmonisierung

des Funksystems der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, in der EU-weiten Frequenzallokierung, in der Ergebniskonsolidierung EU-weiter Forschungsprojekte und in der Förderung der Zusammenarbeit mit den Initiativen in den USA und in Japan (siehe dazu Abbildung 2.1) [Com].

**SAFESPOT** Im Projekt SAFESPOT (2006 - 2009) wird auf kooperative Sicherheitsanwendungen fokussiert und darauf abgezielt, den Safety-Margin, also die Zeit und den zur Verfügung stehenden Raum vor Unfallsituationen mittels Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu erhöhen und damit Unfälle zu vermeiden. Als technologische Basis zur Umsetzung sicherheitsrelevanter Anwendungen, wie z.B. Kollisionsvermeidung, wird IEEE 802.11p eingesetzt [Saf].

**CVIS** Das Projekt CVIS (Cooperative Vehicle Infrastructure System (2006 - 2010)) hat das Ziel, eine europäische Technologieplattform, die sowohl auf Kurzstreckenfunk WLAN und auf zellularen Mobilfunk (2.5/3G) basiert, zur Verfügung zu stellen. Diese soll es ermöglichen, auf einer vereinheitlichten Plattform Anwendungen für den kooperativen Verkehr von morgen umzusetzen [Cvi].

### Nationale Projekte

**Fleetnet** Im BMBF-Projekt Fleetnet - Internet on the Road (2001 - 2004) wurden erstmals konzentriert Untersuchungen zur WLAN-basierten Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation durchgeführt. Fleetnet hat mögliche Applikationen und Dienste in drei Kategorien unterteilt: Kooperative Fahrerassistenzsysteme, dezentrale Floating Car Data Anwendungen sowie Informations- und Kommunikationsdienste. Neben WLAN wurde in Fleetnet auch die Eignung von UTRA-TDD (UMTS Terrestrial Radio Access - Time Division Duplexing) als Übertragungstechnologie untersucht. Außerdem wurden zahlreiche Lösungen zur Weiterleitung von Information (Routing-Algorithmen) in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen erarbeitet [Fle].

**Network-On-Wheels** Im vom BMBF geförderten Projekt NOW (Network On Wheels (2003 - 2008)) haben sich die beteiligten Partner auf die Erarbeitung eines für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation geeigneten Kommunikationssystems bzw. einer ersten Architektur dafür konzentriert. Die Arbeiten haben sich auf die physikalische Schicht (z.B. Effekte der Wellenausbreitung im angestrebten 5.9 GHz-Band), die Netzwerkschicht (z.B.

Algorithmen für positionsbasiertes Routing), Konzepte zur Kommunikationssicherheit (z.B. Kryptoverfahren zur Signierung von Nachrichten mit sicherheitsrelevantem Inhalt) und den Aufbau herstellerübergreifender Demonstratoren konzentriert. Um das Thema der Standardisierung voranzubringen wurde eng mit dem C2CCC zusammengearbeitet [NOW].

**Aktiv** Das Projekt Aktiv (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenen Verkehr (2007 - 2011)) ist eines der wichtigsten aktuell laufenden nationalen Förderprojekte im Umfeld der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. In Aktiv wird an neuen Fahrerassistenzsystemen für ein effizientes Verkehrsmanagement durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation geforscht. Das vom BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) geförderte Projekt validiert im Vorfeld einen Großteil der in geplanten Feldversuchen unter realen Alltagsbedingungen und im großen Maßstab zu erprobenden Technologien und Anwendungen. Das Projekt ist aufgliedert in drei Teilprojekte: Aktiv-AS, Aktiv-VM und CoCar. Aktiv-AS (Aktiv-Aktive Sicherheit) konzentriert sich auf die Umfeldsensorik und auf die Fusion von Daten die im Fahrzeug bordautonomen und aus der Kommunikationstechnik gewonnen werden. Eine weitere Untergliederung des Teilprojekts ist durch die Schwerpunkte aktive Gefahrenbremsung, Integrierte Querführung, Kreuzungsassistenz, Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer, Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit gegeben. In Aktiv-VM wird die Vernetzung intelligenter Systeme im Fahrzeug mit intelligenter Infrastruktur mittels Kommunikation und Kooperation im Verkehr untersucht. Das Teilprojekt CoCar arbeitet an der Grundlagenforschung zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation mittels zellularen Mobilfunksystemen der nächsten Generation (3G<sup>+</sup> und UMTS) [Akt].

**Sichere-Intelligente-Mobilität Testfeld-Deutschland** (2008 - 2012) Auf Initiative der Bundesregierung und der Automobilindustrie wurde im September 2008 das Projekt SIM-TD als großangelegter Feldversuch im Rhein-Main Gebiet gestartet. Fördergeber sind, gegeben durch die Komplexität des Projekts, drei Ministerien: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). In SIM-TD soll mit bis zu 500 Fahrzeugen und mehreren hundert Road-Side-Units (RSU) der Nachweis erbracht werden, dass die Verkehrseffizienz und die Verkehrssicherheit durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation signifikant gesteigert werden kann. Ein weiteres sehr wichtiges Ziel ist die Erarbeitung von tragfähigen Rollout-Strategien und Markteinführungsszenarien sowie die Bewertung des rechtlich-regulatorischen Rahmens.

### 2.2.2. Parkraummanagement

**EU-Projekte** Auf europäischer Ebene wurde im Rahmen der Förderinitiative DRIVE-1 (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) (1988 - 1991) im Projekt Pulsar [pul] ein EU-weiter Leitfaden entwickelt, um Probleme, die durch den Parksuchverkehr an Straßen entstehen, zu identifizieren. Als Empfehlung zur Problemlösung wurde in Pulsar der Einsatz von RTI-Technologien (Road Transport Informatics - Informations- und Kommunikationstechnologien) ausgesprochen. Im Projekt PARCMAN (Parking Management, Control and Information Systems) [pin], das ebenfalls im Rahmen von Drive-1 gefördert wurde, wurde ein Parkraummanagementsystem mittels RTI-Technologien konzipiert und prototypisch realisiert. Die Entwicklung eines E-Commerce Tools zum drahtlosen Bezahlen der Parkgebühren wurde im Projekt E-PARKING [epa] (2001 - 2003) im 5. Rahmenprogramm der EU gefördert.

**Nationale Projekte** Als eines der umfassenden Projekte in Deutschland, in denen das Thema Parken aufgegriffen wurde, ist das im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Mobilität in Ballungsräumen“ durchgeführte und im Jahr 2003 abgeschlossene Projekt Stadinfo.Köln [Sta] zu nennen. In diesem Projekt wurde ein internet-basiertes auf Echtzeitdaten operierendes Mobilitäts- und Verkehrsinformationsportal erarbeitet. Dieser umfasst die Reiseplanung, das Parken, die Erfassung und Verbreitung der Verkehrslage, die Bereitstellung von Information zu Bus und Bahn sowie von Information zu Events, Wetterlage, Tourismus und Flughafen. Der Aufbau benutzerfreundlicher Abwicklungssysteme für Reservierung und Abrechnung zukünftiger Betreiberstrukturen war ein weiterer Projektschwerpunkt. Es wurde die Möglichkeit geschaffen, auf dynamische Parkrauminformation in Parkhäusern, auf Park-and-Ride Parkplätze und auf Anwohnerparkplätze zuzugreifen. Auch Suche, Reservierung und Bezahlung von freien Parkflächen über den Zugriff auf ein spezielles Internetportal aus dem Fahrzeug heraus wurde ermöglicht. Das bestehende Parkleitsystem der Stadt Köln wurde in das Gesamtparkkonzept des Projekts mit integriert. Als weitere im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Mobilität in Ballungsräumen“ geförderte Projekte mit gleicher Zielstellung und ähnlichen Ergebnissen sind MOBILIST [Moba] in Stuttgart, MOBINET [Mobb] in München, WayFlow [Way] in Frankfurt und das Mobilitätsprojekt Intermobil [Int] in Dresden zu nennen.

Das im Rahmen der Hightech Offensive Bayern von der Bayrischen Staatskanzlei geförderte Projekt CoPark (Coordiniertes Parken in Ballungszentren) [Cop] hat ebenfalls die individuelle zielnahe Vermittlung von ausgesuchten Parkplätzen, die effiziente Koordination des Parksuchverkehrs und eine vereinfachte Gebührenabrechnung mittels zellularer

Mobilfunktechnologie untersucht. Weiterhin ist das Projekt Parkinfo [[parb](#)] als kostenloser Informationsservice der BMW AG zu nennen. Parkinfo zeichnet sich als Online-Service mit über 1500 angeschlossenen Parkhäusern in 105 deutschen Großstädten aus. Die Pflege der zugrundeliegenden Datenbank wurde Anfang 2005 vom ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobilclub) übernommen.

**Weitere Projekte** Die Nutzung von Handys zum Bezahlen von Parkgebühren findet in der Öffentlichkeit immer mehr Verbreitung. So können z.B. mit dem Bezahlssystem der Firma easyPark [[eas](#)] bereits heute in Hannover, Duisburg, Leverkusen und Flensburg Parkgebühren für den öffentlichen Parkraum per Mobiltelefon bezahlt werden. Laut Firmenauskunft existieren nach heutigem Stand (2008) in Europa ca. 70.000 registrierte Kunden. In Dänemark ist das System in 95% der gesamten Parkfläche verfügbar. 20% aller Parkvorgänge in Kopenhagen werden über das Bezahlssystem der Firma easyPark abgewickelt. Der Einsatz von Handheld-Lösungen mit der Funktion eines In-Car Parkautomaten mit minutengenauer Bezahlfunktion wird zur Zeit vor allem in den USA in Feldtests evaluiert [[sma](#)]. Aus den verschiedenen laufenden und abgeschlossenen Projekten zum Thema Parkraumbezahlung kann geschlossen werden, dass sich verschiedene elektronische Bezahlssysteme für Parkraum in der Markteinführungsphase befinden und die Kundenakzeptanz in den durchgeführten Pilotphasen sehr positiv war.

Ab Ende 2008 soll ein System zur Online-Parkplatzsuche, welches als Gemeinschaftsprojekt zwischen der Stadt San Francisco und den Firmen Streetline und Smartdust durchgeführt wurde, in Betrieb genommen werden. Zur Erkennung von parkenden Fahrzeugen werden bis zu 6000 Sensoren auf der Straßenoberfläche installiert. Die Übertragung der detektierten Belegung an einen zentralen Server erfolgt über ein dezentrales drahtloses Mesh-Netzwerk [[Ver](#)]. Parkplatz-suchende Fahrzeuge verbinden sich über zellularen Mobilfunk mit dem Server und rufen die erfassten Parkplatzdaten online ab.

## 2.3. Relevante Veröffentlichungen

Neben dem Parksuchverkehr entstehen innerstädtische Verkehrsprobleme u.a. auch durch Tagesbaustellen, Straßensperrungen, Unfällen und (ausgefallenen) Lichtsignalanlagen. Auch hier bietet die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation den Vorteil Verkehrsinformation dezentral zu verbreiten. Daher wird in diesem Abschnitt auf Verkehrs- und auf Parkraumprobleme eingegangen (siehe dazu Abschnitt [2.3.1](#) und Abschnitt [2.3.2](#)). Weiterhin können Fahrzeug-Fahrzeug-Netze als eine Unterklasse von mobilen Ad-Hoc-Netzen

betrachtet werden. Aufgrund der thematischen Verwandtschaft sind existierende Lösungen für mobile Ad-Hoc-Netze eine wichtige Grundlage zur Lösung von Problemstellungen in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen. Deshalb werden relevante Lösungen aus mobilen Ad-Hoc-Netzen, die im Kontext des dezentralen Parkrauminformationssystems von Bedeutung sind, gemeinsam mit Lösungen für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze vorgestellt. Hierzu zählen insbesondere Fragestellungen zur Informationsverbreitung und zum Umgang mit beschränkter Bandbreite (siehe dazu Abschnitt 2.3.3).

### 2.3.1. Verkehrsmanagement

In [Bec00] und [Pip94] werden Ursachen und Maßnahmen zur Reduzierung von Verkehrsstau diskutiert. Es wird festgestellt, dass Staus und Unfälle durch die frühzeitige Versendung von Information an Fahrer vermieden werden können und existierende Fahrerinformationssysteme Störungen nicht frühzeitig genug an Fahrzeuge weiterleiten. Dass der Aufbau von Verkehrsinformationssystemen durch die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen mit wesentlich kürzeren Übertragungszeiten möglich ist, wird in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen (z.B. in [CM07], [WLB07], [NSI06] oder [WKR07]). In [CM07] wird ein Traffic Management System auf Basis von WLAN vorgestellt. Ähnlich wie im dezentralen Parkrauminformationssystem sammeln, aggregieren und filtern einzelne Fahrzeuge Information und versenden diese über WLAN. Zusätzlich werden gesammelte Daten, in diesem Fall die Fahrzeit zwischen zwei Kreuzungen, über RSU an einen zentralen Server gesendet. Es erfolgt eine serverseitige Anreicherung und Aufwertung der Information, da alle Fahrzeuge ihre Datenbasis beim Vorbeifahren an den Server senden. Die Information auf dem Server wiederum, z.B. Fahrempfehlungen einzelner Streckenabschnitte, wird über RSU an vorbeifahrende Fahrzeuge zurückgesendet. Zusätzlich zur Informationsverbreitung und zur effizienten Auslastung des Funkkanals, werden z.B. in [WLB07] Lösungen zur Berechnung von Fahrempfehlungen zur Stauvermeidung vorgeschlagen. In [WKR07] wird Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zur Umsetzung eines effizienten Einfädelvorgangs bei Spur- und Straßenverengungen angewendet. In [WF05] werden Fahrempfehlungen auf Basis von in der Natur vorkommenden Phänomenen, dem Verhalten von Bienen, abgeleitet.

### 2.3.2. Parkraummanagement

Bisherige Parkraummanagementsysteme beschränken sich auf die Einbindung von Parkhäusern über Parkleitsysteme, auf internet-basierte Auskunftsdienste und auf Park-and-Ride

Parkplätze. Der innerstädtische Parksuchverkehr ist trotz der Einführung verschiedener Lösungen zur Reduzierung (siehe dazu Abschnitt 1.1), ein bisher ungelöstes innerstädtisches Verkehrsproblem [Para].

Es existieren zwei grundlegend unterschiedliche Herangehensweisen zur Reduzierung des Parksuchverkehrs.

Der erste Ansatz sieht vor, die Attraktivität von Parkraum zu reduzieren, indem eine höhere Bepreisung und eine kürzere Parkdauer für Parkflächen an Straßen eingeführt wird [Sho06]. Das grundlegende Argument ist, dass sich, durch die Erhöhung der Parkgebühren für Stellflächen an Straßen, die als übersteuert wahrgenommenen Parkpreise in Parkhäusern relativieren und Fahrzeuge nach einer gewissen Suchdauer die Suche nach freien Parkplätzen am Straßenrand beenden und sich für ein Parkhaus entscheiden. In [AP90] wird die höhere Bepreisung von Parkflächen am Straßenrand ebenfalls als eine mögliche Strategie zur Reduzierung des Parksuchverkehrs vorgeschlagen. Laut dieser Untersuchung nehmen Fahrer je nach Parkdauer und Fahrtzweck im Durchschnitt eine Parksuchdauer von bis zu 15 Minuten und damit eine Erhöhung der Fahrtstrecke von bis zu 40% in Kauf. Abhängig von empirisch ermittelten Eigenschaften des Parksuchverkehrs werden auch verschiedene von den Fahrern angewendete Parkplatzsuchstrategien kategorisiert. Aus dieser Kategorisierung werden Implikationen und Designkriterien für zukünftige Parkraummanagementsysteme abgeleitet. Die Einführung von Maßnahmen zur Erhöhung der Umschlaghäufigkeit einzelner Parkflächen wird auch in [Top94] diskutiert. Auch hier wird argumentiert, dass durch die Reduzierung der maximalen Parkdauer, die Erhöhung der Bepreisung einzelner Parkflächen am Straßenrand und die Überwachung der Regeleinhaltung, die Akzeptanz von Parkhäusern erhöht werden kann.

Der zweite Ansatz zur Reduzierung des Parksuchverkehrs stellt den Fahrer in den Mittelpunkt und sieht vor, die Informiertheit des Fahrers zu erhöhen und dadurch einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Parksuchverkehrs zu leisten. Das auf Basis aktueller und zuverlässiger Belegungsinformation über alle Parkplätze, Fahrzeuge selbst, die für sie beste Entscheidung treffen sollten, ist auch der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz. Auch die zur Reduzierung des Parksuchverkehrs dargestellten Handlungsempfehlungen in [Bir95] sehen die Nutzung moderner Verkehrsleit- und Kommunikationstechnik zur Detektion, Bekanntmachung, Reservierung und Bezahlung von Parkflächen vor. Zahlreiche Lösungen zur Umsetzung dieses Ansatzes existieren bereits. Das in [BOR<sup>+</sup>06] vorgestellte Parkrauminformationssystem benutzt Sensoren zur Detektion der Belegung von Stellflächen. Die Sensoren stehen in Kommunikationsreichweite und leiten die detektierten Belegungen an einen zentralen Server weiter. Fahrzeuge senden Anfragen an den Server

und fragen nach Parkmöglichkeiten an. Das aufgebaute Sensor-Netzwerk in [YZLM06] erzielt das gleiche Ergebnis, allerdings wird hier eine hierarchische Struktur zwischen den die Information weiterleitenden Sensoren aufgebaut. Es wird zwischen Monitoring-Nodes zur Detektion einzelner Parkflächen, strategisch positionierten Guiding-Nodes zur Führung von Parkplatz-suchenden Fahrzeugen und Sink-Nodes, welche als Gateway zur Management-Station arbeiten, unterschieden. In [BL04] wird vorgeschlagen einzelne Parkautomaten so aufzustellen, dass sie sich untereinander über Funkkommunikation erreichen können. Das Besondere an diesem System ist, dass neben dem Detektionssensor ein weiteres Modul die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeug und Parkautomaten erlaubt und damit Anfragen an die einzelnen Parkautomaten ermöglicht. In [PTSP07] wird eine weitere Variante der Verwaltung einer einzelnen Parkflächen vorgeschlagen. Ein- und ausparkende Fahrzeuge erfassen alle Stellflächen, an denen sie vorbeifahren und melden diese über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation an eine der Parkfläche zentral angeordneten RSU. Diese nimmt Anfragen vorbeifahrender Fahrzeuge entgegen und antwortet mit der exakten GPS-Position einzelner, vorher gemeldeter freier Parkflächen. Im Hochschulprojekt Smartpark [GP] an der EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) werden dezentrale Lösungen für die Detektion und die Weiterleitung von freier Parkrauminformation erarbeitet. Aktuell liegt der Arbeitsschwerpunkt auf dem Aufbau von Demonstratoren, welche durch Sensorik die Belegung der Stellflächen erfassen und die Belegungsinformation an vorbeifahrende Fahrzeuge versenden können.

### 2.3.3. Mobile Ad-Hoc-Netze

#### 2.3.3.1. Informationsverbreitung

In Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen kann Information auf zwei Arten verfügbar gemacht werden: entweder durch reaktive Anfragen oder durch proaktive Verbreitung. Reaktive Verfahren basieren auf Anfrage-Antwort Mechanismen und setzen aktive Anfragen einzelner Netzknoten voraus. In proaktiven Verfahren existiert im System ein sich wiederholender Takt, auf dessen Basis Information von Netzknoten zu Netzknoten versendet wird.

Zur Umsetzung von reaktiven Verfahren grundlegende Funktionalitäten, wie z.B. Routingalgorithmen, wurden im BMBF-Projekt Fleetnet [Fle] untersucht. Routingalgorithmen sind notwendig, wenn in einem Fahrzeug-Fahrzeug-Netz Daten von einem Fahrzeug an Position A an ein anderes Fahrzeug an Position B versendet werden sollen. Ein Überblick über positionsbasierte Routingprotokolle findet sich in [MWH01] und in [FMH<sup>+</sup>02] wieder. Routingmechanismen mit der Möglichkeit der geografischen Adressierung, um z.B.

Fahrzeuge über eine Gefahrensituationen zu informieren oder um eine Anfrage an ein beliebiges Fahrzeug in einem festen geographischen Bereich zu senden, wurden in [FM03] untersucht. Ein weiterer Aspekt der bei reaktiven Anfragen wichtig ist, ist die Kenntnis über die aktuelle Position des zu adressierenden Fahrzeugs. In [CBW02], in [KHFM02] und in [KFWM04] sind Algorithmen zur Lokalisierung von Teilnehmern in mobilen Ad-hoc-Netzen vorgestellt worden. In [LHT<sup>+</sup>03] wird ein Verfahren zum Routing von Information in innerstädtischen Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen präsentiert. In [Mat06] ist eine von dem in [HWK<sup>+</sup>03] beschriebenen Contention Based Forwarding Algorithmus abgeleitete Strategie zur reaktiven Informationsbeschaffung implementiert und an einem realitätsnahen Verkehrsmodell evaluiert worden. Evaluierungen zur Umsetzbarkeit von Routingstrategien in Autobahnscenarien finden sich in [FBW07]. Die Frage, ob fest vordefinierte Routen für Datenpakete in einem Fahrzeug-Fahrzeug-Netz genutzt werden können, ist in [CMRL05] und [WM05] untersucht worden. Eine weitere Anwendung in denen reaktive Anfragen notwendig sind, sind auf Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen basierende Suchmaschinen [WCLM07]. Die Möglichkeit der aktiven Anfrage an Fahrzeuge nach Information wird in [DINI05] und in [WCLM08] untersucht. Diese Verfahren basieren auf Anfrage-Antwort Mechanismen und nutzen das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz zur Weiterleitung der Anfragen und dem Zurücksenden der Information an das anfragende Fahrzeuge.

Die Idee der epidemischen Algorithmen aus [EGKM04], [WSN<sup>+</sup>06], [Yam05], welche Information proaktiv verbreiten, wird im dezentralen Parkrauminformationssystem umgesetzt. In [DQA04] finden sich Algorithmen in denen eine Übertragung auf mobile Ad-hoc-Netze durchgeführt wird. Spezielle für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze konzipierte Verfahren zur Informationsübertragung konzentrieren sich auf Verbreitungsmethoden und auf Aggregationsverfahren. Das systematische Verbreiten von Information über kontrollierte Broadcast-Mechanismen, welche sowohl Umgebungsparameter als auch die Semantik der Information berücksichtigen, werden für mobile Ad-Hoc-Netze in [CGK<sup>+</sup>08] vorgestellt. Verbreitungsstrategien für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze im Kontext eines Verkehrsinformationssystems TrafficView sind z.B. in [NSI06] untersucht. In TrafficView wird die Verbreitungsmethode in Abhängigkeit von der Semantik der Information und der Fahrtrichtung einzelner Fahrzeuge festgelegt. Es wird zwischen der Informationsübertragung zwischen Fahrzeugen in gleicher Fahrtrichtung, zwischen Fahrzeugen in entgegengesetzter Fahrtrichtung und Mischformen unterschieden. Die je nach Strategie ausgewählten Fahrzeuge sind für die periodische Informationsverbreitung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug zuständig. In TrafficView versenden Fahrzeuge zwei Arten von Informationspaketen: generated Data, welche fahrzeugspezifische Information und relayed Data, welche zusammengefasste

Information enthalten. In [SFUH04] wird als eine weitere Optimierung der periodischen Informationsverbreitung das Speed Dependent Random Protocol (SDRP) vorgeschlagen. In SDRP wird das Broadcast-Intervall abhängig von der Geschwindigkeit zwischen den Werten  $v_{min}$  und  $v_{max}$  geregelt. Es wird festgestellt, dass sich weder die Ermittlung der Werte  $v_{min}$  und  $v_{max}$  noch das Einstellen des Broadcast-Intervalls ohne zusätzlichen Kommunikationsaufwand realisieren lässt. Daher wird in [STUH05] aufbauend auf SDRP das Received Message Dependent Protocol (RMDP) vorgestellt. RMDP optimiert das Broadcast-Intervall ohne zusätzlichen Kommunikationsaufwand und geht davon aus, dass das Broadcast-Intervall negativ mit der Anzahl empfangener Pakete korreliert. Je mehr Datenpakete ein Fahrzeug also in einem Intervall empfängt, desto länger werden die eigenen Broadcast-Intervalle. Eine weitere Variante der Informationsverbreitung wird in [XOW04] vorgestellt und als opportunistischer Austausch bezeichnet. In [WXY04] erweitern die Autoren ihr Modell auf Road-Side-Units (RSU). Allerdings wird in beiden Untersuchungen nicht genau beschrieben, wie Fahrzeuge die geeigneten Sendezeitpunkte berechnen. Auch wird nicht erläutert, wie Fahrzeuge die Existenz von anderen Fahrzeugen erkennen können und wie der Typ und die Menge der zwischen den Fahrzeugen auszutauschenden Information ausgehandelt wird. In einer weiteren Studie [WX04] wird daher als alternative Lösung zum opportunistischen Austausch der Ansatz der periodischen Informationsverbreitung präferiert.

### 2.3.3.2. Bandbreite

Die erzeugte Netzlast bei konstanter Größe der Datenpakete steigt mit steigender Sendefrequenz an. Weil es in WLAN-Netzen keinen exklusiven Zugriff auf das Medium gibt und die zur Verfügung stehende Bandbreite zwischen den sendewilligen Knoten aufgeteilt wird, reduzieren hohe Wiederholraten und eine hohe Anzahl von Fahrzeugen die pro Fahrzeug zur Verfügung stehende Bandbreite. In einer allgemeineren Betrachtung in [GK00] wird eine theoretische Analyse der zur Verfügung stehenden Bandbreite pro Knoten für dezentrale Funknetze mit einheitlichen Funkreichweiten durchgeführt. Es wird gezeigt, dass die pro Knoten zur Verfügung stehende Bandbreite bei einer Datenübertragung von einem Knoten zu einem beliebigen Knoten in  $\mathcal{O}(\frac{1}{\sqrt{n}})$  liegt. Damit wird theoretisch bewiesen, dass bei steigender Knotenzahl, die Aufteilung der Bandbreite zwischen den Nutzern die Übertragungsqualität stark einschränkt. Eine simulative Analyse des Bandbreiterverhaltens in statischen WLAN-basierten Funknetzen wird in [LBC<sup>+</sup>01] durchgeführt. [CCG98] geht auf Eigenschaften des MAC-Protokolls ein und zeigt Optimierungsmöglichkeiten auf, um den Durchsatz des IEEE 802.11 Protokolls zu erhöhen. Die positiven Einflüsse von

Mobilität auf die Bandbreite werden in [GT02] dargestellt. Schließlich wird in [Waa06] ein Algorithmus zur optimalen Ausnutzung der beschränkten Bandbreite bei Netztopologien mit mehreren tausend Knoten geliefert. Hierbei wird zuerst der Zusammenhang zwischen Netztopologie und Sendeleistung untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden Algorithmen erarbeitet, die es ermöglichen, die Kapazität des Netzwerks einer bekannten Topologie mit bekannt hoher Netzkapazität anzunähern. In [NTS99] wird die durch Fluten von Information entstehende Verringerung der Netzkapazität als „Broadcast-Storm-Problem“ definiert. Zur Verbesserung der Kapazität des Funkkanals werden die, die Kapazität einschränkenden Faktoren: redundante Broadcasts, Contention und Collision identifiziert. Zur Reduzierung des Einflusses dieser Faktoren werden verschiedene Strategien vorgestellt und deren positive Effekte auf die Kapazitätssteigerung simulativ ermittelt. Ein Vergleich verschiedener auf Broadcast basierender Informationsverbreitungsprotokolle wird in [WC02] durchgeführt. Es wird sowohl die Verzögerung bei einer Ende-zu-Ende Kommunikation als auch das Bandbreiteverhalten des 802.11 MAC Protokolls der unterschiedlichen Verfahren analysiert. In [HBR03] wird ein Verfahren zur Informationsverbreitung für mobile Ad-Hoc-Netze vorgestellt. Das besondere an diesem Verfahren ist, dass einzelne Knoten in direktem Austausch die zum nächsten Sendezeitpunkt zu versendende Information aushandeln.

Zur effizienten Ausnutzung des Funkkanals in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen wird z.B. in [SFUH04] das Speed Dependent Random Protocol (SDRP) vorgeschlagen. In diesem Protokoll stellt sich die Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Broadcasts in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit ein. Weitere Arbeiten zur effizienten Ausnutzung des Funkkanals beschäftigen sich mit der Aggregation von Daten. Insbesondere wird versucht Information so zusammenzufassen, dass sich der Informationsgehalt für den Fahrer nicht reduziert. In [NDLI04] werden Metriken definiert, auf deren Basis die zu aggregierenden Einzelinformationen selektiert werden. Eine Metrik ist beispielsweise die Auswahl der Information, die relativ betrachtet ihren Ursprung am entferntesten zu dem versendenden Fahrzeug hat. Diese Metrik hat das Ziel, die Information in entfernte Gebiete zu verteilen. Als eine weitere Strategie zur effizienten Ausnutzung des Funkkanals wird Aggregation betrachtet. Die in dieser Arbeit genutzte Quad-Tree Struktur zur Aggregation von Parkrauminformation wird in [TFW<sup>+</sup>06] für den Design eines skalierbaren Multi-Cast Protokolls genutzt. Weitere Möglichkeiten der Aggregation sind probabilistische Aggregationsverfahren [LSM07] und cluster-basierte Aggregationsverfahren [IW07].

Die Anwendung des Prinzips der dezentralen, periodischen Verbreitung von Verkehrsinformation durch Empfangen, Aggregieren und Weiterleiten wird auch in [WER<sup>+</sup>03],

[GIO04], [DJ07] und in [SFUH04] genutzt, um Information mit geringem Bandbreitenbedarf zwischen Fahrzeugen auszutauschen. Diese Verfahren sind von ihrem Ansatz her dem in dieser Arbeit genutzten Verfahren ähnlich, nutzen aber andere Methoden zur Informationsaggregation. Gemeinsam ist, dass durch die Übertragung individuelle Verkehrslagebilder entstehen und keine explizite Verkehrslenkung stattfindet. Fahrzeuge können autonom entscheiden, wie sie auf die Verkehrssituation bzw. die empfangene Information reagieren.

## 2.4. Möglichkeiten der Markteinführung

Mögliche Markteinführungsstrategien für Systeme der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind in [MML05] dargestellt. Tabelle 2.1 gibt einen Ausschnitt dieser Studie wieder und stellt die notwendige Zeit zur Erreichung von Ausstattungsdaten in Deutschland dar. Diese Ausstattungsdaten bilden die Ausgangswerte der simulativen Untersuchung in dieser Arbeit. Mittels der Ergebnisse der simulativen Untersuchung, in der die Werte für definierte Kriterien (z.B. das Alter oder die Verbreitungsentfernung) abhängig von der Ausstattungsrate betrachtet werden, kann die Qualität der Parkrauminformation und damit der erwartete Kundennutzen bezogen auf die einzelnen Jahre nach Markteinführung eingeschätzt werden.

Fahrzeugklasse	1%	3%	5%	8%	10%	20%
Alle Neufahrzeuge	0.15	0.45	0.75	1.2	1.5	3
Alle Neufahrzeuge VW, BMW, Daimler sowie alle Mittel- und Oberklassefahrzeuge und LKW anderer OEM	0.3	0.9	1.5	2.4	3	6
Alle Neufahrzeuge mit Navigationssystem	0.6	1.8	3	4.8	6	12

Tabelle 2.1.: Erreichung von Ausstattungsdaten nach Markteinführung (in Jahren)

Laut [MML05] gibt es zwei Möglichkeiten der Markteinführung für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation: entweder durch Verordnung über EU-Regularien oder der Einführung als gesamtheitliches Paket, welches die Umsetzung von Anwendungen der Kategorien Verkehrssicherheit (z.B. Gefahrenwarnung), der Verkehrseffizienz (z.B. Stauendwarnung) und des Fahrkomforts (z.B. Internetzugang) ermöglicht.

Die europäische Automobilindustrie verfolgt beide Wege zur Erreichung der kritischen Masse ausgestatteter Fahrzeuge. Zum einen werden in enger Zusammenarbeit mit der EU Rahmenbedingungen für die Standardisierung der Architektur, der Frequenzen und das

Kommunikationsprotokoll festgelegt. Zum anderen unterstützt die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikationsarchitektur (siehe dazu Abbildung [2.2](#)) neben der europäischen Variante von IEEE 802.11p auch WLAN nach dem Standard IEEE 802.11a/b/g und zellularen Mobilfunk. Diese breite technische Grundlage ermöglicht die gleichzeitige Umsetzung von Anwendungen verschiedener Kategorien auf einer technischen Plattform und damit auch die Erarbeitung von verschiedenen Einführungsstrategien.

# 3. Informationsverbreitung

## 3.1. Problembeschreibung

In diesem Kapitel wird der erste Teil des Algorithmus, die Informationsverbreitung, erläutert [CGM06]. Die Hauptaufgabe ist die Erarbeitung einer Informationsverbreitungsstrategie unter den Kriterien geringer Bandbreitenbedarf und Nutzen für den Fahrer.

- **Geringer Bandbreitenbedarf:** Die Informationsverbreitungsstrategie sollte den Funkkanal im Hinblick auf zunehmende Nutzerzahlen und parallel laufenden Anwendungen effizient nutzen. Hieraus resultiert die Forderung einer Auslegung des Systems mit geringer Bandbreitenanforderung, d.h. einer steigenden Anzahl an Informationserzeugern (Fahrzeuge und Parkautomaten) steht ein akzeptabler Anstieg der Netzlast gegenüber.
- **Nutzenmaximale Verbreitung der Information:** Es gilt die Annahme, dass Information an der Stelle zur Verfügung stehen muss, an der sie gebraucht wird. Abgebildet auf den Parksuchverkehr bedeutet das, dass Fahrzeuge fein aufgelöste Information über ihr direktes Umfeld erhalten sollen. Weil der Nutzen einzelner Parkrauminformation mit steigender Entfernung abnimmt, kann die Genauigkeit der Parkrauminformation mit steigender Entfernung zum Zielparkplatz abnehmen.

## 3.2. Funktionsweise

Der Algorithmus zur dezentralen Verbreitung und Bewertung von Parkrauminformation basiert auf dem Kommunikationsstandard Wireless-LAN IEEE 802.11 (WLAN) [IEE99]. Mit WLAN ausgestattete Fahrzeuge bilden lokale Datennetze und tauschen innerhalb ihrer Kommunikationsradien Parkrauminformation aus. Fahrzeuge sind Informationssenken und Informationsrelais. Parkautomaten sind Informationsquellen. Diese detektieren und senden die Belegung der von ihnen beobachteten Stellfläche an vorbeifahrende Fahrzeuge weiter. Sowohl Fahrzeuge als auch Parkautomaten verbreiten Parkrauminformation über

periodischen Broadcast. Im Gegensatz zu Parkautomaten, die Information ausschließlich versenden, gleichen Fahrzeuge empfangene Information mit der eigenen Datenbasis ab. Falls die empfangene Information aktueller als bereits vorhandene ist, findet eine zeitstempelbasierte Ersetzung statt.

Parkplatz-suchende Fahrzeuge konkurrieren um die Ressource Parkplatz. Es werden zwei Ressourcentypen unterschieden: Atomare Ressourcen (Atome) und aggregierte Ressourcen (Aggregate). Atome stellen die kleinste verfügbare Informationseinheit dar und beinhalten die von einem Parkautomaten ermittelte Belegungsinformation. Die Ist-Zustände werden in sogenannten Ressource-Reports versendet. So enthält z.B. ein Ressource-Report für ein Atom folgende Information: Parkplatz „Am Radeklint“, Belegung 14 Fahrzeuge, Kapazität 30 Fahrzeuge, Datum 03.03.2008, Zeit 9:25, Zugangsrate  $\lambda$ , Abgangs- bzw. Parkrate  $\mu$ . Ein Aggregat fasst im Vergleich zu einem Atom Information mehrerer Parkautomaten zusammen.

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, teilt der Algorithmus ein Stadtgebiet mit Hilfe einer Quad-Tree-Struktur in ein hierarchisches Gitternetz auf (siehe dazu [TFW<sup>+</sup>06]). Die Teilbereiche einer Hierarchieebene des Quad-Trees sind disjunkt. Jede Hierarchieebene des Quad-Trees definiert ein Aggregatelevel und damit ein Granularitätsniveau für die zusammengefasste Parkrauminformation. Je höher das Level eines Aggregats ist, desto größer ist das abgedeckte Gebiet. Aggregate eines höheren Levels werden immer aus Aggregaten des direkt darunterliegenden Levels erzeugt.

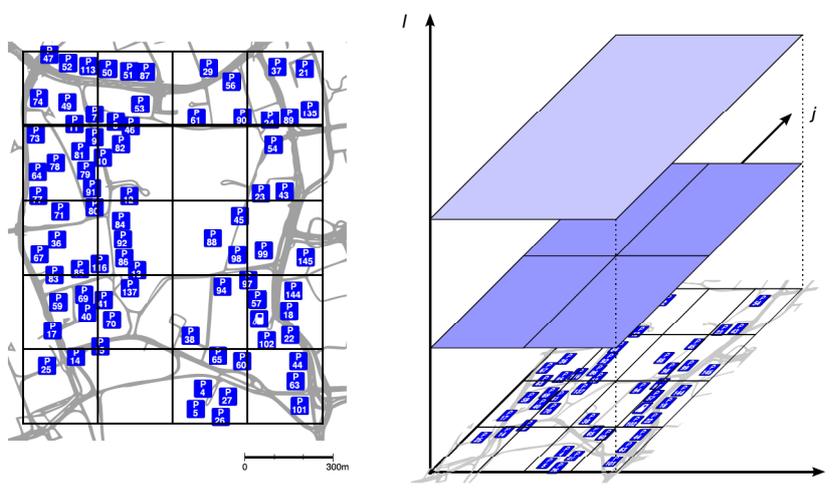


Abbildung 3.1.: Aufteilung des Stadtgebiets mittels Quad-Tree Struktur

Die Verteilungsstrategie legt fest, welche der in den Fahrzeugen vorhandenen Informationen (Atome und Aggregate) zum nächsten Sendezeitpunkt zur Weiterleitung ausgewählt

werden. Die Verteilungsstrategie folgt dem Grundsatz, dass Parkrauminformation in der direkten Umgebung, d.h. um die Position eines Fahrzeugs die höchste Relevanz für dieses Fahrzeug besitzt und damit möglichst genau sein sollte. Daher wird Information so verteilt, dass die Genauigkeit der Parkrauminformation in den Fahrzeugen mit steigender Entfernung abnimmt. Es gilt: Der maximale Nutzen für Parkraum-suchende Fahrzeuge entsteht dann, wenn diese periodisch fein granulare Information über ihr direktes Umfeld und ungenaue Parkrauminformation über entferntere Gebiete erhalten. Mit fein granularer, genauer Information können Parkflächen in direkter Umgebung gezielt ausgewählt werden. Empfangene Aggregate liefern Information über die Belegungen entfernter Parkgebiete. Die frühzeitige Identifizierung dieser Gebiete ermöglicht eine erste Orientierung, um mittels der mit abnehmender Distanz genauer werdenden Belegungsinformation den anzufahrenden Parkplatz bedarfsgerecht auswählen zu können.

Das periodische Erzeugen von Atomen und Aggregaten sowie deren periodisches Versenden und die Verteilungsstrategie stellen die effiziente Informationsverbreitung sicher. Durch das periodische Sendeintervall und die Aggregationsstrategie wird der Funkkanal hinsichtlich Bandbreite effizient ausgenutzt und gleichzeitig Parkrauminformation mit hohem Nutzen für den Fahrer verbreitet.

Bedingt durch niedrige Ausstattungsraten existieren vor allem in der Einführungsphase zu wenig Fahrzeuge zur Weiterleitung der Information [MML05]. Das hat zum Ergebnis, dass Information verzögert übertragen wird und zum Empfangszeitpunkt nicht mehr den aktuellen Belegungszustand an den Parkplätzen wiedergibt. Das Parkrauminformationssystem hält zum Umgang mit nicht aktueller Parkrauminformation zwei aufeinander aufbauende Maßnahmen bereit: Zum einen werden durch die Bildung von Aggregaten zeitlich stabilere Gebietsinformationen erzeugt. Diese geben, auch wenn sie zum Empfangszeitpunkt nicht aktuell und genau sind, den ungefähren Parkzustand entfernter Gebiete wieder und ermöglichen damit eine erste Orientierung. Je größer das zusammengefasste Gebiet bzw. das Level des Quad-Trees, desto größer wird das zusammengefasste Gebiet und desto weiter wird diese Information verbreitet. Zum anderen bewertet ein probabilistisches Prognoseverfahren die Parkrauminformation und ermöglicht es, den Belegungszustand der Parkflächen zum Zeitpunkt des Eintreffens vorauszuberechnen. Hierzu werden die Parkflächen als Wartesystem modelliert. Mittels der Zu- und Abgangsraten der Fahrzeuge an den einzelnen Parkflächen ( $\lambda$ ,  $\mu$ ), die Teil der von den Parkautomaten versendeten Belegungsinformation sind, errechnet das auf Markov-Ketten [Bei97] basierende Verfahren einen Vektor mit Einzelwahrscheinlichkeiten für jeden Belegungszustand der Atome und Aggregate zum Ankunftszeitpunkt aus. Nach Anwendung der Prognosemethodik in der das Informations-

alter und die geschätzte Restfahrzeit zum Zielparkplatz berücksichtigt werden, kennen Fahrzeuge die wahrscheinlichsten Belegungen der für sie in Frage kommenden Parkflächen zum individuellen Ankunftszeitpunkt. Die Prognosemethodik stellt den zweiten Teil des Algorithmus dar.

### 3.3. Konzept der Informationsverbreitung

In Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen bilden Fahrzeuge durch spontane Vernetzung untereinander das Netzwerk zur Datenübertragung. Sie agieren zeitgleich als Netzwerkknoten, Informationserzeuger und Informationsverbraucher. Als Netzwerkknoten, weil sie Information über ihre Funkschnittstelle an andere Fahrzeuge oder an die Infrastruktur weiterleiten, als Informationserzeuger, weil sie über ihre Sensorik Information aus ihrer Umwelt wahrnehmen, diese mit Hilfe vorhandener Information zu neuer Information weiterverarbeiten und als Informationsverbraucher, weil jedes Fahrzeug die erzeugte und empfangene Information zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Verkehrseffizienz und des Fahrkomforts einsetzt. Ein weiterer Vorteil der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ist, dass Information zwischen zwei Fahrzeugen, die in Sende-/Empfangsreichweite sind, mit sehr geringer Verzögerung ausgetauscht werden kann. Eine ausreichende Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge vorausgesetzt, kann Information in entferntere Bereiche über die sogenannte Multi-Hop-Technik verbreitet werden. Die Grundidee der Multi-Hop-Technik ist, dass Fahrzeuge als Zwischenknoten agieren und empfangene Nachrichten von Fahrzeug-zu-Fahrzeug bis in das Zielgebiet weiterleiten. Durch die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen mittels der Multi-Hop Technik ergeben sich neue Möglichkeiten zur Übertragung von Verkehrsinformation. Information über Tagesbaustellen, Unfälle, Ampelphasen, freie Parkplätze, Staumeldungen und temporäre Strassensperrungen können in einem festdefinierten geographischen Gebiet mit geringer Verzögerung gezielt verbreitet und gehalten werden. Durch die periodische Verbreitung von Parkplatzzuständen kann den betreffenden Fahrzeugen über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation mitgeteilt werden, ob eine vorher als frei erkannte Parkfläche aktuell belegt ist oder ob sich ein Stau zwischenzeitlich aufgelöst hat. Die Verbreitungsmethodik im dezentralen Parkrauminformationssystem erfolgt nach der Multi-Hop-Technik. Fahrzeuge und Parkautomaten sind proaktive dezentrale Elemente des Fahrzeug-Fahrzeug-Netzes. Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, zwischen Fahrzeugen und Parkautomaten und damit auch die Verbreitung der Information verlaufen unkoordiniert und unkontrolliert. Durch den physikalischen Transport der Information durch Fahrzeugbewegungen und dem periodischen Broadcast wird Information an unter-

schiedlichen geographischen Positionen verfügbar. Im Idealfall resultieren, ähnlich wie bei epidemischen Algorithmen [Yam05], sehr hohe Verbreitungsgeschwindigkeiten im gesamten Stadtgebiet. Der Effekt des Ausfalls einzelner Fahrzeuge, durch z.B. Ausschalten des Motors oder durch Verlassen des Stadtgebiets, reduziert zwar die Verbreitungsgeschwindigkeit der Information anteilig, der Informationsverlust kann aber vernachlässigt werden, weil die Anzahl ausfallender Fahrzeuge bezogen auf das Gesamtsystem sehr gering ist. Zur Sicherstellung der Verbreitung der Information und der Aktualität der Information im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz ist das Broadcast-Intervall geeignet zu wählen.

## 3.4. Beschreibung des Modells

Das dezentrale Parkrauminformationssystem besteht aus den Elementen: Informationserzeuger und -verbraucher, dem virtuellen topologieunabhängigen Gitternetz, den Ressourcen und den Strategien zur Informationsverteilung und -ersetzung.

### 3.4.1. Informationserzeuger: Infrastruktur und Fahrzeuge

Die Infrastruktur zur Umsetzung des Parkrauminformationssystems besteht aus Parkautomaten, die mit einer WLAN-Funkeinheit ausgestattet sind. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Parkautomaten den Belegungszustand der ihr zugeordneten Parkflächen detektieren können. Verschiedene Möglichkeiten zur Detektion von Parkflächen werden in Projekten, wie z.B. Smartpark [GP] untersucht. Kommerziell verfügbare Detektionssysteme, deren Einsatz zur Beobachtung des Parksuchverkehrs denkbar sind, sind z.B. Kamerasysteme, Induktionsschleifen, RFID-Tags oder Schranken an Parkflächen. Parkautomaten speisen detektierte Belegungsinformation periodisch in das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz ein. Fahrzeuge empfangen und integrieren die Parkrauminformation in ihren lokalen Speicher (Cache) und leiten ihre aktualisierte Datenbasis an andere Fahrzeuge über die Multi-Hop-Technik weiter.

### 3.4.2. Virtuelles Topologieunabhängiges Gitternetz

Die in Abbildung 3.1 dargestellte Quad-Tree Struktur bildet das Referenzkoordinatensystem des Gitternetzes zur Erzeugung und Verbreitung von Atomen und Aggregaten. Jede Parkrauminformation wird basierend auf der Position eines Parkautomaten eindeutig einem Teilbereich des Quad-Trees zugeordnet. Die Quad-Tree Struktur ist unabhängig von Straßentopologien und kann dadurch in jeder beliebigen Stadt angewendet werden.

Im Folgenden wird der strukturelle Aufbau des Gitternetzes vorgestellt. Der Ursprung wird durch den Punkt  $(0, 0)$  des kartesischen Koordinatensystems mit Abszisse  $i$ ,  $i > 0$  und Ordinate  $j$ ,  $j > 0$  definiert. Die Position des Punktes  $(0, 0)$  des Gitternetzes kann beliebig gewählt werden. Die Zellen des Grids verteilen sich entlang der positiven  $x$ - und  $y$ -Achse des Koordinatensystems. Eine zusätzliche dritte Dimension  $l$ ,  $l > 0$  definiert die Hierarchieebene bzw. das Aggregationslevel, durch welche die Granularität der zusammengefassten Parkrauminformation eingestellt wird. Bezogen auf ein Level- $l$  definiert jedes Quadrat im zweidimensionalen Raum eine Zelle mit fester Kantenlänge  $k(l)$ . In Abbildung 3.2 sind Zellen der Hierarchieebenen 0, 1 und 2 dargestellt. Die unterste Hierarchieebene des Gitternetzes besteht aus  $4 \times 4$  Level-0 Zellen. Diese Zellen werden sukzessiv zu Level-1 bzw. zu Level-2 Zellen zusammengefasst.

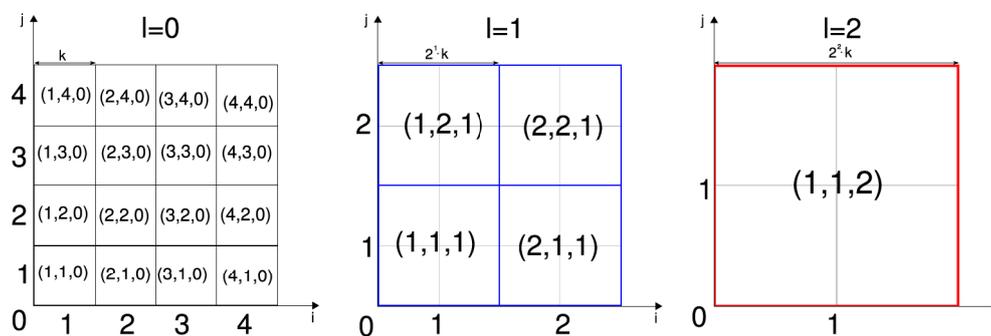


Abbildung 3.2.: 2-Dimensionale Darstellung des Gitternetzes

Diese Konstellation ermöglicht die eindeutige Bezeichnung jeder Zelle des Gitternetzes durch das Tripel  $(i, j, l)$ . Ein Aggregat des Levels  $(l + 1)$  führt immer vier Aggregate des Levels  $(l)$ ,  $l \geq 0$  zusammen. Der Aggregationsvorgang startet mit Atomen und wird bis zum maximalen Aggregationslevel  $l_{max}$  fortgeführt. Theoretisch gesehen kann die geographische Ausdehnung des Grids und die Granularität der Parkrauminformation beliebig sein. Daher sollte bei spezifischen Umsetzungen die maximale Ausdehnung des Grids durch Festlegung eines maximalen Levels  $l_{max}$  (z.B. Eingrenzung des maximalen Parkbereichs im Stadtgebiet) und die Granularität der Parkrauminformation durch geeignete Wahl der Kantenlänge des kleinsten Levels  $k(0)$  eingestellt werden.

Die Kantenlänge einer Zelle  $k(l)$  für ein beliebiges Level- $l$  mit  $l \geq 0$  berechnet sich durch

$$\begin{aligned} k(l) &= 2 \cdot k(l-1) & (l > 0) \\ &= 2^l \cdot k(0) \end{aligned} \quad (3.1)$$

In Abbildung 3.3 ist ein dreidimensionales Gitternetz mit 4 Hierarchieebenen dargestellt. Graphentheoretisch betrachtet ist durch das Aggregat  $(i, j, l_{max})$  die Wurzel und durch  $l_{max}$  die Tiefe des aufgespannten Baumes definiert.

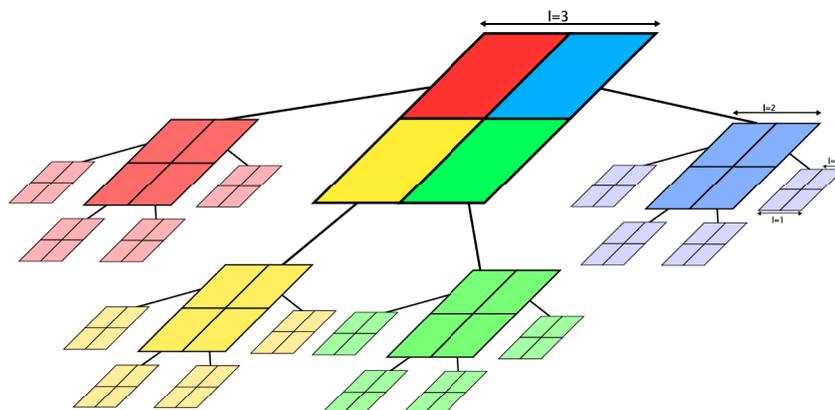


Abbildung 3.3.: Beispiel Quad-Tree mit maximalem Level  $l_{max} = 3$  und 85 Zellen

Die Anzahl der Zellen auf einer Hierarchieebene  $l$  berechnet sich durch

$$4^{l_{max}-l} \quad (3.2)$$

Die maximale Anzahl aller Aggregate berechnet sich aus der Summe aller Aggregate über alle Level.

$$\sum_{i=0}^{l_{max}} 4^{l_{max}-i} \quad (3.3)$$

Zusammengefasst ist das virtuelle topologieunabhängige Gitternetz ein dreidimensionales Hilfsmittel zur eindeutigen Aufteilung beliebiger Straßentopologien und zur Definition von Hierarchiebeziehungen zwischen gebietsweise aggregierter Parkrauminformation.

### 3.5. Ressourcen

Als Ressource wird jede Art von Information definiert, die für Fahrzeuge von Interesse ist. Ressourcentypen können in sich zeitlich-räumlich verändernde Ressourcen (z.B. die Belegungssituation von Parkflächen, Stau, Tagesbaustellen) und sich ausschließlich zeitlich verändernde Ressourcen mit festem Ortsbezug (z.B. Benzinpreise an einer Tankstelle) unterteilt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines dezentralen Parkrauminformationssystems. Daher wird im Folgenden der Begriff Ressource als Über-

begriff für Atome und Aggregate benutzt. Ein Fahrzeug allokiert durch das Befahren einer Stellfläche eine Parkplatzressource und gibt diese beim Verlassen wieder frei. In einem Ressource-Report, also einem Bericht über den Zustand von Ressourcen, werden Belegungsinformationen gekapselt. Zwischen Fahrzeugen und zwischen Parkautomaten und Fahrzeugen werden Ressource-Reports ausgetauscht. Ein Ressource-Report gibt die konkrete Ausprägung eines Atoms oder Aggregats, also den Ist-Zustand einer Parkfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder.

### 3.5.1. Atomare Information

Ein Atom bzw. ein Ressource-Report zu einem Atom enthält die von einem Parkautomaten erzeugten Belegungsdaten. Diese sind die Parkplatz ID, die Parkplatzposition, die aktuelle Belegung, die Kapazität des Parkplatzes, der Zeitpunkt der Versendung sowie die Ankunftsrate  $\lambda$  und die Parkrate  $\mu$  der Fahrzeuge an den Parkplätzen. Die Ankunfts- und die Parkrate sind zur Anwendung des in Abschnitt 4.2 entwickelten Prognosemodells notwendig.

### 3.5.2. Aggregierte Information

Die Zusammenfassung der Belegungsinformation für einen Teilbereich einer beliebigen Hierarchiestufe ( $l \geq 0$ ) des Quad-Trees wird als Aggregation bezeichnet. Im Gegensatz zu Parkautomaten wird die Position eines Aggregats durch den Mittelpunkt des von diesem Aggregat abgedeckten Bereichs definiert. Ein Ressource-Report zu einem Aggregat enthält die gleichen Informationselemente wie ein Atom. Lediglich die Berechnungen der Parameter unterscheiden sich. So ist die Position eines Aggregats durch seinen Mittelpunkt definiert.

### 3.5.3. Vorgehen bei der Erzeugung von Aggregaten

Aggregate werden immer zum Broadcastzeitpunkt  $t_{br}$  erzeugt. Die Zeit zwischen zwei Broadcastzeitpunkten in einem Fahrzeug wird zum Informationsempfang genutzt. Je aktueller die empfangene Parkrauminformation zwischen zwei Broadcastzeitpunkten ist, desto höher ist der Nutzen neu erzeugter Aggregate.

Die Erzeugung von Aggregaten folgt einem mehrstufigen inkrementellen Prozess und beginnt mit der Erzeugung von Level-0 Aggregaten aus den in den Fahrzeugen vorhandenen

Atomen. Zum Zeitpunkt  $t_{br}$  werden schrittweise alle Aggregate mit Level  $> 0$  aus den jeweils ein Level niedrigeren Aggregaten erzeugt. Die Schritte im Einzelnen sind:

1. Abbilden der vorhandenen Atome auf zugehörige Level-0 Zellen
2. Erzeugen von Aggregaten für alle Level durch Zusammenführen der Aggregate eines unteren Levels bzw. der Atome bei der Erzeugung von Level-0 Aggregaten.
  - a) Berechnung der Kapazität: Die Kapazität des Level- $l$  Aggregats ist die Summe der Einzelkapazitäten der Aggregate des Levels  $(l - 1)$  bzw. die Summe der Einzelkapazitäten der Atome bei Erzeugung eines Level-0 Aggregats.
  - b) Berechnung des neuen Zeitstempels: Der Zeitstempel  $t_{max}$  des jüngsten Aggregats des Levels  $(l - 1)$  bzw. des jüngsten Atoms bei der Erzeugung eines Level-0 Aggregats ist der Zeitstempel des neu erzeugten Aggregats.
  - c) Berechnung der Belegung:
    - i. Vor dem Zusammenfassen werden die Belegungen der Aggregate des Levels  $(l - 1)$  bzw. der Atome auf Basis der Werte  $\lambda$  und  $\mu$  einzeln auf den Zeitpunkt  $t_{max}$  prognostiziert. Die Belegung eines Aggregats bzw. eines Atoms wird nach Anwendung der Prognosemethodik auf den wahrscheinlichsten Belegungszustand zum Zeitpunkt  $t_{max}$  gesetzt (siehe dazu Abschnitt 4.4.2).
    - ii. Die Belegung für das neu erzeugte Aggregat des Levels  $l$  ergibt sich aus der Summe der prognostizierten Belegungszustände zusammengefasster Aggregate des Levels  $(l - 1)$ .
  - d) Berechnung der Werte  $\lambda$  und  $\mu$  zum Zeitpunkt  $t_{max}$  für das neu erzeugte Aggregat (siehe dazu Abschnitt 4.4.2).

## 3.6. Verteilungsstrategie für Atome und Aggregate

Ziel der Informationsverbreitung ist es, alle Atome und Aggregate im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz mit geringem Bandbreitenbedarf und mit maximalem Nutzen für Fahrzeuge zu verteilen. Die Darstellung der notwendigen Parameter und deren Einbettung in eine Datenstruktur erfolgt in Abschnitt 3.7.

Die für den Fahrer nutzenmaximale Verbreitung der Parkrauminformation erfolgt nach der Annahme, dass lokale Information höchste Relevanz besitzt. Daraus folgt, dass Atome

möglichst lokal und Aggregate abhängig vom Level global verbreitet werden müssen. Die levelabhängige Erhöhung der Lokalität verbreiteter Information wird durch Anwendung der Verteilungsstrategie erreicht. Die Verbreitungsentfernung einer Parkplatzinformation hängt vom Level der Ressource, der Kantenlänge des Level-0 Aggregats  $k(0)$  und der aktuellen Fahrzeugposition ab. Die Grenzen der Verbreitung können durch Festlegung der Kantenlänge für das Level-0 Aggregat  $k(0)$  beliebig bestimmt werden. Je größer  $k(0)$  gewählt wird, desto weiter verbreiten sich die Ressourcen im Stadtgebiet. Zum Broadcastzeitpunkt  $t_{br}$  werden die Elemente aus dem Fahrzeugcache nach folgendem Algorithmus ausgewählt:

1. Für alle Level- $l$ ,  $l \geq 0$ 
  - a) Definiere um die aktuelle Fahrzeugposition ein Quadrat mit Kantenlänge  $k(l)$  als virtuellen Erfassungsbereich
  - b) Markiere für  $l = 0$  alle Atome, sonst alle Aggregate der direkt untergeordneten Hierarchieebene für ein übergeordnetes Aggregat des Levels  $(l + 1)$ , welche von dem virtuellen Erfassungsbereich abgedeckt werden und im Fahrzeugspeicher vorhanden sind
2. Versende Liste markierter Elemente

Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, hat der hell-grüne Erfassungsbereich die Kantenlänge  $k(0)$ , der hell-rote Erfassungsbereich die Kantenlänge  $k(1)$  und der hell-rote Bereich die Kantenlänge  $k(2)$ . Das Fahrzeug bildet den Mittelpunkt aller virtuellen Erfassungsbereiche. Ausgehend von der Position des Fahrzeugs werden nun alle Atome, die in den hell-grünen Bereich, alle Level-0 Aggregate, die in den hell-roten Bereich und alle Level-1 Aggregate, die in den hell-blauen Bereich fallen, markiert und zum Broadcastzeitpunkt  $t_{br}$  versendet. Damit wird sichergestellt, dass die Ressourcen in einem höheren Level abhängig von der relativen Position der Fahrzeuge verbreitet werden. Weil die maximale Levelanzahl  $l_{max}$  und die Anzahl der Aggregate im Szenario insgesamt von  $k(0)$  abhängt, wird die Verbreitungsentfernung der Ressourcen über den Parameter  $k(0)$  gesteuert. Wird  $k(0)$  zu klein gewählt, entstehen sehr viele Aggregate auf einer Hierarchieebene. Obwohl die Verbreitung der Information feingranularer wird, geht dies zu Kosten der Netzlast. Im Extremfall resultiert aus einem sehr klein gewählten  $k(0)$  eine sehr hohe Aggregatedichte ohne Mehrnutzen für die Fahrzeuge. Wird  $k(0)$  zu groß gewählt, bilden sich zu wenige Level. Im Extremfall gibt es nur eine Hierarchieebene, die ebenfalls ohne Mehrnutzen permanent versendet wird. Ein richtiger Wert für  $k(0)$  ist aus Fahrersicht zu ermitteln.

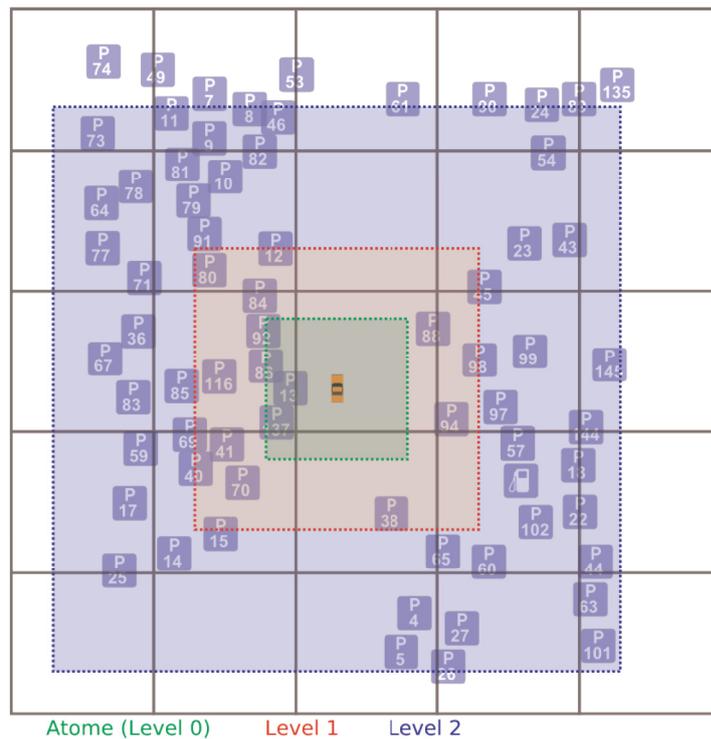


Abbildung 3.4.: Nutzenmaximale Informationsverbreitung aus Fahrersicht

Unter der Annahme, dass Atome bis zu einer Entfernung von ca. 300 Metern relevant sind, wird zur Evaluierung des Algorithmus ein  $k(0)$ -Wert von 300 Metern gewählt. Dieser Wert ist auch aus Sicht der WLAN-Reichweite (siehe dazu Tabelle 5.1) vorteilhaft, da damit auch die maximale Reichweite des Trägermediums berücksichtigt wird. Bei sehr hoher Dichte von betrachteten Parkautomaten bzw. Stellflächen kann dieser Wert angepasst werden.

### 3.7. Datenstrukturen für Atome und Aggregate

In diesem Abschnitt wird die Datenstruktur der Ressourcen beschrieben. Alle Atome und Aggregate werden durch das in Abbildung 3.5 dargestellte Paketformat gekapselt. Dieser beginnt mit einem 8-Bit Feld, in dem der Pakettyp beschrieben wird. Der Pakettyp definiert, ob es sich um ein Atom oder Aggregat handelt. Das darauf folgende 16-Bit Feld gibt die Anzahl der zusammengefassten Ressourcen wieder. Die Größe  $s$  (size) der Resource-Reports ist für alle Atome und Aggregate gleich und beträgt 40-Byte. Ein Resource-Report beinhaltet folgende Datenelemente:

- ID: Eindeutiger Bezeichner des Parkplatzautomaten bzw. des Aggregats
- Zeitstempel
- Longitude und Latitude: Position des Parkautomaten bzw. des Aggregatmittelpunktes
- Kapazität und Belegung der Parkautomaten bzw. der Aggregate
- $\lambda$  und  $\mu$ : Ankunfts- und Bedienrate der Fahrzeuge an den Parkflächen

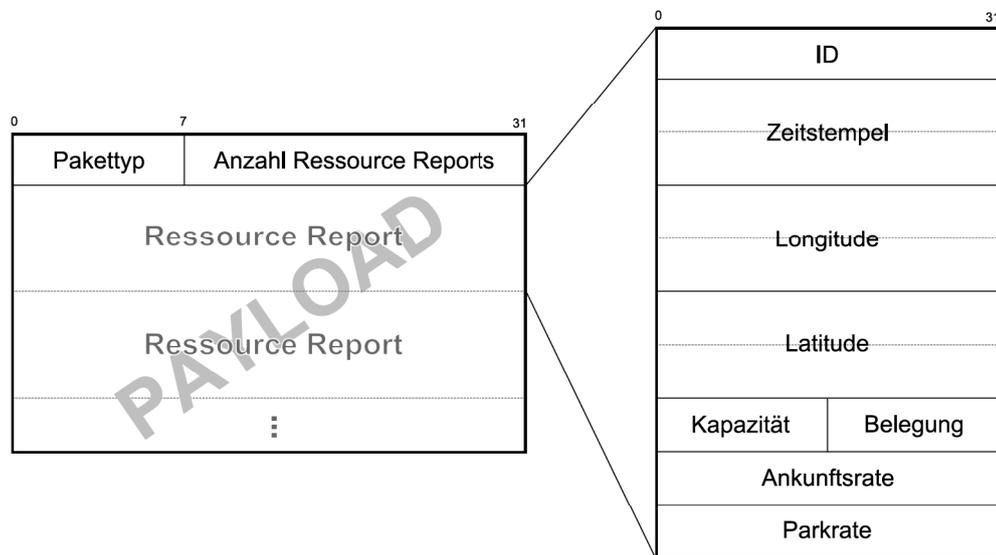


Abbildung 3.5.: Paketformat im dezentralen Parkrauminformationssystem

Die Größe  $s$  (size) eines Resource-Reports versendet durch einen Parkautomaten berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 s(\text{Resource-Report}) &= s(\text{MAC-Header}) + s(\text{IP-Header}) \\
 &\quad + s(\text{Anwendungsspezifischer Broadcast-Header}) \\
 &\quad + s(\text{Resource-Report}) \\
 &= 28 + 20 + 4 + 40 \\
 &= 92 \text{ bytes}
 \end{aligned}$$

Die Größe eines Broadcastpakets mit  $m$  gekapselten Ressource-Reports berechnet sich aus:

$$\begin{aligned} s(\text{Broadcastpaket}) &= s(\text{MAC-Header}) + s(\text{IP-Header}) \\ &\quad + s(\text{Anwendungsspezifischer Broadcast-Header}) \\ &\quad + (m \cdot s(\text{Ressource-Report})) \\ &= 28 + 20 + 4 + (m \cdot 40) \\ &= 52 + (m \cdot 40) \text{ bytes} \end{aligned}$$

Der WLAN-Standard IEEE 802.11 [IEE99] beschränkt die maximale Größe einer Message Transfer Unit (MTU) für ein MAC-Layer Frame auf 2312 Bytes. Falls die Größe eines Pakets diese überschreitet, wird die Information vor dem Versenden in Pakete der Größe  $\leq 2312$  Byte aufgeteilt. Der entwickelte Algorithmus fragmentiert die versendete Information selbstständig. Jedes Parkrauminformationspaket ist dadurch direkt nach dem Empfang interpretier- bzw. auswertbar.

### 3.8. Broadcast-Intervall

Zusätzlich zur Definition der Paketstruktur sind geeignete Broadcast-Intervalle zwischen Fahrzeugen (Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI)) sowie zwischen Fahrzeugen und den Parkautomaten (Parkautomat-Broadcast-Intervall (PBI)) zu ermitteln. Es kann zwischen zwei Extremfällen unterschieden werden:

1. Falls das FBI sehr klein gewählt wird, reduziert sich der Durchsatz des Funkkanals durch zu frequenten Informationsbroadcast vieler Netzteilnehmer signifikant.
2. Falls bei der Übertragung der Broadcastpakete das Broadcast-Intervall sehr groß gewählt oder ein Mindestschwellwert  $FBI_{min}$  überschritten wird, ist eine deutliche Verschlechterung der Informationsübertragung zu erwarten. Als Konsequenz steigt das durchschnittliche Informationsalter. Bei sehr langen Sendeintervallen erreicht die Information nicht mehr alle Fahrzeuge. Der natürliche Effekt, dass Fahrzeuge durch Verlassen des Stadtgebiets oder durch Abstellen des Fahrzeugs dem Fahrzeug-Fahrzeug-Netz Information entziehen, verstärkt sich.

Die Qualität der Informationsübertragung hängt neben dem FBI von den Parametern Ausstattungsrate, durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit, Straßentopologie und Eigenschaften des Funkkanals ab. Im Weiteren wird durch Diskussion der durchschnittlichen

Fahrzeuggeschwindigkeiten eine grobe Abschätzung für das Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen und zwischen Parkautomaten und Fahrzeugen hergeleitet.

### 3.8.1. Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen und Parkautomaten

Ein erster Wert für das Broadcast-Intervall zwischen Parkautomaten und Fahrzeugen, also dem Broadcast-Intervall der Parkautomaten (PBI), kann durch folgende Abschätzung erhalten werden:

Auf gerader Straße und einer WLAN-Reichweite von 300 Metern hat ein an einem Parkautomaten vorbeifahrendes Fahrzeug bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 40 km/h (entspricht ca. 11 m/s) eine maximale Kommunikationsdauer von ca. 54 Sekunden. Bedingt durch die komplexe Straßentopologie, die störenden Effekte auf dem Funkkanal und die unvorhersehbaren Fahrzeugbewegungen stellt dieser Idealwert lediglich eine obere Schranke für das PBI dar. Aus dieser Überlegung folgt, dass geeignete Werte zwischen  $0 < PBI \leq 54$  Sekunden liegen sollten, um ein vorbeifahrendes und mit WLAN ausgestattetes Fahrzeug zu erreichen.

### 3.8.2. Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen

Analog zur Abschätzung des PBI ist eine Abschätzung für das Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen, also für das Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI) möglich.

$$\begin{aligned} \text{FBI} &= \frac{2 \cdot r}{v_{rel}} & (3.4) \\ &= \frac{2 \cdot 300m}{2 \cdot 11 \frac{m}{s}} \\ &= 27s \end{aligned}$$

Auch hier erschweren Straßentopologie, Ausstattungsraten und Hindernisse die Informationsverbreitung. Daher kann auch aus dieser Überlegung lediglich abgeleitet werden, dass das Broadcast-Intervall zwischen Fahrzeugen nicht über 27s liegen sollte. Wegen der vielen Freiheitsgrade im Szenario kann der FBI-Wert nicht analytisch hergeleitet werden. Geeignete FBI-Werte und Abhängigkeiten zwischen den die Informationsverbreitung beeinflussenden Parametern werden aus diesem Grund in Abschnitt [6.3.1](#) simulativ ermittelt.

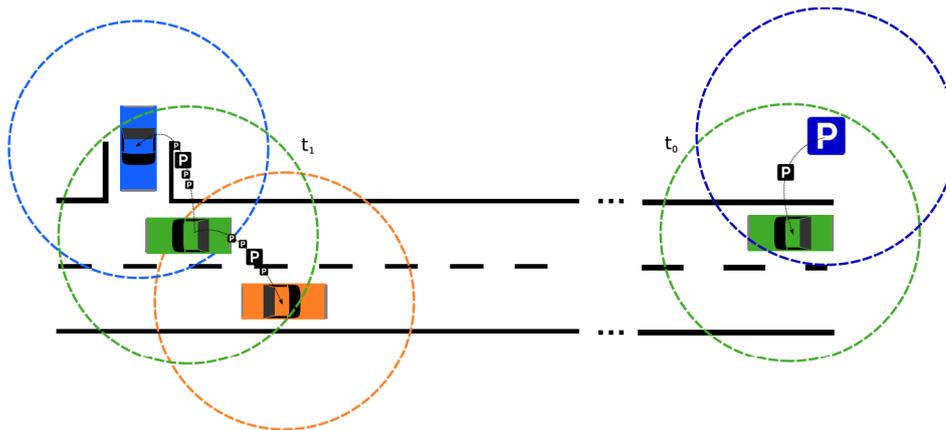


Abbildung 3.6.: Proaktive Informationsverbreitung: Das grüne Fahrzeug empfängt Belegungsinformation von einem Parkautomaten und leitet diese Information im nächsten Broadcast-Intervall weiter ( $t_1 > t_0$ )

### 3.9. Reaktive vs. Proaktive Verfahren

Abschließend werden reaktive und proaktive Verfahren dargestellt und deren Eignung zur Umsetzung des dezentralen Parkrauminformationssystems diskutiert.

**Reaktive Informationsbeschaffung** Mit reaktiver Informationsbeschaffung wird das aktive Anfragen nach Information über einen Anfrage-Antwort Mechanismus beschrieben. Einzelne Fahrzeuge fragen Informationen bei anderen Fahrzeugen über das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz an und erhalten sofern möglich eine Antwort von diesen. Für den Anwendungsfall der Parkplatzsuche bedeutet das, dass Fahrzeuge während des Vorbeifahrens Information bei einzelnen Parkautomaten anfragen und Parkautomaten nur nach erfolgter Anfrage eine Antwort zurück senden. Grundlegend ist, dass kein Austausch der Parkrauminformation ohne explizite Anfragen stattfindet. Eine Aktualisierung der Informationsbasis in den Fahrzeugen findet damit nur nach erfolgter Anfrage und empfangener Antwort statt.

Ein reaktiver Anfrage-Antwort Mechanismus am Beispiel von Parkrauminformation kann in drei Teilschritte untergliedert werden. Diese Teilschritte sind:

1. Lokalisieren eines Fahrzeugs im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz mit der gewünschten Information über die Zielparkplätze. Dies müsste, weil der aktive Informationsaustausch ausgeschlossen ist, ein Fahrzeug sein, welches bereits am Parkautomaten vorbeigefahren ist und diesen reaktiv zur Belegungssituation befragt hat. Möglichkeiten zum Auffinden eines Fahrzeugs mit spezieller Parkrauminformation sind:

- a) Fluten des Fahrzeug-Fahrzeug-Netzes mit der Anfrage: Diese Verfahren werden als ineffizient eingestuft, da die Netzlast mit steigender Anzahl von Anfragen unkontrollierbar ansteigt.
  - b) Aufbau eines Positionierungsdienstes, der die Positionen der Informationen aufzeichnet und bei Anfrage die Positionen der Fahrzeuge mit der gewünschten Information dem anfragenden Fahrzeug zur Verfügung stellt.
  - c) Positionsbasierte Anfrage in Richtung des Zielparkplatzes mit der impliziten Annahme, dass sich in diesem Bereich Fahrzeuge mit der gewünschten Parkrauminformation aufhalten. Es werden hierbei Geokoordinaten in die Anfragepakete hineinkodiert, welche bei der Weiterleitungsentscheidung berücksichtigt werden müssen.
2. Nach Auffinden des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeuge erfolgt das Versenden der Anfrage. Zur Übertragung kommen Unicast- oder Multicast-Algorithmen [Per01] zum Einsatz.
  3. Ebenfalls über Unicast-Algorithmen kann die Antwort des angefragten Fahrzeugs zurück an das anfragende Fahrzeug versendet werden.

Der zu betreibende Mehraufwand bei einer reaktiven Implementierung des Parkrauminformationssystems lässt hinsichtlich der praktischen Umsetzbarkeit wesentliche Fragen offen. In realen städtischen Szenarien kann die Routenstabilität, welche eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Zustellraten von positionsbasierten Routingprotokollen ist, nicht gewährleistet werden [LHT<sup>+</sup>03], [Kos05]. Die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Parkplatzanfrage wird durch die Partitionierung des Fahrzeug-Fahrzeug-Netzes, die inhomogene Verteilung der Fahrzeuge, die unvorhersehbaren Fahrzeugbewegungen und die niedrigen Ausstattungsraten sowie durch die physikalischen Effekte auf dem Funkkanal stark beeinflusst. Hinzu kommt, dass durch Request-Reply Mechanismen die Netzlast mit steigender Anzahl von Anfragen nicht skaliert und signifikant ansteigt.

Die reaktive Informationsbeschaffung wird auf Grund obiger ungelöster Herausforderungen nicht für den Aufbau eines dezentralen Parkrauminformationssystems verwendet.

**Proaktive Informationsverbreitung** Proaktive Informationsbeschaffungsstrategien hingegen basieren auf dem periodischen Versenden von Information. In [BSH00] und in [KEÖÖ04] finden sich erste Untersuchungen zum Design von Multi-Hop Protokollen für Fahrzeug-Fahrzeug-Netze. Durch proaktive Informationsverbreitung (siehe dazu Abbildung 3.6) heben sich die Nachteile der reaktiven Informationsverbreitung auf. Alle

Hilfsfunktionen, wie z.B. das Beaconsing oder das nachbarschaftstabellenbasierte Routing der Datenpakete fallen vollständig weg. Bei periodischem Broadcast von einzelnen Datenpaketen ist die erzeugte Netzlast pro Fahrzeug konstant. Die Informationsredundanz kann durch die Wahl eines geeigneten FBI-Wertes kontrolliert werden. Fahrzeugbewegungen ermöglichen die Verteilung von punktuell auftretender Information im gesamten Stadtgebiet. Die Aktualisierung der Information in den einzelnen Fahrzeugen findet implizit statt, da Information basierend auf Zeitstempeln ersetzt wird. Dadurch haben Fahrzeuge immer eine aktuelle Datenbasis und das Anfragen fällt vollständig weg. Wegen den genannten Vorteilen wird der Algorithmus mittels einer proaktiven Verbreitungsstrategie umgesetzt.

### 3.10. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ausgehend von der Problembeschreibung in Abschnitt 3.1 ein Algorithmus zur Verbreitung von Parkrauminformation vorgestellt. Zentrale Elemente sind Fahrzeuge und Parkautomaten. Insbesondere ist keine zusätzliche Infrastruktur außer bereits existierenden Parkautomaten notwendig. Die von Parkautomaten eingespeiste Belegungsinformation wird von Fahrzeugen gespeichert und an andere Fahrzeuge weitergeleitet. Geringe Bandbreitenanforderung wird durch die Einführung eines virtuellen dreidimensionalen hierarchischen Gitternetzes, einer darauf aufbauenden gebietsweisen Aggregation sowie einer Verteilungsstrategie erreicht. Durch die Verteilungsstrategie senden Fahrzeuge ausgewählte Aggregate, die zeitstabiler als einzelne Parkrauminformation sind, in entfernte Bereiche. Einzelne Parkrauminformation (Atome) ist weniger zeitstabil, daher wird ihre Verbreitung lokal begrenzt. Die Aggregation in Kombination mit der Verteilungsstrategie hat den Vorteil, dass die gesamte Netzlast reduziert wird und dass die Aktualität und Genauigkeit empfangener Parkrauminformation durch den höheren Lokalitätsbezug mit kleiner werdender Entfernung zu den Zielparkplätzen ansteigt.



# 4. Prognose

## 4.1. Problembeschreibung

Charakteristisch für Fahrzeug-Fahrzeug-Fahrzeug-Netze ist, dass sich durch die unterschiedlichen Bewegungsmuster einzelner Fahrzeuge die Kommunikationsmöglichkeiten im Netz insgesamt permanent ändern. Information zwischen den Fahrzeugen kann dadurch nicht latenzfrei übertragen werden und ist zum Empfangszeitpunkt nicht mehr aktuell. Der Nutzen empfangener Parkrauminformation wächst aber mit steigender Aktualität, da für den Fahrer nicht die Belegung einer Parkfläche in der Vergangenheit, sondern die Belegung zum Ankunftszeitpunkt von Bedeutung ist. Dies wurde bereits bei dem Verbreitungsalgorithmus durch die Bildung von Aggregaten und deren nutzenmaximaler Verbreitung durch die Verteilungsstrategie berücksichtigt. In diesem Kapitel wird der zweite Teil des Algorithmus zur weiteren Erhöhung des Nutzens empfangener Parkrauminformation vorgestellt.

## 4.2. Prognosemethodik

Der zur Aktualisierung der Parkrauminformation erarbeitete Ansatz benutzt ein mathematisches Modell, um die Parkplatzzustände zum individuellen Ankunftszeitpunkt zu prognostizieren [CBSM07]. Die Prognosemethodik integriert sich vollständig in das vorgestellte Verfahren zur Informationsverbreitung aus Kapitel 3. Die Elemente zur Vorhersage sind in Abbildung 4.1 dargestellt und lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

1. **Ermittlung der Modellparameter  $\lambda$ ,  $\mu$ :** Die Modellierung der Parkfläche als Wartesystem setzt das Vorhandensein der Parameter  $\lambda$  (Ankunftsrate) und  $\mu$  (Parkrate) voraus. Im realen Umfeld werden diese Werte durch die Parkautomaten ermittelt. Für die simulative Evaluierung ist eine kontinuierliche Belegungskurve erzeugt worden. Über diese Kurve können die Werte  $\lambda$  und  $\mu$  abgeleitet und in der Simulation genutzt werden. Hierfür ist der zeitliche Verlauf der Parkplatzbelegungen auf Basis

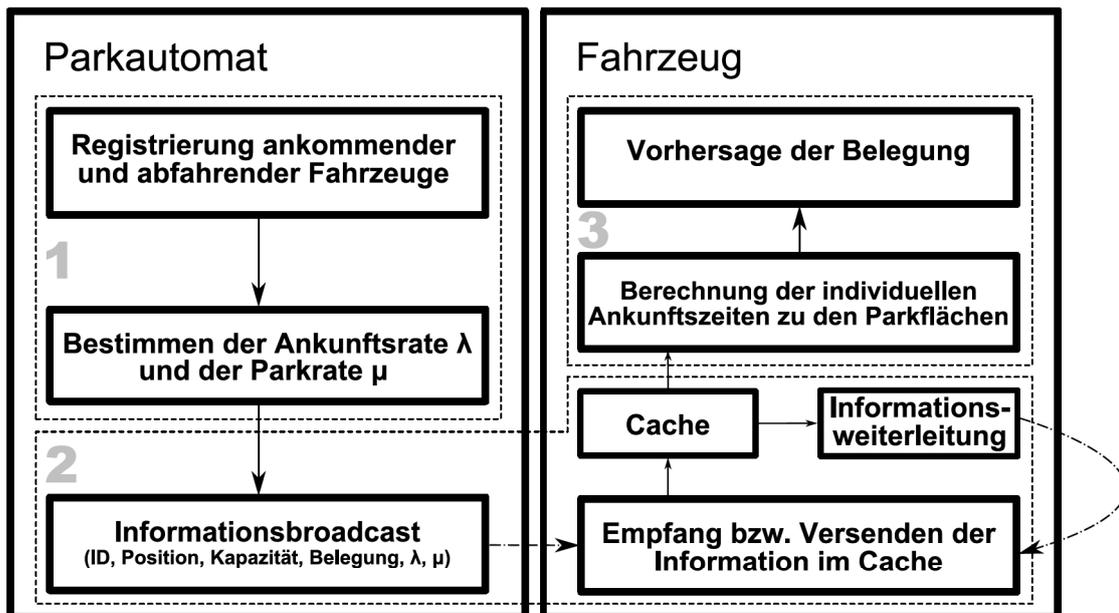


Abbildung 4.1.: Darstellung der Prognosemethodik

von Daten der Stadt Braunschweig (siehe dazu Tabelle A.1 und Tabelle A.2) über normalverteilte Zufallsgrößen in ein mathematisches Modell überführt worden.

- Broadcast der Parkplatzdaten in das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz:** Es muss sichergestellt werden, dass die ermittelten Parameter über das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz im System verteilt werden (siehe dazu Abschnitt 3.6).
- Bewertung und Prognose in den empfangenden Fahrzeugen:** Zur Berechnung der Parkplatzzustände muss jedes Fahrzeug seine Fahrdauer zu den einzelnen Parkflächen kennen. Es wird davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt der Markteinführung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation Navigationssysteme zur Serienausstattung von Fahrzeugen gehören. Deshalb erfolgt die Berechnung des Ankunftszeitpunktes durch eine in die Simulationsumgebung integrierte Navigationssoftware (siehe dazu Abschnitt 5.1.3). Die Parameter  $\lambda$ ,  $\mu$ , die Kapazität des Parkplatzes  $\mathcal{C}$ , die Belegung und das Alter der Information (siehe dazu Datenstruktur in Abschnitt 3.7) bilden gemeinsam mit der Fahrdauer zum Ziel die Eingangsparameter für das Prognoseverfahren.

## 4.3. Mathematische Grundlagen

Zum Verständnis der Anwendung von Markov-Modellen im dezentralen Parkrauminformationssystem werden in diesem Abschnitt die mathematischen Grundlagen vorgestellt. Grundlagen zur Statistik finden sich z.B. in [Sac04] und in [Bei95] wieder.

### 4.3.1. Wahrscheinlichkeitstheorie

#### 4.3.1.1. Begriffsdefinition

Sei durch das Tripel  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  ein Wahrscheinlichkeitsraum mit Wahrscheinlichkeitsmaß  $P$  und Ergebnismenge  $\Omega$  (mit  $P(\Omega) = 1$ ) definiert. Weiterhin seien  $X$ ,  $X_t$  und  $Y$  Zufallsvariablen. Mit folgender Notation wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable  $X$  den Wert  $i$  annimmt bzw. die Zufallsvariablen  $X, Y$  die Werte  $i, j$  annehmen, definiert.

$$\begin{aligned} P(X = i) &:= P(\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) = i\}) \\ P(X = i, Y = j) &:= P(\{X = i\} \cap \{Y = j\}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable einen Wert  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  annimmt, wird durch  $P(X_t = i) := P(\{\omega \in \Omega \mid X_t(\omega) = i\})$  für alle  $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  definiert.

#### 4.3.1.2. Bedingte Wahrscheinlichkeit

Die bedingte Wahrscheinlichkeit definiert das Eintreten eines Ereignisses  $A$  unter der Bedingung, dass ein Ereignis  $B$  bereits vorher eingetreten ist.

$$P(A \mid B) := \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad \text{für alle } A, B \in \mathcal{A} \quad (4.2)$$

#### 4.3.1.3. Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist als einzige stetige Verteilung gedächtnislos. Die Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit ist grundlegend für die Theorie der Markov-Ketten und wird oftmals auch als Markov-Eigenschaft bezeichnet (siehe dazu Gleichung 4.3).

$$P(X > x_1 + x_0 \mid X > x_0) \equiv P(X > x_1) \quad \text{für alle } x_0, x_1 \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (4.3)$$

Die Exponentialverteilung mit Parameter  $\lambda > 0$  hat die Dichtefunktion

$$f_\lambda(x) := \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

den Erwartungswert  $E(X) = 1/\lambda$  und die Varianz  $\sigma = 1/\lambda^2$ .

Die Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung ist gegeben durch

$$F_\lambda(t) := \begin{cases} \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx = [-e^{-\lambda x}]_{x=0}^{x=t} = 1 - e^{-\lambda t} & \text{für } t \geq 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

#### 4.3.1.4. Poisson-Prozess

Ein Poisson-Prozess ist ein diskreter stochastischer Erneuerungsprozess in stetiger Zeit. Ein Erneuerungsprozess ist ein Sonderfall eines Zählprozesses  $\{X_t : \Omega \rightarrow \mathbb{N} \mid t \in \mathbb{R}_{\geq 0}\}$  mit Zwischenankunftszeiten aus unabhängig, identisch verteilten, nichtnegativen Zufallsvariablen  $\{T_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ . Im Speziellen implizieren exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten einen Poisson-Ankunftsprozess mit Parameter  $\lambda$ .

$$P(X_t = i) = \frac{(t\lambda)^i}{i!} \cdot e^{-t\lambda}, \quad \text{für alle } i \in \mathbb{N}, \lambda \geq 0 \quad (4.6)$$

#### 4.3.2. Warteschlangentheorie

Warteschlangentheorie beschäftigt sich mit der mathematischen Analyse von Wartesystemen und der Abarbeitung von Aufträgen an Bedienstationen. Ankommende Kunden werden auf Basis einer vordefinierten Bedienstrategie auf die Server verteilt und abgearbeitet. Die Kapazität der Bedienstationen kann unterschiedlich sein, so dass bei voll ausgelasteten Bediensystemen mit endlicher Kapazität, ankommende Kunden entweder in eine Warteschlange eingereiht oder abgelehnt werden. Ferner existieren Varianten von Wartesystemen, in denen mehrere Kunden pro Zeiteinheit bedient werden können (siehe dazu [BDMC<sup>+</sup>94]).

Zur Beschreibung eines Wartesystems sind folgende Parameter zu definieren:

- Verteilungsfunktion der Zwischenankunftszeiten =:  $\mathcal{F}$ .
- Verteilungsfunktion der Bedienzeiten =:  $\mathcal{S}$ .

- Anzahl der Bedienstationen =:  $n$ .
- Kapazität des Warteraums =:  $c$ .
- Größe und Typ der Kundenpopulation =:  $\mathcal{K}$
- Bedienstrategie (*first in first out, last in first out, ...*) =:  $\mathcal{D}$

In Kendall-Notation wird ein Wartesystem, welches durch diese Parameter beschrieben ist, mit  $\mathcal{I} / \mathcal{S} / n / c / \mathcal{K} / \mathcal{D}$  dargestellt.

### 4.3.3. Markov-Ketten

Um Zustandsübergänge in einem Wartesystem mit stochastisch verteilten Bedien- und Ankunftsrate zu prognostizieren, werden Markov-Ketten und numerische Approximationsverfahren zur Berechnung des Lösungsraums eingesetzt (siehe dazu [Med91]). In diesem Abschnitt werden zunächst die zum Verständnis von zeitkontinuierlichen Markov-Ketten notwendigen Grundlagen erläutert. Diese finden sich auch in [BDMC<sup>+</sup>94], [Bei97] und in [And91] wieder.

#### 4.3.3.1. Zeitkontinuierliche Markov-Ketten

Ein stochastischer Prozess  $\{X_t \mid t \in \mathbb{R}_{\geq 0}\}$  mit endlicher Zustandsmenge  $S$  ist eine zeitkontinuierliche Markov-Kette, wenn für beliebiges  $n$ , jede Folge

$$\{t_j \in \mathbb{R}_{\geq 0} \mid 0 \leq j \leq n, 0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_n\}$$

und die diskreten Zustände

$$\{i_k \in S \mid 0 \leq k \leq n\}$$

folgendes gilt:

$$\begin{aligned} P(X_{t_n} = i_n \mid X_{t_{n-1}} = i_{n-1}, X_{t_{n-2}} = i_{n-2}, \dots, X_{t_0} = i_0) > 0 &\implies \\ P(X_{t_n} = i_n \mid X_{t_{n-1}} = i_{n-1}, X_{t_{n-2}} = i_{n-2}, \dots, X_{t_0} = i_0) &= P(X_{t_n} = i_n \mid X_{t_{n-1}} = i_{n-1}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Diese Eigenschaften, auch Markov-Eigenschaften (siehe dazu Abschnitt 4.3.1.3) genannt, implizieren, dass der Zustand eines Prozesses zum Zeitpunkt  $t_n$  nur von seinem Zustand zum Zeitpunkt  $t_{n-1}$  abhängt. Dies bedeutet, dass der aktuelle Zustand das einzige Kriterium für die zukünftige Entwicklung eines Prozesses ist.

Die Verweilzeit definiert die Zeit, die ein Prozess benötigt, um von einem Zustand  $i, i \in S$  in einen Zustand  $j \neq i$  überzugehen. Die Verweilzeiten  $T_i$  einer Markov-Kette sind für beliebige Zustände  $i \in S$  exponentialverteilt [Med91]. Eine Markov-Kette ist homogen, wenn die Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand  $i_k$  in den Zustand  $i_{k+1}$  von der Länge des Intervalls  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  und nicht von dem Zeitpunkt  $t_k$  abhängt. Im Weiteren werden die folgenden Definitionen benutzt:

$$p_{ij}(t) := P(X_{\tau+t} = j | X_\tau = i) = P(X_t = j | X_0 = i), \text{ für alle } \tau \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (4.8)$$

$p_{ij}(t)$  definiert damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Markov-Kette  $t$ -Zeiteinheiten später im Zustand  $j$  befindet, wenn sie aktuell im Zustand  $i$  ist. Weiterhin bezeichnet sie zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  die  $(i, j)$ -te Komponente einer Matrix  $\bar{P}(t)$  mit Zustandsmenge  $S$  und  $S = \{0, 1, 2, \dots, m\}$ .

Der initiale Wahrscheinlichkeitsvektor  $\pi_0$  lässt sich zum Zeitpunkt  $t = 0$  durch  $\pi_0 = (P(X_0 = 0), P(X_0 = 1), \dots, P(X_0 = m))$  darstellen. Zum Zeitpunkt  $t$  ist der Wahrscheinlichkeitsvektor durch

$$\pi(t) := (P(X_t = 0), P(X_t = 1), \dots, P(X_t = m)) \quad (4.9)$$

definiert. Mit dem initialen Wahrscheinlichkeitsvektor  $\pi_0$  kann die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Markov-Kette zu einem Zeitpunkt  $t > 0$  in einem beliebigen Zustand befindet, durch die Formel

$$\pi(t) = \pi_0 \bar{P}(t) \quad (4.10)$$

berechnet werden.

Zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten in kontinuierlicher Zeit  $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  wird das Konzept der  $Q$ -Matrix  $Q = (q_{ij})$  eingeführt. Die Übergangsrate  $q_{ij}$  von Zustand  $i$  in den Zustand  $j$  ist als rechtsseitige Ableitung von  $p_{ij}(t)$  definiert. Die  $Q$ -Matrix ermöglicht die Berechnung von Zustandsübergängen einer Markov-Kette in stetiger Zeit.

$$q_{ij} := \lim_{t \searrow 0} \frac{p_{ij}(t) - p_{ij}(0)}{t}, \quad \text{für alle } i \neq j. \quad (4.11)$$

Die Übergangsrates in einem Zustand  $q_{ii}$  zu verweilen, resultiert aus der Normierungsbedingung.

$$q_{ii} := - \sum_{j \neq i} q_{ij} \quad (4.12)$$

Aus den Gleichungen von Chapman und Kolmogorov (siehe dazu Formel (4.14) und Formel (4.15)) werden Differentialgleichungssysteme zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten hergeleitet. Die Lösung dieser führt zu den gewünschten Belegungszuständen im dezentralen Parkrauminformationssystem (siehe dazu [BDMC<sup>+</sup>94]).

Unter der Voraussetzung, dass die Markov-Kette zum Zeitpunkt 0 im Zustand  $i$  war und zum Zeitpunkt  $t_2$  in Zustand  $k$  ist, befindet sie sich zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t_1$ ,  $0 < t_1 < t_2$  im Zustand  $j$ .

$$p_{ik}(t_2) = \sum_{j \in S} p_{ij}(t_1) p_{jk}(t_2 - t_1), \quad \text{für alle } i, k \in S, \quad (4.13)$$

Mittels dieser Gleichung kann gezeigt werden, dass die Gleichungen 4.14 und 4.15 ebenfalls gelten.

$$\frac{d}{dt} p_{ik}(t) = \sum_{j \in S} p_{ij}(t) q_{jk}, \quad \text{für alle } i, k \in S \quad (4.14)$$

$$\frac{d}{dt} p_{ik}(t) = \sum_{j \in S} q_{ij} p_{jk}(t), \quad \text{für alle } i, k \in S. \quad (4.15)$$

Durch Matrixschreibweise der Gleichung (4.14) folgt Gleichung (4.17) (siehe dazu [Bei97]).

$$\frac{d}{dt} \bar{P}(t) = \bar{P}(t) Q \quad (4.16)$$

Die Lösung dieses linearen Differentialgleichungssystems mit konstanten Koeffizienten ist durch

$$\bar{P}(t) = e^{tQ} := I + \frac{tQ}{1!} + \frac{(tQ)^2}{2!} + \frac{(tQ)^3}{3!} + \dots \quad (4.17)$$

gegeben. Durch Einsetzen in Gleichung (4.10) folgt die Lösung für  $\pi(t)$

$$\pi(t) = \pi_0 e^{tQ} \quad \text{für alle } t > 0. \quad (4.18)$$



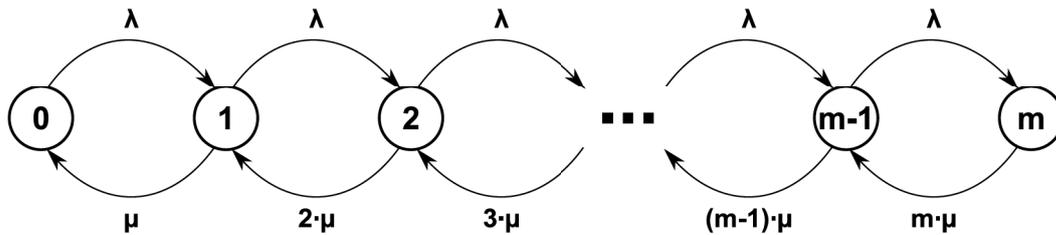


Abbildung 4.2.: Zustände und Übergangswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette

#### 4.4.2. Prognose für Aggregate

Das Konzept der Prognose für Atome kann durch folgende Erweiterung auf Aggregate abgebildet werden: Gegeben seien  $m > 1$  Vektoren mit den initialen Wahrscheinlichkeitsverteilungen

$$(\pi_0^{\hat{p}_i})_{\tau_i}, \quad 1 \leq i \leq m,$$

die für verschiedene Parkplätze  $\hat{p}_i$  zur jeweiligen Zeit  $\tau_i$  bestimmt wurden. Um hieraus ein neues Aggregat zu erzeugen, werden zunächst alle Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf einen gemeinsamen Zeitpunkt

$$\tau_{\max} = \max_i \tau_i$$

prognostiziert. Es werden damit  $m - 1$  Prognosen der einzelnen Parkplatzbelegungen nach Abschnitt 4.4.1 durchgeführt. Dies ergibt eine Menge von Vektoren  $(\pi_{t_i}^{\hat{p}_i})_{1 \leq i \leq m}$ , wobei die jeweiligen Zeiten mit  $t_i = \tau_{\max} - \tau_i$  gewählt werden.

Die Berechnung der Belegung des Aggregats kann über diesen Ansatz durch zusätzliche Bestimmung von  $\pi_0^A$ ,  $\lambda^A$ ,  $\mu^A$  errechnet werden.

##### 4.4.2.1. Ermittlung der Belegung der Aggregate $\pi_0^A$

Zunächst werden die Belegungen der einzelnen Parkplätze mittels dem Maximum-Likelihood-Prinzip (siehe dazu [Bei95]) geschätzt. Hierzu werden die Vektorindizes mit den maximalen Wahrscheinlichkeiten der  $\pi_{t_i}^{\hat{p}_i} = (P(X_{t_i}^{\hat{p}_i} = j))_{0 \leq j \leq \mathcal{C}_{\hat{p}_i}}$  bestimmt und als Belegungswerte

$$b_i = \max_j P(X_{t_i}^{\hat{p}_i} = j) \quad (\text{Eintrag mit Index } j \text{ von } \pi_{t_i}^{\hat{p}_i}), \quad 1 \leq i \leq m \quad (4.20)$$

angenommen.

Abschließend wird ein Vektor mit initialer Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$\pi_0^A = \left( P(X_0^A = 0), P(X_0^A = 1), \dots, P\left(X_0^A = \sum_{i=1}^m \mathcal{C}_{\hat{p}_i}\right) \right) \quad (4.21)$$

für das Aggregat  $A$  analog zur Gleichung (4.9) bestimmt. Dieser Vektor hat eine Länge, die gleich der Summe der Kapazitäten der einzelnen Parkplätze  $\mathcal{C}$  plus Eins (bei Belegung = 0) ist.

$$\mathcal{C}_A + 1 := \left( \sum_{i=1}^m \mathcal{C}_{\hat{p}_i} \right) + 1 \quad (4.22)$$

Dieser Vektor besitzt in jedem Eintrag bis auf dem der die geschätzte Belegung angibt eine Null.

$$P(X_0^A = k) = \begin{cases} 1 & \text{falls } k = \sum_{i=1}^m b_i \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.23)$$

#### 4.4.2.2. Bestimmung des Zuflussprozesses

Um die zur Prognose fehlende  $Q$ -Matrix bestimmen zu können, müssen die Modellparameter  $\lambda^A, \mu^A$  für die Aggregate bestimmt werden. Zunächst ist zu zeigen, dass bei einem Aggregat wieder Exponential- und Poisson-Verteilungen vorliegen.

Bezeichne  $Y_t^{\hat{p}_i}$  die Ankunftsprozesse der Fahrzeuge an den einzelnen Parkplätzen. Diese „zählen“ die Fahrzeuge, die bis zum Zeitpunkt  $t$  an den Parkplätzen  $\hat{p}_i$  angekommen sind. Wie in Abschnitt 4.3.3 angenommen, ist  $Y_t^{\hat{p}_i}$  ein poissonverteilter Ankunftsprozess mit Parameter  $t \cdot \lambda^{\hat{p}_i}$ . Die Summe von zwei Zuflussprozessen ist wieder poissonverteilt (siehe dazu auch [Bei97]).

$$Y_t^{\hat{p}_i} + Y_t^{\hat{p}_j} \sim \text{Poisson}(t \cdot (\lambda^{\hat{p}_i} + \lambda^{\hat{p}_j})) \quad (4.24)$$

Induktiv lässt sich so zeigen, dass die Zufallsvariable, die den gesamten Zufluss aller im Aggregat zusammengefassten Parkplätze zählt, wie folgt verteilt ist:

$$\sum_{i=1}^m Y_t^{\hat{p}_i} \sim \text{Poisson}\left(t \cdot \left(\sum_{i=1}^m \lambda^{\hat{p}_i}\right)\right) \quad (4.25)$$

Damit kann die Ankunftsrate für ein Aggregat  $A$  als

$$\lambda^A := \sum_{i=1}^m \lambda^{\hat{p}_i} \quad (4.26)$$

festgesetzt werden.

#### 4.4.2.3. Bestimmung des Abflussprozesses

Unter der Annahme, dass die Belegung eines Parkplatzes im betrachteten Zeitraum konstant  $\mathcal{O}_{\hat{p}_i}$  ist, wird die exponential zum Parameter  $\mathcal{O}_{\hat{p}_i} \cdot \mu^{\hat{p}_i}$  verteilte Wartezeit  $Z^{\hat{p}_i}$  bis ein Fahrzeug den Parkplatz  $\hat{p}_i$  verlässt, betrachtet. Hierbei konzentriert sich die zu beantwortende Fragestellung auf die Wartezeit, bis das erste Fahrzeug einen der im Aggregat zusammengefassten Parkplätze verlässt. Diese ist durch das Minimum der Wartezeiten der einzelnen Parkplätze gegeben, welche wiederum exponentialverteilt sind [SKR<sup>+</sup>08].

$$Z^A = \min_{i=1}^m Z^{\hat{p}_i} \sim \text{Exponential} \left( \sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i} \cdot \mu^{\hat{p}_i} \right) \quad (4.27)$$

Damit ist die Gleichung

$$\sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i} \cdot \mu^A = \sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i} \cdot \mu^{\hat{p}_i}, \quad (4.28)$$

beziehungsweise

$$\mu^A = \frac{\sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i} \cdot \mu^{\hat{p}_i}}{\sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i}} \quad (4.29)$$

gültig.

Dies ist das harmonische nach Größe der Parkplätze gewichtete Mittel der erwarteten Parkzeit eines einzelnen Fahrzeugs. Wenn die Parkrate  $\mu^{\hat{p}_i} \equiv \mu$  konstant für alle Parkplätze ist, so ist sie auch für das Aggregat konstant und es folgt:

$$\begin{aligned} \mu^A &= \mu \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i}}{\sum_{i=1}^m \mathcal{O}_{\hat{p}_i}} \\ &= \mu \end{aligned} \quad (4.30)$$

## 4.5. Berechnung der Prognose

Durch Herleitung der Gleichung (4.18) wurde gezeigt, dass die Zustandswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette zu einem beliebigen Zeitpunkt  $\pi(t)$  durch die Lösung der Gleichung  $\pi_0 e^{tQ}$  gegeben sind. In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Möglichkeiten  $\pi_0 e^{tQ}$  zu berechnen. In [HLS98], [ML03] und in [Ste94] wird ein Überblick der verschiedenen Verfahren zur Berechnung von  $\pi(t)$  bzw. von  $\pi_0 e^{tQ}$  gegeben. [ML03] stellt detailliert verschiedene Verfahren hinsichtlich der Kriterien "generality, reliability, stability, accuracy, efficiency, storage requirements, ease of use, and simplicity" gegenüber. Eine der favorisierten Methoden ist die in dieser Arbeit genutzte Methode: „Scaling and squaring with Padé-Approximation“. Durch die Verfügbarkeit einer Matlab-Implementierung [GL83] und ihrer allgemeinen wissenschaftlichen Anerkanntheit ist diese Methode eine der am meisten präferierten.

Die Anwendung der Padé-Approximation durch Scaling und Squaring auf ein Problem der Form  $e^{tQ}$  kann in drei Schritte unterteilt werden:

1. Scaling: Durch Ausnutzung der Äquivalenz

$$\left(e^{\frac{tQ}{n}}\right)^n \equiv e^{tQ} \quad (4.31)$$

wird  $n$  als Potenz der Zahl zwei so gewählt, dass die Norm von  $\frac{tQ}{n}$  ausreichend klein wird. Die genutzte Implementierung z.B. wählt die Potenz  $n$  so, dass die Norm  $< \frac{1}{2}$  ist.

2. Padé Approximation: Im zweiten Schritt wird der Padé Approximand für  $e^{\frac{tQ}{n}}$  berechnet.
3. Squaring: Durch wiederholte Quadrierung werden die Divisionen durch  $n$ , also die Anpassung der Norm rückgängig gemacht.

Detailanalysen mathematischer Verfahren zur Berechnung von Anfangswertproblemen finden sich z.B. in [Hig05] wieder. In [Hig05] wird u.a. auch die in dieser Arbeit eingesetzte Matlab-Implementierung zur Lösung der Belegungswahrscheinlichkeiten im dezentralen Parkrauminformationssystem untersucht.

## 4.6. Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist ein auf zeitkontinuierlichen Markov-Ketten basierendes Modell zur Prognose von Parkplatzbelegungen entwickelt worden. Nach der Problembeschreibung in Kapitel 4.1 und der Vorstellung der Lösung in Abschnitt 4.2 werden in Abschnitt 4.3 die mathematischen Grundlagen zum Verständnis der Theorie zeitkontinuierlicher Markov-Ketten vorgestellt. Abschließend wird die Anwendung des Modells für Atome und Aggregate in Abschnitt 4.4 beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Erläuterung des eingesetzten Verfahrens zur Berechnung der Prognosen in Abschnitt 4.5 ab.



## 5. Simulationsmodell

Für die realitätsnahe Darstellung einer Anwendung zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sind der Funkkanal, das Fahrer- bzw. Verkehrsmodell und die Anwendung selbst zu simulieren. Neben der Sicherstellung der Funktionalität einzelner Simulatoren ist auch die Interaktion dieser untereinander elementar. Bisher durchgeführte Projekte haben jeweils ihre Schwerpunkte (z.B. Funkkommunikation, Straßenverkehr etc.) simuliert. Im Projekt Fleetnet z.B. wurden Routing-Protokolle auf der Netzwerkschicht [HFMF03] des ISO/OSI-Referenzmodells mittels ns-2 [ns2] konzipiert und evaluiert. Zu Beginn dieser Arbeit hat kein Simulator existiert, mit dem es möglich war ein Gesamtbild der Realität abzubilden und damit das dezentrale Parkrauminformationssystem zu evaluieren. Allerdings waren sich etablierte Simulatoren zur Abbildung einzelner Aspekte der Fahrzeug-Fahrzeug-Anwendungen verfügbar. Daher wurde der Ansatz gewählt, sich etablierte Simulationswerkzeuge für die einzelnen Teilaspekte einzusetzen und diese zu dem gewünschten Gesamtbild zusammenzuführen [LCS<sup>+</sup>05]. Die Umsetzung und der Design der Simulationsumgebung erfolgte im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit dem Lehrstuhl für Rechnernetze an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Diese hat ihre Simulationserfahrung aus dem Fleetnet-Projekt [Fle] eingebracht. Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades des Netzwerksimulators ns-2 [KCC05] im wissenschaftlichen Umfeld, der langjährigen Erfahrung der Abteilung Mobilität der Konzernforschung der VOLKSWAGEN AG mit dem Verkehrssimulator Vissim [PTV06] und der Verfügbarkeit eines realitätsnahen Vissim-Verkehrsmodells der Stadt Braunschweig wurden in einem ersten Schritt ns-2 und Vissim miteinander über ein eigenständiges Programm zur Synchronisation - Simulationcontrol - gekoppelt. Die Kopplung wurde zur Berechnung des Prognoseverfahrens um eine Matlab-Schnittstelle und zur Berechnung der Restfahrzeiten zu den einzelnen Parkflächen um eine Navigationssoftware erweitert. Das eingesetzte Modell der Stadt Braunschweig wurde mittels realer Messdaten kalibriert [MAA06]. Die Implementierung des WLAN-Protokollstapels [IEEE99] in ns-2 wurde mit den spezifischen Eigenschaften einer handelsüblichen WLAN-Karte der Firma Proxim parametrisiert [Ori].

In der gegenwärtigen Entwicklungsstufe sollen Simulationsumgebungen zum Nachweis

der verkehrlichen und sicherheitsrelevanten Wirkung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation eingesetzt werden. Beispielsweise finden sich in [SDK<sup>+</sup>05] simulative Untersuchungen zu verkehrlichen Effekten von Anwendungen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Weitere in letzter Zeit von verschiedenen Forschergruppen implementierte Simulationsumgebungen sind z.B. in [CB05], [HFBF06] und in [KSEH<sup>+</sup>07] zu finden. Durch die EU wurde im 7. Rahmenprogramm das Projekt Pre-Drive Car-to-X initiiert. Zahlreiche Universitäten, die PTV AG und Fahrzeughersteller haben sich in diesem Projekt zur Entwicklung von Simulatoren zur Darstellung der Effekte der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation auf den Verkehr zusammengeschlossen.

## 5.1. Simulationsumgebung

Die in Abbildung 5.1 dargestellte Simulationsumgebung ermöglicht die gleichzeitige Simulation

1. der Kommunikationstechnologie IEEE 802.11 Wireless-LAN,
2. realistischer Fahrzeugbewegungs- und Stadtmodelle und bietet
3. die Möglichkeit der Implementierung des dezentralen Parkrauminformationssystems.

Im Folgenden werden die einzelnen Simulatoren und das Bindeglied Simulationcontrol, ein Programm zur Steuerung und zur Synchronisation der einzelnen Simulatoren, beschrieben.

### 5.1.1. Netzwerksimulation

Der Netzwerksimulator ns-2 erlaubt es Simulationsabläufe über die Skriptsprache OTcl über eine simulatorinterne Schnittstelle zu verwalten. Mittels OTcl können in C++ implementierte Klassen ohne Neucompilierung des Quellcodes instantiiert und damit komfortabel beliebige Parameterwerte überprüft werden. ns-2 stellt Module zur Simulation von mobilen Knoten und zur Simulation der Funktechnologie eine fertige Implementierung des WLAN-Protokollstapels bereit. Weiterhin existieren Bewegungsmodelle, wie z.B. das Random-Waypoint Modell zur Modellierung der Mobilität. Diese sind, da es zur Evaluierung des Algorithmus realitätsnaher Fahrzeugbewegungen bedarf, nicht nutzbar. Daher wurde eine Schnittstelle zur Einbindung externer Bewegungsmodelle in ns-2 implementiert.

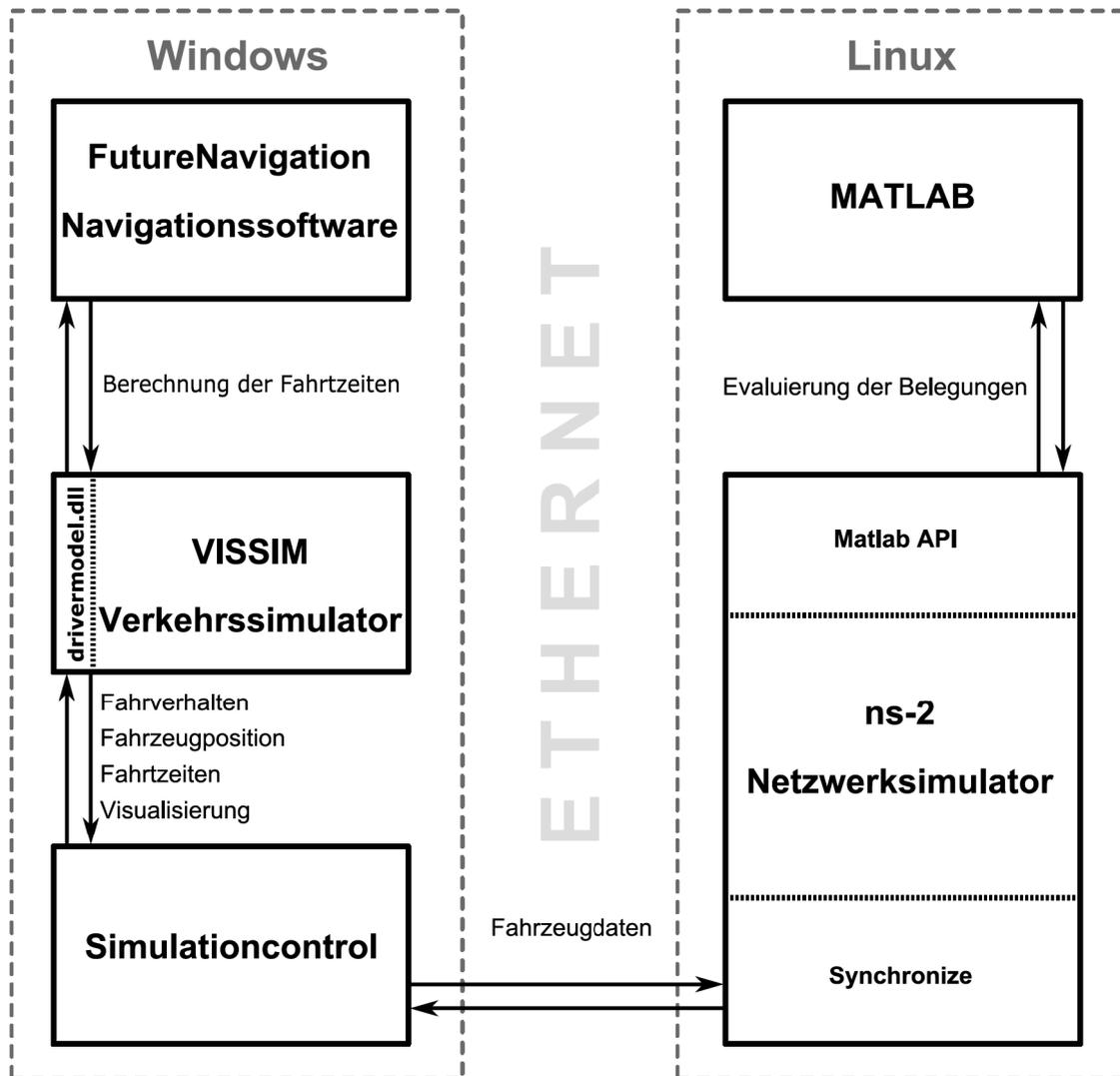


Abbildung 5.1.: Simulationsumgebung für das dezentrale Parkrauminformationssystem

Die Funkkanal-Parameter sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Diese entsprechen der Produktspezifikation der IEEE 802.11b Client PC Card ORiNOCO©11b der Firma Proxim [Ori].

Funkwellen unterliegen bei ihrer Ausbreitung Störungen. Diese sind z.B. atmosphärische Störungen und Abschattungen verursacht durch stationäre Hindernisse (z.B. Häuser, Bäume) sowie Interferenzen durch zusätzliche elektromagnetische Wellen im gleichen Frequenzband oder durch Mehrwegeausbreitung. Die Störungen lassen sich durch den Signal-Rausch-Abstand (Signal-Noise-Ratio/SNR) als Kenngröße darstellen. Je kleiner das SNR, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass Signale empfängerseitig nicht mehr korrekt dekodiert werden können. Eine genaue Darstellung von Funkübertragungsverfahren und

Allgemeine Parameter	
Simulierter WLAN-Standard	IEEE 802.11b
Kanalkapazität	11Mbps
Signalausbreitung	TwoRay Ground
Abstrahlcharakteristik	Rundstrahlantenne (Omni Direktional)
Reichweite	300m
Physikalische Schicht	
RXThreshold	1.97642e-11W
Transmit Power	0.031622777W (15dbm)
Frequency	2.47e+09Hz
CPTreshold	10.0
CSThreshold	2.56144e-12W

Tabelle 5.1.: ns-2 Parameter des simulierten WLAN-Protokollstapels

Dämpfungseffekten findet sich in [Wal98] wieder.

ns-2 bildet zur Abbildung von Pfadverlust und Störungen auf dem Funkkanal verschiedene Verbreitungsmodelle an. In dieser Arbeit wurde das Two-Ray Ground Modell eingesetzt, weil es sowohl den direkten Weg zwischen zwei Knoten als auch Reflektionen vom Boden berücksichtigt. Zur Modellierung von Gebäuden im städtischen Szenario wurden aus einer worst-case Annahme heraus Gebäude als die Kommunikation vollständig dämpfende Elemente in ns-2 implementiert. Dadurch empfangen Fahrzeuge unabhängig von der Entfernung zueinander keine Daten, wenn sich zwischen diesen ein Gebäude befindet.

### 5.1.2. Vissim

Die Simulation von Stadtszenarien stellt folgende Anforderungen an den eingesetzten Verkehrssimulator:

1. Modellierung der Straßentopologie einschließlich Straßen, Lichtsignalanlagen und Gebäuden
2. Modellierung realistischer Anzahl an Fahrzeugen
3. Modellierung realistischer Fahrzeugbewegungs- und -folgemodelle

Der Straßenverkehrssimulator Vissim erfüllt diese Anforderungen. Einzelne Fahrzeuge, öffentliche Verkehrsmittel, Fußgänger und Lichtsignalanlagen sind vollständig modelliert. Es wird realitätsnaher Verkehr auf mehrspurigen Straßen mit Spurwechselforgängen simuliert. Vorfahrtsregeln werden beachtet. Als Fahrzeugfolgemodell kommt das psychophysische Verkehrsflußmodell nach Wiedemann [Wie74] zum Einsatz.

### 5.1.3. Future-Navigation

Um den Belegungszustand der Parkplätze zum Ankunftszeitpunkt prognostizieren zu können, müssen Fahrzeuge ihre verbleibenden Fahrzeiten kennen. Die Berechnung der verbleibenden Fahrtdauer zu den Zielparkplätzen bzw. den Aggregatmittelpunkten ist durch Integration der Volkswagen spezifischen Navigationsplattform Future-Navigation realisiert. Future-Navigation ist für die einfache Verwendung von Navigationsfunktionen in Forschungsprojekten entwickelt worden. Sie abstrahiert den tatsächlich genutzten Navigationskern und erlaubt es generisch auf Navigationsfunktionen und Datentypen zuzugreifen. Über die in Abbildung 5.1 dargestellten Schnittstellen erhält Future-Navigation von Vissim vor jeder Prognose die geografischen Koordinaten der Fahrzeuge im Szenario und antwortet mit den berechneten Restfahrzeiten, welche über die Vissim-Schnittstelle an ns-2 versendet werden. ns-2 sendet wiederum die empfangene Information an Matlab, welche die Prognose der Belegungszustände zum Ankunftszeitpunkt der Fahrzeuge errechnet (siehe dazu Abschnitt 7.1).

## 5.2. Die Kopplung zwischen ns-2 und Vissim

Die in Abbildung 5.1 dargestellte Programmlogik zwischen ns-2 und Vissim ist das Kernstück der Simulationsumgebung. Diese stellt die Kommunikationsverbindung zwischen den Betriebssystemen Windows und Linux her, liefert Methoden zum Austausch von Fahrzeugpositionen und -bewegungen und erlaubt das Visualisieren von Ereignissen. Visualisiert werden können z.B. mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ausgestattete Fahrzeuge, Parkplätze sowie Füllstände einzelner Parkplätze und das hierarchische Gitternetz (siehe dazu Anhang B). Die Hauptaufgabe der Kopplung ist die Sicherstellung der zeitlichen Synchronisation der in den Teilsimulatoren durchgeführten Berechnungen und der Austausch von Fahrzeugpositionen zwischen Vissim und ns-2. Die Programmlogik besteht aus drei Teilen:

1. *Simulationcontrol.exe*: Ein Serverprogramm auf Windows-Seite zur Abwicklung der Kommunikation zwischen Vissim und ns-2.
2. *DriverModel.dll*: Eine Bibliothek zum Auslesen von Fahrzeugbewegungen aus Vissim heraus.
3. *Synchronize.o*: Diese Klasse bildet die ns-2 seitige Schnittstelle zu Simulationcontrol.exe. In der Synchronize-Klasse findet die Abbildung von Vissim-Fahrzeugen

auf ns-2 Knoten (MobileNodes) statt.

Zu Beginn der Simulation verbindet sich Synchronize über TCP-Sockets mit Simulationcontrol. Daraufhin startet Vissim und lädt das zu simulierende Vissim-Szenario, z.B. das der Stadt Braunschweig.

**Zuordnung der Fahrzeuge zwischen Vissim und ns-2 Knoten** Die Synchronize-Klasse empfängt drei Pakettyten von Simulationcontrol:

1. *WakeCar*: Dieser Pakettyt enthält die Vissim-ID (VID) der Fahrzeuge, die im jeweiligen Simulationsschritt im Vissim-Szenario erzeugt wurden.
2. *MoveCar*: Pakete dieses Typs enthalten die neuen Position von Fahrzeugen (VID) auf Vissim-Seite, die sich in einem vorherigen Simulationsschritt bereits in der Simulation befunden haben.
3. *SleepCar*: Dieser Pakettyt enthält die VIDs von Fahrzeugen, die zum jeweiligen Simulationszeitpunkt das Szenario verlassen haben.

Zusätzlich wird auf ns-2 Seite nach Empfang des jeweiligen Pakettyts entschieden, ob für die Fahrzeuge im Szenario ns-2 Knoten (mobileNodes) aktiviert werden sollen oder nicht. Inaktive Knoten auf ns-2 Seite werden nicht simuliert, diese stellen nicht ausgestattete Fahrzeuge dar.

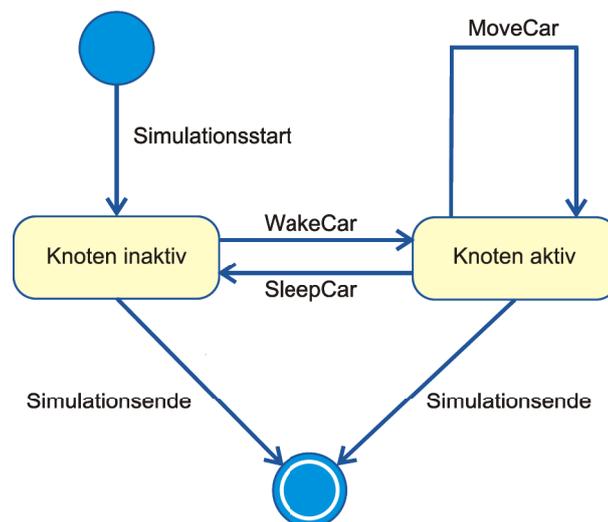


Abbildung 5.2.: Zustandsdiagramm der ns-2 Knoten

**Ausstattungsrate** Die Synchronize-Klasse beobachtet die Anzahl der aktiven Fahrzeuge im Szenario nach jedem Synchronisationsschritt bzw. dem Empfang der Pakettypen. Die Ausstattungsrate  $\rho$  bezeichnet das Verhältnis zwischen der Anzahl mit WLAN-ausgestatteter Fahrzeuge  $n_e$  zur Anzahl aller Fahrzeuge im Szenario  $n$ . Abhängig von der untersuchten Ausstattungsrate wird in der Synchronize-Klasse entschieden, ob neu in das Szenario eintretende Fahrzeuge aktiviert werden oder nicht. Die Aktivierung bzw. Deaktivierung einzelner Fahrzeuge wird auf Basis der Information in den Pakettypen WakeCar, MoveCar und SleepCar umgesetzt. Falls ein Knoten aktiviert wird, bleibt es bis zum Verlassen des Szenarios aktiv. Abbildung 5.2 visualisiert schematisch die beschriebene Funktionalität.

$$\rho = \frac{n_e}{n} \quad (5.1)$$

## 5.3. Braunschweiger Verkehrsmodell

Das Braunschweiger Verkehrsmodell bildet den Braunschweiger Fahrzeugverkehr für einen durchschnittlichen Wochentag zwischen 06:00 und 10:00 morgens ab. Die ermittelte mittlere Abweichung des Fahrzeugverkehrs im Vergleich zum realen Verkehrsaufkommen beträgt im Durchschnitt 15% für das Gesamtszenario. Die Entwicklung des Braunschweiger Modells erfolgte in der Abteilung Mobilität der Volkswagen Konzernforschung. Das Verkehrsmodell wurde für den Einsatz in dieser Arbeit aufgegriffen und um Parkplätze erweitert. Zusätzlich wurde ausgehend von realen Verkehrsmessdaten eine Kalibrierung an strategischen Messpunkten der Stadt Braunschweig, z.B. an Hauptstraßen und Kreuzungen durchgeführt [MAA06].

Alle in dieser Arbeit getroffenen Aussagen beziehen sich auf das eingesetzte Braunschweiger Verkehrsmodell. In den weiteren Abschnitten werden daher Eigenschaften des Braunschweiger Verkehrsmodells erläutert.

### 5.3.1. Anzahl Fahrzeuge

Abbildung 5.3 gibt den Verlauf der Fahrzeuge im Braunschweiger Stadtmodell zwischen 06:00 und 10:00 wieder. Die Anzahl der Fahrzeuge steigt von 06:00 bis ca. 06:25 stetig an. Diese Zeit wird von Vissim genutzt, um einen initialen eingeschwungenen Zustand der Fahrzeuge herzustellen. Der Anstieg von ca. 07:00 bis 08:00 repräsentiert den innerstädtischen Verkehrsstrom in den Morgenstunden. Ab ca. 08:15 pendelt sich die Anzahl der Fahrzeuge auf einen Durchschnittswert von ca. 8000 Fahrzeugen ein und nimmt simulationsbedingt

ab ca. 09:36 wieder ab. Verlässliche Aussagen zum Verhalten und der Funktionsweise des Algorithmus können nur dann getroffen werden, wenn das Szenario im eingeschwungenen Zustand betrachtet wird. Daher wird das dezentale Parkrauminformationssystem von 06:25 bis 09:36 evaluiert. Dies entspricht dem Simulationsintervall von Simulationssekunde 1500 bis Simulationssekunde 11500. Unterschiedliche Bewegungsmuster werden durch

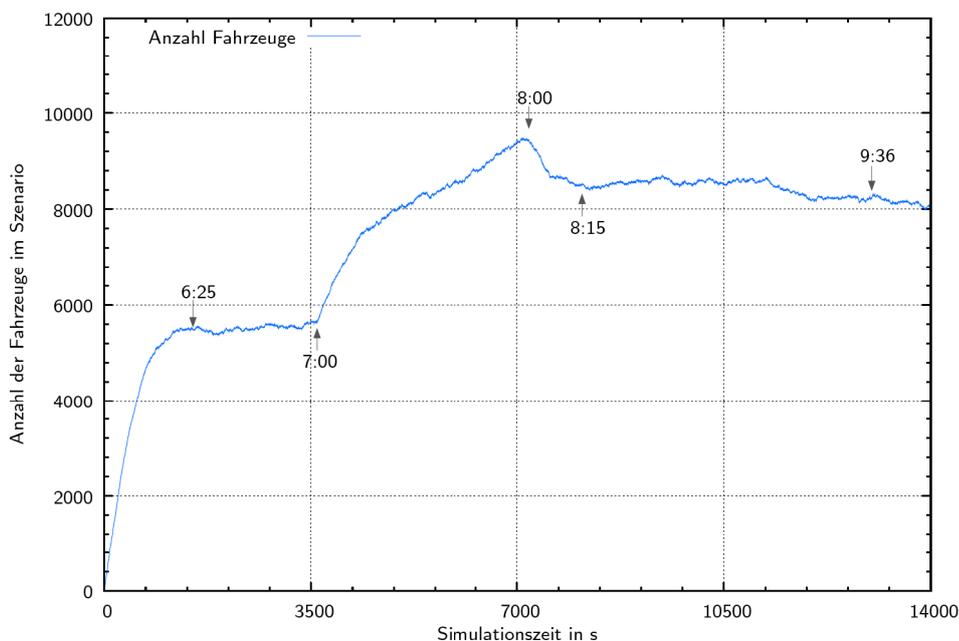


Abbildung 5.3.: Anzahl der Fahrzeuge

einen zufälligen initialen Anfangswert, dem „Random-Seed“ berechnet. Basierend auf dem Random-Seed definiert VISSIM zu Simulationsbeginn Quelle-Ziel Beziehungen für einzelne Fahrzeugströme. Mittels dieser Quelle-Ziel Beziehungen entstehen zu jeder Simulation unterschiedliche Ausprägungen des Verkehrs.

### 5.3.2. Anzahl Aggregate

Die Anzahl der Aggregate im Braunschweiger Modell ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Ein Aggregat existiert im Szenario nur dann, wenn in dem von diesem Aggregat abgedeckten Bereich mindestens ein Parkautomat existiert. Aus diesem Grund ist die Anzahl der Aggregate auf den unterschiedlichen Leveln abhängig von der Anzahl und der Verteilung der Parkautomaten im Stadtgebiet. Das maximale Aggregationslevel  $l_{max}$  ist auf 6 beschränkt. Ein Level-6 Aggregat definiert eine Zelle mit einer Kantenlänge von 19,2 km, welches sich durch Einsetzen in Formel 3.1 mit  $2^6 \cdot 300$  m berechnen lässt. Damit erschließt das

Aggregat der Hierarchieebene 6 einen Bereich von ca.  $368 \text{ km}^2$  und deckt das gesamte Braunschweiger Stadtgebiet ab.

Level	Anzahl	max. Anzahl Atome
0	32	13
1	13	19
2	6	50
3	2	120
4	2	120
5	2	120
6	1	130
Summe verfügbarer Aggregate: 58		

Tabelle 5.2.: Anzahl vorhandener Aggregate im Braunschweiger Modell

### 5.3.3. Geschwindigkeitsverteilungen

Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge über die Simulationsdauer ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Eine Annahme von durchschnittlich  $11 \text{ m/s}$  in Abschnitt 3.8 als Grundlage für die Vorüberlegungen zum Broadcast-Intervall sind damit realistisch.

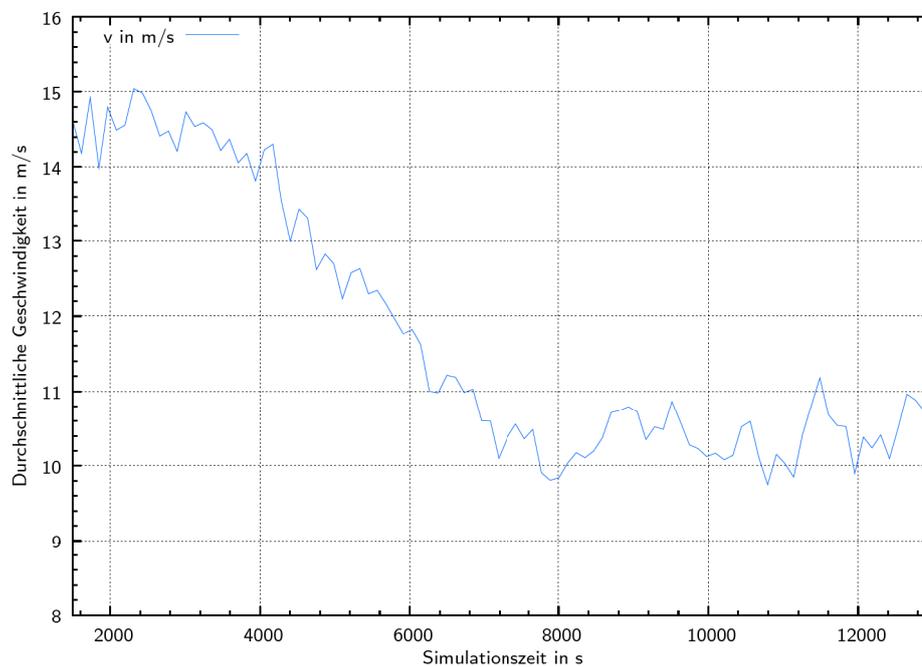


Abbildung 5.4.: Geschwindigkeitsverteilungen

### 5.3.4. Konnektivität

Ein wesentliches Merkmal der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ist, dass sich durch unvorhersehbare Bewegungsmuster und die heterogene Verteilung der Fahrzeuge sich permanent zeitlich und örtlich verändernde Fahrzeuganordnungen bilden. Dadurch entstehen im Netzwerk unterschiedliche Topologien, über die Information weitergeleitet werden kann.

Diese verschiedenartigen Anordnungen führen zu sich in der Qualität ändernden unvorhersehbaren Kommunikationsketten. Die Übertragung der Nachrichten erfolgt zum einen entlang dieser Kommunikationsketten und zum anderen über die physikalischen Bewegungen der Fahrzeuge. Die Untersuchung der zeitlichen Verfügbarkeit von Kommunikationsketten ist daher eine wichtige Metrik für das Funktionieren von Fahrzeug-Fahrzeug-Anwendungen, in denen über Multi-Hop-Technik (siehe dazu Abschnitt 3.3) Information ausgetauscht wird. Sie wird im Folgenden als Konnektivität bezeichnet. In [Bet02] und [Bet04] finden sich erste Untersuchungen zur Konnektivität in mobilen Ad-Hoc-Netzen. Der Einfluss von Interferenz, also von Störungen auf dem Kommunikationskanal auf die Konnektivität in Ad-Hoc-Netzen ist in [DBT05] untersucht. Eine graphentheoretische Darstellung der Konnektivität in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen findet sich in [Kos05] wieder. Analytische Darstellungen für eindimensionale Szenarien sind in [UDK07] gegeben. In [YAEAF08] wird ein auf Warteschlangentheorie basierendes Modell für die Konnektivität in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen vorgeschlagen und auf zweidimensionalen Verkehr in Stadtszenarien erweitert.

Zur Analyse der Informationsverbreitung wird die Konnektivität im Braunschweiger Modell ermittelt. Die Betrachtungen sind wie z.B. auch in [Kos05] simulativ und szenariospezifisch durchgeführt. Als Maß für das Braunschweiger Modell (siehe dazu Abbildung 5.5) wird die Anzahl der Fahrzeuge, die pro Zeiteinheit in direkter Reichweite sind und damit eine geschlossene Kommunikationskette bzw. eine Zusammenhangskomponente bilden, herangezogen. Damit kann die räumliche Auflösung der Konnektivität dargestellt werden. Die Anzahl der Kommunikationspartner pro Zeiteinheit hängt von der Ausstattungsrate und der Verteilung der Fahrzeuge im Szenario ab. Abbildung 5.5 zeigt, wie sich die Konnektivität im Szenario bei 20%-Ausstattungsrate über die gesamte Simulationszeit verhält. Die Analyse der örtlichen Verteilung der Konnektivität bei unterschiedlichen Ausstattungs-raten ergibt, dass diese auf Hauptverkehrsstraßen und innerstädtischen Kernbereichen hoch, auf Nebenstraßen gering ist. Die Konnektivität auf den Nebenstraßen ändert sich nur geringfügig mit steigenden Ausstattungs-raten. Das spiegelt wider, dass der Verkehr auf Nebenstraßen bei steigender Verkehrsdichte wesentlich weniger stark anwächst als auf den

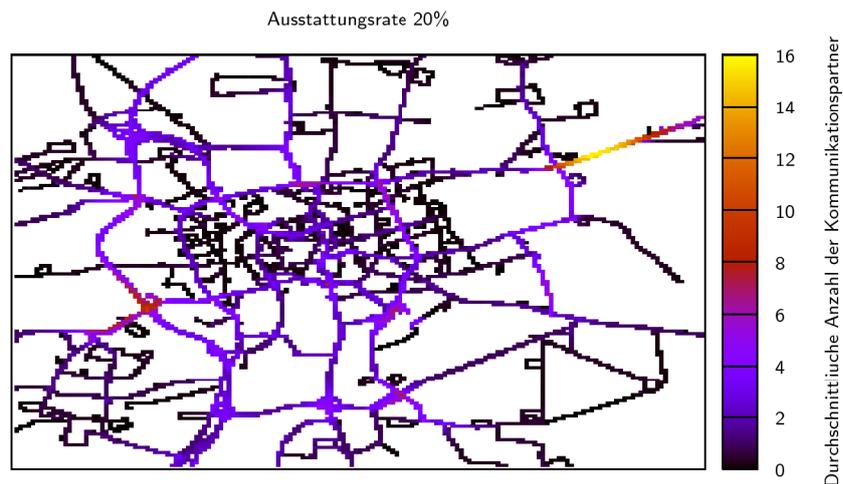


Abbildung 5.5.: Konnektivität in Braunschweig bei 20%-Ausstattungsrate

Hauptstraßen. Dass auf Nebenstraßen unabhängig der Ausstattungsrate eine sehr geringe Konnektivität existiert ist in Anhang A in den Abbildungen A.3 bis A.5 dargestellt.

## 5.4. Modellierung der Parkautomaten

Das verfügbare Simulationsmodell der Stadt Braunschweig stellt zwar den Fahrzeugverkehr dar, aber nicht die zur Evaluierung des Prognoseverfahrens notwendigen Belegungskurven der Parkflächen. Das Modell wurde daher um die Fähigkeit der Belegungserzeugung sowohl Vissim als auch ns-2-seitig erweitert. Die zugrundeliegende Datenbasis besteht aus der Belegungsdauer einzelner Parkflächen und Stichproben zum täglichen Verlauf von Parkhausbelegungen (siehe dazu Anhang A). Die Erzeugung der Belegungskurve ermöglicht die Ableitung der Parameter  $\lambda$  und  $\mu$  und damit auch die Evaluierung der Prognosemethodik.

### 5.4.1. Parkautomaten auf Vissim-Seite

Die Standorte der betrachteten Parkautomaten in Braunschweig sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Implementierung der Parkautomatenlogik liegt vollständig auf der Seite des Netzwerksimulators ns-2. Vissim-seitig können die Namen der Parkplätze, die aktuelle Belegung, die Kapazität und die Belegungsrate visualisiert werden (siehe dazu Anhang B).

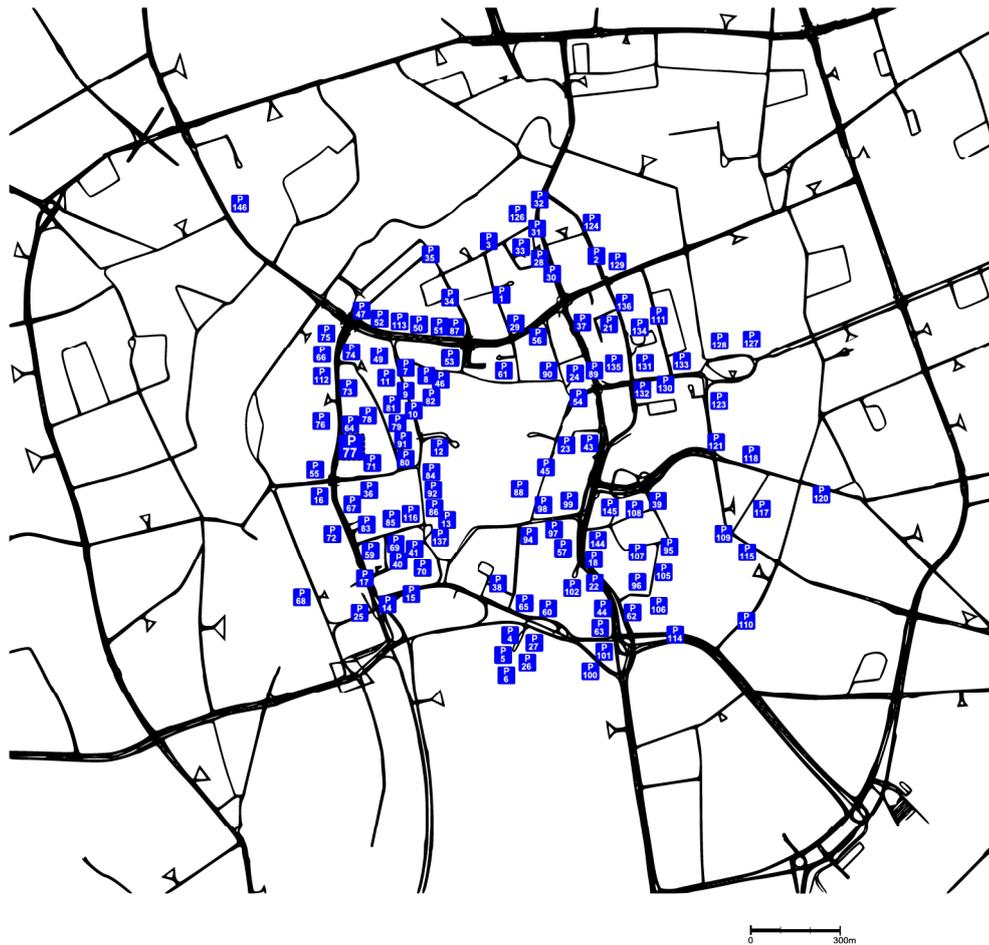


Abbildung 5.6.: Standorte der Parkplätze in Braunschweig

#### 5.4.2. Parkautomaten auf ns-2 Seite

Die Parkautomaten sind im Netzwerksimulator als WLAN-fähige stationäre Knoten implementiert. Sie detektieren und versenden ihre Belegungen sowie die Zugangs- und Abgangsraten der Fahrzeuge periodisch an ihr direktes Umfeld.

##### 5.4.2.1. Modellierung der Belegungen

Wie in Kapitel 4 erläutert, begegnet der Algorithmus der latenzbehafteten Informationsübertragung mit der Prognosemethodik. Zur Anwendung der Prognosemethodik muss der Verlauf der Parkplatzbelegungen über die Simulationszeit bekannt sein, da aus dem Belegungsverlauf die Ankunftsrate  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  und die Parkdauer  $\mu^{-1}$  abgeleitet werden. Obwohl die von der Stadt Braunschweig zur Verfügung gestellten Daten eine gute Informationsbasis darstellen, reicht der Detailgrad dieser Information nicht zur Ableitung der zur Prognose

notwendigen Parameter aus. Daher wird diese Datenbasis als Grundlage herangezogen und ausgehend von diesen eine Methodik zur Berechnung der Ankunftsrate  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  und Parkdauer  $\mu^{-1}$  an den einzelnen Parkplätzen entwickelt. Bei der Berechnung der Zu- und Abgangsraten  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  und  $\mu$  werden die in Tabelle 5.3 definierten Parameter genutzt.

Bezeichnung	Parameterbeschreibung
$N_{ref}$	Referenzwert für Anzahl der Fahrzeuge
$\sigma_{rel}$	Relative Standardabweichung normalverteilter Stichproben
$0 \leq \gamma \leq 1$	Koeffizient zur linearen Kombination der Stichproben
$\mathcal{C}_{\hat{p}}$	Kapazität der Parkfläche $\hat{p}$
$\sigma_{\hat{p}}$	Standardabweichung der Stichproben für den Parkautomaten $\hat{p}$
$I_r$	Intervall zur Neuberechnung der Parkplatzbelegungen
$I_e$	Intervall zur Schätzung von $\lambda$
$N_V(t)$	Anzahl der Fahrzeuge im Szenario zum Zeitpunkt $t$
$\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t)$	Erwartungswert der Stichproben für Parkautomat $\hat{p}$ zum Zeitpunkt $t$
$\mathcal{O}_{\hat{p}}(t)$	Simulierte Belegung der Parkfläche $\hat{p}$ zum Zeitpunkt $t$
$\lambda_{\hat{p}}(t)$	Ankunftsrate der Fahrzeuge am Parkautomaten $\hat{p}$ zum Zeitpunkt $t$
$\mu_{\hat{p}}(t) \equiv \mu$	Parkrate der Fahrzeuge an Parkfläche $\hat{p}$ zum Zeitpunkt $t$

Tabelle 5.3.: Genutzte Parameter zur Belegungssimulation

#### 5.4.2.2. Simulation ankommender Fahrzeuge an einem Parkautomaten

Als statistisches Werkzeug zur Erzeugung der Parkplatzbelegungen werden normalverteilte Zufallsgrößen herangezogen. Damit folgt die Parkplatzbelegung über die Zeit einer Normalverteilung mit den Parametern  $\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t)$  und  $\sigma_{\hat{p}}$ . Hierfür wird zu fest definierten Intervallen  $I_r$  ein neuer Belegungswert durch lineare Kombination normalverteilter Stichproben  $x_{\hat{p}}(t)$  berechnet. Die Normalverteilung, aus der die Stichproben bzw. die Belegungskurve generiert wird, hat den Erwartungswert

$$\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t) = \frac{N_V(t)}{N_{ref}} \cdot \mathcal{C}_{\hat{p}}$$

und die Standardabweichung

$$\sigma_{\hat{p}} = \mathcal{C}_{\hat{p}} \cdot \sigma_{rel}$$

Die Belegungskurven (siehe dazu Anhang A.1) für Parkhäuser in Braunschweig zeigen, dass die Belegungen der einzelnen Parkhäuser ab ca. 08:00 stark ansteigen, gegen 12:00 mittags ihren maximalen Belegungszustand erreichen und die Belegungen ab ca. 13:00 wieder abfallen. Gemeinsam mit Abbildung 5.3 betrachtet, steigen die Belegungen der

Parkhäuser mit steigender Fahrzeuganzahl im Verkehr. Daraus folgt, dass die Belegungen der Parkflächen mit der Fahrzeuganzahl im Szenario korrelieren. Diese Beobachtung wird bei der Modellierung der Belegungen auf die Parkflächen am Straßenrand übertragen. Die Kopplung zwischen der Parkplatzbelegung am Straßenrand und der Anzahl der Fahrzeuge im Straßenverkehr erfolgt durch den Referenzwert  $N_{ref}$ . Die Parameter  $N_{ref}$  und  $\sigma_{rel}$  sind einstellbar. Der Einfluss dieser auf die Entwicklung der Belegungskurven wird in Kapitel 5.4.3 anhand unterschiedlicher Werte diskutiert.

Die Startbelegung der Parkautomaten wird zum Zeitpunkt  $t = 0$  durch folgende Gleichung berechnet:

$$\mathcal{O}_{\hat{p}}(0) = \lfloor \underbrace{\min\{\max\{x_{\hat{p}}(0), 0\}, \mathcal{C}_{\hat{p}}\}}_{=:\mathcal{O}_{\hat{p}}^*(0)} + 0.5 \rfloor \quad (5.2)$$

Die Berechnung der weiteren Belegungswerte erfolgt durch Festlegung des Neuberechnungsintervalls  $I_r$ . Zu allen weiteren Zeitpunkten  $t$ , die ein Vielfaches von  $I_r$  sind, wird durch lineare Kombination des letzten Belegungswertes und der neuen Stichprobe Gleichung 5.3 angewendet.

$$\mathcal{O}_{\hat{p}}(t) = \lfloor \underbrace{\min\{\max\{\gamma \cdot \mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t - I_r) + (1 - \gamma) \cdot x_{\hat{p}}(t), 0\}, \mathcal{C}_{\hat{p}}\}}_{=:\mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t)} + 0.5 \rfloor \quad (5.3)$$

#### 5.4.2.3. Berechnung der Ankunfts- und der Parkrate

Aus der Entwicklung der Belegungskurve kann lediglich das Verhältnis  $\frac{\lambda_{\hat{p}}(t)}{\mu_{\hat{p}}(t) \cdot \mathcal{O}_{\hat{p}}(t)}$  und damit  $\frac{\lambda_{\hat{p}}(t)}{\mu_{\hat{p}}(t)}$  abgeleitet werden. Damit ist aber keine Aussage zur absoluten Anzahl ankommender und abgehender Fahrzeuge an den Parkflächen möglich. Zur weiteren Konkretisierung muss entweder die Ankunftsrate  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  oder die Parkrate  $\mu_{\hat{p}}(t)$  bekannt sein. Aus der Studie der Stadt Braunschweig geht eine durchschnittliche Parkdauer von 51 Minuten und damit eine Parkrate von  $\mu_{\hat{p}}(t) \equiv \mu = 51^{-1}$  hervor [FL98]. Zur simulativen Evaluierung wird dieser repräsentative Mittelwert als Parkrate festgelegt. Diese Festlegung von  $\mu_{\hat{p}}(t)$  ermöglicht die Schätzung der Ankunftsrate  $\lambda_{\hat{p}}(t)$ .

Eine weitere Verfeinerung des Modells findet dadurch statt, dass die an der Parkfläche ankommenden, aber abgewiesenen Fahrzeuge ebenfalls berücksichtigt werden. Hierfür wird bei der Schätzung von  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  nicht  $\mathcal{O}_{\hat{p}}(t)$ , sondern  $\mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t)$  herangezogen. Ankommende Fahrzeuge werden damit abgewiesen, wenn  $\mathcal{O}_{\hat{p}}^* > \mathcal{C}_{\hat{p}}$  ist.

Das Schätzen von  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  erfolgt durch die Beobachtung der in der Vergangenheit liegenden Belegungen in einem festen Zeitintervall  $I_e$ , wobei  $I_e$  ein Vielfaches von  $I_r$  ist. Zur

Schätzung werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Schätzen der Anzahl der Fahrzeuge, die in den letzten  $I_e$  Sekunden den Parkplatz verlassen haben, allerdings nicht beobachtbar waren, weil sie durch ankommende Fahrzeuge ersetzt wurden.

Zur Schätzung dieses Wertes wird für den abgehenden Verkehr ein Poisson-Prozess mit Abgangsrate  $\mu$  angenommen. Wenn ein Parkplatz in einem Intervall  $I_e$  die durchschnittliche Belegung  $i$  hat, beträgt die Anzahl der abgehenden Fahrzeuge in diesem Intervall  $i \cdot \mu$ . Die Anzahl der Fahrzeuge  $n_l$ , die im Zeitintervall  $I_e$  einen Parkplatz verlassen, errechnet sich mittels des Wiederberechnungsintervalls  $I_r$  aus:

$$n_l := \sum_{j=1}^{I_e/I_r} \mathcal{O}_{\hat{p}}(t - (j-1) \cdot I_r) \cdot \mu \quad (5.4)$$

2. Die Summe der ankommenden Fahrzeuge im betrachteten Zeitintervall berechnet sich aus:

$$n_a := \sum_{j=1}^{I_e/I_r} \max\{0, \mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t - (j-1) \cdot I_r) - \mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t - j \cdot I_r)\} \quad (5.5)$$

Durch  $\mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t)$  werden auch die an einer Parkfläche ankommenden aber abgewiesenen Fahrzeuge berücksichtigt.

3. Als letzten Schritt wird aus  $n_l$ ,  $n_a$  und  $I_e$  der Wert  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  berechnet.

$$\lambda_{\hat{p}}(t) = \frac{n_l + n_a}{I_e} \quad (5.6)$$

Die Werte  $\lambda_{\hat{p}}(t)$  und  $\mu$  sind Eingangsparameter für die Durchführung der Prognosemethodik in den Fahrzeugen.

### 5.4.3. Diskussion der Modellparameter

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der in Abbildung 5.3 definierten Modellparameter auf die Entwicklung der Belegungskurve diskutiert. Die Belegungen werden mittels der Formeln 5.2 und 5.3 berechnet. Ziel ist es, die mit der vorhandenen Datenbasis der Stadt Braunschweig verträglichen Parameterwerte zu identifizieren.

Die in den Abbildungen 5.7 bis 5.9 dargestellten Elemente bezeichnen:

1. Normalverteilte Stichproben:  $x_{\hat{p}}(t)$

2. Kapazität der Parkfläche  $\hat{p}$ :  $\mathcal{C}_{\hat{p}}$
3. Belegung der Parkfläche:  $\mathcal{O}_{\hat{p}}^*(t)$ , ungerundet
4. Simulierte Belegung:  $\mathcal{O}_{\hat{p}}(t)$
5. Erwartungswert normalverteilter Stichproben:  $\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t)$

#### 5.4.3.1. Referenzwert für die Anzahl der Fahrzeuge $N_{ref}$

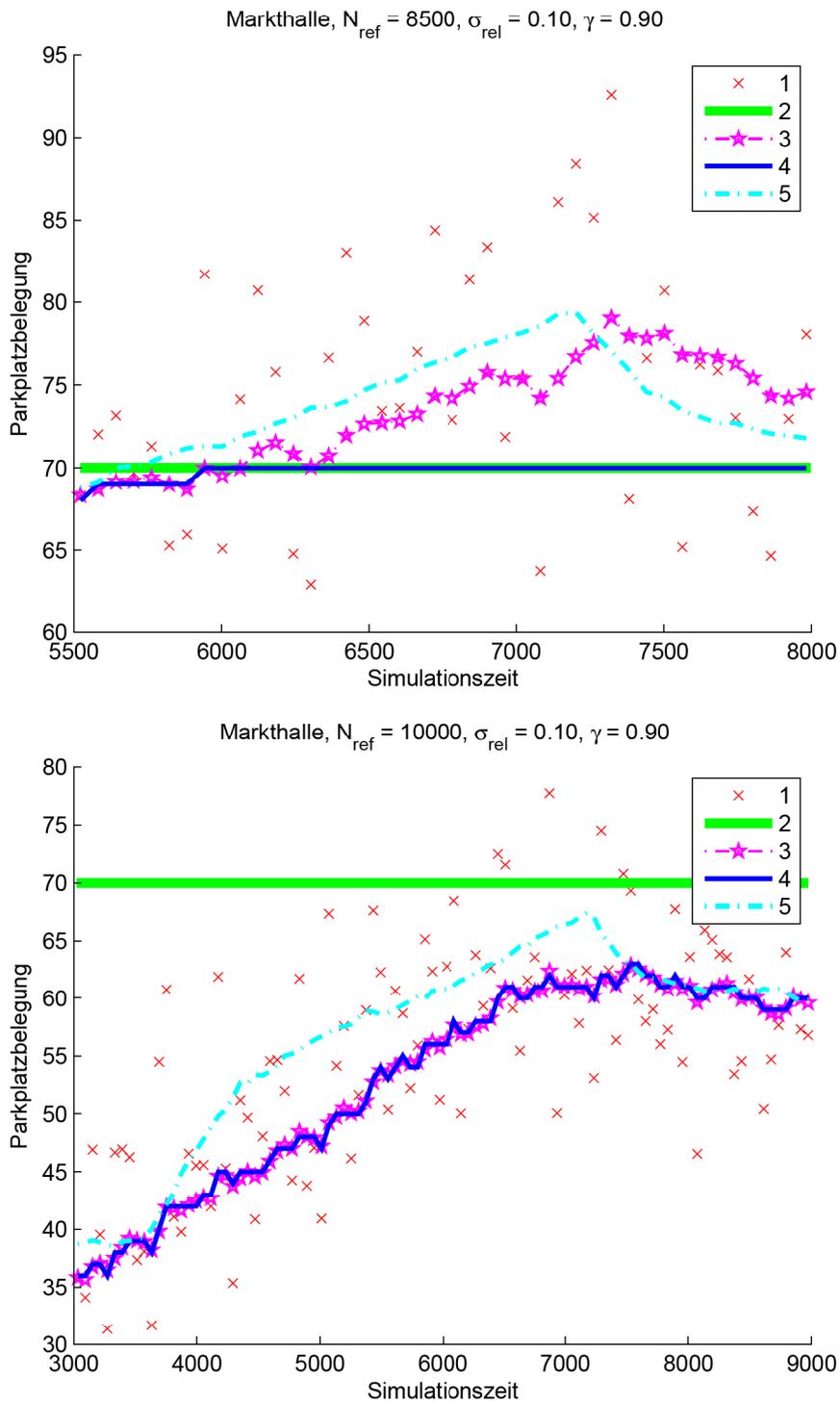
Der Parameter  $N_{ref}$  beeinflusst die Erzeugung der Belegungskurve über die Gleichung  $\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t) = \frac{N_V(t)}{N_{ref}} \cdot \mathcal{C}_{\hat{p}}$ . Durch den Wert  $\tilde{\mu}_{\hat{p}}(t)$  wird der Erwartungswert der Normalverteilung, auf deren Basis die Stichproben zur Belegungserzeugung generiert werden, bestimmt.  $N_{ref}$  ist damit ein einstellbarer Parameter, der es ermöglicht die Belegung an die tatsächliche Fahrzeuganzahl im Szenario  $N_V(t)$  anzupassen.

Abbildung 5.7 zeigt zwei Belegungskurven mit unterschiedlichem Parameter  $N_{ref}$  für einen Parkplatz mit einer Kapazität  $\mathcal{C}_{\hat{p}}$  von 70 Fahrzeugen.

Die Belegungsmodellierung mit  $N_{ref}$ -Werten bis 8500 führt dazu, dass die Parkplätze immer vollständig belegt sind. Steigende  $N_{ref}$ -Werte ab 10000 führen zu Unterbelegungen und zu einer zu schwachen Korrelation zwischen Fahrzeugzahlen und Parkplatzbelegung. Das Intervall zwischen 8500 und 10000 schließlich führt zur einer für die Simulation als ausreichend bewertbaren Korrelation an die Fahrzeugzahlen. Die damit erzeugten Belegungen weisen eine hohe Ähnlichkeit zu den realen Belegungen in Anhang A.1 auf.

#### 5.4.3.2. Relative Standardabweichung normalverteilter Stichproben $\sigma_{rel}$

Als weiterer Parameter zur Belegungserzeugung, definiert die relative Standardabweichung die Streubreite der durch die Normalverteilungsmodellierung erzeugten Stichproben  $x_{\hat{p}}(t)$ . Wird der Wert  $\sigma_{rel}$  erhöht, ist die Streubreite zwischen den einzelnen Stichproben sehr hoch. Als Ergebnis resultiert eine Belegungskurve die nicht mit der angenommenen Parkdauer von 51 Minuten verträglich ist und zu hohen Schwankungen innerhalb kurzer Zeitabschnitte führt. Exemplarisch ist der Kurvenverlauf bei variierendem  $\sigma_{rel}$  in Abbildung 5.8 für  $\sigma_{rel} = 0.01$  und  $\sigma_{rel} = 0.1$  dargestellt. Aus den Abbildungen folgt, dass bei einer relativen Standardabweichung von  $\sigma_{rel} = 0.01$ , die Schwankungen zwischen den einzelnen Stichproben zu verträglichen, den realen Belegungskurven aus Anhang A.1 ähnlichen Belegungskurven führen.

Abbildung 5.7.: Belegungssimulation mit unterschiedlichen  $N_{ref}$ -Werten

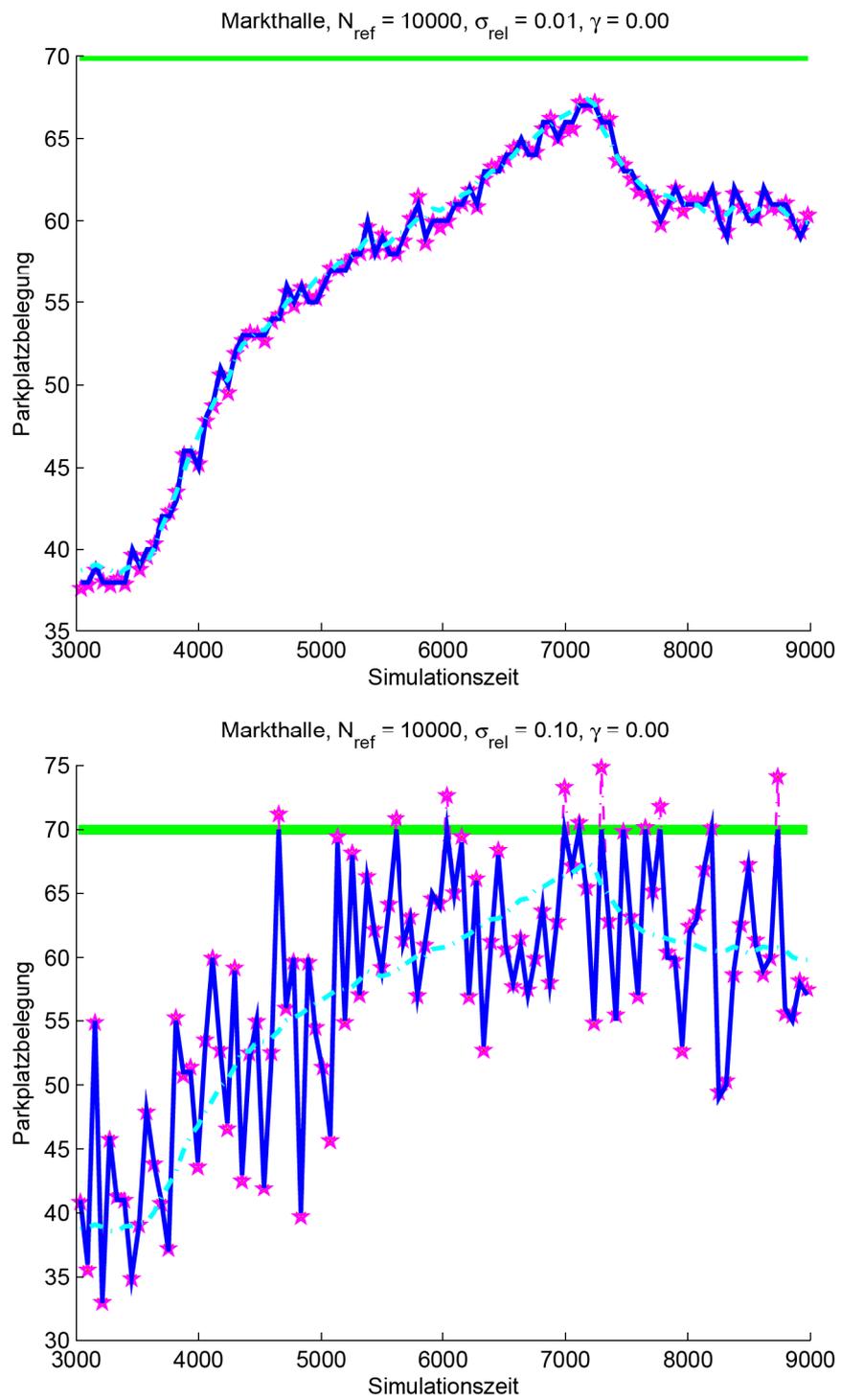


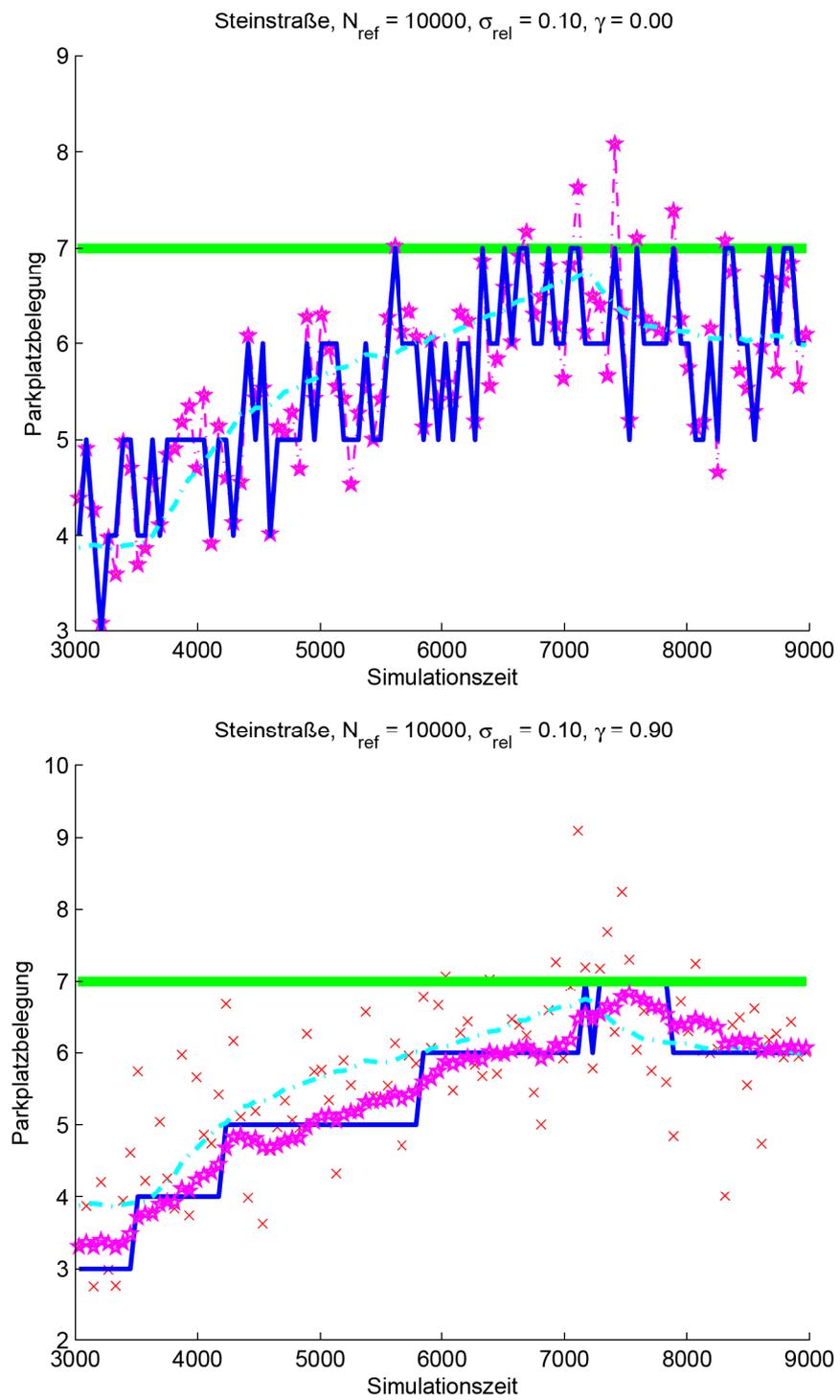
Abbildung 5.8.: Belegungssimulation mit unterschiedlichen  $\sigma_{rel}$ -Werten

#### 5.4.3.3. Koeffizient zur linearen Kombination der Stichproben $\gamma$

Die Anpassung von  $\sigma_{rel}$  führt dazu, dass die relativen Belegungen der Parkflächen fast gleich sind. Um dies zu vermeiden, wird ein zusätzlicher Parameter  $\gamma$  eingeführt. Durch den  $\gamma$ -Wert kann die zu starke Kopplung an die Fahrzeuganzahlen bei zu klein gewähltem  $\sigma_{rel}$  oder die zu hohe Streubreite bei zu großem  $\sigma_{rel}$ , welche zu unrealistischen Belegungskurven führen, korrigiert bzw. entzerrt werden (siehe dazu Abbildung 5.9).

#### 5.4.3.4. Fazit

Die Werte  $\sigma_{rel} = 0.1$ ,  $\gamma = 0.9$  und  $N_{ref} = 10000$  weisen eine hohe Verträglichkeit zur vorliegenden Datenbasis der Parkflächenbelegung für die Stadt Braunschweig mit einer durchschnittlichen Parkdauer von 51 Minuten (siehe dazu Anhang A) auf. Daher werden diese Parameterwerte als Grundlage zur Erzeugung der Belegungskurven genutzt. Die von diesen Belegungskurven abgeleiteten Werte für  $\lambda$  und  $\mu$  werden zur Evaluation des Prognoseverfahrens in den Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 herangezogen. Das Prognoseverfahren und die Ermittlung dieser Werte sind unabhängig voneinander.

Abbildung 5.9.: Belegungssimulation mit unterschiedlichen  $\gamma$ -Werten

# 6. Evaluierung der Informationsverbreitung

In diesem Kapitel wird der Algorithmus zur Informationsverbreitung aus Kapitel 3 evaluiert. Die Untersuchung beginnt mit der Definition der Anforderungen und der Beschreibung des Gesamtziels in Abschnitt 6.1. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 6.2 Kenngrößen zur Untersuchung der Informationsqualität und der Netzlast definiert. Die Evaluierung der szenariospezifischen Ausprägung dieser Kenngrößen wird in Abschnitt 6.3 am Modell der Stadt Braunschweig (siehe dazu Abschnitt 5.3) durchgeführt. Das Kapitel schließt mit der Gegenüberstellung der ausschließlich auf Atomen basierenden Variante und der Variante mit Aggregation des dezentralen Parkrauminformationssystems ab.

## 6.1. Anforderungen, Durchführung und Ziel

### 6.1.1. Anforderungen

1. Es ist zu erwarten, dass in der Einführungsphase der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation nur wenige Fahrzeuge mit WLAN ausgestattet sein werden [MML05]. Das Parkrauminformationssystem sollte daher bei bereits geringen Ausstattungsraten Parkrauminformation in ausreichender Aktualität zur Verfügung stellen.
2. Eine weitere Anforderung ergibt sich aus den Eigenschaften der eingesetzten Funktechnologie IEEE 802.11. Greifen mehrere Anwendungen gleichzeitig auf das Funkmedium zu, teilt sich die verfügbare Bandbreite zwischen den Anwendungen auf. Die Koexistenz von vielen Anwendungen und deren parallele Nutzung bei steigenden Ausstattungsraten kann daher nur dann gewährleistet werden, wenn die Bandbreitenanforderung jeder einzelnen Anwendung gering ist.

### 6.1.2. Durchführung

Es werden zwei Strategien zur Informationsverbreitung betrachtet. Diese sind:

- die auf der ausschließlichen Verbreitung von Atomen basierende Variante und
- die auf der Verbreitung von Atomen und Aggregaten basierende Variante aus Abschnitt 3.6.

Im Weiteren werden diese Möglichkeiten als „Variante mit atomarer Verbreitung“ und „Variante mit aggregierter Verteilung“ bezeichnet.

### 6.1.3. Ziel

Das dezentrale Parkrauminformationssystem steht zwei sich widersprechenden Anforderungen gegenüber: Aktualität der Parkrauminformation und geringer Bandbreitenbedarf. Die Sicherstellung der Aktualität der Information erfordert hohe Ausstattungs- und Wiederholraten und erzeugt damit hohe Netzlast. Die Reduzierung der Netzlast bzw. des Bandbreitenbedarfs kann aber nur dann erreicht werden, wenn die Ausstattungs- und Wiederholraten gering sind. Dies wiederum wirkt sich negativ auf die Aktualität der Parkrauminformation aus. Das Ziel der Untersuchung ist es daher, nachzuweisen, dass diese im Konflikt stehenden Ziele durch die Realisierung der Variante mit Aggregation miteinander vereinbart werden können. Die Variante mit atomarer Verbreitung stellt dabei den naiven Realisierungsansatz dar und dient als Vergleichsrealisierung. Weiterhin werden einzelne Kenngrößen definiert und Wechselwirkungen zwischen diesen untersucht.

## 6.2. Beschreibung der Kenngrößen

In diesem Abschnitt werden Kenngrößen zur Bestimmung eines geeigneten Broadcast-Intervalls zwischen Fahrzeugen, der Informationsqualität in den Fahrzeugen und der Netzlast auf dem Funkkanal vorgestellt. Die Informationsqualität in den Fahrzeugen hängt von anwendungsbezogenen Parametern, wie z.B. dem durchschnittlichen Informationsalter, dem Anstieg der Anzahl von Parkrauminformation in den Fahrzeugen über die Zeit und der Informationsredundanz im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz ab. Der Bandbreitenbedarf wird über die erzeugte Netzlast pro WLAN-Zelle bzw. erzeugte Netzlast pro Fahrzeug angegeben. Im Folgenden werden die Kenngrößen zur Informationsqualität und zur Netzlast in ihren Grundzügen erläutert. Die genaue Erläuterung dieser findet sich in Abschnitt 6.3, in dem die einzelnen Kenngrößen im Detail untersucht werden, wieder.

### 6.2.1. Informationsqualität

- **Alter der Ressourcen (ADR):** Das ADR gibt die Aktualität der Parkrauminformation an. Je aktueller die Parkrauminformation ist, desto größer ist ihr Nutzen für den Parksuchverkehr. Die Aktualität hängt im wesentlichen von der Ausstattungsrate und dem Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI) ab.
- **Alter der Ressourcen über die Entfernung (ARE):** Das ARE bestimmt neben dem ADR den Nutzen empfangener Parkrauminformation. Als entfernungsabhängiges Alter der Parkrauminformation ist sie bei der Suche nach einem freien Parkplatz von besonderem Interesse.
- **Menge vorhandener Information:** Durch die Menge bzw. die Anzahl der in den einzelnen Fahrzeugen vorhandenen Parkrauminformation im Vergleich zu der im Szenario tatsächlich vorhandenen, wird der Wissenstand bzw. der Grad der Informiertheit einzelner Fahrzeuge definiert. Diese wird durch den Anteil informierter Fahrzeuge und den mittleren Informationsgehalt gemessen.
  - **Anteil-Informierter-Fahrzeuge (AIF):** Der Anteil informierter Fahrzeuge gibt den Anteil der Fahrzeuge wieder, die einen bestimmten Anteil der im Szenario insgesamt vorhandenen Parkrauminformation besitzen.
  - **Mittlerer Informationsgehalt (MIA):** Der mittlere Informationsgehalt ist eine Kenngröße für die Umsetzungsvariante mit Aggregation. Sie gibt das Verhältnis zwischen den in einem Aggregat zusammengeführten Atomen und den Atomen, die in dem von diesem Aggregat abgedeckten Gebiet tatsächlich vorhanden sind, wieder.
- **Granularität empfangener Information über die Entfernung (GLE):** Das GLE ist ein Maß zur Überprüfung der Funktionsweise der Verteilungsstrategie aus Abschnitt 3.6. Diese Strategie stellt die lokale Verbreitung von Atomen und die levelabhängige Verbreitung von Aggregaten in entfernten Bereiche sicher. In der GLE-Messung wird die Anzahl der empfangenen Atome und Aggregate bei unterschiedlichen Entfernungen abgetragen und verglichen.
- **Redundanz:** Der Redundanzgrad gibt den Anteil erfolgreich integrierter Parkrauminformationen im Verhältnis zu der von einem Fahrzeug insgesamt empfangenen Parkrauminformation wieder.

### 6.2.2. Netzlast

- **Bandbreitenbedarf:** Fahrzeuge und Parkautomaten versenden periodisch Information in das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz und erzeugen dadurch Netzlast. Das Sendintervall ist durch den FBI-Wert (Fahrzeug-Broadcast-Intervall) definiert. Nach erfolgtem Sendevorgang zum Zeitpunkt  $t$  wird im Zeitintervall  $[t, t + FBI]$  Parkrauminformation gesammelt. Diese werden zum darauf folgenden Sendezeitpunkt  $t + FBI$  zu neuen Aggregaten zusammengeführt.

Ein versendetes Datenpaket der Größe  $s$  in einem Broadcast-Intervall von  $[t, t + FBI]$  Sekunden hat einen Bandbreitenbedarf von  $\frac{s}{FBI}$ . Die von einem Fahrzeug  $F$  über die gesamte Simulationszeit  $t_{ges}$  genutzte Bandbreite  $b_F$  errechnet sich aus der Summe der Pakete aller einzelnen Sendevorgänge  $s_F$  über die gesamte Zeit in der das Fahrzeug im Szenario ist (siehe dazu Formel 6.2).

$$s_F = \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{t_{ges}}{FBI} \right\rfloor} s_i \quad (6.1)$$

$$b_F = \frac{s_F}{t_{ges}} \quad (6.2)$$

Bei einer zur Verfügung stehenden Brutto-Datenrate von 11Mbps nach IEEE 802.11 pro WLAN-Zelle [IEE99] berechnet sich der durchschnittliche prozentuale Bandbreitenbedarf pro Fahrzeug  $\sigma_F$  aus:

$$\sigma_F = \frac{b_F}{11\text{Mbps}} \quad (6.3)$$

- **Bandbreitenbedarf pro WLAN-Zelle:** Zur Berechnung des Bandbreitenbedarfs pro WLAN-Zelle sind zwei Werte zu ermitteln: der Bandbreitenbedarf  $b$  insgesamt und die Anzahl der WLAN-Zellen im Szenario  $n_{wc}$ .

Der Bandbreitenbedarf  $b$  des dezentralen Parkrauminformationssystems berechnet sich aus der Summe des Bandbreitenbedarfs aller Fahrzeuge  $n_F$  über die gesamte Simulationsdauer von  $t$  Sekunden (siehe dazu Formel 6.4).

$$b = \frac{\sum_{F=0}^{n_F-1} s_F}{t} \quad (6.4)$$

Zur Ermittlung von  $n_{wc}$  ist die Gesamtstraßenlänge  $x$  und die WLAN-Reichweite  $r$  notwendig. Wird die Gesamtstraßenlänge in Zellen zweifacher WLAN-Reichweite unterteilt, errechnet sich die Anzahl der WLAN-Zellen im Szenario mit

$$n_{wc} = \frac{x}{2r} \quad (6.5)$$

Für das Braunschweiger Modell mit einer Straßenlänge von insgesamt ca. 522km und einer WLAN-Reichweite von 300m ergeben sich 870 WLAN-Zellen. Der Bandbreitenbedarf pro WLAN-Zelle errechnet sich damit aus

$$b_{wc} = \frac{b}{n_{wc}} \quad (6.6)$$

- **Paketverluste:** Sei  $n_L$  die Anzahl der versendeten, aber von keinem Fahrzeug empfangenen Datenpakete. Paketverluste können auftreten durch
  - Kollisionen: Das CSMA/CA Kanalzugriffsverfahren in 802.11 führt dazu, dass die Anzahl der Kollisionen innerhalb einer WLAN-Zelle mit steigender Anzahl von Sendevorgängen und Fahrzeugen ansteigt [[Kos05](#)].
  - physikalische Effekte. Beispielsweise durch Freiraumdämpfung und Mehrwegeausbreitung (siehe dazu Abschnitt [5.1.1](#)).
  - nicht vorhandene Kommunikationspartner zum Sendezeitpunkt (siehe dazu Abschnitt [5.3.4](#)).

## 6.3. Durchführung und Auswertung

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zu den in den Abschnitten [6.2.1](#) und [6.2.2](#) definierten Kriterien durchgeführt. Die Ermittlung geeigneter Werte für das Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI) im Vorfeld ermöglicht die Sicherstellung der Informationsverbreitung unter den in Abschnitt [6.1.1](#) definierten Randbedingungen. Das durchschnittliche Informationsalter, der Redundanzgrad und die Netzlast der atomaren Variante ermöglichen den Vergleich der Ergebnisse mit der aggregierten Variante.

### 6.3.1. Fahrzeug-Broadcast-Intervall (FBI)

**Ziel** Der FBI-Wert definiert das Sendeintervall der in den Fahrzeugen gespeicherten Parkrauminformation. Ziel dieser Untersuchung ist die simulative Ermittlung geeigneter

FBI-Werte, welche die Kriterien Aktualität und geringe Bandbreitenanforderung gleichzeitig erfüllen. Ebenfalls sind FBI-Werte Eingangsgrößen für alle Folgeuntersuchungen zum dezentralen Parkrauminformationssystem sowohl für die atomare als auch für die aggregierte Variante. Da eine Korrelation zwischen dem geeigneten FBI-Wert und der Ausstattungsrate zu erwarten ist, wird in dieser Untersuchung der zeitliche Anstieg der Parkrauminformation in den Fahrzeugen bei unterschiedlichen Ausstattungsraten betrachtet. Insbesondere wird ermittelt, für welche Ausstattungsrate welcher FBI-Wert geeignet ist.

**Beschreibung** Ein FBI-Wert wird als geeignet definiert, wenn in möglichst kurzer Zeit möglichst viele Fahrzeuge über die Parkraumsituation im gesamten Stadtgebiet informiert werden. Ein Fahrzeug kann als informiert betrachtet werden, wenn es in seinem Speicher Information über mindestens 120 der im Braunschweiger Szenario insgesamt existierenden 130 Parkautomaten (ca. 92%, siehe dazu Anhang A) besitzt. Die verfügbare Parkrauminformation im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz soll wiederum dann als verbreitet gelten, wenn der prozentuale Anteil informierter Fahrzeuge im Verhältnis zu allen ausgestatteten Fahrzeugen im Szenario über einen vordefinierten Wert, z.B. 80% liegt.

In Abschnitt 3.8 wurde unter der Annahme einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 11m/s und einer WLAN-Reichweite von 300 Metern ein möglicher FBI-Wert von ca. 27 Sekunden hergeleitet. Zur Verifikation, ob ein FBI-Wert der Größenordnung von ca. 20 bis 30 Sekunden zur Informationsverbreitung ausreicht, wird ausgehend von dieser ersten Betrachtung der FBI-Wert für die jeweils untersuchten Ausstattungsraten variiert. Je höher die Ausstattungsrate, desto mehr Kommunikationspartner existieren im Szenario und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Parkrauminformation auch bei FBI-Werten größer als 20 Sekunden verbreitet. Der erwartete Zusammenhang zwischen FBI-Wert, Informationsalter, Redundanzgrad und Netzlast ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

FBI-Wert	Informationsalter	Redundanzgrad	Netzlast
↑ (steigt)	↑ (steigt)	↓ (sinkt)	↓ (sinkt)
↓ (sinkt)	↓ (sinkt)	↑ (steigt)	↑ (steigt)

Tabelle 6.1.: Zusammenhang: FBI-Wert, Informationsalter, Redundanzgrad und Netzlast

**Bewertung der Messergebnisse** In den Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3 ist der prozentuale Anteil informierter Fahrzeuge über die Simulationszeit abgetragen. Die untersuchten FBI-Werte und Ausstattungsraten sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Die Ermittlung geeigneter FBI-Werte basiert auf zwei Kriterien. Zum einen darauf, dass sich der Anteil informierter

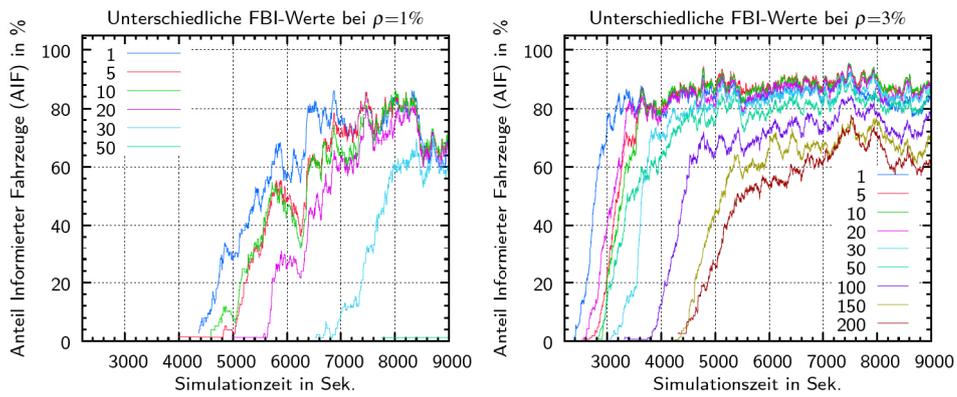


Abbildung 6.1.: Ermittlung geeigneter FBI-Werte für 1%- und 3%-Ausstattungsrate

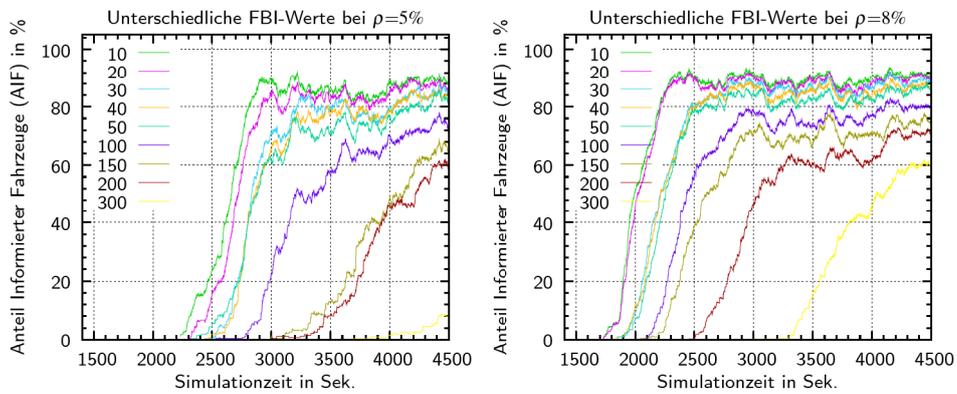


Abbildung 6.2.: Ermittlung geeigneter FBI-Werte für 5%- und 8%-Ausstattungsrate

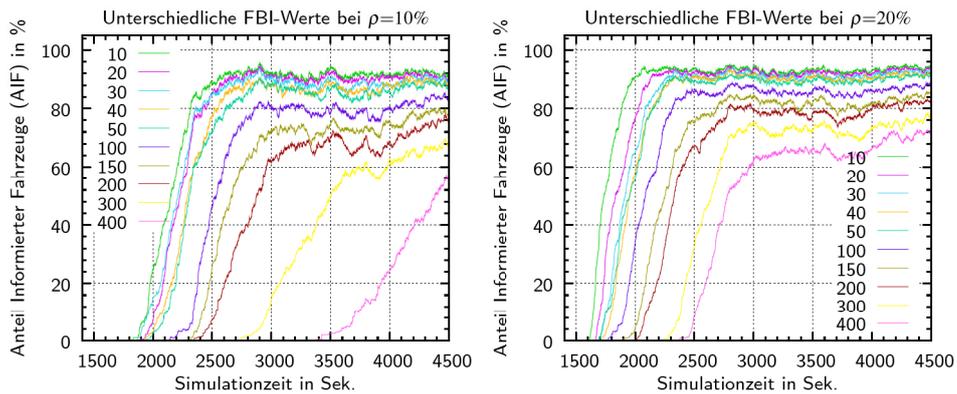


Abbildung 6.3.: Ermittlung geeigneter FBI-Werte für 10%- und 20%-Ausstattungsrate

Ausstattungsrate	1%, 3%, 5%, 8%, 10%, 20%
FBI-Werte	(1s), (5s), 10s, 20s, 30s, 40s, (50s), (100s), (150s), (200s), (300s), (400s)

Tabelle 6.2.: Simulationsparameter zur Ermittlung von FBI-Werten

Fahrzeuge im System auf einen hohen Fahrzeuganteil einschwingt. Zum anderen darauf, dass eine Reduzierung des FBI-Wertes unterhalb eines Schwellwertes  $FBI_{min}$  nicht zur weiteren Verbesserung des Systemverhaltens, wie z.B. zu Kurvenverläufen mit weniger Schwankungen im eingeschwungenen Zustand oder zur Verkürzung der Dauer des Erreichens des eingeschwungenen Zustands führt. Ein eingeschwungener Systemzustand ist dadurch charakterisiert, dass ein fester Anteil, z.B. 80% der ausgestatteten Fahrzeuge über Information zur Parkraumsituation im Szenario verfügen und dieser Anteil über die Simulationsdauer weitestgehend stabil bleibt, d.h. keinen bis sehr geringen Schwankungen unterliegt. Der durch Reduzierung des FBI-Wertes unter einen Wert der kleiner ist als  $FBI_{min}$  auftretende, zu frequente Austausch von Parkrauminformation hat den Effekt, dass die Netzlast ansteigt ohne den Nutzen empfangener Information für Fahrzeuge zu erhöhen. Vor allem an Verkehrspunkten mit zeitweise statischem Verkehr, wie z.B. an Kreuzungen oder Lichtsignalanlagen wird sehr häufig Information ausgetauscht, die keinen Mehrnutzen bringt. Durch das umgekehrt proportionale Verhältnis zwischen Netzlast und Fahrzeug-Broadcast-Intervall kann die erzeugte Netzlast durch den Schwellwert  $FBI_{min}$  eingestellt bzw. kontrolliert werden. Ein weiterer Indikator, welcher zusätzlich zur Ermittlung geeigneter FBI-Werte herangezogen werden kann, ist das Systemverhalten vor Erreichung des eingeschwungenen Zustands. Diese Zeit kann als Vorphase interpretiert werden, in der sich das System, z.B. in den frühen Morgenstunden, initialisiert. Je kürzer diese Phase andauert, desto geeigneter ist der FBI-Wert für die betrachtete Ausstattungsrate.

Die Ergebnisse (siehe dazu Seite 83) zeigen, dass der maximale Anteil informierter Fahrzeuge (AIF) stark von der Ausstattungsrate und dem FBI-Wert abhängt. Eingeschwungene Zustände sind fast in jeder Untersuchung und bei jeder Ausstattungsrate erkennbar. Die Ausprägungen der eingeschwungenen Phasen sind stark von der Ausstattungsrate, aber weniger stark von der Variation des Fahrzeug-Broadcast-Intervalls abhängig. Durch den periodischen Informationsaustausch wird die Information in den Fahrzeugen laufend aktualisiert. Auch wird sichergestellt, dass sich die gesamte Parkrauminformation in nahezu allen Fahrzeugen verbreitet. Nicht informierte Fahrzeuge, die im eingeschwungenen Zustand in das System eintreten, können dadurch in kurzer Zeit Information über das gesamte Szenario empfangen. Die Schwankungen des Anteils informierter Fahrzeuge sind bei niedrigen Ausstattungsraten besonders stark zu beobachten. Der Grund der hohen

Schwankungsbreite bei niedrigen Ausstattungsraten liegt darin, dass permanent Fahrzeuge das Szenario verlassen und neue Fahrzeuge in das Szenario eintreten. Das Verlassen des Szenarios durch ein informiertes Fahrzeug führt lokal, d.h. in der direkten Umgebung des Fahrzeugs, zum Informationsabfluss. Neu in das Szenario eintretende Fahrzeuge müssen eine bestimmte Zeit Information empfangen, um diese nutzenbringend an andere Fahrzeuge weiterverbreiten zu können. Die Schwankung, also die Abweichung zwischen den prozentualen Anteilen informierter Fahrzeuge zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, korreliert damit negativ zur Ausstattungsrate. Je höher die Ausstattungsrate, desto geringer die Schwankungen im eingeschwungenen Zustand und desto gleichmäßiger die Informationsverbreitung. Je mehr ausgestattete Fahrzeuge vorhanden sind, desto mehr informierte Fahrzeuge befinden sich im Szenario und desto weniger macht sich der Informationsabfluss durch abgehenden Verkehr bemerkbar.

Wie in Abbildung 6.1 dargestellt, verbreitet sich die Information bereits bei einer Ausstattungsrate von 1% und einem FBI-Wert von 50 Sekunden. Das Erreichen des eingeschwungenen Zustands erfolgt im Vergleich zu höheren Ausstattungsraten sehr spät. Durch die geringe Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge ist die durchschnittliche Entfernung zwischen den ausgestatteten Fahrzeugen hoch. Steigende Entfernungen zwischen Fahrzeugen reduzieren die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Informationsaustauschs und steigern damit die Anzahl erfolgloser Sendevorgänge. Diese wiederum führt zu einer niedrigen Informationsredundanz in den Fahrzeugen und zu einem signifikanten Informationsverlust durch abgehende Fahrzeuge. Der Negativ-Effekt abgehender Fahrzeuge verstärkt sich mit steigenden FBI-Werten. Der Anteil informierter Fahrzeuge im eingeschwungenen Zustand hat sein Maximum bei ca. 80%. Wird der Bereich links des eingeschwungenen Zustands als die Phase betrachtet, in der sich das System in den frühen Morgenstunden initialisiert, wird ersichtlich, dass das Erreichen des eingeschwungenen Zustands bei der Wahl eines FBI-Wertes von über 30 Sekunden fast 8000 Sekunden dauert. Je steiler der Anstieg dieser Kurve ist, desto schneller wird die Parkrauminformation im Netz verbreitet. Mit zunehmender Zeit erreichen immer mehr Fahrzeuge eine Cachegröße von mehr als 120 Einträgen. Bei FBI-Werten von 1, 5 und 10 Sekunden liegt diese Zeit bei ca. 5500 Sekunden. Die Kurvenverläufe sind sich sehr ähnlich. Daher wird der geeignete FBI-Wert für 1%-Ausstattungsrate auf 10 Sekunden festgelegt.

Bei 3%-Ausstattungsrate existieren kaum Schwankungen im eingeschwungenen Zustand. Es stehen ausreichend Fahrzeuge und damit ausreichend viele Kommunikationspartner zur Erhaltung eines stabilen Zustands mit informierten Fahrzeugen zur Verfügung. Der maximale Wert für den Anteil informierter Fahrzeuge beträgt ca. 80% und wird ab FBI-Werten

von 50 Sekunden erreicht. Allerdings sind sich die Kurvenverläufe für FBI-Werte unter 50 Sekunden sehr ähnlich. Betrachtet man auch hier den linken Teil des eingeschwungenen Zustands als die Phase, in der sich das System initialisiert, wird ebenfalls ersichtlich, dass die Dauern dieser Phase für die FBI-Werte 1, 5, 10 und 20 Sekunden in der gleichen Größenordnung liegen. In allen vier Fällen haben ca. 80% der Fahrzeuge innerhalb von ca. 1000 Sekunden mehr als 120-Einträge in ihrem lokalen Speicher. Die erreichbare Verbesserung in der Informationsverbreitung durch die Wahl von FBI-Werten, die kleiner als 20 Sekunden sind, ist damit vernachlässigbar. Daher wird der für 3%-Ausstattungsrate geeignete FBI-Wert auf 20 Sekunden festgelegt. FBI-Werte größer als 50 Sekunden wirken sich negativ auf die Informationsverbreitung aus. Der Anteil informierter Fahrzeuge im eingeschwungenen Zustand fällt in diesem Fall unter 80%.

In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass es kaum Schwankungen im eingeschwungenen Zustand gibt. Die Kurvenanteile links des eingeschwungenen Zustands liegen bei 5%-Ausstattungsrate bei ca. 3000 Sekunden bzw. bei 8%-Ausstattungsrate bei ca. 2500 Sekunden. Der Negativ-Effekt abgehender Fahrzeuge verringert sich mit steigender Ausstattungsrate und niedriger werdenden FBI-Werten. Der Anteil informierter Fahrzeuge liegt für beide Ausstattungsraten bei ca. 80%. Die Kurvenverläufe sind sich bei FBI-Werten von 10, 20, 30 und 40 Sekunden sehr ähnlich. Daher wird der geeignete FBI-Wert für 5%- und 8%-Ausstattungsrate auf 20 Sekunden festgelegt.

Bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate und FBI-Werten von bis zu 50 Sekunden sind sich die Kurvenverläufe im eingeschwungenen Zustand (siehe dazu Abbildung 6.3) sehr ähnlich. Unabhängig des gewählten FBI-Wertes sind für diese Ausstattungsraten kaum Schwankungen erkennbar. Dies ist gleichbedeutend damit, dass der Effekt des Informationsabflusses durch abgehende Fahrzeuge verschwindend gering ist. Der qualitative Verlauf der Kurven für FBI-Werte zwischen 10 und 50 Sekunden ist fast identisch. Eine Erhöhung des FBI-Wertes über 50 Sekunden hinaus führt auch bei einer hohen Ausstattungsrate von 20% zu einem niedrigen Anteil informierter Fahrzeuge. Der geeignete FBI-Wert zur Verbreitung von Parkrauminformation bei 10%- und 20%- Ausstattungsrate wird aus dieser Überlegung heraus auf 30 Sekunden festgelegt.

**Fazit** Für die untersuchten Ausstattungsraten sind die geeigneten FBI-Werte aus dem Intervall zwischen 10 und 30 Sekunden gewählt worden. Niedrige Ausstattungsraten implizieren niedrige, höhere Ausstattungsraten höhere FBI-Werte. Eine Verringerung des FBI-Wertes unter 10 Sekunden erhöht die Netzlast ohne erkennbaren Vorteil in der Informationsverbreitung (z.B. Erhöhung des Anteils informierter Fahrzeuge). Daher kann

ein FBI-Wert von 10 Sekunden als untere Grenze für die in dieser Arbeit untersuchten Ausstattungsraten betrachtet werden.

Ausgehend von der realitätsnähe des Braunschweiger Modells aus Abschnitt 5.3 kann geschlossen werden, dass sich das dargestellte Systemverhalten des eingeschwungenen Zustands auch in realen Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen wiederfinden wird. Wichtig ist eine geeignete Auswahl der FBI-Werte zu treffen, so dass die schnelle Erreichung des eingeschwungenen Zustands gewährleistet ist, da fast alle Fahrzeuge (außer z.B. Fahrzeuge in den sehr frühen Morgenstunden) im eingeschwungenen Zustand in das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz eintreten.

Die zur Bewertung der Informationsverbreitung festgelegten geeigneten FBI-Werte für das Braunschweiger Modell sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Diese für die jeweiligen Ausstattungsraten spezifischen Werte bilden die Eingangswerte für alle Folgeuntersuchungen zur Informationsverbreitung, sowohl für die Realisierung der atomaren als auch die Realisierung der aggregierten Variante (siehe dazu Kapitel 6.1.1).

Ausstattungsrate	FBI
1%	10s
3%, 5%, 8%	20s
10%, 20%	30s

Tabelle 6.3.: Festgelegte Werte für das Fahrzeug-Broadcast-Intervall

## 6.3.2. Untersuchungen zur Variante mit atomarer Verteilung

### 6.3.2.1. Alter der Ressourcen (ADR-Messung)

**Ziel** Das Ziel der ADR-Messung ist die Analyse der zeitlichen Entwicklung des Alters einzelner und insgesamt im Netz vorhandener Parkrauminformation. Neben der Ermittlung des Informationsalters werden auch Effekte, die bei der Übertragung einzelner Parkrauminformationen auftreten erkannt und die Gründe für deren Auftreten diskutiert.

**Beschreibung** In Abschnitt 6.3.1 war der Anteil informierter Fahrzeuge über die Zeit das Kriterium zur Ermittlung geeigneter FBI-Werte. In diesem Abschnitt wird das gleiche Kriterium, also der Anteil informierter Fahrzeuge zur Ermittlung und Interpretation der zeitlichen Entwicklung des durchschnittlichen Alters der Parkrauminformation herangezogen. In Abschnitt 6.3.1 wurde eine Information als verbreitet angenommen, wenn Information über mindestens 120 Parkautomaten in mindestens 80% der ausgestatteten Fahrzeuge vorhanden war. Die Ermittlung des Anteils informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) wird

bei der Messung zum Alter der Information ebenfalls, aber modifiziert, herangezogen. Es wird das Erreichen unterschiedlicher Anzahl von Parkrauminformationen im Cache berücksichtigt. Dafür werden sechs Bereiche für die Anzahl der Cache-Einträge gebildet. Diese sind die Bereiche  $\geq 0$ -Einträge,  $\geq 30$ -Einträge,  $\geq 60$ -Einträge,  $\geq 100$ -Einträge,  $\geq 110$ -Einträge und  $\geq 120$ -Einträge. Zur Simulation werden die FBI-Werte aus Tabelle 6.3 und die Ausstattungsraten aus Abschnitt 2.4 herangezogen. Parallel zur AIF-Messung mit den definierten Bereichen wird die ADR-Messung durchgeführt. Hierbei werden für jedes Fahrzeug das Maximum und das Minimum der Einträge ausgewählt sowie der Durchschnittswert des Alters vorhandener Parkrauminformation gebildet. Diese Werte werden über alle Fahrzeuge gemittelt, so dass die errechneten Werte Aussagen über das gesamte Szenario und über die gesamte Simulationsdauer ermöglichen. Zusätzlich wird die Abweichung zwischen dem Durchschnittsalter der Information und dem Maximum gebildet und gemittelt über alle Fahrzeuge abgetragen (siehe dazu Abbildungen 6.4 bis 6.9).

**Bewertung der Messergebnisse** Die Messung zum Anteil informierter Fahrzeuge in Abbildung 6.4 links zeigt, wie sich Information bei 1%-Ausstattungsrate verteilt. Das Intervall links des eingeschwungenen Zustands lässt sich Analog zu Abschnitt 6.3.1 erklären. Auch hier ist es wichtig, dass der eingeschwungene Zustand möglichst schnell erreicht wird. Die starken Schwankungen in den Kurvenverläufen im eingeschwungenen Zustand resultieren aus der geringen Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge und dem damit verbundenen Negativ-Effekt abgehender Fahrzeuge. Unmittelbar aus den gestaffelt abgetragenen Kurven lässt sich erkennen, dass die Erreichung von bis zu 100 Cache-Einträgen ca. 3000 Sekunden, zur Erreichung von bis zu 110 Cache-Einträgen ca. 4000 Sekunden und zur Erreichung von 120 Cache-Einträgen mehr als 5000 Sekunden dauert. Daraus lässt sich schließen, dass die Verbreitung der Information einer kleinen Anzahl von ca. 10 Parkflächen mehr als 25% der Zeit zur Verbreitung der gesamten Information erfordert. Das lange Intervall lässt vermuten, dass diese einzelnen Cache-Einträge zu Parkflächen an Straßen mit geringem Fahrzeugverkehr gehören. Die ADR-Messung verstärkt diese Vermutung, da das maximale Alter der Einträge in den Fahrzeugen über die gesamte Simulationszeit großen Schwankungen unterliegt, der Durchschnittswert aber stabil bleibt. Die Abweichung zwischen dem Maximum und dem Mittelwert der Cache-Einträge über die Zeit zeigt ebenfalls, dass es sich um einzelne nicht aktualisierte Informationen handelt. Dieser Effekt wird im Weiteren als Effekt der „versteckten Parkflächen“ bezeichnet.

Nach Simulationssekunde 4000 haben ca. 70% der Fahrzeuge mehr als 110 Einträge in ihrem Cache. Das minimale Informationsalter beträgt im Durchschnitt ca. 700 Sekunden.

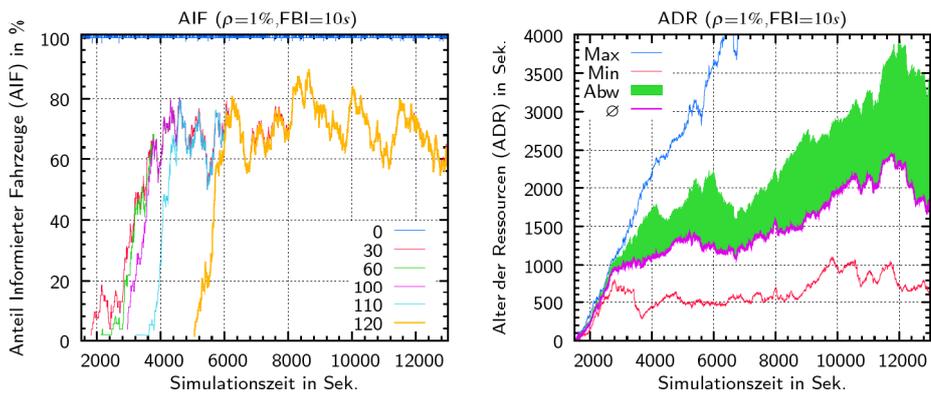


Abbildung 6.4.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 1%-Ausstattungsrate

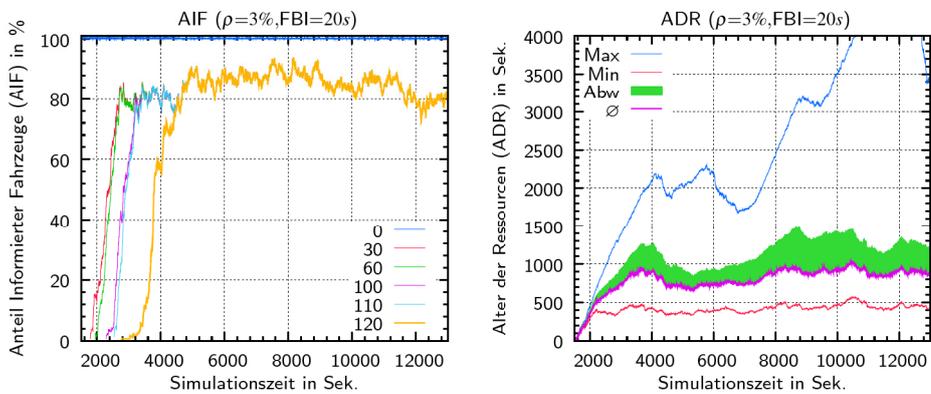


Abbildung 6.5.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 3%-Ausstattungsrate

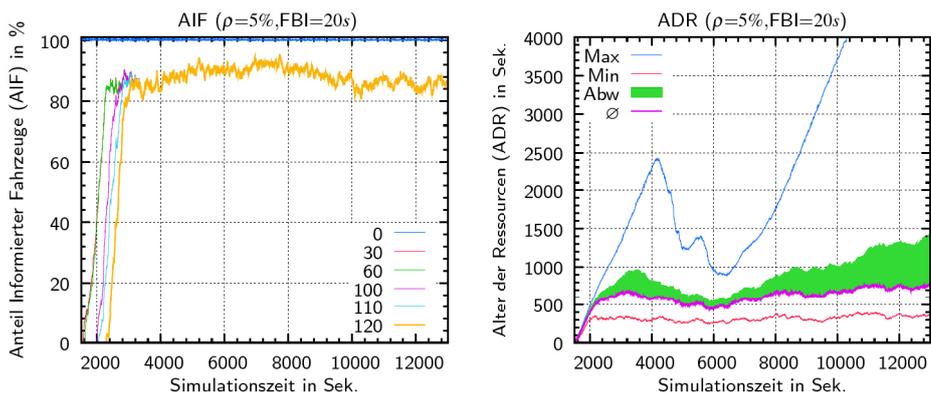


Abbildung 6.6.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 5%-Ausstattungsrate

Das durchschnittliche Informationsalter bei 1% liegt im Mittel zwischen 1000 und 2000 Sekunden. Mit zunehmender Ausstattungsrate, d.h. ab ca. 5% sind die Kurvenverläufe für alle Staffellungen fast identisch. Die Verbreitung erfolgt gleichmäßiger und in weniger als 2000 Sekunden in über 80% der Fahrzeuge. Der Effekt versteckter Parkflächen wird mit zunehmender Ausstattungsrate abgeschwächt. Besonders stark ist dieser bei Ausstattungs-raten von bis zu 5% zu beobachten. Bei 20%-Ausstattungsrate (siehe dazu Abbildung 6.9) ist dieser Effekt kaum noch bemerkbar, da mit der Anzahl der Fahrzeuge im Szenario auch die Konnektivität ansteigt (siehe dazu Abschnitt 5.3.4).

Das durchschnittliche Alter der Parkrauminformation schwingt sich ab 5%-Ausstat-tungsrate auf Werte unter 600 Sekunden ein. Der Einfluss der Ausstattungsrate auf das Informationsalter ist erheblich. Beispielsweise ist das durchschnittliche Alter der Parkraum-information bei 20%-Ausstattungsrate um ca. 600 Sekunden (10 Minuten) geringer als bei 3%-Ausstattungsrate. Das Schwanken der Maximum-Kurve bei fast allen Ausstattungs-raten zeigt, dass sich Information ungleichmäßig verteilt und dass Fahrzeugbewegungen bei der Informationsverbreitung eine zentrale Rolle einnehmen.

**Fazit** Je höher die Ausstattungsrate ist, desto höher ist die Anzahl informierter Fahrzeuge im Szenario. Das durchschnittliche Alter der Ressourcen sinkt mit steigender Ausstattungs-rate (siehe dazu Abbildung 6.10 bzw. Tabelle 6.4).

Der Effekt versteckter Parkplätze nimmt mit steigenden Fahrzeuganzahlen ab. Obwohl ab 5%-Ausstattungsrate mehr als 80% der Fahrzeuge mit über 90% der vorhandenen Parkrauminformation versorgt werden können, kann zur entfernungsabhängigen Aktualität der Parkrauminformation keine Aussage getroffen werden. Daher wird in einem nächsten Schritt das Alter der Parkrauminformation in Abhängigkeit der Verbreitungsentfernung betrachtet.

#### 6.3.2.2. Alter der Ressourcen über die Entfernung (ARE)

**Ziel** Das Ziel der ARE-Messung ist die Ermittlung der entfernungsabhängigen Entwick-lung des Alters der Parkplatzinformation.

**Beschreibung** Die ARE-Messung stellt die Beziehung zwischen dem Alter der Park-rauminformation und der Verbreitungsentfernung her. Die Messungen sind am Beispiel des Parkplatzes Scharnstraße in Braunschweig (siehe dazu Anhang A) durchgeführt wor-den. In Abbildung 6.10 ist das durchschnittliche Alter der Information des Parkplatzes

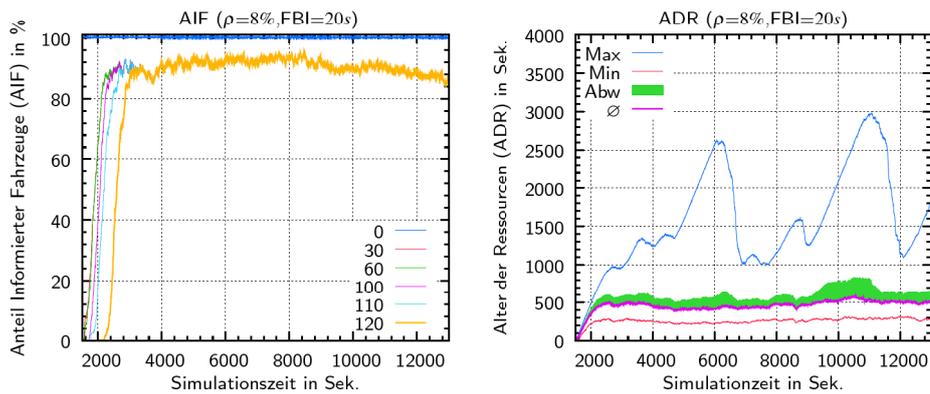


Abbildung 6.7.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 8%-Ausstattungsrate

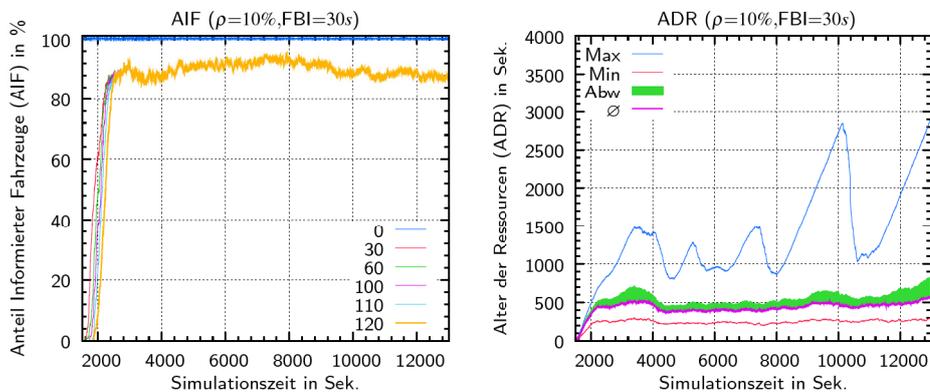


Abbildung 6.8.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 10%-Ausstattungsrate

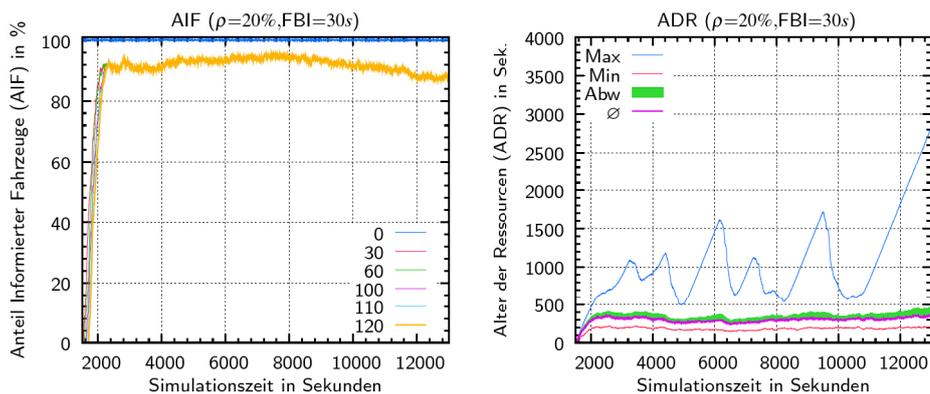


Abbildung 6.9.: Anteil informierter Fahrzeuge (AIF-Messung) und Alter der Ressourcen (ADR-Messung) bei 20%-Ausstattungsrate

Scharnstraße in Abhängigkeit der Entfernung dargestellt. Grundlage für die Ermittlung des durchschnittlichen Informationsalters sind die FBI-Werte aus Tabelle 6.3.

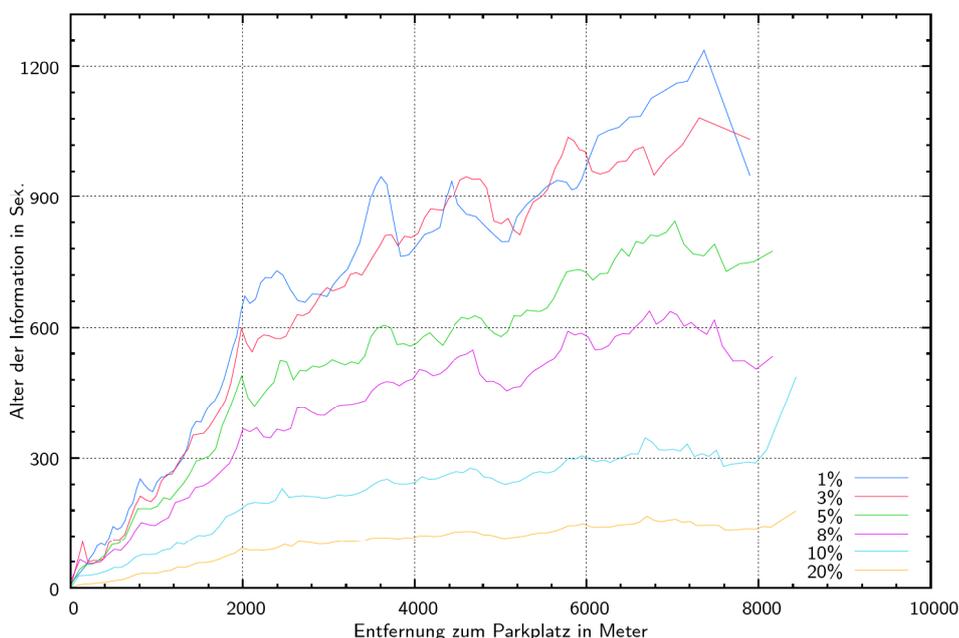


Abbildung 6.10.: Entfernungsabhängiges Alter der Parkrauminformation

Abbildung 6.10 zeigt den bereits in Tabelle 6.1 beschriebenen Zusammenhang zwischen Informationsalter und Ausstattungsrate genauer auf. In Tabelle 6.4 ist das durchschnittliche Informationsalter des Parkplatzes Scharnstrasse für die untersuchten Ausstattungsraten dargestellt.

Ausstattungsrate	1%	3%	5%	8%	10%	20%
Alter der Atome (Sek.)	903	768	595	484	283	114

Tabelle 6.4.: Durchschnittliches Alter der Atome

Die Untersuchung zeigt weiterhin, dass die Verteilung des Informationsalters über die Entfernung nicht homogen ist. Die Parkrauminformation verbreitet sich undeterministisch, so dass sie mit gleichem Alter in unterschiedlichen Entfernungen vorzufinden ist. Beispielsweise ist bei 5%-Ausstattungsrate Information welche 600 Sekunden alt ist, zwischen 3500 und 5500 Metern zu finden. Die Messergebnisse für die Ausstattungsraten 1%, 3%, 5%, 8%, 10% und 20% (siehe dazu Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13) bestätigen die undeterministische Verbreitung, zeigen aber auch auf, ab welchen Ausstattungsraten sich teilweise Gleichmäßigkeiten einstellen.

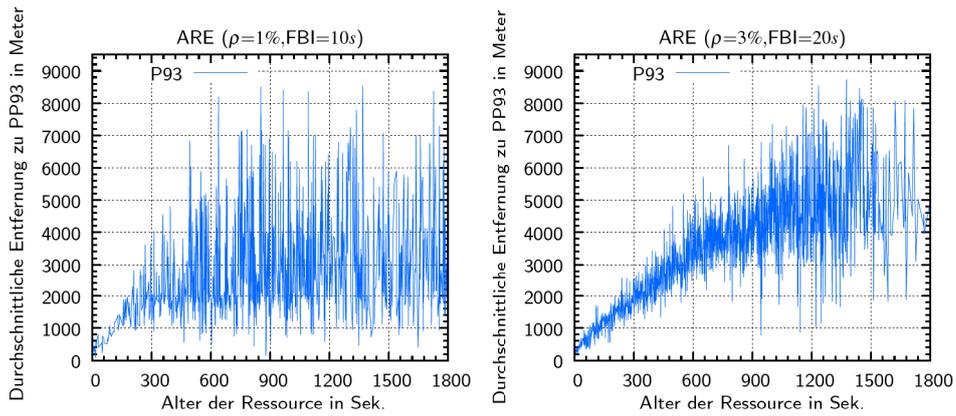


Abbildung 6.11.: Alter der Ressource PP93 über die Entfernung (ARE-Messung) bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate

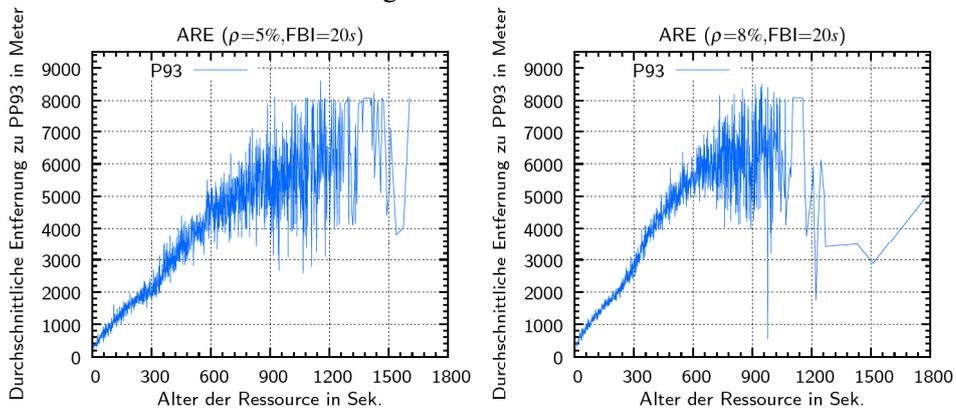


Abbildung 6.12.: Alter der Ressource PP93 über die Entfernung (ARE-Messung) bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate

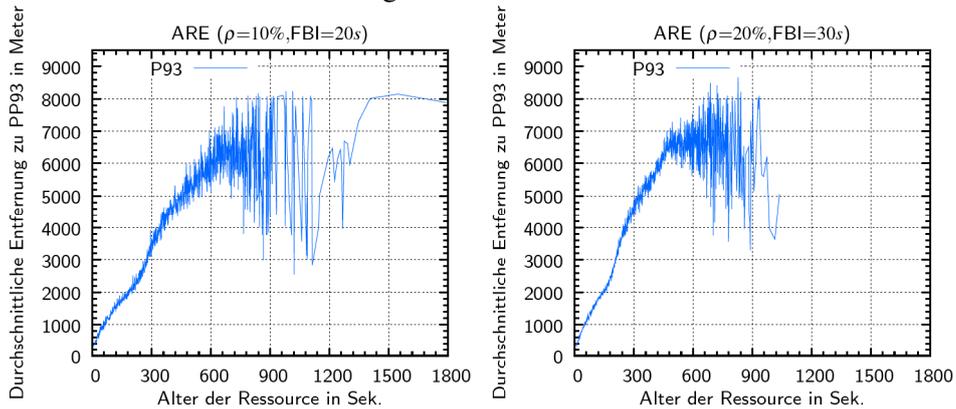


Abbildung 6.13.: Alter der Ressource PP93 über die Entfernung (ARE-Messung) bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate

**Bewertung der Messergebnisse** Die Darstellungen zum durchschnittlichen Alter der Parkrauminformation in Abhängigkeit der Verbreitungsentfernung lassen folgende Interpretationen zu: Bei 1%-Ausstattungsrate kann kein entfernungsabhängiges Alter für die Informationsverbreitung angegeben werden. Die vorliegenden Schwankungen resultieren aus der geringen Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge und der fehlenden Konnektivität. Die Schwankungen bei 3%-Ausstattungsrate sind weiterhin stark, allerdings ist erkennbar, dass das Informationsalter mit steigender Entfernung positiv korreliert. Mit steigenden Ausstattungsraten nimmt die Schwankungsbreite ab, die Information verbreitet sich gleichmäßiger. Die Steigung der ARE-Kurve nimmt mit steigender Ausstattungsrate zu. Das bedeutet auch, dass sich Information bei 5%-Ausstattungsrate langsamer verbreitet als bei 10% und umgekehrt, dass sich Information bei gleichbleibendem Alter bei 10% in weitere Entfernungen verbreitet als bei 5%-Ausstattungsrate. Beispielsweise hat Information mit einem Alter von ca. 300 Sekunden bei 5% eine Verbreitungsentfernung von ca. 2000 Metern und bei 10% von ca. 3000 Metern.

Bis zu einer Entfernung von 6000 Metern ist der Anstieg zwischen dem Alter der Ressourcen und der Verbreitungsentfernung positiv korreliert. Ab 6000 Meter Entfernung zum Informationsursprung werden Schwankungen stärker. Das Alter der Ressourcen in einer Entfernung ab 6000 Metern kann nicht bestimmt werden (siehe z.B. Abbildung 6.12). Im Braunschweiger Modell nimmt die Anzahl der Fahrzeuge besonders in äußeren Randbereichen ab. Die Instabilität ab 6000 Metern kann auf die geringe Anzahl der Fahrzeuge in den Randgebieten zurückgeführt werden. Trotz der geringen Fahrzeuganzahl im Mittel bilden sich Kommunikationsketten, die eine Informationsübertragung ermöglichen. Dieser Effekt kommt insbesondere auf Zubringer- und Einfallstraßen zum Tragen, weil diese zu Hauptverkehrszeiten viel Fahrzeugverkehr tragen müssen. Außerhalb dieser Zeiten sind diese Straßen wenig ausgelastet. Dies führt wiederum zu wenigen ausgestatteten Fahrzeugen und damit zur Instabilität in der Informationsverbreitung.

In Tabelle 6.5 ist die durchschnittliche Verbreitungsentfernung, d.h. die Entfernung zwischen Fahrzeug und dem Parkplatz Scharmstraße (siehe dazu Anhang A) für Parkrauminformation die jünger als 300 Sekunden ist, dargestellt.

**Fazit** Das Alter der Ressourcen im Netz ist abhängig von der Distanz zwischen Fahrzeug und Parkplatz und der Ausstattungsrate. Niedrige Ausstattungsraten führen, auch wenn sie sich bis zu 7000 Meter weit verbreitet, zu sehr alter Information. Mit steigender Ausstattungsrate stabilisiert sich das durchschnittliche Alter der Ressourcen bei steigenden Entfernungen. Verlässliche Aussagen zum Informationsalter sind erst ab ca. 3%-Ausstattungsrate

Ausstattungsrate	∅ Verbreitungsradius
1%	keine Angabe möglich
3%	1500 Meter
5%	2000 Meter
8%	2500 Meter
10%	3000 Meter
20%	4500 Meter

Tabelle 6.5.: Verbreitung von Parkrauminformation jünger als 300 Sekunden

und für Entfernungen von maximal 6000 Metern möglich.

### 6.3.2.3. Redundanzgrad empfangener Information (BHR-Messung)

**Ziel** Durch den periodischen und dezentralen Broadcast gleicher Parkrauminformation empfangen Fahrzeuge mehrfach gleiche Belegungsinformation. Die dadurch entstehende Redundanz führt zu Last auf dem Funkkanal, trägt aber anderweitig durch Erhöhung der Verfügbarkeit der Information zur besseren Verbreitung aktueller Parkrauminformation bei. Ziel dieser Untersuchung ist es, den Redundanzgrad in Abhängigkeit der Ausstattungsrate zu ermitteln.

**Beschreibung** Der Redundanzgrad im System definiert den Anteil mehrfach empfangener Information und hängt vom FBI-Wert, der Ausstattungsrate sowie den Bewegungsmustern der Fahrzeuge ab. Der Redundanzgrad des Szenarios wird über die Broadcast-Hit-Ratio Messung (BHR-Messung) ermittelt. In der BHR-Messung ist ein Hit als das Ersetzen oder das Integrieren einer einzelnen Parkrauminformation im Cache des empfangenden Fahrzeugs definiert. Das Broadcast-Hit-Ratio für einen Sendevorgang berechnet sich aus dem Verhältnis der Summe erfolgreich integrierter Parkrauminformationen  $m$  und der Summe  $n$  ( $m \leq n$ ) insgesamt empfangener Belegungsinformationen (siehe dazu Abbildung 3.5), also aus  $\frac{m}{n}$ . Der BHR-Wert wird nach jedem Empfang durch diese Gleichung ermittelt. Die BHR-Werte aller Sendevorgänge werden über die gesamte Simulationszeit über alle Fahrzeuge aufsummiert und gemittelt, um einen durchschnittlichen BHR-Wert für die untersuchte Ausstattungsrate über die gesamte Simulationszeit zu erhalten.

**Bewertung der Messergebnisse** In Abbildung 6.14 sind die durchschnittlichen BHR-Werte für die atomare Variante dargestellt. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die Anzahl erfolgreich integrierter Parkrauminformationen in den Fahrzeugen.

Mit zunehmender Ausstattungsrate nimmt die Anzahl erfolgreich integrierter Parkrauminformationen zu, was gleichbedeutend damit ist, dass die Redundanz leicht abnimmt.

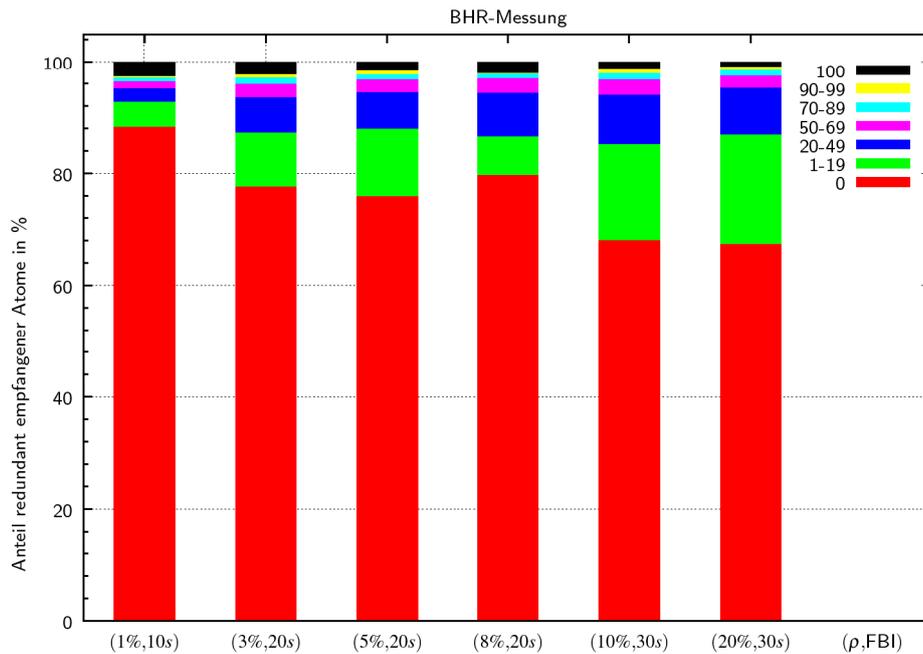


Abbildung 6.14.: Redundanzgrad empfangener Atome

Allerdings ist das nur im Verhältnis zu sehen, da absolut betrachtet die Netzlast insgesamt, mit steigenden Ausstattungsraten zunimmt und damit auch die Anzahl redundanter Broadcasts. Die relative Abnahme der Redundanz bei steigenden Ausstattungsraten liegt vor allem daran, dass die Anzahl nicht informierter aber ausgestatteter und damit durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erreichbarer Fahrzeuge steigt. Durch die steigende Konnektivität (siehe dazu Abschnitt 5.3.4) können Fahrzeuge in Randgebieten, in denen die Konnektivität gering ist (siehe dazu Anhang A), besser erreicht werden. Die Integration der Information in Fahrzeugen in den Randgebieten reduziert den Redundanzgrad im System. Demgegenüber steht die steigende Redundanz im inneren Stadtbereich, da sich auch hier bei höheren Ausstattungsraten die Anzahl der Fahrzeuge erhöht und diese teilweise hohe Standzeiten, z.B. an Lichtsignalanlagen haben.

Die Aussage, dass der Redundanzgrad im Parkrauminformationssystem mit steigender Ausstattungsrate abnimmt, kann simulationsbedingt nur bis zu einer Ausstattungsrate von 20% getroffen werden. Die weitere Reduzierung des Redundanzgrades bei Ausstattungsraten > 20% kann z.B. durch die Erhöhung des FBI-Wertes auf Werte  $\geq 30$  Sekunden erreicht werden, sofern sich hohe FBI-Werte nicht auf die Qualität der Informationsverbreitung auswirken.

**Fazit** Ein hoher Redundanzgrad im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz führt zur Erhöhung der Netzlast, aber auch gleichzeitig zur Steigerung der Verbreitungsqualität. Richtig parametrisiert stellt Redundanz ein wichtiges Hilfsmittel zur Abwägung des Verhältnisses Netzlast und Redundanzgrad und damit zur Bestimmung der Qualität der Informationsverbreitung dar.

### 6.3.3. Untersuchungen zur Variante mit aggregierter Verteilung

Ausgehend von den in Abschnitt 6.2 definierten Kenngrößen und den Untersuchungen zur atomaren Variante, gilt es in diesem Abschnitt die aggregierte Variante zu evaluieren.

#### 6.3.3.1. Alter der Ressourcen für Aggregate (ADRA-Messung)

**Ziel** Das Alter der Ressourcen ist bei der Suche nach freiem Parkraum ein wesentliches Kriterium. Je jünger eine Ressource ist, desto genauer gibt sie den Belegungszustand wieder und desto höher ist ihr Nutzen für den Fahrer bei einer Parkentscheidung.

**Beschreibung** In der ADRA-Messung wird zu jedem Zeitpunkt das Alter der Ressourcen (Atome und Level-1 bis Level-6 Aggregate) über alle Fahrzeuge im Szenario gemittelt abgetragen.

**Bewertung der Messergebnisse** Das durchschnittliche Alter der Ressourcen sinkt mit steigenden Ausstattungsrate. Bei 1%-Ausstattungsrate ist die Entwicklung des durchschnittlichen Informationsalters über die gesamte Simulationszeit und alle Level sehr ungleichmäßig. Die Werte für das Alter der Ressourcen schwanken zwischen ca. 200 Sekunden und ca. 1000 Sekunden. Bereits bei 3%-Ausstattungsrate ist die Entwicklung des durchschnittlichen Informationsalters gleichmäßiger. Das durchschnittliche Alter bei 3%-Ausstattungsrate liegt zwischen 200 und 600 Sekunden. Die Gleichmäßigkeit (weniger Schwankungen) nimmt mit steigender Ausstattungsrate zu. Ab 5%-Ausstattungsrate schwingt sich das durchschnittliche Alter im Intervall von ca. 200 bis 400 Sekunden ein. Ab 5% rückt das Alter aller Aggregate immer näher zusammen. Die von den Ausstattungsrate abhängigen Werte für das durchschnittliche Alter der Ressourcen ist in Tabelle 6.6 dargestellt.

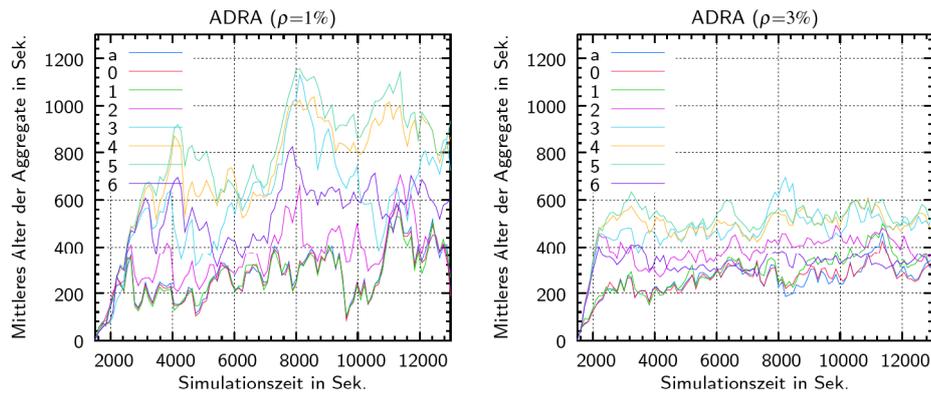


Abbildung 6.15.: ADRA-Messung zur Variante mit aggregierter Verteilung für 1%- und 3%-Ausstattungsrate

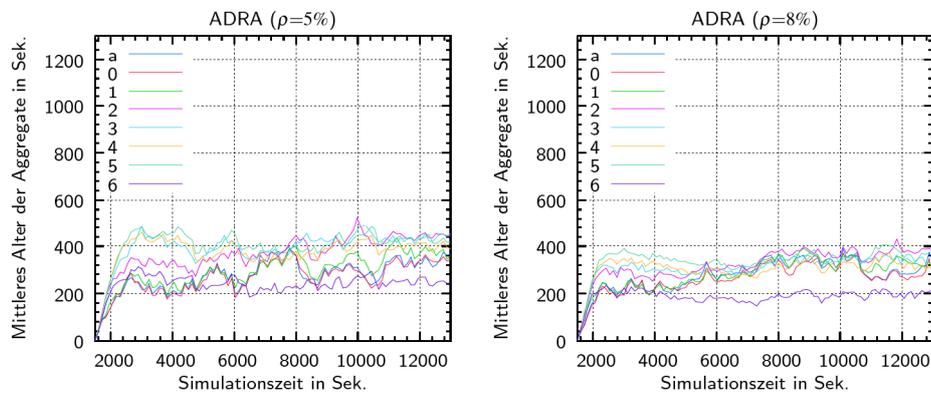


Abbildung 6.16.: ADRA-Messung zur Variante mit aggregierter Verteilung für 5%- und 8%-Ausstattungsrate

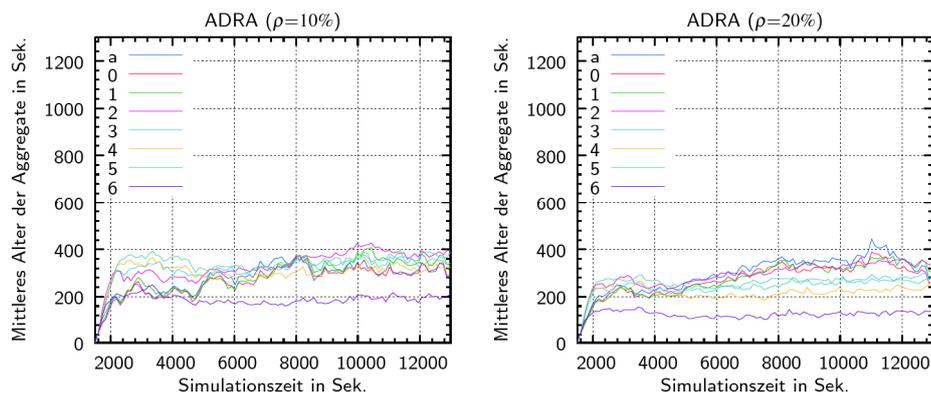


Abbildung 6.17.: ADRA-Messung zur Variante mit aggregierter Verteilung für 10%- und 20%-Ausstattungsrate

Level	1%	3%	5%	8%	10%	20%
Atome	280	258	275	277	279	297
L0	274	259	268	264	269	274
L1	270	289	295	283	289	276
L2	364	380	368	324	331	293
L3	593	476	395	311	327	250
L4	725	489	376	305	304	216
L5	788	514	404	338	334	253
L6	524	326	240	188	187	125

Tabelle 6.6.: Durchschnittliches Alter der Atome und Aggregate (Sek.)

**Fazit** Mit steigenden Ausstattungsraten sinkt das durchschnittliche Alter der Ressourcen. Das niedrige Durchschnittsalter ist positiv zu bewerten, da es sich bei jüngerer Information gleichzeitig auch um Information handelt, die einen höheren Nutzen für den Parksuchverkehr hat.

### 6.3.3.2. Alter der Ressourcen über die Entfernung für Aggregate (AREA-Messung)

**Ziel** Der Nutzen aggregierter Parkrauminformation wird durch das entfernungsabhängige Alter der Aggregate bestimmt. Ziel der AREA-Messung ist die Ermittlung der Entwicklung des Alters der Aggregate über die Entfernung, um die Aktualität und damit den Nutzen dieser für einzelne Fahrzeuge einschätzen zu können.

**Beschreibung** In der AREA-Messung wird zu jedem Zeitpunkt das Alter der Ressourcen und die Entfernung zu den Ressourcen abgetragen. Diese sind bei Atomen die Positionen der Parkautomaten und bei Aggregaten jeweils der Aggregatmittelpunkt. Die ermittelten Werte werden über alle Fahrzeuge im Szenario gemittelt.

**Bewertung der Messergebnisse** Durch die Verteilungsstrategie in Abschnitt 3.6 verbreiten sich Aggregate mit steigendem Level in entferntere Bereiche als Aggregate niedrigeren Levels. Die gezielt lokale Verbreitung von Atomen und Aggregaten niedrigen Levels führt zu einem geringen Informationsalter für alle Ressourcen im Szenario. In den Abbildungen 6.18, 6.19 und 6.20 ist für die unterschiedlichen Ausstattungsraten die Verbreitungsentfernung in Abhängigkeit des Alters abgetragen.

Levels-0 Aggregate haben immer das geringste Durchschnittsalter und die geringste Verbreitungsentfernung. Das Alter und die Verbreitungsentfernung der Aggregate steigt mit steigendem Level.

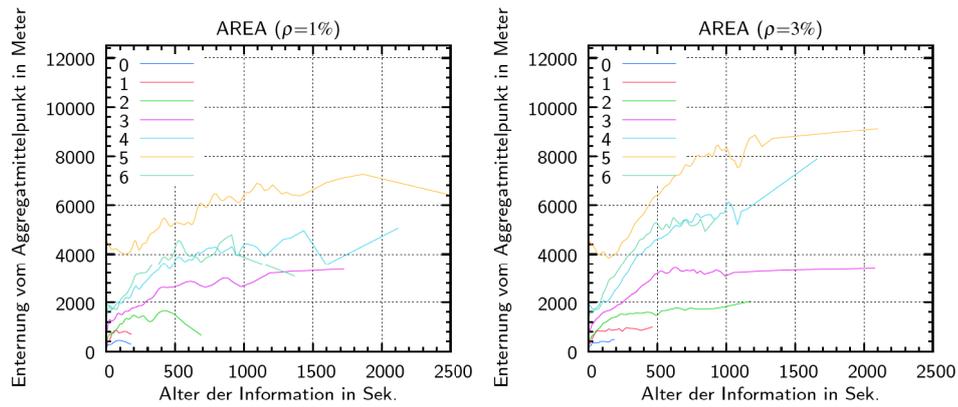


Abbildung 6.18.: Alter der Aggregate über die Entfernung bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate

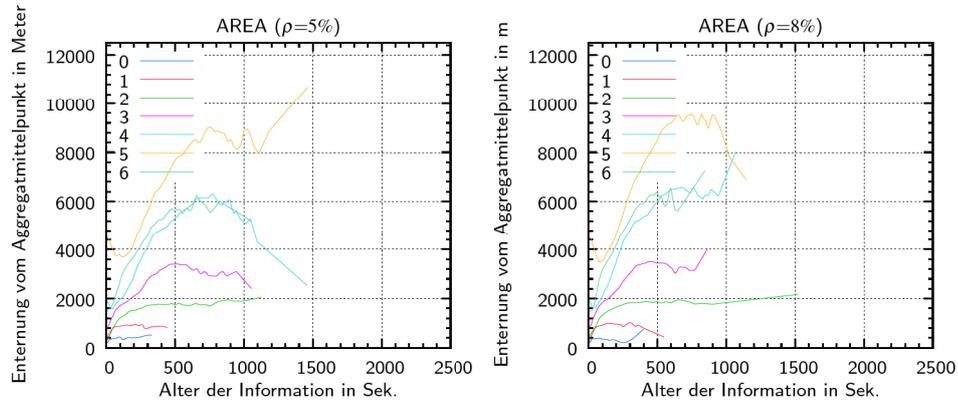


Abbildung 6.19.: Alter der Aggregate über die Entfernung bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate

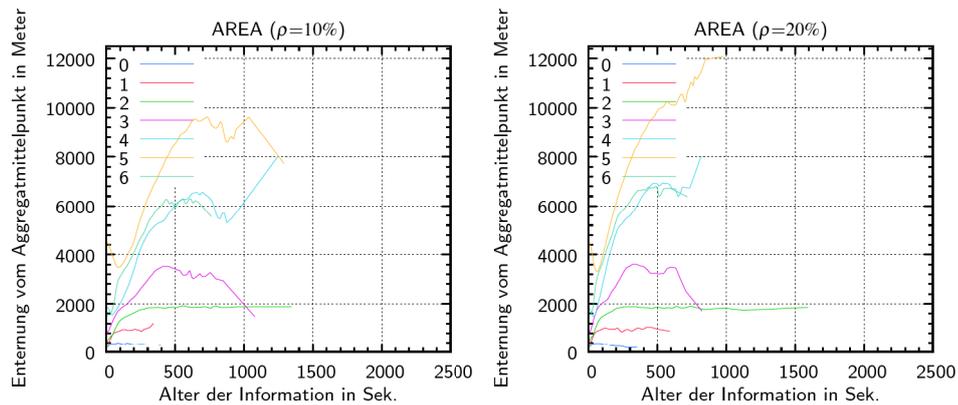


Abbildung 6.20.: Alter der Aggregate über die Entfernung bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate

Der Anstieg der Ausstattungsrates hat positive Auswirkungen auf das durchschnittliche Informationsalter und keine Auswirkung auf die Verbreitungsentfernung. Beispielsweise verbreiten sich Level-3 Aggregate bei 5%-Ausstattungsrate und einem maximalen Durchschnittsalter von ca. 1000 Sekunden 3000 Meter weit. Bereits bei 8%-Ausstattungsrate reduziert sich das maximale Alter von Level-3 Aggregaten auf unter 800 Sekunden bei gleicher Verbreitungsentfernung (siehe dazu Abbildung 6.19). Dass Information insbesondere bei niedrigen Ausstattungsrates bis zu 2000 Sekunden alt werden kann, liegt an der fehlenden Konnektivität und daran, dass Fahrzeuge physikalisch vereinzelt Information in Gebiete mit sehr wenigen Fahrzeugen transportieren. Diese Informationen können aufgrund der geringen Konnektivität nicht unmittelbar durch andere Fahrzeuge aktualisiert werden und tragen bei der Bildung von Mittelwerten negativ zum durchschnittlichen Informationsalter der Aggregate bei.

**Fazit** Steigende Ausstattungsrates haben für alle Ressourcen, unabhängig des Levels, den Effekt, dass ihr durchschnittliches Alter mit steigender Ausstattungsrates in gleichen Entfernungen abnimmt.

### 6.3.3.3. Granularität empfangener Level über die Entfernung (GLE-Messung)

**Ziel** Die in Kapitel 3.6 eingeführte level-abhängige Verteilungsstrategie für Parkrauminformation hat das Ziel, Aggregate niedrigen Levels möglichst lokal und Aggregate höheren Levels möglichst global zu verbreiten. Ziel dieser Untersuchung ist die Evaluierung der vorgestellten Verteilungsstrategie.

**Beschreibung** Zu jedem Empfangszeitpunkt werden in der GLE-Messung die Level und die Entfernung zum Mittelpunkt empfangener Aggregate aus Sicht jedes einzelnen Fahrzeugs ermittelt und die Anzahl der empfangenen Aggregate entfernungsabhängig pro Level abgetragen.

**Bewertung der Messergebnisse** Abbildungen 6.21, 6.22 und 6.23 zeigen die Verteilung der Aggregate für die betrachteten Ausstattungsrates. Der prozentuale Anteil von Level-0 bis Level-6 Aggregaten, die aus einer Entfernung von 0 bis 500 Metern empfangen werden, ist ungefähr gleich. Mit steigender Entfernung werden immer weniger Level-0 und Level-1 Aggregate empfangen. Empfangene Aggregate ab ca. 4000 Metern gehören den

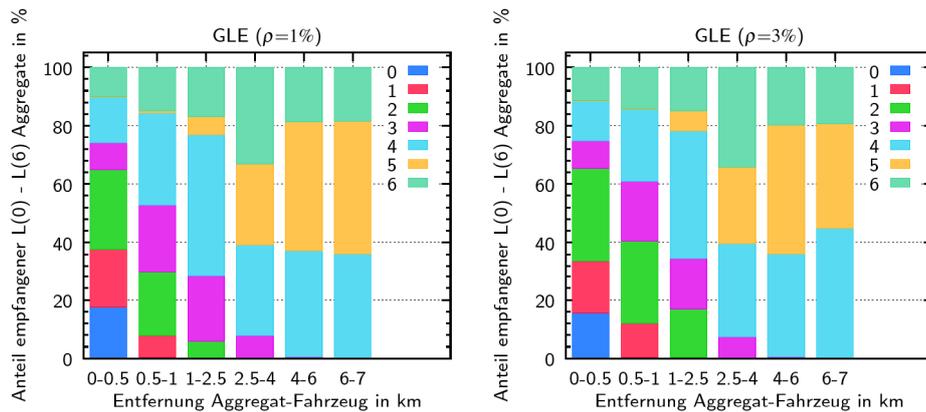


Abbildung 6.21.: Granularität empfangener Level über die Entfernung (GLE-Messung) bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate

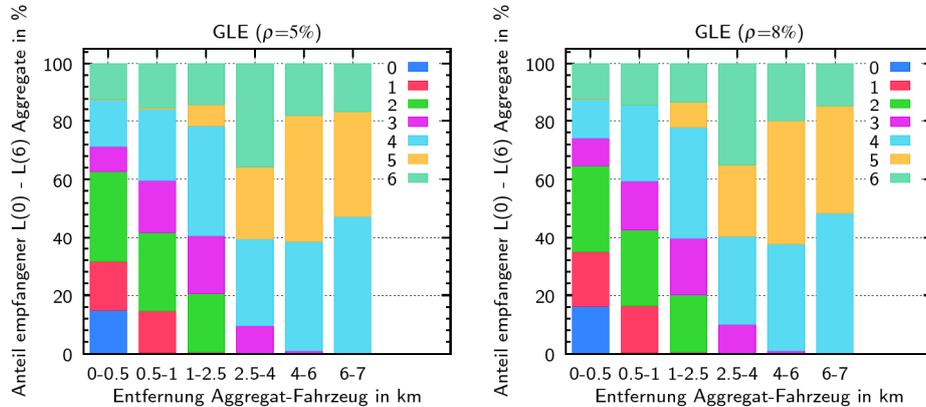


Abbildung 6.22.: Granularität empfangener Level über die Entfernung (GLE-Messung) bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate

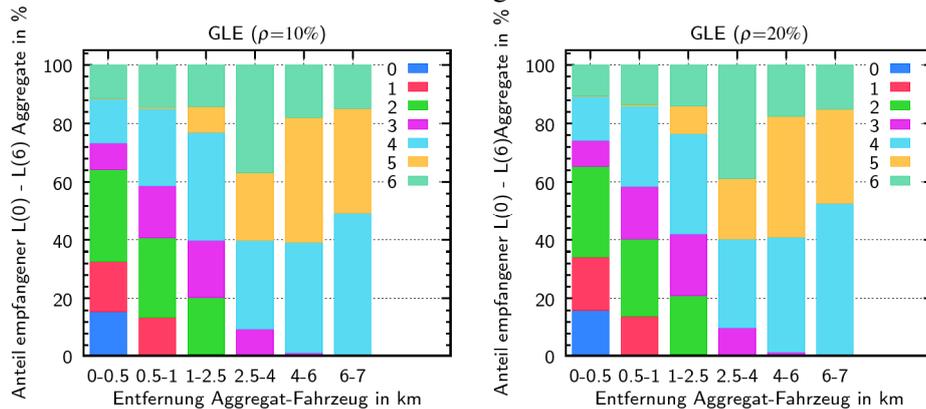


Abbildung 6.23.: Granularität empfangener Level über die Entfernung (GLE-Messung) bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate

Leveln 4, 5 und 6 an. Veränderungen in der Ausstattungsrate bewirken eine Veränderung im Alter der empfangenen Information und in der von der Anwendung erzeugten Netzlast.

**Fazit** Die Information wird gemäß der Annahme, dass lokale Information maximalen Nutzen für die Fahrzeuge erbringt, verbreitet. Das gewollte Verteilungsverhalten stellt sich damit unabhängig von der Ausstattungsrate ein und bleibt stabil.

Der Nachweis der Bandbreiteneffizienz dieser Verbreitungsstrategie gegenüber der atomaren Variante wird in Abschnitt 6.3.4 erbracht.

#### 6.3.3.4. Mittlerer Informationsgehalt (MIA)

**Ziel** Der mittlere Informationsgehalt MIA definiert das Verhältnis zwischen der tatsächlich vorhandenen zu der insgesamt verfügbaren Parkrauminformation in dem von diesem Aggregat abgedeckten Gebiet. Ziel der Verbreitungsstrategie ist die Erzeugung qualitativ hochwertiger Aggregate. Die MIA-Messung validiert die Verteilungsstrategie und stellt die Qualität erzeugter Aggregate dar.

**Beschreibung** Die umgesetzte Verteilungsstrategie verbreitet Aggregate so, dass Aggregate eines höheren Levels möglichst viele Atome bzw. möglichst viele Aggregate des eins niedrigeren Levels beinhalten. Zu jedem Zeitpunkt, in dem ein neues Aggregat erzeugt wird, wird das Verhältnis zwischen den vorhandenen Atomen im Aggregat und den Atomen die tatsächlich in dem von diesem Aggregat abgedeckten Gebiet existieren gebildet und gemittelt über alle Fahrzeuge abgetragen.

**Bewertung der Messergebnisse** Die MIA-Werte der erzeugten Aggregate sind in Tabelle 6.7 dargestellt. Der MIA-Wert ist ein Indikator für die Qualität der Informationsverbreitung. Je besser sich Atome im Szenario verbreiten, desto höher ist der Informationsgehalt erzeugter Aggregate. Steigende Ausstattungsraten wirken sich positiv auf die Informationsverbreitung aus. Dies lässt sich an dem mit der Ausstattungsrate ansteigenden Informationsgehalt erzeugter Aggregate erkennen (siehe dazu Tabelle 6.7).

**Fazit** Durch die Verteilungsstrategie wird die Erzeugung von Aggregaten mit hohen MIA-Werten erreicht. Obwohl bei niedrigen Leveln, insbesondere bei Level-0 und Level-1 Aggregaten sehr hohe MIA-Werte erreicht werden, sinkt der Informationsgehalt der Aggregate mit steigendem Aggregatelevel. Gründe dafür sind z.B. nicht erfolgreiche Sendevorgänge (siehe dazu Abschnitt 5) oder durch fehlende Kommunikationspartner

Level	1%	3%	5%	8%	10%	20%
0	75.89%	80.57%	87.63%	91.96%	92.13%	97.06%
1	59.11%	61.57%	68.37%	74.15%	73.06%	80.13%
2	32.86%	34.91%	41.38%	46.63%	46.52%	54.07%
3	18.72%	21.22%	22.71%	27.26%	27.05%	30.70%
4	18.47%	21.69%	22.71%	25.89%	26.66%	29.70%
5	18.89%	22.79%	23.11%	25.51%	26.25%	29.00%
6	11.00%	12.37%	15.56%	15.87%	15.86%	18.07%

Tabelle 6.7.: Mittlerer Informationsgehalt der Aggregate

entstehende Kommunikationslücken. Zusätzlich anzumerken ist, dass sich das Fehlen einer atomaren Information in der gesamten Erzeugungskette der Aggregate von Level-0 bis Level-6 durchgehend negativ auswirkt. Weiterhin erschweren Gebäude und stehender Fahrzeugverkehr die Informationsverbreitung zusätzlich und damit auch die Erzeugung von Aggregaten mit hohen MIA-Werten. Aggregate die in direkter Umgebung eines Fahrzeugs gebildet werden (z.B. Level-0, Level-1 und Level-2 Aggregate) und damit von hoher Relevanz sind, haben hohe MIA-Werte. Vorausgesetzt, dass der Nutzen entfernter Parkplatzinformation mit steigender Entfernung abnehmen darf und Fahrzeuge diese Information für eine erste Orientierung nutzen, sind niedrige MIA-Werte für Aggregate höheren Levels ausreichend. Die Bildung von Aggregaten mit niedrigen MIA-Werten trägt maßgeblich zur Reduzierung der Netzlast bei.

#### 6.3.3.5. Redundanzgrad empfangener Information (BHR-Messung)

**Beschreibung und Bewertung** Die BHR-Messung in Abbildung 6.24 ist für die in Kapitel 3.6 beschriebene Verteilungsstrategie durchgeführt worden. Die Definition des Broadcast-Hit-Ratios sowie die Darstellung des Redundanzgrades ist analog zu der in Abschnitt 6.3.2.3. Der Redundanzgrad in Abbildung 6.24 ist über alle Level kumuliert abgetragen.

**Fazit** Die eingeführte Verteilungsstrategie, Atome und Aggregate abhängig vom Level und lokal zu verbreiten, reduziert die Anzahl redundanter Broadcasts im Vergleich zur atomaren Variante (siehe dazu Abschnitt 6.3.2.3).

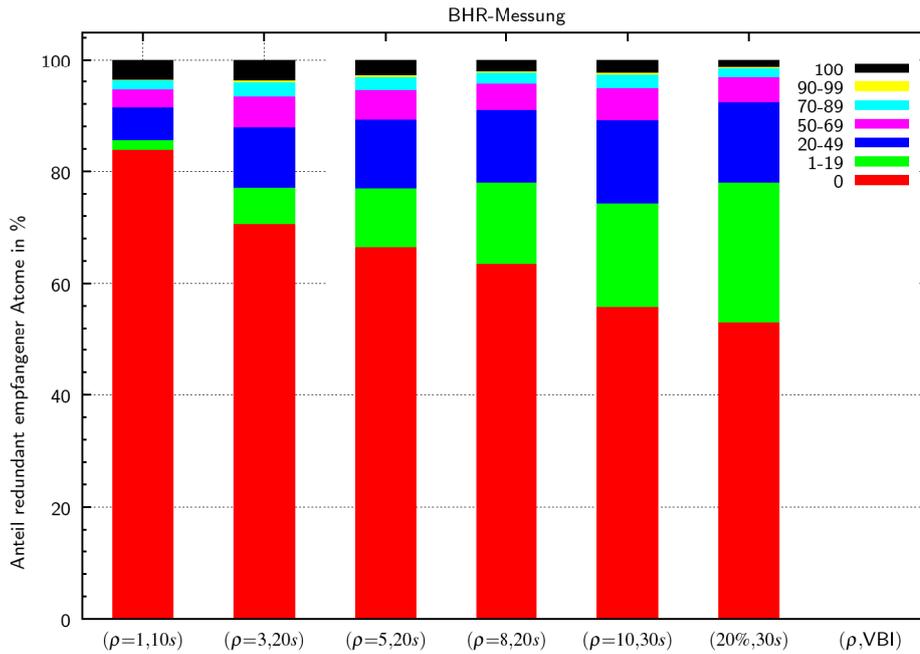


Abbildung 6.24.: Redundanzgrad empfangener Aggregate

### 6.3.4. Netzlast

Die insgesamt erzeugte Netzlast des realisierten dezentralen Parkrauminformationssystems besteht aus der Netzlast der Parkautomaten und der Fahrzeuge. Die Berechnung der Werte erfolgt mittels der Formeln aus Abschnitt 6.2.2.

Bezeichnung	Parameterbeschreibung
$\rho$	Ausstattungsrate
$n_F$	Anzahl Fahrzeuge
$n_P$	Anzahl Parkautomaten
$n_D$	Erzeugte Netzlast in Mb
$n_P$	Anzahl insgesamt versendeter Datenpakete
$n_L(n_{LC})$	Paketverluste (durch Kollisionen)
$b_{wc}$	Bandbreitenbedarf pro WLAN Zelle in Kbps
$b_F$	Bandbreitenbedarf pro Fahrzeug in Kbps
$\sigma_F$	Durchschnittliche Auslastung des Funkkanals pro Fahrzeug
$b$	Bandbreitenbedarf der Parkautomaten insgesamt
$b_P$	Bandbreitenbedarf eines Parkautomaten
$\sigma_P$	Durchschnittliche Auslastung des Funkkanals pro Parkautomat

Tabelle 6.8.: Kriterien zur Messung der Netzlast

#### 6.3.4.1. Erzeugte Netzlast durch Parkautomaten

In Tabelle 6.9 ist die von den Parkautomaten insgesamt genutzte durchschnittliche Bandbreite bei einem Broadcast-Intervall von 5 Sekunden dargestellt. Wegen der festen Zahl von Parkautomaten, der konstanten Datenpaketgröße und dem periodischen Versenden ist die erzeugte Netzlast sowohl für die atomare als auch die aggregierte Variante gleich.

$n_P$	130
$n_D$	6.51 Mb
$n_P$	74200
$b$	4.74 Kbps
$b_P$	37 Bps
$\sigma_P$	0.00033%

Tabelle 6.9.: Bandbreitenbedarf der Parkautomaten (PBI = 5 Sek.)

#### 6.3.4.2. Variante mit atomarer Verbreitung

Die erzeugte Netzlast im Fall der atomaren Variante ist in Tabelle 6.10 dargestellt. Die benötigte Bandbreite der Anwendung steigt mit steigender Anzahl von Fahrzeugen und Parkautomaten. Im Extremfall, also bei Ausstattungsraten von bis zu 100%, zusätzlichen Parkflächen (z.B. Anwohnerparkflächen, Park and Ride Parkflächen, Parkhäuser etc.) und weiteren parallel laufenden Fahrzeug-Fahrzeug-Anwendungen ist zu erwarten, dass die Netzlast unkontrollierbar ansteigt und der Durchsatz des Funkkanals die Datenmenge nicht mehr trägt. Daher muss jede Anwendung für sich, die zur Verfügung stehende Bandbreite möglichst effektiv nutzen. Im Fall des dezentralen Parkrauminformationssystems wird das durch Einführung der Aggregation und der Verteilungsstrategie erreicht.

#### 6.3.4.3. Variante mit aggregierter Verteilung

In Tabelle 6.11 wird der Bandbreitenbedarf der aggregierten Variante dargestellt. Die Erläuterung der Kriterien zur Netzlast findet sich in Abschnitt 6.2.2 bzw. in Tabelle 6.8 wieder.

### 6.4. Zusammenfassung

Die Verteilungsstrategie, Atome in lokaler Umgebung und Aggregate abhängig von ihrem Level in entferntere Bereiche zu versenden, reduziert die durch Parkrauminformation erzeugte Netzlast.

$\rho$	1%				3%			
	10s	20s	30s	40s	10s	20s	30s	40s
FBI	1015	1036	1026	960	3561	3437	3461	3381
$n_F$	260.2	131.7	83.0	54.4	865	464	133.9	238
$n_D$ in Mb	62522	31055	20516	14306	186762	101049	69308	51340
$n_L$ ( $n_{LC}$ )	36864(41)	18268(33)	11430(14)	8176(7)	60633(735)	31080(357)	21485(198)	15736(92)
$b_{w,c}$ in Kbps	0.15	0.07	0.06	0.03	1.2	0.7	0.5	0.35
$b_F$ in Kbps	3.3	1.7	1.1	0.8	3.7	0.8	1.3	1.0
$\sigma_F$ in %	0.031	0.016	0.010	0.007	0.035	0.017	0.012	0.009
$\rho$	5%				8%			
	10s	20s	30s	40s	10s	20s	30s	40s
FBI	6049	6027	5985	5942	9514	9564	9523	9461
$n_F$	1526	845	578	437	2640	1410	945	730
$n_D$ in Mb	320468	177471	121957	92157	548326	293147	195875	152315
$n_L$ ( $n_{LC}$ )	68328(3578)	36919(1269)	24510(594)	18240(476)	93962(17012)	44622(4789)	29166(2449)	21206(1493)
$b_{w,c}$ in Kbps	3.6	2.01	1.38	1.1	9.46	5.06	3.42	2.68
$b_F$ in KBps	3.9	2.0	1.3	1.0	3.9	2.0	1.4	1.0
$\sigma_F$ in %	0.036	0.018	0.012	0.0094	0.037	0.018	0.013	0.009
$\rho$	10%				20%			
	10s	20s	30s	40s	10s	20s	30s	40s
FBI	11907	12111	12069	11843	22616	24204	24146	24069
$n_F$	3222	1790	1254	914	6070	3650	2495	1895
$n_D$ in Mb	665550	369839	257687	187238	1245474	744496	512491	389140
$n_L$ ( $n_{LC}$ )	101599(27237)	49614(9329)	33003(5093)	22564(2624)	262645(198489)	111782(74589)	58028(33124)	38815(20213)
$b_{w,c}$ in Kbps	14.03	8.03	5.74	4.04	56.27	31.62	22.11	16.92
$b_F$ in Kbps	4.0	2.0	1.3	1.0	4.0	2.0	1.3	1.0
$\sigma_F$ in %	0.037	0.019	0.013	0.01	0.04	0.019	0.012	0.01

Tabelle 6.10.: Bandbreitenbedarf der atomaren Variante

$\rho$ (FBI)	1% (10s)	3% (20s)	5% (20s)	8% (20s)	10% (20s)	20% (30s)
$n_F$	1091	3502	6020	9641	12051	24102
$n_D$ in (MB)	11	18.5	32	52.6	44.2	90
$n_P$	66287	113743	193653	310627	260492	519934
$n_L(n_{LC})$	35958 (14)	30094 (97)	33162 (158)	34406 (555)	22037 (560)	21977 (2910)
$b_{wc}$ in Kbps	0.008	0.015	0.03	0.043	0.048	0.08
$b_F$ in Kbps	0.14	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05
$\sigma_F$ in %	0.001	0.0007	0.0007	0.0007	0.0005	0.0005

Tabelle 6.11.: Bandbreitenbedarf der Variante mit Aggregation

Im Vergleich zum ausschließlich atomaren Broadcast ist die entwickelte Verteilungsstrategie effizienter. Sowohl das durchschnittliche Informationsalter als auch der Redundanzgrad (siehe dazu Abbildung 6.24) liegen für alle Ausstattungsraten unter den ermittelten Werten für die atomare Variante (siehe dazu Abbildung 6.14). Ebenfalls wird durch die lokale Einschränkung der Informationsverbreitung weniger Netzlast erzeugt. Diese ist in Tabelle 6.12 für beide Realisierungsmöglichkeiten dargestellt. Im Vergleich zur atomaren Variante kann die Netzlast durch Umsetzung der aggregierten Variante um über 90% reduziert werden.

$\rho$ (FBI)	1% (10s)	3% (20s)	5% (20s)	8% (20s)	10%(30s)	20% (30s)
Atomarer Broadcast (Mb)	260,2	464	845	1410	1254	2495
Aggregation (Mb)	11	18.5	32	52.6	44.2	90

Tabelle 6.12.: Vergleich der erzeugten Netzlast: atomare Verbreitung vs. Aggregation

# 7. Evaluierung der Prognosemethodik

Zur Erhöhung der Aussagekraft der Parkrauminformation in den Fahrzeugen und zum Umgang mit latenzbehafteter Informationsübertragung wurde in Kapitel 4 das Prognosemodell vorgestellt. Weiterhin wurde in Abschnitt 5.4.2.1 ein von dem Prognosemodell unabhängiges Modell zur Belegungserzeugung erarbeitet. Zur Evaluierung der Prognosemethodik werden diese beiden voneinander unabhängigen Modelle über die Parameter  $\lambda$  und  $\mu$  miteinander gekoppelt. Das die Prognose durchführende Fahrzeug empfängt diese Parameter über das Fahrzeug-Fahrzeug-Netz und führt die Prognose für die ermittelte Prognosezeit durch.

## 7.1. Ermittlung der Prognosezeiten

Zur Ermittlung der Prognosezeit eines Fahrzeugs sind zwei Werte zu bestimmen. Diese sind die Restfahrzeit  $t_{rfz}$  zum Zielparkplatz und das Informationsalter der Parkplatzinformation  $t_{ia}$ . Aus der Summe dieser beiden Werte ergibt sich die zu prognostizierende Zeit  $t_{pr}$ .

$$t_{pr} = t_{rfz} + t_{ia} \quad (7.1)$$

### 7.1.1. Restfahrzeiten der Fahrzeuge

In Tabelle 7.1 sind die durchschnittlichen Restfahrzeiten der Fahrzeuge zu den einzelnen Parkflächen und Aggregatmittelpunkten dargestellt. Die Restfahrzeiten, welche unabhängig von den Ausstattungsraten sind, werden mittels der Navigationsschnittstelle der Simulationsumgebung zu jeder Simulationssekunde ausgelesen (siehe dazu Abschnitt 5.1.3).

Aus der Tabelle lässt sich Folgendes ableiten:

- Der Anteil der Fahrzeuge mit gleichen Restfahrzeiten ist unabhängig von den Ausstattungsraten. Beispielsweise haben ca. 35% der Fahrzeuge eine Restfahrzeit zwischen

$t_{rfz}$	Prozentualer Anteil der Fahrzeuge
$0 < t \leq 300$	53,1%
$300 < t \leq 600$	34,4%
$600 < t \leq 900$	9,6%
$t > 900$	2,9%

Tabelle 7.1.: Restfahrzeiten der Fahrzeuge im Braunschweiger Modell

300 und 600 Sekunden zu den Zielparkplätzen.

- ca. 87% der Fahrzeuge können Zielparkplätze in weniger als 10 Minuten anfahren.
- ca. 3% der Fahrzeuge haben eine Fahrzeit von mehr als 900 Sekunden (ca. 15 Minuten) zu den Parkflächen, wobei es sich hier hauptsächlich um Fahrzeuge auf den Autobahnstrecken nördlich und östlich der Stadt Braunschweig handelt.

### 7.1.2. Durchschnittliches Informationsalter

Das durchschnittliche Alter der Parkrauminformation wurde in Kapitel 6 ermittelt und in den Abschnitten 6.3.2.1 und 6.3.3.1 diskutiert. Zur Festlegung der Prognosezeit wird das durchschnittliche Informationsalter aus den Tabellen 6.4 und 6.6 mit den in diesem Abschnitt ermittelten Restfahrzeiten addiert. Der höchste Durchschnittswert für die atomare Variante beträgt 903 Sekunden. Der höchste Durchschnittswert für die Variante mit Aggregation 788 Sekunden. Durch gezielte Platzierung und Vernetzung von Stützstellen kann das durchschnittliche Informationsalter in einem Fahrzeug-Fahrzeug-Netz weiter reduziert werden [LSCM07].

### 7.1.3. Festlegung des Prognoseintervalls

Werden die Werte  $t_{rfz}$  und  $t_{ia}$  addiert, resultiert hieraus ein maximales Prognoseintervall  $t_{pr}$  von ca. 1800 bis 2100 Sekunden (ca. 30 bis 35 Minuten) als Obergrenze. Weiterhin kann der Ansatz zur Genauigkeit der Informationsverbreitung aus Kapitel 3.6, lokal wichtige Information aus direkter Umgebung möglichst genau zu verarbeiten, auf die Prognose übertragen werden. Für die Prognose bedeutet das, dass Prognosen, welche das direkte Umfeld eines Fahrzeugs betreffen (also von Atomen), im Vergleich zu Prognosen von entfernter Information (also von Aggregaten) den Zustand genauer vorhersagen sollten.

## 7.2. Durchführung und Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird das Prognosemodell aus Kapitel 4 gegen die in Abschnitt 5.4 erzeugte Belegungskurve evaluiert. Zur Evaluierung dieser beiden voneinander unabhängigen Modelle wird das maximale Prognoseintervall in 300 Sekunden Intervalle aufgeteilt. Die dargestellten Prognoseergebnisse betreffen die in den Tabellen 7.2 und 7.3 gekennzeichneten Intervalle. Die Belegungskurven sind mit den in Abschnitt 5.4.3 festgelegten Parameterwerten  $\sigma_{rel} = 0.1$ ,  $\gamma = 0.9$  und  $N_{ref} = 10000$  erzeugt.

Die Wahrscheinlichkeitsvektoren  $\pi$  bilden die Grundlage der Evaluierung. Hierzu wird zu jeder Simulationssekunde das Fahrzeug mit dem größten  $t_{pr}$ -Wert, welches gerade noch kleiner das untersuchte Intervalls ist, zur Evaluierung ausgewählt. Beispielsweise wird bei der Evaluierung des Prognoseintervalls  $300 < t_{pr} \leq 600$  Sekunden zu jeder Simulationssekunde immer das Fahrzeug, welches den größten  $t_{pr}$ -Wert besitzt, der gerade noch kleiner als 600 Sekunden ist, zur Evaluierung ausgewählt. Der resultierende Wahrscheinlichkeitsvektor  $\pi$  für dieses Fahrzeug wird parallel zur Y-Achse auf einer Farbskala abgetragen. Weil in jedem Simulationsschritt immer nur das Fahrzeug mit dem größten  $t_{pr}$ -Wert für das untersuchte Intervall ausgewählt wird, können die Wahrscheinlichkeitsvektoren unabhängig von einem bestimmten Fahrzeug über die gesamte Simulationszeit fortgeschrieben werden. Je dunkler der Farbton um die Belegungskurve ist, desto höher ist die Übereinstimmung zwischen der prognostizierten und der tatsächlich eingetretenen Belegung.

### 7.2.1. Atomare Information

	Markthalle
$0 < t_{pr} \leq 300$	X
$300 < t_{pr} \leq 600$	X
$600 < t_{pr} \leq 900$	X
$900 < t_{pr} \leq 1200$	X
$1200 < t_{pr} \leq 1500$	-
$1500 < t_{pr} \leq 1800$	-
$1800 < t_{pr} \leq 2100$	-

Tabelle 7.2.: Prognoseintervalle für Atome

Die in Tabelle 7.2 dargestellten Intervalle sind beispielhaft an dem Parkplatz „Markthalle“ mit einer Kapazität von 70 Parkplätzen evaluiert (siehe dazu Abbildung 7.1).

**Fazit** Mit zunehmendem Prognoseintervall weicht das Prognoseergebnis von der tatsächlich eintreffenden Belegung ab. Die geringste Abweichung bzw. die größte Sicherheit bei der Prognose wird für  $t_{pr}$ -Werte kleiner als 300 Sekunden erzielt. Je mehr Zustände ein Parkplatz hat, desto geringer ist die zugewiesene Wahrscheinlichkeit für einen einzelnen Zustand. Mit steigendem Prognoseintervall und mit steigender Kapazität werden die den

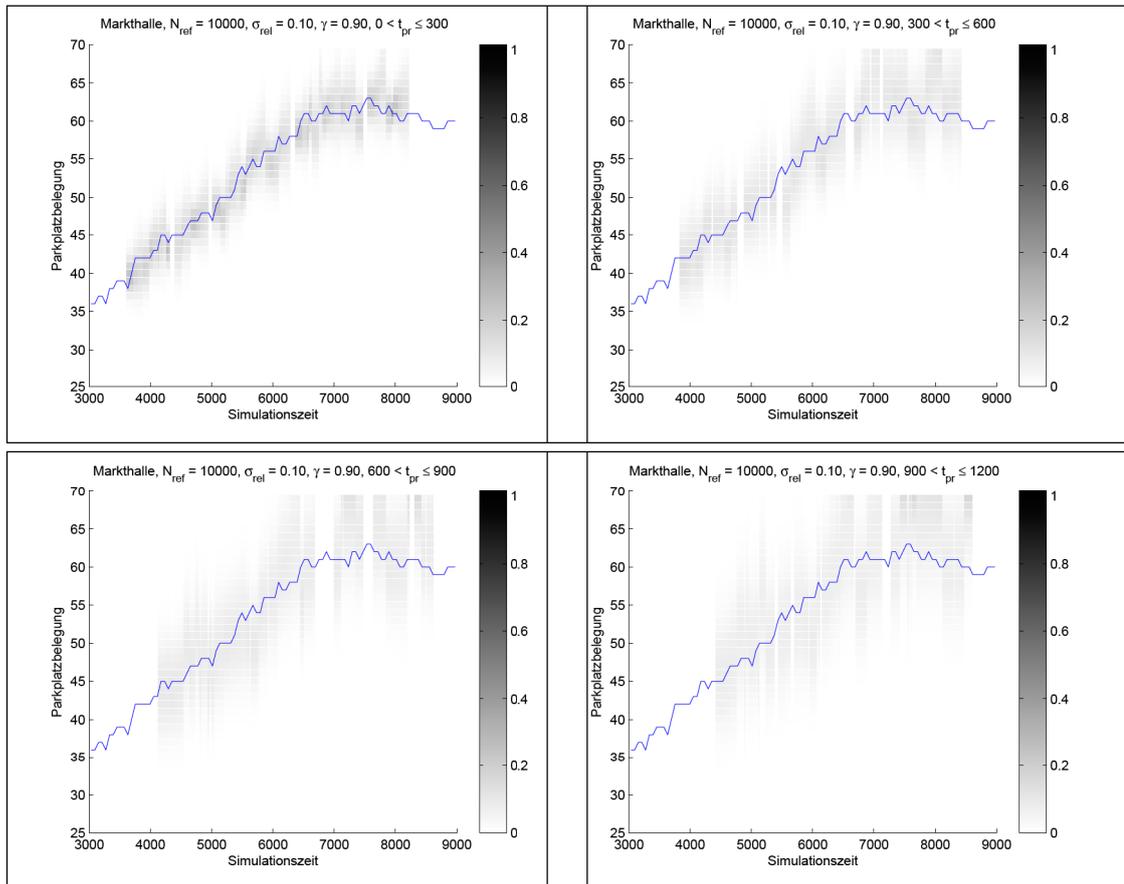


Abbildung 7.1.: Markthalle mit  $t_{pr}$ -Werten  $\leq 1200$

einzelnen Zuständen zugewiesenen Wahrscheinlichkeiten kleiner. Beispielsweise liegt ein sehr großer Anteil der zugewiesenen Wahrscheinlichkeiten für  $t_{pr}$ -Werte zwischen 1200 und 1500 Sekunden zwischen 0.01 und 0.025. In Gegensatz dazu sind diese bei  $t_{pr}$ -Werten bis 300 Sekunden größer als 0.1. Abschließend kann gesagt werden, dass das Modell die Entwicklung von Atomen in einem Intervall von bis zu 10 Minuten (ca. 600 Sekunden) mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig voraussagt.

### 7.2.2. Aggregierte Information

Die zu untersuchenden Prognoseintervalle für Aggregate sind im Vergleich länger als die Intervalle für Atome, da sich Fahrzeuge frühzeitig und in weiter Entfernung auf Basis der Information in den Aggregaten für ein Zielgebiet entscheiden. Die Evaluation von Aggregaten niedrigen Levels ist für kleine Entfernungen (und damit kürzere Prognoseintervalle) und die Evaluation von Aggregaten höheren Levels für größere Entfernungen (und damit für längere Prognoseintervalle) von Bedeutung. In Tabelle 7.3 sind beispielhaft Prognoseintervalle dargestellt, die in den Abbildungen auf den folgenden Seiten wiederzufinden sind. Die Darstellungen beruhen, auf der Annahme, dass der lokale Bezug und die zeitliche Erreichbarkeit von Aggregaten niedrigen Levels bei der Suche nach freien Parkplätzen wichtiger ist als bei Aggregaten höheren Levels.

Aus den Überlegungen folgt, dass es für Aggregate ausreichend ist, die tendenzielle und nicht die genaue Entwicklung vorauszuberechnen. Es werden also nicht die einzelnen Parkplätze, wie es bei Atomen der Fall ist, prognostiziert, sondern Parkplätze so zusammengefasst, dass sich die tendenzielle Entwicklung der Belegungssituation darstellen lässt. Zur Illustration werden im Weiteren die prognostizierten Belegungswahrscheinlichkeiten einzelner Zustände in den evaluierten Aggregaten so abgetragen, dass jeder Zustand des berechneten Wahrscheinlichkeitsvektors 10% der Gesamtbelegung des jeweiligen Aggregats präsentiert. Dies bedeutet, dass eine erfolgreiche Prognose genau dann vorliegt, wenn diese die tatsächlich eingetroffene Belegung mit einer Abweichung von maximal 10% vorausgesagt hat.

Aggregat (i,j,l)	(28,27,0)	(16,15,1)	(8,7,2)	(5,4,3)	(2,2,4)	(1,1,5)	(1,1,6)
$0 < t_{pr} \leq 300$	X	-	-	-	-	-	-
$300 < t_{pr} \leq 600$	-	X	-	-	-	-	-
$600 < t_{pr} \leq 900$	-	-	X	-	-	-	-
$900 < t_{pr} \leq 1200$	-	-	-	X	-	-	-
$1200 < t_{pr} \leq 1500$	-	-	-	-	X	-	-
$1500 < t_{pr} \leq 1800$	-	-	-	-	-	X	-
$1800 < t_{pr} \leq 2100$	-	-	-	-	-	-	X

Tabelle 7.3.: Prognoseintervalle für Aggregate

Um die Eignung der Prognose im dezentralen Parkrauminformationssystem besser darstellen zu können, werden die Abbildungen 7.2 bis 7.5 gemeinsam interpretiert.

**Fazit** Auch bei der aggregierten Variante ist das Prognoseverfahren bei niedrigem Level und kurzem Prognoseintervall sicherer als bei hohem Level und langem Prognoseintervall. Die Abweichung vom tatsächlich eintreffenden Belegungswert ist gering. Dies ist an der

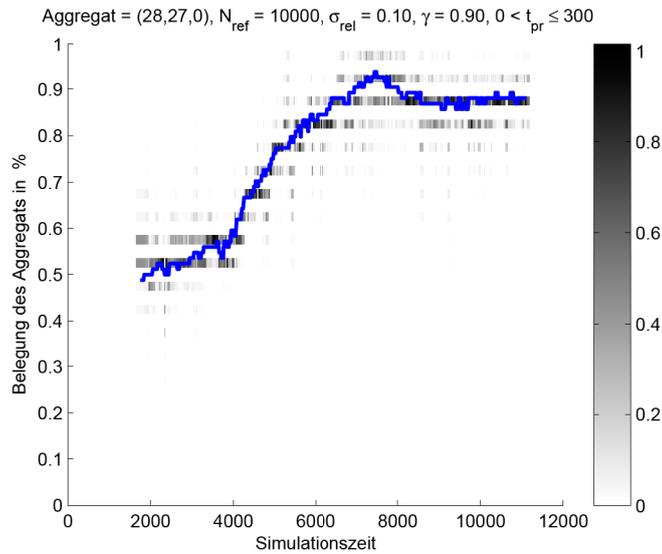


Abbildung 7.2.: Aggregat  $(28,27,0)$  mit  $0 < t_{pr} \leq 300$

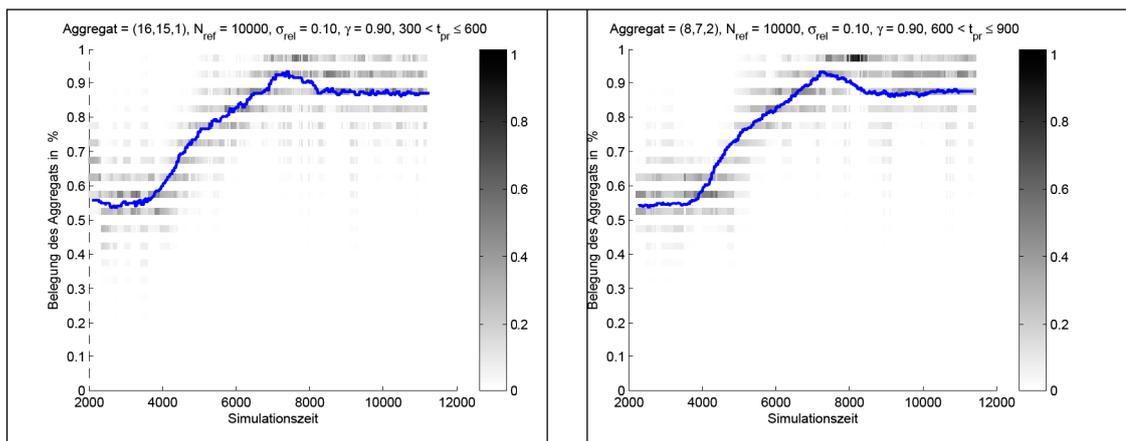


Abbildung 7.3.: Aggregat  $(16,15,1)$  mit  $300 < t_{pr} \leq 600$  und Aggregat  $(8,7,2)$  mit  $600 < t_{pr} \leq 900$

steigenden Farbintensität um die Belegungskurve erkennbar. Mit steigendem Prognoseintervall und Level wird das Prognosemodell unsicherer, d.h. die Farbintensität um die Belegungskurve nimmt ab. Die Anzahl erfolgreich durchgeführter Prognosen ist abhängig vom betrachteten Level. Für Level-0 und Level-1 Aggregate liegt der Großteil erfolgreich durchgeführter Prognosen im Intervall von 0 bis 1200 Sekunden.

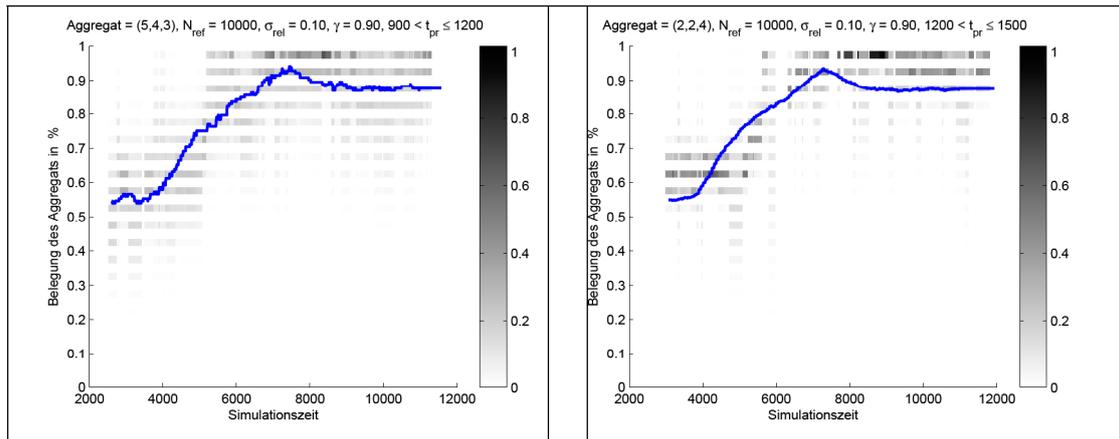


Abbildung 7.4.: Aggregat (5,4,3) mit  $900 < t_{pr} \leq 1200$  und Aggregat (2,2,4) mit  $1200 < t_{pr} \leq 1500$

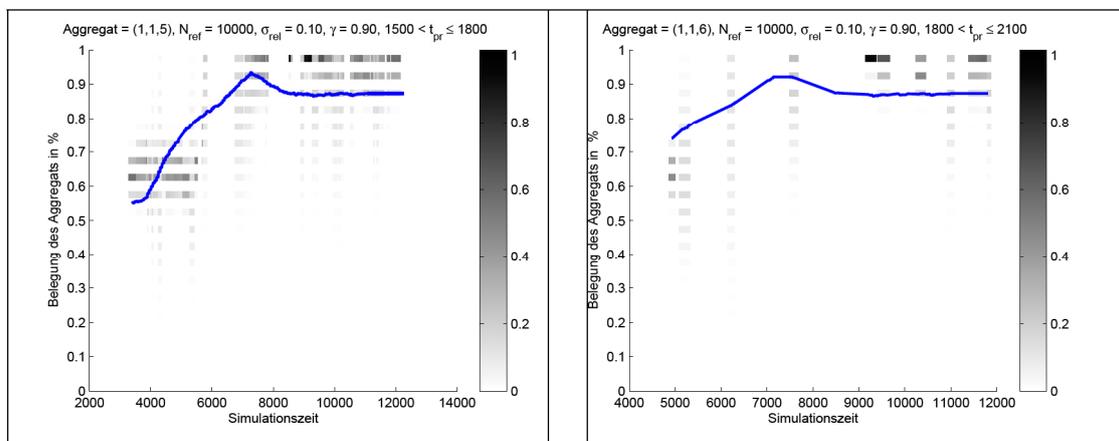


Abbildung 7.5.: Aggregat (1,1,5) mit  $1500 < t_{pr} \leq 1800$  und Aggregat (1,1,6) mit  $1800 < t_{pr} \leq 2100$

## 7.3. Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die Evaluierung der Prognosemethodik für Atome und Aggregate durchgeführt. Das Prognosemodell kann die Aussagekraft der in den Fahrzeugen vorhandenen Parkrauminformation erhöhen. Das Prognosemodell wird sowohl für Atome als auch für Aggregate mit niedriger werdender Granularität (niedriger werdendem Level) und kleiner werdendem Prognoseintervall zuverlässiger. Durch diese Eigenschaft kann der Fahrer Fahrentscheidungen frühzeitig und zugunsten von Bereichen mit höherer Parkwahrscheinlichkeit zwischen Aggregaten gleichen Levels oder Atomen treffen.



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist ein auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation basierendes dezentrales Parkrauminformationssystem für Parkflächen am Straßenrand konzipiert und simulativ evaluiert worden. Die simulative Evaluierung ist mittels eines realitätsnahen Verkehrsmodells der Stadt Braunschweig erfolgt. Die Modellierung der Belegung der Parkautomaten ist ebenfalls auf Basis realer Messdaten der Stadt Braunschweig durchgeführt worden. Aus technischer Sicht trägt das dezentrale Parkrauminformationssystem den Anforderungen und Eigenschaften des Funkmediums Wireless-LAN im automobilen Umfeld Rechnung. Hierzu zählen z.B. geringer Bandbreitenbedarf und der Umgang mit fehlenden Kommunikationspartnern bei niedrigen Ausstattungsraten. Die Anforderungen des Parksuchverkehrs möglichst genaue Parkrauminformation über ihr Umfeld zu erhalten, wird ebenfalls erfüllt. Aus ökonomischer Sicht ist eine kostengünstige Umsetzung möglich.

Das System besteht aus den Teilalgorithmen Informationsverbreitung und Prognose. Die Informationsverbreitung stellt die Verbreitung der Parkplatzinformation unter dem Aspekt der geringen Bandbreitenanforderung und der nutzenmaximalen Verbreitung für den Parksuchverkehr sicher. Zur Verbreitung wird periodischer Broadcast nach dem Wireless-LAN Standard IEEE 802.11 eingesetzt. Die periodische Verbreitung schont auf der einen Seite die Kapazitäten des Funkkanals, erzeugt aber auf der anderen Seite gleichzeitig die notwendige Informationsredundanz im Fahrzeug-Fahrzeug-Netz. Dadurch verbreitet sich die Information bei bereits niedrigen Ausstattungsraten. Die Einführung einer hierarchischen Gitternetz-Struktur und die auf dieser Basis durchgeführte Aggregation der Information erlaubt eine fein-granulare Aufteilung der Straßentopologie und die Bildung von Hierarchien zwischen den zusammengefassten Parkgebietsinformationen. Die zeitlichen Schwankungen der Belegung denen ein Aggregat unterliegt, sind geringer als die, denen ein einzelner Parkplatz unterliegt. Daher enthalten Aggregate zeitlich stabilere Parkrauminformation. Eine weitere Eigenschaft des Algorithmus ist, dass die Informationsgenauigkeit und -granularität mit der Entfernung negativ korreliert. Der Fahrer erhält

frühzeitig grobgranulare Information zur ersten Orientierung und kann sich mit kleiner werdender Entfernung zum Zielgebiet genauer entscheiden, welchen freien Parkplatz er anfahren möchte. In der durchgeführten Simulationsstudie wurde nachgewiesen, dass bereits ab 5%-Ausstattungsrate eine effiziente Verbreitung der Information möglich ist. Auch wurde gezeigt, dass die Netzlast, durch das Aggregationsverfahren und die Verteilungsstrategie im Vergleich zu Verfahren ohne Aggregation um über 90% reduziert werden kann. Bedingt durch Partitionierung des Netzwerks ist die Informationsverbreitung in der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation mit Latenz behaftet. Die Prognose ermöglicht die Erhöhung der Aussagekraft empfangener aber nicht mehr aktueller Parkrauminformation. Hierzu prognostiziert ein Fahrzeug den Belegungszustand gewünschter Parkflächen zum Zeitpunkt des Eintreffens. Hierbei wird ausgehend von dem Alter einzelner Parkplatzinformation und der Restfahrzeit zu einem bestimmten Parkplatz der wahrscheinlichste Zustand der Parkplatzbelegung zum individuellen Ankunftszeitpunkt berechnet. Diese Berechnung kann sowohl für einzelne von einem Parkautomaten kontrollierte als auch für aggregierte Bereiche durchgeführt werden.

Die präsentierte Lösung der Realisierung eines dezentralen Parkrauminformationssystems zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass

- sie eine mögliche Einführungsanwendung darstellt.
- eine bereits existierende Infrastruktur direkt genutzt werden kann.
- sie in jeder beliebigen mit Parkautomaten ausgestatteten Stadt angewendet werden kann.
- sie dezentral arbeitet und Fahrzeuge einen Großteil der Aufgaben übernehmen, indem sie gleichzeitig als Informationserzeuger, -verteiler und -verbraucher agieren.
- sie geringe Anforderungen an die Bandbreite des Funkkanals hat.
- sie mit geringen Kosten aufgebaut werden kann und keine zentrale Infrastruktur aufgebaut werden muss.
- sie auch mit dem weit verbreiteten WLAN-Standard IEEE 802.11 funktioniert und mobile Endgeräte mit einer WLAN-Schnittstelle (z.B. Handy, Mobiles Navigationssystem, PDA etc.) zusätzlich zur Erhöhung der Ausstattungsraten eingesetzt werden können.
- die Kommunikation selbst für den Nutzer kostenlos ist, da sie auf freien, unlicensierten Frequenzbändern (ISM-Band) läuft.

Eine Integration der erarbeiteten Lösung in Navigationssysteme der nächsten Generation ist denkbar. Durch Filterung der Information kann eine Personalisierung der empfangenen Parkplatzinformation vorgenommen werden. Beispielsweise können durch Filtermechanismen Parkplätze für behinderte Menschen gefunden oder auch Kostenkontrollen durchgeführt werden, indem man z.B. die für den Fahrer akzeptablen Parkkosten pro Stunde einstellt oder Parkflächen filtert die eine tolerierte Laufdistanz zwischen Parkfläche und Zielpunkt erfüllen. Zur Vervollständigung kann das System in folgenden Punkten erweitert werden:

- Identifikation freier Parkflächen durch Sensoren oder videobasierte Systeme aus den fahrenden Fahrzeugen heraus.
- Erweiterung des Systems mit dezentralen Bezahlmechanismen, in denen der Kommunikationskanal zwischen Fahrzeug und Parkautomat zum drahtlosen Bezahlen genutzt wird.
- Dezentrale Reservierungsmechanismen für Parkplätze: Parkwünsche einzelner Fahrzeuge könnten von Fahrzeug-zu-Fahrzeug an Parkautomaten übertragen werden. Diese würden nach Empfang der Reservierungswünsche Stellflächen für anfragende Fahrzeuge reservieren.



# A. Ergänzende Information

ID	Parkplatz	$\mathcal{C}$	$1/\mu$	ID	Parkplatz	$\mathcal{C}$	$1/\mu$
1	Ackerhof	10		31	Eiermarkt	22	46
2	Ägidienmarkt	4		32	Gieseler	7	46
3	Ägidienmarkt 2	22		33	Gieselerwall	13	
4	Alte Knochenhauer	20	47	34	Gördelinger Str. 1	13	51
5	Am Schlossgarten 1	15		35	Gördelinger Str. 2	6	
6	Am Schlossgarten 2	64		36	Grosser Hof 1	41	
7	Am Theater 1	18	58	37	Grosser Hof 2	37	
8	Am Theater 2	17	64	38	Güldenstrasse 1	9	51
9	An der Martinikirche	9		39	Güldenstrasse 2	15	44
10	An der Petrikirche	9	47	40	Güldenstrasse 3	10	48
11	Auguststrasse 1	11	52	41	Güldenstrasse 4	11	50
12	Auguststrasse 2	17	43	42	Güldenstrasse 5	14	44
13	Auguststrasse 3	12	44	43	Güldenstrasse 6	10	43
14	Auguststrasse 4	7		44	Güldenstrasse 7	17	46
15	Augusttorwall	9	37	45	Güldenstrasse 8	20	51
16	Bäckerklint	23	45	46	Güldenstrasse 9	17	
17	Bankplatz	15		47	Hagenscharrn	15	43
18	Bohlweg	6	44	48	Hinter Liebfrauen	14	51
19	Brabantstrasse 1	9	46	49	Hintern Brüdern	11	44
20	Brabantstrasse 2	13	47	50	John F. Kennedyplatz	19	72
21	Brabantstrasse 3	9	45	51	Kaffeezwete	39	
22	Breite Strasse 1	6	45	52	Kalenwall	7	
23	Breite Strasse 2	11	48	53	Kannengiesserstr. 1	29	51
24	Breite Strasse 3	6	45	54	Kannengiesserstr. 2	58	
25	Bruchtorwall 1	6	65	55	Karrenführerstr.	4	
26	Bruchtorwall 2	12		56	Klint 1	16	61
27	Casparistrasse 1	13	43	57	Klint 2	10	59
28	Casparistrasse 2	7	42	58	Kuhstrasse 1	5	54
29	Echternstrasse 1	9	68	59	Kuhstrasse 2	19	55
30	Echternstrasse 4	20		60	Lange Strasse 1	11	42

Tabelle A.1.: ID, Name, Kapazität und Parkdauer für Parkplätze in Braunschweig

ID	Parkplatz	$\mathcal{C}$	$1/\mu$	ID	Parkplatz	$\mathcal{C}$	$1/\mu$
61	Lange Strasse 2	6	46	96	Schützenstrasse	20	
62	Lange Strasse 3	5	41	97	Stecherstrasse	9	
63	Lange Strasse 4	4	39	98	Steinstrasse	7	
64	Lange Strasse 5	5	43	99	Steintorwall 1	13	57
65	Lange Strasse 6	6	45	100	Steintorwall 2	12	55
66	Langer Hof 1	26	49	101	Steintorwall 3	13	52
67	Langer Hof 2	9		102	Steintorwall 4	13	59
68	Lessingplatz	9	73	103	Steintorwall 5	19	50
69	Linentwede	23		104	Steintorwall 6	24	
70	Löwenwall	17	79	105	Steinweg 1	13	58
71	Magnitorwall	12	58	106	Steinweg 2	6	49
72	Markthalle	70		107	Steinweg 3	18	52
73	Meinhardshof	6	42	108	Steinweg 4	15	50
74	Münzstrasse 1	4		109	Südstrasse	26	
75	Münzstrasse 2	8		110	Südstrasse 1	9	45
76	Mummetweete	10		111	Südstrasse 2	10	48
77	Museumstrasse 1	15	63	112	Turnierstrasse	16	
78	Museumstrasse 2	16	66	113	Waisenhausdamm 1	5	47
79	Neue Güldenlinke	13	44	114	Waisenhausdamm 2	4	46
80	Neue Strasse	15		115	Waisenhausdamm 3	8	45
81	Nimesstrasse 4	13		116	Wendenstrasse 1	10	
82	Nimesstrasse 5	30		117	Wendenstrasse 2	2	
83	Nimestrasse 1	28		118	Wendenstrasse 3	33	
84	Nimestrasse 2	16		119	Wendenstrasse 4	7	
85	Nimestrasse 3	21		120	Werder	76	
86	Öschlögern	10	51	121	Wilhelmsgarten	7	
87	Öschlögern 1	11	50	122	Wilhelmstrasse 1	11	38
88	Petersilienstrasse	13	46	123	Wilhelmstrasse 2	4	
89	Reichsstrasse	13		124	Wilhelmstrasse 3	18	
90	Ritterstrasse	12	56	125	Wilhelmstrasse 4	12	
91	Rosenhagen	6		126	Wilhelmstrasse 5	19	
92	Rufhäutechenplatz	20		127	Wilhelmstrasse 6	18	
93	Scharnstrasse 1	17	46	128	Wollmarkt 1	8	
94	Scharnstrasse 2	14	48	129	Wollmarkt 2	7	
95	Schöppenstedter Str.	12		130	Ziegenmarkt	12	

Tabelle A.2.: ID, Name, Kapazität und Parkdauer für Parkplätze in Braunschweig

Parkhausbelegung 14.04.2005

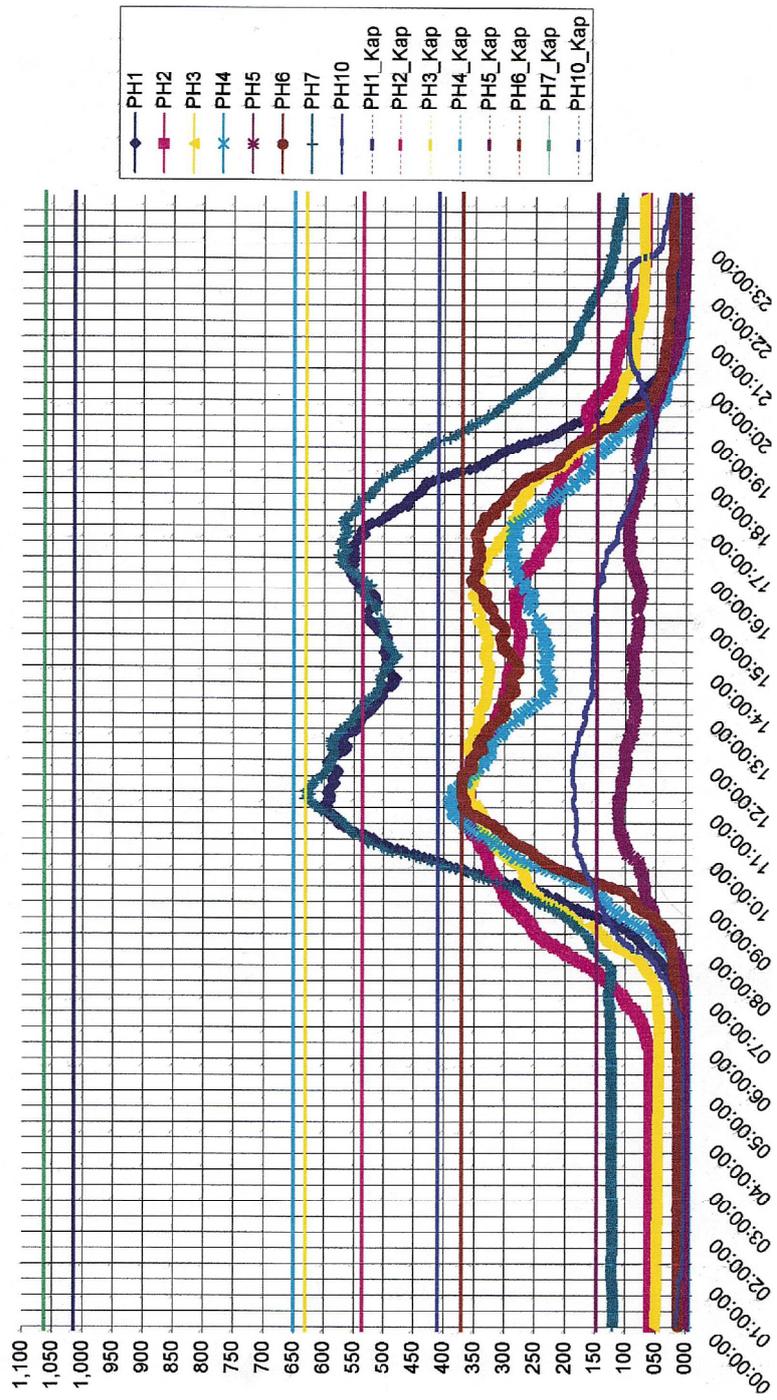


Abbildung A.1.: Exemplarischer Verlauf von Parkhausbelegungen in Braunschweig

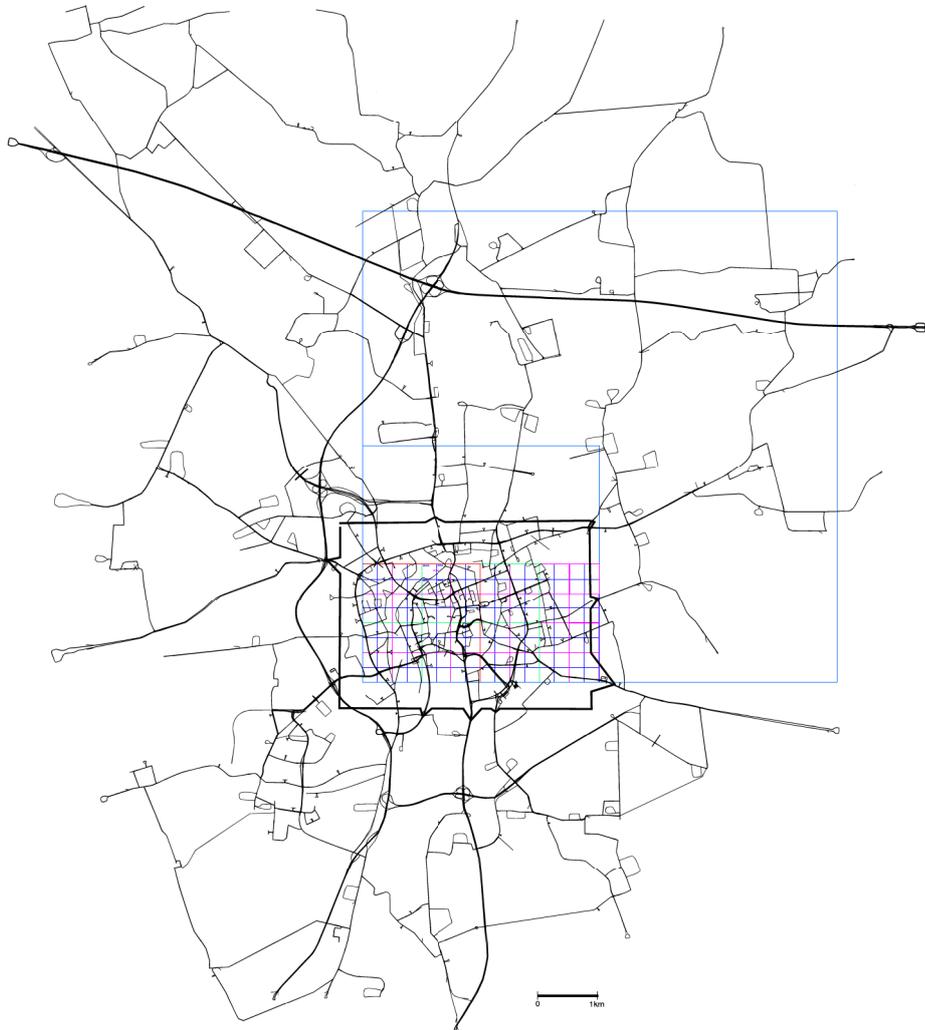


Abbildung A.2.: Darstellung von Level-0 bis Level-6 Zellen mit unterschiedlichen Kantenfarben in Braunschweig: Level-0 Zellen - blau; Level-1 Zellen - lila; Level-2 Zellen - grün; Level-3 Zellen - rot; Level-4 Zellen - hellblau; Level-5 Zellen - blau; Level-6 Zellen - dunkelblau.

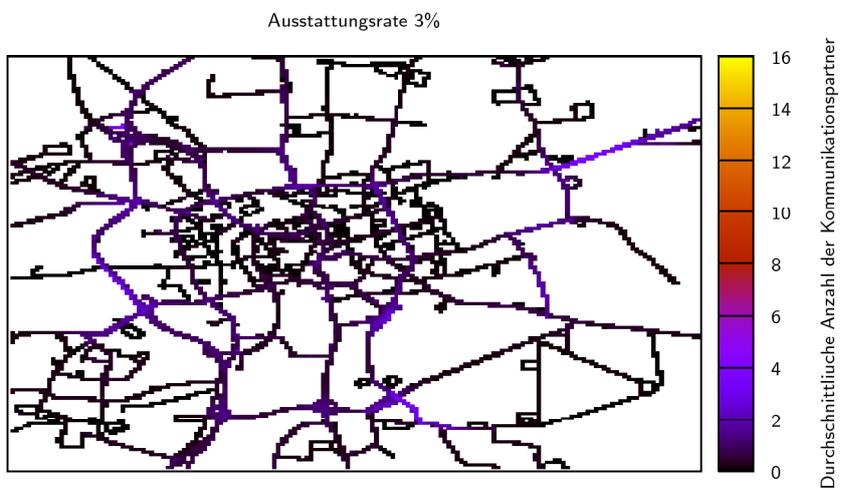
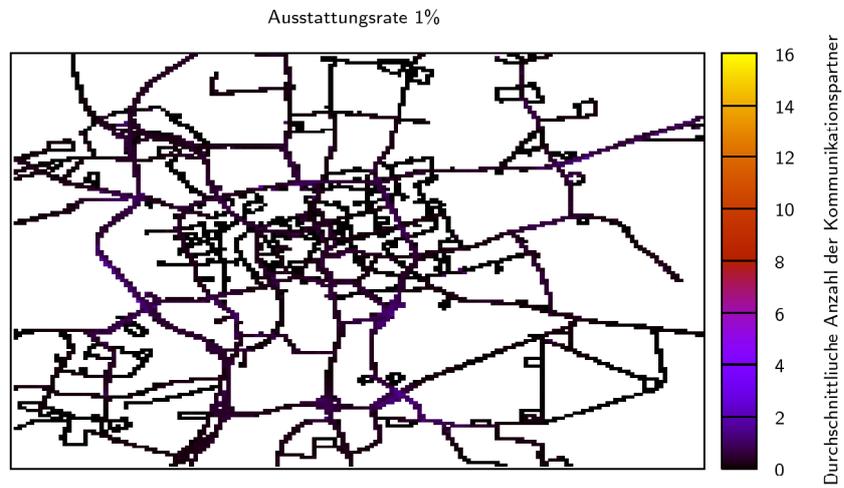


Abbildung A.3.: Konnektivität in Braunschweig bei 1%- und 3%-Ausstattungsrate

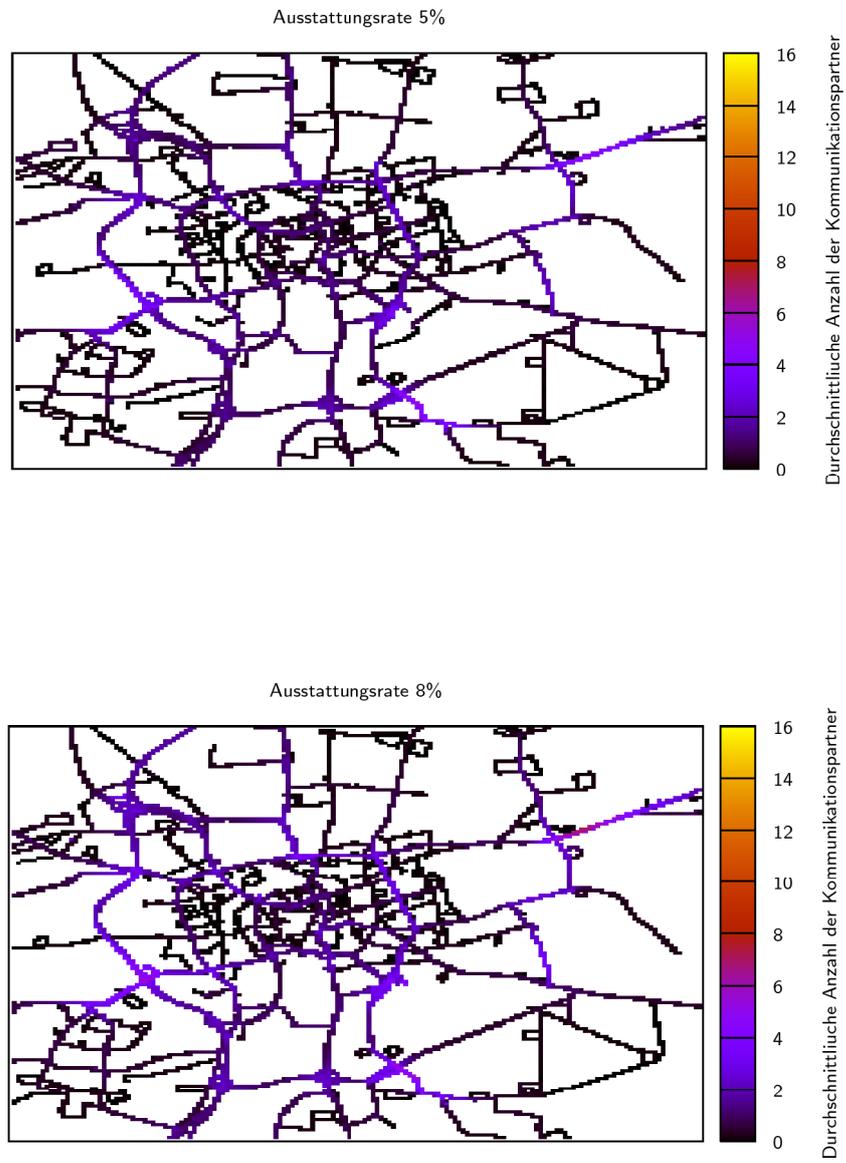


Abbildung A.4.: Konnektivität in Braunschweig bei 5%- und 8%-Ausstattungsrate

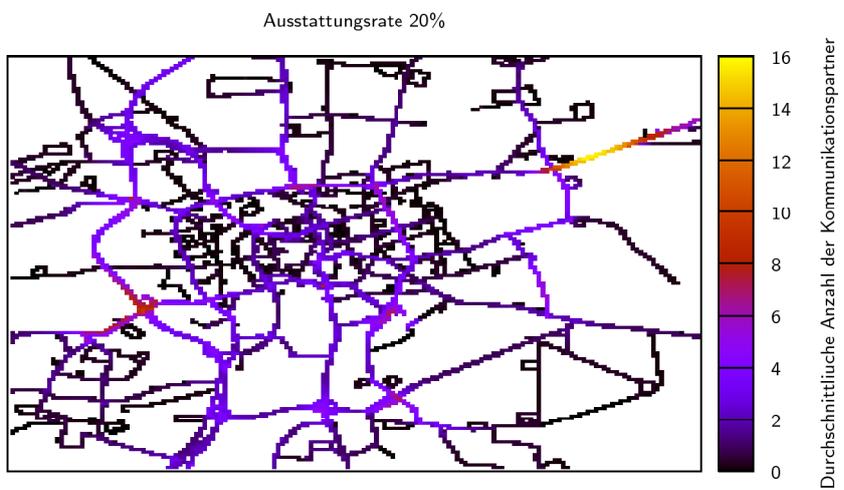
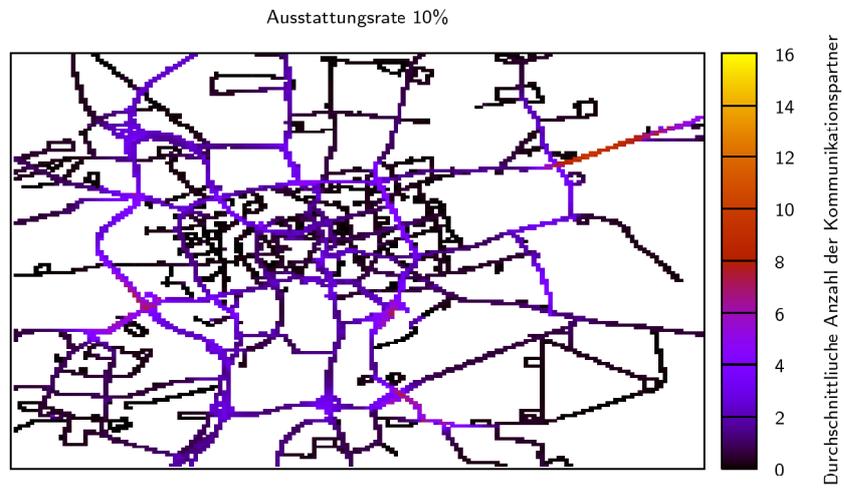


Abbildung A.5.: Konnektivität in Braunschweig bei 10%- und 20%-Ausstattungsrate



## B. Vissim Screenshots

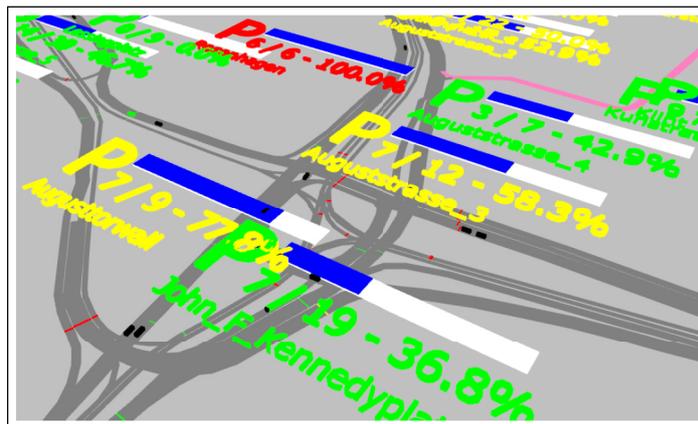


Abbildung B.1.: Visualisierung der Parkautomaten um die Kreuzung Auguststrasse

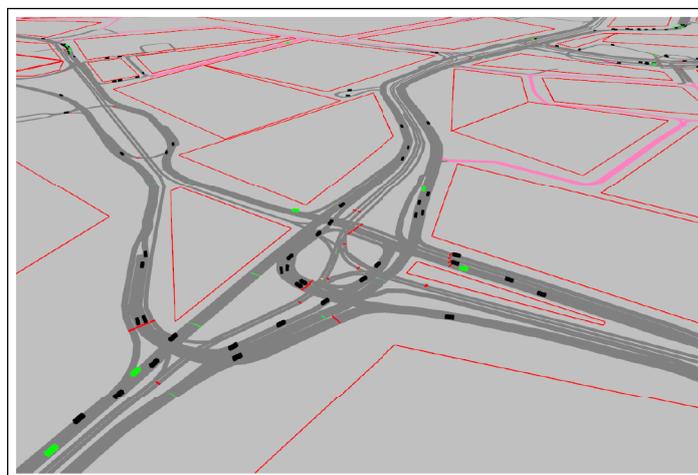


Abbildung B.2.: Grün-Färbung WLAN-fähiger Fahrzeuge und Hindernisdarstellung durch Polygone

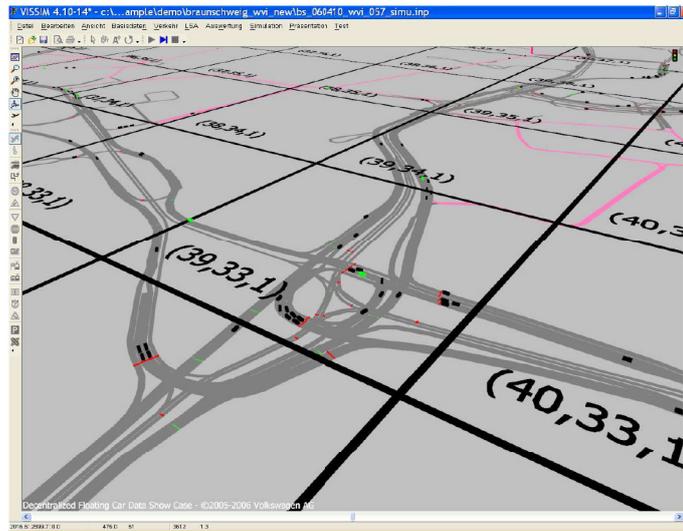


Abbildung B.3.: Visualisierung der Quad-Tree Struktur auf Level-1 Ebene

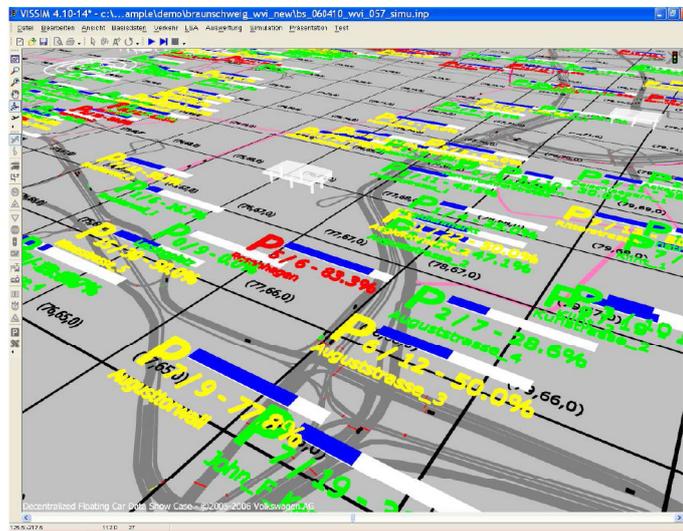


Abbildung B.4.: Parkplätze entlang des Grids auf Level-0 Ebene

## C. Veröffentlichungen

Patentnummer	Titel	Erfinder	Offenlegung
DE 102006045142 A1, EP 1919164 A1	Verfahren zum Sammeln von Daten in einem anfragenden Fahrzeug von anderen Fahrzeugen in einem Netzwerk	Caliskan, Murat	27.03.2008
DE 102006041360 A1	Verfahren zum Verbreiten von räumlich-zeitlichen Verkehrsinformationen	Caliskan, Murat; Mauve, Martin, Prof. Dr.	06.03.2008
DE 102006032374 A1	Verfahren zum Sammeln von Daten in einem dezentralen, von Fahrzeug-Kommunikationseinrichtungen gebildeten Netzwerk	Caliskan, Murat; Mauve, Martin, Prof. Dr.; Rech, Bernd, Dr.; Lübke, Andreas, Dr.	10.05.2007
DE 102005027018 A1, WO 2006119976 A1	Verfahren und Vorrichtung zum Aufwecken eines drahtlosen Kommunikations-Moduls in einem Kraftfahrzeug	Meier, Klaus; Aijaz, Amer; Bruns, Christian; Caliskan, Murat; Grade, Martin; Lübke, Andreas, Dr.; Rech, Bernd, Dr.; Gerpen, Dieter van	16.11.2006
DE 102005013648 A1	Kommunikationsverbund aus Kraftfahrzeugen sowie existierender, immobiler Netzknoten	Bruns, Christian; Aijaz, Amer; Caliskan, Murat; Grade, Martin; Lübke, Andreas; Meier, Klaus; Rech, Bernd	28.09.2006
DE 102005009490 A1, WO 2006089584 A1	Verfahren, Vorrichtung, Gerät und System zum Schützen eines privaten Kommunikationsschlüssels für eine Fahrzeug-Umwelt-Kommunikation	Caliskan, Murat; Aijaz, Amer; Rech, Bernd, Dr.; Lübke, Andreas, Dr.	14.09.2006
DE 102004056724 A1	Verfahren und Anordnung für ein Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikationsnetz	Caliskan, Murat; Aijaz, Amer; Rech, Bernd, Dr.	24.05.2006
DE 102004040627 A1, EP 1790144 A2, WO 2006018244 A2	Übertragung von Daten zu einem Fahrzeug	Caliskan, Murat; Aijaz, Amer; Bruns, Christian; Grade, Martin; Lübke, Andreas, Dr.; Meier, Klaus; Rech, Bernd, Dr.	23.02.2006
DE 102004017604 A1	Verfahren und Anordnung für ein Kommunikationsnetz mit direkter Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation	Caliskan, Murat; Rech, Bernd, Dr.; Aijaz, Amer	27.10.2005
DE 102004017603 A1	Übertragen von Kommunikationssignalen in einem Kommunikationsnetz mit direkter Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation	Caliskan, Murat; Rech, Bernd, Dr.; Aijaz, Amer	27.10.2005

Tabelle C.1.: Schutzrechanmeldungen durch die VOLKSWAGEN AG

<b>Konferenzbeiträge - Eigene Veröffentlichungen</b>
<p>Christian Wewetzer, Murat Caliskan, Andreas Luebke, Martin Mauve. A Search Engine for Vehicular Ad Hoc Networks. V2VCOM 2008: Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Vehicle to Vehicle Communications, Eindhoven, Netherlands, June 2008.</p>
<p>Christian Wewetzer, Murat Caliskan, Andreas Luebke, Martin Mauve. The Feasibility of a Search Engine for Metropolitan Vehicular Ad Hoc Networks. AutoNet 2007: Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Automotive Networking and Application, Washington DC, USA, November 2007.</p>
<p>Christian Wewetzer, Murat Caliskan, Klaus Meier, Andreas Luebke. Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication. ITST 2007: Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 287-292, Sophia Antipolis, France, June 2007.</p>
<p>Murat Caliskan, Andreas Barthels, Björn Scheuermann, Martin Mauve. Predicting Parking Lot Occupancy in Vehicular Ad Hoc Networks. VTC 2007 Spring: 65th IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 277-281, Dublin, Ireland, April 2007.</p>
<p>Christian Lochert, Björn Scheuermann, Murat Caliskan, Martin Mauve. The Feasibility of Information Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks. WONS 2007: Fourth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services, pp. 92-99, Obergurgl, Austria, January 2007.</p>
<p>Murat Caliskan, Daniel Graupner, Martin Mauve. Decentralized Discovery of Free Parking Places. Proceedings of the Third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006), pp. 30-39, Los Angeles, CA, USA, September 2006.</p>
<p>Murat Caliskan, Martin Mauve, Bernd Rech, Andreas Luebke. Information Collection in Vehicular Ad Hoc Networks. 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems, Hannover, Germany, June 2005.</p>
<p>Murat Caliskan, Martin Mauve, Bernd Rech, Andreas Luebke. Collection of Dedicated Information in Vehicular Ad Hoc Networks. 12th World Congress on Intelligent Transport Systems 2005, San Francisco, USA, November 2005.</p>
<p>Christian Lochert, Murat Caliskan, Björn Scheuermann, Andreas Barthels, Alfonso Cervantes, Martin Mauve. Multiple Simulator Interlinking Environment for Inter Vehicle Communication. The Second ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2005), pp. 87-88, Cologne, Germany, September 2005.</p>

Tabelle C.2.: Konferenzbeiträge - Eigene Veröffentlichungen

# Literaturverzeichnis

- [Akt]        *Projekt: AKTIV*. <http://www.aktiv-online.org/> 12, 14
- [And91]     ANDERSON, William J.: *Continuous-time Markov Chains : An Applications Oriented Approach*. Springer Verlag, 1991 47
- [AP90]      AXHAUSEN, K. W. ; POLAK, J. W.: The Implications of Parking Search Behaviour for Parking Management. In: *VDI Berichte* 817 (1990), S. 249–271 18
- [ARI]        *Organisation: Association of Radio Industries and Businesses, Japan*. <http://www.arib.or.jp/english> 9
- [Arm]        ARMSTRONG, Lee: *DSRC Homepage*. <http://www.learmstrong.com/DSRC/DSRCHomeset.htm> 11
- [BDMC<sup>+</sup>94] BUCHHOLZ, Peter ; DUNKEL, Jürgen ; MÜLLER-CLOSTERMANN, Bruno ; SCZITTNIK, Michael ; ZÄSKE, Siegmur: *Quantitative Systemanalyse mit Markovschen Ketten*. B. G. Teubner, 1994 46, 47, 49
- [Bec00]     BECKER, Udo J.: Unnötiger Verkehr: Was ist das? In: *Internationales Verkehrswesen* 52 (2000), S. 364–369 17
- [Bei95]     BEICHELT, Frank: *Stochastik für Ingenieure*. B. G. Teubner, 1995. – ISBN 3–519–02987–1 45, 51
- [Bei97]     BEICHELT, Frank: *Stochastische Prozesse für Ingenieure*. B. G. Teubner, 1997. – ISBN 3–519–02989–0 27, 47, 49, 52
- [Bet02]     BETTSTETTER, Christian: On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network. In: *MobiHoc '02: Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. New York, NY, USA : ACM, 2002. – ISBN 1–58113–501–7, S. 80–91 66

- [Bet04] BETTSTETTER, Christian: *Mobility Modeling, Connectivity, and Adaptive Clustering in Ad Hoc Networks.*, Technische Universität München, Diss., Mai 2004 66
- [Bir95] BIRKNER, Thomas: Innerstädtischer Parksuchverkehr: Eine unbekannte Größe? In: *Straßenverkehrstechnik* 7 (1995), S. 323–327 18
- [BL04] BASU, P. ; LITTLE, T.D.C.: Wireless Ad Hoc Discovery of Parking Meters / Department of Electrical and Computer Engineering, Boston University. Boston, Massachusetts 02215, USA, 2004 (Technical Report No. 01-08-2004). – Forschungsbericht 19
- [BOR<sup>+</sup>06] BENSON, J. ; O'DONOVAN, T. ; ROEDIG, U. ; O'SULLIVAN, P. ; SREENAN, C.J. ; BARTON, J. ; MURPHY, A. ; O'FLYNN., B.: Car-Park Management using Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of First IEEE International Workshop on Practical Issues in Building Sensor Network Applications (SENSEAPP)*, IEEE Computer Society Press, November 2006 18
- [BSH00] BRIESEMEISTER, Linda ; SCHÄFERS, Lorenz ; HOMMEL, Günther: Disseminating Messages among Highly Mobile Hosts based on Inter-Vehicle Communication. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000, S. 522–527 40
- [C2C] Organisation: Car-to-Car Communication Consortium. <http://www.car-to-car.org/> 1, 8
- [C2C07] C2CCC: *Manifesto - Overview of the C2C-CC System.* Car-to-Car Communication Consortium, 2007 8, 9
- [CB05] CHOFFNES, David R. ; BUSTAMANTE, Fabián E.: An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks. In: *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks.* New York, NY, USA : ACM, 2005. – ISBN 1–59593–141–4, S. 69–78 58
- [CBSM07] CALISKAN, Murat ; BARTHELS, Andreas ; SCHEUERMANN, Björn ; MAUVE, Martin: Predicting Parking Lot Occupancy in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings VTC2007-Spring Vehicular Technology Conference IEEE 65th*, 2007. – ISSN 1550–2252, S. 277–281 43

- [CBW02] CAMP, T. ; BOLENG, J. ; WILCOX, L.: Location Information Services in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'02)*, 2002, S. 3318–3324 [20](#)
- [CCG98] CALÌ, Federico ; CONTI, Marco ; GREGORY, Enrico: IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and Protocol Enhancement. In: *Proceedings of the 17th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 1998)*. San Francisco, CA, April/May 1998, S. 142–149 [21](#)
- [CGK<sup>+</sup>08] COSTA, Paolo ; GAVIDIA, Daniela ; KOLDEHOFE, Boris ; MIRANDA, Hugo ; MUSOLESI, Mirco ; RIVA, Oriana: When Cars Start Gossiping. In: *Proceedings of the ACM Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications Workshop (MiNEMA'08)*. Glasgow, United Kingdom, April 2008 [20](#)
- [CGM06] CALISKAN, Murat ; GRAUPNER, Daniel ; MAUVE, Martin: Decentralized Discovery of Free Parking Places. In: *The Third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006)*, 2006 [25](#)
- [CM07] COLLINS, K. ; MUNTEAN, Gabriel-Miro: TraffCon: An Intelligent Traffic Control System for Wireless Vehicular Networks. In: *IET China-Ireland International Conference on Information and Communications Technology (CIICT)*. Dublin, Ireland, August 2007, S. 699–706 [17](#)
- [CMRL05] CALISKAN, Murat ; MAUVE, Martin ; RECH, Bernd ; LUEBKE, Andreas: Information Collection in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems*, 2005 [20](#)
- [Com] *Projekt: ComESafety*. <http://www.comesafety.org/> [7](#), [12](#), [13](#)
- [Coo] *Projekt: COOPERS*. <http://www.coopers-ip.eu/> [12](#)
- [Cop] *Projekt: CoPark - Koordiniertes Parken in Ballungszentren* [15](#)
- [Cvi] *Projekt: CVIS*. <http://www.cvisproject.org/> [12](#), [13](#)
- [DBT05] DOUSSE, Olivier ; BACCELLI, François ; THIRAN, Patrick: Impact of Interferences on Connectivity in Ad Hoc networks. In: *IEEE/ACM Transactions Networking* 13 (2005), Nr. 2, S. 425–436 [66](#)

- [DINI05] DIKAIAKOS, M. ; IQBAL, S. ; NADEEM, T. ; IFTODE, L.: VITP: An Information Transfer Protocol for Vehicular Computing. In: *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*. Cologne, Germany, September 2005 20
- [DJ07] DORNBUSH, Sandor ; JOSHI, Anupam: StreetSmart Traffic: Discovering and Disseminating Automobile Congestion Using VANET's. In: *VTC Spring*, 2007, S. 11–15 23
- [DQA04] DATTA, A. ; QUARTERONI, S. ; ABERER, K.: Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Mobile Ad Hoc Networks, 2004 20
- [eas] *Company: EasyPark*. <http://www.easypark.de/> 16
- [EGKM04] EUGSTER, P.T. ; GUERRAOU, R. ; KERMARREC, A.-M. ; MASSOULIE, L.: Epidemic Information Dissemination in Distributed Systems. In: *Computer* 37 (2004), May, Nr. 5, S. 60 – 67 20
- [epa] *Projekt: E-Parking - User-friendly e-commerce to Optimise Parking Space*. [http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ\\_LANG=EN&PJ\\_RCN=5244672&q=4D24941B3C018E74415A39CBB26EF390&type=hom](http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_LANG=EN&PJ_RCN=5244672&q=4D24941B3C018E74415A39CBB26EF390&type=hom) 15
- [EU] *Europäische Kommission: Lissabon Agenda*. [http://ec.europa.eu/growthandjobs/priority-actions/more-RD-and-innovation/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/growthandjobs/priority-actions/more-RD-and-innovation/index_de.htm) 1, 7
- [FBW07] FESTAG, A. ; BALDESSARI, R. ; WANG, H.: On Power-Aware Greedy Forwarding in Highway Scenarios. In: *5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, 2007 20
- [FL98] FISCHER, Stephan ; LÜTTGE, Niels: Analyse : Parkraummanagement Braunschweig / Stadt Braunschweig, Tiefbauamt, Abt. 66.2 - Verkehrsanlagen. 1998. – Forschungsbericht 70
- [Fle] *Projekt: Fleetnet*. <http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/> 12, 13, 19, 57

- [FM03] FRANZ, Walter ; MAIHÖFER, Christian: *Geographical Addressing and Forwarding in FleetNet*. Whitepaper, available at <http://www.fleetnet.de>, 2003 20
- [FMH<sup>+</sup>02] FÜSSLER, Holger ; MAUVE, Martin ; HARTENSTEIN, Hannes ; KÄSEMANN, Michael ; VOLLMER, Dieter: A Comparison of Routing Strategies for Vehicular Ad Hoc Networks / Department of Computer Science, University of Mannheim. 2002 (TR-02-003). – Forschungsbericht 19
- [GIO04] GOEL, Samir ; IMIELINSKI, Tomasz ; OEZBAY, Kaan: Ascertaining the Viability of Based Vehicle-to-Vehicle Network for WiFi Traffic Information Dissemination. In: *Proceedings of the 7th Annual IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2004, S. 1086 – 1091 23
- [GK00] GUPTA, Piyush ; KUMAR, P. R.: The Capacity of Wireless Networks. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 46 (2000), März, Nr. 2, S. 388–404 21
- [GL83] GOLUB, G. H. ; LOAN, C. F. V.: *Matrix Computation*. Johns Hopkins University Press, 1983. – pp. 384 S. 54
- [GP] GROSSGLAUSER, Matthias ; PIORKOWSKI, Michal: *Projekt SmartPark == Parking Made Easy*. <http://smartpark.epfl.ch/> 19, 29
- [GT02] GROSSGLAUSER, Matthias ; TSE, David N. C.: Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks. In: *IEEE/ACM Transaction Networks* 10 (2002), Nr. 4, S. 477–486. – ISSN 1063–6692 22
- [HBR03] HÄHNER, J. ; BECKER, C. ; ROTHERMEL, K.: A Protocol for Data Dissemination in Frequently Partitioned Mobile Ad Hoc Networks. In: *Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2003 22
- [HFBF06] HÄRRI, J. ; FILALI, F. ; BONNET, C. ; FIORE, Marco: VanetMobiSim: Generating Realistic Mobility Patterns for VANETs. In: *VANET '06 : 3rd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Los Angeles, USA, 2006 58
- [HFMF03] HARTENSTEIN, Hannes ; FÜSSLER, Holger ; MAUVE, Martin ; FRANZ, Walter: Simulation Results and Proof-of-Concept Implementation of the

- FleetNet Position-Based Router. In: *Proceedings of the IFIP-TC6 8th International Conference on Personal Wireless Communications (PWC '03)*. Venice, Italy, September 2003, S. 192–197 [57](#)
- [Hig05] HIGHAM, Nicholas J.: *The Scaling and Squaring Method for the Matrix Exponential Revisited* [54](#)
- [HLS98] HOCHBRUCK, Marlis ; LUBICH, Christian ; SELHOFER, Hubert: Exponential Integrators for Large Systems of Differential Equations. In: *SIAM Journal on Scientific Computing* 19 (1998), September, Nr. 5, S. 1552–1574 [54](#)
- [HUB06] HUMBOLDT-UNIVERSITÄT BERLIN, LS I.: *Projekt Vernetztes Fahren - Mobile Kommunikation in Automobilen, Akzeptanz von Assistenzsystemen*. <http://www.vernetztes-fahren.de/>, November 2006 [2](#)
- [HWK<sup>+</sup>03] HOLGER, Füssler ; WIDMER, Jörg ; KÄSEMANN, Michael ; MAUVE, Martin ; HARTENSTEIN, Hannes: Contention-Based Forwarding for Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Elsevier Ad Hoc Networks* 4 (2003), S. 351–369 [20](#)
- [IEE99] IEEE STANDARD 802.11 (Hrsg.): *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE standard 802.11, 1999. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf> [25](#), [37](#), [57](#), [80](#)
- [Int] *Projekt: INTERMOBIL*. <http://www.intermobil-dresden.de> [15](#)
- [IW07] IBRAHIM, Khaled ; WEIGLE, Michele C.: Accurate Data Aggregation for VANETs. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978-1-59593-739-1, S. 71–72 [22](#)
- [KCC05] KURKOWSKI, Stuart ; CAMP, Tracy ; COLAGROSSO, Michael: MANET Simulation Studies: The Incredibles. In: *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 9 (2005), Nr. 4, S. 50–61. – ISSN 1559–1662 [57](#)
- [KEÖÖ04] KORKMAZ, Gökhan ; EKICI, Eylem ; ÖZGÜNER, Füsün ; ÖZGÜNER, Ümit: Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems. In: *VANET '04: Proceedings of the 1st International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Philadelphia, PA, USA : ACM Press, September 2004, S. 76–85 [40](#)

- [KFWM04] KIESS, Wolfgang ; FÜSSLER, Holger ; WIDMER, Jörg ; MAUVE, Martin: Hierarchical Location Service for Mobile Ad-Hoc Networks. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)* 8 (2004), Oktober, Nr. 4, S. 47–58 [20](#)
- [KHFM02] KÄSEMANN, Michael ; HARTENSTEIN, Hannes ; FÜSSLER, Holger ; MAUVE, Martin: A Simulation Study of a Location Service for Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks / Department of Computer Science, University of Mannheim. 2002 (TR-07-002). – Forschungsbericht [20](#)
- [Kos05] KOSCH, Timo: *Situationsadaptive Kommunikation in Fahrzeug-Ad Hoc Netzen*, Technische Universität München, Diss., 2005 [40](#), [66](#), [81](#)
- [KSEH<sup>+</sup>07] KILLAT, Moritz ; SCHMIDT-EISENLOHR, Felix ; HARTENSTEIN, Hannes ; RÖSSEL, Christian ; VORTISCH, Peter ; ASSENMACHER, Silja ; BUSCH, Fritz: Enabling Efficient and Accurate Large-Scale Simulations of VANETs for Vehicular Traffic Management. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978–1–59593–739–1, S. 29–38 [58](#)
- [LBC<sup>+</sup>01] LI, Jinyang ; BLAKE, Charles ; COUTO, Douglas S.J. D. ; LEE, Hu I. ; MORRIS, Robert: Capacity of Ad Hoc Wireless Networks. In: *MobiCom '01: Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA : ACM, 2001. – ISBN 1–58113–422–3, S. 61–69 [21](#)
- [LCS<sup>+</sup>05] LOCHERT, Christian ; CALISKAN, Murat ; SCHEUERMANN, Björn ; BARTHEL, Andreas ; CERVANTES, Alfonso ; MAUVE, Martin: Multiple Simulator Interlinking Environment for Inter Vehicle Communication. In: *VANET 2005: Proceedings of the Second ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, 2005, S. 87–88 [57](#)
- [LHT<sup>+</sup>03] LOCHERT, Christian ; HARTENSTEIN, Hannes ; TIAN, Jing ; FÜSSLER, Holger ; HERRMANN, Dagmar ; MAUVE, Martin: A Routing Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*. Columbus, OH, June 2003, S. 156–161 [20](#), [40](#)

- [LSCM07] LOCHERT, Christian ; SCHEUERMANN, Björn ; CALISKAN, Murat ; MAUVE, Martin: The Feasibility of Information Dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *WONS 2007: Fourth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services*, 2007, S. 92–99 110
- [LSM07] LOCHERT, Christian ; SCHEUERMANN, Björn ; MAUVE, Martin: Probabilistic Aggregation for Data Dissemination in VANETs. In: *VANET 2007: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, 2007, S. 1–8 22
- [MAA06] MICHAEL, Manfred ; AMME, Florian ; ARNHOLD, Stefanie: Aufbereitung des Modellsystems ADVANCE unter VISSIM zur Nutzung im Projekt “Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation” der Volkswagen AG : Ergebnisbericht / WVI GmbH, Braunschweig. 2006. – Forschungsbericht 57, 63
- [Mat06] MATHEW, Vinay: *A Strategy for Information Dissemination and Retrieval in Vehicular Ad-hoc Networks*, Carolo-Wilhelmina University Braunschweig, Diplomarbeit, February 2006 20
- [Med91] MEDHI, Jyotiprasad: *Stochastic models in queueing theory*. Academic Press, 1991 47, 48
- [ML03] MOLER, Cleve ; LOAN, Charles van: Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix, Twenty-Five Years Later. In: *Society for Industrial and Applied Mathematics Review* 45 (2003), Nr. 1, S. 1 – 46 54
- [MML05] MATHEUS, Kirsten ; MORICH, Rolf ; LÜBKE, Andreas: Economic Background of Car-to-Car Communication / Carmeq GmbH and Volkswagen AG. 2005. – Forschungsbericht 5, 23, 27, 77
- [Moba] *Projekt: Mobilist*. <http://www.mobilist.de/sixcms/list.php?page=homepage> 15
- [Mobb] *Projekt: MOBINET*. <http://www.mobinet.de/> 15
- [MWH01] MARTIN, Mauve ; WIDMER, Jörg ; HARTENSTEIN., Hannes: A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. In: *IEEE Network Magazine* 6 (2001), S. 30–39 19

- [NDLI04] NADEEM, T. ; DASHTINEZHAD, S. ; LIAO, C. ; IFTODE, L.: Traffic View: Traffic Data Dissemination Using Car-to-Car Communication. In: *In ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, Special Issue on Mobile Data Management* Vol. 8, No. 3 (2004), July, S. 6–19 22
- [NOW] *Projekt: Network On Wheels.* <http://www.network-on-wheels.de/> 12, 14
- [ns2] FALL, Kevin (Hrsg.) ; VARADHAN, Kannan (Hrsg.): *The ns-2 Network Simulator.* <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>. – Manual - 2005 57
- [NSI06] NADEEM, Tamer ; SHANKAR, Pravin ; IFTODE, Liviu: A Comparative Study of Data Dissemination Models for VANETs. In: *International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networks and Services (MOBIQUITOUS)*, 2006 17, 20
- [NTS99] NI, S.-Y. ; TSENG, Y.-C. ; SHEU, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. In: *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, 1999, S. 151–162 22
- [Ori] *Company: Proxim Corporation.* <http://www.proxim.com/learn/library/datasheets/11bpccard.pdf>. – ORiNOCO 11b Client PC Card Specification 57, 59
- [Para] *Parkplatzproblematik und Parksuchverkehr in München.* <http://www.mobil.org/aktionen/parkplatz.html> 1, 18
- [parb] *Projekt: Parkinfo.* <http://www.parkinfo.com/> 16
- [Per01] PERKINS, Charles E.: *Ad Hoc Networking.* Addison-Wesley Professional, 2001 40
- [pin] *Projekt: Parcman.* [http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ\\_LANG=EN&PJ\\_RCN=335319&q=E5F60E4CFF380F8360AD6DCFBCC9FC25&type=hom](http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_LANG=EN&PJ_RCN=335319&q=E5F60E4CFF380F8360AD6DCFBCC9FC25&type=hom) 15
- [Pip94] PIPER, Heinz: Staus und Unfälle auf Autobahnen: Ursachen und Abhilfen. In: *Internationales Verkehrswesen* 46 (1994), S. 407–410 17

- [PTSP07] PANAYAPPAN, Ramu ; TRIVEDI, Jayini M. ; STUDER, Ahren ; PERRIG, Adrian: VANET-based Approach for Parking Space Availability. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978-1-59593-739-1, S. 75–76 19
- [PTV06] PTV AG: *Vissim Benutzerhandbuch*. [http://www.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf\\_vissim.pl](http://www.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf_vissim.pl), 2006 57
- [pul] *Projekt: Pulsar*. [http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ\\_LANG=EN&PJ\\_RCN=726130&q=B9AB80885824CD6448D57694AA020C57&type=hom](http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_LANG=EN&PJ_RCN=726130&q=B9AB80885824CD6448D57694AA020C57&type=hom) 15
- [Sac04] SACHS, Lothar: *Angewandte Statistik : Anwendung statistischer Methoden*. Springer Verlag, 2004 45
- [Saf] *Projekt: SAFESPOT*. <http://www.safespot-eu.org/pages/page.php> 12, 13
- [SDK<sup>+</sup>05] SCHROTH, Christoph ; DÖTZER, Florian ; KOSCH, Timo ; OSTERMAIER, Benedikt ; STRASSBERGER, Markus: Simulating the Traffic Effects of Vehicle-to-Vehicle Messaging Systems. In: *Proceedings of the 5th International Conference on ITS Telecommunications*, 2005 58
- [SFUH04] SAITO, Masashi ; FUNAI, Mayuko ; UMEDU, Takaaki ; HIGASHINO, Teruo: Inter-Vehicle Ad-Hoc Communication Protocol for Acquiring Local Traffic Information. In: *Proceedings of the 11th World Congress on ITS, CD-ROM 4066.pdf*, 2004 21, 22, 23
- [Sho06] SHOUP, Donald C.: Cruising for Parking. In: *Elsevier Transport Policy* 13 (2006), S. 479–486 v, vii, 2, 18
- [SKR<sup>+</sup>08] SCHEUERMANN, Björn ; KIESS, Wolfgang ; ROOS, Magnus ; JARRE, Florian ; MAUVE, Martin: Error Bounds and Consistency of Maximum Likelihood Time Synchronization / Computer Science Department, Heinrich Heine University, Düsseldorf, Germany. 2008 (TR-2008-001). – Forschungsbericht 53
- [SM] *Stadt München: Parkkonzepte in München - Anwohnergaragen, Referat für Stadtplanung und Bauordnung*. <http://www.muenchen.de/Rathaus/>

[plan/stadtentwicklung/verkehrsplanung/82502/02\\_parken.html](http://www.koeln.de/stadtinfo/verkehr/plan/stadtentwicklung/verkehrsplanung/82502/02_parken.html)  
2

- [sma] *SmartPark: An In-Vehicle Parking Meter*. <http://www.smartpark.co.nz> 16
- [Sta] *Projekt: stadtinfoKöln*. <http://www.koeln.de/stadtinfo/verkehr/> 15
- [Ste94] STEWART, William: *Introduction to the Numerical Solution of Markov Chains*. Princeton University Press, 1994 54
- [STUH05] SAITO, Masahi ; TSUKAMOTO, Jun ; UMEDU, Takaaki ; HIGASHINO, Teruo: Evaluation of Inter-Vehicle Ad Hoc Communication Protocol. In: *AINA '05: Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2005. – ISBN 0-7695-2249-1, S. 78-83 21
- [TFW<sup>+</sup>06] TRANSIER, Matthias ; FÜSSLER, Holger ; WIDMER, Jörg ; MAUVE, Martin ; EFFELSBERG, Wolfgang: A Hierarchical Approach to Position-Based Multicast for Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Springer's Wireless Networks - The Journal of Mobile Communication, Computation and Information* 13 (2006), S. 447-460 22, 26
- [Top94] TOPP, Hartmut H.: Zur Rolle des Parkens in der Verkehrsberuhigung. In: *Straßenverkehrstechnik* 6 (1994), S. 375-379 18
- [UDK07] UKKUSURI, Satish ; DU, Lili ; KALYANARAMAN, Shivkumar: Geometric Connectivity of Vehicular Ad Hoc Networks: Analytical Characterization. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978-1-59593-739-1, S. 79-80 66
- [Ver] *Heise Verlag: Parkplatzsuche Online*. <http://www.heise.de/tr/Parkplatzsuche-online--/artikel/113737> 16
- [VIC] *The VICS System, Japan*. <http://www.vics.or.jp> 10
- [Waa06] WAAL, Christian de: *Dezentrale Sendeleistungsregelung zur Kapazitätssteigerung drahtloser Netze mit gemeinsam genutztem Übertragungskanal*, University of Bonn, Diss., March 2006 22

- [Wal98] WALKE, Bernhard: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. Teubner Verlag, 1998. – ISBN 3–519–26430–7 60
- [Wan] WANDKE, Hartmut: *Was der Autofahrer wirklich will?* In: Berliner Zeitung - 18.11.2006, . – Humboldt Universität Berlin 2
- [Way] *Projekt: WAYFLOW.* <http://www.bmwi.tuvpt.de/abgeschlossene-projekte/mobilitaet-in-ballungsraeumen/wayflow.html> 15
- [WC02] WILLIAMS, B. ; CAMP, T.: Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, 2002, S. 194–205 22
- [WCLM07] WEWETZER, Christian ; CALISKAN, Murat ; LUEBKE, Andreas ; MAUVE, Martin: The Feasibility of a Search Engine for Metropolitan Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *AutoNet 2007: Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Automotive Networking and Application*, 2007 20
- [WCLM08] WEWETZER, Christian ; CALISKAN, Murat ; LUEBKE, Andreas ; MAUVE, Martin: A Search Engine for Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *V2VCOM 2008: Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Vehicle to Vehicle Communications*, 2008 20
- [WCML07] WEWETZER, Christian ; CALISKAN, Murat ; MEIER, Klaus ; LUEBKE, Andreas: Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication. In: *ITST 2007: Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications*, 2007, S. 287–292
- [WER<sup>+</sup>03] WISCHHOF, Lars ; EBNER, André ; ROHLING, Hermann ; LOTT, Matthias ; HALFMANN, Rüdiger: SOTIS - A Self-Organizing Traffic Information System. In: *Proceedings of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '03 Spring)* Bd. 19. Jeju, Korea : IEEE, April 2003, S. 1171–1177 22
- [WF05] *Kapitel* In Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications. In: WEDDE, H. F. ; FAROOQ, M.: *BeeHive - New Ideas for Developing Routing Algorithms Inspired by Honey Bee Behavior*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, London, New York, 2005 17

- [Wie74] WIEDEMANN, Rainer: Simulation des Straßenverkehrsflusses. In: *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe* 8 (1974), S. – [60](#)
- [WKR07] WANG, Ziyuan ; KULIK, Lars ; RAMAMOHANARAO, Kotagiri: Proactive Traffic Merging Strategies for Sensor-Enabled Cars. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978–1–59593–739–1, S. 39–48 [17](#)
- [WLB07] WEDDE, Horst F. ; LEHNHOFF, Sebastian ; BONN, Bernhard van: Highly Dynamic and Scalable VANET Routing for Avoiding Traffic Congestions. In: *VANET '07: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978–1–59593–739–1, S. 81–82 [17](#)
- [WM05] WOOLSCHOT, Niels ; MOSSELMANN, René: *Information Collection in Vehicular Ad-Hoc Networks*, Hochschule Arnheim Nijmegen Niederlande, Diplomarbeit, 2005 [20](#)
- [WSN<sup>+</sup>06] WILLIAMSON, Graham ; STEVENSON, Graeme ; NEELY, Steve ; COYLE, Lorcan ; NIXON, Paddy: Scalable Information Dissemination for Pervasive Systems: Implementation and Evaluation. In: *MPAC '06: Proceedings of the 4th International Workshop on Middleware for Pervasive and Ad-Hoc Computing (MPAC 2006)*. New York, NY, USA : ACM, 2006. – ISBN 1–59593–421–9, S. 7 [20](#)
- [WX04] WOLFSON, Ouri ; XU, Bo: Opportunistic Dissemination of Spatio-Temporal Resource Information in Mobile Peer to Peer Networks. In: *Proceedings of 15th International Workshop on Database and Expert Systems Applications*, 2004, S. 954–958 [21](#)
- [WXY04] WOLFSON, Ouri ; XU, Bo ; YIN, Huabei: Dissemination of Spatial-Temporal Information in Mobile Networks with Hotspots. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Databases, Information Systems and Peer-to-Peer Computing* Bd. 3367, Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science), S. 185–199 [21](#)

- [XOW04] XU, Bo ; OUKSEL, Aris ; WOLFSON, Ouri: Opportunistic Resource Exchange in Inter-vehicle Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Mobile Data Management*. Berkeley, CA, 2004 (Proc. of the Fifth IEEE International Conference on Mobile Data Management), S. 4–12 [21](#)
- [YAEAF08] YOUSEFI, Saleh ; ALTMAN, Eitan ; EL-AZOUZI, Rachid ; FATHY, Mahmood: Short Communication: Improving Connectivity in Vehicular Ad Hoc Networks: An Analytical Study. In: *Computer Communication* 31 (2008), Nr. 9, S. 1653–1659. – ISSN 0140–3664 [66](#)
- [Yam05] YAMAMOTO, Lidia: Epidemic Dissemination in Ad Hoc Networks. In: *Service Management and Self-Organization in IP-based Networks*, Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Schloss Dagstuhl, Germany, 2005 (Dagstuhl Seminar Proceedings 04411). – ISSN 1862–4405 [20](#), [29](#)
- [YZLM06] Y.-Z., Bi ; L.-M., Sun: A Parking Management System Based on Wireless Sensor Networks. In: *ACTA AUTOMATICA SINICA* VOL 32; PART 6 (2006), S. pages 968–977 [19](#)