

# **Netzlastabhängige Dienstgütebewertung in Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur**

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Henrik Schumacher  
geboren am 31. Juli 1979 in Hildesheim

2016

1. Referent : Prof. Dr.-Ing. Markus Fidler  
2. Referent : Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf  
Tag der Promotion : 27. Juni 2016

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Henrik Schumacher: *Netzlastabhängige Dienstgütebewertung  
in Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen*, Dissertation, 2016

© Henrik Schumacher, 2016

## VORWORT

---

Die vorliegende Arbeit ist während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Kommunikationsnetze des Instituts für Kommunikationstechnik (IKT) der Leibniz Universität Hannover entstanden. Ihren Entstehungsprozess begleitet und zu seinem erfolgreichen Abschluss beigetragen haben viele Personen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Markus Fidler für seine langjährige Unterstützung, die von stetiger Diskussionsbereitschaft, wertvollem wissenschaftlichen Rat und konstruktiver Kritik geprägt war. Großer Dank gebührt auch dem zweitem Referenten, Herrn Professor Dr.-Ing. Lars Wolf, sowie dem Vorsitzendem der Promotionskommission, Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Peissig.

Hervorzuheben ist außerdem die Rolle des ehemaligen Leiters des Fachgebiets Kommunikationsnetze, Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Jobmann, der maßgeblich zur Entstehung des Promotionsvorhabens beigetragen hat und dem ich ganz herzlich für sein großes Engagement und all die Dinge danke, die ich vor und nach seiner Pensionierung von ihm lernen durfte.

Den Kolleginnen und Kollegen am IKT danke ich für das gute Arbeitsklima und ihre stetige Hilfsbereitschaft. Ausdrückliche Erwähnung verdient hier Herr Dr.-Ing. Hugues N. Tchouankem, dem ich für die vielen hilfreichen Diskussionen und seine großartige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Feldtests besonders dankbar bin.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Studentinnen und Studenten, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als studentische Hilfskräfte am IKT wertvolle Beiträge zur Entwicklung der Simulationsumgebung und darüber hinaus geleistet haben.

Des Weiteren danke ich dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Förderung des Forschungsprojektes „C3World – Connected Cars in a Connected World“ sowie allen daran beteiligten Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig, des Oldenburger Instituts für Informatik OFFIS und der Konzernforschung der Volkswagen AG für die hervorragende Zusammenarbeit.

Der Delphi Deutschland GmbH, insbesondere Herrn Sven Kopetzki, danke ich für die professionelle Vermessung der bei den Feldtests eingesetzten Magnetfußantennen.

Mein besonders herzlicher Dank gilt Frau Dr. Hanna Engelhardt für ihre unschätzbare persönliche Unterstützung, ihre große Hilfe bei der Korrektur des Manuskripts und ihre Eigenschaft als stetige Motivationsquelle.

Schließlich danke ich meinen Eltern, Renate und Heinz-Jörg Schumacher, für ihre selbstverständlich entgegengebrachte, fortwährende und grenzenlose Unterstützung im Vorfeld und während des Promotionsvorhabens. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.



## KURZFASSUNG

---

Die drahtlose Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner unmittelbaren Umgebung kann zukünftigen Fahrzeuggenerationen eine neue Dimension innovativer Dienste und Assistenzfunktionen eröffnen. Ein großes Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bieten kooperative Sicherheitsanwendungen, die auf einer periodischen Broadcast-Übertragung von Statusnachrichten durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation basieren. In Europa bildet die von ETSI standardisierte, auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11 beruhende Funktechnologie ITS-G5 die favorisierte technische Grundlage zur Realisierung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen, die als Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) bezeichnet werden.

*VANETs auf Basis  
von ETSI ITS-G5*

Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist die Bewertung der netzlastabhängigen Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs auf Basis von ETSI ITS-G5. Die zu diesem Zweck durchgeführten Untersuchungen stützen sich sowohl auf Labor- und Feldtests als auch auf extensive Simulationsstudien.

*Netzlastabhängige  
Dienstgüte-  
bewertung*

Nach einer kurzen Einleitung im ersten Kapitel fasst das zweite Kapitel der Arbeit zunächst die für ihren weiteren Verlauf relevanten Grundlagen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zusammen. Das dritte Kapitel gibt anschließend einen Überblick über verwandte Forschungsarbeiten zur Leistungsbewertung und Überlaststeuerung in VANETs.

*Einleitung,  
Grundlagen und  
verwandte Arbeiten*

Da die Validität der aus Simulationsstudien hervorgehenden Ergebnisse maßgeblich von der Qualität des ihnen zugrunde liegenden Simulationsmodells abhängt, widmet sich das vierte Kapitel der Dissertation vertieft der Modellierung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs. Dabei wird eine Messumgebung für Labor- und Feldtests vorgestellt, die es erlaubt, empirisch validierte Modelle für die simulationsgestützte Leistungsbewertung zu gewinnen. Mit ihrer Hilfe wird in Labortests zunächst die datenratenabhängige Empfängerempfindlichkeit der verwendeten IEEE 802.11 Interfacekarten bestimmt, um dem Simulationsmodell diesbezüglich realitätsnahe Schwellenwerte zugrunde legen zu können.

*Modellierung*

*Messumgebung und  
Labortests*

Im Folgenden wird der Fokus auf die Modellierung des Funkkanals gerichtet. Unter Verwendung der entwickelten Messumgebung werden anhand von Feldtests die in der Realität gegebenen Ausbreitungsbedingungen von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf Autobahnen empirisch ermittelt. Aus den Ergebnissen der Feldtests wird, motiviert durch die diesbezüglichen Schwächen bisher verfügbarer Simulationsmodelle, ein Ausbreitungsmodell für die simulationsgestützte Leistungsbewertung in Autobahnscenarien abgeleitet, das die realen Ausbreitungsverhältnisse mit hinreichender Genauigkeit abbildet.

*Feldtests und  
Ableitung eines  
realitätsnahen Aus-  
breitungsmodells*

Nach einer Einführung individuell an die Bedürfnisse der weiteren Untersuchungen angepasster Performanzmetriken wird das vierte Kapitel abgeschlossen durch die Vorstellung eines umfangreichen Simulationsmodells

*Simulations-  
umgebung*

*Netzwerk- und Verkehrsflussimulation*

und einer darauf aufbauenden Simulationsumgebung zur Leistungsbewertung in VANETs, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurden. Die Simulationsarchitektur nutzt eine Kopplung von Netzwerksimulation und mikroskopischer Verkehrsflussimulation auf Basis der Simulatoren OMNeT++ und SUMO, um eine realistische Modellierung sowohl des Kommunikationsnetzes als auch der Teilnehmermobilität sicherstellen zu können. Das Simulationsmodell bildet die relevanten Teile der europäischen ITS-Protokollarchitektur detailgetreu ab und stützt sich zur realitätsnahen Modellierung des Funkkanals auf das empirisch validierte Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien. Durch die Implementierung einer komplexen Auswertungsmethodik ermöglicht die Simulationsumgebung eine detaillierte Evaluation des Verhaltens und der Performanz von VANETs. Im Ergebnis steht damit ein leistungsfähiges Werkzeug für eine effiziente und aussagekräftige Dienstgütebewertung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen zur Verfügung.

*Leistungsbewertung durch Simulation*

Das fünfte Kapitel der Dissertation widmet sich der simulationsgestützten Leistungsbewertung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs anhand extensiver Simulationsstudien, die auf dem entwickelten Modellierungs- und Simulationskonzept basieren. Den Untersuchungsgegenstand bildet dabei ein Autobahnszenario, dem zur Untersuchung netzlastabhängiger Effekte unterschiedliche Verkehrsdichten zugrunde gelegt werden, wobei jedes Fahrzeug periodisch Statusnachrichten erzeugt und als Single-Hop-Broadcast unter Verwendung von ITS-G5 überträgt.

*Untersuchung grundlegender Skalierbarkeitseffekte*

Die Simulationsstudien werden eingeleitet durch eine Untersuchung grundlegender Skalierbarkeitseffekte. Dabei wird aufgezeigt, dass sich die Netzlast maßgeblich auf die Dienstgüte des Netzes auswirkt und Multi-User-Interferenzen in Überlastsituationen zu inakzeptablen Beeinträchtigungen der Dienstgüte führen.

*Einfluss von Ausbreitungsmodellierung und PLC*

Im Anschluss wird evaluiert, welchen Einfluss die Ausbreitungsmodellierung auf die unter Verwendung von Simulationsstudien ermittelte Dienstgüte hat. Die Ergebnisse zeigen erhebliche Auswirkungen sowohl des zugrunde gelegten Pfadverlustmodells als auch der Fading-Intensität. Anhand substantieller Abweichungen gegenüber dem empirisch validierten Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien wird die Notwendigkeit einer realitätsnahen Ausbreitungsmodellierung dokumentiert. Mithilfe weiterer Simulationen wird ferner herausgearbeitet, dass die Nutzung von Physical Layer Capture (PLC) eine signifikante Verbesserung der erzielbaren Dienstgüte bewirkt und daher durch das Simulationsmodell abgebildet werden muss.

*Quantifizierung der Netzlast*

Nachfolgend setzt sich die Arbeit mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Quantifizierung der Netzlast in VANETs auseinander, indem verschiedene zu diesem Zweck in Betracht kommende Metriken und ihre Interdependenzen untersucht werden.

*Vermeidung von Überlast*

Den Schwerpunkt und Abschluss des fünften Kapitels bildet schließlich eine eingehende Untersuchung der netzlastabhängigen Auswirkungen verschiedener konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Performanz des Netzes. Im Rahmen umfangreicher Simulationsstudien werden die Parameter Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate, Datenrate, Carrier-Sense-

Schwellenwert und Größe des Contention Windows betrachtet und ihr jeweiliges Potential zur Bewältigung von Skalierbarkeitsproblemen und zur Vermeidung von Überlastsituationen in VANETs bewertet.

Das sechste und letzte Kapitel schließt die Dissertation mit einer Zusammenfassung ihrer Ergebnisse und einem kurzen Ausblick ab.

*Schlagwörter:* Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, VANET, ITS-G5.

## ABSTRACT

---

Wireless networking between vehicles and their immediate environment can provide a new dimension of innovative services and assistance functions to future vehicle generations. Cooperative safety applications, relying on periodic broadcasts of status messages using vehicle-to-vehicle communication, offer great opportunities to improve traffic safety. In Europe, ETSI ITS-G5, which is derived from the IEEE 802.11 standard for wireless LANs, is the favored wireless networking technology to realize vehicle-to-vehicle communication networks, commonly referred to as Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs).

*VANETs based on  
ETSI ITS-G5*

In this dissertation, periodic broadcast communication performance in VANETs based on ETSI ITS-G5 is evaluated dependent on network load. The research conducted for this purpose relies on laboratory and field tests as well as on extensive simulation studies.

*load-dependent  
performance  
evaluation*

Following a short introduction in the first chapter, the second chapter summarizes fundamentals of vehicle-to-vehicle communication that are considered relevant for the remainder of the thesis. Afterwards, the third chapter gives an overview of related work on performance evaluation and congestion control in VANETs.

*introduction,  
fundamentals and  
related work*

As the validity of results acquired from simulation studies is substantially affected by the quality of the underlying simulation model, the fourth chapter of this dissertation thoroughly addresses modeling periodic broadcasts in VANETs. A measurement system for laboratory and field tests is presented, which allows obtaining empirically validated models for simulation-based performance evaluation. With the aid of this measurement system, the receiver sensitivity of the employed IEEE 802.11 network interface controllers is quantified as a function of data rate in laboratory tests. The results are used to provide the simulation model with realistic threshold values regarding frame reception.

*modeling*

*measurement system  
and laboratory tests*

Subsequently, the thesis focuses on radio propagation modeling. Using the developed measurement system, the propagation conditions prevailing in reality are determined empirically by means of vehicle-to-vehicle communication field tests on highways. Motivated by the weaknesses of simulation models available to date, a propagation model for simulation-based performance evaluation in highway scenarios is derived from the field test results that reflects real propagation conditions adequately accurate.

*field tests and  
derivation of a  
realistic propagation  
model*

After introducing performance metrics that are individually adapted to the needs of the following performance studies, the fourth chapter is com-

*simulation  
environment*

*network and traffic  
simulation*

pleted by the presentation of a comprehensive simulation model and a corresponding simulation environment for performance evaluation in VANETs, which have been developed for the purpose of this thesis. In order to ensure realistic modeling of both the communication network and the mobility of its users, the simulation architecture relies on an interconnection of network simulation and microscopic traffic simulation based on the simulators OMNeT++ und SUMO. The simulation model reproduces relevant details of the European ITS protocol architecture true to the detail and utilizes the empirically validated propagation model for highway scenarios to realistically reflect radio propagation. By implementing an elaborate functionality for data collection, aggregation and analysis, the simulation environment enables a detailed investigation of the behavior and performance of VANETs. As a result, a powerful tool for efficient and insightful performance evaluation in vehicular networks is provided.

*simulation-based  
performance  
evaluation*

The fifth chapter of this dissertation is devoted to simulation-based performance evaluation of periodic broadcasts in VANETs by means of extensive simulation studies, which are based on the developed modeling and simulation concept. The object of investigation is a highway scenario, which involves variable traffic densities in order to investigate effects dependent on network load. The scenario assumes that each vehicle periodically generates status messages and transmits these as single-hop broadcast using ITS-G5.

*investigation of  
fundamental  
scalability effects*

The simulation studies start with an investigation of fundamental scalability effects. It illustrates that the level of network load substantially affects network performance and that multi-user interference causes unacceptable performance impairments when the network is congested.

*impact of  
propagation  
modeling and PLC*

Subsequently, the impact of propagation modeling on simulation-based performance evaluation is evaluated. The results show a significant influence of both the employed path loss model and the fading severity. In view of substantial deviations from the empirically validated propagation model for highway scenarios, it is documented that realistic propagation modeling is indispensable for acquiring accurate results using simulation studies. Additional simulations disclose that physical layer capture (PLC) considerably improves the achievable performance and therefore has to be reflected by the simulation model.

*network load  
quantification*

Afterwards, the thesis examines several alternatives for network load quantification in VANETs. Different metrics that can be applied for this purpose are compared and interdependencies between them are identified.

*congestion  
avoidance*

The fifth chapter is completed by an in-depth investigation that quantifies the impact of different configurable communication parameters on load-dependent network performance. By means of comprehensive simulation studies, the parameters transmission power, message generation rate, data rate, carrier sense threshold and contention window size are examined, and their suitability to overcome scalability problems and to avoid network congestion in VANETs is evaluated.

The sixth and final chapter concludes the dissertation with a summary of its results and a short outlook.

*Keywords:* Vehicle-to-Vehicle Communication, VANET, ITS-G5.

# INHALTSVERZEICHNIS

---

Abkürzungsverzeichnis	xv
Formelzeichen	xxi
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation für die vorliegende Arbeit . . . . .	2
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 GRUNDLAGEN DER FAHRZEUG-ZU-FAHRZEUG-KOMMUNIKATION</b>	<b>7</b>
2.1 Anwendungen . . . . .	7
2.1.1 Verkehrssicherheit . . . . .	8
2.1.2 Verkehrseffizienz . . . . .	9
2.1.3 Mehrwertdienste . . . . .	9
2.2 Kommunikationstechnik und Standardisierung . . . . .	9
2.2.1 Wireless Access in Vehicular Environments . . . . .	10
2.2.2 Europäische ITS-Protokollarchitektur . . . . .	11
2.2.3 Cooperative Awareness durch periodische Broadcasts . . . . .	15
2.2.4 IEEE 802.11 . . . . .	17
2.2.5 ETSI ITS-G5 und IEEE 802.11p . . . . .	31
2.2.6 Decentralized Congestion Control . . . . .	37
2.2.7 Frequenzallokation für ITS in Europa . . . . .	38
2.2.8 Kanalallokation für ITS-G5 . . . . .	39
2.3 Anforderungen und Herausforderungen . . . . .	40
2.4 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	44
<b>3 VERWANDTE ARBEITEN</b>	<b>47</b>
3.1 Leistungsbewertung periodischer Broadcasts in VANETs . . . . .	47
3.1.1 Simulationsstudien . . . . .	47
3.1.2 Analytische Modelle . . . . .	53
3.2 Überlaststeuerung in VANETs . . . . .	63
<b>4 MODELLIERUNG VON BROADCAST-KOMMUNIKATION IN VANETS</b>	<b>75</b>
4.1 Messumgebung für Feldtests . . . . .	76
4.2 Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit . . . . .	78
4.3 Modellierung des Funkkanals . . . . .	81
4.3.1 Modellierung des Pfadverlustes in Autobahnszenarien . . . . .	83
4.3.2 Modellierung von Fading in Autobahnszenarien . . . . .	91
4.3.3 Validierung der Ausbreitungsmodellierung durch Feldtests . . . . .	95
4.3.4 Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien . . . . .	102
4.4 Metriken zur Leistungsbewertung . . . . .	103
4.4.1 Framebezogene Verhältnisgrößen . . . . .	103
4.4.2 Delay-Metriken . . . . .	105
4.4.3 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Performanzmetriken . . . . .	109
4.4.4 Metriken zur Quantifizierung der Netzlast . . . . .	110
4.5 Simulationsumgebung . . . . .	113
4.5.1 Architektur . . . . .	113

4.5.2	Netzwerksimulation . . . . .	115
4.5.3	Verkehrsflusssimulation . . . . .	136
5	LEISTUNGSBEWERTUNG DURCH SIMULATION . . . . .	139
5.1	Simulationsszenario . . . . .	141
5.1.1	Verkehrsfluss . . . . .	141
5.1.2	Kommunikation . . . . .	144
5.2	Untersuchung grundlegender Skalierbarkeitseffekte . . . . .	146
5.3	Modellierungsaspekte . . . . .	157
5.3.1	Funkausbreitungseffekte: Pfadverlust und Fading . . . . .	157
5.3.2	Physical Layer Capture . . . . .	165
5.4	Quantifizierung der Netzauslastung . . . . .	168
5.5	Vermeidung von Überlast . . . . .	173
5.5.1	Sendeleistung . . . . .	174
5.5.2	Nachrichtenerzeugungsrate . . . . .	185
5.5.3	Datenrate . . . . .	192
5.5.4	Carrier-Sense-Schwellenwert . . . . .	202
5.5.5	Größe des Contention Windows . . . . .	209
5.5.6	Fazit . . . . .	220
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK . . . . .	225
6.1	Modellierung von Broadcast-Kommunikation in VANETs . . . . .	226
6.2	Leistungsbewertung durch Simulation . . . . .	227
6.3	Ausblick . . . . .	230
A	ANHANG . . . . .	233
A.1	Herleitungen zum Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell . . . . .	233
A.2	Autobahnszenario: Ergänzende Simulationsauswertungen . . . . .	236
	LITERATURVERZEICHNIS . . . . .	237

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1	Entwicklung der jährlichen Verkehrsleistung in der Europäischen Union. . . . .	1
Abbildung 2	Referenzarchitektur einer ITS-Station. . . . .	12
Abbildung 3	Aussenden einer Cooperative Awareness Message (CAM) als Single-Hop Broadcast. . . . .	16
Abbildung 4	Assoziierung, Authentifizierung und korrespondierende Zustände einer IEEE 802.11 Station. . . . .	22
Abbildung 5	Medienzugriff nach dem CSMA/CA-Verfahren. . . . .	27
Abbildung 6	Schematische Darstellung des Hidden-Station-Problems. . . . .	28
Abbildung 7	Ablauf des IEEE 802.11 RTS/CTS-Verfahrens. . . . .	29
Abbildung 8	Schematische Darstellung des Exposed-Station-Problems. . . . .	31
Abbildung 9	MAC-Header eines ITS-G5-Datenframes. . . . .	34
Abbildung 10	Markov-Kette zur Beschreibung des Backoff-Prozesses sowie der Wartephase einer Station. . . . .	58
Abbildung 11	Markov-Kette zur Modellierung des Belegungszustandes aufeinanderfolgender Zeitschlitze. . . . .	60
Abbildung 12	Geometrie des eindimensionalen Autobahnszenarios. . . . .	61
Abbildung 13	Hardwarekomponenten der Messumgebung. . . . .	77
Abbildung 14	Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit. . . . .	79
Abbildung 15	In Labortests ermittelte Packet Delivery Rate in Abhängigkeit von Empfangsleistung und SNR für verschiedene Datenraten. . . . .	80
Abbildung 16	Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell . . . . .	84
Abbildung 17	Pfadverlustverlauf nach dem Two-Ray Ground Reflection Modell . . . . .	85
Abbildung 18	Pfadverlust als Funktion der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Modelle. . . . .	88
Abbildung 19	Parameter $m$ für Nakagami-Fading als Funktion der Distanz. . . . .	95
Abbildung 20	Ergebnisse der Feldtests auf Autobahnen: Empfangsleistung, mittlere Empfangsleistung und PDR. . . . .	98
Abbildung 21	Ergebnisse der Feldtests auf Autobahnen: gemessene Empfangsleistung im Vergleich zu verschiedenen Pfadverlustmodellen. . . . .	99
Abbildung 22	Ergebnisse der Feldtests auf Autobahnen: aus Messungen resultierende und modellbasierte PDRs. . . . .	101
Abbildung 23	Übersicht verwendeter Delay-Metriken. . . . .	106
Abbildung 24	Architektur der Simulationsumgebung mit Kopplung von Netzwerk- und Verkehrsflusssimulation. . . . .	114
Abbildung 25	Schematischer Aufbau des Compound Modules <i>ITS-Station</i> mit Submodules. . . . .	117

Abbildung 26	Prozessdiagramme des Medienzugriffsverfahrens bei Broadcast-Übertragung. . . . .	124
Abbildung 27	Schematische Darstellung von Physical Layer Capture. . . . .	128
Abbildung 28	Schematische Darstellung der Nutzung von OMNeT++-Signalen zur zentralen Erfassung statistischer Daten im StatisticCollector-Modul. . . . .	130
Abbildung 29	Entstehung einer Hidden-Station-Kollision. . . . .	135
Abbildung 30	Schematische Darstellung des Autobahnszenarios mit Auswertungszone (Area of Interest) und geometrischen Abmessungen. . . . .	141
Abbildung 31	Carrier Sense Rate, PDR im interferenzfreien sowie im interferenzbehafteten Fall in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	147
Abbildung 32	Carrier Sense Rate, PDR im interferenzfreien sowie im interferenzbehafteten Fall in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Erzeugungsraten. . . . .	149
Abbildung 33	Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Position des Senders im 10 km langen Autobahnszenario für verschiedene Verkehrsdichten und Sendeleistungen. . . . .	150
Abbildung 34	Komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF) der Channel Access Time für verschiedene Erzeugungsraten und Verkehrsdichten. . . . .	151
Abbildung 35	Komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF) von Update Delay und Message Lifetime für $d = 100$ m bei unterschiedlicher Verkehrsdichte. . . . .	155
Abbildung 36	Arithmetisches Mittel der Message Lifetime $\bar{T}_{mlt}$ für verschiedene Erzeugungsraten und Verkehrsdichten. . . . .	156
Abbildung 37	Mittlere Empfangsleistung, Kommunikationsreichweite und interferenzfreie PDR für verschiedene Pfadverlustmodelle. . . . .	158
Abbildung 38	Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten bei distanzabhängiger Fading-Intensität. . . . .	160
Abbildung 39	Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Kollisionsrate für verschiedene Verkehrsdichten bei distanzabhängiger Fading-Intensität. . . . .	162
Abbildung 40	Auswirkungen der Fading-Intensität auf die Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall für verschiedene Pfadverlustmodelle. . . . .	163
Abbildung 41	Auswirkungen der Fading-Intensität auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten im Dual-Slope Pfadverlustmodell. . . . .	164
Abbildung 42	Auswirkungen von Physical Layer Capture auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	166

Abbildung 43	Auswirkungen von Physical Layer Capture auf die Anzahl von CSMA-Kollisionen, durch Hidden Stations verursachte Kollisionen und die Gesamt-Kollisionsrate.	167
Abbildung 44	Distanzverlauf der Packet Delivery Rate für verschiedene Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte. . . . .	169
Abbildung 45	Mittlere Message Lifetime für verschiedene Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte. . .	170
Abbildung 46	Mittlere auf den Carrier-Sense-Schwellenwert und den Standard-Schwellenwert bezogene Channel Busy Times in Abhängigkeit der Kommunikationsdichte. . . . .	171
Abbildung 47	PDR im interferenzfreien Fall in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Sendeleistungen. . . . .	175
Abbildung 48	Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Sendeleistung für verschiedene Verkehrsdichten und Erzeugungsraten. . . . .	176
Abbildung 49	Arithmetisches Mittel der Channel Access Time und auf den Carrier-Sense-Schwellenwert bezogene Channel Busy Time in Abhängigkeit der Sendeleistung für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	177
Abbildung 50	Mittlere Packet Delivery Rate in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Sendeleistungen bei geringer und hoher Nachrichtenerzeugungsdichte. . . . .	178
Abbildung 51	PDR im interferenzfreien sowie interferenzbehafteten Fall und Kollisionsraten in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger bei höchster und geringster Sendeleistung. . . . .	179
Abbildung 52	Mittlere Packet Delivery Rate in Abhängigkeit der Sendeleistung für verschiedene Nachrichtenerzeugungsdichten und Distanzen. . . . .	180
Abbildung 53	Mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit der Sendeleistung für verschiedene Nachrichtenerzeugungsdichten und Distanzen. . . . .	181
Abbildung 54	Mittlere Packet Delivery Rate für verschiedene Sendeleistungen bei Verwendung des Autobahn-Ausbreitungsmodells und des vereinfachten Two-Ray Ground Modells mit distanzabhängiger Fading-Intensität. . . . .	183
Abbildung 55	PDR im interferenzfreien sowie interferenzbehafteten Fall und Kollisionsraten bei Verwendung des Autobahn-Ausbreitungsmodells und des vereinfachten Two-Ray Ground Modells mit distanzabhängiger Fading-Intensität. . . . .	183

Abbildung 56	Mittlere Frame Drop Rate und auf den Carrier-Sense-Schwellenwert bezogene Channel Busy Time in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	186
Abbildung 57	Channel Access Time: Arithmetisches Mittel für verschiedene Verkehrsdichten $\rho$ und komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF) für $\rho = 135$ Fz./km in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate. . . . .	187
Abbildung 58	Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Distanzen und Verkehrsdichten. . . . .	188
Abbildung 59	Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate auf die mittlere Message Lifetime für verschiedene Distanzen und Verkehrsdichten. . . . .	189
Abbildung 60	Komplementäre Verteilungsfunktion der Message Lifetime für $f_g = 10$ Nachrichten/s sowie $f_g = 7$ Nachrichten/s mit $\rho = 135$ Fz./km. . . . .	190
Abbildung 61	Goodput in Mbps in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	191
Abbildung 62	PDR im interferenzfreien Fall in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten bei mittlerer und hoher Sendeleistung. . . . .	195
Abbildung 63	Mittlere auf den Standard-Schwellenwert und den Carrier-Sense-Schwellenwert bezogene Channel Busy Times in Abhängigkeit der Datenrate bei mittlerer und hoher Sendeleistung für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	196
Abbildung 64	Arithmetisches Mittel der Channel Access Time in Abhängigkeit der Datenrate für verschiedene Verkehrsdichten bei mittlerer und hoher Sendeleistung. . . . .	197
Abbildung 65	Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Datenrate für verschiedene Verkehrsdichten bei mittlerer und hoher Sendeleistung. . . . .	197
Abbildung 66	PDR im interferenzfreien und interferenzbehafteten Fall sowie Kollisionsraten in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger bei geringster und höchster Datenrate. . . . .	198
Abbildung 67	Mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten und Nachrichtenerzeugungsdichten mit $f_g = 10$ Nachrichten/s und $P_t = 23$ dBm. . . . .	199
Abbildung 68	Mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten und Nachrichtenerzeugungsdichten mit $f_g = 10$ Nachrichten/s und $P_t = 30$ dBm. . . . .	200
Abbildung 69	Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts für verschiedene Verkehrsdichten und Erzeugungsraten. . . . .	204

Abbildung 70	Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 300$ Nachrichten/km·s. . . . .	205
Abbildung 71	Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 900$ Nachrichten/km·s. . . . .	206
Abbildung 72	Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 1350$ Nachrichten/km·s. . . . .	207
Abbildung 73	Gesamt-Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 1800$ bzw. $2700$ Nachrichten/km·s. . . . .	208
Abbildung 74	Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Verkehrsdichten und Erzeugungsraten. . . . .	211
Abbildung 75	Packet Delivery Rate in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Nachrichtenerzeugungsdichten und Distanzen. . . . .	212
Abbildung 76	Mittlere Channel Access Time in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	213
Abbildung 77	Komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF) der Channel Access Time für verschiedene Größen des Contention Windows und Nachrichtenerzeugungsdichten. . . . .	214
Abbildung 78	Mittlere Anzahl zeitgleich um den Medienzugriff konkurrierender Frames pro Kilometer Strecke in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	215
Abbildung 79	Mittlere Anzahl konkurrierender Frames pro Kilometer Strecke und für den Übertragungsbeginn verfügbarem Zeitschlitz sowie mittlere auf den Standard-Schwellenwert bezogene Channel Busy Time in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Verkehrsdichten. . . . .	215
Abbildung 80	Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 900$ Nachrichten/km·s. . . . .	217
Abbildung 81	Erhöhung der effektiven Carrier-Sense-Reichweite bei (quasi-)gleichzeitigem Übertragungsbeginn. . . . .	218

Abbildung 82	Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows für verschiedene Distanzen zwischen Sender und Empfänger bei $\rho_g = 1350$ Nachrichten/km·s. . . . .	219
Abbildung 83	Anhang: Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell	233
Abbildung 84	Anhang: Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Fahrzeugdichten bei mittlerer Fading-Intensität ( $m = 3$ ). . . . .	236

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 1	EDCA-Parameter von ITS-G5 und IEEE 802.11p. . . . .	33
Tabelle 2	Datenraten von IEEE 802.11 bei Verwendung von OFDM im 5 GHz Frequenzband. . . . .	37
Tabelle 3	Frequenzallokation für ITS in Europa. . . . .	39
Tabelle 4	Kanalallokation für ITS-G5 in Europa. . . . .	40
Tabelle 5	In Labortests ermittelte Empfängerempfindlichkeiten und SINR-Schwellenwerte in Abhängigkeit der Daten- rate. . . . .	81
Tabelle 6	Konfigurationsparameter bei der Durchführung der Feld- tests. . . . .	96
Tabelle 7	Parameter des Ausbreitungsmodells für Autobahnssze- narien. . . . .	102
Tabelle 8	Vergleich der verwendeten Performanzmetriken im Hin- blick auf die Berücksichtigung verschiedener Charakte- ristika der Dienstgüte. . . . .	109
Tabelle 9	Zusammenfassung der innerhalb der entwickelten Si- mulationsumgebung verwendeten OMNeT++-Module und ihrer Relation zur Ausgangsbasis im INETMANET- Framework. . . . .	121
Tabelle 10	Zusammenfassung der zur statistischen Datenerfassung verwendeten OMNeT++-Signale. . . . .	131
Tabelle 11	Vom Radio-Modul emittierte OMNeT++-Signale zur Un- terscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kol- lisionen. . . . .	134
Tabelle 12	Parametrierung der gestutzten Normalverteilung der Höchstgeschwindigkeiten von Pkw und Lkw. . . . .	142
Tabelle 13	Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsstärke des Autobahnsszenarios für die im Rahmen der Simula- tionsstudien untersuchten Verkehrsdichten. . . . .	143
Tabelle 14	Standard-Konfigurationsparameter des Simulationssze- narios. . . . .	145
Tabelle 15	Dauer eines Simulationslaufs in Abhängigkeit der Ver- kehrsdichte. . . . .	146
Tabelle 16	PDR für $d = 350$ m und Auswirkungen einer Verdopp- lung der Erzeugungsrate bei unterschiedlicher Verkehrs- dichte und Erzeugungsdichte. . . . .	149
Tabelle 17	Mittlere Channel Access Times und mittlere End-to- End Delays für verschiedene Erzeugungsraten und Ver- kehrsdichten. . . . .	153
Tabelle 18	Kommunikationsdichte für verschiedene Simulations- konfigurationen. . . . .	171

Tabelle 19	Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Sendeleistung. . . . .	175
Tabelle 20	Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate. . . . .	186
Tabelle 21	Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Datenrate. . . . .	193
Tabelle 22	Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Datenrate untersuchten Simulationskonfigurationen. . . . .	193
Tabelle 23	Im Simulationsmodell angenommene Empfängerempfindlichkeiten und SINR-Schwellenwerte in Abhängigkeit der Datenrate. . . . .	194
Tabelle 24	Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen des Carrier-Sense-Schwellenwerts. . . . .	203
Tabelle 25	Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen des Carrier-Sense-Schwellenwerts untersuchten Simulationskonfigurationen. . . . .	203
Tabelle 26	Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Größe des Contention Windows. . . . .	210
Tabelle 27	Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Größe des Contention Windows untersuchten Simulationskonfigurationen. . . . .	211
Tabelle 28	Einfluss verschiedener Kommunikationsparameter auf die Netzlast. . . . .	221

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

AC	Access Category
ACC	Adaptive Cruise Control
ACK	Acknowledgment (Bestätigungsframe in IEEE 802.11)
AIFS	Arbitration Interframe Space
AIFSN	Arbitration Interframe Space Number
AIMD	Additive Increase / Multiplicative Decrease
AP	Access Point
BEB	Binary Exponential Backoff
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identification
c. p.	ceteris paribus
CAM	Cooperative Awareness Message
CAT	Channel Access Time
CBT	Channel Busy Time
CCDF	Komplementäre Verteilungsfunktion (Complementary Cumulative Distribution Function)
CCH	Control Channel
CDF	Verteilungsfunktion (Cumulative Distribution Function)
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear to Send
CW	Contention Window
D-FPAV	Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular Environments
DCC	Decentralized Congestion Control
DCF	Distributed Coordination Function
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
DIFS	DCF Interframe Space

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DS	Distribution System
DSC	DCC Sensitivity Control
DSRC	Dedicated Short Range Communications
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECC	Electronic Communications Committee
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EIFS	Extended Interframe Space
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIFO	First In First Out
FPAV	Fair Power Adjustment for Vehicular Environments
FSM	Finite State Machine
Fz.	Fahrzeug
Gl.	Gleichung
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
IBSS	Independent BSS
IDR	Information Dissemination Rate
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Interframe Space
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
IRT	Packet Inter-Reception Time
ISI	Intersymbol Interference

ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transport Systems
LDM	Local Dynamic Map
Lkw	Lastkraftwagen
LLC	Logical Link Control
LOS	Line of Sight
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
MBL	Maximum Beaconing Load
Mbps	Megabit pro Sekunde
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIB	Management Information Base
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPDU	MAC Protocol Data Unit
NAV	Network Allocation Vector
NLOS	Non Line of Sight
NS-2	Network Simulator 2
NS-3	Network Simulator 3
OCB	Outside the Context of a BSS
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFFIS	Oldenburger Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Informatik
OSI	Open Systems Interconnection
PCF	Point Coordination Function
PDR	Packet Delivery Rate
PHY	Physical Layer
PIFS	PCF Interframe Space
Pkw	Personenkraftwagen
PLC	Physical Layer Capture
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PPDU	PLCP Protocol Data Unit
PPP	Point-to-Point Protocol
PULSAR	Periodically Updated Load Sensitive Adaptive Rate Control

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RMS	Root Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indication
RSU	Roadside Unit
RTS	Request to Send
RUDE	Real-time UDP Data Emitter
SAE	Society of Automotive Engineers
SCH	Service Channel
SHB	Single-Hop-Broadcast
SIFS	Short Interframe Space
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SIR	Signal to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
STA	Station (insbesondere nach IEEE 802.11)
STDMA	Self-Organizing Time Division Multiple Access
SUMO	Simulation of Urban MObility
TAC	Transmit Access Control
TC	Technical Committee
TCP	Transmission Control Protocol
TDC	Transmit Datarate Control
TPC	Transmit Power Control
TraCI	Traffic Control Interface
TRC	Transmit Rate Control
TS	Technical Specification
TXOP	Transmission Opportunity
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle

VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WSMP	WAVE Short Message Protocol
WSSUS	Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering
XML	Extensible Markup Language



## FORMELZEICHEN

---

$A_e$	Effektive Apertur der Antenne
$B$	Bandbreite in Hertz [Hz]
$C_{LB}$	Lokale Broadcast-Kapazität
$CW$	Größe des Contention Windows
$CW_{max}$	Maximales Contention Window
$CW_{min}$	Minimales Contention Window
$d$	Entfernung (euklidischer Abstand) zwischen Sender und Empfänger
$d_{bp}$	Breakpoint Distance des Two-Ray Ground Reflection Modells
$d_c$	Crossover Distance des vereinfachten Two-Ray Ground Modells
$d_{cs}$	Carrier-Sense-Reichweite
$d_{robHS}$	Robuste Reichweite gegen Hidden Stations
$d_t$	Zielentfernung (Target Distance)
$f_c$	Trägerfrequenz (Mittenfrequenz des verwendeten Kanals)
$\Delta f$	Subträgerabstand des Mehrträgerverfahrens
$f_g$	Nachrichtenerzeugungsrate [Nachrichten/s]
$G_r$	Antennengewinn auf Empfängerseite
$G_t$	Antennengewinn auf Senderseite
$H(x)$	Heaviside-Funktion
$h_r$	Höhe der Empfangsantenne
$h_t$	Höhe der Sendeantenne
$J_{gen}$	Jitter der Nachrichtenerzeugungsverzögerung
$K$	Fading-Parameter bei Ricean Fading
$k_B$	Boltzmann-Konstante

$k_{cf,km}$	Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Frames pro km
$m$	Fading-Parameter bei Nakagami Fading
$N$	Rauschleistung
$N_{therm}$	Thermische Rauschleistung
$PL$	Pfadverlust (Path Loss)
$PL_{tol}$	Tolerierbarer Pfadverlust
$P_I$	Interferenzleistung
$P_r$	Empfangsleistung
$P_{r,cs}$	Carrier-Sense-Schwellenwert
$P_{r,cum}$	Kumulative Empfangsleistung
$P_{r,def}$	Standard-Schwellenwert zur Berechnung der Channel Busy Time: $P_{r,def} = -85$ dBm
$P_{r,th}$	Empfängerempfindlichkeit
$P_t$	Sendeleistung
$q$	Verkehrsstärke [Fz./h]
$R_b$	Brutto-Datenübertragungsrate [bit/s]
$r_n$	Radius der $n$ -ten Fresnelzone
$S$	Leistungsdichte der elektromagnetischen Welle
$SIR_{min}$	Minimales SINR während der Dauer eines Frameempfangs
$SIR_{th}$	SINR-Schwellenwert für fehlerfreien Frameempfang
$T_{AIFS}$	Dauer eines AIFS
$T_{ca}$	Kanalzugriffszeit (Channel Access Time)
$T_{env}$	Umgebungstemperatur in Kelvin [K]
$T_{ee}$	Ende-zu-Ende Delay
$T_G$	Länge eines OFDM-Guardintervalls
$T_{gen}$	Erzeugungsverzögerung
$T_{int}$	Intertransmission Delay
$T_{mlt}$	Message Lifetime
$T_{obs}$	Beobachtungsdauer zur Berechnung von Channel Load Metriken und Durchsatz
$T_{preamble}$	Dauer der PLCP-Präambel eines Frames nach IEEE 802.11 bzw. ITS-G5

$T_{prop}$	Ausbreitungsverzögerung (Propagation Delay)
$T_{run}$	Dauer eines Simulationslaufs
$T_S$	Länge eines OFDM-Kernsymbols
$T_{SIFS}$	Dauer eines SIFS
$T_{slot}$	Dauer eines Zeitschlitzes nach IEEE 802.11 bzw. ITS-G5
$T_{step}$	Dauer eines SUMO-Simulationsschritts
$T_{sym}$	Länge eines OFDM-Symbolintervalls mit $T_{sym} = T_S + T_G$
$T_{tr}$	Übertragungsverzögerung (Transmission Delay)
$T_{upd}$	Update Delay
$v_{max}$	Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs im Fahrzeugfolge- modell
$\bar{v}$	Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit
$\alpha$	Pfadverlustkoeffizient
$\gamma$	Channel Busy Time (CBT)
$\gamma_{cs}$	Auf Carrier-Sense-Schwellenwert $P_{r,cs}$ bezogene CBT
$\gamma_{def}$	Auf Standard-Schwellenwert $P_{r,def} = -85$ dBm bezogene CBT
$\lambda$	Wellenlänge des Trägersignals
$\rho$	Verkehrsdichte [Fz./km]
$\rho_{com}$	Kommunikationsdichte [Frames/s]
$\rho_g$	Nachrichtenerzeugungsdichte [Nachrichten/(km · s)]



## EINLEITUNG

Als Carl Benz am 29. Januar 1886 beim Kaiserlichen Patentamt die Erteilung eines Patents für das von ihm erfundene „Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb“ [10] beantragte, konnte er nicht voraussehen, welche Entwicklung der motorisierte Straßenverkehr bis in das 21. Jahrhundert nehmen und welche sozioökonomische Bedeutung ihm für die Mobilitätsgesellschaft der heutigen Zeit zukommen würde. Im Jahr 2013 wurden in der Europäischen Union offiziell Statistiken zufolge 4672 Milliarden Personenkilometer mit dem Pkw zurückgelegt und Güter im Umfang von 1719 Milliarden Tonnenkilometern mithilfe des straßengebundenen Güterverkehrs transportiert. Dies entspricht einer Zunahme von 18,7% bzw. 33,4% gegenüber dem Jahr 1995, wie Abbildung 1 veranschaulicht [37].

Entwicklung des  
motorisierten  
Straßenverkehrs

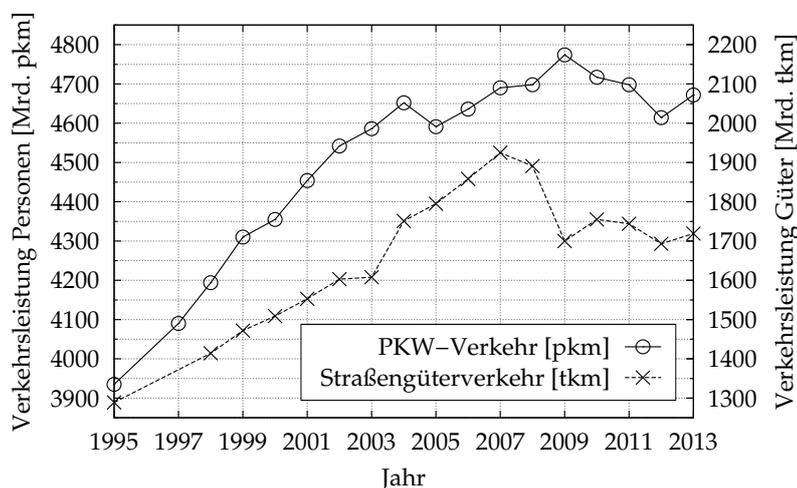


Abbildung 1: Entwicklung der jährlichen Verkehrsleistung des in Personenkilometern (pkm) gemessenen PKW-Verkehrs und des in Tonnenkilometern (tkm) gemessenen Straßengüterverkehrs in der Europäischen Union zwischen 1995 und 2013 [36, 37].

Die sichere und effiziente Bewältigung dieser enormen Verkehrsleistung ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden: Trotz der großen Fortschritte, die in den letzten Jahrzehnten im Bereich der Verkehrssicherheit erzielt werden konnten, ereigneten sich im Jahr 2013 in der EU noch immer mehr als 1,054 Millionen Straßenverkehrsunfälle mit Personenschäden und 25938 Menschen verloren dabei ihr Leben [37]. Staus innerhalb des Straßennetzes der EU verursachen nach Schätzungen der Europäischen Kommission volkswirtschaftliche Kosten in Höhe von 1% des Bruttoinlandsproduktes [29].

Vor diesem Hintergrund können *kooperative Systeme*, die auf einer Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umwelt basieren, aufgrund ihres vielfältigen Anwendungspotentials einen wertvollen Beitrag dazu leisten, den Straßenverkehr der Zukunft sicherer, effizienter und komfortabler zu gestalten. Die Nut-

Kooperative Systeme

zung dieses Potentials ist daher seit einigen Jahren fester Bestandteil der politischen Agenda: Die Europäische Kommission etwa hat bereits im Jahr 2008 einen Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme<sup>1</sup> vorgestellt, der die Verbesserung von Sicherheit, Effizienz und Umweltverträglichkeit des Güter- und Personenverkehrs in der EU als politische Hauptziele definiert und die Entwicklung kooperativer Systeme als wichtiges Mittel zur Erreichung dieser Ziele hervorhebt [38].

*V2V- und V2I-Kommunikation*

Die technische Grundlage solcher kooperativen Systeme bildet die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Fahrzeug-zu-Fahrzeug), in der englischsprachigen Literatur als *Vehicle-to-Vehicle (V2V)* bezeichnet, sowie zwischen Fahrzeugen und der sie umgebenden Infrastruktur (Fahrzeug-zu-Infrastruktur), im Englischen *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)* genannt [69, 89, 98, 149, 183].

*Vehicular Ad-Hoc Network (VANET)*

Die Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner unmittelbaren Umgebung lässt ein sich selbst organisierendes Ad-hoc-Netz entstehen, das zwar durch Infrastrukturelemente, etwa in Form sogenannter *Roadside Units (RSUs)*, ergänzt werden kann, zu dessen Steuerung und Betrieb jedoch grundsätzlich keine feste Infrastruktur benötigt wird. Da es sich somit um einen Spezialfall eines *Mobile Ad-Hoc Networks (MANET)* [6, 125, 129, 168] handelt, wird für diese Form eines Kommunikationsnetzes der Begriff *Vehicular Ad-Hoc Network (VANET)* verwendet [69, 89, 149, 183].

*IEEE 802.11 im 5,9 GHz Frequenzband*

In den letzten Jahren haben sich Wireless Local Area Networks (WLANs) nach dem Standard IEEE 802.11 als favorisierte Technologie für die Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umgebung herauskristallisiert [41, 81, 89]. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs, welche ohne Nutzung einer ortsfesten Kommunikationsinfrastruktur auskommen und auf einer Anwendung der IEEE 802.11 Funktechnologie im 5,9 GHz Frequenzband basieren [55, 76, 77].

## 1.1 MOTIVATION FÜR DIE VORLIEGENDE ARBEIT

Die drahtlose Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umwelt kann dem Fahrer in zukünftigen Fahrzeuggenerationen eine neue Dimension innovativer Dienste und Assistenzfunktionen eröffnen. Um diese Vernetzung mithilfe von VANETs realisieren zu können, müssen allerdings erhebliche technische Herausforderungen bewältigt werden.

*Herausfordernde Kommunikationsbedingungen*

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs ist mit überaus diffizilen Voraussetzungen für eine zuverlässige Datenübermittlung verbunden, auf deren Ursachen im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher eingegangen wird.<sup>2</sup> Hierzu zählen eine hochdynamische Netztopologie, ungünstige Funkausbreitungseigenschaften sowie eine Reihe von Einschränkungen, die aus der Broadcast-Natur sicherheitsrelevanter Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommuni-

<sup>1</sup>Im Englischen ist die Bezeichnung *Intelligent Transport Systems (ITS)* für diese Systeme gebräuchlich, daher wird der deutsche Begriff *intelligente Transportsysteme* im weiteren Verlauf dieser Arbeit synonym verwendet.

<sup>2</sup>Siehe diesbezüglich insbesondere Abschnitt 2.3.

kation auf Basis der IEEE 802.11 Funktechnologie resultieren. Eine hervorzuhebende Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem unvermeidbaren Auftreten von Multi-User-Interferenzen zwischen Übertragungen verschiedener Nutzer des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums zu. Multi-User-Interferenzen rufen Übertragungskollisionen hervor, welche die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung erheblich beeinträchtigen und daher einen limitierenden Faktor für die Performanz des VANETs darstellen können [111, 139, 147, 170].

*Interferenzen und Kollisionen*

Diesen anspruchsvollen und herausfordernden Bedingungen stehen aus Anwendungsperspektive hohe Anforderungen an die Dienstgüte des Netzes gegenüber. In besonderem Maße gilt dies für kooperative Sicherheitsanwendungen, die auf einem periodischen Austausch von Broadcast-Statusnachrichten zwischen benachbarten Fahrzeugen basieren. Um das große Potential dieser Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, aus dem ein wesentlicher Anreiz für die weltweit angestrebte Markteinführung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystemen resultiert, in vollem Umfang nutzen zu können, ist eine zuverlässige Nachrichtenübermittlung bei geringer Verzögerung über möglichst große Distanzen notwendig [40, 89, 146].

*Hohe Dienstgüteanforderungen*

Von elementarer Bedeutung für die Entwicklung effektiver und zuverlässiger kooperativer Sicherheitsanwendungen ist daher eine belastbare Bewertung der Leistungsfähigkeit des zugrunde liegenden Kommunikationsnetzes. Dieses grundlegende Erfordernis motiviert die in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Untersuchungen: Ihr Ziel ist eine umfassende, netzlastabhängige Bewertung der unter realitätsnahen Bedingungen erzielbaren Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs. Im Zentrum des Interesses steht dabei die Gewinnung von Erkenntnissen über die Auswirkungen der gegebenen Netzlast und des durch sie bestimmten Interferenzniveaus auf die Dienstgüte des Netzes.

*Netzlastabhängige Bewertung der Dienstgüte*

Hieraus lassen sich insbesondere direkte Rückschlüsse auf die *Skalierbarkeit* von VANETs ziehen, welche einen limitierenden Faktor für die Leistungsfähigkeit dieser Netze darstellen kann. Den Begriff der Skalierbarkeit definiert B. Clifford Neuman für verteilte Systeme in folgender Weise [116]: „A system is said to be scalable if it can handle the addition of users and resources without suffering a noticeable loss of performance or increase in administrative complexity.“ In Anlehnung an diese Definition ist ein VANET als skalierbar anzusehen, soweit es das Hinzufügen von Nutzern ohne Beeinträchtigung der Performanz erlaubt.

*Skalierbarkeit von VANETs*

Um die netzlastabhängige Dienstgüte und die Skalierbarkeit von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs umfassend beurteilen zu können, ist es erforderlich, eine Vielzahl unterschiedlicher Netzkonfigurationen unter realitätsnahen und reproduzierbaren Bedingungen zu bewerten. Der Natur des Untersuchungsgegenstands entsprechend sind dabei Szenarien mit einer sehr großen Anzahl von Stationen in die Untersuchung und Bewertung einzubeziehen.

Zu diesem Zweck herangezogene analytische Modelle müssen aufgrund der Komplexität der realen Prozesse in VANETs grundsätzlich von signifikant vereinfachenden Annahmen ausgehen. Feldtests hingegen bieten in die-

*Notwendigkeit von Simulationen*

sem Zusammenhang zwar grundsätzlich die Möglichkeit zur Ableitung und Validierung geeigneter Modelle, sie erlauben jedoch mit vertretbarem Aufwand keine umfassende Bewertung netzlastabhängiger Effekte und weisen außerdem Schwächen in Bezug auf die Reproduzierbarkeit ihrer Bedingungen auf. In methodischer Hinsicht stellt daher die Leistungs- und Dienstgütebewertung auf Basis von Simulationen ein unverzichtbares Werkzeug zur Erreichung der mit der vorliegenden Arbeit verfolgten Ziele dar.

*Entwicklung eines  
realitätsnahen  
Simulationsmodells*

Die Belastbarkeit der Ergebnisse, die auf diesem Wege gewonnen werden können, hängt jedoch maßgeblich von der Qualität des zugrunde liegenden Simulationsmodells ab. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Simulationsumgebung zur Leistungsbewertung von VANETs entwickelt, die auf einer Kopplung von Netzwerksimulation und mikroskopischer Verkehrsflusssimulation beruht, um eine realitätsnahe Modellierung sowohl des Kommunikationsnetzes als auch der Teilnehmermobilität zu gewährleisten. Mithilfe von Feldtests konnte außerdem ein empirisch validiertes Ausbreitungsmodell für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnscenarien abgeleitet werden, welches in die Simulationsumgebung integriert wurde. Im Ergebnis ist somit eine Bewertung der Leistungsfähigkeit und Dienstgüte anhand eines detailgetreuen und realitätsnahen Simulationsmodells möglich.

*Extensive  
Simulationsstudien*

Aufbauend auf dieser Basis stellt die vorliegende Arbeit die Ergebnisse einer umfassenden, auf extensive Simulationsstudien gestützten Leistungsbewertung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnscenarien vor. Neben einer grundlegenden Bewertung der netzlastabhängigen Performance steht dabei insbesondere eine quantitative Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Modellierungs- und Kommunikationsparameter auf die Dienstgüte des Netzes im Vordergrund. Besondere Aufmerksamkeit wird diesbezüglich der Frage gewidmet, ob und in welchem Maße sich eine Anpassung der untersuchten Kommunikationsparameter zur Überwindung von Skalierbarkeitsproblemen eignet und welche Parametrierungen hierzu zweckmäßig sind.

*Überlaststeuerung*

Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse dienen insbesondere der Entwicklung, Parametrierung und Optimierung effektiver Methoden und Verfahren zur Vermeidung und Bewältigung übermäßig hoher Netzlast sowie der damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Dienstgüte des Netzes. Der Entwurf von Algorithmen oder Mechanismen zur Überlaststeuerung ist hingegen nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

*Forschungsprojekt  
C3World*

Im Rahmen des Forschungsprojektes „C3World – Connected Cars in a Connected World“, das vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur gefördert wurde, arbeiteten in den Jahren 2007 bis 2012 Wissenschaftler der Leibniz Universität Hannover, der Technischen Universität Braunschweig und des Oldenburger Instituts für Informatik OFFIS in enger Kooperation mit der Konzernforschung der Volkswagen AG zusammen, um die Entwicklung leistungsfähiger Systeme zur Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umwelt voranzutreiben. Das Institut für Kommunikationstechnik der Leibniz Universität Hannover war dabei verantwortlich für die Untersuchung und Bewertung von Protokollen für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation auf Basis von IEEE 802.11. Die

Grundlagen für die in dieser Dissertation vorgestellten Ergebnisse wurden durch die Mitarbeit des Verfassers im C<sub>3</sub>World-Projekt und die wertvolle Zusammenarbeit mit den beteiligten Wissenschaftlern geschaffen.

## 1.2 AUFBAU DER ARBEIT

Das unmittelbar auf diese Einleitung folgende zweite Kapitel der Dissertation fasst zunächst die für ihren weiteren Verlauf relevanten *Grundlagen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation* zusammen. Dabei wird einführend auf die vielfältigen Anwendungen von VANETs eingegangen, bevor ihre technische Basis, zugehörige Protokollarchitekturen und deren Standardisierung erläutert werden, um ausgehend hiervon die wesentlichen Herausforderungen, die mit der Realisierung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs verbunden sind, ableiten zu können. Auf dieser Basis werden schließlich die konkrete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sowie die in ihrem Rahmen zu beantwortenden Fragestellungen herausgearbeitet und dargelegt.

*Grundlagen*

Im Anschluss gibt das dritte Kapitel einen Überblick über *verwandte Forschungsarbeiten*. Die Darstellung konzentriert sich dabei zum einen auf Simulationsstudien und analytische Modelle zur Leistungsbewertung periodischer Broadcasts in VANETs, zum anderen auf in der Literatur vorgestellte Ansätze zur Überlaststeuerung in diesen Netzen.

*Verwandte Arbeiten*

Das vierte Kapitel widmet sich der *Modellierung periodischer Broadcast-Kommunikation* in VANETs. Zu Beginn des Kapitels wird eine Messumgebung für Labor- und Feldtests vorgestellt, die der Gewinnung empirisch validierter Modelle für die simulationsgestützte Leistungsbewertung dient. Nach einer Zusammenfassung mithilfe dieser Messumgebung durchgeführter Labor- und Feldtests zur Bestimmung der Empfängerempfindlichkeit und ihrer Ergebnisse konzentriert sich das Kapitel auf die Modellierung des Funkkanals. Dabei wird im Detail auf die für die Zwecke dieser Arbeit durchgeführten Feldtests zu Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf Autobahnen eingegangen und aus ihren Ergebnissen das empirisch validierte Ausbreitungsmodell für Autobahnscenarien abgeleitet. Im Anschluss an die Einführung der im weiteren Verlauf der Untersuchungen verwendeten Metriken wird das vierte Kapitel abgeschlossen durch eine detaillierte Beschreibung der Simulationsumgebung zur Leistungsbewertung in VANETs, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, und des ihr zugrunde liegenden Simulationsmodells.

*Modellierung*

Den Gegenstand des fünften Kapitels bildet eine *simulationsgestützte Leistungsbewertung* periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs auf der Grundlage extensiver Simulationsstudien, welche auf dem in Kapitel 4 beschriebenen Modellierungs- und Simulationskonzept basieren. Nach einer Vorstellung des Simulationsszenarios werden zunächst grundlegende Skalierbarkeitseffekte untersucht, bevor der Fokus auf ausgewählte Modellierungsaspekte und ihre Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse gerichtet wird. Im Anschluss setzt sich das Kapitel mit verschiedenen Möglichkeiten zur Quantifizierung der Netzlast in VANETs auseinander und stellt hierzu in Betracht kommende Metriken gegenüber. Den Schwerpunkt des fünften Ka-

*Leistungsbewertung durch Simulation*

pitels bilden schließlich eine eingehende Untersuchung der netzlastabhängigen Auswirkungen verschiedener konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Performanz des Netzes sowie eine Bewertung ihres Potentials zur Bewältigung und Vermeidung von Skalierbarkeitsproblemen und Überlastsituationen.

Das sechste und letzte Kapitel schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung ihrer Ergebnisse und einem kurzen Ausblick ab.

## GRUNDLAGEN DER FAHRZEUG-ZU-FAHRZEUG-KOMMUNIKATION

---

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Grundlagen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs und dient zugleich als Einführung in den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit.

Abschnitt 2.1 beginnt mit einer kurzen Übersicht über Anwendungen zur Erhöhung von Sicherheit, Verkehrseffizienz und Fahrkomfort, deren Realisierung durch VANETs ermöglicht wird und daher die Motivation für die Entwicklung dieser Netze bildet. Dabei werden ausgewählte Anwendungsfälle (Use Cases) exemplarisch vorgestellt.

*Aufbau des Kapitels*

Aufgrund des hohen potentiellen Nutzens der vielfältigen Anwendungen widmen sich nicht nur verschiedene Forschungsgruppen und Entwicklungsabteilungen weltweit der Untersuchung von V2V- und V2I-Kommunikation, sondern internationale Standardisierungsgremien haben in den letzten Jahren die Spezifikation entsprechender Protokollarchitekturen weit vorangebracht. Auf die relevanten Aspekte dieser Protokollarchitekturen und der VANETs zugrunde liegenden Kommunikationstechnik geht Abschnitt 2.2 näher ein.

Die wesentlichen mit der Realisierung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation einhergehenden Herausforderungen skizziert Abschnitt 2.3, bevor Abschnitt 2.4 zum Abschluss dieses Kapitels die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Fragestellungen und die damit verbundene Zielsetzung zusammenfasst.

### 2.1 ANWENDUNGEN

Die Vernetzung von Fahrzeugen in VANETs erlaubt die Realisierung einer Vielzahl von Anwendungen, die sich in drei verschiedene Anwendungsklassen einteilen lassen [8, 24, 40, 89, 98, 149]:

*Anwendungsklassen*

1. Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
2. Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrseffizienz
3. Mehrwertdienste

Die Nutzung einer bestimmten Anwendung in einer speziellen Situation oder in einem speziellen Szenario wird als *Use Case* (Anwendungsfall) bezeichnet [40]. Die Implementierung einer Anwendung kann daher einen oder mehrere Use Cases abdecken. Obwohl die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit fokussieren, werden im Folgenden ausgewählte Use Cases aller drei Anwendungsklassen exemplarisch skizziert. Eine umfassendere Darstellung der Vielzahl von Use Cases kann z. B. den Quellen [40] oder [89] entnommen werden.

*Use Cases*

### 2.1.1 Verkehrssicherheit

Die Klasse der Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit umfasst sämtliche Use Cases, die eine Verhinderung von Verkehrsunfällen oder eine Milderung ihrer Auswirkungen bezwecken [89]. Der Informationsaustausch des Fahrzeugs mit seiner Umgebung mittels V2V- und V2I-Kommunikation dient in diesem Kontext der Realisierung kooperativer aktiver Sicherheitssysteme, die es ermöglichen, eine bevorstehende Gefahrensituation frühzeitig zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten, indem der Fahrer gewarnt oder in das Verhalten des Fahrzeugs eingegriffen wird. VANETs erlauben demnach eine räumliche und zeitliche Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts des Fahrers [169]. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden diese Anwendungen auch als *kooperative Sicherheitsanwendungen* bezeichnet. Exemplarisch seien folgende Use Cases genannt [8, 24, 40, 89]:

#### Cooperative Forward Collision Warning

*Cooperative Forward Collision Warning:* Dieser Use Case dient der Verhinderung von Fahrzeugkollisionen, insbesondere von Auffahrunfällen, durch die Erkennung kollisionsgefährdeter Fahrzeugtrajektorien. Zu diesem Zweck tauschen ausgerüstete Fahrzeuge kontinuierlich fahrzeugbezogene Statusinformationen wie ihre aktuelle Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und Beschleunigung miteinander aus und erlangen so Kenntnis über die Trajektorien der Fahrzeuge in ihrer Umgebung. Falls dabei eine kritische Annäherung erkannt wird, kann der Fahrer frühzeitig gewarnt und so eine Kollision vermieden werden.

#### Intersection Collision Warning

*Intersection Collision Warning:* Eine drohende Kollision zwischen Fahrzeugen, die sich aus unterschiedlichen Richtungen einer Kreuzung annähern, kann ebenfalls erkannt werden, indem die sich annähernden Fahrzeuge kontinuierlich ihre Positions- und Bewegungsdaten aussenden, sodass die Fahrer bei Kollisionsgefahr frühzeitig gewarnt werden können. Dieser Use Case weist insbesondere an unübersichtlichen Kreuzungen ein großes Potential zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf, da auch ohne bestehende Sichtverbindung Gefahrensituationen erkannt werden können. Eine Erhöhung der Kommunikationsreichweite ist hier durch Einbeziehung von Roadside Units in unmittelbarer Kreuzungsnähe realisierbar.

#### Hazardous Location Notification

*Hazardous Location Notification:* Dieser Use Case dient der Warnung vor lokalen Gefahrenstellen wie etwa einer glatten Fahrbahn. Erkennt ein Fahrzeug eine solche Gefahrenstelle, z. B. anhand der Aktivierung der elektronischen Fahrdynamikregelung (ESP), erzeugt es entsprechende Warnnachrichten und informiert auf diese Weise in der Nähe befindliche Fahrzeuge, deren Fahrer entsprechend gewarnt werden können.

#### Emergency Electronic Brake Lights

*Emergency Electronic Brake Lights:* Leitet ein vorausfahrendes Fahrzeug einen Notbremsvorgang im Sinne eines Bremsvorgangs mit außergewöhnlich hoher Verzögerung ein, kann das betroffene Fahrzeug entsprechende Warnnachrichten aussenden und so den nachfolgenden Verkehr informieren. Im Vergleich zu konventionellen Bremsleuchten ermöglicht dieser Use Case eine deutlich frühere Reaktion des Fahrers auf eine drohende Gefahrensituation, da eine Sichtverbindung nicht notwendig ist.

### 2.1.2 Verkehrseffizienz

Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrseffizienz bezwecken eine Optimierung des Verkehrsflusses durch eine verbesserte Koordination und Steuerung des Fahrzeugverkehrs [8, 40, 89, 144].

Ein typischer Use Case dieser Anwendungsklasse wird als *Green Light Optimal Speed Advisory* bezeichnet.<sup>1</sup> Nähert sich ein Fahrzeug einer mit einer Lichtsignalanlage ausgerüsteten Kreuzung, erhält es Nachrichten, die von einer mit der Lichtsignalanlage verbundenen Roadside Unit erzeugt werden und Informationen zu ihrer Position und zum Signalplan enthalten, darunter die verbleibende Zeit bis zum nächsten Signalwechsel. Aus diesen Daten kann das Fahrerassistenzsystem eine optimale Geschwindigkeit zum Erreichen der Kreuzung während der Freigabezeit (Grünphase) berechnen und diese dem Fahrer empfehlen, sodass unnötige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge vermieden und die Anzahl von Fahrzeughalten verringert werden können.

*Green Light  
Optimal Speed  
Advisory*

Der Use Case *Cooperative Adaptive Cruise Control* dient der Erweiterung konventioneller, auf Umfoldsensoren wie Radar und Lidar basierender Adaptive Cruise Control (ACC) Systeme und erlaubt eine genauere und zuverlässigere Längsregelung unter Berücksichtigung vorausfahrender Fahrzeuge, die zu diesem Zweck kontinuierlich Nachrichten mit ihren Positions- und Bewegungsdaten aussenden.

*Cooperative  
Adaptive Cruise  
Control*

Im Rahmen des Use Cases *Enhanced Route Guidance and Navigation* werden dem Fahrer aktuelle Verkehrsinformationen und Routenempfehlungen zur Verfügung gestellt. Die Gewinnung der Verkehrsinformationen kann sich dabei neben anderen Datenquellen auf dezentral innerhalb des VANETs erhobene Daten stützen.

*Enhanced Route  
Guidance and  
Navigation*

### 2.1.3 Mehrwertdienste

Die Anwendungsklasse der Mehrwertdienste fasst eine Vielzahl von Use Cases zusammen, die nicht unmittelbar der Steigerung der Straßenverkehrssicherheit oder -effizienz dienen. Als typische Beispiele können die Benachrichtigung über lokale Orte von Interesse (*Point of Interest Notification*), der Datenaustausch zu Zwecken des Flottenmanagements (*Fleet Management*), die auf drahtlose Kommunikation gestützte Fahrzeugdiagnose aus der Entfernung (*Remote Diagnosis*) und ganz allgemein die Bereitstellung eines mobilen Internetzugangs genannt werden [8, 40, 89].

## 2.2 KOMMUNIKATIONSTECHNIK UND STANDARDISIERUNG

Die auf V2V- und V2I-Kommunikation basierende drahtlose Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umgebung bildet die Grundlage zur Schaffung *kooperativer intelligenter Transportsysteme*, deren Entwicklung in den letzten Jahren

<sup>1</sup>Teilweise wird auch die gleichbedeutende Bezeichnung *Traffic Light Optimal Speed Advisory* verwendet.

Kooperative  
intelligente  
Transportsysteme

durch eine Vielzahl von Forschungsprojekten weltweit vorangetrieben worden ist und noch immer intensiv vorangetrieben wird. Die aus diesen Projekten gewonnenen Ergebnisse fließen in verschiedene Standardisierungsaktivitäten ein, die der Sicherstellung einer herstellerübergreifenden Interoperabilität der Systeme dienen. Hervorzuheben sind in diesem Kontext die unterschiedlichen Standardisierungsprozesse in Europa, den USA und Japan.

ETSI ITS

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die europäische Protokollarchitektur, deren Standardisierung vom Technischen Komitee für ITS des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnormen<sup>2</sup> (ETSI) in Zusammenarbeit mit weiteren Standardisierungsgremien verantwortet wird [61, 71]. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden daher relevante Aspekte der von ETSI spezifizierten Protokollarchitektur für kooperative ITS in Europa zusammengefasst [41].

Wireless Access in  
Vehicular Environ-  
ments (WAVE)

Gleichwohl sind wesentliche Teile der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse aufgrund weitreichender Gemeinsamkeiten zwischen europäischer und US-amerikanischer Standardisierung, welche insbesondere die MAC-Teilschicht und die Bitübertragungsschicht betreffen, auf die als *Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)* bezeichnete US-Protokollarchitektur übertragbar [81]. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst ein kurzer Überblick über WAVE gegeben.

Auf die Entwicklungs- und Standardisierungsaktivitäten auf dem Gebiet der V2V- und V2I-Kommunikation in Japan wird nicht weiter eingegangen, da sie keine direkte Bedeutung für die im Kontext dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben.

### 2.2.1 *Wireless Access in Vehicular Environments*

Unter dem Oberbegriff *Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)* wird eine US-amerikanische Protokollarchitektur für V2V- und V2I-Kommunikation zusammengefasst, die vom *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* in der Standardfamilie IEEE 1609 [81] und der Standarderweiterung IEEE 802.11p [77] spezifiziert wird.

Frequenzregulierung  
in den USA

Im Jahr 1999 hat die für die Frequenzregulierung in den USA zuständige *Federal Communications Commission (FCC)* ein 75 MHz breites Frequenzband zwischen 5,850 GHz und 5,925 GHz für die exklusive Nutzung durch die in diesem Zusammenhang als *Dedicated Short Range Communications (DSRC)* bezeichnete V2V- und V2I-Kommunikation freigegeben [59]. Während am unteren Rand des Frequenzbands ein Schutzabstand von 5 MHz vorgesehen ist, wird das übrige Frequenzband in sieben Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 10 MHz für die Nutzung durch sicherheitsrelevante und nicht-sicherheitsrelevante Applikationen unterteilt. Neben verschiedenen *Service Channels (SCHs)* ist ein *Control Channel (CCH)* zwischen 5,885 GHz und 5,895 GHz vorgesehen, der insbesondere der Übertragung von Signalisierungsdaten und sicherheitsrelevantem Datenverkehr hoher Priorität dient. Die WAVE-Protokollarchitektur ist auf die Nutzung dieses Frequenzbands ausgerichtet.

<sup>2</sup>European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

Die im Jahr 2010 veröffentlichte Standarderweiterung IEEE 802.11p [77], auf die in Abschnitt 2.2.5 gemeinsam mit dem europäischen Standard ITS-G5 näher eingegangen wird, spezifiziert Anpassungen der MAC-Teilschicht und der Bitübertragungsschicht des WLAN-Standards IEEE 802.11 an die besonderen Anforderungen von VANETs. Inzwischen wurden die in IEEE 802.11p enthaltenen Standarderweiterungen in die aktuelle, im Jahr 2012 veröffentlichte Revision des Standards mit der Bezeichnung IEEE 802.11-2012 aufgenommen [78]. Um die Besonderheiten der Anwendung von IEEE 802.11 WLANs für die V2V- und V2I-Kommunikation in VANETs hervorzuheben, wird allerdings ungeachtet dieser Tatsache Bezug auf den als IEEE 802.11-2007 bezeichneten Basisstandard von 2007 [76] und die Standarderweiterung IEEE 802.11p [77] genommen.

*IEEE 802.11p*

Höhere Schichten des WAVE-Protokollstacks werden durch die Standardfamilie IEEE 1609 spezifiziert. Einen Überblick über die WAVE-Protokollarchitektur enthält der Standard IEEE 1609.0 [81], während in IEEE 1609.2 Sicherheitsmechanismen wie Authentifizierung und Verschlüsselung erläutert werden [82]. IEEE 1609.3 beschreibt die Vermittlungsschicht (Network Layer) sowie die Transportschicht (Transport Layer) des OSI-Referenzmodells innerhalb des WAVE-Protokollstacks und definiert in diesem Rahmen das für eine einfache und effiziente Nachrichtenübermittlung in VANETs ausgelegte *WAVE Short Message Protocol (WSMP)* [79]. Der Standard IEEE 1609.4 stellt eine Erweiterung der MAC-Teilschicht dar und beinhaltet insbesondere Methoden zur Koordination des Mehrkanalbetriebs [80].

*IEEE 1609*

Um auch Stationen mit nur einer Transceiver-Einheit die parallele Nutzung von CCH und SCHs zu ermöglichen, definiert IEEE 1609.4 ein zeitlich koordiniertes Kanalwechselschema und Mechanismen für die dadurch notwendige Zeitsynchronisation. Dabei wird die Zeit in alternierende CCH- und SCH-Intervalle unterteilt. Einen mit einem Verlassen des CCHs verbundenen Wechsel auf einen der SCHs erlaubt IEEE 1609.4 nur für die Dauer des SCH-Intervalls. Während des CCH-Intervalls hingegen müssen sämtliche Stationen den als Rendezvous-Kanal dienenden CCH abhören, damit ihnen der Empfang von Signalisierungsdaten und sicherheitsrelevanten Nachrichten hoher Priorität möglich ist [80]. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zur europäischen Protokollarchitektur [55], wie in Abschnitt 2.2.5 näher ausgeführt wird.

*Koordiniertes  
Kanalwechselschema  
in WAVE*

Zur Gewährleistung einer herstellerübergreifenden Interoperabilität ist außerdem eine Standardisierung der Nachrichtenformate der verschiedenen auf IEEE 802.11p und IEEE 1609 basierenden V2V- und V2I-Applikationen notwendig. Die Verantwortung hierfür hat die *Society of Automotive Engineers (SAE)* übernommen [133].

### 2.2.2 Europäische ITS-Protokollarchitektur

Im Folgenden werden für die vorliegende Arbeit relevante Aspekte der europäischen ITS-Protokollarchitektur für V2V- und V2I-Kommunikation erläutert. Diese ist derzeit Gegenstand mit hoher Intensität verfolgter und noch

andauernder, jedoch bereits weit fortgeschrittener Standardisierungsaktivitäten.

Der vom CAR2CAR Communication Consortium [24] initiierte europäische Standardisierungsprozess wird in Zusammenarbeit mit weiteren Standardisierungsgremien von dem zu ETSI gehörenden Technischen Komitee für ITS (TC ITS) verantwortet und verwertet die Ergebnisse einer Vielzahl internationaler Forschungsprojekte [61, 71]. Wesentlich geprägt wurde die resultierende Protokollarchitektur dabei durch das Projekt COMeSafety, ein von der Europäischen Kommission gefördertes Kooperationsprojekt, in dessen Rahmen die Ergebnisse verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte aggregiert und in die Spezifikation einer Basis-Kommunikationsarchitektur für kooperative intelligente Transportsysteme in Europa aufgenommen wurden [8].

Abbildung 2 zeigt die Referenzarchitektur einer ITS-Station, wie sie durch den europäischen Standard ETSI EN 302 665 spezifiziert wird [41]. Die Architektur orientiert sich am *Open Systems Interconnection (OSI)* Referenzmodell der *International Organization for Standardization (ISO)* [84] und erweitert dieses um eine Einbeziehung der verschiedenen ITS-Applikationen (Applications), die exemplarisch bereits in Abschnitt 2.1 zusammengefasst wurden. Insgesamt umfasst die Referenzarchitektur vier horizontale Schichten und zwei Cross-Layer Funktionalitäten beinhaltende vertikale Schichten.

ITS-  
Referenzarchitektur

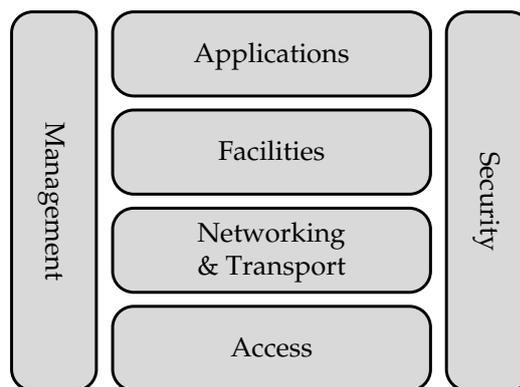


Abbildung 2: Referenzarchitektur einer ITS-Station [41].

Eine besondere Rolle innerhalb der ITS-Referenzarchitektur kommt dem *Facilities Layer* zu, welcher die Schichten 5 bis 7 des OSI-Modells repräsentiert. Trotz der großen Anzahl unterschiedlicher Anwendungsszenarien von V2V- und V2I-Kommunikation weisen viele Use Cases, insbesondere solche zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, sehr ähnliche Anforderungen im Hinblick auf die benötigten Funktionen, Dienste und Informationen auf. Dazu gehören etwa die Bereitstellung der Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung benachbarter Fahrzeuge sowie des eigenen Fahrzeugs und damit von Daten, die einerseits durch Auswertung empfangener Nachrichten sowie andererseits durch lokale Sensoren gewonnen werden. Der *Facilities Layer* übernimmt innerhalb der ITS-Architektur daher die Funktion einer Middleware, die den

*Facilities Layer*

verschiedenen Applikationen einen einheitlichen Zugriff auf die benötigten Funktionen, Dienste und Informationen ermöglicht [41, 98, 158].

Neben einer Vielzahl weiterer Funktionalitäten, deren detaillierte Beschreibung den entsprechenden Literaturquellen [40, 41, 56, 98] entnommen werden kann, bestehen wichtige Aufgaben des Facilities Layers darin, zum einen die im Rahmen kooperativer Anwendungen in VANETs ausgetauschten Nachrichten zu erzeugen und zur Übermittlung an die unteren Schichten zu übergeben, zum anderen die Nachrichten nach ihrem Empfang zu decodieren und die enthaltenen Nutzdaten zu verarbeiten [56]. Dabei sind zwei grundlegende Nachrichtentypen mit besonderer Bedeutung für kooperative Sicherheitsanwendungen zu unterscheiden:

- *Cooperative Awareness Message (CAM)*: CAMs sind Statusnachrichten, die *periodisch* von jedem entsprechend ausgerüsteten Fahrzeug generiert und gesendet werden und Informationen zum gegenwärtigen Status sowie zu verschiedenen Attributen des sendenden Fahrzeugs beinhalten. Dazu gehören z. B. die Position und der Bewegungszustand des Fahrzeugs. Der Facilities Layer übernimmt dabei nicht nur die Erzeugung der Nachrichten, sondern auch ihre Auswertung sowie die Verarbeitung und Bereitstellung der enthaltenen Daten für die verschiedenen ITS-Applikationen. Das Ziel des Austausches dieser Daten ist die Herstellung eines als *Cooperative Awareness* bezeichneten Zustands innerhalb des VANETs, in welchem jedes ausgerüstete Fahrzeug über den aktuellen Status der Fahrzeuge in seiner Umgebung informiert ist. Auf Cooperative Awareness wird in Abschnitt 2.2.3 näher eingegangen [54].
- *Decentralized Environmental Notification Message (DENM)*: DENMs sind Warn- oder Hinweismnachrichten, die Informationen zu einer erkannten Gefahrenstelle oder Anomalie des Straßen- bzw. Verkehrszustands beinhalten. Diese Informationen umfassen z. B. die Position und Art der erkannten Gefahrenstelle. Im Gegensatz zu CAMs wird die Erzeugung von DENMs durch bestimmte und vom jeweiligen Use Case abhängige Ereignisse ausgelöst (*event-driven*). Dabei ist die zugeordnete Applikation für die Erkennung des Ereignisses, wie etwa des Auftretens von Eisglätte oder Nebel, verantwortlich und veranlasst daraufhin die Erzeugung entsprechender DENMs durch den Facilities Layer. Die während der Dauer des Bestehens der Anomalie ggf. periodisch wiederholten Nachrichten werden in der Regel an die Fahrzeuge in einem bestimmtem geographischen Zielgebiet, für das die erkannte Anomalie relevant ist, weitergeleitet. Nach Empfang und Auswertung einer DENM durch den Facilities Layer werden die enthaltenen Daten der jeweiligen Applikation zur Verfügung gestellt, sodass dem Fahrer eine geeignete Warnung signalisiert werden kann [50].

Die Aufgabe des *Networking & Transport* Layers der ITS-Referenzarchitektur, der den Schichten 3 und 4 des OSI-Modells zuzuordnen ist, besteht im Ende-zu-Ende Transport der Daten von ihrer Quelle bis zu ihrer Senke und dem zu diesem Zweck notwendigen Routing und Forwarding der Datenpakete. Während für nicht sicherheitsrelevante Anwendungen auch die Nutzung

*Nachrichtentypen*

*Cooperative  
Awareness Message  
(CAM)*

*Decentralized  
Environmental  
Notification  
Message (DENM)*

*Networking &  
Transport Layer*

von Protokollen der Internetprotokollfamilie (insbesondere IPv6, TCP und UDP) vorgesehen ist, stützen sich kooperative Sicherheitsanwendungen auf ITS-spezifische Protokolle des Networking & Transport Layers.

*GeoNetworking*

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Kontext das von ETSI ITS standardisierte *GeoNetworking*-Protokoll, das auf die besonderen Anforderungen des Ad-hoc-Charakters von V2V- und V2I-Kommunikation in VANETs ausgerichtet ist. *GeoNetworking* ermöglicht die Multi-Hop Weiterleitung von Datenpaketen zwischen ITS-Stationen auf Basis geographischer Adressierung und geographischen Routings und unterstützt sowohl Point-to-Point als auch Point-to-Multipoint Vermittlung. Von besonderer Bedeutung, insbesondere für Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit wie z. B. Hazardous Location Notification, ist die Übermittlung von Paketen an sämtliche Stationen (*GeoBroadcast*) oder eine beliebige einzelne Station (*GeoAnycast*) in einem bestimmtem geographischen Gebiet. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Multi-Hop Weiterleitung von Paketen, sondern ausschließlich *Single-Hop-Broadcast (SHB)* (siehe Abschnitt 2.2.3) untersucht wird, sei für weitere Details an dieser Stelle auf die genannten Literaturquellen verwiesen [44, 45, 46, 48, 98].

*Access Layer*

Der *Access Layer* der ITS-Referenzarchitektur umfasst die Bitübertragungs- und Sicherungsschicht (Schicht 1 und 2) des OSI-Modells. Neben der Ad-hoc-Vernetzung auf Basis von IEEE 802.11 und ITS-G5 (siehe Abschnitte 2.2.4 bis 2.2.8) sieht die Referenzarchitektur zur Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umwelt ergänzend einen Rückgriff auf zellulare Mobilfunknetze (GSM/GPRS, UMTS) und sonstige zellulare Funktechnologien (IEEE 802.11 im Infrastruktur-Modus, IEEE 802.16/WiMAX) vor [41, 46, 55, 98, 158]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch ausschließlich Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs ohne Nutzung einer ortsfesten Kommunikationsinfrastruktur unter Verwendung von IEEE 802.11 bzw. ITS-G5 untersucht [55, 76, 77]. Auf diese Funkstandards, insbesondere auf Aspekte der Mediengriffsteuerung, wird daher in den Abschnitten 2.2.4 und 2.2.5 näher eingegangen.

*Security Layer*

ITS-Anwendungen weisen aufgrund ihrer Auswirkungen auf den Straßenverkehr besondere Anforderungen an die zu gewährleistende Informationssicherheit auf. Für die Erfüllung dieser Anforderungen ist der vertikal angeordnete *Security Layer* der ITS-Referenzarchitektur verantwortlich (siehe Abbildung 2). Der *Security Layer* dient der Sicherstellung des in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung notwendigen Grades an Vertraulichkeit (Confidentiality), Authentizität (Authenticity), Integrität (Integrity), Zurechenbarkeit (Accountability) und Verfügbarkeit (Availability) der V2V- und V2I-Kommunikation in VANETs [41, 43]. Wesentliche Teile des *Security Layers* stimmen mit dem Standard IEEE 1609.2 des WAVE-Protokollstacks überein (siehe Abschnitt 2.2.1) [47, 51, 82].

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussierten Cooperative Awareness Messages (CAMs) erfordern ebenso wie Decentralized Environmental Notification Messages (DENMs) die Authentifizierung und Autorisierung der sendenden Station sowie die Integrität der übermittelten Daten, nicht jedoch deren Vertraulichkeit, da diese an sämtliche Fahrzeuge in der Umgebung

zu verteilende Informationen betreffen. Zu diesem Zweck werden die Nachrichten von der sendenden Station signiert, wobei den Nachrichten neben der Signatur ein beglaubigtes Zertifikat hinzugefügt wird. Der dadurch verursachte Security-Overhead ist nicht zu vernachlässigen und kann für eine einzelne Nachricht mehrere hundert Bytes betragen [20, 51, 52, 60].

Der ebenfalls vertikal angeordnete *Management Layer* (siehe Abbildung 2) ist neben anderen Aufgaben insbesondere für die Konfiguration der ITS-Station und den Cross-Layer Austausch von Informationen zwischen den verschiedenen horizontalen Schichten innerhalb der ITS-Referenzarchitektur verantwortlich [41, 46].

*Management Layer*

Im Folgenden wird auf ausgewählte Aspekte der ITS-Referenzarchitektur mit besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit näher eingegangen.

### 2.2.3 *Cooperative Awareness durch periodische Broadcasts*

Der Begriff *Cooperative Awareness* bezeichnet einen durch kooperative ITS angestrebten Zustand, in dem die verschiedenen Verkehrsteilnehmer über die aktuelle Position, den gegenwärtigen Bewegungszustand sowie weitere Eigenschaften und Attribute der Verkehrsteilnehmer in ihrer Umgebung informiert sind. *Cooperative Awareness* bildet eine essenzielle Grundlage vieler kooperativer ITS-Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz des Straßenverkehrs (siehe Abschnitt 2.1) [54].

*Cooperative Awareness*

Der Herstellung von *Cooperative Awareness* in VANETs dient die regelmäßige Übermittlung von Statusnachrichten, welche innerhalb der europäischen ITS-Architektur als *Cooperative Awareness Messages (CAMs)* bezeichnet werden. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 kurz dargestellt wurde, werden CAMs von jedem entsprechend ausgerüsteten Fahrzeug periodisch erzeugt und an benachbarte Stationen übertragen.<sup>3</sup> Die mit einem Zeitstempel versehenen Nachrichten enthalten Daten zur gegenwärtigen Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und Beschleunigung des sendenden Fahrzeugs sowie darüber hinaus grundlegende Fahrzeugattribute und Sensorinformationen. Für die Erzeugung und Verarbeitung von CAMs ist der zum *Facilities Layer* der ITS-Referenzarchitektur (siehe Abschnitt 2.2.2) gehörende *Cooperative Awareness Basic Service* verantwortlich, dessen Implementierung für jede ITS-Station verbindlich vorgeschrieben ist [54, 56].

*Periodische Erzeugung von CAMs*

In periodischen Intervallen, deren Länge in Verbindung mit der durch sie bestimmten CAM-Erzeugungsrate unter Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik (z. B. Änderungen von Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung) festzulegen ist, beschafft der *Cooperative Awareness Basis Service* die zu übermittelnden Daten über verschiedene fahrzeuginterne Schnittstellen, erzeugt unter Verwendung dieser Nutzdaten die CAM und übergibt diese zur Übertragung an die darunterliegenden Schichten. Obgleich die ITS-Architek-

<sup>3</sup>Grundsätzlich beschränkt sich die Erzeugung von CAMs nicht auf Kraftfahrzeuge im Straßenverkehr (PKW, LKW, Motorräder), sondern schließt auch Infrastrukturelemente wie *Roadside Units* ein und kann durch die Verwendung geeigneter mobiler Endgeräte auch Fahrradfahrer und Fußgänger einbeziehen [54]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch nur die Erzeugung von CAMs durch Kraftfahrzeuge betrachtet.

tur vorsieht, dass für die Übermittlung der Nachrichten grundsätzlich auf unterschiedliche Lösungen innerhalb des Networking & Transport Layers und des Access Layers (siehe Abbildung 2) zurückgegriffen werden kann, stellt die Übertragung mithilfe der auf diesen Verwendungszweck ausgerichteten und im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten ITS-G5-Funktechnologie (siehe Abschnitte 2.2.4 bis 2.2.8) den Regelfall dar [46, 54, 56, 62].

*Single-Hop  
Broadcast*

Da die enthaltenen Statusdaten grundsätzlich für alle Fahrzeuge in der direkten Umgebung des Senders relevant sind, werden CAMs als *Single-Hop Broadcast* übermittelt, d. h. eine durch das GeoNetworking-Protokoll ermöglichte Multi-Hop-Weiterleitung der die CAMs beinhaltenden Pakete erfolgt nicht und die korrespondierenden ITS-G5-Frames werden mit der Broadcast-Empfängeradresse versehen, sodass ihre Inhalte von sämtlichen in Funkreichweite befindlichen Empfängern verarbeitet werden [54]. Abbildung 3 veranschaulicht das Aussenden einer CAM an Fahrzeuge in der Umgebung des Senders als Single-Hop Broadcast [54].

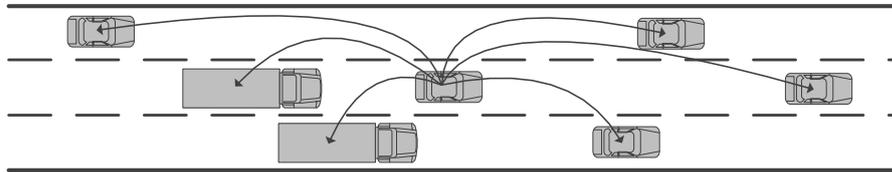


Abbildung 3: Aussenden einer Cooperative Awareness Message (CAM) als Single-Hop Broadcast.

Nach erfolgreichem Empfang einer CAM extrahiert der Cooperative Awareness Basis Service des Facilities Layers der empfangenden ITS-Station die enthaltenen Nutzdaten. Die dadurch gewonnenen Informationen über den Zustand des sendenden Fahrzeugs werden im Anschluss entweder direkt den jeweiligen Applikationen zur Verfügung gestellt oder einer als *Local Dynamic Map (LDM)* bezeichneten Datenbank zugeführt, die ebenfalls Bestandteil des Facilities Layers ist. Die LDM stellt dabei eine aggregierte Repräsentation der Fahrzeugumgebung bereit. Neben den aus empfangenen CAMs und DENMs gewonnenen dynamischen Positions- und Zustandsdaten benachbarter ITS-Stationen kann die LDM auch statische Daten digitaler Karten, allgemeine Verkehrsdaten wie z. B. Signalpläne von Lichtsignalanlagen oder aktuelle Verkehrsflussdaten und Kontextinformationen etwa zu Witterungsbedingungen beinhalten [54, 56].

*Local Dynamic Map*

Die vorhandenen Informationen können den verschiedenen ITS-Applikationen auf diese Weise in einheitlicher und aggregierter Form für eine weitere Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden. So wird ein Fahrzeug beispielsweise durch einen Vergleich seiner eigenen Trajektorie mit den Positions- und Bewegungsdaten benachbarter ITS-Stationen in die Lage versetzt, ein drohendes Kollisionsrisiko frühzeitig zu erkennen und den Fahrer in geeigneter Weise zu informieren, um einen Unfall zu verhindern [54].

*Frühzeitige  
Erkennung  
drohender  
Kollisionen*

Der durch den Facilities Layer gesteuerte Austausch von CAMs sowie der auf diese Weise erzeugte Zustand von Cooperative Awareness innerhalb des VANETs dient somit insbesondere der Erfüllung von Anforderungen

unterschiedlicher ITS-Anwendungen zur Erhöhung von Verkehrssicherheit und -effizienz. Darüber hinaus werden die durch die periodische CAM-Übermittlung gewonnenen Positions- und Bewegungsdaten benachbarter Stationen ebenfalls im Rahmen der GeoNetworking-Funktionalität des Networking & Transport Layers für die Multi-Hop Weiterleitung von Paketen verwendet [41, 48]. Hierauf wird an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen, da sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung der für CAMs charakteristischen Übertragung als Single-Hop Broadcast konzentriert.

#### 2.2.4 IEEE 802.11

Bei der Entwicklung von Protokollarchitekturen für V2V- und V2I-Kommunikation kommt der zugrunde liegenden Funktechnologie eine besondere Bedeutung zu. Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte europäische ITS-Referenzarchitektur (siehe Abbildung 2) betrifft dies die konkrete Ausgestaltung des Access Layers und damit der Bitübertragungs- und Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells.

Unbeschadet der Tatsache, dass die ITS-Referenzarchitektur ergänzend die Nutzung anderer Technologien wie z. B. zellulärer Mobilfunknetze vorsieht, hat sich in den letzten Jahren die von ETSI standardisierte Funktechnologie ITS-G5 als favorisierte Lösung herauskristallisiert, um mithilfe von VANETs kooperative Anwendungen zur Erhöhung von Sicherheit und Effizienz des Straßenverkehrs zu realisieren. ETSI ITS-G5 basiert auf dem IEEE-Standard 802.11 für Wireless Local Area Networks (WLANs) und ist eng an dessen Erweiterung IEEE 802.11p angelehnt [42, 55, 76, 77].

Wegen ihrer besonderen Relevanz für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen, die sich auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation unter Verwendung der ITS-G5-Funktechnologie konzentrieren, werden daher im weiteren Verlauf dieses Abschnitts zunächst der WLAN-Standard IEEE 802.11 und im darauffolgenden Abschnitt 2.2.5 die Besonderheiten von ETSI ITS-G5 und IEEE 802.11p zusammenfassend erläutert.

IEEE 802.11 spezifiziert die Bitübertragungsschicht (*Physical Layer*, kurz *PHY*), die für die Steuerung des Medienzugriffs (*Medium Access Control*, kurz *MAC*) verantwortliche MAC-Teilschicht sowie Protokolle und Dienste für das Management der MAC-Teilschicht (*MAC-Management*), z. B. zur Authentifizierung und Assoziierung von Stationen. Um höheren Schichten eine einheitliche Schnittstelle bereitstellen zu können, ist darüber hinaus vorgesehen, dass IEEE 802.11 in Verbindung mit einer dem IEEE-Standard 802.2 entsprechenden und oberhalb der MAC-Teilschicht angeordneten *LLC*-Teilschicht (*Logical Link Control*) verwendet wird [75, 76, 126].

Die erste Version des Standards IEEE 802.11 wurde bereits im Jahr 1997 veröffentlicht. Seitdem wurden dem Standard durch eine Vielzahl von Erweiterungen (Amendments) verschiedene Funktionalitäten und leistungsfähigere Übertragungstechnik zur Verwendung in unterschiedlichen Frequenzbändern hinzugefügt. Die im Jahr 2010 veröffentlichte Standarderweiterung IEEE 802.11p [77], auf die in Abschnitt 2.2.5 näher eingegangen wird, spezifiziert Anpassungen an die besonderen Anforderungen von VANETs. Diese

802.11 spezifiziert  
PHY, MAC und  
MAC-Management

wurden inzwischen in die aktuelle, im Jahr 2012 veröffentlichte Revision des Standards mit der Bezeichnung IEEE 802.11-2012 übernommen [78]. Ungeachtet dieser Tatsache wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings weiterhin Bezug auf den als IEEE 802.11-2007 bezeichneten Basisstandard von 2007 [76] und die Standarderweiterung IEEE 802.11p [77] genommen, um die Besonderheiten der Verwendung von IEEE 802.11 in VANETs hervorzuheben.<sup>4</sup>

#### 2.2.4.1 Übertragungstechnik

PHY-Evolution und  
Datenraten

In seiner ursprünglichen Version aus dem Jahr 1997 spezifizierte der Standard neben der MAC-Teilschicht lediglich drei unterschiedliche PHY-Varianten mit Brutto-Datenraten in Höhe von 1 Mbps sowie 2 Mbps und sah dabei neben einem in der Praxis bedeutungslosen Infrarot-Übertragungsverfahren zwei Frequenzspreizverfahren, *Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)* und *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, für den Betrieb im 2,4 GHz ISM-Frequenzband<sup>5</sup> vor. Die Erweiterung 802.11b erhöhte die mittels DSSS im 2,4 GHz Band erzielbare Datenrate bereits auf 11 Mbps [76].

Mit der Erweiterung 802.11a wurde das Modulationsverfahren *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* für die Verwendung im 5 GHz Frequenzband eingeführt und später durch 802.11g auch für das 2,4 GHz Band umgesetzt. 802.11a bildet die Basis der Übertragungstechnik von ITS-G5 und 802.11p und ist aus diesem Grund von besonderer Relevanz für die vorliegende Arbeit. Auf diese PHY-Variante wird daher in Abschnitt 2.2.5 erneut eingegangen. Während 802.11a und 802.11g die Realisierung einer maximalen Datenrate von 54 Mbps ermöglichen, konnte durch den Rückgriff auf *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* Antennentechnologie und weitere Maßnahmen mit der im Jahr 2009 fertiggestellten und inzwischen in die Standardrevision IEEE 802.11-2012 aufgenommenen Erweiterung 802.11n die theoretisch erzielbare Datenrate auf 600 Mbps erhöht werden [78].

#### 2.2.4.2 Netzarchitektur und MAC-Management

Komponenten der  
IEEE 802.11  
Netzarchitektur

Die Netzarchitektur von IEEE 802.11 beinhaltet im Wesentlichen folgende Komponenten, auf die an dieser Stelle kurz eingegangen werden soll: die *Station (STA)*, den *Access Point (AP)*, das *Basic Service Set (BSS)*, das *Extended Service Set (ESS)*, das *Distribution System (DS)* sowie verschiedene Dienste (*Services*) [76, 126].

Als *Station (STA)* wird im engeren Sinne ein standardkonformes Netzwerkinterface (Network Interface Controller) bzw. eine entsprechende Interfacekarte bezeichnet. Im weiteren Sinne umfasst der Begriff jedoch auch einen Host, der über ein IEEE 802.11 Netzwerkinterface verfügt.

Einen elementaren Bestandteil eines IEEE 802.11 WLANs bildet das *Basic Service Set (BSS)*, welches eine Gruppe untereinander kommunizierender Stationen beschreibt. Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Arten von Basic

<sup>4</sup>Die Bezeichnungen „der Standard 802.11“ und „der Basisstandard“ beziehen sich daher, soweit nicht anders gekennzeichnet, auf die Standardrevision IEEE 802.11-2007 [76].

<sup>5</sup>*Industrial, Scientific and Medical Band (ISM-Band)*.

Service Sets unterschieden, dem *Independent BSS (IBSS)* und dem *Infrastructure BSS*. Die einfachste Form einer 802.11 Netztopologie wird durch das IBSS repräsentiert, in welchem die zu demselben IBSS gehörenden Stationen direkt, d. h. ohne Nutzung einer Relaisstation, miteinander kommunizieren. Aufgrund der Ausbreitungsbedingungen ist es dabei allerdings möglich, dass sich nicht jede zu einem bestimmten IBSS gehörende Station innerhalb der Kommunikationsreichweite jeder anderen zu demselben IBSS gehörenden Station befindet. IBSS dienen der spontanen und zeitlich begrenzten Vernetzung, z. B. im Rahmen von Konferenzen oder Besprechungen [65, 76, 126].

*Independent Basic Service Set (IBSS)*

Obwohl der Standard den auf einem Zusammenschluss von Stationen in einem IBSS beruhenden Betrieb eines WLANs als *Ad-hoc-Netz* bezeichnet und in diesem Zusammenhang häufig der Begriff des IEEE 802.11 *Ad-hoc-Modus* verwendet wird, darf diese Form der Vernetzung nicht mit dem durch IEEE 802.11p und ITS-G5 spezifizierten Betriebsmodus für die Kommunikation in VANETs verwechselt werden, der grundlegende Unterschiede aufweist, auf die in Abschnitt 2.2.5 eingegangen wird.

Der auch *Infrastruktur-Modus* genannte Zusammenschluss der Stationen in einem Infrastructure BSS stellt die am weitesten verbreitete Form der Netzorganisation in 802.11 WLANs dar. Kennzeichnendes Merkmal eines Infrastructure BSS ist das Vorhandensein einer als *Access Point (AP)* bezeichneten Basisstation, welche die Funktion einer Relaisstation übernimmt. Im Infrastruktur-Modus erfolgt jegliche Form der Kommunikation über den AP. Auch zur Datenübermittlung von einer Station (der Quelle) zu einer anderen Station (der Senke) innerhalb desselben BSS sendet die Quelle den zu übermittelnden Frame zunächst an den AP, welcher den Frame daraufhin an die Senke weiterleitet.

*Infrastruktur-Modus mit Access Points (APs)*

Darüber hinaus kann das BSS durch einen AP mit einem *Distribution System (DS)* verbunden werden, das in herkömmlichen WLAN-Netzen üblicherweise als kabelgebundenes lokales Netz (z. B. IEEE 802.3 Ethernet) ausgeführt ist und zur Verbindung mehrerer APs und damit verschiedener BSS sowie zur Anbindung an andere Netze dient. Der Standard lässt die Art der Implementierung des DS jedoch offen und beschreibt lediglich die zur Verfügung zu stellende Funktionalität. Dabei kommt dem AP die Funktion einer Bridge zu: Für jeden Datenframe, den der AP aus dem BSS oder dem DS empfängt, überprüft dieser, ob der Frame an das BSS oder an das DS weiterzuleiten ist. Diese Form der Vernetzung mehrerer BSS über ein DS wird als *Extended Service Set (ESS)* bezeichnet [65, 76, 126].

*Distribution System (DS) und Extended Service Set (ESS)*

Für detaillierte Informationen zu den verschiedenen Diensten (Services), die von Stationen und APs zu erbringen sind, sei an dieser Stelle auf den Standard verwiesen [76].

Jedes BSS kann anhand der ihm zugeordneten *Basic Service Set Identification (BSSID)* eindeutig identifiziert werden, die das Format einer 48 bit langen MAC-Adresse aufweist. Während die BSSID im Infrastruktur-Modus der MAC-Adresse des APs entspricht, wird sie in einem IBSS von der das IBSS initiiierenden Station unter Verwendung eines zufallsbasierten Verfahrens festgelegt.

*BSSID und Adressfilterung*

Eine wichtige Rolle kommt der BSSID insbesondere bei der durch die MAC-Teilschicht jeder Station und jedes APs durchgeführten Adressfilterung zu, da IEEE 802.11 den parallelen Betrieb mehrerer BSS auf einem Kanal erlaubt. Aus diesem Grund wird in den MAC-Header der Frames neben der MAC-Adresse der Datenquelle (*Source Address*) und der MAC-Adresse der Datensenke (*Destination Address*) zusätzlich die BSSID des BSS eingefügt, zu dem die sendende bzw. empfangende Station gehört. Bei der Entscheidung, ob ein empfangener Frame ausgewertet oder verworfen werden soll, wertet die MAC-Teilschicht sowohl die Destination Address als auch die BSSID in den Adressfeldern des Headers aus. Für ein anderes BSS bestimmte Frames werden dabei ebenso verworfen wie an einen anderen Empfänger gerichtete Frames. Von besonderer Bedeutung ist die Einbeziehung der BSSID in die Adressfilterung für den Empfang von Multicast- und Broadcast-Frames, um den Empfänger nicht übermäßig mit der Verarbeitung irrelevanter Daten zu belasten [76, 126].

*Beacon-Frames*

Damit eine Station sich einem BSS anschließen kann, muss es ihr möglich sein, in Reichweite befindliche BSS aufzufinden. Eine wichtige Rolle spielen in diesem Zusammenhang die als *Beacons* bezeichneten Management-Frames, die periodisch innerhalb des BSS ausgesendet werden. Im Infrastruktur-Modus übernimmt diese Aufgabe der AP. In einem IBSS setzen die Stationen ein dezentrales, zufallsgesteuertes und wettbewerbsbasiertes Verfahren ein, um zu bestimmen, welche Station im nächsten Beacon-Intervall für das Aussenden des Beacon-Frames verantwortlich ist, sodass alle Stationen gleichmäßig mit dem damit einhergehenden Overhead belastet werden. Die Beacon-Frames enthalten eine Reihe für eine Assoziierung mit dem BSS notwendiger Informationen, darunter der bis zu acht Bytes lange *Service Set Identifier (SSID)*, welcher das ESS bzw. IBSS identifiziert. Darüber hinaus werden Beacon-Frames für Energiesparfunktionen im Rahmen des *Power Managements* genutzt und dienen der Zeitsynchronisation unter den zu einem BSS gehörenden Stationen, welche durch die *Timing Synchronization Function* zur Verfügung gestellt wird [76, 126].

*Scanning*

Um in Reichweite befindliche APs oder IBSS aufzufinden, verwenden IEEE 802.11 Stationen ein als *Scanning* bezeichnetes Verfahren, das aktiv oder passiv durchgeführt werden kann.

Beim aktiven Scanning wechselt die Station auf einen der zur Verfügung stehenden Kanäle und sendet einen als *Probe Request* bezeichneten Frame, in welchem optional, sofern nach einem bestimmten Netz gesucht werden soll, ein SSID spezifiziert werden kann. Im Infrastruktur-Modus antworten daraufhin diejenigen APs, die denselben Funkkanal und, falls im Probe-Request-Frame spezifiziert, denselben SSID verwenden, mit einem *Probe Response* genannten Frame, der sämtliche zur Assoziierung mit dem BSS notwendigen Informationen beinhaltet. In einem IBSS übernimmt diese Aufgabe diejenige Station, welche den letzten Beacon-Frame gesendet hat. Während des Verbleibs auf dem gewählten Funkkanal verarbeitet die den Scanning-Prozess durchführende Station, bevor sie entweder auf den nächsten Kanal wechselt oder das Scanning beendet, die aus sämtlichen empfangenen Probe-Response- und Beacon-Frames gewonnenen Informationen, um nach Abschluss des

Scannings eine Entscheidung über die Assoziierung mit einem der verfügbaren BSS treffen zu können.

Das Verfahren des passiven Scannings unterscheidet sich von dem des aktiven Scannings lediglich dahingehend, dass die Station während ihres Verbleibs auf dem gewählten Funkkanal nur passiv den Kanal nach Beacon- und Probe-Response-Frames abhört, aber keine eigenen Probe-Request-Frames sendet.

Nach Abschluss des Scanning-Verfahrens verfügt die Station über die notwendigen Informationen, um sich einem der verfügbaren BSS anschließen zu können. Bei dem als *Join* bezeichneten Vorgang übernimmt die Station zunächst eine Reihe von Parametern des gewählten BSS, darunter die BSSID, und synchronisiert ihre lokale Zeit mit der des BSS. Falls es sich bei dem gewählten BSS um ein Infrastructure BSS handelt, muss die Station daraufhin zunächst eine *Authentifizierung (Authentication)* und anschließend eine *Assoziierung (Association)* mit dem AP durchführen, bevor sie innerhalb des BSS Datenframes senden darf. Für IBSS ist die Authentifizierungsprozedur optional und eine Assoziierungsprozedur nicht vorgesehen [76, 126].

*Join, Authentication  
und Association*

Die Authentifizierungsprozedur besteht im einfachsten Fall, der offenen Authentifizierung (Open System Authentication), nur aus einem Zwei-Wege-Handshake, bei dem keinerlei Berechtigungsprüfung der Station und damit keine echte Authentifizierung stattfindet. Darüber hinaus sind verschiedene fortgeschrittenere Verfahren vorgesehen, die eine tatsächliche Authentifizierung der Station beinhalten. Details können den Standards IEEE 802.11-2007 [76] oder IEEE 802.11-2012 [78], dort insbesondere Abschnitt 8 bzw. Abschnitt 11, entnommen werden.

Die Assoziierungsprozedur besteht ebenfalls aus einem Zwei-Wege-Handshake. Zu diesem Zweck sendet die Station zunächst einen als *Association Request* bezeichneten Frame an den AP. Der Frame enthält verschiedene die Fähigkeiten der Station betreffende Informationen, wie beispielsweise unterstützte Datenraten, auf deren Grundlage der AP eine Entscheidung darüber trifft, ob eine Assoziierung gewährt werden kann. Mit einem *Association Response* genannten Frame informiert der AP schließlich die Station über Erfolg oder Scheitern der Assoziierung [65, 76, 126].

Als Ergebnis der durch den Standard vorgesehenen Authentifizierungs- und Assoziierungsprozedur können drei Zustände einer Station unterschieden werden, wie Abbildung 4 veranschaulicht. Ausgehend von dem vor einer Authentifizierung oder Assoziierung vorliegenden Zustand 1 kann die Station durch eine erfolgreiche Authentifizierung mit einem BSS in Zustand 2 und durch eine erfolgreiche Assoziierung in Zustand 3 übergehen. Der Zustand der Station beschränkt die Art der Frames, welche die Station innerhalb des BSS senden darf: So sind in Zustand 1 nur Frames der Klasse 1 zugelassen, die beispielsweise Probe-Request-Frames und die für den Übergang in Zustand 2 notwendigen Authentication-Frames umfasst.<sup>6</sup> Ebenfalls zur Klasse 1 gehören in einem IBSS gesendete Datenframes, da die Authentifizierungsprozedur hier optional und eine Assoziierungsprozedur nicht vorgesehen ist.

*Authentifizierungs-  
und Assoziierungs-  
zustand der  
Station*

<sup>6</sup>Details zu den im jeweiligen Zustand zugelassenen Frametypen können Abschnitt 11.3 des Standards 802.11-2007 entnommen werden [76].

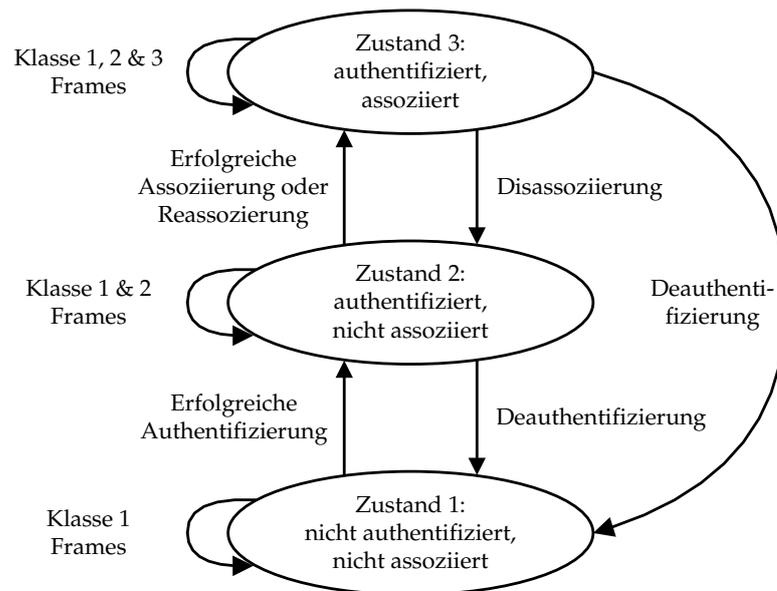


Abbildung 4: Assoziierung, Authentifizierung und korrespondierende Zustände einer IEEE 802.11 Station [76].

Association-Request-Frames hingegen gehören der Klasse 2 an und dürfen somit erst in Zustand 2 gesendet werden, während Datenframes im Infrastrukturmodus der Klasse 3 zugeordnet werden und somit ausschließlich in Zustand 3 nach erfolgreicher Assoziierung mit dem BSS zugelassen sind. Dabei sieht der Standard zwar vor, dass eine Station mit mehreren BSS gleichzeitig authentifiziert (Zustand 2) sein kann, eine Assoziierung (Zustand 3) ist jedoch stets nur mit einem BSS zur gleichen Zeit möglich [65, 76, 126].

#### 2.2.4.3 Medienzugriffssteuerung

##### Herausforderungen

Im Vergleich zu kabelgebundenen Netzen bringt die drahtlose Kommunikation sowohl in herkömmlichen WLANs als auch insbesondere in VANETs eine Reihe von Herausforderungen mit sich, welche durch die sich grundlegend unterscheidenden Eigenschaften des verwendeten Übertragungsmediums bedingt sind. So sind drahtlose Kommunikationsnetze deutlich ungünstigeren und im Zeitverlauf variierenden Ausbreitungsbedingungen ausgesetzt (vgl. Abschnitt 4.3). Die damit verbundene geringere Reichweite und Zuverlässigkeit geht einher mit einer wegen der Mobilität der Stationen dynamischen Netztopologie und einer unvollständigen Konnektivität des Netzes [76].

##### Interferenzen und Kollisionen

Gleichzeitig führt die nicht klar begrenzte Ausbreitung des Funksignals zu *Interferenzen* mit anderen Nutzern des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums (*Multi-User-Interferenzen*). Übersteigen die Interferenzen während der Übertragung eines Frames ein tolerierbares Niveau, kann der Empfänger den Frame nicht fehlerfrei decodieren - es kommt zu einer *Kollision*. Durch Frameverluste infolge von Kollisionen wird die Zuverlässigkeit des Netzes weiter herabgesetzt.

IEEE 802.11 begegnet diesen Herausforderungen mit der *Distributed Coordination Function (DCF)*, die den Kern der MAC-Teilschicht bildet.<sup>7</sup> Die DCF stellt eine dezentral organisierte, wettbewerbsbasierte Steuerung des Medienzugriffs auf der Grundlage eines als *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)* bezeichneten Zugriffsverfahrens zur Verfügung, das in ähnlicher Form bereits deutlich früher in kabelgebundenen AppleTalk-Netzwerken eingesetzt wurde [150]. Viele Prinzipien der DCF sind an das durch IEEE 802.3 Ethernet verwendete Medienzugriffsverfahren *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)* angelehnt. Insbesondere sieht auch CSMA/CA vor, dass eine Station vor dem Senden den Belegungsstatus des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums prüft und mit der Übertragung nur dann beginnt, wenn das Medium nicht als belegt erkannt wurde [94]. Die Besonderheiten des drahtlosen Übertragungsmediums lassen jedoch eine direkte Übertragung von CSMA/CD auf IEEE 802.11 nicht zu.

*Distributed  
Coordination  
Function (DCF)*

So erlaubt CSMA/CD im kabelgebundenen Ethernet die Erkennung von Kollisionen, indem die Stationen während ihrer eigenen Übertragung gleichzeitig das über das gemeinsam genutzte Übertragungsmedium empfangene Signal überwachen und mit dem gesendeten Signal vergleichen. Aufgrund der deutlich höheren Dämpfung lässt sich ein gleichzeitiges Senden und Empfangen in drahtlosen Netzen jedoch nur durch komplexe und teure Transceiver realisieren. Darüber hinaus führen die Ausbreitungsbedingungen des drahtlosen Mediums dazu, dass weder eine Kollision an der sendenden Station zwangsläufig eine Kollision an der empfangenden Station impliziert noch umgekehrt. Eine sendende Station könnte daher durch lokale Überwachung des Übertragungsmediums ohnehin nicht zuverlässig erkennen, ob eine Kollision an der empfangenden Station stattgefunden hat. Die Kollisionserkennung von CSMA/CD wurde daher nicht in die DCF aufgenommen.

Motiviert durch die fehlende Kollisionserkennung und die aufgrund der Ausbreitungsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.3) ohnehin deutlich geringere Zuverlässigkeit der drahtlosen Datenübertragung sieht die DCF vor, dass sämtliche an eine individuelle Zieladresse gerichteten Frames, sogenannte *Unicast-Frames*, vom Empfänger unmittelbar bestätigt werden. Zu diesem Zweck verwendet der Empfänger eines fehlerfrei decodierten Frames eine positive Bestätigung in Form eines an den Sender gerichteten *Acknowledgment-Frames (ACK-Frames)*. Bleibt eine Bestätigung aus, wird die Übertragung vom Sender wiederholt. War die Übertragung auch nach einer bestimmten Anzahl wiederholter Übertragungsversuche nicht erfolgreich, wird der Frame verworfen [65, 76, 126].

*Bestätigung von  
Unicast-Frames  
durch ACK-Frames*

In Ermangelung einer individuellen Zieladresse ist eine Bestätigung von *Multicast- und Broadcast-Frames* und die damit einhergehende Übertragungswiederholung im Fehlerfall allgemein nicht möglich. Eine Ausnahme bilden hier lediglich an einen AP gesendete Frames im Infrastrukturmodus, die wie-

---

<sup>7</sup>Darüber hinaus definiert IEEE ein als *Point Coordination Function (PCF)* bezeichnetes Verfahren, das eine zentrale Koordination des Medienzugriffs mit wettbewerbsfreien Phasen vorsieht [76]. Hierauf wird nicht näher eingegangen, da die PCF keinerlei Bedeutung für die vorliegende Arbeit aufweist.

derum nach erfolgreichem Empfang vom AP bestätigt werden und bei Ausbleiben einer Bestätigung vom Sender wiederholt werden können [76].

Fragmentierung von  
Unicast-Frames

Einer Erhöhung der Erfolgswahrscheinlichkeit bei der Übertragung längerer Frames dient die durch IEEE 802.11 zur Verfügung gestellte Möglichkeit der *Fragmentierung*. Diese sieht vor, dass die MAC-Teilschicht Frames, deren Länge einen konfigurierbaren Schwellenwert überschreitet, in Fragmente aufteilt, die anschließend separat übertragen und bestätigt werden. Auch diese Funktionalität steht allerdings allgemein nur für Unicast-Frames, mit Ausnahme von an einen AP gerichteten Übertragungen jedoch nicht für Multicast- und Broadcast-Frames zur Verfügung [76].

Physikalischer und  
virtueller Carrier-  
Sense-Mechanismus

Um die Zuverlässigkeit der Erkennung laufender Übertragungen zu steigern, verwendet CSMA/CA sowohl *physikalisches* als auch *virtuelles Carrier Sensing*. Dabei erachtet die MAC-Teilschicht das Übertragungsmedium nur dann als frei, wenn dessen Zustand durch beide Mechanismen als frei erkannt wird. Meldet einer der beiden Mechanismen ein belegtes Medium, muss die Station von einem Medienzugriff absehen.

Im Rahmen des physikalischen Carrier Sensings prüft die Bitübertragungsschicht das Übertragungsmedium auf empfangene Signale und trifft üblicherweise in Abhängigkeit der empfangenen Leistung anhand eines *Carrier-Sense-Schwellenwerts* eine Entscheidung darüber, ob der MAC-Teilschicht ein freies (idle) oder belegtes (busy) Übertragungsmedium gemeldet wird.

Der virtuelle Carrier-Sense-Mechanismus hingegen wird von der MAC-Teilschicht selbstständig ausgeführt und basiert auf dem von jeder Station vorgehaltenen *Network Allocation Vector (NAV)*. Dem NAV kommt die Funktion eines Timers zu, welcher der Station die verbleibende Belegungsdauer des Übertragungsmediums anzeigt. Dabei wird die gesamte gegenwärtig übertragene Framesequenz inkl. ausstehender ACK-Frames berücksichtigt. Zu diesem Zweck nutzt die DCF das im MAC-Header der IEEE 802.11 Frames enthaltene *Duration-Feld*, mit dessen Hilfe die sendende Station die Belegungsdauer angibt, sodass sämtliche Stationen in Reichweite des Senders eine Aktualisierung ihrer lokalen NAV-Instanz durchführen können [65, 76, 126].

RTS/CTS-Verfahren

Die Verwendung des virtuellen Carrier Sensings dient insbesondere dazu, dem Auftreten sogenannter *Hidden Stations*, die sich nicht in Carrier-Sense-Reichweite des Senders befinden, entgegenzuwirken. Um vor Beginn einer Datenübertragung eine Aktualisierung des NAV sowohl für Stationen in Reichweite des Senders als auch für solche in Reichweite des Empfängers zu bewirken, sieht die DCF ein optionales Handshake-Verfahren vor. Dieses beinhaltet die Übertragung eines als *Request to Send (RTS)* bezeichneten Steuerframes, der vom Empfänger mit einem *Clear to Send (CTS)* genannten Steuerframe beantwortet wird [13, 76, 91, 150]. Auf Hidden Stations und das RTS/CTS-Verfahren wird in Abschnitt 2.2.4.4 näher eingegangen.

Interframe Space  
(IFS)

Eine wichtige Rolle bei der Koordinierung des Medienzugriffs im Rahmen des CSMA/CA-Verfahrens spielen die als *Interframe Space (IFS)* bezeichneten Zeitintervalle, welche den mindestens einzuhaltenden zeitlichen Abstand zwischen zwei Frameübertragungen spezifizieren. Bevor eine Station den Regeln von CSMA/CA entsprechend mit der Übertragung eines Frames beginnen darf, muss sie für die Dauer eines Interframe Spaces sowohl auf Grundla-

ge des physikalischen als auch des virtuellen Carrier-Sense-Mechanismus ohne Unterbrechung ein freies Übertragungsmedium erkannt haben. Der Priorisierung verschiedener Frametypen dienen dabei Interframe Spaces verschiedener Länge, die unter anderem durch die vom verwendeten PHY abhängige Dauer  $T_{slot}$  eines IEEE 802.11 Zeitschlitzes bestimmt wird [76, 126]:

- *Short Interframe Space (SIFS)*: Der SIFS stellt den kürzesten IFS dar und ist daher mit der höchsten Priorität des Medienzugriffs verbunden. Er wird für die Übertragung von ACK- und CTS-Frames sowie im Falle einer fragmentierten Frameübertragung für dem ersten Fragment folgende Fragmente verwendet, um eine bestehende Belegung des Mediums zu erhalten.
- *PCF Interframe Space (PIFS)*: Der PIFS ist um die Dauer eines Zeitschlitzes  $T_{slot}$  länger als der SIFS, aber kürzer als die übrigen IFS-Typen. Er wird zur Priorisierung im Rahmen wettbewerbsfreier Phasen bei zentraler Koordination des Medienzugriffs (PCF), im Zusammenhang mit der Ankündigung eines Kanalwechsels und für verschiedene Zwecke im Kontext der Standarderweiterung IEEE 802.11n verwendet.
- *DCF Interframe Space (DIFS)*: Die Dauer eines DIFS übersteigt die eines SIFS um den zweifachen Wert von  $T_{slot}$ . Der DIFS wird für die Übertragung von Daten- und Management-Frames im wettbewerbsbasierten Medienzugriff der DCF verwendet.
- *Arbitration Interframe Space (AIFS)*: Der AIFS tritt bei Verwendung des mit der Standarderweiterung IEEE 802.11e eingeführten *Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)* an Stelle des DIFS und wird für die unterschiedliche Priorisierung von Frames verschiedener Prioritätsklassen verwendet. Die Dauer eines AIFS hängt von der jeweiligen Prioritätsklasse ab, entspricht aber mindestens der eines DIFS.
- *Extended Interframe Space (EIFS)*: Der EIFS wird als längster IFS vor jeder Übertragung verwendet, die im direkten Anschluss an einen fehlerhaften Frameempfang erfolgt. Die Länge des EIFS übersteigt die eines DIFS um einen SIFS und die Übertragungsdauer eines mit der niedrigsten vorgesehenen Datenrate übertragenen ACK-Frames, um eine Kollision mit einem möglicherweise auf den fehlerhaft empfangenen Frame folgenden ACK-Frame einer anderen Station zu verhindern.

Den Kern des CSMA/CA-Verfahrens bildet gemeinsam mit dem Carrier-Sense-Mechanismus die als *Binary Exponential Backoff (BEB)* bezeichnete Backoff-Prozedur. Diese dient dazu, die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Übertragungsbeginns mehrerer Stationen und damit die Kollisionswahrscheinlichkeit zu reduzieren, indem jede Station eine zufällig gewählte Zeitdauer ermittelt, während derer sie trotz eines als frei erkannten Übertragungsmediums vom Zugriff auf das Medium absieht.

Erkennt die Station vor dem Beginn ihrer Übertragung anhand des (physikalischen und virtuellen) Carrier-Sense-Mechanismus für die Dauer des zugehörigen IFS (DIFS, AIFS oder EIFS) ohne Unterbrechung ein freies Übertragungsmedium und hat sie die Backoff-Prozedur noch nicht begonnen, d. h.

*Binary Exponential  
Backoff (BEB)*

ihr Backoff-Timer hat den Wert Null, so kann sie der IEEE 802.11 Standardspezifikation entsprechend unmittelbar im Anschluss an den IFS mit der Übertragung des Frames beginnen [76, 126].

*Contention Window  
und Backoff-Timer*

Meldet der Carrier-Sense-Mechanismus jedoch zu Beginn des Zugriffsverfahrens ein bereits belegtes Übertragungsmedium, so sieht das CSMA/CA-Verfahren vor, dass die MAC-Teilschicht die Backoff-Prozedur beginnt. Zu diesem Zweck ermittelt die Station zunächst auf Grundlage einer diskreten Gleichverteilung eine ganzzahlige Zufallszahl aus der Menge  $\{0, 1, \dots, CW\}$ , wobei  $CW$  als *Contention Window* bezeichnet wird. Die so ermittelte Zufallszahl bildet den Startwert des *Backoff-Timers*, der die verbleibende Backoff-Zeit in Einheiten der Dauer eines Zeitschlitzes  $T_{slot}$  misst [76].

Die Grenzen des Contention Windows  $CW$  werden durch die Parameter  $CW_{min}$  und  $CW_{max}$  bestimmt, die von dem zugrunde liegenden PHY und bei Verwendung von EDCA außerdem von der Prioritätsklasse des Frames abhängen. Der Wert des Contention Windows wird dabei zunächst mit  $CW = CW_{min}$  initialisiert. Erkennt die Station anhand einer ausbleibenden Bestätigung einen fehlgeschlagenen Übertragungsversuch, wird das Contention Window exponentiell nach der Formel

$$CW = \min \left( CW_{max}, (CW_{min} + 1) \cdot 2^i - 1 \right) \quad (2.1)$$

vergrößert, bis  $CW = CW_{max}$  gilt. Dabei bezeichnet  $i$  die Anzahl aufeinanderfolgend fehlgeschlagener Übertragungsversuche. Das Contention Window wird auf den Wert  $CW_{min}$  zurückgesetzt, sobald die Übertragung des Frames erfolgreich war, angezeigt durch den Empfang einer Bestätigung, oder der Frame nach Erreichen der maximalen Anzahl von Übertragungsversuchen verworfen wurde [76].

Die Vergrößerung des Contention Windows nach dem BEB-Algorithmus, der einer Reduzierung der Kollisionswahrscheinlichkeit im Falle einer hohen Auslastung des Netzes dient, kann jedoch nur bei der Übertragung von Frames erfolgen, die vom Empfänger bestätigt werden. Für die Übertragung von Multicast- und Broadcast-Frames, deren Fehlschlagen vom Sender in Ermangelung einer Bestätigung nicht erkannt werden kann, gilt daher stets  $CW = CW_{min}$ .

*Dekrementieren des  
Backoff-Timers und  
Übertragungsbeginn*

Sobald für die Dauer des für die Übertragung relevanten IFS (DIFS, AIFS oder EIFS) kontinuierlich ein freies Übertragungsmedium erkannt wurde, beginnt die Station nach den Regeln des CSMA/CA-Verfahrens, den Backoff-Timer herunterzuzählen. Für jeden Zeitschlitz der Dauer  $T_{slot}$ , währenddessen der Carrier-Sense-Mechanismus kontinuierlich ein freies Medium erkennt, wird in der Folge der Backoff-Timer um eine Einheit dekrementiert. Sobald das Medium als belegt erkannt wird, unterbricht die Station das Herunterzählen des Timers und fährt damit erst fort, wenn erneut für die Dauer eines DIFS, AIFS bzw. EIFS kontinuierlich ein freies Übertragungsmedium detektiert wurde. Erreicht der Backoff-Timer den Wert Null, beginnt die Station mit der Übertragung ihres Frames. Abbildung 5 veranschaulicht den Medienzugriff nach den Regeln des CSMA/CA-Verfahrens [76, 126].

*CSMA-Kollisionen*

Trotz der zufallsgesteuerten Backoff-Prozedur des CSMA/CA-Verfahrens kann eine Kollision entstehen, wenn mehrere Stationen denselben Zeitschlitz

für einen Übertragungsbeginn wählen. Eine solche Kollision wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit als *CSMA-Kollision* bezeichnet.

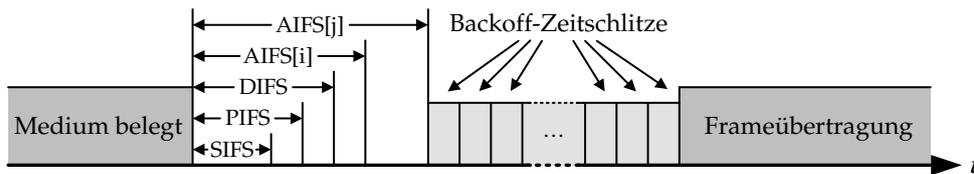


Abbildung 5: Medienzugriff nach dem CSMA/CA-Verfahren von IEEE 802.11. AIFS[i] und AIFS[j] bezeichnen die AIFS unterschiedlicher Prioritätsklassen  $i$  und  $j$ . Beispielhaft ist die Übertragung eines Frames der niedriger priorisierten Klasse  $j$  gezeigt [76].

Der Standard IEEE 802.11 schreibt im Anschluss an jede erfolgreiche Übertragung eines Frames ebenfalls die Durchführung der oben beschriebenen Backoff-Prozedur vor, welche in diesem Zusammenhang üblicherweise als *Post-Backoff* bezeichnet wird. Im Unicast-Fall beginnt diese Backoff-Prozedur nach dem Empfang einer Bestätigung, im Multicast- oder Broadcast-Fall beginnt sie direkt nach dem Ende der Frameübertragung, da eine Bestätigung nicht vorgesehen ist. Auch im Anschluss an eine fehlgeschlagene Übertragung, angezeigt durch das Ausbleiben eines ACK-Frames, muss die MAC-Teilschicht die Backoff-Prozedur beginnend mit dem Ablauf des entsprechenden Timers erneut absolvieren [76].

*Post-Backoff*

Durch die Standarderweiterung IEEE 802.11e aus dem Jahr 2005 wurde der WLAN-Standard mit *Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)* um eine weiterentwickelte Variante der DCF ergänzt. EDCA dient der Bereitstellung einer differenzierten Dienstgüte oder *Quality of Service (QoS)* und definiert zu diesem Zweck vier verschiedene als *Access Categories (ACs)* bezeichnete Prioritätsklassen. Diesen Prioritätsklassen werden für eine Übertragung vorgesehene Frames in Abhängigkeit ihrer QoS-Anforderungen zugeordnet [76].<sup>8</sup>

*Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)*

Dabei wird eine unterschiedliche Priorisierung der verschiedenen ACs zugeordneten Frames erreicht, indem jeder AC individuelle EDCA-Parameter zugewiesen werden, welche die Länge eines AIFS sowie die Grenzen des Contention Windows  $CW_{min}$  und  $CW_{max}$  umfassen. Darüber hinaus erlaubt EDCA den Stationen im Rahmen einer *Transmission Opportunity (TXOP)* die aufeinanderfolgende Übertragung mehrerer Frames in einem Burst, dessen Länge durch einen weiteren EDCA-Parameter mit der Bezeichnung *TXOP Limit* begrenzt wird. Je niedriger AIFS,  $CW_{min}$  sowie  $CW_{max}$  und je höher der Parameter TXOP Limit gewählt werden, desto höher ist die resultierende Priorität der Frames [76].

Für die vier ACs hält die MAC-Teilschicht vier separate Warteschlangen bereit, die als voneinander unabhängige Instanzen auf Grundlage ihrer individuellen EDCA-Parameter im CSMA/CA-Verfahren um den Medienzugriff konkurrieren. Dabei kann es zu internen Kollisionen zwischen den Frames

<sup>8</sup>Darüber hinaus wurde durch IEEE 802.11e ein weiteres, als *HCF Controlled Channel Access (HCCA)* bezeichnetes Verfahren eingeführt, das in Anlehnung an die PCF eine zentrale Koordination des Medienzugriffs vorsieht [76]. Da HCCA keinerlei Bedeutung für die vorliegende Arbeit aufweist, wird hierauf nicht näher eingegangen.

verschiedener ACs kommen, die zugunsten des Frames der höher priorisierten AC aufgelöst werden [76].

#### 2.2.4.4 Hidden und Exposed Stations

Im vorangegangenen Abschnitt 2.2.4.3 wurde bereits erläutert, dass trotz der zufallsgesteuerten Backoff-Prozedur des CSMA/CA-Verfahrens die Entstehung von Kollisionen möglich ist, wenn mehrere Stationen denselben Zeitschlitz für einen Übertragungsbeginn wählen. Eine weitere wichtige Kollisionsursache ergibt sich durch das sogenannte *Hidden-Station-Problem*, welches im Folgenden erläutert wird [167].

*Hidden-Station-  
Problem*

Abbildung 6 veranschaulicht eine beispielhafte Hidden-Station-Situation: Station A befindet sich außerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  von Station C und umgekehrt, sodass aufgrund einer zu geringen Leistung des empfangenen Signals keine der beiden Stationen in der Lage ist, anhand des physikalischen Carrier-Sense-Mechanismus eine laufende Übertragung der anderen Station zu erkennen. In diesem Fall ist Station A eine Hidden Station aus Perspektive von Station C, ebenso ist Station C eine Hidden Station aus Perspektive von Station A. Dabei geht das Beispiel vereinfachend davon aus, dass die Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  der Kommunikationsreichweite der Stationen entspricht. Demnach wäre im interferenzfreien Fall eine erfolgreiche Frameübertragung von Station A an Station B ebenso möglich wie von Station C an Station B.

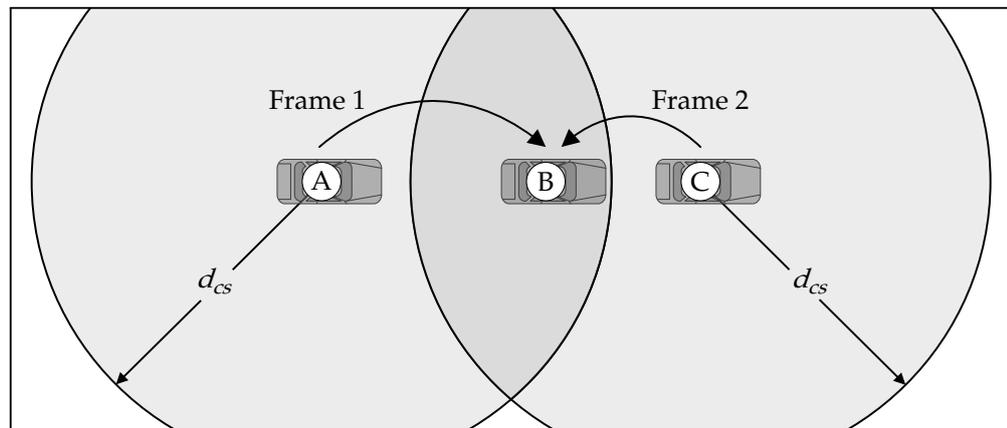


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Hidden-Station-Problems: Da Station C sich nicht innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  von Station A befindet (und umgekehrt), beginnt C mit der Übertragung von Frame 2 an Station B, obwohl A bereits Frame 1 an B überträgt, sodass es zu einer Kollision kommt.

Es sei angenommen, dass im gezeigten Beispiel Station A mit der Übertragung des an Station B gerichteten Frames 1 begonnen hat. In dieser Situation besteht die Gefahr, dass Station C während der laufenden Übertragung von Frame 1 mit der Übertragung des ebenfalls an Station B gerichteten Frames 2 beginnt, da Station C irrtümlich von einem freien Übertragungsmedium ausgeht. Tritt dieser Fall ein, kommt es zu einer Kollision an der empfangenden Station B und damit zum Verlust mindestens eines der beiden Frames. Im Ge-

gensatz zu der zuvor beschriebenen CSMA-Kollision besteht das mit einem Übertragungsbeginn von Station C verbundene Kollisionsrisiko hier während der gesamten Dauer der Frameübertragung von Station A. Hidden Stations führen somit zu einem Versagen des Carrier-Sense-Mechanismus und können daher einen signifikanten Einfluss auf die Kollisionshäufigkeit und damit auf die Dienstgüte des Netzes ausüben.

Der Bereich, in dem andere Stationen mithilfe des physikalischen Carrier-Sense-Mechanismus eine Übertragung des Senders erkennen können, ist in Abbildung 6 zu Darstellungszwecken zwar als Kreis um den Sender mit dem Radius einer konstanten Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  visualisiert, dies stellt jedoch eine erhebliche Abstraktion realer Bedingungen dar. In der Realität führen die Mobilität des Senders, Mehrwegeausbreitung sowie das damit zusammenhängende Small-Scale und Large-Scale Fading des Signals (siehe Abschnitt 4.3) dazu, dass die Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  signifikanten Änderungen im Zeitverlauf sowie in Abhängigkeit der Sender- und Empfängerposition unterworfen ist. Daher ist unter realen Ausbreitungsbedingungen eine exakte Begrenzung des Bereichs, in welchem mit dem Auftreten von Hidden Stations zu rechnen ist, kaum möglich.

Die DCF von IEEE 802.11 wirkt dem Hidden-Station-Problem unter Zuhilfenahme des virtuellen Carrier-Sense-Mechanismus entgegen, indem Sender und Empfänger vor der Übertragung eines Datenframes in einem Handshake-Verfahren die Steuerframes *Request to Send (RTS)* und *Clear to Send (CTS)* austauschen, wie Abbildung 7 veranschaulicht [13, 76, 91, 150]. Das RTS/CTS-Verfahren erlaubt eine Aktualisierung des NAV sowohl für Stationen in Reichweite des Senders als auch für solche in Reichweite des Empfängers.

*RTS/CTS-Handshake zur Bekämpfung des Hidden-Station-Problems*

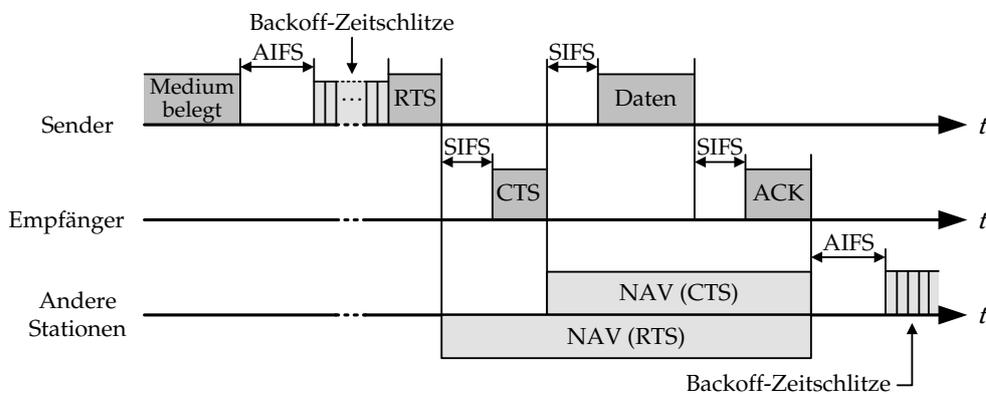


Abbildung 7: Framesequenz bei Anwendung des IEEE 802.11 RTS/CTS-Verfahrens mit aus RTS- und CTS-Frames entnommenen Werten des NAV benachbarter Stationen. Ausbreitungsverzögerungen sind aus Darstellungsgründen vernachlässigt. An Stelle der AIFS können ebenso DIFS oder EIFS treten [76].

Zu diesem Zweck führt die sendende Station zunächst das im vorangehenden Abschnitt 2.2.4.3 dargestellte Medienzugriffsverfahren durch, wie es die DCF bzw. ihre Erweiterung EDCA für die Übertragung eines Datenframes vorschreibt, d. h. es sind entweder DIFS, AIFS oder EIFS und ggf. die Backoff-Prozedur zu berücksichtigen. Nach Abschluss dieses Verfahrens be-

ginnt die Station mit der Übertragung eines RTS-Frames, der an den Empfänger der zu übermittelnden Nutzdaten gerichtet wird. Dieser antwortet nach erfolgreichem Empfang des RTS-Frames mit einem CTS-Frame, wobei dessen Übertragung bereits unmittelbar nach einem SIFS beginnt. Nach dem Empfang des CTS-Frames beginnt der Sender, wiederum im direkten Anschluss an einen SIFS, mit der Übertragung des Datenframes, welcher vom Empfänger nach einem SIFS mit einem ACK-Frame bestätigt wird [76, 126].

Sowohl der RTS- als auch der CTS-Frame enthalten in ihrem MAC-Header das bereits in Abschnitt 2.2.4.3 beschriebene *Duration-Feld*, das die verbleibende Belegungsdauer des Übertragungsmediums angibt und dabei die gesamte Framesequenz mit CTS-, Daten- und ACK-Frames berücksichtigt. Auf dieser Basis können nicht nur sämtliche Stationen in Reichweite des Senders anhand des RTS-Frames ihren NAV aktualisieren, sondern es werden darüber hinaus sämtliche Stationen in Reichweite des Empfängers in die Lage versetzt, eine Aktualisierung ihres NAVs anhand des CTS-Frames durchzuführen. Dies erlaubt die Erkennung einer laufenden Übertragung auf Grundlage des virtuellen Carrier-Sense-Mechanismus auch im Falle einer Hidden-Station-Situation und reduziert das Kollisionsrisiko auf die vergleichsweise kurze Übertragungsdauer des RTS-Frames [76, 126].

Obwohl die Länge der RTS- und CTS-Frames erheblich geringer ist als die übliche Länge eines IEEE 802.11 Datenframes, ist der RTS/CTS-Austausch mit zusätzlichem Overhead verbunden und kann daher mittels eines konfigurierbaren Schwellenwerts entweder für kurze Datenframes oder vollständig deaktiviert werden [76, 126].

Die Anwendung des RTS/CTS-Verfahrens ist jedoch ebenso wie die Anwendung des IEEE 802.11 Bestätigungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.2.4.3) auf die Übertragung von Unicast-Frames beschränkt. In Ermangelung einer individuellen Zieladresse ist ein RTS/CTS-Handshake vor der Übertragung von Multicast- und Broadcast-Frames allgemein nicht möglich, eine Ausnahme bilden auch hier lediglich an einen AP gesendete Frames im Infrastrukturmodus [76].

Abbildung 8 veranschaulicht das in IEEE 802.11 Netzen ebenfalls auftretende *Exposed-Station-Problem*. Es sei angenommen, dass Station B mit der Übertragung von Frame 1 begonnen hat, einem an Station A adressierten Unicast-Frame, und Station C zu diesem Zeitpunkt Frame 2, einen an Station D adressierten Unicast-Frame, übertragen möchte. Da die Entfernungen zwischen Station B und Station A sowie zwischen Station C und Station D gering sind im Vergleich zu den Entfernungen zwischen Station B und Station D sowie zwischen Station C und Station A, würde eine zeitlich parallele Übertragung von Frame 1 und Frame 2 nur geringe Interferenzen für die Empfänger der beiden Frames verursachen und keine Kollision hervorrufen. Dennoch beginnt Station C in dieser Situation nicht mit der Übertragung von Frame 2 an Station D, da sie sich innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{CS}$  von Station B befindet. Die Folge ist eine suboptimale Auslastung des Übertragungsmediums und eine Reduzierung des erzielbaren Durchsatzes [13, 91].

*RTS/CTS  
beschränkt auf  
Unicast-Frames*

*Exposed-Station-  
Problem*

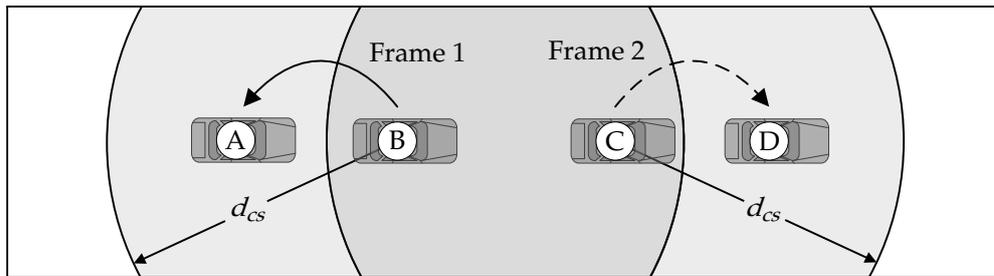


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Exposed-Station-Problems: Station B überträgt Frame 1 an Station A. Da Station C sich innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  von Station B befindet, beginnt Station C nicht mit der Übertragung von Frame 2 an Station D, obwohl dadurch keine Kollision hervorgerufen würde.

Das Exposed-Station-Problem ist jedoch nur von Bedeutung, wenn weder der Inhalt von Frame 1 für Station C noch der Inhalt von Frame 2 für Station B relevant ist. Handelt es sich bei den in Abbildung 8 zu übertragenden Frames hingegen nicht um Unicast-, sondern um Broadcast-Frames, so muss deren zeitlich überlappende Übertragung ohnehin vermieden werden, da Station B sonst nicht in der Lage wäre, den für sie relevanten Frame von Station C zu empfangen und umgekehrt.

### 2.2.5 ETSI ITS-G5 und IEEE 802.11p

Die von ETSI als Teil der ITS-Referenzarchitektur (siehe Abbildung 2 in Abschnitt 2.2.2) standardisierte Funktechnologie ITS-G5 [42, 55] hat sich in den letzten Jahren als bevorzugte Lösung für V2V- und V2I-Kommunikation zur Erhöhung von Sicherheit und Effizienz des Straßenverkehrs in Europa herauskristallisiert und steht daher im Zentrum des Interesses der vorliegenden Arbeit. ETSI ITS-G5 spezifiziert den Access Layer der ITS-Referenzarchitektur, der die Bitübertragungsschicht und Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells umfasst [41, 84].

ETSI ITS-G5

Zu diesem Zweck greift ITS-G5 auf bestehende Standards und insbesondere auf den im vorherigen Abschnitt dargestellten WLAN-Funkstandard IEEE 802.11 dahingehend zurück, dass sowohl die Bitübertragungsschicht als auch die MAC-Teilschicht aus der Standarderweiterung IEEE 802.11p [77] übernommen werden.<sup>9</sup> Sämtliche Ausführungen zu IEEE 802.11p in diesem Abschnitt gelten daher auch unmittelbar für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit fokussierte Funktechnologie ETSI ITS-G5.

Im Hinblick auf die oberhalb der MAC-Teilschicht angeordnete LLC-Teilschicht schreibt ITS-G5 außerdem vor, dass die Stationen den im Standard IEEE 802.2 spezifizierten verbindungslosen, unbestätigten Übertragungsmodus unterstützen müssen [75]. Darüber hinaus sind als *Decentralized Congestion Control (DCC)* bezeichnete Methoden zur Überlaststeuerung vorgesehen,

<sup>9</sup>Die in IEEE 802.11p enthaltenen Standarderweiterungen wurden inzwischen in die aktuelle Revision des Standards mit der Bezeichnung IEEE 802.11-2012 [78] übernommen, welche gleichzeitig die Grundlage für ETSI ITS-G5 [42, 55] bildet.

wie sie innerhalb der ETSI Technical Specification (TS) 102 687 [49] definiert werden [42, 55]. Hierauf wird in Abschnitt 2.2.6 kurz eingegangen.

IEEE 802.11p

IEEE 802.11p ist eine im Jahr 2010 nach mehrjähriger Entwicklungsdauer veröffentlichte Erweiterung der 802.11 Standardspezifikation, die konzipiert wurde, um den besonderen Anforderungen der Funkkommunikation zwischen Fahrzeugen und ihrer Umgebung mit dem Ziel einer Erhöhung von Verkehrssicherheit und -effizienz gerecht zu werden. Die Vernetzung von Fahrzeugen in VANETs unterscheidet sich maßgeblich vom originären Verwendungszweck der WLAN-Technologie, die ursprünglich lediglich auf nomadenhafte Teilnehmermobilität ausgerichtet war. Da VANETs hingegen eine hochdynamische Netztopologie mit einer außerordentlich hohen Mobilität der Stationen aufweisen, stehen der Ad-hoc-Charakter der Vernetzung und die damit verbundene geringe Toleranz gegenüber Verzögerungen im Vordergrund der mit 802.11p vorgenommenen Ergänzungen des Standards.

### 2.2.5.1 Medienzugriffssteuerung und MAC-Management

Outside the Context  
of a BSS (OCB)

Von wesentlicher Bedeutung für die Funktionsweise der auf IEEE 802.11 basierenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation ist die mit IEEE 802.11p eingeführte Möglichkeit zur Kommunikation *Outside the Context of a BSS (OCB)*, die sowohl im Zentrum von IEEE 802.11p als auch von ETSI ITS-G5 steht. Eine Station wird dabei durch Setzen des Flags *dot11OCBActivated*, eines zu diesem Zweck vorgesehenen Attributs ihrer *Management Information Base (MIB)*, in den OCB-Modus versetzt.<sup>10</sup> Dadurch wird der Standard in Ergänzung zu den ursprünglich vorgesehenen, in Abschnitt 2.2.4.2 dargestellten Möglichkeiten der Kommunikation in einem IBSS (Ad-hoc-Modus) oder über einen Access Point (AP) innerhalb eines BSS (Infrastruktur-Modus) um einen dritten Betriebsmodus erweitert, welcher den Stationen einen Datenaustausch unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem BSS ermöglicht [55, 76, 77].

Verzicht auf  
Scanning,  
Authentifizierung,  
Assoziierung und  
weitere Features

Verwendet eine Station den OCB-Modus, so ist es ihr erlaubt, ohne vorherige Authentifizierung oder Assoziierung mit einem BSS sowohl Datenframes als auch sämtliche sonstigen zur Kommunikation mit ihrer Umgebung notwendigen Frametypen zu übertragen. Die in Abschnitt 2.2.4.2 (siehe Abbildung 4) dargestellte Verwaltung des entsprechenden Zustands der Station sowie die damit verbundenen Beschränkungen entfallen demnach [55, 76, 77].

Aufgrund des vollständigen Fehlens der Assoziierungs- und Authentifizierungsprozedur<sup>11</sup> wird bei Verwendung des OCB-Modus auf weitere Features des in Abschnitt 2.2.4.2 dargestellten MAC-Managements verzichtet: So nutzen die Stationen weder aktives noch passives Scanning und es erfolgt keine Übertragung von Beacon-Frames. Dies hat zum einen zur Folge, dass der Station der zu verwendende Kanal im Voraus bekannt sein muss, zum ande-

<sup>10</sup>Innerhalb des Amendments IEEE 802.11p wurde das MIB-Attribut ursprünglich als *dot11OCBEnabled* bezeichnet [77].

<sup>11</sup>Die Authentifizierungsprozedur entfällt bei Verwendung des OCB-Modus lediglich innerhalb der MAC-Teilschicht von IEEE 802.11. Da die Vernetzung von Fahrzeugen in VANETs allerdings dessen ungeachtet eine Authentifizierung der Stationen erfordert, übernimmt diese Aufgabe der Security Layer der ITS-Referenzarchitektur (vgl. Abschnitt 2.2.2).

ren stehen im OCB-Modus aus diesem Grund weder die auf Grundlage der Beacon-Frames realisierte Timing Synchronization Function noch die Power Management Funktionalitäten des IEEE 802.11 Standards zur Verfügung. Um dennoch eine Synchronisierung der Stationen zu ermöglichen, wurde mit IEEE 802.11p ein zu diesem Zweck geeigneter Timing Advertisement Frame eingeführt. Eine Nutzung der im IEEE 802.11 Standard vorgesehenen Methoden zur Datenverschlüsselung ist im OCB-Modus ebenfalls nicht möglich [55, 76, 77].

Durch diese Maßnahmen können die mit der Notwendigkeit eines Beitritts zu einem BSS verbundenen Verzögerungen durch Scanning, Authentifizierung und Assoziierung eliminiert werden, womit der geringen Verzögerungstoleranz aufgrund der hochdynamischen Netztopologie von VANETs Rechnung getragen wird. Der Charakter der auf IEEE 802.11 basierenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation im OCB-Modus wird dabei auf eine reine Ad-hoc Vernetzung reduziert. Diese unterscheidet sich grundlegend von den ursprünglich zur Verfügung stehenden Betriebsmodi des Basisstandards, insbesondere darf der OCB-Modus nicht mit der üblicherweise als Ad-hoc-Modus bezeichneten Kommunikation in einem IBSS verwechselt werden.

Darüber hinaus sieht die ITS-G5-Standardspezifikation die Bereitstellung einer nach Prioritätsklassen differenzierten Quality of Service (QoS) unter Verwendung des in Abschnitt 2.2.4.3 (siehe Seite 27) dargestellten EDCA-Verfahrens vor. Zu diesem Zweck werden in Abhängigkeit der als Access Category bezeichneten Prioritätsklasse des zu übertragenden Frames die EDCA-Parameter  $AIFSN$ ,  $CW_{min}$  und  $CW_{max}$  angepasst. Die Dauer eines AIFS ergibt sich dabei in Abhängigkeit des Parameters  $AIFSN$ <sup>12</sup> als

$$AIFS [AC] = AIFSN [AC] \cdot T_{slot} + SIFS , \quad (2.2)$$

wobei die Dauer eines SIFS im Fall der von ITS-G5 verwendeten Übertragungstechnik  $T_{SIFS} = 32 \mu s$  beträgt und  $T_{slot} = 13 \mu s$  die Dauer eines IEEE 802.11 Zeitschlitzes bezeichnet. Die ebenfalls durch EDCA zur Verfügung gestellten Transmission Opportunities (TXOPs) für die aufeinanderfolgende Übertragung mehrerer Frames werden von ITS-G5-Stationen hingegen nicht verwendet, der Parameter TXOP Limit hat daher stets den Wert Null.

AC	$CW_{min}$	$CW_{max}$	AIFSN	TXOP Limit
AC_VO	3	7	2	0
AC_VI	7	15	3	0
AC_BE	15	1023	6	0
AC_BK	15	1023	9	0

Tabelle 1: EDCA-Parameter von ITS-G5 und IEEE 802.11p [55, 77].

Tabelle 1 zeigt die Standardwerte der EDCA-Parameter von ITS-G5 für die vier nach fallender Priorität geordneten Access Categories (ACs) *Voice (VO)*, *Video (VI)*, *Best Effort (BE)* und *Background (BK)* [55, 76, 77].

<sup>12</sup>Arbitration Interframe Space Number (AIFSN).

Reine Ad-hoc-  
Vernetzung

Quality of Service  
auf Basis von EDCA

Die Priorisierung auf Grundlage von EDCA ist für die vorliegende Arbeit jedoch nur von untergeordneter Bedeutung, da eine Betrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Prioritätsklassen nicht Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen ist, sondern sämtliche zu übertragenden Frames derselben Access Category zugeordnet werden.

Aufbau des MAC-  
Headers von ITS-G5

Abbildung 9 zeigt den Aufbau des aus sieben Feldern bestehenden MAC-Headers eines ITS-G5-Datenframes im OCB-Modus unter Angabe der Länge des jeweiligen Feldes in Oktetten (Bytes). Das Feld *Frame Control* besteht aus mehreren Subfeldern und enthält unter anderem die exakte Angabe des Frametyps, im Falle eines ITS-G5-Datenframes *QoS Data*, sowie die Flags *ToDS* und *FromDS*, die nur bei Verwendung eines Access Points gesetzt werden und im OCB-Modus daher stets den Wert Null aufweisen. Details zum Aufbau des Frame Control Feldes können den Standardspezifikationen entnommen werden [42, 76].

Frame Control	Duration	Address 1	Address 2	Address 3	Sequence Control	QoS Control
2 Oktette	2 Oktette	6 Oktette	6 Oktette	6 Oktette	6 Oktette	2 Oktette

Abbildung 9: Aufbau des MAC-Headers eines ITS-G5-Datenframes und Länge der einzelnen Felder [55, 76].

Das bereits in Abschnitt 2.2.4.3 beschriebene Feld *Duration* gibt die verbleibende Belegungsdauer des Übertragungsmediums unter Berücksichtigung der gesamten Framesequenz an und wird für den virtuellen Carrier-Sense-Mechanismus verwendet. Mithilfe des *Sequence Control* Feldes wird der Frame mit einer Sequenznummer versehen und außerdem, sofern Fragmentierung verwendet wird, eine Fragmentnummer vergeben. Das Feld *QoS Control* wird zur Bereitstellung einer differenzierten Quality of Service im Rahmen des EDCA-Verfahrens verwendet und enthält Angaben über die Prioritätsklasse des Frames sowie zu dem verwendeten Bestätigungsmodus. Dabei nutzt ITS-G5 das herkömmliche, in Abschnitt 2.2.4.3 dargestellte Verfahren zur Einzelbestätigung von Unicast-Frames, während Multicast- und Broadcast-Frames nicht bestätigt werden. Eine Verwendung der mit der Standarderweiterung IEEE 802.11e eingeführten Block Acknowledgments sieht ITS-G5 hingegen nicht vor [42, 55, 76].

Adressfelder des  
MAC-Headers

Der MAC-Header eines ITS-G5-Datenframes enthält darüber hinaus drei Adressfelder: Das Feld *Address 1* beinhaltet die MAC-Adresse des Empfängers<sup>13</sup>, das Feld *Address 2* entspricht der MAC-Adresse des Senders<sup>14</sup> und das Feld *Address 3* ist für die BSSID des BSS vorgesehen, zu dem die sendende Station gehört. Beim Empfang eines Datenframes wird die im Feld *Address 3* enthaltene BSSID von der empfangenden Station in die Adressfilterung einbezogen (vgl. Abschnitt 2.2.4.2). Ist der OCB-Modus aktiviert, wird das Feld *Address 3* daher mit der sogenannten *Wildcard-BSSID* versehen, die

<sup>13</sup>Receiver Address, im OCB-Modus identisch mit der Destination Address [42, 76, 77].

<sup>14</sup>Transmitter Address, im OCB-Modus identisch mit der Source Address [42, 76, 77].

mit der Broadcast-MAC-Adresse identisch ist<sup>15</sup>, um eine Auswertung des Frames durch sämtliche designierten Empfänger sicherzustellen [42, 55, 76].

### 2.2.5.2 Übertragungstechnik

Der Physical Layer (PHY) von ITS-G5 basiert auf der mit der Standarderweiterung IEEE 802.11a in den WLAN-Standard eingeführten Übertragungstechnik. Wie bereits in Abschnitt 2.2.4.1 kurz dargelegt wurde, erweiterte IEEE 802.11a dem Standard um eine auf das Mehrträger-Modulationsverfahren *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* gestützte PHY-Variante, die für den Frequenzbereich von näherungsweise 5,2 GHz bis 5,8 GHz vorgesehen war.

IEEE 802.11a

OFDM

Das Mehrträgerverfahren OFDM teilt die zur Verfügung stehende Bandbreite des Kanals auf mehrere orthogonale Subträger auf und erzeugt aus dem zu übertragenden Datenstrom hoher Datenrate mehrere Subdatenströme niedriger Datenrate, die jeweils einem Subträger zugeordnet und zeitlich parallel übertragen werden. Dabei wird jeder einzelne Subträger unter Verwendung eines herkömmlichen digitalen Modulationsverfahrens moduliert. IEEE 802.11a sieht zu diesem Zweck mit BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) sowie 16- und 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) vier Verfahren unterschiedlicher Wertigkeit und Robustheit vor [55, 76].

Die parallele Übertragung über eine Vielzahl schmalbandiger Subträger ermöglicht im Vergleich zu Einträgerverfahren gleicher Bandbreite und Datenrate eine Vervielfachung der Symboldauer. OFDM ist daher vergleichsweise robust gegenüber dem in drahtlosen Kommunikationsnetzen auftretenden Phänomen der Intersymbol-Interferenz (ISI), welches durch eine ausgeprägte Dispersion des Signals (*Delay Spread*) und frequenzselektives Fading in Folge von Mehrwegeausbreitung hervorgerufen wird. Einer weiteren Erhöhung der Robustheit gegenüber Delay Spread und der Vermeidung von ISI dient das Einfügen von Guard-Intervallen zwischen aufeinanderfolgenden Symbolen. Diese Guard-Intervalle der Länge  $T_G$  enthalten eine zyklische Erweiterung (Cyclic Prefix) des Kernsymbols. Die Gesamtsymboldauer erhöht sich damit auf  $T_S + T_G$ , wobei  $T_S$  die Kernsymboldauer bezeichnet [66, 88, 159].

Vermeidung von Intersymbol-Interferenz

Die Orthogonalität der OFDM-Subträger wird erreicht, indem der Sender einen rechteckförmigen Grundimpuls verwendet und der Subträgerabstand zu  $\Delta f = 1/T_S$  gewählt wird. Die Subträger eines OFDM-Signals können daher im Frequenzbereich überlappen, ohne miteinander zu interferieren. Eine OFDM-Übertragung mit den beschriebenen Eigenschaften lässt sich effizient durch Nutzung der Schnellen Fourier-Transformation (*Fast Fourier Transform, FFT*) realisieren, indem eine inverse FFT auf der Senderseite in Verbindung mit einer FFT auf der Empfängerseite eingesetzt wird [88, 113, 159].

IEEE 802.11a teilt die Bandbreite des Kanals auf insgesamt 52 Subträger auf, wobei vier Pilot-Subträger und 48 Daten-Subträger vorgesehen sind. Die zu übertragenden Datenbits werden dabei mithilfe von Interleaving und

Daten- und Pilot-Subträger

<sup>15</sup>Die IEEE 802 Broadcast-MAC-Adresse entspricht einer 48 bit langen Folge von binären Einsen, hexadezimal FF-FF-FF-FF-FF-FF.

Faltungscodes (Convolutional Codes) unter Verwendung unterschiedlicher Coderaten redundant auf die Daten-Subträger verteilt, sodass *Forward Error Correction (FEC)* ermöglicht wird. Der Standard spezifiziert drei verschiedene Betriebsmodi für Kanäle mit einer Bandbreite (Abstand der Mittenfrequenzen) von 20 MHz, 10 MHz oder 5 MHz [76].

Grundsätzlich ist Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation im Zusammenhang mit der Nutzung des zu diesem Zweck vorgesehenen Frequenzbereichs bei 5,9 GHz besonders ausgeprägter Mehrwegeausbreitung ausgesetzt (siehe Abschnitte 2.2.7 und 4.3). Dies verursacht das Auftreten hoher Delay Spreads, welche wiederum zu einer Anfälligkeit der Übertragung gegenüber ISI führen. So wurden im Rahmen von Messkampagnen für verschiedenste Szenarien auf Autobahnen, Landstraßen und im Innenstadtbereich RMS (Root Mean Square) Delay Spreads empirisch ermittelt, deren Mittelwerte in einem Bereich zwischen 20 und 400 ns liegen, während die entsprechenden Maximalwerte in einzelnen Szenarien sogar 900 ns überschreiten. Die gemessenen Maximum Excess Delays, definiert als Differenz zwischen kleinster und größter Verzögerung des durch Mehrwegeausbreitung aufgespreizten Signals, erreichen dabei die Größenordnung mehrerer Mikrosekunden [12, 27, 108, 114, 121].

Während herkömmliche IEEE 802.11 WLANs üblicherweise Kanäle mit einer Bandbreite von 20 MHz verwenden, greift die ITS-G5-Funktechnologie, motiviert durch die zuvor beschriebenen Ausbreitungseigenschaften, auf den als *half-clocked* bezeichneten Betrieb mit einer Bandbreite von 10 MHz zurück. Durch diese Maßnahme verdoppeln sich im Vergleich zur Verwendung des herkömmlichen Kanalabstands sowohl die Kernsymboldauer als auch die Länge des Guard-Intervalls auf  $T_S = 6,4 \mu\text{s}$  und  $T_G = 1,6 \mu\text{s}$ , sodass eine größere Robustheit gegenüber ISI erreicht wird. Der resultierende Subträgerabstand beträgt  $\Delta f = 1/T_S = 156,25 \text{ kHz}$  [55, 76].

IEEE 802.11a definiert insgesamt acht verschiedene Modulations- und Kodierschemata (Modulation and Coding Schemes, MCS), deren Datenraten von der verwendeten Kanalbandbreite  $B$  abhängen. Diese MCS werden durch ETSI ITS-G5 unverändert übernommen, wobei für ITS-G5-Stationen  $B = 10 \text{ MHz}$  gilt. Bei 48 Daten-Subträgern und einer Symbolrate pro Subträger in Höhe von  $1/(T_S+T_G) = 125 \cdot 10^3 \text{ Symbole/s}$  erlaubt ITS-G5 in Abhängigkeit der Wertigkeit des eingesetzten Subträger-Modulationsverfahrens (zwischen einem und sechs bit pro Symbol) und der verwendeten Koderate (zwischen  $1/2$  und  $3/4$ ) somit Datenraten  $R_b$  von 3 Mbps bis zu 27 Mbps [55, 76].

Tabelle 2 fasst die verschiedenen MCS und die resultierenden Datenraten zusammen. Obligatorisch ist für jede ITS-G5-Station dabei die Unterstützung der drei MCS, die den Datenraten 3 Mbps, 6 Mbps und 12 Mbps entsprechen [55, 76].

ETSI ITS-G5 ist ebenso wie die auf IEEE 802.11p basierende WAVE-Architektur für den Betrieb in einem reservierten Frequenzband bei Trägerfrequenzen von rund 5,9 GHz vorgesehen. Während jedoch in den USA für WAVE-Systeme ein insgesamt 75 MHz breites Band freigegeben wurde, steht in Europa für sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen auf Basis von ITS-G5 zunächst

Verlängerte  
Symboldauer durch  
Kanalbandbreite von  
10 MHz

MCS und  
Datenraten von  
ITS-G5

5,9 GHz  
Frequenzband

MCS		$R_b$ [Mbps]	
Modulation	Koderate	$B = 10$ MHz	$B = 20$ MHz
BPSK	1/2	3	6
BPSK	3/4	4,5	9
QPSK	1/2	6	12
QPSK	3/4	9	18
16-QAM	1/2	12	24
16-QAM	3/4	18	36
64-QAM	2/3	24	48
64-QAM	3/4	27	54

Tabelle 2: Datenraten  $R_b$  von IEEE 802.11 bei Verwendung von OFDM im 5 GHz Frequenzband in Abhängigkeit des Modulations- und Kodierschemas (MCS) für verschiedene Kanalbandbreiten  $B$ . Für ITS-G5 gilt  $B = 10$  MHz [55, 76].

nur eine Bandbreite von 30 MHz zur Verfügung (siehe hierzu Abschnitte 2.2.1 und 2.2.7).

### 2.2.6 Decentralized Congestion Control

Eine übermäßig hohe Netzlast kann in auf ITS-G5 basierenden VANETs aus mehreren Gründen zu signifikanten Beeinträchtigungen der Dienstgüte führen. Die durch zeitlich überlappende Übertragungen verschiedener Stationen verursachten Multi-User-Interferenzen rufen Framekollisionen hervor, welche die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung maßgeblich beeinflussen. Mit wachsender Netzlast induziert außerdem die CSMA/CA-Mediumzugriffsprozedur erhöhte Verzögerungen, die dazu führen können, dass zu übertragende Frames vor Übertragungsbeginn verworfen werden (Frame Drops). Diese netzlastabhängigen Effekte werden im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit, insbesondere in Kapitel 5, ausführlich erläutert.

In Überlastsituationen kann es dazu kommen, dass die Dienstgüte des Netzes so weit herabgesetzt wird, dass diese den Mindestanforderungen bestimmter ITS-Anwendungen nicht mehr genügt. Dies gilt in besonderem Maße für kooperative Sicherheitsanwendungen. Die Gewährleistung einer zuverlässigen und verzögerungsarmen Nachrichtenübermittlung in VANETs erfordert daher Maßnahmen zur Begrenzung der Netzlast.

Zu diesem Zweck definiert die ETSI Technical Specification (TS) 102 687 für ITS-G5-Stationen verschiedene Mechanismen zur dezentralen Überlaststeuerung, welche einen Bestandteil des Access Layers der ITS-Referenzarchitektur bilden und allgemein unter dem Oberbegriff *Decentralized Congestion Control (DCC)* zusammengefasst werden [49]. Ausgewählte DCC-Mechanismen werden außerdem durch ETSI TS 102 724 im Zusammenhang mit der für ITS-G5 vorgesehenen europäischen Kanalallokation (siehe Abschnitt 2.2.8) detaillierter spezifiziert [53].

Zur Quantifizierung der von jeder Station individuell wahrgenommenen Netzlast (Channel Load) sieht DCC die Verwendung der lokal messbaren

*Herabsetzung der Dienstgüte im Überlastfall*

*Decentralized Congestion Control (DCC)*

Quantifizierung der  
Netzlast

Metrik *Channel Busy Time (CBT)* vor.<sup>16</sup> Von der ermittelten CBT werden verschiedene DCC-Zustände (Relaxed, Active, Restrictive) abgeleitet, welche die Auslastung des Netzes qualitativ repräsentieren. Über- oder unterschreitet die von der Station in einem Zeitfenster festgelegter Länge gemessene CBT bestimmte Schwellenwerte, wird ein Zustandswechsel ausgelöst.

DCC-Mechanismen  
des Access Layers

In Abhängigkeit des aktuellen DCC-Zustands nimmt der Access Layer eine Anpassung verschiedener Kommunikationsparameter an die Belastung des Netzes vor. Dazu definiert ETSI TS 102 687 folgende Mechanismen:

- *Transmit Power Control (TPC)* reduziert mit steigender Netzlast die Sendeleistung;
- *Transmit Rate Control (TRC)* reduziert mit steigender Netzlast die Nachrichtenerzeugungsrate, indem das minimal zulässige Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Frameübertragungen derselben Station verlängert wird;
- *Transmit Datarate Control (TDC)* erhöht mit steigender Netzlast die für die Frameübertragung verwendete Datenrate und verringert dadurch die Dauer der Kanalbelegung;
- *DCC Sensitivity Control (DSC)* erhöht mit steigender Netzlast den Carrier-Sense-Schwellenwert, um Frame Drops zu vermeiden.

Darüber hinaus wird durch einen *Transmit Access Control (TAC)* genannten Mechanismus der Zugriff auf die unterschiedlich priorisierten EDCA-Warteschlangen beschränkt [49].

Die ETSI-Spezifikationen der europäischen ITS-Referenzarchitektur definieren somit bereits relativ umfangreiche und zugleich vielversprechende Maßnahmen zur Handhabung von Überlastsituationen in VANETs.

Untersuchungsbe-  
darf hinsichtlich  
geeigneter DCC-  
Parametrierung

Gleichzeitig liegen jedoch keine hinreichend validierten Erkenntnisse darüber vor, wie eine konkrete Parametrierung von Sendeleistung, Datenrate, Nachrichtenerzeugungsrate und Carrier-Sense-Schwellenwert zu wählen ist, um unter realistischen Bedingungen eine zufriedenstellende Dienstgüte in VANETs auch bei hoher Netzlast sicherzustellen. Gleiches gilt für die Quantifizierung der in diesem Zusammenhang tolerierbaren Netzlast und die Festlegung entsprechender Schwellenwerte.

Den daraus resultierenden Fragestellungen widmet sich die simulationsgestützte Leistungsbewertung in Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit.

### 2.2.7 Frequenzallokation für ITS in Europa

Im März des Jahres 2008 verabschiedete das Electronic Communications Committee (ECC) der Europäischen Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation<sup>17</sup> (CEPT) eine Entscheidung zugunsten der harmonisierten Verwendung des Frequenzbands von 5,875 GHz bis 5,925 GHz für

<sup>16</sup>Zur Definition der Channel Busy Time siehe Abschnitt 4.4.4.

<sup>17</sup>Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (CEPT).

sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen. Den Frequenzbereich von 5,905 GHz bis 5,925 GHz sieht die ECC-Entscheidung allerdings lediglich als zukünftige Erweiterung des Frequenzbands vor, sodass für sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen zunächst eine Bandbreite von 30 MHz im als *ITS-G5A* bezeichneten Teilband zwischen 5,875 GHz und 5,905 GHz zur Verfügung steht. Zwar sind derartige ECC-Entscheidungen für die CEPT-Mitgliedstaaten nicht bindend, gleichwohl hat ein überwiegender Anteil der 48 nationalen Verwaltungsbehörden die Entscheidung bereits umgesetzt [33].

*ITS-G5A*

Ebenfalls zu Beginn des Jahres 2008 beschloss das ECC außerdem eine Empfehlung an die nationalen Verwaltungsbehörden der CEPT-Mitgliedstaaten zur Freigabe des Frequenzbandes von 5,855 GHz bis 5,875 GHz, welches als *ITS-G5B* bezeichnet wird, für nicht sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen [34].

*ITS-G5B*

Auf Empfehlung des ECC hat darüber hinaus die Europäische Kommission im August 2008 eine Entscheidung zugunsten der harmonisierten Nutzung von Funkfrequenzen im Frequenzband von 5,875 GHz bis 5,905 GHz (*ITS-G5A*) für sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen erlassen. Diese ist bindend für sämtliche EU-Mitgliedsstaaten [39].

Frequenzbereich [GHz]	Bezeichnung	Verwendungszweck
5,875 bis 5,905	ITS-G5A	Sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen
5,905 bis 5,925	ITS-G5D	Zukünftige Erweiterung des Frequenzbands für sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen
5,855 bis 5,875	ITS-G5B	Nicht sicherheitsbezogene ITS-Anwendungen

Tabelle 3: Frequenzallokation für ITS in Europa [33, 34, 39, 55].

Tabelle 3 fasst die Frequenzallokation für ITS in Europa zusammen.<sup>18</sup> Um Gleichkanal- und Nachbarkanalinterferenzen (Co-Channel Interference und Adjacent-Channel Interference) zu begrenzen, sieht die europäische Regulierung für die drei genannten Frequenzbereiche eine maximal zulässige spektrale Leistungsdichte von 23 dBm/MHz bezogen auf die äquivalente isotrope Sendeleistung (EIRP) vor. Darüber hinaus gilt für die Bereiche *ITS-G5A* und *ITS-G5D* eine Beschränkung der insgesamt abgestrahlten Sendeleistung auf maximal 33 dBm EIRP [33, 34, 39].

*Zulässige  
Sendeleistung*

### 2.2.8 Kanalallokation für ITS-G5

Die in Abschnitt 2.2.7 dargestellte europäische Frequenzallokation ist zur Nutzung durch ITS-Systeme auf Grundlage der im Zentrum des Interesses der vorliegenden Arbeit stehenden Funktechnologie ETSI ITS-G5 vorgesehen. Die ITS-G5-Standardspezifikation schreibt den Stationen dabei für die Kommunikation innerhalb der Teilbänder *ITS-G5A*, *ITS-G5B* und *ITS-G5D* die Verwendung des in Abschnitt 2.2.5.1 erläuterten OCB-Modus vor [55].

<sup>18</sup>Auf das als *ITS-G5C* bezeichnete Band zwischen 5,470 GHz bis 5,725 GHz wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da dieses Band keine Bedeutung für die Ad-hoc-Vernetzung in VANETs hat [55].

Kanalallokation für  
ETSI ITS-G5

Die von ETSI spezifizierte Kanalallokation für ITS-G5, welche Tabelle 4 zusammengefasst, teilt den zur Verfügung stehenden Frequenzbereich zu diesem Zweck in verschiedene physikalische Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 10 MHz auf. Vorgesehen ist neben mehreren Service Channels (SCHs) ein insbesondere zur Nutzung durch sicherheitsbezogene Anwendungen hoher Priorität bestimmter Control Channel (CCH) mit einer Mittenfrequenz von 5,9 GHz. Wie aus der Tabelle erkennbar ist, lässt die ETSI-Spezifikation zur Verringerung von Interferenzen auf einigen Kanälen deutlich geringere maximale Sendeleistungen und Leistungsdichten zu als die europäische Frequenzallokation [55].

Kanal	Mittenfrequenz	Max. Sendeleistung	Max. Leistungsdichte
G5-CCH	5,900 GHz	33 dBm	23 dBm/MHz
G5-SCH2	5,890 GHz	23 dBm	13 dBm/MHz
G5-SCH1	5,880 GHz	33 dBm	23 dBm/MHz
G5-SCH3	5,870 GHz	23 dBm	13 dBm/MHz
G5-SCH4	5,860 GHz	0 dBm	-10 dBm/MHz

Tabelle 4: Kanalallokation für ITS-G5 in Europa. Im Rahmen einer zukünftigen Erweiterung (ITS-G5D) sind darüber hinaus zwei weitere Service Channels vorgesehen. Die angegebenen Sendeleistungen und Leistungsdichten sind EIRP-Werte [55].

Kontinuierliche  
Empfangsbereit-  
schaft auf dem  
CCH

Im Gegensatz zur in Abschnitt 2.2.1 skizzierten WAVE-Architektur schreibt die ETSI-Standardspezifikation für ITS-G5 vor, dass sämtliche Stationen immer dann auf dem CCH empfangsbereit sein müssen, wenn sie nicht gerade mit einer eigenen Übertragung innerhalb der Frequenzbänder ITS-G5A oder ITS-G5B beschäftigt sind. Ausgenommen von dieser Vorgabe sind lediglich diejenigen Stationen, die keine sicherheitsbezogenen ITS-Anwendungen unterstützen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit eines aufwändigen Kanalwechschelschemas, wie es IEEE 1609 definiert [80]. Gleichzeitig impliziert dies jedoch, dass nur solche Stationen die vorhandenen SCHs von ITS-G5 nutzen können, die grundsätzlich fähig sind, auf zwei Kanälen gleichzeitig Daten zu empfangen, sodass entsprechend aufwändige Empfängerstrukturen erforderlich sind. Darüber hinaus schreibt die Spezifikation vor, dass ausnahmslos alle ITS-G5-Stationen imstande sein müssen, auf dem CCH zu senden [42].

Nutzung des CCH  
für Übertragung  
von CAMs

Die europäische ITS-Architektur sieht vor, dass die Stationen für die Übertragung der in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 beschriebenen Cooperative Awareness Messages (CAMs) ausschließlich den ITS-G5 Control Channel (CCH) verwenden, da diesen Nachrichten eine besondere Bedeutung für die Sicherheit des Straßenverkehrs zukommt [23, 53]. Die vorliegende Arbeit widmet sich der Untersuchung periodischer CAM-Broadcasts in VANETs und konzentriert sich in ihrem weiteren Verlauf daher auf die Betrachtung des ITS-G5 Control Channels, welcher den einzigen in diesem Kontext relevanten Kanal darstellt.

## 2.3 ANFORDERUNGEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umwelt ermöglicht die Realisierung einer Vielzahl verschiedenster Anwendungen (vgl. Abschnitt 2.1), die mit unterschiedlichen Anforderungen an das zugrunde liegende Kommunikationsnetz einhergehen. Dabei sind mit der Realisierung von kooperativen Sicherheitsanwendungen naturgemäß besonders hohe Anforderungen an die Dienstgüte des Netzes und vornehmlich die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung verbunden. Dies betrifft insbesondere auch die in Abschnitt 2.2.3 beschriebene und in der vorliegenden Arbeit fokussierte Herbeiführung von Cooperative Awareness mithilfe periodischer CAM-Broadcasts.

Cooperative Awareness dient der proaktiven Vermeidung von Verkehrsunfällen durch eine räumliche und zeitliche Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts des Fahrers. Die Erfüllung dieses Zwecks setzt möglichst aktuelle, fehlerfreie und vollständige Informationen über die Positionen und Bewegungszustände benachbarter Fahrzeuge voraus. Ist ein Fahrzeug A für längere Zeit nicht in der Lage, einem bestimmten anderen Fahrzeug B, das sich in seiner näheren Umgebung befindet, durch die erfolgreiche Übermittlung einer CAM aktualisierte Informationen über seine Position und seinen Bewegungszustand zur Verfügung zu stellen, so kann im Falle einer Gefahrensituation eine drohende Kollision zwischen Fahrzeug A und Fahrzeug B nicht zuverlässig verhindert werden.

Aus diesem Grund erfordert Cooperative Awareness eine Nachrichtenübermittlung mit möglichst hoher Empfangswahrscheinlichkeit an eine möglichst große Anzahl benachbarter Fahrzeuge. Dabei sind die Relevanz der in einer CAM enthaltenen Informationen und die damit verbundenen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Übermittlung umso höher, je geringer die Entfernung zwischen Sender und Empfänger ist. Da in VANETs sehr hohe Relativgeschwindigkeiten der Stationen auftreten können, ist jedoch gleichzeitig eine möglichst hohe Kommunikationsreichweite anzustreben, um hinreichende Vorwarnzeiten beim Erkennen einer Gefahrensituation zu gewährleisten. Darüber hinaus sind bei der periodischen Übermittlung von CAMs nur geringe Verzögerungen tolerierbar, da die notwendige Aktualität der Statusdaten anderenfalls nicht sichergestellt werden kann [40, 89, 111, 139, 146].

Die Erfüllung dieser anspruchsvollen Anforderungen wird erschwert durch besonders herausfordernde Bedingungen für eine zuverlässige Datenübermittlung, die sich zum einen aus den äußeren Gegebenheiten von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs im Allgemeinen, zum anderen aus den Besonderheiten periodischer Broadcast-Kommunikation unter Verwendung der Funkstandards IEEE 802.11 und ITS-G5 ergeben. Die Ursachen hierfür werden im Folgenden in der gebotenen Kürze zusammenfassend dargestellt.

Zunächst einmal bewirken die hohen Relativgeschwindigkeiten der Stationen in VANETs eine hochdynamische Netztopologie und eine unvollständige sowie zeitlich variable Konnektivität des Netzes. Eine erfolgreiche Frameübertragung ist unter diesen Bedingungen in vielen Fällen nur für die Dauer sehr kurzer Zeitfenster möglich.

*Anforderungen  
periodischer CAM-  
Broadcasts*

*Herausforderungen  
für zuverlässige  
Datenübermittlung*

*Hochdynamische  
Netztopologie*

*Ungünstige Ausbreitungseigenschaften*

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ist darüber hinaus ungünstigen Ausbreitungseigenschaften ausgesetzt, die sich in ausgeprägter Mehrwegeausbreitung und damit verbundenem Small-Scale Fading des Signals, Abschattungen und einem hohen Pfadverlust im vorgesehenen Frequenzbereich bei 5,9 GHz manifestieren [108, 114]. In Abschnitt 4.3 wird auf die Eigenschaften des Funkkanals näher eingegangen.

*Broadcast-Natur sicherheitsrelevanter Kommunikation*

Des Weiteren wohnt auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation basierenden kooperativen Sicherheitsanwendungen die gemeinsame Eigenschaft inne, dass die zu diesem Zweck erzeugten Nachrichten in der Regel sicherheitsrelevante Informationen enthalten, die potentiell für sämtliche Empfänger in der näheren Umgebung des Senders von Bedeutung sind. Dies gilt insbesondere für CAMs. Daher werden diese periodisch generierten Nachrichten grundsätzlich als Broadcast-Frames übertragen und somit von jeder empfangenden Station verarbeitet, ohne dass innerhalb der MAC-Teilschicht eine Adressfilterung stattfindet. Stattdessen bewertet der Facilities Layer der empfangenden Station die Relevanz der Nutzdaten sämtlicher empfangenen CAMs und führt auf dieser Grundlage eine Aggregation der Daten durch. Diese *Broadcast-Natur* sicherheitsrelevanter Nachrichten und des für die Frameübertragung vorgesehenen ITS-G5 Control Channels (siehe Abschnitt 2.2.8) führt aus verschiedenen Gründen, die nachfolgend kurz zusammengefasst werden, zu besonderen Herausforderungen im Hinblick auf die Übertragungszuverlässigkeit [55, 76, 139, 158, 172].

*Keine Übertragungswiederholung bei Frameverlust*

Zunächst entfällt aufgrund der Broadcast-Adressierung der gesendeten Datenframes das auf Acknowledgment-Frames (ACK-Frames) gestützte Bestätigungsverfahren von IEEE 802.11 und infolgedessen, da Übertragungsfehler vom Sender nicht erkannt werden können (vgl. Abschnitt 2.2.4.3), die Möglichkeit zur Wiederholung fehlgeschlagener CAM-Übertragungen. Die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung wird dadurch im Vergleich zur Übertragung von Unicast-Frames herabgesetzt. Eine Übertragungswiederholung periodischer CAM-Broadcasts wäre aber ohnehin nur eingeschränkt zweckmäßig, da sich die damit verbundenen Verzögerungen negativ auf die Aktualität der gesendeten Statusdaten auswirken und spätestens mit der Erzeugung der nächsten CAM die Nutzdaten der fehlgeschlagenen Übertragung veraltet und somit aus Anwendungssicht wertlos sind.

*Keine Vergrößerung des Contention Windows*

Im Zusammenhang mit der unbestätigten Broadcast-Übertragung kann außerdem keine Vergrößerung des Contention Windows (CW) durchgeführt werden, wie sie das in Abschnitt 2.2.4.3 erläuterte Binary Exponential Back-off Verfahren als Reaktion auf fehlgeschlagene Übertragungsversuche von Unicast-Frames vorsieht. Bei der Übertragung von CAMs und anderer sicherheitsrelevanter Nachrichten in VANETs gilt daher für die Größe des Contention Windows stets  $CW = CW_{min}$ . Somit steht der einzig wirksame Mechanismus, den die DCF vorsieht, um einer Überlastung des Netzes entgegenzuwirken, für periodische CAM-Broadcasts nicht zur Verfügung. Um Skalierbarkeitsproblemen in VANETs zu begegnen, muss daher eine Anpassung des Contention Windows an die Netzlast – sofern sich diese Maßnahme als zweckmäßig erweist – ebenso wie die Anpassung weiterer Parameter in Abhängigkeit anderer messbarer Einflussfaktoren erfolgen.

Zudem folgt aus der Broadcast-Natur der übermittelten Nachrichten, dass in Ermangelung einer individuellen Zieladresse das RTS/CTS-Verfahren, welches dazu dient, dem Hidden-Station-Problem entgegenzuwirken, nicht angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.4.4). Periodische Broadcast-Kommunikation in VANETs weist daher im Vergleich zu herkömmlichen IEEE 802.11 Netzen eine höhere Anfälligkeit gegenüber durch Hidden Stations verursachten Interferenzen und daraus resultierenden Framekollisionen auf.

*Kein RTS/CTS-Handshake*

Das ebenfalls in Abschnitt 2.2.4.4 kurz erläuterte Exposed-Station-Problem, welches die Performanz von Unicast-Kommunikation in herkömmlichen IEEE 802.11 WLANs einschränkt, hat in VANETs hingegen keinerlei Relevanz, sofern ausschließlich Broadcast-Frames übertragen werden. Dies folgt aus der dem Exposed-Station-Problem zugrunde liegenden Annahme, dass eine zeitlich parallele Frameübertragung zweier Stationen zweckmäßig ist, wenn die dabei infolge von Kollisionen verlorenen Frames für die betroffenen Empfänger ohnehin nicht von Bedeutung sind. Diese Annahme gilt jedoch nicht für die Übertragung von Broadcast-Frames, die per Definition für sämtliche Empfänger relevant sind [158].

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4.3 dargelegt wurde, sieht die IEEE 802.11 Standardspezifikation vor, dass jede Station im direkten Anschluss an eine eigene Broadcast-Übertragung eine Backoff-Prozedur durchführt, welche in diesem Fall als Post-Backoff bezeichnet wird. Dies gilt auch dann, wenn zum Zeitpunkt des Übertragungsendes kein weiterer Frame derselben Station auf eine Übertragung wartet. Ist der Post-Backoff vor der Ankunft des nächsten zu übertragenden Frames abgeschlossen und erkennt die Station nach Ankunft dieses nächsten zu übertragenden Frames für die Dauer eines AIFS ein freies Medium, erlaubt der Standard einen direkten Übertragungsbeginn ohne erneute Durchführung der Backoff-Prozedur. Diese Situation, in der ein Medienzugriff ohne unmittelbar vorangegangene Backoff-Prozedur erfolgt, kann eine Erhöhung der Kollisionswahrscheinlichkeit zur Folge haben. Ihr Auftreten ist in Verbindung mit periodischen CAM-Broadcasts aufgrund der vergleichsweise großen zeitlichen Abstände zwischen den Erzeugungszeitpunkten aufeinanderfolgender Nachrichten besonders wahrscheinlich.

*Post-Backoff*

Darüber hinaus ergeben sich aus der hohen Variabilität der Verkehrsdichte besondere Herausforderungen im Hinblick auf die Dienstgüte und Performanz von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs. So muss eine zuverlässige Frameübertragung sowohl auf einer wenig befahrenen Kreisstraße als auch bei sehr dichtem Verkehr auf einer Autobahn mit mehreren Richtungsfahrtstreifen möglich sein.

*Variabilität der Verkehrsdichte*

Der erstgenannte Fall impliziert eine geringe Netzlast und erfordert eine möglichst hohe Kommunikationsreichweite, sodass eine hohe Sendeleistung, ein robustes Modulations- und Kodierschema sowie eine hohe Nachrichtenerzeugungsrate zweckmäßig erscheinen. Der zweite genannte Fall hingegen ist mit deutlich abweichenden Anforderungen verbunden, denn zur Erzielung eines möglichst hohen Sicherheitsgewinns ist mittelfristig ein möglichst großer Anteil mit entsprechenden Kommunikationssystemen ausgerüsteter Fahrzeuge im Straßenverkehr anzustreben. Geht man von einem solchen Zustand aus, ergibt sich im zweiten genannten Fall eine hohe Belastung des Kommu-

nikationsnetzes in Verbindung mit einem vergleichsweise geringen Abstand zwischen benachbarten Stationen. Unter diesen Bedingungen erscheinen daher eine geringere Sendeleistung, eine höhere Datenrate sowie eine geringere Nachrichtenerzeugungsrate zweckmäßig, um eine Entlastung des Netzes herbeizuführen, Interferenzen zu reduzieren und Kollisionen zu vermeiden.

Das Technische Komitee für ITS des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnormen (ETSI) hat die Notwendigkeit einer Begrenzung der Netzlast in VANETs erkannt und für ITS-G5-Stationen mit der in Abschnitt 2.2.6 dargestellten ETSI Technical Specification (TS) 102 687 [49] eine Reihe von Maßnahmen zur dezentralen Überlaststeuerung (DCC) als Teil der ITS-Referenzarchitektur spezifiziert. Neuere Simulationsstudien zeigen jedoch, dass die in ETSI TS 102 687 definierten Mechanismen in Verbindung mit der vorgesehenen Parametrierung von Sendeleistung, Erzeugungsintervall, Datenrate und Carrier-Sense-Schwellenwert bei hoher Auslastung des Netzes keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern [30].

#### 2.4 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

*Skalierbarkeits-  
problematik in  
VANETs*

Die Untersuchung der zuvor skizzierten *Skalierbarkeitsproblematik in VANETs*, deren negative Auswirkungen sich insbesondere bei hoher Netzlast manifestieren, steht im Zentrum des Interesses der vorliegenden Arbeit. Die Entwicklung effektiver Mechanismen zur Bewältigung von Überlastsituationen erfordert zunächst ein möglichst detailliertes Verständnis und insbesondere eine belastbare und möglichst exakte Quantifizierung netzlastabhängiger Effekte, welche sich auf die Dienstgüte des Kommunikationsnetzes auswirken.

Ein unverzichtbares Hilfsmittel für die Gewinnung entsprechender Erkenntnisse über die Performanz von VANETs stellt die simulationsgestützte Bewertung verschiedener Netzkonfigurationen dar. Die Validität der dabei gewonnenen Ergebnisse hängt jedoch maßgeblich von der Qualität des zugrunde liegenden Simulationsmodells ab.

Nach einer Diskussion *verwandter Forschungsarbeiten* im nächsten Kapitel befasst sich das vierte Kapitel der vorliegenden Arbeit daher mit der *Modellierung periodischer Broadcast-Kommunikation* in VANETs. Das wesentliche Ziel des vierten Kapitels und der darin vorgestellten Arbeitsergebnisse ist die Bereitstellung eines Simulationsmodells, welches die für die Leistungsbewertung des Netzes relevanten Bedingungen und Charakteristika von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation realitätsnah abbildet, sowie einer darauf aufbauenden Simulationsumgebung, die eine aussagekräftige und reproduzierbare netzlastabhängige Leistungsbewertung erlaubt. Im Zentrum des Interesses stehen dabei

*Ausblick auf die  
folgenden Kapitel,  
Zielsetzung und  
Forschungsfragen*

- die Ableitung eines empirisch validierten Ausbreitungsmodells für die im weiteren Verlauf der Untersuchungen fokussierte Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnszenarien,
- die Modellierung der Teilnehmersmobilität in Form des Fahrzeugverkehrs,

- die Definition von Metriken für eine umfassende Leistungsbewertung des Kommunikationsnetzes und
- die Implementierung einer Simulationsumgebung, welche eine realitätsnahe Modellierung mit einer leistungsfähigen Auswertungsmethodik verbindet.

Unter Verwendung des im vierten Kapitel vorgestellten Modellierungs- und Simulationskonzeptes widmet sich das fünfte Kapitel dieser Arbeit anschließend der *simulationsgestützten Leistungsbewertung* periodischer Broadcast-Kommunikation in VANET-Autobahnscenarien. Fokussiert werden insbesondere Skalierbarkeitsaspekte und netzlastabhängige Effekte unterschiedlicher Modellierungs- und Kommunikationsparameter. Dabei stehen folgende Forschungsfragen im Vordergrund:

- Wie leistungsfähig sind auf ETSI ITS-G5 basierende VANETs im Zusammenhang mit der Übermittlung periodischer CAM-Broadcasts?
- Wie wirkt sich die gegebene Netzlast quantitativ auf Empfangswahrscheinlichkeiten, Verzögerungen und sonstige Metriken zur Charakterisierung der Dienstgüte aus?
- Welchen Einfluss haben das zugrunde liegende Ausbreitungsmodell und andere Modellierungsaspekte auf die Simulationsergebnisse?
- Welche netzlastabhängigen Auswirkungen haben konfigurierbare Kommunikationsparameter wie Sendeleistung, Datenrate, Nachrichtenerzeugungsrate, Carrier-Sense-Schwellenwert und Größe des Contention Windows auf die Performanz des Netzes?
- In welchem Maße eignet sich eine Anpassung dieser unterschiedlichen Kommunikationsparameter zur Bewältigung von Skalierbarkeitsproblemen und welche Parametrierung ist dazu zweckmäßig?

Das sechste und letzte Kapitel schließt die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem kurzen Ausblick ab.



In diesem dritten Kapitel wird ein Überblick über verwandte Forschungsarbeiten gegeben. Die Darstellung konzentriert sich dabei auf ausgewählte Literaturquellen, die einen besonderen inhaltlichen Bezug zu den im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussierten Fragestellungen aufweisen. Von hervorzuhebender Bedeutung sind in diesem Kontext Untersuchungen periodischer Single-Hop-Broadcasts in VANETs auf Basis von ITS-G5 und IEEE 802.11p, ihre netzlastabhängige Leistungsbewertung sowie die Beurteilung und Handhabung von Überlastsituationen, insbesondere im Hinblick auf die in Kapitel 5 betrachteten Autobahnszenarien.

### 3.1 LEISTUNGSBEWERTUNG PERIODISCHER BROADCASTS IN VANETS

Eine Reihe von Arbeiten widmet sich der Dienstgütebewertung und der Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation unter Verwendung der Funkstandards ETSI ITS-G5 bzw. IEEE 802.11p. Grundsätzlich stehen zu diesem Zweck drei verschiedene Ansätze zur Verfügung: Analytische Modelle, Feldtests und Simulationen. Während jedoch analytische Modelle wegen der komplexen Wechselwirkungen zwischen hoher Teilnehmersmobilität, Funkausbreitung und Medienzugriffsverfahren in VANETs deren Gegebenheiten nur signifikant vereinfacht beschreiben können, erlauben Feldtests insbesondere die Gewinnung von aussagekräftigen Erkenntnissen über netzlastabhängige Effekte nicht mit vertretbarem Aufwand. In der Literatur wird daher überwiegend auf Simulationsstudien zurückgegriffen.

#### 3.1.1 *Simulationsstudien*

Von wegweisendem Charakter für die Leistungsbewertung auf IEEE 802.11 basierender Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation sind die Simulationsstudien von Torrent Moreno et al. [141, 170, 171, 172, 174, 176], welche sich auf die Untersuchung von IEEE 802.11p in Autobahnszenarien konzentrieren. Die Autoren nutzen zur Durchführung der Simulationen den Netzwerksimulator NS-2, wobei die Implementierung der IEEE 802.11 betreffenden Module des Simulators signifikant überarbeitet wurde, um die Realitätsnähe des Simulationsmodells zu verbessern [25]. Die dem Verkehr auf deutschen Autobahnen nachempfundene Teilnehmersmobilität wird durch Verkehrstrajektorien nachgebildet, die zuvor von einem mikroskopischen Verkehrsflusssimulator erzeugt wurden.

*Torrent Moreno  
et al.*

Torrent Moreno et al. verwenden zur Quantifizierung der Performanz periodischer Single-Hop-Broadcasts in Autobahnszenarien die Metriken *Channel Busy Time (CBT)*, *Channel Access Time (CAT)* sowie insbesondere die distanzab-

hängige *Packet Delivery Rate (PDR)*<sup>1</sup>, auf deren Auswertung ein wesentlicher Schwerpunkt liegt, und untersuchen den Einfluss von Fading, Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate und Verkehrsdichte<sup>2</sup>. Die Ergebnisse der Simulationsstudien offenbaren bei erhöhter Netzlast eine maßgebliche Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Netzes durch Framekollisionen. In diesem Zusammenhang zeigen die Autoren auch die Existenz einer *robusten Reichweite gegen Hidden Stations* auf, welche sich deutlich auf die PDR auswirkt, und leiten aus diesen Erkenntnissen einen signifikanten Einfluss von Hidden Stations auf die Kollisionshäufigkeit ab. Darüber hinaus kommen Torrent Moreno et al. zu dem Ergebnis, dass im Falle erhöhter Netzlast durch eine Reduzierung der Sendeleistung die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung erheblich gesteigert werden kann [141, 170, 171, 172, 174, 176].

ElBatt et al.

ElBatt et al. [32] präsentieren eine detaillierte Simulationsstudie auf Grundlage des Netzwerksimulators QualNet [127], in der sie die Leistungsfähigkeit von IEEE 802.11p unter Fokussierung des Use Cases Cooperative Forward Collision Warning (siehe Abschnitt 2.1.1) bewerten. Zu diesem Zweck wird ein Autobahnzenario mit vier Fahrstreifen je Fahrtrichtung untersucht, wobei eine Konfiguration mit einer äußerst hohen Verkehrsdichte von annähernd 1200 Fz./km im Zentrum des Interesses steht und sämtliche Fahrzeuge periodisch Statusnachrichten mit einer vergleichsweise geringen Länge von 100 Bytes als Single-Hop-Broadcast übertragen. Betrachtet werden insbesondere der Einfluss verschiedener Sendeleistungen und Nachrichtenerzeugungsraten [32].

Um die Performanz der Nachrichtenübermittlung aus Applikationssicht zu veranschaulichen, verwenden ElBatt et al. eine als *Packet Inter-Reception Time (IRT)* bezeichnete Metrik und werten diese in Abhängigkeit der Simulationszeit aus. Die IRT beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen dem erfolgreichen Empfang zweier Statusnachrichten eines ausgewählten Senders durch einen ausgewählten Empfänger und spiegelt somit sowohl die Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate als auch der Häufigkeit von Paketverlusten wider. Aufgrund der Anforderungen des betrachteten Use Cases beschränken sich die Auswertungen dabei auf Nachrichten, die von einem in Fahrtrichtung gesehen unmittelbar benachbart zum Empfänger positionierten Sender und somit aus sehr geringer Distanz empfangen wurden [32].

Die auf diese Weise gewonnenen Simulationsergebnisse offenbaren erwartungsgemäß, dass durch eine Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate oder der Sendeleistung das Interferenzniveau verringert und somit die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Frameempfangs erhöht werden kann. Darüber hinaus zeigen die Autoren, dass aufgrund der negativen Korrelation zwischen Erzeugungsverzögerung und Kollisionshäufigkeit eine optimale Nachrichtenerzeugungsrate existiert, die eine Minimierung der IRT bewirkt [32].

---

<sup>1</sup>Zur Definition dieser und weiterer Metriken siehe Abschnitt 4.4.

<sup>2</sup>Als *Verkehrsdichte  $\rho$*  wird im Kontext der vorliegenden Arbeit nicht etwa die Dichte des Datenverkehrs, sondern stets die in Fahrzeugen pro Kilometer (Fz./km) gemessene Dichte des Fahrzeugverkehrs bezeichnet.

Eichler [31] untersucht unter Verwendung verschiedener EDCA-Prioritätsklassen die Performanz von IEEE 802.11p bzw. WAVE (vgl. Abschnitt 2.2.1) im Hinblick auf den erzielbaren Durchsatz sowie Kollisionswahrscheinlichkeiten und Ende-zu-Ende Delays bei unterschiedlicher Netzlast. Zu diesem Zweck wird einerseits ein einfaches analytisches Modell, andererseits eine Simulationsstudie auf Basis von OMNeT++ genutzt. Im Ergebnis stellt Eichler in Anbetracht hoher Verzögerungen und Kollisionswahrscheinlichkeiten fest, dass WAVE trotz EDCA-Priorisierung bei hoher Teilnehmerdichte ohne weitergehende Maßnahmen nicht in der Lage ist, eine zuverlässige Übermittlung sicherheitsrelevanter und zeitkritischer Nachrichten sicherzustellen [31].

Eichler

Jiang et al. [86] stellen eine als *Communication Density* (Kommunikationsdichte) bezeichnete Metrik zur Quantifizierung der Netzlast bei periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs vor, welche als Produkt aus Verkehrsdichte, Nachrichtenerzeugungsrate und Kommunikationsreichweite definiert wird. In einer Simulationsstudie auf Basis des Netzwerksimulators NS-2 untersuchen die Autoren periodische Single-Hop-Broadcasts unter Nutzung von IEEE 802.11p in einem einfachen, eindimensionalen und statischen Szenario für verschiedene Parameterkombinationen bei konstanter Größe der übertragenen Frames. Die Ergebnisse offenbaren zum einen, dass sich aus Parameterkombinationen, die durch gleiche Werte der Communication Density gekennzeichnet sind, gleiche Verteilungen der CAT ergeben. Zum anderen resultiert aus Konfigurationen mit gleicher Communication Density, sofern diese darüber hinaus in der verwendeten Sendeleistung und damit in der sich ergebenden Kommunikationsreichweite übereinstimmen, auch ein identischer distanzabhängiger Verlauf der PDR [86].

Jiang et al.

In einer weiteren auf NS-2 basierenden Simulationsstudie widmen sich Jiang et al. der wichtigen Frage der optimalen Wahl der Datenrate bei periodischer IEEE 802.11p Broadcast-Kommunikation [87]. Dazu verwenden die Autoren wie zuvor ein eindimensionales, statisches VANET-Szenario und greifen wiederum auf das Konzept der Communication Density zurück, um die Netzlast zu quantifizieren. Untersucht werden die im Standard definierten Datenraten von 3 Mbps bis 12 Mbps (vgl. Tabelle 2 in Abschnitt 2.2.5) im Hinblick auf den Distanzverlauf der PDR bei unterschiedlicher Nachrichtenlänge und Communication Density. Die Auswirkungen der Datenrate auf die Netzlast werden dabei durch eine Anpassung der Sendeleistung kompensiert, d. h. bei einer Erhöhung der Datenrate wird gleichzeitig die Sendeleistung so weit erhöht, dass sich ceteris paribus ein identisches Interferenzniveau ergibt. Zu diesem Zweck wird das Interferenzniveau anhand der innerhalb einer Gruppe von Referenzstationen beobachteten PDR bewertet, wobei die Konfiguration der Referenzstationen unverändert bleibt. Die Auswertungen der Simulationen zeigen, dass für die überwiegende Mehrheit der betrachteten Konfigurationen eine Datenrate von 6 Mbps zu den besten Ergebnissen führt. Lediglich im Falle sehr niedriger bzw. sehr hoher Netzlast resultiert aus einer Datenrate von 4,5 Mbps bzw. 9 Mbps eine noch höhere PDR [87].

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die Erkenntnisse von Jiang et al. nur in sehr eingeschränktem Maße Rückschlüsse darüber erlauben, ob und inwiefern sich eine Anpassung der Datenrate zur Überlaststeuerung in

VANETs eignet. Die Autoren weisen zwar darauf hin, dass durch eine Erhöhung der Datenrate das gegebene Interferenzniveau grundsätzlich verringert wird - dieser Entlastungseffekt wird im Rahmen der von den Autoren gewählten Methodik jedoch durch eine Erhöhung der Sendeleistung kompensiert und ist somit nicht Bestandteil der Auswertung [87]. Dies gilt in umgekehrter Form auch für eine Reduzierung der Datenrate, welche bei geringer Netzlast zweckmäßig sein kann. Die Auswirkungen unterschiedlicher Datenraten auf das Interferenzniveau und die Zuverlässigkeit periodischer Broadcasts in VANETs werden daher in Abschnitt 5.5.3 dieser Arbeit näher untersucht.

Schmidt-Eisenlohr

Schmidt-Eisenlohr konzentriert sich in späteren Arbeiten [139, 140] auf die simulationsbasierte Bewertung der Leistungsfähigkeit von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen bei der periodischen Verbreitung von Broadcast-Statusnachrichten unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Multi-User-Interferenzen. Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit wird dabei die Metrik *lokale Broadcast-Kapazität*  $C_{LB}(R_b, \rho, r, p)$  eingeführt. Diese wird definiert als maximale Datenmenge pro Zeiteinheit, die jede einzelne Station in einem Szenario mit einer Verkehrsdichte  $\rho$  unter Verwendung einer Brutto-Datenübertragungsrate  $R_b$  auf das gemeinsam genutzte Medium unter Einhaltung der Nebenbedingung übertragen darf, dass mindestens der Anteil  $p$  aller innerhalb einer *Awareness Range* genannten Entfernung  $r$  gesendeten Nachrichten erfolgreich empfangen werden kann.<sup>3</sup>

Die extensive Simulationsstudie von Autobahnszenarien verschiedener Verkehrsdichten, die Schmidt-Eisenlohr in [139] vorstellt, stützt sich auf den Simulator NS-2 und beinhaltet eine Sensitivitätsanalyse bzgl. verschiedener Konfigurationsparameter (Nachrichtenlänge, Nachrichtenerzeugungsrate und Sendeleistung) im Hinblick auf verschiedene Metriken wie CAT und PDR. Dabei werden erfolgreich und nicht erfolgreich empfangene Frames jeweils verschiedenen Unterkategorien zugeordnet, die einen detaillierteren Einblick in das Verhalten des Netzes erlauben. Darüber hinaus ermittelt Schmidt-Eisenlohr aus sämtlichen Parameterkombinationen aller Simulationsruns die maximal erreichbare lokale Broadcast-Kapazität  $C_{LB}$ , welche zum Vergleich der Performanz der verschiedenen Konfigurationen dient, da sie die zulässige erzeugte Netzlast unter Wahrung der Zuverlässigkeitsanforderungen der Anwendung quantifiziert. Eine Maximierung der lokalen Broadcast-Kapazität wird daher gleichgesetzt mit einer optimalen Nutzung des Netzes.

Im Ergebnis stellt Schmidt-Eisenlohr unter anderem fest, dass Multi-User-Interferenz die Zuverlässigkeit des Netzes durch das Auftreten von Framekollisionen in erheblichem Maße herabsetzt. Als Ursache für hohe Kollisionswahrscheinlichkeiten werden insbesondere zu hohe Sendeleistungen bei hoher Netzlast sowie die Auswirkungen des ausgeprägten Fadings in VANETs auf den Carrier-Sense-Mechanismus angeführt [139, 140].

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse von Schmidt-Eisenlohr [139, 140] führen An et al. [2] eine weitergehende Sensitivitätsanalyse bezüglich

An et al.

<sup>3</sup>Bei der Darstellung verwandter Arbeiten werden diejenigen Formelzeichen verwendet, welche auch in den übrigen Abschnitten dieser Arbeit Verwendung finden und welche von den in der referenzierten Quelle verwendeten Formelzeichen abweichen können.

der Auswirkungen von Verkehrsdichte, Nachrichtenerzeugungsrate, Sendeleistung, Paketlänge und Fading-Intensität auf die PDR durch. Dabei stellen die Autoren einen signifikanten Einfluss bereits geringfügiger Änderungen der untersuchten Parameter auf die PDR insbesondere dann fest, wenn das Netz an der Grenze seiner Belastbarkeit betrieben wird oder die Entfernung zwischen Sender und Empfänger annähernd der maximalen Kommunikationsreichweite entspricht.

Kloiber et al. bewerten die Auswirkungen unterschiedlicher Verkehrsdichten und Nachrichtenerzeugungsraten auf die periodische Verbreitung von Single-Hop Broadcast-Statusnachrichten in einem Autobahnzenario auf Grundlage des *Update Delays* [95, 96]. Diese bereits in [131] in ähnlichem Zusammenhang vorgeschlagene Metrik wird definiert als zeitlicher Abstand zwischen dem Empfang zweier Nachrichten eines bestimmten Senders aus Sicht eines Empfängers und ist somit eng verwandt mit der von ElBatt et al. [32] verwendeten Packet Inter-Reception Time (siehe Seite 48). Die Verwendung von Update Delays bezweckt die Quantifizierung der Aktualität der lokal verfügbaren Statusinformationen über die Umgebung des Empfängers, wobei sowohl Einflüsse variierender Nachrichtenerzeugungsraten als auch variierender Paketverlusthäufigkeiten widergespiegelt werden. In Abschnitt 4.4 wird näher auf Definition und Eigenschaften dieser Metrik eingegangen.

*Kloiber et al.*

Mittag [109, 112] stellt eine von ihm entwickelte Simulationsumgebung vor, welche die Modellierung des Funkkanals, der Bitübertragungsschicht (PHY) und der Medienzugriffsteuerung (MAC) von IEEE 802.11p in sich vereint, und präsentiert darauf aufbauend eine umfassende Simulationsstudie zur Leistungsbewertung periodischer Broadcasts in VANETs. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt dabei auf einer detaillierten Abbildung des PHYs: Im Gegensatz zu herkömmlichen Netzwerksimulatoren stellt nicht das einzelne Paket bzw. der einzelne Frame die kleinste Einheit der Untersuchung dar, sondern das übertragene Signal wird als Folge von diskreten, komplexen Abtastwerten (Samples) modelliert, welche die Amplitude und Phase des Signals beschreiben. Ein einzelnes OFDM-Symbol wird dabei durch eine Folge von 80 Zeitsamples repräsentiert. Die Implementierung basiert auf dem Netzwerksimulator NS-3 [117] und der Kanalmodellierung, Signalverarbeitung und weitere Aspekte der PHY-Simulation umfassenden C++Bibliothek IT++ [85].

*Mittag*

Dieser Ansatz erlaubt Mittag eine Modellierung der Signalverarbeitung innerhalb des PHYs und damit die Realisierung eines in diesem Bereich zuvor nicht gekannten Detaillierungsgrades. Gleiches gilt für die Modellierung der Funkausbreitung: Neben herkömmlichen Pfadverlustmodellen und stochastischen Modellen zur Charakterisierung von Large-Scale und Small-Scale Fading greift Mittag, um eine Nachbildung des zeit- und frequenzselektiven Charakters des Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Funkkanals zu ermöglichen, auf verschiedene in der Literatur vorgeschlagene Tapped-Delay Line Modelle [1] zurück und integriert zur Überwindung der WSSUS-Annahme<sup>4</sup> außerdem ein

---

<sup>4</sup>Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering (WSSUS)

geometriebasiertes stochastisches Kanalmodell in die Simulationsumgebung, das von Karedal et al. [90] vorgeschlagen wurde [109, 112].

Allerdings ist dieser sehr detaillierte Modellierungsansatz mit einem äußerst hohen Rechenaufwand bei der Durchführung der Simulationen verbunden, der mit einer bis zu 7000-fachen Vervielfachung gegenüber herkömmlichen NS-3 Simulationen auf Paketebene beziffert wird. Im Hinblick auf die Simulationsergebnisse, welche die Performanz von IEEE 802.11p in Autobahnszenarien quantifizieren, kommt Mittag zu der Schlussfolgerung, dass weder die Verwendung von Tapped-Delay Line Modellen noch die geometriebasierte stochastische Modellierung fundamentalen Einfluss besitzen, vielmehr liefere ein Rückgriff auf *Flat Fading* und gängige stochastische Modelle wie Rayleigh Fading (siehe Abschnitt 4.3.2) in Verbindung mit Simulationen auf Paketebene annähernd gleichwertige Ergebnisse [109].

Im Rahmen seiner simulationsgestützten Charakterisierung von Paketkollisionen in VANETs beschränkt Mittag die Modellierung des Funkkanals daher auf Rayleigh Fading in Verbindung mit einem Log-Distance Pfadverlustmodell (vgl. Gl. 4.18 in Abschnitt 4.3.1) und bewertet auf dieser Grundlage die Auswirkungen von Shadowing und Fading sowie verschiedener Paketlängen, Sendeleistungen und Nachrichtenerzeugungsraten auf periodische Single-Hop Broadcast-Kommunikation. Auf eine Modellierung der Teilnehmermobilität in Form des Fahrzeugverkehrs wird dabei jedoch verzichtet [109].

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen einen signifikanten Einfluss von Fading auf die Performanz des Netzes. Darüber hinaus stellt Mittag unter anderem fest, dass durch eine Reduzierung der Erzeugungsrate die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung im Überlastfall signifikant verbessert werden kann, während eine Reduzierung der Sendeleistung – entgegen der Erkenntnisse von Schmidt-Eisenlohr [139] und Torrent-Moreno [170, 176] – diesbezüglich keine zufriedenstellende Wirkung zeigt [109].

Sjöberg et al. [15, 16, 151, 152, 153, 154] schlagen die Verwendung von *Self-Organizing Time Division Multiple Access (STDMA)* zur Steuerung des Medienzugriffs in VANETs vor und vergleichen anhand einer Reihe von Simulationsstudien die Leistungsfähigkeit von STDMA auf der einen und dem sowohl IEEE 802.11p als auch ITS-G5 zugrunde liegenden CSMA/CA (siehe Abschnitt 2.2.4.3) auf der anderen Seite.

STDMA ist ein dezentrales Medienzugriffsverfahren, das für die periodische Broadcast-Übertragung von Statusnachrichten einheitlicher und konstanter Länge entwickelt wurde und auf Zeitschlitzern basiert, deren Länge an die Übertragungsdauer einer Nachricht angepasst ist. Dabei prüfen die Stationen den Belegungszustand sämtlicher Zeitschlitz, die in einem sich wiederholenden Zeitrahmen festgelegter Länge zusammengefasst werden, und wählen für den regelmäßig erfolgenden Kanalzugriff zufallsbasiert einen freien Zeitschlitz. Findet eine Station keinen freien Zeitschlitz vor, verwendet sie für ihre Übertragung denjenigen Zeitschlitz, der durch die am weitesten entfernt positionierte Station belegt ist, um die dadurch verursachte Interferenz so gering wie möglich zu halten. Zu diesem Zweck greifen die Stationen auf die in den übermittelten Nachrichten enthaltenen Positionsdaten des Senders zurück. STDMA erfordert darüber hinaus eine zeitliche

Synchronisierung der Zeitschlitze unter den Stationen, die über ein Satellitennavigationssystem, z. B. über das *Global Positioning System (GPS)*, zur Verfügung gestellt werden muss.

In ihren Untersuchungen betrachten Sjöberg et al. periodische Single-Hop-Broadcasts in Autobahnscenarien unterschiedlicher Netzlast mit fünf bzw. sechs Fahrstreifen je Fahrtrichtung und stützen ihre Untersuchungen auf ein MATLAB-Simulationsmodell. Die durchgeführten Simulationsstudien beruhen auf verschiedenen Ausbreitungsmodellen unterschiedlichen Detaillierungsgrads: Während in früheren Veröffentlichungen [15, 16, 154] lediglich angenommen wird, dass sämtliche übertragenen Frames innerhalb eines festgelegten Radius fehlerfrei empfangen werden, greifen die Autoren in späteren Veröffentlichungen [151, 152, 153] auf detailliertere Modellierungsansätze auf Basis eines Dual-Slope Pfadverlustmodells zurück (siehe Abschnitt 4.3.1).

Auf dieser Basis vergleichen Sjöberg et al. die Performanz von CSMA/CA und STDMA für verschiedene Nachrichtenerzeugungsraten und Paketlängen unter anderem anhand der Metriken CAT, PDR und Update Delay. Dabei wird hervorgehoben, dass die Verwendung von CSMA/CA insbesondere bei hoher Netzlast grundsätzlich mit Kanalzugriffszeiten unbegrenzter Höhe verbunden sein kann, sodass zu übertragende Frames vor Übertragungsbeginn vom Sender verworfen werden können (Frame Drops), während STDMA im Hinblick auf die CAT die Einhaltung einer deterministischen Obergrenze gewährleistet und somit Frame Drops verhindert. Die Simulationsergebnisse zeigen für die untersuchten Parameterkombinationen einerseits eine höhere Zuverlässigkeit von STDMA im Vergleich zu CSMA/CA bei mittlerer und großer Entfernung zwischen Sender und Empfänger<sup>5</sup>, andererseits jedoch niedrigere mittlere Kanalzugriffszeiten bei Verwendung von CSMA/CA – auch bei hoher Netzlast [151, 152]. Außerdem kommen die Autoren zu dem Schluss, dass Hidden Stations die Performanz periodischer Single-Hop-Broadcasts für beide Medienzugriffsverfahren *nicht* signifikant beeinflussen [153].

Offen bleibt in diesem Zusammenhang, wie sich Synchronisierungsfehler, unvollständige Informationen über die Fahrzeugpositionen und den Belegungszustand der Zeitschlitze, die Verwendung unterschiedlicher Datenraten oder die Übertragung unterschiedlicher Nachrichtenformate und Nachrichtenlängen auf einem gemeinsamen Kanal auf die Leistungsfähigkeit von STDMA im Vergleich zu CSMA/CA auswirken.

### 3.1.2 Analytische Modelle

Analytische Modelle können zur mathematisch exakten Beschreibung der Leistungsfähigkeit von VANETs genutzt werden, müssen jedoch aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Prozesse, insbesondere im Hinblick auf Medienzugriffsverfahren, Funkausbreitung und Teilnehmermobilität, in der Regel von signifikant vereinfachenden Annahmen ausgehen. Um die ver-

---

<sup>5</sup>Sämtliche untersuchten Konfigurationen basieren dabei auf einer vergleichsweise geringen Größe des Contention Windows ( $CW = 3$  bzw.  $CW = 7$ ) und einer Sendeleistung  $P_t = 20$  dBm.

wendeten Ansätze, die damit zusammenhängenden Annahmen und Unterschiede zum im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfolgten Simulationskonzept zu verdeutlichen, werden im Folgenden ausgewählte Arbeiten, die auf analytischen Modellen basieren, in zusammengefasster Form dargestellt.

*Schmidt-Eisenlohr*

Für die lokale Broadcast-Kapazität  $C_{LB}$  (siehe Abschnitt 3.1.1, Seite 50) leitet Schmidt-Eisenlohr sowohl eine theoretische Obergrenze  $C_{LB,max}$  als auch eine theoretische Untergrenze  $C_{LB,wc}$  analytisch her [139, 140]. In beiden Fällen wird eine konstante Datenrate  $R_b$  sowie eine Reihe starker Vereinfachungen bzgl. des Szenarios zugrunde gelegt. Unter Annahme einer homogenen eindimensionalen Stationsverteilung der Dichte  $\rho$ , eines idealen Kanals mit der Kommunikations- und Interferenzreichweite  $r$ , die gleichzeitig der geforderten Awareness Range entspricht, sowie eines perfekt koordinierten Medienzugriffs, d. h. alle Nachrichten können unmittelbar aufeinanderfolgend und stets kollisionsfrei übertragen werden, errechnet sich eine theoretische Obergrenze für die lokale Broadcast-Kapazität von

$$C_{LB,max}(R_b, \rho, r, p) = \frac{R_b}{2\rho r}.$$

Zur Berechnung einer theoretischen Untergrenze für  $C_{LB}$  werden zusätzlich eine von der Awareness Range  $r$  abweichende Kommunikationsreichweite  $r'$ , in welcher ein Frame ohne das Vorkommen von Interferenzen erfolgreich empfangen werden kann, und eine Interferenzreichweite  $r''$  angenommen. Die Interferenzreichweite  $r''$  beschreibt dabei den Radius um einen Empfänger, innerhalb dessen ein zweiter Sender im Falle einer zeitlich überlappenden Übertragung eine Kollision am Empfänger hervorruft. Darüber hinaus wird von einem vollkommen unkoordinierten Medienzugriff als Worst-Case Szenario sowie von exponentialverteilten Intervallen zwischen den Übertragungsstartzeitpunkten ausgegangen. Für den Spezialfall, dass  $r'' = r$  gilt, also die Interferenzreichweite der geforderten Awareness Range entspricht, kann so die lokale Broadcast-Kapazität

$$C_{LB,wc}(R_b, \rho, r, p) = \frac{R_b}{2\rho r} \cdot \left(-\frac{\ln p}{4}\right) = C_{LB,max}(R_b, \rho, r, p) \cdot \left(-\frac{\ln p}{4}\right)$$

hergeleitet werden, wobei  $p$  den Mindestanteil erfolgreich empfangener Nachrichten bezeichnet [139, 140].

Wegen der zugrunde liegenden Annahmen, die in beiden Fällen eine starke Abstraktion des VANET-Kommunikationsszenarios darstellen, handelt es sich bei den ermittelten Grenzen um Extremfälle, welche die Performanz des Netzes unter realen Bedingungen nur unzureichend beschreiben. Außerdem stellt Schmidt-Eisenlohr fest, dass weitere Anforderungen der Anwendung, wie z. B. maximal tolerierbare Verzögerungen bei der Übertragung oder maximal tolerierbare Zeitabstände zwischen empfangenen Nachrichten eines Senders, als zusätzliche Nebenbedingungen berücksichtigt werden müssen [139, 140].

*Brakemeier*

Brakemeier präsentiert in [17] eine umfangreiche analytische Untersuchung von Broadcast-Kommunikation in VANETs. In einem ersten Teil modelliert der Autor das gesamte Netz als Wartesystem, dem ein Poisson-Ankunfts-

prozess mit gegebener mittlerer Ankunftsrate und ein deterministischer Bedienprozess zugrunde liegen. Das Modell geht davon aus, dass, sofern sich mindestens ein Frame im Wartesystem befindet, pro Zeitschritt der Länge  $T_{pkt}$  genau ein Frame übertragen wird. Dabei setzt sich

$$T_{pkt} = T_{air} + T_{ca} \quad (3.1)$$

zusammen aus der Übertragungsdauer  $T_{air}$  eines Frames und der mittleren angenommenen Kanalzugriffszeit

$$T_{ca} = T_{AIFS} + T_{slot} \cdot \frac{CW_{min}}{2} \quad (3.2)$$

mit der Dauer  $T_{AIFS}$  eines AIFS, der Länge eines Zeitschlitzes  $T_{slot}$  und der in Zeitschlitz gemessenen minimalen Größe des Contention Windows  $CW_{min}$ . Die mittlere Ankunftsrate des angenommenen Poisson-Ankunftsprozesses beschreibt die Sendewünsche, welche insgesamt von den Stationen erzeugt werden, die sich innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  voneinander befinden.

Ausgehend von diesen Annahmen wird eine Markov-Kette entwickelt, deren Zustand  $Q_n$  die diskrete Anzahl  $n$  von Frames beschreibt, die innerhalb von  $d_{cs}$  in den Ausgangspuffern der Stationen auf eine Übertragung warten und somit um den Medienzugriff konkurrieren. Für dieses Wartesystem werden die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten  $P_n$  in Abhängigkeit der mittleren Ankunftsrate und der Framelänge berechnet. Aufgrund des angenommenen deterministischen Bedienprozesses errechnet sich im Zustand  $Q_n$  für den Fall  $n \geq 2$  die Wartezeit eines Frames als

$$T_{wait}(Q_n) = T_{ca} + \frac{T_{pkt}}{2} + (n-1)T_{pkt} \quad , \quad (3.3)$$

sodass sich aus den Zustandswahrscheinlichkeiten  $P_n$  unmittelbar die Verteilung der Wartezeiten im System ableiten lässt.

Die Annahme eines deterministischen Bedienprozesses mit konstanter Bediendauer  $T_{pkt}$  beinhaltet allerdings eine weitgehende Abstraktion der DCF-Medienzugriffsprozedur. Ein einfaches Aufsummieren der in  $T_{pkt}$  enthaltenen Werte für  $T_{ca}$  entspricht nicht der Realität, da nach den Regeln von CS-MA/CA sämtliche über einen Sendewunsch verfügenden Stationen im Falle eines als frei erkannten Mediums simultan ihr Backoff-Intervall dekrementieren (vgl. Abschnitt 2.2.4.3). In diesem Zusammenhang ist einerseits mit einem niedrigeren mittleren residuellen Backoff-Intervall als  $T_{slot} \cdot CW_{min}/2$  zu rechnen, andererseits tritt in der Realität die Wartezeit  $T_{AIFS}$  nach jeder Belegphase des Mediums erneut auf.

Ausgehend von den oben skizzierten Zustandswahrscheinlichkeiten  $P_n$  leitet Brakemeier unter Anwendung einer Binomialverteilung außerdem die Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund eines zeitgleichen Übertragungsbeginns in Abhängigkeit der mittleren Ankunftsrate und der Framelänge her. Funkausbreitungseffekte, Auswirkungen von Hidden Stations sowie Physical Layer Capture (PLC) bleiben dabei unberücksichtigt.

In einem zweiten Teil nutzt Brakemeier ein Log-Distance Pfadverlustmodell<sup>6</sup> zur Charakterisierung des Funkkanals, d. h. die von der Distanz  $d$  zwi-

Modellierung als  
Wartesystem

Zustandsabhängige  
Wartezeit

<sup>6</sup>siehe hierzu Abschnitt 4.3.1, Seite 86.

schen Sender und Empfänger abhängige Empfangsleistung  $P_r(d)$  wird beschrieben als

$$P_r(d) = \frac{P_r(d_0)}{d^\alpha} \quad (3.4)$$

mit dem Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha$  und der Empfangsleistung  $P_r(d_0)$  für eine Referenzdistanz  $d_0 = 1$  m mit

$$P_r(d_0) = P_t \cdot \frac{\lambda^2 G}{16\pi^2} \quad , \quad (3.5)$$

wobei  $P_t$  die Sendeleistung,  $G$  den Antennengewinn und  $\lambda$  die der Trägerfrequenz entsprechende Wellenlänge bezeichnen. Daraus ergibt sich unter Annahme eines Schwellenwertes für den Carrier-Sense-Mechanismus (Carrier-Sense-Threshold) die Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$ , innerhalb welcher eine laufende Übertragung von anderen Teilnehmern detektiert werden kann.

Auf dieser Basis stellt der Autor in [17] außerdem eine analytische Untersuchung der Wahrscheinlichkeit durch Hidden Stations verursachter Kollisionen vor. Zu diesem Zweck wird eine eindimensionale Netztopologie angenommen, bei der sich das sendende Fahrzeug TX ohne Einschränkung der Allgemeinheit an der Position  $x_{TX} = 0$ , der designierte Empfänger RX an der Position  $x_{RX}$  mit  $0 < x_{RX} \leq d_{cs}$  und eine Hidden Station HS an der Position  $x_{HS}$  befinden. Für den Fall zeitlich überlappender Übertragungen des sendenden Fahrzeugs und einer Hidden Station ergibt sich unter Verwendung von Gl. 3.4 am Empfänger ein *Signal to Interference Ratio (SIR)* von

$$SIR_{HS}(x_{RX}, x_{HS}) = \frac{P_r(x_{RX})}{P_r(x_{HS} - x_{RX})} = \frac{|x_{HS} - x_{RX}|^\alpha}{|x_{RX}|^\alpha} = \left| \frac{x_{HS}}{x_{RX}} - 1 \right|^\alpha. \quad (3.6)$$

Daraus lässt sich mit  $d_{cs}$  als minimal möglicher Entfernung einer Hidden Station zum sendenden Fahrzeug und dem Schwellenwert  $SIR_{th}$ , der für einen fehlerfreien Frameempfang am Empfänger mindestens erreicht werden muss, die gegenüber Hidden Stations robuste Entfernung  $d_{robHS}$  zwischen Sender und Empfänger ableiten, innerhalb derer Hidden Stations keine Kollisionen verursachen können:

$$SIR_{Th} = \left( \frac{d_{cs}}{d_{robHS}} - 1 \right)^\alpha \Leftrightarrow d_{robHS} = \frac{d_{cs}}{SIR_{th}^{\frac{1}{\alpha}} + 1}. \quad (3.7)$$

Brakemeier nimmt eine netzweit konstante Channel Busy Time  $\gamma$  an, die als zeitlicher Anteil definiert wird, währenddessen durch den Carrier-Sense-Mechanismus ein belegter Kanal detektiert wird.

Um die Wahrscheinlichkeit einer durch Hidden Stations verursachten Kollision bestimmen zu können, geht Brakemeier außerdem davon aus, dass durch den Carrier-Sense-Mechanismus innerhalb von Distanzintervallen der Länge  $d_{cs}$  höchstens eine Hidden Station zeitgleich sendet. Daher werden die Intervalle  $[k \cdot d_{cs}, (k+1) \cdot d_{cs}]$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  der Länge  $d_{cs}$  zunächst isoliert voneinander betrachtet und drei Bereiche unterschieden, in denen sich Hidden Stations befinden können:

- Basic Hidden Station Range mit  $d_{cs} \leq x_{HS} \leq 2d_{cs}$

Wahrscheinlichkeit  
von Hidden-Station-  
Kollisionen

Gegenüber Hidden  
Stations robuste  
Entfernung  $d_{robHS}$

- Extended Hidden Station Range mit  $x_{HS} > 2d_{cs}$
- Opposite Hidden Station Range mit  $x_{HS} < -d_{cs}$

Für jeden dieser drei Bereiche berechnet Brakemeier zunächst separat unter vereinfachenden Annahmen die Wahrscheinlichkeit einer durch eine Hidden Station verursachten Kollision in Abhängigkeit der Empfängerposition  $x_{RX}$ . Die daraus resultierende Gesamtwahrscheinlichkeit, die der Autor unter Verwendung eines iterativen Näherungsverfahrens berechnet, ergibt sich als Wahrscheinlichkeit der Vereinigung der nicht paarweise disjunkten Ereignisse, die das Auftreten einer Hidden-Station-Kollision in den einzelnen Distanzintervallen beschreiben [17].

Wie jedes analytische Modell beruht der dargestellte Ansatz von Brakemeier auf einer Reihe abstrahierender Annahmen. So wird neben einer vereinfachten Modellierung von Funkausbreitung und Frameempfang beispielsweise angenommen, dass Übertragungen von Hidden Stations innerhalb unterschiedlicher Distanzintervalle unabhängig voneinander erfolgen. Dies entspricht jedoch wegen des Einflusses des Carrier-Sense-Mechanismus in benachbarten Intervallen nicht der Realität. Darüber hinaus wird die Wahrscheinlichkeit einer durch Hidden Stations hervorgerufenen Kollision trotz vorhandener Abhängigkeiten isoliert von auf andere Weise verursachten Frameverlusten betrachtet. Auch berücksichtigt der gewählte Ansatz nicht, dass Kollisionen in der Realität durch kumulative Interferenzen mehrerer interferierender Übertragungen verursacht werden können.

Insgesamt liefert der von Brakemeier in [17] vorgestellte Ansatz somit einen wertvollen Beitrag zur Abschätzung der durch Hidden Stations verursachten Kollisionen, zur allgemeinen Bewertung der Leistungsfähigkeit des Netzes sind jedoch darüber hinausgehende Untersuchungen notwendig.

Fallah et al. stellen in [58] ein umfangreiches Modell zur analytischen Leistungsbewertung von VANETs in einem eindimensionalen Autobahnszenario vor. In Anlehnung an den Modellierungsansatz von Bianchi [14] verwenden die Autoren mehrere Markov-Ketten, um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung (entspricht nach der Terminologie der vorliegenden Arbeit der PDR, d. h. dem Anteil erfolgreich übertragener Frames) sowie die Rate der erfolgreich übertragenen Frames (definiert als Anzahl der erfolgreich übertragenen Frames pro Zeiteinheit) in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Sender und Empfänger zu ermitteln. Dabei unterscheidet sich das von Fallah et al. entwickelte Modell von analytischen Modellen der DCF früherer Arbeiten [14, 21, 166] im Wesentlichen durch drei für die Kommunikation in VANETs charakteristische Eigenschaften:

*Fallah et al.*

- Die Stationen senden ausschließlich Broadcast-Frames, d. h. Acknowledgments (ACKs), Übertragungswiederholungen sowie RTS- und CTS-Frames kommen nicht vor,
- es wird vom Nicht-Sättigungsfall ausgegangen, d. h. die Warteschlangen der einzelnen Stationen sind nicht zu jedem Zeitpunkt mit mindestens einem Frame gefüllt,

- Auswirkungen der aufgrund des nicht-idealen Funkkanals vorhandenen Hidden Stations werden innerhalb des Modells berücksichtigt.

Der Backoff-Prozess sowie die Wartephase einer Station werden zu diesem Zweck als Markov-Kette modelliert, die aus den aktuellen Wert des Backoff-Zählers repräsentierenden Zuständen sowie einem zusätzlichem Wartezustand besteht (siehe Abbildung 10). Dabei bezeichnet  $P_a$  die Wahrscheinlichkeit, dass der Wartezustand  $a$  verlassen wird und  $CW$  die Größe des Con-

Modellierung des  
Backoff-Prozesses als  
Markov-Kette

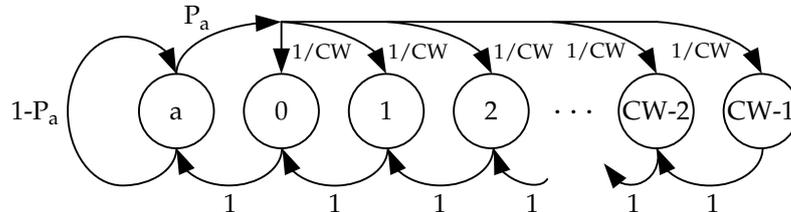


Abbildung 10: Markov-Kette zur Beschreibung des Backoff-Prozesses sowie der Wartephase einer Station in [58]

tention Windows. Es werden diskrete Zeitschritte der Länge  $T_{vs}$  (Virtual Slot Time) angenommen mit

$$T_{vs} = P_{busy} \cdot T_{busy} + P_{idle} \cdot T_{slot} , \quad (3.8)$$

wobei  $T_{slot}$  die Dauer eines (freien) Zeitschlitzes,  $T_{busy}$  die mittlere Dauer einer Kanalbelegung sowie  $P_{idle}$  und  $P_{busy}$  die Wahrscheinlichkeiten bezeichnen, dass durch den Carrier-Sense-Mechanismus ein freier bzw. belegter Kanal detektiert wird. Zur Modellierung der Sendewünsche einer einzelnen Station wird ein Poisson-Prozess mit der Erzeugungsrate  $R$  genutzt und angenommen, dass nur die jeweils aktuellste Statusnachricht in der Warteschlange einer Station gesendet werden muss, sodass

$$P_a = 1 - e^{-R \cdot T_{vs}} \quad (3.9)$$

gilt. Die stationäre Zustandswahrscheinlichkeit  $b_0$ , dass sich die Markov-Kette aus Abbildung 10 im Zustand 0 befindet, entspricht der Wahrscheinlichkeit  $\tau$ , dass eine bestimmte Station in einem gegebenen Zeitschritt mit der Übertragung eines Frames beginnt und ergibt sich als

$$\tau = b_0 = \frac{1}{\frac{1}{P_a} + \frac{CW+1}{2}} . \quad (3.10)$$

Bei der Abschätzung der mittleren Kanalbelegungsdauer  $T_{busy}$  berücksichtigen die Autoren, dass diese aufgrund der durch Hidden Stations entstehenden zeitlichen Überlappungen mehrerer Frames größer als die mittlere Übertragungsdauer eines einzelnen Frames ist. Dieser Effekt wird durch eine weitere Markov-Kette modelliert, deren Zustände die Anzahl aufeinanderfolgender überlappender Übertragungen beschreiben.

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass vor dem Übertragungsende eines Frames die Übertragung eines weiteren Frames beginnt, wird vereinfachend angenommen, dass die  $k$  für eine die Belegungsdauer verlängernde Übertragung in Frage kommenden Hidden Stations jeweils mit der Rate

Abschätzung der  
mittleren Kanalbe-  
legungsdauer

$R_a = \tau/T_{vs}$  unabhängig voneinander senden und die Übertragungen einem Poisson-Prozess der aggregierten Rate  $k \cdot R_a$  folgen. Um  $k$  berechnen zu können, wird von einer Gleichverteilung der Fahrzeuge innerhalb der eindimensionalen Autobahntopologie ausgegangen, sodass sich bei einer angenommenen konstanten Kommunikations- und Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  und einer konstanten Fahrzeugdichte  $\rho$  die Anzahl  $N_{cs}$  von Fahrzeugen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite einer Station als  $N_{cs} = 2 \cdot \rho \cdot d_{cs}$  ergibt.

Dieser Annahme folgend wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger in Fahrzeugen gemessen und  $k$  als Anzahl der Stationen definiert, die weiter als  $d_{cs}$  vom Sender, jedoch nicht weiter als  $d_{cs}$  vom Empfänger einer Übertragung positioniert sind, sodass für einen  $u$  Fahrzeuge vom Sender entfernten Empfänger  $k = u$  gilt. Hieraus berechnen die Autoren in Verbindung mit der zugrunde gelegten Markov-Kette die erwartete Länge einer durch Hidden Stations verursachten Kollision für einen  $u$  Fahrzeuge entfernten Empfänger und durch Mittelwertbildung über sämtliche in Betracht kommenden Entfernungen bis zur Carrier-Sense-Reichweite die mittlere Belegungsdauer  $T_{busy}$ .

Ein weiterer Beitrag von [58] zur Modellierung des Einflusses von Hidden Stations auf die Performanz des Netzes liegt in der Berücksichtigung des *Silencing Effektes* der Hidden Stations: Da ein Teil der benachbarten Stationen eines Senders durch Übertragungen von Hidden Stations davon abgehalten wird, auf den Kanal zuzugreifen, verringert sich die Anzahl der innerhalb des Intervalls der Länge  $2 \cdot d_{cs}$  um den Mediengriff konkurrierenden Stationen. Dieser Effekt wird durch einen den Anteil der aktiven Stationen beschreibenden Faktor  $\mu$  berücksichtigt, sodass für die Wahrscheinlichkeit  $P_{busy}$ , die zur Ermittlung der Länge eines Zeitschrittes

*Silencing Effekt  
durch  
Hidden Stations*

$$T_{vs} = P_{busy} \cdot T_{busy} + (1 - P_{busy}) \cdot T_{slot} \quad (3.11)$$

benötigt wird, der folgende Zusammenhang gilt:

$$P_{busy} = 1 - (1 - \tau)^{\mu N_{cs}} \quad (3.12)$$

Zur Ermittlung von  $\mu$  wird die Wahrscheinlichkeit  $P_{notSil}(i)$  herangezogen, dass eine  $i$  Fahrzeuge vom Sender entfernte Station nicht durch eine Übertragung einer Hidden Station davon abgehalten wird, selbst eine Übertragung zu beginnen. Der Faktor  $\mu$  ergibt sich als Mittelwert von  $P_{notSil}(i)$  über alle Stationen in der Nachbarschaft eines Senders:

$$\mu = \frac{1}{N_{cs}} \cdot \sum_{i=-N_{cs}/2, i \neq 0}^{N_{cs}/2} P_{notSil}(i) \quad (3.13)$$

Um  $P_{notSil}(i)$  zu bestimmen, nutzen die Autoren eine weitere Markov-Kette (siehe Abbildung 11), deren Zustände die Belegung zeitlich aufeinanderfolgender Zeitschlitze der Länge  $T_{slot}$  abbilden. Aus dem Zustand *idle*, welcher einen unbelegten Zeitschlitz repräsentiert, geht die Markov-Kette mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{tr}(i) = 1 - (1 - \tau)^i$ , dass mindestens eine von  $i$  Hidden Stations eine Übertragung beginnt, in den ersten von  $L = \frac{T_p}{T_{slot}}$  Belegzustän-

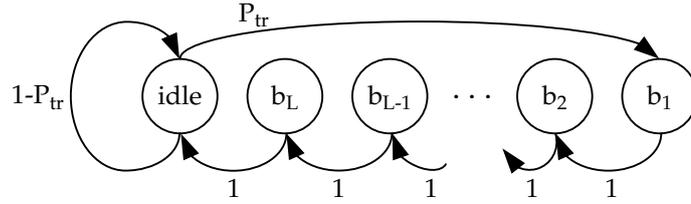


Abbildung 11: Markov-Kette zur Modellierung des Belegungszustandes aufeinanderfolgender Zeitschlitz in [58]

den über, wobei  $T_p$  die Übertragungsdauer eines Frames bezeichnet. Da die stationäre Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands  $b_1$ , welche sich als

$$b_1 = \frac{P_{tr}(i)}{1 + L \cdot P_{tr}(i)} \quad (3.14)$$

ergibt, die Wahrscheinlichkeit eines Übertragungsbeginns in einem Zeitschlitz beschreibt, folgt

$$P_{notSil}(i) = \left(1 - \frac{P_{tr}(i)}{1 + L \cdot P_{tr}(i)}\right)^L \quad (3.15)$$

als Wahrscheinlichkeit, dass  $L$  Zeitschlitz vor Übertragungsbeginn der betrachteten Station kein Übertragungsbeginn einer Hidden Station die betrachtete Station von einer Übertragung abhält. Durch Einsetzen ergeben sich  $\mu$ ,  $P_{busy}$  und  $T_{vs}$ , woraus die Autoren die sogenannte *Rate of Attempt*  $R_a = \frac{\tau}{T_{vs}}$  ableiten, deren analytisch ermittelte Werte für Beispielfiguren mit Simulationsergebnissen verglichen werden.

Wahrscheinlichkeit  
einer erfolgreichen  
Übertragung

Um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung  $P_{succ}(u)$  an einen  $u$  Fahrzeuge entfernten Empfänger bestimmen zu können, unterscheiden die Autoren in [58] zwischen der Wahrscheinlichkeit  $P_{CC}$  einer durch eine innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  positionierte Station verursachten Kollision (CSMA-Kollision) und der Wahrscheinlichkeit  $P_{CH}$  einer durch eine Hidden Station verursachten Kollision, sodass der folgende Zusammenhang gilt:

$$P_{succ}(u) = (1 - P_{CC}(u)) (1 - P_{CH}(u)) \quad (3.16)$$

Wahrscheinlichkeit  
einer  
CSMA-Kollision

Ausgehend von der Annahme, dass sämtliche Stationen, deren Entfernung sowohl zum Sender als auch zum Empfänger kleiner als  $d_{cs}$  ist, am Empfänger eine Kollision durch gleichzeitigen Übertragungsbeginn in einem Zeitschlitz verursachen können (siehe  $S_C$  in Abbildung 12), ergibt sich die Anzahl dieser Stationen als  $N_{SC} = \rho (2d_{cs} - d)$ , wobei  $d$  die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bezeichnet. Wegen des oben beschriebenen Silencing Effektes der Hidden Stations ist auch hier nur der Anteil  $\eta$  der Stationen aktiv. Unter Nutzung des aus Gl. 3.13 bekannten Ansatzes ergibt sich

$$\eta(u) = \frac{1}{N_{SC}} \cdot \sum_{i=u-N/2, i \neq 0}^{N/2} P_{notSil}(i) \quad (3.17)$$

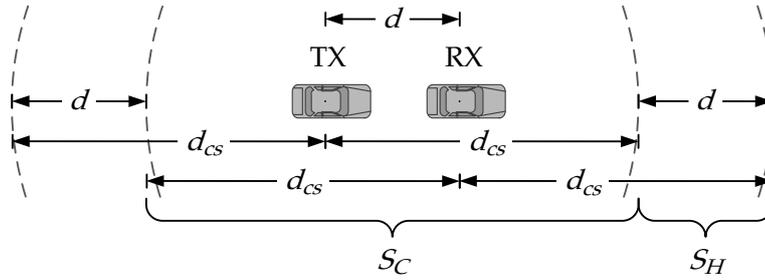


Abbildung 12: Geometrie des eindimensionalen Autobahnszenarios in [58]. Stationen in  $S_C$  erzeugen eine CSMA-Kollision, Stationen in  $S_H$  sind Hidden Stations bei einer Übertragung von TX an RX.

für einen  $u$  Fahrzeuge vom Sender entfernten Empfänger, sodass sich die Wahrscheinlichkeit einer CSMA-Kollision ermitteln lässt als

$$P_{CC}(u) = 1 - (1 - \tau)^{\eta N_{SC}} . \quad (3.18)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{CH}$  einer durch eine Hidden Station verursachten Kollision entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Hidden Station frühestens  $L = \frac{T_p}{T_{slot}}$  Zeitschlitze vor oder spätestens  $L$  Zeitschlitze der Länge  $T_{slot}$  nach Übertragungsbeginn des Senders mit der Übertragung eines Frames beginnt. Mit der Anzahl von Hidden Stations  $N_{SH} = \rho d = u$  für einen Empfänger in der  $u$  Fahrzeugen entsprechenden Entfernung  $d$  (siehe  $S_H$  in Abbildung 12) bei einer Fahrzeugdichte  $\rho$  ergibt sich unter Verwendung von Gl. 3.15

*Wahrscheinlichkeit  
einer Hidden-  
Station-Kollision*

$$P_{CH}(u) = 1 - \left(1 - \frac{P_{tr}(u)}{1 + L \cdot P_{tr}(u)}\right)^{2L} \quad (3.19)$$

mit  $P_{tr}(u) = 1 - (1 - \tau)^u$ . Einsetzen von Gl. 3.18 und Gl. 3.19 in Gl. 3.16 liefert die von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger abhängige Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung  $P_{succ}(u)$ .

Die mittlere Erfolgswahrscheinlichkeit einer Übertragung innerhalb der Kommunikationsreichweite folgt als

$$P_{succ} = \frac{N_{CS}}{2} \cdot \sum_{u=1}^{N_{CS}/2} P_{succ}(u) , \quad (3.20)$$

welche für Beispielkonfigurationen evaluiert und mit Simulationsergebnissen verglichen wird. Die von  $P_{succ}$  und der Rate of Attempt  $R_a$  abhängige Rate erfolgreicher Frame-Übertragungen  $R_{succ}$  errechnet sich daraus als

$$R_{succ} = P_{succ} \cdot R_a . \quad (3.21)$$

Darüber hinaus erweitern die Autoren in [58] das beschriebene Modell, welches bis zu diesem Punkt ausschließlich Aspekte der Medienzugriffssteuerung widerspiegelt, indem ein Log-Distance Pfadverlustmodell<sup>7</sup>, eine entfernungabhängige Paketfehlerrate sowie ein SIR-Schwellenwert  $SIR_{th}$  für einen fehlerfreien Frameempfang eingebunden werden. Unter Einbeziehung der Paketfehlerrate  $P_{PHY}(u)$  ergibt sich

$$P_{succ}(u) = (1 - P_{CC}(u)) (1 - P_{CH}(u)) (1 - P_{PHY}(u)) . \quad (3.22)$$

Außerdem werden in diesem erweiterten Modell zusätzlich zu den bisher berücksichtigten, innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite des Empfängers positionierten Hidden Stations auch außerhalb der Carrier-Sense-Reichweite positionierte Hidden Stations berücksichtigt, soweit deren Übertragungen eine für eine Kollision ausreichende Interferenzleistung am Empfänger erzeugen. Zur Ermittlung der Entfernung zum Empfänger, innerhalb derer Hidden Stations eine Kollision, also einen Frameempfang mit  $SIR < SIR_{th}$  verursachen können, nehmen die Autoren an, dass sich die kumulative Interferenz aus mehreren überlappenden Frames zusammensetzen kann. Die Anzahl überlappender Frames wird wiederum unter der vereinfachenden Annahme berechnet, dass die Übertragungen der in Betracht kommenden Stationen einem Poisson-Prozess folgen.

Abschließend vergleichen die Autoren die analytischen Ergebnisse des erweiterten Modells für  $P_{succ}$  ebenfalls anhand von Beispielkonfigurationen mit Simulationsergebnissen, wobei eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgestellt wird.

Insgesamt liefert das von Fallah et al. in [58] vorgestellte analytische Modell zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit und Rate erfolgreich übertragener Frames einen überaus wertvollen Beitrag zur Methodik der Leistungsbewertung in VANETs. Gleichwohl geht auch dieses Modell neben der eindimensionalen Netztopologie und der in der Realität nicht vorhandenen Gleichverteilung der Fahrzeugpositionen von einer Reihe weiterer Vereinfachungen aus. So wird einerseits zur besseren Handhabbarkeit des Modells angenommen, dass die Sendewünsche der einzelnen Stationen einem Poisson-Prozess folgen, während kooperative VANET-Anwendungen durch eine periodische Nachrichtenerzeugung geprägt sind, wie in Abschnitt 2.2.3 erläutert wurde. Andererseits setzt die Annahme eines Poisson-Prozesses für die von Hidden Stations übertragenen Frames eine aufgrund des Carrier-Sense-Mechanismus nicht gegebene Unabhängigkeit der Stationen untereinander voraus. Die in der Realität vorhandene robuste Entfernung eines Empfängers gegen Hidden Stations, welche sich aus der mit der Distanz zunehmenden Dämpfung der Interferenzleistung einer Hidden Station ergibt, wird trotz der Einbeziehung von Ausbreitungseffekten im erweiterten Modell nicht berücksichtigt. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben die Auswirkungen von Fading auf die Kollisionswahrscheinlichkeit sowie das von zeitgemäßen IEEE 802.11 Empfängern unterstützte Physical Layer Capture (PLC). Darüber hinaus ist für die Bewertung der Dienstgüte neben der Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung die Betrachtung entstehender Verzögerungen, insbesonde-

<sup>7</sup>siehe hierzu Abschnitt 4.3.1, Seite 86.

re verursacht durch den Medienzugriff, von Interesse, die hier nicht abgebildet werden.

Somit besteht weiterer Untersuchungsbedarf, dem die vorliegende Arbeit durch eine detaillierte Nachbildung periodischer Broadcast-Kommunikation auf Grundlage einer Kombination aus Verkehrsfluss- und Netzwerksimulation nachkommt, wie in den Kapiteln 4 und 5 im Detail ausgeführt wird.

### 3.2 ÜBERLASTSTEUERUNG IN VANETS

Eine übermäßig hohe Netzlast und das damit verbundene erhöhte Interferenzniveau können in VANETs auf Basis von ITS-G5 oder IEEE 802.11 zu signifikanten Beeinträchtigungen der Dienstgüte führen, die mit Framekollisionen, zunehmenden Verzögerungen und Frame Drops einhergehen. Um die Mindestanforderungen bestimmter ITS-Anwendungen, insbesondere kooperativer Sicherheitsanwendungen, erfüllen zu können, sind daher eine Begrenzung der Netzlast und eine Vermeidung von Überlastsituationen notwendig (vgl. hierzu bereits Abschnitt 2.2.6). Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die Performanz periodischer Broadcasts in VANETs und den netzlastabhängigen Einfluss verschiedener Parameter dienen insbesondere der Entwicklung, Parametrierung und Optimierung effektiver Methoden zur Vermeidung und Bewältigung übermäßig hoher Netzlast.

In der Literatur ist in den letzten Jahren eine Reihe von Ansätzen zur üblicherweise als *Congestion Control* bezeichneten Überlaststeuerung in VANETs vorgeschlagen worden [147]. Obwohl der Entwurf entsprechender Verfahren und Algorithmen nicht unmittelbarer Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, soll daher im Folgenden ein kurzer Überblick über ausgewählte Arbeiten auf diesem Gebiet gegeben werden.

Eine systematische Übersicht bezüglich in Betracht kommender Ansätze zur Überlaststeuerung in VANETs präsentieren Zhang et al. [186]. Die Autoren betonen die Notwendigkeit dezentral gesteuerter Verfahren und schlagen eine Quantifizierung der Netzlast auf Grundlage der Channel Busy Time (CBT) vor<sup>8</sup>. Zur Reduzierung der Netzlast werden drei grundlegende Ansätze identifiziert:

Zhang et al.

- Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate,
- Reduzierung der Sendeleistung,
- Reduzierung der Übertragungsdauer.

Die letztgenannte Reduzierung der Übertragungsdauer kann dabei zum einen durch eine Erhöhung der Brutto-Datenübertragungsrate, zum anderen durch eine Reduzierung der Framelänge erreicht werden. Im Ergebnis heben Zhang et al. hervor, dass bezüglich der Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze auf die Dienstgüte in VANETs erheblicher Forschungsbedarf besteht [186].

---

<sup>8</sup>Zur Definition der Channel Busy Time siehe Abschnitt 4.4.4.

Torrent-Moreno et al.

Torrent-Moreno et al. [170, 173, 175, 176] gehören zu den ersten Autoren, die die Notwendigkeit zur Begrenzung der durch periodische CAM-Broadcasts verursachten Netzlast in VANETs erkannt haben. Zu diesem Zweck legen die Autoren einen als *Maximum Beaconing Load (MBL)* bezeichneten Schwellenwert fest, dessen Überschreitung durch eine Anpassung der zur Übertragung von CAMs<sup>9</sup> verwendeten Sendeleistung (Transmit Power Control, TPC) verhindert werden soll, um Übertragungsressourcen für ereignisgesteuerte Warnnachrichten (DENMs, siehe Abschnitt 2.2.2) zu reservieren.

Dabei bezeichnet die in bit/s gemessene *Beaconing Load* bezogen auf eine ausgewählte betrachtete Station die aggregierte Datenmenge pro Zeiteinheit, die in Form von CAMs von denjenigen Stationen übertragen wird, innerhalb deren Carrier-Sense-Reichweite sich die betrachtete Station befindet. Darüber hinaus nehmen die Autoren einheitliche und konstante Nachrichtenerzeugungsraten und Paketgrößen an, sodass die Beaconing Load als Anzahl sendender Stationen innerhalb eines durch die Sendeleistung festgelegten Bereichs gemessen werden kann. Die zu diesem Zweck erforderliche Berechnung der Carrier-Sense-Reichweite erfolgt auf Basis des vereinfachten Two-Ray Ground Pfadverlustmodells (siehe Gl. 4.16 in Abschnitt 4.3.1).

In einem ersten Ansatz entwerfen die Autoren einen als *FPAV*<sup>10</sup> bezeichneten zentralisierten Algorithmus [170, 173], der auf einem einfachen Prinzip unter Annahme vollständiger Information beruht: Ausgehend von der geringsten konfigurierbaren Sendeleistung erhöhen sämtliche Stationen synchron in Schritten festgelegter und einheitlicher Größe ihre Sendeleistung, bis die Beaconing Load an einem Punkt im Netz die festgelegte MBL überschreitet. FPAV bewirkt eine Einhaltung der MBL-Bedingung und zugleich eine Maximierung der minimalen Sendeleistung, die von den verschiedenen Stationen zur Übertragung von CAMs verwendet wird.

Um eine Implementierung in realen Netzen zu ermöglichen, erweitern Torrent-Moreno et al. diesen Ansatz zu einem dezentralen Algorithmus mit der Bezeichnung *D-FPAV*<sup>11</sup> [170, 175, 176]. D-FPAV sieht vor, dass jede Station die Positionsdaten sämtlicher benachbarter Stationen überwacht, die sich innerhalb ihrer maximalen (aus der größtmöglichen Sendeleistung resultierenden) Carrier-Sense-Reichweite befinden. Auf Grundlage dieser lokalen Sicht auf die Netztopologie führt jede Station individuell den FPAV-Algorithmus aus und errechnet unter Berücksichtigung des MBL-Schwellenwerts eine für die Stationen innerhalb der maximalen Carrier-Sense-Reichweite zulässige Sendeleistung, deren Wert anschließend an die benachbarten Stationen übermittelt wird. Jede Station wählt schließlich als Sendeleistung zur Übertragung von CAMs das Minimum der durch sie selbst errechneten und der durch benachbarte Stationen errechneten Sendeleistungen.

Zur Verteilung der erforderlichen Statusinformationen nutzt D-FPAV die periodisch erzeugten CAMs. Neben der eigenen Position und der nach dem FPAV-Algorithmus errechneten zulässigen Sendeleistung übermittelt jede

---

<sup>9</sup>Die periodisch erzeugten und als Broadcast übertragenen Statusnachrichten bezeichnen Torrent-Moreno et al. als *Beacons*. Im Folgenden wird jedoch die Terminologie der europäischen ITS-Protokollarchitektur (siehe Abschnitt 2.2.2) verwendet.

<sup>10</sup>*Fair Power Adjustment for Vehicular Environments (FPAV)*.

<sup>11</sup>*Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular Environments (D-FPAV)*.

Station in regelmäßigen Abständen zusätzlich die Positionen und errechneten Sendeleistungen der benachbarten Stationen innerhalb ihrer Carrier-Sense-Reichweite. Da diese zusätzlich zu übermittelnden Umgebungsinformationen signifikanten Overhead erzeugen, untersuchen Torrent-Moreno et al. verschiedene Konfigurationen im Hinblick auf den Umfang der zu übermittelnden Informationen und deren Übermittlungshäufigkeit [170, 175, 176].

Eine Weiterentwicklung von D-FPAV, die auf einer Unterteilung der Fahrzeugumgebung in Segmente einheitlicher Größe basiert, präsentieren Mittag et al. [110]. Der vorgeschlagene Algorithmus sieht zur Ermittlung der erforderlichen Umgebungsinformationen vor, dass statt individueller Positionen Histogramme übermittelt werden, welche die Anzahl benachbarter Stationen je Segment beschreiben. Dieser Ansatz erlaubt eine erhebliche Verringerung der zu übermittelnden Datenmenge und erzeugt bei vergleichbarer Zuverlässigkeit lediglich vernachlässigbaren Overhead [110].

*Mittag et al.*

Wischhof und Rohling [184] beschreiben ein Verfahren zur Überlaststeuerung in VANETs, das die Häufigkeit des Medienzugriffs einer Station durch das Einfügen von Wartezeiten zwischen aufeinanderfolgenden Übertragungen begrenzt. Dabei wird aus dem Nutzen der in der übermittelten Nachricht enthaltenen Information, der mithilfe einer anwendungsspezifischen Nutzenfunktion quantifiziert wird, eine relative Priorität errechnet, welche die Länge der einzufügenden Wartezeit und damit die in Anspruch genommenen Übertragungsressourcen bestimmt [184].

*Wischhof und Rohling*

Khorakhun et al. [93] vergleichen einen Algorithmus zur Regelung der Sendeleistung und einen sehr ähnlichen Algorithmus zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrate im Hinblick auf deren Eignung zur Begrenzung der Netzlast in VANETs. Zur Quantifizierung der Netzlast greifen die Autoren in beiden Fällen auf die Channel Busy Time (CBT) zurück, welche von den Stationen in regelmäßigen Abständen lokal gemessen wird.<sup>12</sup> Übersteigt die im vorausgegangenen Messintervall ermittelte CBT einen festgelegten Schwellenwert, reduziert der Algorithmus zur Sendeleistungsregelung die für die nächste Frameübertragung verwendete Sendeleistung durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor  $1 - \alpha$ , wobei  $0 < \alpha < 1$  gilt. Auf ein Unterschreiten des Schwellenwerts wird dementsprechend mit einer Erhöhung der Sendeleistung um den Faktor  $1 + \alpha$  reagiert. Der Algorithmus zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrate basiert auf demselben Ansatz: Bei Über- bzw. Unterschreiten des Schwellenwerts wird hier das Nachrichtenerzeugungsintervall durch Addition bzw. Subtraktion eines konstanten Werts  $\beta$  angepasst [93].

*Khorakhun et al.*

Um eine gleichmäßigere Verteilung der zur Verfügung stehenden Übertragungsressourcen unter den Stationen im Netz zu erreichen, ergänzen Khorakhun et al. den Algorithmus darüber hinaus um eine Orientierung am Mittelwert des zu regelnden Parameters. Im Fall der Sendeleistungsregelung fügt jede Station den aktuellen Wert der von ihr verwendeten Sendeleistung in den Header der übermittelten Pakete ein, sodass auf dieser Grundlage der Mittelwert der Sendeleistung unter den benachbarten Stationen berechnet werden kann. Erlaubt die Netzlast eine Erhöhung der Sendeleistung, so

<sup>12</sup>Zur Definition der Channel Busy Time siehe Abschnitt 4.4.4.

nimmt der Algorithmus diese nur dann vor, wenn die aktuell von der Station verwendete Sendeleistung kleiner als der berechnete Mittelwert ist. Im Hinblick auf eine Verringerung des Nachrichtenerzeugungsintervalls wird in derselben Weise verfahren [93].

*Busche et al.* Zwei verschiedene Weiterentwicklungen dieses Verfahrens präsentieren Busche et al. [18, 19]. Um ein stabileres Anpassungsverhalten zu erreichen, verwenden die vorgestellten Algorithmen statt einem einzigen CBT-Schwellenwert einen Minimal- und einen Maximalwert und definieren so einen Toleranzbereich der CBT.

Zunächst stellen die Autoren auf dieser Grundlage einen einfachen Algorithmus vor, welcher zur Regelung entweder der Nachrichtenerzeugungsrate oder der Sendeleistung einsetzbar ist [18]. Überschreitet die lokal gemessene CBT den festgelegten Maximalwert oder unterschreitet sie den festgelegten Minimalwert, so verringert bzw. vergrößert der Algorithmus die Nachrichtenerzeugungsrate (oder die Sendeleistung) um einen Schritt konstanter Größe. Liegt die gemessene CBT im Toleranzbereich zwischen den Schwellenwerten, erfolgt hingegen eine Anpassung, die sich am Mittelwert der Erzeugungsrate bzw. Sendeleistung der benachbarten Stationen orientiert [18].

In einem später vorgestellten Algorithmus zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrate erweitern Busche et al. diesen Ansatz dahingehend, dass ein Austausch der lokal gemessenen CBT-Werte unter den Stationen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite erfolgt. Auf dieser Basis wird eine „globale“ CBT als Maximum der lokal gemessenen Werte ermittelt und eine Erhöhung der Erzeugungsrate nur dann vorgenommen, wenn die globale CBT den festgelegten Minimalwert unterschreitet [19].

*Huang et al.* Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert wurde, bildet der als Cooperative Awareness bezeichnete Zustand, in dem jedes ausgerüstete Fahrzeug über den aktuellen Status der Fahrzeuge in seiner Umgebung informiert ist, die Grundlage einer Vielzahl von Anwendungen in VANETs. Huang et al. [72, 73, 74] konzentrieren ihre Untersuchungen daher auf die zu diesem Zweck erforderliche kontinuierliche Nachverfolgung des Bewegungszustands benachbarter Fahrzeuge (Tracking) und präsentieren verschiedene Algorithmen, die eine Steuerung der Nachrichtenerzeugungsrate in Abhängigkeit der Tracking-Genauigkeit ermöglichen.

Statt der Verwendung einer festgelegten Nachrichtenerzeugungsrate sehen diese Algorithmen vor, dass jede Station je Zeitschritt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Nachricht erzeugt. Diese Erzeugungswahrscheinlichkeit wächst mit der Zunahme des geschätzten Tracking-Fehlers, der die Differenz zwischen dem tatsächlichen Zustand des betrachteten Fahrzeugs und dem benachbarten Fahrzeugen bekannten Zustand dieses Fahrzeugs quantifiziert. Hierfür schätzt jede Station anhand der empfangenen Sequenznummern kontinuierlich die mittlere Fehlerrate aller empfangenen Frames und berechnet daraus einen Schätzwert des Tracking-Fehlers [72, 73, 74].

Um der Entstehung von Framekollisionen entgegenzuwirken, erweitern die Autoren die Steuerung der Nachrichtenerzeugungsrate außerdem um eine Berücksichtigung der aktuellen Netzlast. Zu diesem Zweck wird zusätzlich zum Tracking-Fehler die lokal gemessene CBT derart in die Berechnung

der Erzeugungswahrscheinlichkeit einbezogen, dass eine erhöhte Netzlast eine reduzierte Erzeugungswahrscheinlichkeit bewirkt [72, 74].

In einer anderen Veröffentlichung präsentieren Huang et al. einen ähnlichen Algorithmus, der eine anwendungsorientierte Steuerung der Nachrichtenerzeugungsrates mit einer netzlastabhängigen Regelung der Sendeleistung kombiniert [73]. Die Erzeugungswahrscheinlichkeit wächst ab Überschreitung eines tolerierbaren Schwellenwerts auch hier mit der Zunahme des geschätzten Tracking-Fehlers. Darüber hinaus führt der vorgeschlagene Algorithmus jedoch eine netzlastabhängige Anpassung der Sendeleistung auf Grundlage der lokal gemessenen CBT durch. Zu diesem Zweck werden Minimal- und Maximalwerte sowohl der CBT als auch der angestrebten Kommunikationsreichweite definiert. Innerhalb dieser festgelegten Grenzen erfolgt mit steigender CBT eine lineare Reduzierung der Kommunikationsreichweite, wobei auf Basis eines Pfadverlustmodells eine Zuordnung zwischen Reichweite und Sendeleistung festgelegt wird [73].

In Fortführung dieser Arbeiten konzentrieren Fallah et al. [57] ihre Untersuchungen auf die Frage, ob und wie die lokal gemessene CBT als indirekter Performanzindikator genutzt werden kann, um durch eine geeignete Anpassung der Kommunikationsreichweite oder der Nachrichtenerzeugungsrates die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs zu optimieren.

Fallah et al.

Zu diesem Zweck definieren die Autoren zunächst eine als *Information Dissemination Rate (IDR)* bezeichnete Performanzmetrik, welche die mittlere Anzahl von Frames beschreibt, die von einer Station pro Zeiteinheit erfolgreich an benachbarte Stationen übermittelt werden. Mithilfe von Simulationen, in welchen die Parameter Nachrichtenerzeugungsrates, Kommunikationsreichweite und Verkehrsdichte variiert werden, stellen Fallah et al. fest, dass der Wert der IDR – unabhängig von der konkreten Ausprägung der genannten Parameter – ceteris paribus eindeutig durch die sich ergebende CBT bestimmt wird. Für die gewählten Randbedingungen (Ausbreitungsmodell, Datenrate, Contention Window und weitere Einflussfaktoren) ergibt sich für einen CBT-Wert<sup>13</sup> von  $\gamma_{opt} = 0,7$  eine näherungsweise maximale IDR [57].

Ausgehend von dieser Erkenntnis entwerfen die Autoren einen an der Methodik zeitdiskreter Regelsysteme orientierten Algorithmus, der zur Regelung der CBT auf den Sollwert  $\gamma_{opt}$  dient. Dieser sieht vor, dass jede Station in diskreten Zeitschritten die lokal wahrnehmbare CBT misst und in Abhängigkeit der Abweichung vom Sollwert die als Stellgröße verwendete Kommunikationsreichweite nach der Formel

$$d_{k+1} = d_k + \eta \ln \left( \frac{1 - \gamma_k}{1 - \gamma_{opt}} \right) \quad (3.23)$$

anpasst, wobei  $d_k$  und  $\gamma_k$  die Kommunikationsreichweite und die CBT in Zeitschritt  $k$  bezeichnen. Darüber hinaus untersuchen die Autoren, wie der Parameter  $\eta$  zu wählen ist, damit einerseits die Stabilität des Regelkreises sowie andererseits eine hinreichend schnelle Konvergenz des Algorithmus gewährleistet sind [57].

<sup>13</sup>Bezugsgröße für die Berechnung der CBT ist dabei der Carrier-Sense-Schwellenwert [57].

Baldessari et al.

Auch Baldessari et al. [3] streben mit unterschiedlichen Lösungen eine Begrenzung der Netzlast in VANETs an und präsentieren einen Algorithmus zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrates (Improved Rate Control, kurz IRC), einen Algorithmus zur Steuerung der Sendeleistung (Improved Power Control, kurz IPC) sowie darauf aufbauend verschiedene kombinierte Verfahren, die eine Anpassung beider Parameter erlauben. Ziel der vorgestellten Algorithmen ist jeweils eine Begrenzung der durch periodische Broadcast-Kommunikation generierten Netzlast, quantifiziert durch die CBT  $\gamma$ , auf einen vorgegebenen Sollwert, den die Autoren mit  $\gamma_{th} = 0,2$  angeben.<sup>14</sup> Im Kern gehen die vorgeschlagenen Lösungen dabei von der vereinfachenden Grundannahme aus, dass die CBT sowohl mit der Anzahl  $n_{cs}$  von Stationen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite als auch mit der Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g$  linear anwächst [3].

Auf der Basis dieses linearen Zusammenhangs wählt der IRC-Algorithmus die Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g$  so, dass die zur Verfügung stehende Kanalbelegungs-dauer  $\gamma_{th}$  gleichmäßig auf die  $n_{cs} + 1$  Stationen verteilt wird. Deren geschätzte Anzahl wird zu diesem Zweck abgeleitet aus der zum Beobachtungszeitpunkt gegebenen CBT in Verbindung mit der zu diesem Zeitpunkt von benachbarten Stationen verwendeten mittleren Nachrichtenerzeugungsrates [3].

Ebenfalls ausgehend von der angenommenen Linearität bestimmt der IPC-Algorithmus unter Zugrundelegung einer festgelegten und einheitlichen Erzeugungsrates  $f_g$  zunächst eine maximal tolerierbare Anzahl von Stationen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite, die zur Erreichung des CBT-Sollwerts  $\gamma_{th}$  führen würde. Anhand der geschätzten Fahrzeugdichte wird daraus eine zulässige Kommunikationsreichweite berechnet und die Sendeleistung unter Annahme eines Freiraumausbreitungsmodells entsprechend konfiguriert [3].

Darüber hinaus legen Baldessari et al. einen Schwerpunkt ihrer Untersuchungen auf die Betrachtung verschiedener Kombinationen der beiden Algorithmen. Dies umfasst einerseits einen parallelen, voneinander unabhängigen Betrieb beider Algorithmen, andererseits eine sequentielle Ausführung, wobei der sekundäre Algorithmus erst zum Einsatz kommt, wenn der primäre Algorithmus bereits einen Minimalwert erreicht hat. Außerdem wird ein kombiniertes Verfahren vorgeschlagen, das unter Berücksichtigung der geschätzten Fahrzeugdichte sowie des CBT-Sollwerts  $\gamma_{th}$  verschiedene Kombinationen von Sendeleistung und Erzeugungsrates erlaubt. Die zulässige Sendeleistung einer Station orientiert sich dabei nicht nur an der eigenen, sondern an der maximalen von benachbarten Stationen verwendeten Nachrichtenerzeugungsrates [3].

Wang et al.

Wang et al. [180] untersuchen ein Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikationsszenario auf Basis von IEEE 802.11p und schlagen eine Anpassung des Contention Windows vor, die entweder in Abhängigkeit der zentral erfassten Anzahl konkurrierender Stationen oder in Abhängigkeit der dezentral gemessenen CBT erfolgen kann. Dabei zeigen die Autoren, dass die entwickelten Algorithmen durch eine stetige Vergrößerung des Contention Windows

<sup>14</sup>Bezugsgröße für die Berechnung der CBT ist auch hier der Carrier-Sense-Schwellenwert, der mit  $P_{r,cs} = -90$  dBm angenommen wird [3].

mit wachsender Netzlast eine deutliche Erhöhung des erzielbaren Netzdurchsatzes im Vergleich zum herkömmlichen Binary Exponential Backoff (vgl. Abschnitt 2.2.4.3) des IEEE 802.11 Standards erreichen. Gleichwohl besitzen diese Ergebnisse keine unmittelbare Aussagekraft für periodische Broadcast-Kommunikation in VANETs, da die Untersuchungen zum einen auf Unicast-Kommunikation mit Übertragungswiederholungen basieren, zum anderen ein Sättigungsfall betrachtet wird, in dem jede Station kontinuierlich über zu übertragende Daten verfügt [180].

Kaul et al. [92] präsentieren eine als *Information Age* bezeichnete Metrik zur Bewertung der Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs, welche das mittlere Alter der verfügbaren Statusdaten benachbarter Fahrzeuge aus der Perspektive des empfangenden Fahrzeugs beschreibt. Für eine bestimmte Kombination aus einem sendenden Fahrzeug  $u$  und einem empfangenden Fahrzeug  $v$  definieren die Autoren das Information Age  $\Delta_{uv}^t$  zu einem Beobachtungszeitpunkt  $t$  als Zeitdauer, die zwischen der Erzeugung derjenigen Statusdaten von  $u$ , die zuletzt von  $v$  erfolgreich empfangen wurden, und dem Beobachtungszeitpunkt  $t$  vergangen ist. Durch Mittelwertbildung über sämtliche Beobachtungszeitpunkte  $t$ , Sender  $u$  und Empfänger  $v$  wird hieraus eine netzweite Performanzmetrik errechnet [92].

Kaul et al.

Auf dieser Grundlage konzentrieren Kaul et al. ihre Untersuchungen auf die Frage, wie im Falle hoher Netzlast das bei periodischer Broadcast-Kommunikation auftretende Information Age minimiert und dadurch die Dienstgüte des Netzes maximiert werden kann. Mithilfe einer Simulationsstudie kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass in realen Systemen auf Basis von IEEE 802.11 eine Vergrößerung des Contention Windows allein zu diesem Zweck nicht geeignet ist. Insbesondere wird dabei herausgearbeitet, dass eine Verwendung der durchsatzmaximierenden Größe des Contention Windows, wie sie Bianchi [14] für den Sättigungsfall in IEEE 802.11 Netzen herleitet, in diesem Kontext keine akzeptablen Ergebnisse liefert. Anschaulich begründet wird diese Erkenntnis mit der Tatsache, dass in einem System, das eine Synchronisierung der Erzeugung der Statusdaten mit dem Medienzugriff nicht vorsieht, eine Vergrößerung des Contention Windows mit einer Erhöhung der zwischen Datenerzeugung und Übertragungsbeginn auftretenden Wartezeit<sup>15</sup> einhergeht, die sich negativ auf das Information Age auswirkt. Darüber hinaus schließen Kaul et al. aus den Simulationsergebnissen, dass bei gegebener Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Stationen das auftretende Information Age hingegen durch eine geeignete Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate in Verbindung mit einer vergleichsweise geringen Größe des Contention Windows ( $CW = 15$ ) minimiert werden kann [92].

Motiviert durch diese Ergebnisse entwickeln die Autoren einen dezentral organisierten Algorithmus, dessen Ziel eine das Information Age minimierende und zugleich homogene Konfiguration der Nachrichtenerzeugungsrate ist. Zu diesem Zweck wird das Nachrichtenerzeugungsintervall in jedem diskreten Zeitschritt durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor  $\beta$  bzw. dessen Kehrwert entweder vergrößert oder verringert. Die Entscheidung über

<sup>15</sup>Diese Wartezeit entspricht der im Rahmen der vorliegenden Arbeit als *Kanalzugriffsverzögerung* bzw. *Channel Access Time* bezeichneten Delay-Metrik (siehe Abschnitt 4.4.2).

die notwendige Anpassungsrichtung wird anhand eines lokalen Schätzwerts der Information Age Metrik getroffen, den jede Station aus den empfangenen Nachrichten, die zusätzlich zu den Statusinformationen deren Erzeugungszeitpunkt und das aktuell verwendete Erzeugungsintervall enthalten, ermittelt. Darüber hinaus wird aus den empfangenen Nachrichten das im Mittel verwendete Erzeugungsintervall berechnet. Überschreitet das ermittelte Information Age das Doppelte des mittleren Erzeugungsintervalls, wird Letzteres vergrößert; anderenfalls wird bei sinkendem Information Age im Vergleich zum letzten Zeitschritt die Anpassungsrichtung beibehalten, bei steigendem Information Age wird sie hingegen umgekehrt. Um eine ungleichmäßige Verteilung des gewählten Erzeugungsintervalls unter den Stationen zu vermeiden, wird dieses bei Überschreiten eines Schwellenwerts außerdem auf den berechneten Mittelwert zurückgesetzt [92].

Ihre Untersuchungen stützen Kaul et al. sowohl auf Simulationen als auch auf Messungen in einem IEEE 802.11 Netz. In beiden Fällen befinden sich dabei sämtliche Stationen innerhalb ihrer gegenseitigen Carrier-Sense-Reichweite, sodass die für VANETs charakteristischen Auswirkungen von Hidden Stations nicht abgebildet und bewertet werden [92].

Tielert et al.

Ausgehend von einer systematischen Analyse der Anforderungen an Verfahren zur Überlaststeuerung in VANETs und der daraus resultierenden Designprinzipien präsentieren Tielert et al. [164] einen Mechanismus zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrate mit dem Namen *PULSAR*<sup>16</sup>. Die Autoren konzentrieren sich dabei auf periodische Broadcast-Kommunikation zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Das *PULSAR* zugrunde liegende Designkonzept sieht vor, dass die erforderliche Kommunikationsreichweite und die korrespondierende Sendeleistung unabhängig von der gegebenen Netzlast durch die von der jeweiligen Fahrsituation abhängigen Anforderungen der Anwendung festgelegt und aus Sicht der Überlaststeuerung somit vorgegeben werden. Auf dieser Grundlage führt *PULSAR* eine Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate in Abhängigkeit der Netzlast durch, welche durch die CBT quantifiziert wird [164].

Bei der Erarbeitung ihres Konzepts greifen die Autoren die Ergebnisse von Fallah et al. [57, 58] auf (siehe Seite 67) und streben daher ebenfalls die Erreichung eines die Information Dissemination Rate (IDR) maximierenden CBT-Sollwerts an, der im Rahmen einer ersten Studie auf  $\gamma_{opt} = 0,6$  festgelegt wird.<sup>17</sup> Um die Dienstgüte der verschiedenen in Betracht kommenden Kombinationen von Kommunikationsreichweite und Nachrichtenerzeugungsrate, aus denen bei gegebener Verkehrsdichte jeweils eine Erreichung des CBT-Sollwerts resultiert, zu bewerten, nutzen Tielert et al. außerdem in Anlehnung an ElBatt et al. [32] (siehe Seite 48) die von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger abhängige Packet Inter-Reception Time (IRT). Die Bewertung konzentriert sich dabei auf die von der Anwendung vorgegebene und von der jeweiligen Fahrsituation abhängige *Zielentfernung (Target Distance)*  $d_t$ , welche die Entfernung zwischen sendendem und empfangendem Fahr-

<sup>16</sup>*Periodically Updated Load Sensitive Adaptive Rate Control (PULSAR)*.

<sup>17</sup>Bezugsgröße für die Berechnung der CBT ist wiederum der Carrier-Sense-Schwellenwert, der mit  $P_{r,cs} = -95$  dBm angenommen wird [164].

zeug bezeichnet, innerhalb derer eine zuverlässige Nachrichtenübermittlung zur Vermeidung von Gefahrensituationen erforderlich ist [164].

Auf dieser Basis vergleichen Tielert et al. im Rahmen einer Simulationsstudie unter Zugrundelegung einer statischen, eindimensionalen Topologie von Fahrzeugen verschiedene Parameterkombinationen aus Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsrate bei unterschiedlicher Verkehrsdichte, indem sie für jede Zielentfernung  $d_t$  diejenige Konfiguration ermitteln, welche den Mittelwert der IRT minimiert. Dabei gelangen die Autoren zu zwei wichtigen Erkenntnissen: Zum einen besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Zielreichweite und der optimalen, d. h. die IRT minimierenden Kommunikationsreichweite<sup>18</sup>. Zum anderen sind die optimale Kommunikationsreichweite und damit die optimale Sendeleistung – im Gegensatz zur optimalen Nachrichtenerzeugungsrate – unabhängig von der Verkehrsdichte [164].

In einer späteren Veröffentlichung [165] vertiefen und erweitern Tielert et al. diese Untersuchungen. Während sowohl die Bewertungsmethodik als auch die betrachtete Topologie weitestgehend übernommen werden, gehen die Autoren hierbei neben einer größeren Nachrichtenlänge von einer veränderten Ausbreitungsmodellierung unter Verwendung eines Log-Distance Pfadverlustmodells (siehe Abschnitt 4.3.1) aus. Im Rahmen einer umfangreichen Parameterstudie wird erneut eine Vielzahl verschiedener Kombinationen aus Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsrate bei unterschiedlicher Verkehrsdichte bewertet und zunächst eine homogene Zielentfernung  $d_t$  für sämtliche Fahrzeuge angenommen. Die jeweiligen Optimalkonfigurationen ermitteln Tielert et al. zum einen ohne Netzlastrestriktion, zum anderen unter der Nebenbedingung einer maximal zulässigen CBT [165].

Die dabei gewonnenen Ergebnisse bestätigen einerseits die Unabhängigkeit der optimalen Sendeleistung von der gegebenen Verkehrsdichte, andererseits offenbaren sie, dass die optimale Sendeleistung neben der gewählten Zielentfernung  $d_t$  von der maximal zulässigen CBT abhängt. Darüber hinaus lassen die Simulationsergebnisse erkennen, dass sämtliche ohne Anwendung einer Netzlastrestriktion gefundenen Optimalkonfigurationen von Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsrate unabhängig von der Verkehrsdichte eine annähernd übereinstimmende CBT von  $\gamma_{opt} \approx 0,91$  aufweisen.<sup>19</sup> Die Autoren schließen daraus zwar auf das Vorhandensein eines globalen Optimums an diesem Punkt, auf mögliche Ursachen für die Abweichung dieser Ergebnisse von jenen ihrer oben dargestellten früheren Studien [164] gehen sie jedoch nicht ein [165].

Die ermittelten CBT-Werte setzen Tielert et al. außerdem in Beziehung zu der korrespondierenden Kommunikationsdichte<sup>20</sup> (Communication Density, siehe Seite 49) der Simulationskonfiguration und leiten so eine näherungsweise optimale Kommunikationsdichte von  $\rho_{com,opt} \approx 950$  Nachrichten/s her. In

<sup>18</sup>Gemeint ist hier die theoretische, d. h. die unter Zugrundelegung eines deterministischen Ausbreitungsmodells erreichbare Kommunikationsreichweite [164].

<sup>19</sup>Als Bezugsgröße für die Berechnung der CBT dient wie zuvor der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -95$  dBm [165].

<sup>20</sup>Die von Tielert et al. verwendete Definition der Kommunikationsdichte unterscheidet sich geringfügig von der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Definition, vgl. hierzu Abschnitt 4.4.4.

diesem Zusammenhang wird außerdem herausgearbeitet, dass die CBT bis zu dem genannten Optimum monoton mit der Kommunikationsdichte anwächst. Dieses Verhalten kann dazu genutzt werden, um ohne Kenntnis der Verkehrsdichte aus der gemessenen CBT auf die Kommunikationsdichte rückzuschließen [165].

Die Untersuchungen des homogenen Szenarios erweitern Tielert et al. auf ein Szenario mit zwei gleich großen Gruppen von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Zielentfernungen  $d_t$  und stellen dabei fest, dass die Pareto-Optima dieses Szenarios approximiert werden können durch Verwendung derjenigen Sendeleistungen, die eine Optimierung des homogenen Szenarios bewirken [165].

Anhand der Simulationsergebnisse arbeiten die Autoren schließlich heraus, dass eine separate Anwendung der Überlaststeuerungsmechanismen Transmit Power Control (TPC) oder Transmit Rate Control (TRC)<sup>21</sup> nicht geeignet ist, um eine an der Minimierung der IRT gemessene Optimierung der Dienstgüte für sämtliche in Betracht kommenden Zielentfernungen  $d_t$  herbeizuführen. Veranlasst durch die gewonnenen Erkenntnisse wird daher ein kombiniertes Konzept zur Überlaststeuerung vorgeschlagen, das eine Anpassung der Sendeleistung in Abhängigkeit der Zielentfernung  $d_t$  mit einer netzlastabhängigen Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate zur Erreichung des CBT-Sollwerts  $\gamma_{opt}$  verbindet. Eine Reduzierung der Sendeleistung zur weiteren Verringerung der Netzlast ist nach diesem Ansatz erst dann vorgesehen, wenn die Nachrichtenerzeugungsrate einen vorgegebenen Minimalwert erreicht hat [164, 165].

Dieses Designkonzept bildet die Grundlage für das von Tielert et al. vorgestellte Überlaststeuerungsverfahren PULSAR. Dabei misst jede Station in Messintervallen festgelegter Länge den Wert der CBT und berechnet aus den Messwerten durch exponentielle Glättung einen gleitenden Mittelwert, anhand dessen die Netzlast bewertet wird. Um eine Mitwirkung sämtlicher zu einer Überlastsituation beitragender Stationen an der Reduzierung der Netzlast sicherzustellen, bedient sich PULSAR außerdem einer Weiterleitung der ermittelten Netzlastinformationen über zwei Hops, indem jede Station den gesendeten Nachrichten sowohl den lokal gemessenen als auch den maximalen von benachbarten Stationen empfangenen CBT-Wert hinzufügt [164].

Am Ende jedes Messintervalls ermittelt PULSAR das Maximum aus der lokal gemessenen CBT und den von anderen Stationen empfangenen Werten und führt einen Vergleich mit dem vorgegebenen Sollwert  $\gamma_{opt}$  durch. Im Rahmen eines Anpassungsintervalls zwischen einer minimalen und einer maximalen Nachrichtenerzeugungsrate wird anschließend nach dem Prinzip *Additive Increase / Multiplicative Decrease (AIMD)* die Erzeugungsrate der Station bei einer Überschreitung des Sollwerts dekrementiert, anderenfalls inkrementiert. Zur Verkürzung der Konvergenzzeit orientiert sich die Schrittweite der AIMD-Anpassung darüber hinaus am gleitenden Mittelwert der von benachbarten Stationen verwendeten Erzeugungsraten, den jede Station kontinuierlich aus den empfangenen Nachrichten berechnet: Führt die Inkrementierung bzw. Dekrementierung der Erzeugungsrate zu einer Annäherung an

<sup>21</sup>Zur Erläuterung der Begriffe siehe Abschnitt 2.2.6.

den berechneten Mittelwert, wird die Schrittweite verdoppelt, anderenfalls halbiert [164].

Tielert et al. evaluieren die Leistungsfähigkeit der Überlaststeuerung anhand verschiedener Simulationsszenarien und vergleichen PULSAR dabei mit den Algorithmen zur Regelung der Nachrichtenerzeugungsrate von Khorakun et al. [93] sowie Busche et al. [19] (siehe hierzu Seite 65 f.). Dabei stellen die Autoren signifikante Vorteile von PULSAR insbesondere im Hinblick auf die Fairness des Verfahrens und die Konvergenzzeit bei einer plötzlichen Erhöhung der Verkehrsdichte fest [164].

Von besonders hervorzuhebender Bedeutung für die praktische Realisierung effektiver Verfahren zur dezentralen Überlaststeuerung (Decentralized Congestion Control, kurz DCC) ist ihre Standardisierung. Im Rahmen der europäischen ITS-Referenzarchitektur dient diesem Zweck, wie bereits in Abschnitt 2.2.6 erläutert wurde, die für den Funkstandard ETSI ITS-G5 entwickelte ETSI Technical Specification (TS) 102 687 [42, 49, 55]. Über die Leistungsfähigkeit und Stabilität der durch ETSI TS 102 687 definierten DCC-Mechanismen und ihre Parametrierung liegen bisher allerdings nur wenige Erkenntnisse vor.

ETSI TS 102 687

Zu den ersten Autoren, die in jüngerer Vergangenheit entsprechende Ergebnisse präsentiert haben, gehören Eckhoff et al. [30]. In Bezug auf periodische Broadcast-Kommunikation in VANETS untersuchen die Autoren die durch ETSI TS 102 687 spezifizierten DCC-Mechanismen anhand einer Simulationsstudie und verwenden dabei für sämtliche DCC-Parameter – wie Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsintervall, Datenrate, Carrier-Sense-Schwellenwert und CBT-Schwellenwerte – die für den ITS-G5 Control Channel (CCH) empfohlene Konfiguration nach dem ETSI-Standard. Eckhoff et al. legen ihren Untersuchungen verschiedene realitätsnahe Verkehrsszenarien mit variierender Dichte am Nachrichtenaustausch teilnehmender ITS-G5-Stationen zugrunde [30].

Eckhoff et al.

Die dabei gewonnenen Simulationsergebnisse lassen bei mittlerer und hoher Netzlast ein instabiles Verhalten der durch ETSI TS 102 687 spezifizierten Überlaststeuerung erkennen, das sich bei CBT-Schwellenwerten von  $\gamma_{th,1} = 0,15$  und  $\gamma_{th,2} = 0,4$  in einem kontinuierlich oszillierenden Zustandswechsel des Systems zwischen den DCC-Zuständen *Relaxed*, *Active* und *Restrictive* (vgl. Abschnitt 2.2.6) widerspiegelt. Dies geht einher mit einer Oszillation nicht nur der lokal durch einzelne Stationen, sondern auch der im Mittel durch sämtliche Stationen gemessenen CBT. Darüber hinaus offenbaren die simulierten Konfigurationen bei mittlerer und hoher Netzlast trotz des Einsatzes der dezentralen Überlaststeuerung erheblichen Optimierungsbedarf im Hinblick auf die Aktualität der verfügbaren Statusinformationen und die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung [30, 49].

Eckhoff et al. führen diese unerwünschten Effekte in erster Linie auf die durch den Standard vorgegebene Parametrierung zurück. Diese sieht insbesondere eine starke und abrupte Reduzierung von Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsrate beim Zustandswechsel in den Zustand *Restrictive* vor, welcher den Stationen lediglich die Übertragung einer Nachricht pro Sekun-

de mit einer sehr geringen Sendeleistung in Höhe von  $-10$  dBm erlaubt [30, 49].

*Zusammenfassende  
Betrachtung*

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Reihe vielversprechender Ansätze zur Überlaststeuerung in VANETs zur Verfügung steht. Grundsätzlich greift die überwiegende Mehrzahl veröffentlichter Arbeiten auf die Channel Busy Time (CBT) als lokal messbare Netzlastmetrik zurück und strebt auf dieser Grundlage eine Steuerung oder Regelung der Netzlast an, indem unter Verwendung dezentral organisierter Verfahren die Sendeleistung, die Nachrichtenerzeugungsrate oder beide Parameter angepasst werden. Gleichwohl sind grundlegende Unterschiede in der Funktionsweise der vorgestellten Verfahren erkennbar.

Kaum Einigkeit existiert in der Literatur außerdem über die zur Dienstgütoptimierung geeigneten Werte elementarer Parameter. Dies gilt insbesondere für die anzustrebende Netzlast: Die empfohlenen CBT-Sollwerte auf Basis des Carrier-Sense-Schwellenwerts als Bezugsgröße variieren innerhalb der oben dargestellten Veröffentlichungsauswahl zwischen  $\gamma_{opt,min} = 0,2$  und  $\gamma_{opt,max} = 0,91$ . In ähnlichem Maße unterscheiden sich die Ergebnisse bezüglich der korrespondierenden Konfigurationswerte von Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate und anderer zur Überlaststeuerung herangezogener Parameter.

Nur wenige Erkenntnisse liegen bisher über die Performanz der unter Führung des ETSI im Rahmen der europäischen ITS-Referenzarchitektur standardisierten DCC-Mechanismen [42, 49, 55] vor. Jüngere Untersuchungen zeigen jedoch, dass diese in Verbindung mit der durch den Standard vorgegebenen Parametrierung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern [30].

Als Schlussfolgerung aus diesem summarischen Literaturüberblick lässt sich erheblicher weiterer Untersuchungsbedarf auf dem Gebiet der periodischen Broadcast-Kommunikation in VANETs konstatieren. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die geeignete Parametrierung von Verfahren zur Vermeidung und Handhabung von Überlastsituationen. Einen Beitrag zur Erfüllung dieses Untersuchungsbedarfs leistet die vorliegende Arbeit in den folgenden Kapiteln.

Ein unverzichtbares Hilfsmittel im Entwicklungsprozess von Protokollen für drahtlose Kommunikationsnetze im Allgemeinen und VANETs im Speziellen ist die Simulation. Durch die simulationsgestützte Untersuchung verschiedener Netzkonfigurationen können Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Protokollen bereits in frühen Entwicklungsphasen gewonnen werden. Feldtests, welche insbesondere im Kontext der Untersuchung netzlastabhängiger Effekte in VANETs häufig mit prohibitiv hohen Kosten verbunden sind, können dadurch auf spätere Entwicklungsphasen verschoben und so Zeit- und Kostenaufwand des Entwicklungsprozesses reduziert werden [4, 105, 182].

*Leistungsbewertung  
durch Simulation*

Die Aussagekraft der simulationsbasierten Bewertung von Kommunikationsnetzen und die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf die Realität hängen jedoch maßgeblich von der Qualität des zugrunde liegenden Simulationsmodells ab. Im Hinblick auf die Simulation drahtloser Netze wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. So stehen heute verschiedene ereignisorientierte Simulationswerkzeuge zur Verfügung, die eine präzise Modellierung der Protokollarchitektur ermöglichen und somit einen guten Ausgangspunkt für die simulationsgestützte Leistungsbewertung darstellen. Die überwiegende Mehrheit der bisher verfügbaren Simulationsmodelle weist jedoch signifikante Schwächen auf, die sich insbesondere bei der Simulation von VANETs bemerkbar machen.

Eine dieser Schwächen betrifft die Modellierung des Funkkanals. So verfügen Simulationswerkzeuge für drahtlose Netze in der Regel nur über einfache Ausbreitungsmodelle, die in Simulationsstudien häufig ohne Prüfung der Eignung für das untersuchte Szenario angewendet werden. VANETs sind jedoch aufgrund von Abschattungen und Mehrwegeausbreitung durch komplexe Ausbreitungsbedingungen gekennzeichnet, die eine empirische Validierung der zur Nachbildung des Funkkanals verwendeten Modelle unverzichtbar machen.

*Schwächen bisher  
verfügbarer Simula-  
tionswerkzeuge*

Dieser Notwendigkeit wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit der Schaffung einer Messumgebung begegnet, welche die Durchführung von Labor- und Feldtests ermöglicht. Die Messumgebung wird in Abschnitt 4.1 vorgestellt. Neben Labortests zur Bestimmung der Empfängerempfindlichkeit, deren Ergebnisse Abschnitt 4.2 zusammenfasst, wurden unter Verwendung der entwickelten Messumgebung Feldtests zur empirischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf Autobahnen durchgeführt und daraus ein geeignetes Ausbreitungsmodell abgeleitet, wie Abschnitt 4.3 im Detail entnommen werden kann.

*Aufbau des Kapitels*

Eine weitere Schwäche gegenwärtig verfügbarer Simulationswerkzeuge betrifft die Möglichkeiten der Ergebnisauswertung. Die Bewertung der Dienst-

güte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs, wie sie Gegenstand dieser Arbeit ist, erfordert die Verwendung individuell an diese Aufgabe angepasster Performanzmetriken, die über einfache Kennzahlen wie die Paketverlustwahrscheinlichkeit oder den erzielten Durchsatz hinausgehen. Entsprechende für die simulationsgestützte Leistungsbewertung geeignete Metriken werden in Abschnitt 4.4 definiert.

Die dritte signifikante Schwäche betrifft die Modellierung der Teilnehmermobilität. Während herkömmliche Simulationswerkzeuge zur Untersuchung drahtloser Netze lediglich vergleichsweise einfache Mobilitätsmodelle wie das Random Walk, Random Waypoint, Gauss-Markov oder Manhattan Modell zur Verfügung stellen [11, 22], weist der VANETs zugrunde liegende Fahrzeugverkehr spezifische Charakteristika auf, welche durch die genannten Mobilitätsmodelle nicht abgebildet werden können. Dieser Herausforderung begegnet die vorliegende Arbeit durch die Verwendung des mikroskopischen Verkehrsflusssimulators SUMO [9, 101, 160], der dem Netzwerksimulator OMNeT++ [118, 178, 179] über eine entsprechende Schnittstelle realitätsnahe Mobilitätsdaten bereitstellt [156, 181].

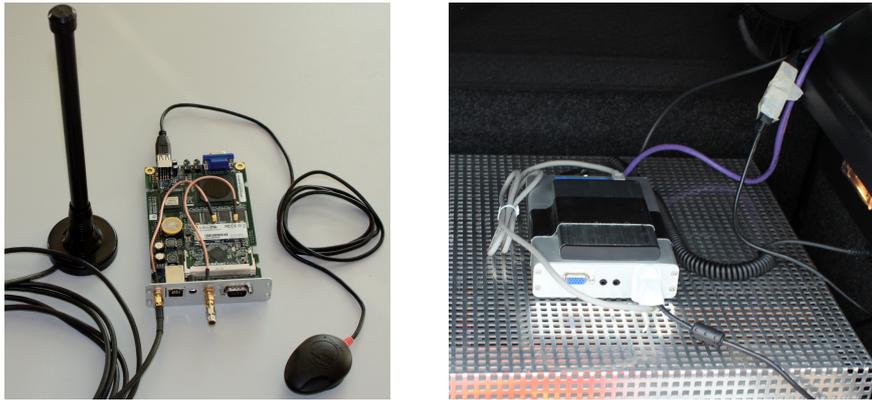
Die Architektur und Funktionalität der auf dieser Basis geschaffenen Simulationsumgebung für VANETs werden schließlich in Abschnitt 4.5 vorgestellt.

#### 4.1 MESSUMGEBUNG FÜR FELDTTESTS

Um eine realitätsnahe Modellierung drahtloser Broadcast-Kommunikation in VANETs zu ermöglichen, ist eine Orientierung der Modelle an Messergebnissen notwendig, die aus Feldtests in realen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsszenarien gewonnen werden können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Messumgebung erschaffen, welche die Durchführung von Labor- und Feldtests zur Unterstützung der Modellbildung und -validierung ermöglicht [143, 145, 162].

Abbildung 13 zeigt die verwendeten Hardwarekomponenten der Messumgebung. Grundlage der Kommunikationseinheit, die durch ihre kompakten Abmessungen problemlos im Kofferraum eines beliebigen Testfahrzeugs installiert werden kann, ist ein mit einer 500 MHz AMD Geode LX800 CPU ausgerüstetes PC Engines ALIX3D3 Mainboard [124], auf dem eine Ubuntu Linux-Distribution (Kernel-Version 2.6.32) als Betriebssystem zum Einsatz kommt. Die Kommunikationseinheiten sind mit handelsüblichen IEEE 802.11abg Mini-PCI Interfacekarten bestückt, welche auf dem Atheros AR5006X (AR5414) Chipsatz basieren. Zur Erfassung von Fahrzeugposition und -geschwindigkeit dient ein den u-blox5 Chipsatz nutzender Navilock NL-402U GPS-Empfänger, der auf dem Dach des Fahrzeugs platziert wird. Die Messdaten werden auf einer externen USB-Festplatte gespeichert.

Darüber hinaus werden die Testfahrzeuge zur Durchführung der Messungen mit einer vertikal polarisierten Magnetfußantenne (Mobile Mark ECOM6-5500) ausgerüstet, die zentral auf dem Fahrzeugdach positioniert wird. Die mit freundlicher Unterstützung der Delphi Deutschland GmbH auf einer metallischen Grundfläche vermessene Antenne weist bei einem Elevationswinkel von 0° eine annähernd perfekte Rundstrahlcharakteristik mit



(a) ALIX3D3-Mainboard ohne Gehäuse mit Magnetfußantenne und GPS-Empfänger.

(b) Im Kofferraum eines Testfahrzeugs installierte Kommunikationseinheit.

Abbildung 13: Hardwarekomponenten der Messumgebung.

einem Antennengewinn von 3,2 dBi inkl. Dämpfung des Anschlusskabels auf. Zusammen mit einer bei allen Messungen konfigurierten Sendeleistung von 23 dBm und einer Dämpfung durch Verbindungsstücke zwischen Interfacekarte und Antenne in Höhe von ca. 3 dB (System Loss) ergibt sich so eine äquivalente isotrope Sendeleistung (EIRP) von 23,2 dB.

Um die Anwendbarkeit der Messergebnisse als Grundlage für zukünftige kooperative Fahrerassistanzanwendungen zu gewährleisten, müssen die verwendeten IEEE 802.11 Interfacekarten den Standardspezifikationen IEEE 802.11p [77] bzw. ITS-G5 [55] entsprechen. Daher wird zum Betrieb der Interfacekarten ein modifizierter Gerätetreiber verwendet, welcher auf dem quelloffenen Treiber ath5k [107] und dem Linux Wireless Subsystem basiert. Im Ergebnis können mithilfe der Messumgebung Feldtests bei einer Mittenfrequenz von 5,9 GHz unter Nutzung eines 10 MHz-Kanals und des in 802.11p definierten und durch ITS-G5 übernommenen OCB-Modus (siehe Abschnitt 2.2.5) durchgeführt werden.

Zur Durchführung der Messungen wird auf der Kommunikationseinheit des sendenden Fahrzeugs ein Paketgenerator<sup>1</sup> konfiguriert, der periodisch Nachrichten erzeugt, sodass in regelmäßigen Abständen IEEE 802.11 Frames im OCB-Modus mit Broadcast-Adressierung gesendet werden. Dadurch wird das Verhalten einer Cooperative Awareness Messages (CAMs) aussendenden Station nachgebildet. Eine Fragmentierung der Nachrichten erfolgt nicht. Den Nachrichten wird neben einer Sequenznummer die Position des sendenden Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung hinzugefügt, um eine spätere Auswertung im Empfänger zu ermöglichen. Gleichzeitig erzeugt der Sender ein lokales Logfile, welches den Erzeugungszeitpunkt, die Sequenznummer und die Senderposition für jeden gesendeten Frame enthält. Diese Daten sind zur Rekonstruktion der Senderposition für verlorene Frames bei der im Anschluss an die Messungen durchgeführten Berechnung der positions- bzw. distanzabhängigen Packet Delivery Rates notwendig.

Softwarekomponenten der Messumgebung

<sup>1</sup>Verwendet wurde der *Real-time UDP Data Emitter (RUDE)* [132].

Der Treiber des IEEE 802.11 Interfaces auf der Empfängerseite wird im Monitor-Modus betrieben, in welchem der Empfänger passiv auf dem konfigurierten Kanal auf ein decodierbares Signal wartet und sämtliche empfangenen Frames für eine Auswertung zur Verfügung stellt. Mithilfe eines speziell für diesen Zweck entwickelten Softwaretools ist der Empfänger in der Lage, für jeden empfangenen Frame die vom Treiber zur Verfügung gestellte *Received Signal Strength Indication (RSSI)*, aus der direkt die Empfangsleistung berechnet werden kann, die Sequenznummer des empfangenen Paketes sowie die Sender- und Empfängerposition zum Empfangszeitpunkt aufzuzeichnen. Dabei wird die freie C/C++-Bibliothek *libpcap* [163] genutzt, die das Mitschneiden und die spätere Auswertung sämtlicher durch ein Netzwerkinterface empfangener Frames ermöglicht. Zur Ermittlung der RSSI wird der *Radiotap*-Header [128] verwendet, der empfängerseitig durch den Gerätetreiber zum empfangenen Frame hinzugefügt wird und so eine Auswertung sonst nicht zugänglicher, den Frameempfang betreffender Daten im Userspace erlaubt.

Zur Steuerung der Messsoftware auf Sender- und Empfängerseite sowie zur Auswertung der gewonnenen Messdaten in Form von positions- bzw. distanzabhängigen Empfangsleistungen und Packet Delivery Rates dient eine Reihe von Bash- und Python-Skripten. Im Ergebnis erlaubt die Messumgebung die Ermittlung dieser Performanzmetriken im Rahmen von Feldtests zwischen einem oder mehreren mobilen Sendern und einem oder mehreren mobilen Empfängern und die Nutzung dieser Ergebnisse bei der Modellbildung und -validierung für Broadcast-Kommunikation in VANETs.

#### 4.2 ERMITTLUNG DER EMPFÄNGEREMPFINDLICHKEIT

Damit ein gesendeter Frame durch einen Empfänger erfolgreich decodiert werden kann, ist eine ausreichend hohe Leistung des empfangenen Signals notwendig. In Simulationsmodellen zur Leistungsbewertung von Funknetzen wird dabei üblicherweise ein deterministischer Schwellenwert der Empfangsleistung angenommen, dessen Erreichen einen fehlerfreien Frameempfang gewährleistet, während dessen Unterschreitung zu einem Frameverlust führt.

Auch im Rahmen dieser Arbeit wird innerhalb des Simulationsmodells, welches die Grundlage der in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von VANETs bildet, der Ansatz eines deterministischen Schwellenwerts  $P_{r,th}$  verfolgt, welcher im interferenzfreien Fall den erfolgreichen Empfang eines Frames sicherstellt und als *Empfängerempfindlichkeit* bezeichnet wird. Mit der Rauschleistung  $N$  lässt sich aus  $P_{r,th}$  der für einen erfolgreichen Frameempfang erforderliche Signal-Rauschabstand (Signal to Noise Ratio, SNR) errechnen. Dieser Schwellenwert entspricht im Rahmen der Modellbildung gleichzeitig dem bei Vorhandensein von Interferenzen für einen erfolgreichen Frameempfang erforderlichen Signal-Störabstand (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) und wird als  $SIR_{th}$  bezeichnet. Es gilt

$$SIR_{th} = \frac{P_{r,th}}{N_{therm}} \quad . \quad (4.1)$$

Empfängerempfind-  
lichkeit

Die Empfängerempfindlichkeit wird maßgeblich durch die genutzte Hardware sowie die zur Übertragung des Frames verwendete Datenrate  $R_b$  beeinflusst, da höherwertige Modulations- und Kodierschemata (MCS) bei gleicher Signalqualität eine höhere Fehleranfälligkeit aufweisen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Empfängerempfindlichkeit nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf die Performanz des Netzes besitzt. Eine realitätsnahe Konfiguration von  $P_{r,th}$  und  $SIR_{th}$  innerhalb des Simulationsmodells ist somit von wesentlicher Bedeutung.

Im Vorfeld der Bewertung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation durch Feldtests und Simulationen wurde daher die datenratenabhängige Empfängerempfindlichkeit der für die Feldtests verwendeten Interfacekarten experimentell in Labortests bestimmt. Die Ergebnisse dieser Tests bilden die Grundlage des in Kapitel 5 verwendeten Simulationsmodells.

Abbildung 14 zeigt schematisch den Versuchsaufbau: Zwei der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Kommunikationseinheiten wurden als Sender und Empfänger konfiguriert und ihre Antenneneingänge zur Sicherstellung absolut reproduzierbarer Bedingungen unter Verwendung dämpfungsarmer Hochfrequenzkabel verbunden. Regelbare Dämpfungsglieder (Step Attenuators) vom Typ Agilent 8494B und Agilent 8495B ermöglichen die Konfiguration einer definierten Dämpfung der Übertragungsstrecke in Schritten von 1 dB bzw. 10 dB, sodass dem Empfänger eine willkürliche Empfangsleistung zur Verfügung gestellt werden kann. Zur Validierung sowohl der konfigurierten Dämpfung als auch der durch den Interfacetreiber gemeldeten Empfangsleistung wurde ein Spektrumanalysator vom Typ Agilent E4407B verwendet, der über einen Powersplitter (Mini-Circuits N2PD-9G+) in den Testaufbau eingebunden wurde.

*Versuchsaufbau der  
Labortests*

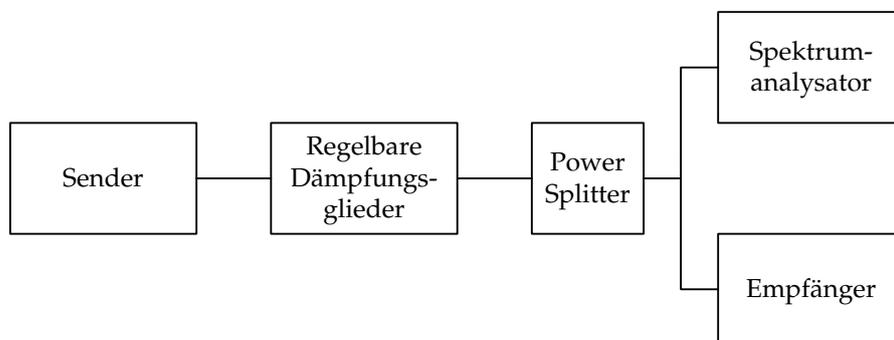


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit.

Mithilfe dieses Messaufbaus wurden bei einer Mittenfrequenz des Trägers von 5,9 GHz und einer Kanalbandbreite von 10 MHz unter Verwendung verschiedener Datenraten Testsequenzen von IEEE 802.11 MAC-Frames der Länge 564 Bytes mit einer Erzeugungsrate von 100 Hz gesendet und am Empfänger die PDR, d. h. der Anteil erfolgreich empfangener Frames an der Gesamtzahl gesendeter Frames bestimmt.

Zur Berechnung des der jeweiligen Empfangsleistung entsprechenden SNRs wurde dabei davon ausgegangen, dass ausschließlich thermisches Rauschen  $N_{therm}$  vorliegt, welches sich berechnen lässt als

$$N_{therm} = k_B \cdot T_{env} \cdot B, \quad (4.2)$$

wobei  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  die Boltzmann-Konstante,  $T_{env}$  die Umgebungstemperatur in Kelvin und  $B$  die Bandbreite des Funkkanals in Hertz bezeichnen [113]. Unter Annahme von  $T_{env} = 300 \text{ K}$  ergibt sich mit  $B = 10 \text{ MHz}$  eine Rauschleistung von

$$N = N_{therm} \approx -103,8 \text{ dBm}. \quad (4.3)$$

Ergebnisse der  
Labortests

Die Ergebnisse der Labortests zeigt Abbildung 15. Klar zu erkennen ist der signifikante Einfluss der Datenrate: So unterscheiden sich die Empfängerempfindlichkeiten für die niedrigste und höchste im Standard [76] definierte Datenrate,  $R_b = 3 \text{ Mbps}$  und  $R_b = 27 \text{ Mbps}$ , um annähernd 18 dB. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse einen vergleichsweise raschen Abfall der PDR-Kurven bei Überschreitung der Empfängerempfindlichkeit. Die mit PDRs von 90 % und 10 % einhergehenden Empfangsleistungen unterscheiden sich unabhängig von der verwendeten Datenrate um nicht mehr als 3 dB. Diese Beobachtung stützt die im Rahmen des Simulationsmodells vereinfachend getroffene Annahme eines deterministischen Schwellenwerts, welcher über den Erfolg oder Misserfolg des Decodiervorgangs entscheidet.

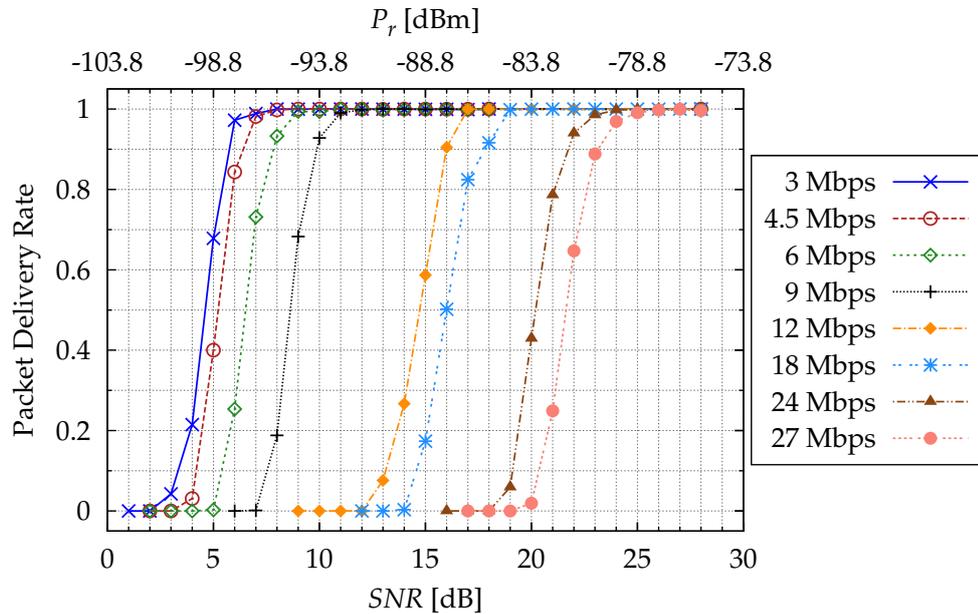


Abbildung 15: In Labortests ermittelte Packet Delivery Rate (PDR) in Abhängigkeit von Empfangsleistung  $P_r$  und Signal to Noise Ratio (SNR) für verschiedene Datenraten.

Bestimmung von  
 $SIR_{th}$

Aus den Ergebnissen der Labortests wird nach Gl. 4.1 in Abhängigkeit der Datenrate der für einen erfolgreichen Frameempfang notwendige SINR-Schwellenwert  $SIR_{th}$  zur Verwendung innerhalb des Simulationsmodells bestimmt. Da bei der Berechnung der SNRs aus den Labortests nur thermisches

Rauschen zugrunde gelegt wurde ( $N = N_{therm}$ ), sind die berechneten SNR-Schwellenwerte vergleichsweise pessimistischer Natur. Um darüber hinaus die Modellierung eines Best-Case Szenarios zu vermeiden, wird eine PDR in Höhe von 95 % als Bezugspunkt zur Ermittlung der Schwellenwerte verwendet. Die entsprechenden in den Labortests ermittelten Werte von Empfangsleistung und SNR sind in der Tabelle mit  $P_{r,95\%}$  und  $SNR_{95\%}$  bezeichnet. Um Messungenauigkeiten zu berücksichtigen, werden die Messwerte zur Ermittlung von  $SIR_{th}$  außerdem mit einem Versatz von 0,5 dB beaufschlagt und anschließend auf ganze dB-Werte aufgerundet. Tabelle 5 fasst die Ergebnisse zusammen.

MCS			Messung		Modell
Modulation	Koderate	$R_b$ [Mbps]	$P_{r,95\%}$ [dBm]	$SNR_{95\%}$ [dB]	$SIR_{th}$ [dB]
BPSK	1/2	3	-97,9	5,9	7,0
BPSK	3/4	4,5	-97,0	6,8	8,0
QPSK	1/2	6	-95,5	8,3	9,0
QPSK	3/4	9	-93,5	10,3	11,0
16-QAM	1/2	12	-87,4	16,4	17,0
16-QAM	3/4	18	-85,4	18,4	19,0
64-QAM	2/3	24	-81,5	22,3	23,0
64-QAM	3/4	27	-80,0	23,8	25,0

Tabelle 5: Zusammenfassung in Labortests ermittelter Empfängerempfindlichkeiten und daraus abgeleiteter SINR-Schwellenwerte  $SIR_{th}$  zur Verwendung innerhalb des Simulationsmodells in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$ .

Die in Tabelle 5 gezeigten Ergebnisse für den von der Datenrate abhängigen Schwellenwert  $SIR_{th}$ , der quantitativ die Empfängerempfindlichkeit bestimmt, bilden die Grundlage der simulationsbasierten Untersuchung der Leistungsfähigkeit von VANETs in Kapitel 5. Zu beachten ist, dass diese Ergebnisse aufgrund von anzunehmenden Messungenauigkeiten der Labortests und nicht vollständig übertragbaren Bedingungen lediglich eine Näherung darstellen, welche jedoch dem im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Zweck gerecht wird. Im Vergleich zu den unter Laborbedingungen durchgeführten Messungen wird dem Simulationsmodell eine höhere Rauschleistung von  $N = -100$  dBm zugrunde gelegt (siehe Abschnitt 5.1).

### 4.3 MODELLIERUNG DES FUNKKANALS

In einem drahtlosen Kommunikationsnetz kann sich ein übertragenes Signal durch Reflexion, Streuung und Beugung über eine Vielzahl unterschiedlicher Pfade vom Sender zum Empfänger ausbreiten. Durch dieses *Mehrwegeausbreitung* genannte Phänomen besteht das empfangene Signal aus verschiedenen Komponenten, die mit individueller Dämpfung, Verzögerung und Phasenverschiebung behaftet sind. Aufgrund der Mobilität von Sender, Empfänger sowie der die Ausbreitung beeinflussenden Umgebung in VANETs ließe sich der Kanal nur durch eine zeitabhängige Impulsantwort vollständig charakte-

*Mehrwegeausbreitung*

risieren, deren reproduzierbare Ermittlung und Handhabung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist [113, 114, 130, 134].

Um die Leistungsfähigkeit mobiler drahtloser Kommunikationsnetze beurteilen zu können, werden daher Ausbreitungsmodelle eingesetzt, welche die relevanten Eigenschaften des Funkkanals in geeigneter Weise nachbilden. Im Zentrum des Interesses bei der Untersuchung von VANETs steht dabei die Ermittlung der (ggf. zeit- und positionsabhängigen) Leistung des empfangenen Signals  $P_r$  in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  und der Beschaffenheit des Funkkanals. Betrachtet man die Empfangsleistung in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger, so können durch eine Differenzierung nach dem Aggregationsgrad der beobachteten Empfangsleistung drei wesentliche Effekte unterschieden werden, die bei der Modellierung Berücksichtigung finden müssen [66, 113, 159].

#### *Small-Scale Fading*

Die Mehrwegeausbreitung des gesendeten Signals bewirkt eine individuelle Verzögerung der unterschiedlichen Signalkomponenten. Wegen der geringen Wellenlängen der verwendeten Träger verursachen kleine Änderungen der Ausbreitungsverzögerung bereits signifikante Änderungen der Phase der empfangenen Komponenten. Somit findet abhängig von den individuellen Phasenlagen der empfangenen Signalkomponenten am Empfänger eine konstruktive oder destruktive Überlagerung statt, die zu einer Variation der empfangenen Signalamplitude und Leistung führt. Diese *Small-Scale Fading* genannten Variationen der Empfangsleistung sind bereits bei sehr kleinen Positionsänderungen in der Größenordnung der Wellenlänge des übertragenen Signals, die bei ITS-G5A ca. 5,1 cm beträgt, zu beobachten.

#### *Shadowing*

Wird eine Mittelwertbildung über ein Distanzintervall von ca. 10 bis 30 Wellenlängen durchgeführt, weist dieser lokale Mittelwert der Empfangsleistung üblicherweise ebenfalls Variationen auf. Dieses *Large-Scale Fading*, *Shadow Fading* oder einfach *Shadowing* genannte Phänomen wird durch Gebäude, Hügel und andere größere Objekte in der Umgebung hervorgerufen, die eine Dämpfung, Reflexion, Beugung oder Streuung des Signals verursachen. Durch die Mobilität von Sender und Empfänger sowie der Umgebung selbst treten diese Effekte in unterschiedlicher Ausprägung auf, wodurch eine im Vergleich zum Small-Scale Fading über wesentlich größere Distanzintervalle beobachtbare Variation der Empfangsleistung entsteht.

#### *Pfadverlust*

Der *Pfadverlust* oder *Path Loss PL* beschreibt für eine gegebene Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger das Verhältnis zwischen der Sendeleistung  $P_t$  und der mittleren empfangenen Leistung  $P_r(d)$  ohne Berücksichtigung von Shadowing und wird üblicherweise in dB angegeben:

$$PL(d) \text{ dB} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r(d)} \text{ dB} , \quad (4.4)$$

wobei  $P_t$  und  $P_r$  hier lineare Größen darstellen. Der Pfadverlust beinhaltet somit eine Mittelwertbildung über unterschiedliche Shadowing-Ausprägungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Ausbreitungsmodelle mit dem Ziel einer realitätsnahen Nachbildung der Empfangsleistung, welche für die Dauer eines Frames als konstant angenommen wird, verwendet. Eine detailliertere Modellierung des Empfangssignals, z. B. durch Berücksichtigung von Delay Spreads, erfolgt aus Gründen der Handhabbarkeit nicht.

Eine realitätsnahe Ausbreitungsmodellierung für VANETs erfordert eine Differenzierung nach der Umgebung, innerhalb derer die Kommunikation stattfindet. Im Folgenden wird die Modellierung des Funkkanals für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersuchten Autobahnszenarien beschrieben.

#### 4.3.1 Modellierung des Pfadverlustes in Autobahnszenarien

Zur mathematischen Modellierung des Pfadverlustes  $PL(d)$  und damit der Leistung  $P_r(d)$  eines empfangenen Signals bei gegebener Sendeleistung  $P_t$  in Abhängigkeit der Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger existieren verschiedene Ansätze, die im Folgenden erläutert werden sollen.

Die einfachste Form der Pfadverlustmodellierung geht von einer Ausbreitung des gesendeten Signals im freien Raum aus, d. h. vollständig unabhängig von Objekten jeglicher Art, welche die Ausbreitung durch Dämpfung, Reflexion, Beugung oder Streuung beeinflussen könnten. Unter der Annahme einer im freien Raum befindlichen Sendeantenne breitet sich die Wellenfront der emittierten elektromagnetischen Welle in Form einer Kugeloberfläche um die Sendeantenne aus. Bei konstanter Sendeleistung beträgt die zur Kugeloberfläche invers proportionale Leistungsdichte der elektromagnetischen Welle daher

$$S(d) = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}, \quad (4.5)$$

wobei  $G_t$  den Antennengewinn der Sendeantenne bezeichnet. Betragen die der Trägerfrequenz entsprechende Wellenlänge  $\lambda$  und der Antennengewinn auf Empfängerseite  $G_r$ , so ergibt sich mit der effektiven Apertur der Empfangsantenne

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (4.6)$$

für die Berechnung der empfangenen Leistung das *Freiraumausbreitungsmodell nach Friis* [64, 123]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \cdot A_e = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (4.7)$$

Der Pfadverlust bei Freiraumausbreitung folgt als

$$PL(d) \text{ dB} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r(d)} \text{ dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{16\pi^2 d^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) \text{ dB}. \quad (4.8)$$

Häufig werden die Auswirkungen der Mehrwegeausbreitung zwischen Sender und Empfänger von zwei dominierenden Komponenten geprägt: der *Line of Sight (LOS)* Komponente und einer am Boden reflektierten Komponente (siehe Abbildung 16). Eine solche Situation ist üblicherweise gegeben, wenn die Umgebung wenige Objekte aufweist, welche die Ausbreitung des Signals signifikant beeinflussen. In solchen Fällen kann der Pfadverlust durch das *Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell* beschrieben werden [66, 130].

*Freiraumausbreitungsmodell nach Friis*

*Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell*

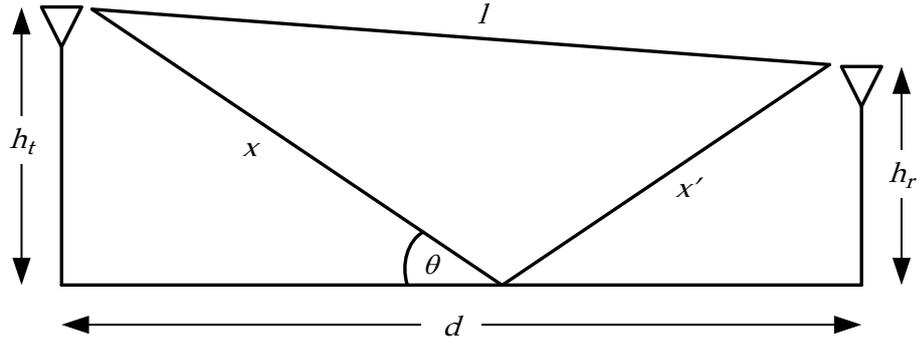


Abbildung 16: Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell [66].

Unter der für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Netze zutreffenden Voraussetzung, dass die durch die Bodenreflexion verursachte Verzögerung  $\tau$  (Delay Spread) deutlich kleiner ist als die inverse Kanalbandbreite  $B^{-1}$ , d. h. es gilt  $\tau \ll B^{-1}$ , kann für das (komplexe) Basisbandsignal  $u(t) \approx u(t - \tau)$  angenommen werden. Mit dieser Näherung und der Annahme einer isotropen Antennencharakteristik kann die durch die Überlagerung der unreflektierten und der reflektierten Signalkomponente resultierende Empfangsleistung beschrieben werden als

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + R \frac{e^{-j\Delta\phi}}{x + x'} \right|^2. \quad (4.9)$$

Dabei bezeichnen  $l$  bzw.  $x + x'$  die Länge der Wege, welche die LOS-Komponente bzw. die am Boden reflektierte Signalkomponente zwischen Sender und Empfänger zurücklegen (siehe Abbildung 16),  $R$  den Reflexionskoeffizienten des Bodens und  $\Delta\phi$  die durch die unterschiedliche Länge der zurückgelegten Wege entstehende Phasenverschiebung mit

$$\Delta\phi = 2\pi(x + x' - l)/\lambda. \quad (4.10)$$

Sind die Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger sowie die Sende- und Empfangsantennenhöhen  $h_t$  und  $h_r$  bekannt, kann  $\Delta\phi$  mithilfe der Beziehung

$$x + x' - l = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (4.11)$$

berechnet werden [66, 130].

Abbildung 17 zeigt den Pfadverlustverlauf nach dem Two-Ray Ground Reflection Modell aus Gl. 4.9 für  $h_t = h_r = 1,5$  m,  $G_t = G_r = 1$  und eine Trägerfrequenz von  $f_c = 5,9$  GHz. Für kleine Entfernungen  $d$  wird deutlich, dass der Pfadverlust durch wechselnde konstruktive und destruktive Überlagerung der beiden Signalkomponenten in Abhängigkeit der von  $d$  bestimmten Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  eine Sequenz von Minima und Maxima aufweist. Für kleine Einfallswinkel  $\theta$  erfährt die am Boden reflektierte Signalkomponente bei der Reflexion eine Phasenverschiebung von annähernd  $\pi$ . Da die beiden

Signalkomponenten für sehr große Entfernungen  $d$  annähernd gleich lange Wege zurücklegen, überlagern sich die Signalkomponenten für sehr große  $d$  ausschließlich destruktiv.

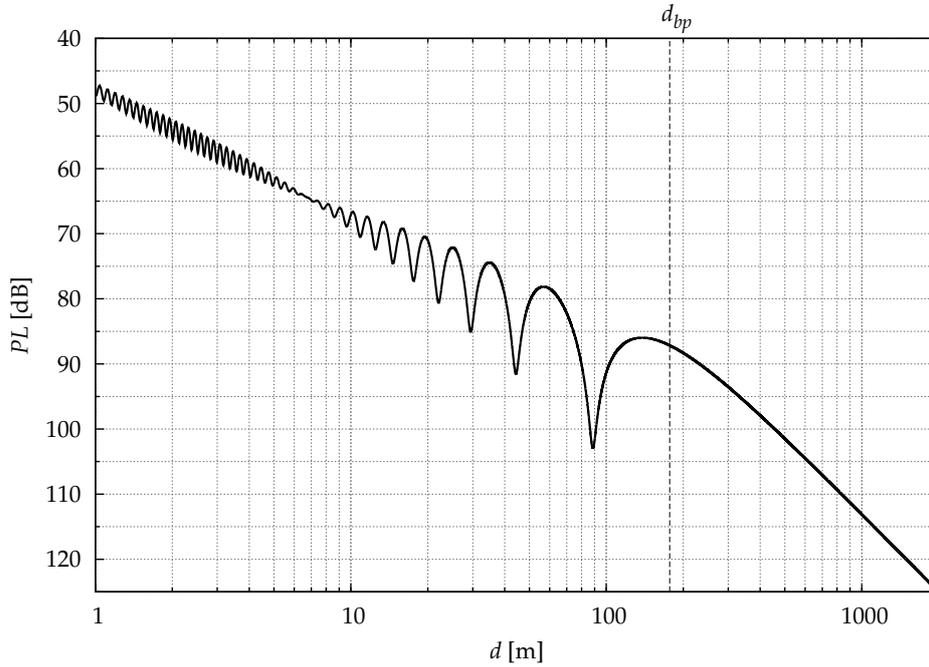


Abbildung 17: Pfadverlust nach dem Two-Ray Ground Reflection Modell als Funktion der Distanz in logarithmischer Skala für  $h_t = h_r = 1,5$  m,  $f_c = 5,9$  GHz mit der Breakpoint Distance  $d_{bp} = 177$  m.

Für große Entfernungen  $d$  zwischen Sender und Empfänger kann aus dem Two-Ray Ground Reflection Modell daher eine vereinfachte Approximation des Pfadverlustes abgeleitet werden. Ist  $d$  deutlich größer als  $h_t$  und  $h_r$ , kann Gl. 4.10 mit hinreichender Genauigkeit unter Verwendung eines Taylor-Polynoms ersten Grades angenähert werden (zur Herleitung siehe Abschnitt A.1 im Anhang), sodass

$$\Delta\phi = 2\pi(x + x' - l)/\lambda \approx \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (4.12)$$

gilt. Im asymptotischen Grenzfall gilt darüber hinaus (siehe Abbildung 16):

$$\lim_{d \rightarrow \infty} (x + x') = \lim_{d \rightarrow \infty} l = d, \quad \lim_{d \rightarrow \infty} \theta = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{\theta \rightarrow 0} R = -1.$$

Für die Empfangsleistung ergibt sich (zur Herleitung siehe auch hier Abschnitt A.1 im Anhang) aus Gl. 4.9 für sehr große  $d$  die Näherung

$$P_r(d) \approx P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left( \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (4.13)$$

und für den Pfadverlust dementsprechend

$$PL(d) \text{ dB} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r(d)} \text{ dB} \approx 10 \log_{10} \left( \frac{d^4}{G_t G_r h_t^2 h_r^2} \right). \quad (4.14)$$

*Approximation des Two-Ray Ground Reflection Modells für große Entfernungen*

Somit nimmt für große Entfernungen  $d$  der Pfadverlust  $PL(d)$  mit der vierten Potenz von  $d$  oder mit 40 dB je Dekade zu.

Im Two-Ray Ground Reflection Modell überlagern sich die beiden Signal-komponenten abhängig von  $d$ ,  $h_t$  und  $h_r$  grundsätzlich konstruktiv oder destruktiv, wodurch der Pfadverlustverlauf für kleine Entfernungen  $d$  eine Sequenz von Minima und Maxima aufweist (siehe Abbildung 17). Aufgrund des asymptotischen Verhaltens der Phasenverschiebung ( $\lim_{d \rightarrow \infty} \Delta\phi = 0$ , siehe Gl. 4.12) und des Reflexionskoeffizienten ( $\lim_{d \rightarrow \infty} R = -1$ , siehe Abschnitt A.1 im Anhang) kann jedoch eine *Breakpoint Distance* genannte Distanz  $d_{bp}$  bestimmt werden, ab welcher der Pfadverlust mit der vierten Potenz von  $d$  zunimmt (siehe Abbildung 17). Eine Näherung für  $d_{bp}$  ergibt sich aus Gl. 4.10, indem  $\Delta\phi = \pi$  gesetzt wird, da an diesem Punkt der Pfadverlustverlauf näherungsweise sein letztes Maximum aufweist [66, 113, 130]. Es folgt

*Breakpoint Distance*

$$d_{bp} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}. \quad (4.15)$$

Mit dem Radius der  $n$ -ten Fresnelzone  $r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$ , wobei  $d_1$  bzw.  $d_2$  die Entfernung des Bodenreflexionspunktes zum Sender bzw. Empfänger bezeichnen, lässt sich zeigen, dass die Breakpoint Distance  $d_{bp}$  der Entfernung zwischen Sender und Empfänger entspricht, in welcher die erste Fresnelzone die Bodenebene berührt, woraus ein deutlich höherer Pfadverlust resultiert.

In simulationsgestützten Untersuchungen zu MANETs und VANETs hat eine vereinfachte Variante des Two-Ray Ground Reflection Modells weite Verbreitung gefunden. Unter der Annahme, dass der Pfadverlust bis zu einer Crossover Distance  $d_c$  genannten Entfernung zum Sender quadratisch mit der Entfernung und ab diesem Punkt mit der vierten Potenz der Entfernung wächst, wird für  $d \leq d_c$  das Freiraumausbreitungsmodell nach Friis genutzt (siehe Gl. 4.8), während für  $d > d_c$  die Approximation des Two-Ray Ground Reflection Modells für große Entfernungen nach Gl. 4.14 verwendet wird:

*Vereinfachtes  
Two-Ray Ground  
Modell*

$$PL(d) \text{ dB} = \begin{cases} 10 \log_{10} \left( \frac{16\pi^2 d^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) \text{ dB} & \text{für } d \leq d_c, \\ 10 \log_{10} \left( \frac{d^4}{G_t G_r h_t^2 h_r^2} \right) \text{ dB} & \text{für } d > d_c. \end{cases} \quad (4.16)$$

Die Crossover Distance  $d_c$  wird dabei durch Gleichsetzen der Gleichungen 4.8 und 4.14 ermittelt, sodass sich

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda}. \quad (4.17)$$

ergibt. Hier ist zu beachten, dass  $d_c$  nicht der aus dem Two-Ray Ground Reflection Modell herleitbaren Distanz  $d_{bp}$  entspricht, in welcher die erste Fresnelzone die Bodenebene berührt und ab welcher der Pfadverlust mit der vierten Potenz der Distanz zum Sender abnimmt (vgl. Gl. 4.15).

In der Realität wird der Pfadverlust maßgeblich von der tatsächlichen Ausbreitungsumgebung beeinflusst. Die Ausbreitungsumgebung wird jedoch weder durch das zuvor beschriebene Freiraumausbreitungsmodell nach Friis, noch (mit Ausnahme des Erdbodens) durch das Two-Ray Ground Reflection

*Empirische Modelle*

Modell berücksichtigt. Die vielfältigen Einflüsse, denen ein Signal bei der Ausbreitung vom Sender zum Empfänger ausgesetzt ist, lassen sich nur in seltenen Fällen vollständig durch ein einfaches Modell beschreiben. Aus diesem Grund werden zur Ausbreitungsmodellierung in der Praxis häufig *empirische Modelle* verwendet, die den durch Messungen ermittelten Pfadverlust mathematisch nachbilden.

Ein einfaches Modell zur makroskopischen Nachbildung des Pfadverlustes in Abhängigkeit der Ausbreitungs Umgebung ist das *Log-Distance Pfadverlustmodell*, das den Pfadverlust  $PL$  für eine Distanz  $d \geq d_0$  zwischen Sender und Empfänger als

*Log-Distance  
Pfadverlustmodell*

$$PL(d) \text{ dB} = PL(d_0) \text{ dB} + \alpha 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \text{ dB} \quad (4.18)$$

beschreibt [130, 148]. Dabei bezeichnet  $\alpha$  den umgebungsabhängigen Pfadverlustkoeffizienten und  $d_0$  eine Referenzdistanz, für die der Pfadverlust bekannt ist.  $PL(d_0)$  kann empirisch aus Messungen bestimmt werden, häufig wird jedoch auch der Freiraum-Pfadverlust nach Friis (siehe Gl. 4.8) zugrunde gelegt. Mit  $d_0 = 1 \text{ m}$  ergibt sich in diesem Fall

$$PL(d_0) \text{ dB} = PL(1 \text{ m}) \text{ dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{16\pi^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) \text{ dB} . \quad (4.19)$$

Für  $\alpha = 2$  entspricht das Log-Distance Modell dem Freiraumausbreitungsmodell. In Umgebungen, in denen eine direkte Sichtverbindung oder LOS durch Shadowing häufig verhindert wird, kann der Wert von  $\alpha$  zwischen 3 und 5 betragen [130].

Eine Erweiterung des Log-Distance Pfadverlustmodells stellen empirische Modelle dar, die den (in logarithmischer Skala angegebenen) Pfadverlust als stückweise lineare Funktion der logarithmischen Entfernung zum Sender abbilden [66, 157]. Einen Spezialfall dieser Modelle bildet das *Dual-Slope Modell*, welches den Pfadverlust beschreibt als

*Dual-Slope  
Pfadverlustmodell*

$$PL(d) \text{ dB} = PL(d_0) \text{ dB} + \begin{cases} \alpha_1 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \text{ dB} & \text{für } d \leq d_{bp} , \\ \alpha_1 10 \log_{10} \left( \frac{d_{bp}}{d_0} \right) \text{ dB} + \alpha_2 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right) \text{ dB} & \text{für } d > d_{bp} , \end{cases} \quad (4.20)$$

wobei die Parameter  $\alpha_1$  sowie  $\alpha_2$  empirisch zu ermittelnde umgebungsabhängige Pfadverlustkoeffizienten und  $d_{bp}$  die Breakpoint Distance beschreiben, welche den Übergang von  $\alpha_1$  zu  $\alpha_2$  markiert.

Cheng et al. stellen in [26] und [28] Ergebnisse extensiver schmalbandiger Messkampagnen bei 5,9 GHz zwischen einem sendenden und einem empfangenden Fahrzeug in ländlicher Umgebung sowie in Stadtrand- und Autobahn szenarien in den USA vor und leiten Empfehlungen zur Ausbreitungsmodellierung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ab. Für die von ihnen untersuchten Autobahn szenarien zeigen Cheng et al. in [28] sowie Stančil et al. in [157], dass ein Dual-Slope Pfadverlustmodell mit den Parametern  $\alpha_1 = 1,9$ ,  $\alpha_2 = 4,0$  sowie einer Breakpoint Distance  $d_{bp} = 220 \text{ m}$  die geringste Abweichung zum gemessenen Pfadverlust liefert.

Empirisches  
Dual-Slope Pfad-  
verlustmodell für  
Autobahnszenarien

Die ermittelte Breakpoint Distance entspricht mit den verwendeten Antennenhöhen  $h_t = 1,51$  und  $h_r = 1,93$  sowie der Wellenlänge  $\lambda = 0,0508$  m näherungsweise der aus dem Two-Ray Ground Reflection Modell herleitbaren Distanz, in welcher die erste Fresnelzone die Bodenebene berührt und ab welcher der Pfadverlust mit der vierten Potenz der Distanz zum Sender abnimmt (siehe Gl. 4.15). Im Ergebnis empfehlen die Autoren zur Modellierung des Pfadverlustes bei Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnszenarien ein Dual-Slope Modell nach Gl. 4.20 mit den Parametern  $\alpha_1 = 2,0$ ,  $\alpha_2 = 4,0$  und  $d_{bp} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$  (siehe Gl. 4.15).

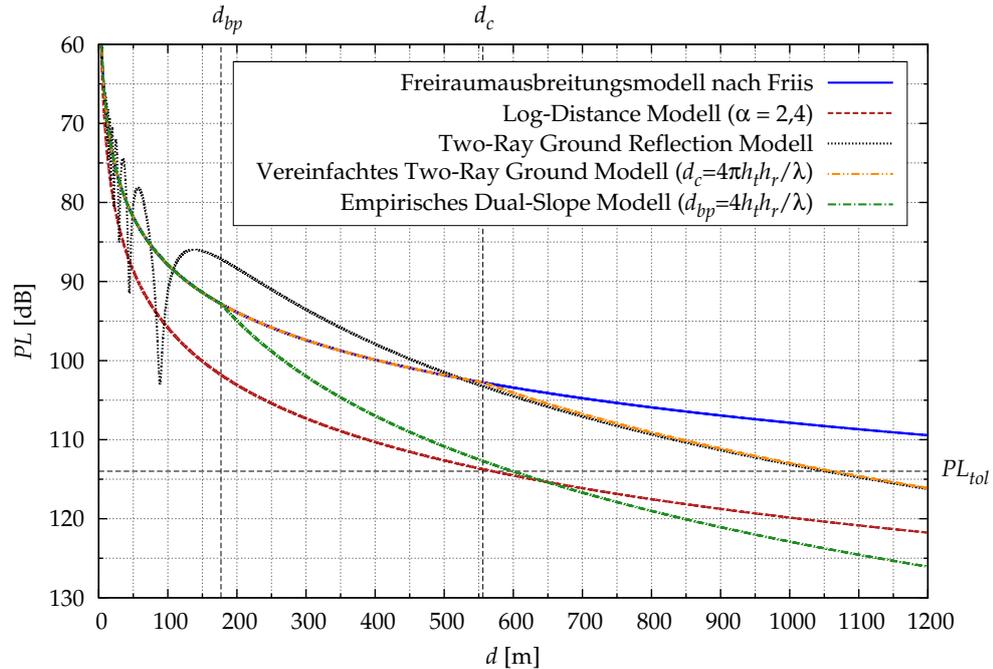


Abbildung 18: Pfadverlust als Funktion der Distanz zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Modelle mit den Parametern  $h_t = h_r = 1,5$  m,  $f_c = 5,9$  GHz sowie der Breakpoint Distance  $d_{bp} = 177$  m und der Crossover Distance  $d_c = 556,06$  m.

Vergleich der  
Pfadverlustmodelle

Abbildung 18 zeigt vergleichend den Pfadverlust als Funktion der Distanz zwischen Sender und Empfänger für die hier beschriebenen Pfadverlustmodelle. Abgebildet sind für eine Trägerfrequenz von  $f_c = 5,9$  GHz, eine angenommene Sende- und Empfangsantennenhöhe von  $h_t = h_r = 1,5$  m sowie  $G_t = G_r = 1$

- das Freiraumausbreitungsmodell nach Friis (siehe Gl. 4.8),
- ein Log-Distance Pfadverlustmodell mit  $\alpha = 2,4$  (siehe Gl. 4.18),
- das Two-Ray Ground Reflection Modell (siehe Gl. 4.9),
- das vereinfachte Two-Ray Ground Modell nach Gl. 4.16 mit der Crossover Distance  $d_c = 556,06$  m aus Gl. 4.17 sowie

- das als Ergebnis von Autobahn-Messkampagnen [28, 157] empfohlene Dual-Slope Pfadverlustmodell nach Gl. 4.20 mit  $\alpha_1 = 2,0$ ,  $\alpha_2 = 4,0$  und der Breakpoint Distance  $d_{bp} = 177$  m aus Gl. 4.15.

Der Referenz-Pfadverlust  $PL(d_0)$  wurde dabei nach dem Freiraumausbreitungsmodell bestimmt (siehe Gl. 4.19). Zur Orientierung enthält die Abbildung darüber hinaus den *tolerierbaren Pfadverlust*  $PL_{tol} = 114$  dB, der aus einer angenommenen Empfängerempfindlichkeit von  $P_{r,th} = -91$  dBm und einer Sendeleistung von  $P_t = 23$  dBm resultiert. Diese Werte entsprechen der Leistungsfähigkeit heutiger IEEE 802.11 Hardware (siehe Abschnitt 4.2). Aus dem tolerierbaren Pfadverlust kann für die einzelnen Modelle mit der für einen erfolgreichen Frameempfang notwendigen Bedingung  $PL(d) \leq PL_{tol}$  somit direkt die ohne Berücksichtigung von Fading, Shadowing oder Interferenzen unter den gegebenen Annahmen erreichbare Kommunikationsreichweite ermittelt werden.

Für  $d \leq d_{bp}$  entspricht  $PL(d)$  sowohl im vereinfachten Two-Ray Ground Modell als auch im Dual-Slope Modell dem Freiraumausbreitungsmodell nach Friis. Im Dual-Slope Modell fällt im weiteren Verlauf  $PL(d)$  für  $d > d_{bp}$ , im vereinfachten Two-Ray Ground Modell für  $d > d_c$  mit der vierten Potenz von  $d$  ab. Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich die erreichbaren Kommunikationsreichweiten der Modelle signifikant voneinander unterscheiden. Aus dem Freiraumausbreitungsmodell nach Friis resultiert wie erwartet eine sehr hohe, in realen VANET-Szenarien nicht erreichbare Kommunikationsreichweite von mehr als 2000 m. Während das empirisch validierte Dual-Slope Modell für eine angenommene Sendeleistung von 23 dBm eine Kommunikationsreichweite von etwa 599 m prognostiziert, liegt dieser Wert für das Two-Ray Ground Reflection bzw. das vereinfachte Two-Ray Ground Modell mit 1052 m bzw. 1062 m deutlich höher als für Autobahnszenarien auf Basis von Messergebnissen zu erwarten ist [28, 138, 157].

In der Literatur existiert eine Reihe von Simulationsstudien zur Leistungsfähigkeit von VANETs, die verschiedene Varianten der oben skizzierten Pfadverlustmodelle zur Charakterisierung des Funkkanals nutzen. Einige seien an dieser Stelle exemplarisch genannt:

*VANET-Ausbreitungsmodellierung in der Literatur*

- Das Freiraumausbreitungsmodell nach Friis (siehe Gl. 4.8) wird von Schmidt et al. sowohl in einem Autobahnszenario [135] als auch in einem städtischen Szenario [137] verwendet. Baldessari et al. nutzen dieses Modell ebenfalls zur Simulation eines Autobahnszenarios [3]. Messkampagnen zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation weisen allerdings darauf hin, dass das Freiraumausbreitungsmodell den Pfadverlust insbesondere für große Entfernungen signifikant unterschätzt und somit die aus der Annahme von Freiraumausbreitung resultierenden Kommunikationsreichweiten deutlich höher sind als die in der Realität erzielbaren Werte [26, 28, 104].
- Beispiele für die Verwendung des Log-Distance Pfadverlustmodells (siehe Gl. 4.18) finden sich für Autobahnszenarien bei ElBatt et al. mit  $\alpha = 2,15$  [32], bei Huang et al. mit  $\alpha = 2,31$  [72, 73] sowie Kloiber et al.

mit  $\alpha = 2,25$  [95, 96]. Während durch die Anpassung des Pfadverlustkoeffizienten im Log-Distance Pfadverlustmodell im Vergleich zum Freiraumausbreitungsmodell bereits realitätsnähere Kommunikationsreichweiten erzielt werden, berücksichtigt dieses Modell nicht die in Messkampagnen festgestellte Zunahme des Pfadverlustkoeffizienten für große Entfernungen [26, 28, 155].

- Ein Two-Ray Ground Reflection Modell in Anlehnung an Gl. 4.9 wird von Sommer und Dressler mit gemessenen Empfangsleistungen einer Funkübertragung bei 5,89 GHz zwischen zwei Fahrzeugen auf einer vollständig freien Fläche verglichen und zur Pfadverlustmodellierung in VANET-Simulationen empfohlen [155]. Die Messergebnisse weisen eine hohe Übereinstimmung mit dem Modell auf und lassen die für dieses Modell charakteristische Sequenz von Minima und Maxima des Pfadverlustes im Distanzverlauf erkennen. Gleichwohl lassen sich diese Ergebnisse nicht direkt auf Autobahnszenarien übertragen, denn sowohl die Annahmen des Two-Ray Ground Reflection Modells, die zu einer Überlagerung der beiden Komponenten nach Gl. 4.9 führen, als auch die verwendete Messumgebung in [155] umfassen eine ungehinderte, abschattungsfreie Ausbreitung der LOS- und der am Boden reflektierten Signalkomponente. In Autobahnszenarien ist mit der Ausnahme sehr niedriger Verkehrsdichten jedoch davon auszugehen, dass insbesondere die am Boden reflektierte Komponente diese Bedingung nicht durchgängig erfüllt. Diese Vermutung wird durch die Ergebnisse verschiedener Messkampagnen auf Autobahnen gestützt, die bei unterschiedlichen Verkehrsdichten nicht die für das Two-Ray Ground Reflection Modell charakteristischen Wechselfolgen von Minima und Maxima des Pfadverlustes erkennen lassen [28, 120, 121].
- Die weiteste Verbreitung in VANET-Simulationsstudien weist das vereinfachte Two-Ray Ground Modell nach Gl. 4.16 mit der Crossover Distance  $d_c$  aus Gl. 4.17 auf, welches für Autobahnszenarien von Xu et al. [185], Torrent-Moreno [170], Schmidt-Eisenlohr (et al.) [139, 140, 141], Mittag et al. [110] sowie An et al. [2] und in einem Innenstadtszenario von Schmidt et al. [136] verwendet wird. Das vereinfachte Two-Ray Ground Modell weist im Vergleich zum Freiraumausbreitungsmodell eine deutlich realitätsnähere Nachbildung des Pfadverlustes in Autobahnszenarien auf, da die Zunahme des Pfadverlustkoeffizienten für große Entfernungen berücksichtigt wird. Die Festlegung der Crossover Distance  $d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda}$  nach Gl. 4.17 ist nach gegenwärtiger Publikationslage jedoch nicht empirisch belegbar. Durchgeführte Messkampagnen zeigen stattdessen eine Zunahme des Pfadverlustkoeffizienten bereits für deutlich geringere Entfernungen als  $d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda}$  auf [26, 28, 155, 161].
- Ein Dual-Slope Pfadverlustmodell wird zur Untersuchung eines Autobahnszenarios von Bauza und Gozalvez verwendet [7]. Die Autoren verweisen dabei auf die Ergebnisse der Autobahn-Messkampagnen von Cheng et al. [28, 157].

Die aktuellen Veröffentlichungen zugrunde liegenden Simulationsstudien weisen somit deutliche Unterschiede in der Pfadverlustmodellierung auf. Gleichwohl wirkt sich der distanzabhängige Verlauf des Pfadverlustes signifikant auf Empfangsleistungen und damit auf die Anzahl der um den Kanalzugriff in Konkurrenz stehenden Stationen sowie die Stärke der auftretenden Interferenzen aus. Eine realitätsnahe Modellierung des Pfadverlustes ist daher von entscheidender Bedeutung bei der Untersuchung von Skalierbarkeitsfragen in VANETs.

Aufgrund der Tatsache, dass mit den von Cheng, Stancil et al. veröffentlichten Ergebnissen extensiver Messkampagnen zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf Autobahnen und dem daraus abgeleiteten Dual-Slope Modell ein empirisch validiertes Pfadverlustmodell zur Verfügung steht [28, 157], wird von der Eignung dieses Modells für die Pfadverlustmodellierung in Autobahnszenarien im Rahmen dieser Arbeit ausgegangen. In Abschnitt 4.3.3 erfolgt eine Validierung dieser Form der Pfadverlustmodellierung anhand von Feldtests in Autobahnszenarien, welche zu diesem Zweck unter Nutzung der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Messumgebung durchgeführt wurden. Darüber hinaus wird in Abschnitt 5.3.1 eine simulative Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle auf die Ergebnisse der Leistungsbewertung in VANETs vorgenommen.

#### 4.3.2 Modellierung von Fading in Autobahnszenarien

Ergänzend zu der in Abschnitt 4.3.1 erläuterten Pfadverlustmodellierung ist für eine realitätsnahe Nachbildung der Kommunikation in VANETs eine Modellierung der in Form von *Large-Scale Fading (Shadowing)* oder *Small-Scale Fading* (siehe Abschnitt 4.3, Seite 81) auftretenden Fluktuation der Empfangsleistung notwendig. In diesem Abschnitt wird auf die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Modellierung von Fading in Autobahnszenarien eingegangen.

*Large-Scale Fading* oder *Shadowing* ist im Vergleich zum *Small-Scale Fading* über wesentlich größere Distanzintervalle beobachtbar und wird durch Gebäude, Hügel und andere größere Objekte in der Umgebung hervorgerufen, die eine Dämpfung, Reflexion, Beugung oder Streuung des Signals verursachen. Da vollständige und exakte Informationen über Position, Größe und dielektrische Eigenschaften dieser Objekte in der Regel nicht vorliegen, werden zur Charakterisierung von Shadowing ebenso wie von Small-Scale Fading üblicherweise stochastische Modelle genutzt.

Ein weit verbreitetes Modell zur Charakterisierung von Shadowing ist das sogenannte *Log-Normal Shadowing*, welches annimmt, dass der Pfadverlust  $PL$  in einer bestimmten Entfernung  $d$  zum Sender als Zufallsvariable beschrieben werden kann, die einer Logarithmischen Normalverteilung folgt [35, 66, 130]. Der logarithmische, in dB angegebene Pfadverlust  $PL_{\text{dB}}$  ist demnach normalverteilt mit der Wahrscheinlichkeitsdichte

$$p(PL_{\text{dB}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{PL_{\text{dB}}}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{PL_{\text{dB}} - \mu_{PL_{\text{dB}}}}{\sigma_{PL_{\text{dB}}}}\right)^2\right), \quad (4.21)$$

*Log-Normal  
Shadowing*

wobei  $\mu_{PL_{\text{dB}}}$  den Erwartungswert und  $\sigma_{PL_{\text{dB}}}$  die Standardabweichung des Pfadverlustes in dB bezeichnen.

Der Erwartungswert des Pfadverlustes kann dabei durch eines der in Abschnitt 4.3.1 dargestellten Pfadverlustmodelle berechnet werden. Mit dem Log-Distance Pfadverlustmodell aus Gl. 4.18 ergibt sich z. B. für den Pfadverlust in einer Entfernung  $d$  zum Sender unter Berücksichtigung von Shadowing [130]:

$$PL(d) \text{ dB} = PL(d_0) \text{ dB} + \alpha 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \text{ dB} + X_\sigma \text{ dB} . \quad (4.22)$$

Dabei bezeichnet  $X_\sigma$  eine normalverteilte Zufallsvariable mit Erwartungswert  $E[X] = 0 \text{ dB}$  und der (ebenfalls in dB angegebenen) Standardabweichung  $\sigma_{PL_{\text{dB}}}$ .

*Small-Scale Fading* wird durch eine Überlagerung der durch Mehrwegeausbreitung entstehenden Signalkomponenten am Empfänger verursacht. Abhängig von den individuellen Phasenlagen der empfangenen Signalkomponenten am Empfänger findet eine konstruktive oder destruktive Überlagerung statt, die zu einer Fluktuation der empfangenen Signalamplitude und Leistung führt. Small-Scale Fading ist daher bereits bei sehr kleinen Positionsänderungen in der Größenordnung der Wellenlänge des übertragenen Signals zu beobachten.

*Rayleigh Fading*

Ein weit verbreitetes stochastisches Modell zur Charakterisierung von Small-Scale Fading für Signale, die keine dominante Signalkomponente, z. B. in Form eines LOS-Ausbreitungspfades, enthalten, ist *Rayleigh Fading*. Unter der Annahme, dass die Inphase-Komponente  $r_I(t)$  und die Quadratur-Komponente  $r_Q(t)$  des empfangenen Signals  $r(t)$  statistisch unabhängige, normalverteilte Zufallsvariablen mit identischer Varianz  $\sigma^2$  und dem Erwartungswert  $E[r_I(t)] = E[r_Q(t)] = 0$  darstellen, kann gezeigt werden, dass der Betrag der empfangenen komplexen Einhüllenden

$$z(t) = |r(t)| = \sqrt{r_I^2(t) + r_Q^2(t)} \quad (4.23)$$

einer Rayleigh-Verteilung mit der Wahrscheinlichkeitsdichte

$$p(z) = \begin{cases} \frac{z}{\sigma^2} e^{-z^2/(2\sigma^2)} & \text{für } z \geq 0 \\ 0 & \text{für } z < 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

folgt. Weiterhin kann gezeigt werden, dass unter diesen Voraussetzungen die Leistung  $P_r$  einer exponentialverteilten Zufallsvariable mit der Wahrscheinlichkeitsdichte

$$p(P_r) = \begin{cases} \frac{1}{\Omega_p} e^{-P_r/\Omega_p} & \text{für } P_r \geq 0 \\ 0 & \text{für } P_r < 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

entspricht, wobei  $\Omega_p = 2\sigma^2$  die mittlere Empfangsleistung ohne Berücksichtigung von Small-Scale Fading bezeichnet [66, 130, 159].

Rayleigh-Fading wird zur Ausbreitungsmodellierung im Rahmen von VANET-Simulationsstudien beispielsweise angewendet für ein Autobahnzenario von Jiang et al. [86] sowie für ein Innenstadtszenario von Schmidt et al. [136].

Existiert hingegen ein LOS-Ausbreitungspfad oder weist das empfangene Signal eine ähnlich dominante Komponente auf, so sind die Voraussetzungen des Rayleigh-Fadings nicht erfüllt, da für die Inphase- bzw. Quadraturkomponente  $E[r_I(t)] \neq 0$  bzw.  $E[r_Q(t)] \neq 0$  gilt. In diesem Fall wird häufig *Ricean Fading* als stochastisches Modell zur Charakterisierung des Empfangssignals verwendet. Unter der Annahme, dass  $r_I(t)$  und  $r_Q(t)$  wiederum statistisch unabhängig mit identischer Varianz  $\sigma^2$  sind, folgt der Betrag der komplexen Einhüllenden des Empfangssignals einer Rice-Verteilung mit der Wahrscheinlichkeitsdichte

*Ricean Fading*

$$p(z) = \begin{cases} \frac{z}{\sigma^2} e^{-(z^2+s^2)/(2\sigma^2)} I_0\left(\frac{zs}{\sigma^2}\right) & \text{für } z \geq 0 \\ 0 & \text{für } z < 0 \end{cases}, \quad (4.26)$$

wobei  $I_0(\cdot)$  die modifizierte Besselfunktion nullter Ordnung bezeichnet. Die Leistung der dominanten bzw. LOS-Komponente beträgt  $s^2$ , die mittlere Leistung der übrigen Signalkomponenten beträgt  $2\sigma^2$ , demnach ergibt sich die mittlere Leistung des Signals als  $\Omega_p = s^2 + 2\sigma^2$ . Üblicherweise erfolgt eine Parametrierung der Verteilung durch den Fading-Parameter  $K$  mit

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2}, \quad (4.27)$$

der das Leistungsverhältnis zwischen LOS- und Nicht-LOS-Komponenten quantifiziert. Je kleiner  $K$  gewählt wird, desto größer ist die Fading-Intensität. Für  $K = 0$  ergibt sich Rayleigh-Fading. Unter Verwendung von  $K$  und  $\Omega_p$  lässt sich die Wahrscheinlichkeitsdichte des Betrags der komplexen Einhüllenden schreiben als [66, 113, 130, 159]

$$p(z) = \begin{cases} \frac{2z(K+1)}{\Omega_p} e^{-K - \frac{(K+1)z^2}{\Omega_p}} I_0\left(2z\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega_p}}\right) & \text{für } z \geq 0 \\ 0 & \text{für } z < 0 \end{cases}. \quad (4.28)$$

Es kann gezeigt werden, dass die Empfangsleistung  $P_r$  im Falle von Ricean Fading einer nichtzentralen Chi-Quadrat-Verteilung mit zwei Freiheitsgraden folgt, d. h. für die Wahrscheinlichkeitsdichte gilt [159]:

$$p(P_r) = \begin{cases} \frac{K+1}{\Omega_p} e^{-K - \frac{(K+1)P_r}{\Omega_p}} I_0\left(2\sqrt{\frac{K(K+1)P_r}{\Omega_p}}\right) & \text{für } P_r \geq 0 \\ 0 & \text{für } P_r < 0 \end{cases}. \quad (4.29)$$

Ricean Fading wird zur Ausbreitungsmodellierung im Rahmen von VANET-Simulationsstudien für Autobahnzenarien z. B. angewendet von Huang et al. (in Kombination mit Rayleigh-Fading für große Distanzen) [72] sowie Fallah et al. [57].

Ein weiteres, weit verbreitetes Modell zur Charakterisierung von Small-Scale Fading ist *Nakagami-Fading*. Der Betrag der empfangenen Einhüllenden

*Nakagami-Fading*

wird hier als Zufallsvariable beschrieben, welche der in [115] vorgestellten Nakagami- $m$ -Verteilung folgt. Für die Wahrscheinlichkeitsdichte des Betrags der Einhüllenden gilt demnach

$$p(z) = \begin{cases} \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega_p^m} e^{-mz^2/\Omega_p} & \text{für } z \geq 0 \\ 0 & \text{für } z < 0 \end{cases}, \quad m \geq 0,5, \quad (4.30)$$

wobei  $\Omega_p$  wie zuvor die mittlere Empfangsleistung und  $\Gamma(\cdot)$  die Gammafunktion bezeichnet. Neben  $\Omega_p$  wird die Verteilung parametrisiert mit dem Fading-Parameter  $m$ , welcher die Fading-Intensität quantifiziert. Für  $m = 1$  ergibt sich Rayleigh-Fading als Spezialfall, während für  $m \rightarrow \infty$  das Signal kein Fading aufweist. Für  $m = (K + 1)^2 / (2K + 1)$  lässt sich mithilfe der Nakagami- $m$ -Verteilung Ricean-Fading mit dem Fading-Parameter  $K$  nachbilden [66, 113, 159].

Die Empfangsleistung  $P_r$  folgt im Falle von Nakagami-Fading einer Gamma-Verteilung mit dem Shape-Parameter  $m$  und dem Scale-Parameter  $\Omega_p/m$ , d. h. für die Wahrscheinlichkeitsdichte gilt [66, 113, 159]:

$$p(P_r) = \begin{cases} \frac{m}{\Omega_p \Gamma(m)} \left(\frac{mP_r}{\Omega_p}\right)^{m-1} e^{-mP_r/\Omega_p} & \text{für } P_r \geq 0 \\ 0 & \text{für } P_r < 0 \end{cases}. \quad (4.31)$$

Nakagami-Fading wird zur Ausbreitungsmodellierung im Rahmen von VANET-Simulationsstudien für Autobahnscenarien mit unterschiedlichen Fading-Intensitäten beispielsweise angewendet von Torrent-Moreno (et al.) [170, 171], Schmidt-Eisenlohr (et al.) [139, 140, 141], Mittag et al. [110] sowie An et al. [2].

Nakagami-Fading ist, da eine Parametrierung der Fading-Intensität erfolgen kann, flexibler einsetzbar als Rayleigh-Fading und weist eine bessere Handhabbarkeit als Ricean-Fading auf. Für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation existieren empirische Ergebnisse aus Messkampagnen, die eine Verwendung von Nakagami-Fading nahelegen und Empfehlungen zur Parametrierung der Verteilung geben [26, 157, 161].

*Fading-Intensität*

Cheng et al. sowie Stancil et al. stellen in [26] und [157] im Zusammenhang mit Ergebnissen verschiedener Messkampagnen, welche die Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen innerhalb eines Vorstadt-Strasennetzes bei 5,9 GHz zum Gegenstand haben, ein Fitting dieser Messergebnisse mit einem Nakagami-Fadingmodell vor und leiten den resultierenden Fading-Parameter  $m$  ab. Eine zusätzliche Modellierung von Shadowing erfolgt dabei nicht, sondern die Fluktuation des empfangenen Signals wird ausschließlich durch eine Nakagami- $m$ -Verteilung modelliert. Die Autoren ermitteln einen mit wachsender Distanz zwischen Sender und Empfänger abnehmenden Wert für  $m$ : Während für geringe Entfernungen Ricean Fading ( $m > 1$ ) beobachtet wird, weisen die Ergebnisse für große Entfernungen eine höhere Fading-Intensität als bei Rayleigh-Fading auf ( $m < 1$ ).

Auch auf Autobahnen nimmt mit zunehmender Entfernung die Wahrscheinlichkeit einer dominanten Mehrwegekomponente bzw. eines LOS-Pfades ab, daher ist statistisch eine Zunahme der mittleren Fading-Intensität

mit wachsender Entfernung zu erwarten. Gleichwohl lassen sich die in [26] und [157] ermittelten Ergebnisse nicht direkt auf Autobahnszenarien übertragen. Die Autoren weisen darauf hin, dass von Gebäuden verursachte Abschattungen bei Abbiegevorgängen an Kreuzungen und in Kurven eine besonders hohe Fading-Intensität der Messergebnisse verursachen. Aufgrund des Fehlens von Kreuzungen sowie größerer Kurvenradien ist für Autobahnszenarien daher mit einer geringeren Fading-Intensität als innerhalb der in [26] und [157] untersuchten Vorstadt-Kommunikationsszenarien zu rechnen.

*Entfernungs-  
abhängige Fading-  
Intensität auf  
Autobahnen*

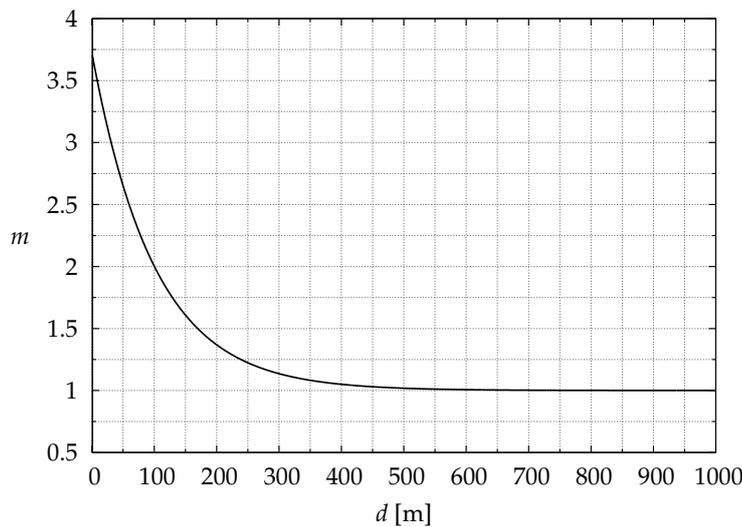


Abbildung 19: Parameter  $m$  für Nakagami-Fading als Funktion der Distanz.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Modellierung von Fading in Autobahnszenarien Nakagami-Fading angenommen. Um die Flexibilität dieses Modells im Hinblick auf die Charakterisierung unterschiedlicher Fading-Intensitäten weiter zu erhöhen, wird der Fading-Parameter  $m$  dabei nicht als Konstante, sondern als Funktion der Distanz zwischen Sender und Empfänger modelliert. In Anlehnung an die Ergebnisse aus [26] und [157] unter Beachtung der Bedingungen in Autobahnszenarien, wo im Vergleich zu Vorstadt-Szenarien mit einer langsameren Abnahme des Einflusses der dominanten Komponente mit zunehmender Entfernung sowie einer geringeren Fading-Intensität für große Entfernungen zu rechnen ist, wird  $m$  für Distanzen  $d > 0$  modelliert als

$$m(d) = 2,7 \cdot e^{-0,01(d-1,0)} + 1,0 \quad , \quad (4.32)$$

d. h. für geringe Entfernungen ( $m(1,0 \text{ m}) = 3,7$ ) herrscht Ricean Fading mit einer stark ausgeprägten dominanten (LOS-)Komponente und geringer Fading-Intensität vor, während das Modell für große Entfernungen hohe Fading-Intensitäten aufweist und sich asymptotisch an Rayleigh-Fading annähert ( $\lim_{d \rightarrow \infty} m = 1,0$ ), wodurch der mit zunehmender Entfernung abnehmende Einfluss der dominanten Signalkomponente quantifiziert wird. Abbildung 19 zeigt den Fading-Parameter  $m$  als Funktion der Distanz nach Gl. 4.32.

### 4.3.3 Validierung der Ausbreitungsmodellierung durch Feldtests

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Feldtests vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit zum Zwecke der Ausbreitungsmodellbildung und -validierung auf der Bundesautobahn 2 mit jeweils zwei Testfahrzeugen durchgeführt wurden [143]. Im Folgenden werden zunächst Testaufbau und -konfiguration beschrieben, bevor im Anschluss die für die Ausbreitungsmodellierung relevanten Ergebnisse erläutert werden.

#### 4.3.3.1 Testaufbau und -konfiguration

Die Fahrzeuge wurden zur Durchführung der Messungen mit den Kommunikationseinheiten der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Messumgebung inkl. auf dem Fahrzeugdach platzierter Magnetfußantennen und GPS-Empfänger ausgerüstet. Obwohl während der Messkampagne unterschiedliche Testfahrzeuge zum Einsatz kamen<sup>2</sup>, kann im Rahmen der Pfadverlustmodellierung aufgrund der kaum variierenden Fahrzeughöhe vereinfachend von einer einheitlichen Antennenhöhe von 1,5 m ausgegangen werden. Jeweils ein Testfahrzeug wurde als Sender konfiguriert, während das zweite Testfahrzeug als Empfänger für die erzeugten Testdaten diente.

Der Paketgenerator der sendenden Kommunikationseinheit wurde für die periodische Erzeugung von Nachrichten mit einer Erzeugungsrate von 100 Hz und einer Netto-Nachrichtenlänge von 500 Bytes konfiguriert. Mit UDP-, IP-, LLC- und MAC-Header (8/20/8/28 Bytes) ergibt sich eine Länge der erzeugten IEEE 802.11 MAC-Frames von 564 Bytes, welche mit einer Datenrate von 6 Mbps übertragen wurden. Die Messungen wurden bei einer Trägerfrequenz (Mittenfrequenz) von 5,9 GHz und damit im dediziert für ITS-Fahrzeugkommunikation in Europa allokierten ITS-G5A-Frequenzband durchgeführt, sodass innerhalb des gewählten Kanals keinerlei Interferenzen mit der Testübertragung erzeugt wurden. Tabelle 6 fasst die Konfigurationsparameter zusammen.

Sendeleistung (EIRP)	23,2 dBm
Trägerfrequenz	5,9 GHz
Kanalbandbreite	10 MHz
Datenrate	6 Mbps
Antennenhöhe	1,5 m
Paketerzeugungsrate	100 Hz
Nachrichtenlänge (Payload)	500 Bytes
MAC-Framelänge	564 Bytes

Tabelle 6: Konfigurationsparameter bei der Durchführung der Feldtests.

Insgesamt wurden zwischen den Ausfahrten 42 (Veltheim) und 55 (Kreuz Braunschweig-Nord) der Bundesautobahn 2, die in diesem Abschnitt drei

<sup>2</sup>Eingesetzt wurden Fahrzeuge des Typs Mercedes-Benz C-Klasse (Baureihe S202), Volkswagen Scirocco III, Škoda Fabia II sowie Citroën C3 (2. Generation).

Fahrstreifen je Fahrtrichtung aufweist, Messdaten auf einer Fahrtstrecke von über 250 km erhoben und in die im Folgenden vorgestellte Auswertung einbezogen. Das sendende und empfangende Fahrzeug bewegten sich in unterschiedlicher Reihenfolge mit Geschwindigkeiten zwischen 90 und 140 km/h in gleicher Fahrtrichtung auf wechselnden Fahrstreifen. Dabei wurde die Distanz zwischen beiden Fahrzeugen systematisch variiert, um Erkenntnisse über die Distanzabhängigkeit des Pfadverlustes gewinnen zu können.

Bei sämtlichen Messungen war eine mittlere bis hohe Verkehrsdichte sowie ein signifikanter Anteil von Schwerlastverkehr vorhanden, der sich überwiegend auf dem rechten, teilweise auf dem mittleren Fahrstreifen bewegte und zu vorübergehenden Unterbrechungen der Sichtverbindung (*Non Line of Sight (NLOS)*) führte. Insbesondere zwischen Hannover und Veltheim weist die Bundesautobahn 2 außerdem eine Reihe von Hügelkuppen im Streckenverlauf auf, die einerseits ebenfalls zu vorübergehenden NLOS-Situationen, andererseits jedoch auch zu einer zeitweisen Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer Sichtverbindung führen können.

#### 4.3.3.2 Ergebnisse

Um aus den erhobenen Messdaten Erkenntnisse für die Modellierung des Pfadverlustes in Autobahnszenarien zu gewinnen, wurden sowohl die Empfangsleistung als auch das Verhältnis zwischen korrekt empfangenen und gesendeten Frames, hier als Packet Delivery Rate bezeichnet, in Abhängigkeit der Distanz zwischen beiden Fahrzeugen (Luftlinie) ausgewertet. Dabei wurden die auf der Bundesautobahn 2 erhobenen Messdaten in aggregierter Form evaluiert. Dies ermöglicht die Bewertung einer Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse auf die Funkausbreitung in Autobahnszenarien in statistisch signifikanter Form.

Abbildung 20 zeigt die so gewonnenen Ergebnisse: Dargestellt sind die über der Distanz zwischen Sender und Empfänger aufgetragene Empfangsleistung  $P_r(d)$  sowie der arithmetische Mittelwert der Empfangsleistung  $\bar{P}_r(d)$  und die Packet Delivery Rate  $PDR(d)$ , wobei  $\bar{P}_r(d)$  und  $PDR(d)$  für Distanzintervalle der Länge 10 m errechnet wurden.<sup>3</sup>

Gemessene  
Empfangsleistungen  
und PDRs

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß ein starkes Fading des Signals, erkennbar an der breiten Streuung der gemessenen Empfangsleistung  $P_r(d)$ . Näherungsweise erkennbar wird auch die Empfindlichkeit der verwendeten Empfänger: Während für  $P_r \geq -93$  dBm noch ein zuverlässiger Empfang möglich ist, können für  $P_r \leq -96$  dBm nur noch sehr vereinzelt Frames erfolgreich decodiert werden. Diese Beobachtung stimmt mit den in Abschnitt 4.2 dargestellten Ergebnissen überein.

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass Empfangsleistungen nur im Falle eines erfolgreichen Frameempfangs aufgezeichnet werden können. Daher sind die errechneten arithmetischen Mittelwerte der Empfangsleistung  $\bar{P}_r(d)$  nur bis zu einer Entfernung  $d \approx 350$  m aussagekräftig. Für größere Entfernungen weisen die errechneten Mittelwerte aufgrund der Nichtberücksich-

<sup>3</sup>Die aus den Messungen gewonnenen Ergebnisse werden in diesem Abschnitt mit Konfidenzintervallen für ein Konfidenzniveau von 95 % dargestellt. Zur Berechnung der Konfidenzintervalle wird auf die Erläuterungen auf Seite 140 in Kapitel 5 verwiesen.

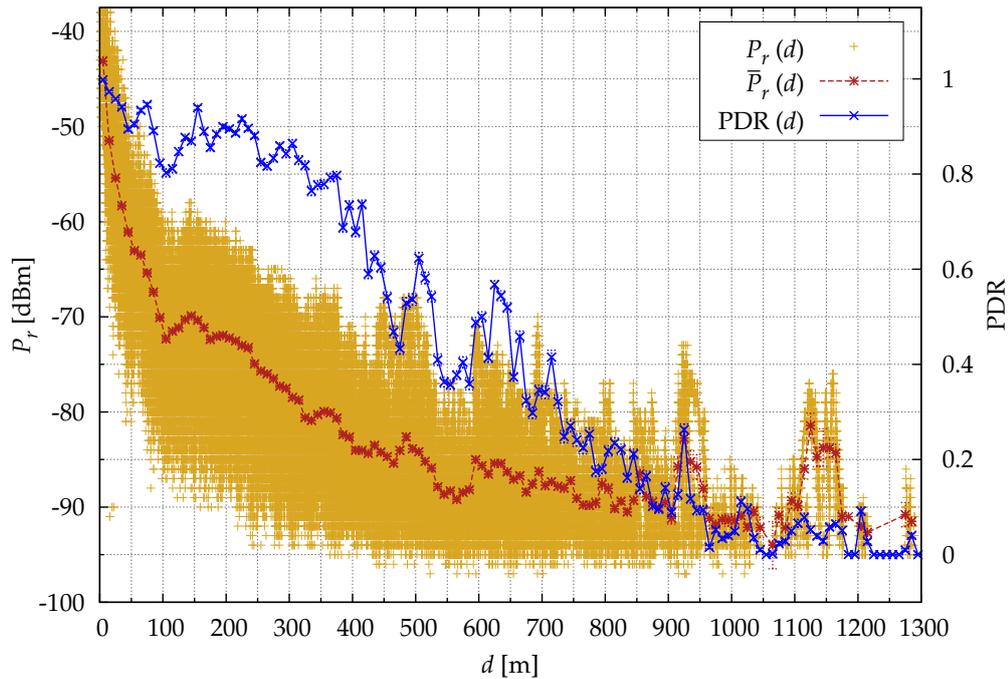


Abbildung 20: Ergebnisse der Feldtests auf Autobahnen - Empfangsleistung  $P_r$ , Mittelwert der Empfangsleistung  $\bar{P}_r$  und PDR als Funktion der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger.

tigung der Empfangsleistung nicht decodierbarer Frames eine inakzeptabel starke Verzerrung auf, woraus eine signifikante Überschätzung der tatsächlichen mittleren Empfangsleistung folgt.

Die PDR als Anteil erfolgreich empfangener Frames verbleibt im Distanzverlauf bis zu einer Entfernung von etwa 330 m stets über 80 %. Für  $d \geq 400$  m nimmt  $PDR(d)$  schnell ab, für  $d = 800$  m können bereits nur noch etwa 20 % der gesendeten Frames empfangen werden. Teilweise wurden Frames auch noch aus größerer Distanz empfangen, insbesondere sind für  $d \approx 930$  m und  $d \approx 1150$  m vereinzelt Frames mit einer unerwartet hohen Empfangsleistung erkennbar. Diese Ergebnisse können anhand einer Betrachtung von Messverlauf und Streckenprofil auf Situationen zurückgeführt werden, in denen sich der Sender, Empfänger oder beide Fahrzeuge in exponierter Position auf einer Hügelkuppe befanden, wodurch auch in großer Entfernung noch eine LOS-Kommunikation möglich war.

In Abbildung 21 ist die gemessene Empfangsleistung im Vergleich mit den in Abschnitt 4.3.1 erläuterten Pfadverlustmodellen dargestellt. Dabei wurde in Ergänzung zu den bereits in Abbildung 18 gezeigten Modellen eine Variation des empirischen Dual-Slope Modells nach Gleichung 4.20 mit den Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha_1 = 2,1$ ,  $\alpha_2 = 3,4$  verwendet. Die Abbildung enthält außerdem eine angenommene Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th} = -91$  dBm.

Das Freiraumausbreitungsmodell nach Friis (siehe Gl. 4.8) liefert erwartungsgemäß insbesondere für große Entfernungen  $d$  im Vergleich zu den in realen Autobahnszenarien erreichbaren Empfangsleistungen deutlich überhöhte Werte und führt ohne Berücksichtigung von Fading für die angenom-

Vergleich mit  
Pfadverlustmodellen

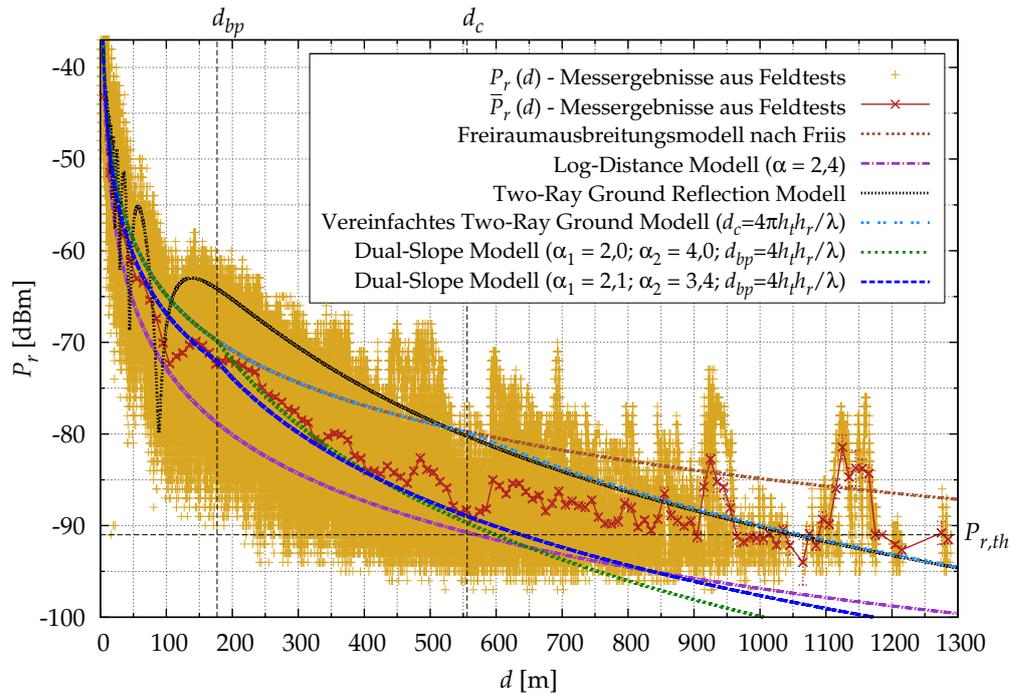


Abbildung 21: Gemessene Empfangsleistung  $P_r$  und Mittelwert der Empfangsleistung  $\bar{P}_r$  im Vergleich zu verschiedenen Pfadverlustmodellen mit den Parametern  $h_t = h_r = 1,5$  m und  $f_c = 5,9$  GHz. Zur Orientierung dienen Breakpoint Distance  $d_{bp} = 177$  m, Crossover Distance  $d_c = 556,06$  m und eine angenommene Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th} = -91$  dBm.

mene Empfängerempfindlichkeit und die bei der Durchführung der Feldtests verwendete Sendeleistung zu einer theoretischen Kommunikationsreichweite von mehr als 2000 m. Die Verwendung eines Log-Distance Modells (siehe Gl. 4.18) ermöglicht zwar für große Entfernungen eine gute Näherung der tatsächlichen Empfangsleistung und somit der erzielbaren Kommunikationsreichweite, führt jedoch für geringe Entfernungen zu einer deutlichen Unterschätzung der Empfangsleistung. Zur Beurteilung der Performanz des Netzes in Hochlastszenarien, deren Untersuchung einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, kommt jedoch einer möglichst genauen Näherung der erzeugten Interferenz unabhängig von der Distanz der interferierenden Station zum Empfänger eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zu.

Von besonderem Interesse ist die Tatsache, dass die Verwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells nach Gl. 4.16 mit der Crossover Distance  $d_c = 4\pi h_t h_r / \lambda$ , welches weite Verbreitung in Simulationsstudien zu VANET-Autobahnszenarien gefunden hat (siehe Abschnitt 4.3.1), für  $d > 250$  m zu einer inakzeptablen Unterschätzung des Pfadverlustes in Autobahnszenarien mittlerer bis hoher Verkehrsdichte und damit zu einer unrealistischen Einschätzung der erzielbaren Kommunikationsreichweite im den Messergebnissen zu Grunde liegenden interferenzfreien Fall führt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der diesem Modell inhärente Pfadverlustkoeffizient von 2,0 bis zur Crossover Distance  $d_c$  (hier 556,06 m) in der Realität so nicht be-

obachtbar ist. In Abschnitt 5.3.1 wird simulativ untersucht, welche Auswirkungen eine Verwendung dieses Pfadverlustmodells im Vergleich zu einer exakteren Pfadverlustmodellierung bei der Leistungsbewertung von VANET-Autobahnszenarien unter Berücksichtigung von Interferenzen hat.

Das Two-Ray Ground Reflection Modell (siehe Gl. 4.9), dessen Ergebnisse auf der Überlagerung des LOS-Signals mit einer am Boden reflektierten Signalkomponente unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung zwischen beiden Komponenten beruhen, bildet die Messergebnisse ebenfalls nicht in geeigneter Weise nach. Die für das Two-Ray Ground Reflection Modell charakteristischen Wechselfolgen von Minima und Maxima der Empfangsleistung treten in Feldtests nur in stark abgeschwächter Form auf. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass aufgrund des vorhandenen PKW- und insbesondere LKW-Verkehrs in den untersuchten Autobahnszenarien die dem Two-Ray Ground Reflection Modell zu Grunde liegende Annahme einer ungehinderten, abschattungsfreien Ausbreitung beider Signalkomponenten nicht durchgängig erfüllt ist. Diese Beobachtung legt außerdem die Vermutung eines nicht zu vernachlässigenden Einflusses sonstiger Reflexionspfade und gestreuter Signalkomponenten nahe. Die Messergebnisse bestätigen diesbezüglich die Resultate vorangegangener Messkampagnen [28, 120, 121].

*Parametrierung des  
Dual-Slope Modells*

Eine gute Approximation des tatsächlichen Pfadverlustes kann hingegen mit dem Dual-Slope Modell nach Gl. 4.20 erzielt werden, da die Breakpoint Distance  $d_{bp} = 4h_t h_r / \lambda$  in zufriedenstellender Näherung die Distanz widerspiegelt, ab der mit einer signifikanten Zunahme des Pfadverlustkoeffizienten zu rechnen ist. Aus Abbildung 21 deutlich zu erkennen ist jedoch auch, dass die von Cheng, Stancil et al. [28, 157] aus Messungen zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnszenarien abgeleiteten Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha_1 = 2,0$  und  $\alpha_2 = 4,0$  die Messergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Feldtests nicht optimal charakterisieren, sondern zu einer leichten Überschätzung der Empfangsleistung für geringe bis mittlere Entfernungen führen. Die Begründung für dieses Verhalten liegt augenscheinlich in der Tatsache, dass die in [28] und [157] vorgestellten Messungen auf US-Highways bei moderater Verkehrsdichte durchgeführt wurden, während bei den auf der Bundesautobahn 2 durchgeführten Messungen durchgängig eine mindestens mittlere, oft hohe Verkehrsdichte zu beobachten war, die zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von Abschattung oder Streuung des Signals und damit zu einer Reduzierung der mittleren Empfangsleistung führt.

Gleichwohl liegen gerade Autobahnszenarien mit hohen Verkehrsdichten im Zentrum des Interesses dieser Arbeit, da eine Leistungsbewertung bei hoher Netzlast durchgeführt wird. Aus diesem Grund werden abweichend von den in [28] und [157] abgeleiteten Empfehlungen die Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha_1 = 2,1$  und  $\alpha_2 = 3,4$  zur Parametrierung des Dual-Slope Modells genutzt, die eine zufriedenstellende Approximation des tatsächlichen Pfadverlustes in Autobahnszenarien bei mittlerer bis hoher Verkehrsdichte erlauben (siehe Abbildung 21). Die maximale Abweichung zwischen Modell und Messung liegt bei ca. 5 dB für  $d \approx 105$  m. Die Abweichung ist jedoch stark auf diesen Punkt, an dem offenbar eine destruktive Überlagerung des LOS-Signals mit einer am Boden reflektierten Signalkomponente maßgeblich den Pfadverlust

beeinflusst, begrenzt. Auch hier ist zu beachten, dass aufgrund zunehmender Paketverluste nur Messwerte bis zu einer Distanz  $d \approx 350$  m aussagekräftig und damit in die Modellbildung einzubeziehen sind.

Über die Quantifizierung des Pfadverlustes hinaus kann auf Basis der Ergebnisse der Feldtests die Eignung des vorgesehenen Fading-Modells zur Ausbreitungsmodellierung auf Autobahnen überprüft werden. Im Falle des im Rahmen dieser Arbeit zur Modellierung von Fading in Autobahnszenarien vorgesehenen Nakagami-Fadings folgt die Empfangsleistung  $P_r$  einer Gammaverteilung (siehe Abschnitt 4.3.2) mit dem Shape-Parameter  $m$ , dem Scale-Parameter  $\Omega_p/m$  und der Wahrscheinlichkeitsdichte

$$p(P_r) = \begin{cases} \frac{m}{\Omega_p \Gamma(m)} \left(\frac{m P_r}{\Omega_p}\right)^{m-1} e^{-m P_r / \Omega_p} & \text{für } P_r \geq 0 \\ 0 & \text{für } P_r < 0 \end{cases}, \quad (4.33)$$

wobei  $\Gamma(\cdot)$  die Gammafunktion und  $\Omega_p$  die mittlere Empfangsleistung bezeichnet, welche mithilfe des Dual-Slope Modells nach Gl. 4.20 unter Verwendung der empirisch ermittelten Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha_1 = 3,1$  sowie  $\alpha_2 = 3,4$  berechnet wird. Neben  $\Omega_p$  wird die Verteilung parametrisiert mit dem Fading-Parameter  $m$ , welcher die Fading-Intensität quantifiziert. Der statistisch zu erwartenden Zunahme der mittleren Fading-Intensität mit wachsender Entfernung wird im hier verwendeten Modell durch die Abhängigkeit des Fading-Parameters  $m$  von der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger (siehe Abbildung 19) in der Form

$$m(d) = 2,7 \cdot e^{-0,01(d-1,0)} + 1,0 \quad (4.34)$$

Rechnung getragen.

Unter der Annahme, dass Frames im interferenzfreien Fall bis zu einer minimalen Leistung  $P_{r,th} = -91$  dBm erfolgreich empfangen werden können, während aus einer geringeren Empfangsleistung ein Frameverlust resultiert, kann aus dem beschriebenen Ausbreitungsmodell eine modellbasierte Packet Delivery Rate errechnet werden, die sich aus der Verteilungsfunktion der Gammaverteilung ergibt als

$$PDR(d) = 1 - P[P_r(d) < P_{r,th}] \quad (4.35)$$

Abbildung 22 zeigt einen Vergleich der aus der Anwendung dieses Modells resultierenden distanzabhängigen Packet Delivery Rate für den interferenzfreien Fall mit den Ergebnissen der auf der Bundesautobahn 2 durchgeführten Feldtests. Der Vergleich offenbart eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messergebnissen und bestätigt somit die Eignung der gewählten Form der Ausbreitungsmodellierung für Autobahnszenarien.

Im folgenden Abschnitt wird das zugrunde gelegte Ausbreitungsmodell noch einmal kurz zusammengefasst.

#### 4.3.4 Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien

Aus den Ausführungen in den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.3 ergibt sich ein Ausbreitungsmodell für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Auto-

*Ableitung des  
modellbasierten  
PDRs*

*Vergleich  
modellbasierter  
PDRs mit  
Messergebnissen*

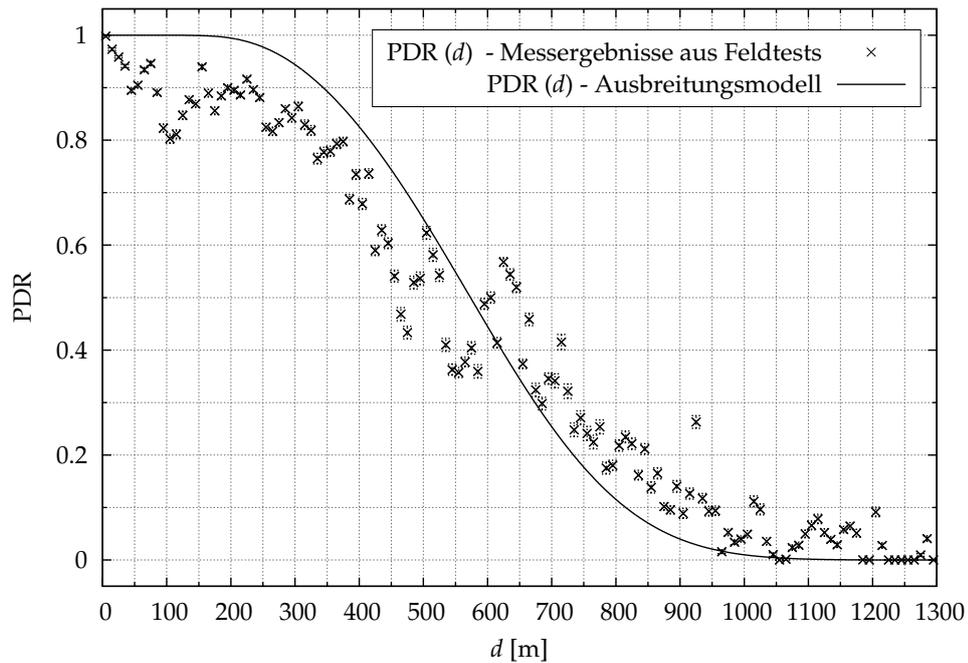


Abbildung 22: Aus Feldtests ermittelte und aus der Anwendung des Ausbreitungsmodells resultierende PDR im interferenzfreien Fall bei einer angenommenen Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th} = -91$  dBm.

bahnszenarien, welches im Rahmen dieser Arbeit als Basis für die simulationsgestützte Performanzbewertung genutzt und im Folgenden in Kurzform dargestellt wird [143]. Die relevanten Parameter des Modells können Tabelle 7 entnommen werden. Ergänzend erfolgt in Abschnitt 5.3.1 eine Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle auf die Leistungsfähigkeit von VANETs.

Der Pfadverlustmodellierung wird ein durch Ergebnisse von Feldtests auf Autobahnen empirisch validiertes Dual-Slope Modell nach Gl. 4.20 mit den Pfadverlustkoeffizienten  $\alpha_1 = 2,1$  und  $\alpha_2 = 3,4$  zugrunde gelegt. Dabei wird abweichend von dem in einer Vielzahl von VANET-Simulationsstudien verwendeten vereinfachten Two-Ray Ground Modell (vgl. Abschnitt 4.3.1) eine deutlich kleinere Breakpoint Distance  $d_{bp}$  nach Gl. 4.15 angenommen, die neben der analytischen Herleitung aus dem Two-Ray Ground Reflection Modell durch Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Feldtests (siehe Abschnitt 4.3.3) und früherer Messkampagnen bestätigt wird [28, 157, 161].

Aus dem auf diese Weise errechneten Pfadverlust ergibt sich die mittlere Empfangsleistung, die als Eingangsparameter zur Modellierung des Fadings Berücksichtigung findet. Im Rahmen dieser Arbeit wird für Autobahnszenarien Nakagami-Fading verwendet (siehe Gl. 4.31 in Abschnitt 4.3.2). Eine zusätzliche Modellierung von Large-Scale Fading, z. B. durch Log-Normal Shadowing, erfolgt nicht, sondern die Fluktuation des empfangenen Signals wird ausschließlich durch eine Nakagami-m-Verteilung charakterisiert. Neben der weiten Verbreitung dieses Modells in existierenden VANET-Simulationsstudien liegen auch hier empirische Ergebnisse aus Messkampagnen vor,

Dual-Slope  
Pfadverlustmodell

Nakagami-m  
Fadingmodell

Parameter	Wert
Pfadverlustmodell	Dual-Slope (Gl. 4.20)
$f_c$	5,9 GHz
$G_t, G_r$	1,0
$h_t, h_r$	1,5 m
$d_0$	1,0 m
$PL(d_0)$	47,86 dB (Gl. 4.19)
$\alpha_1$	2,1
$\alpha_2$	3,4
$d_{bp}$	177 m (Gl. 4.15)
Fading-Modell	Nakagami-m (Gl. 4.31)
$m(d)$	siehe Gl. 4.32

Tabelle 7: Parameter des Ausbreitungsmodells für Autobahnszenarien.

welche die Anwendbarkeit für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation bestätigen [26, 157, 161]. Einer mit wachsender Entfernung zunehmenden Fading-Intensität wird dabei durch eine Modellierung des Fading-Parameters  $m$  als Funktion der Distanz zwischen Sender und Empfänger nach Gl. 4.32 Rechnung getragen.

#### 4.4 METRIKEN ZUR LEISTUNGSBEWERTUNG

In diesem Abschnitt erfolgt eine Definition der im Rahmen dieser Arbeit zur Leistungsbewertung in VANETs verwendeten *Performanzmetriken*. Diese Metriken dienen in ihrer Gesamtheit einerseits der Quantifizierung der Dienstgüte im Netz, andererseits der Quantifizierung der sich auf die Dienstgüte auswirkenden Einflussfaktoren. Details zur Erhebung der hier vorgestellten Metriken innerhalb der Simulationsumgebung finden sich in Abschnitt 4.5.2.5.

*Performanzmetriken*

##### 4.4.1 Framebezogene Verhältnisgrößen

Nach der Erzeugung einer Nachricht wird diese innerhalb der verschiedenen Schichten des Protokollstacks der erzeugenden Station mit einer Reihe von Steuerinformationen versehen. Bevor der im Verlauf dieses Prozesses von der MAC-Teilschicht erzeugte MAC-Frame an die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) übergeben und von dieser übertragen wird, durchläuft die MAC-Teilschicht das auf CSMA basierende IEEE 802.11 Medienzugriffsverfahren, welches unter bestimmten Umständen den Frame bereits auf Senderseite verwirft, sodass es nicht zu einer Übertragung kommt. Findet hingegen eine Übertragung des Frames statt, kann diese wiederum nicht notwendigerweise durch den Carrier-Sense-Mechanismus benachbarter Stationen erkannt werden, und auch im Falle einer erfolgreichen Detektion des Frames durch eine empfangende Station hängt ein erfolgreicher Frameempfang von weiteren Bedingungen ab.

Die geschilderten Ereignisse sind in VANETs von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig und können daher als stochastische Zufallsexperimente aufgefasst werden, deren Auftretenswahrscheinlichkeit für die Leistungsbewertung von besonderem Interesse ist. Zur empirischen Näherung dieser Wahrscheinlichkeiten werden verschiedene *framebezogene Verhältnisgrößen* verwendet, die im Folgenden erläutert werden.

*Frame Drop Rate*

Durch das auf CSMA beruhende IEEE 802.11 Medienzugriffsverfahren können vorwiegend im Falle eines stark ausgelasteten Übertragungsmediums exzessive Kanalzugriffszeiten (Channel Access Times) entstehen, die dazu führen, dass der erzeugte Frame bereits im Sender verworfen und somit nicht übertragen wird. Der als *Frame Drop Rate* bezeichnete Anteil verworfener Frames wird daher definiert als

$$\text{Frame Drop Rate} = \frac{\text{Anzahl vor Übertragung verworfener Frames}}{\text{Anzahl erzeugter Frames}} .$$

Im Falle periodisch generierter Statusnachrichten, welche im Zentrum des Interesses dieser Arbeit stehen, wird ein Frame insbesondere dann verworfen, wenn die Kanalzugriffszeit  $T_{ca}$  das Nachrichtenerzeugungsintervall  $1/f_g$  übersteigt. Trifft dies zu, stehen durch die Erzeugung einer neuen Nachricht aktuellere als die in dem auf eine Übertragung wartenden Frame enthaltenen Statusinformationen zur Verfügung, sodass auf eine Übertragung des veralteten Frames verzichtet werden kann.

*Carrier Sense Rate*

Als *Carrier Sense Rate* wird das Verhältnis der Anzahl erfolgreich durch den Carrier-Sense-Mechanismus einer Station detektierter Frames zur Anzahl an diese Station gesendeter Frames bezeichnet:

$$\text{Carrier Sense Rate} = \frac{\text{Anzahl durch Carrier Sensing detektierter Frames}}{\text{Anzahl gesendeter Frames}} .$$

Bei der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Broadcast-Kommunikation wird ein Frame grundsätzlich an sämtliche Stationen gesendet, indem jeder von der MAC-Teilschicht erzeugte Frame mit der Broadcast-Adresse versehen wird. Ein Frame kann genau dann durch den Carrier-Sense-Mechanismus erkannt werden, wenn seine Empfangsleistung mindestens dem Carrier-Sense-Schwellenwert entspricht, d. h. wenn  $P_r \geq P_{r,cs}$  gilt. Da die Distanz zwischen Sender und Empfänger maßgeblichen Einfluss auf die Carrier Sense Rate hat, wird die Metrik in der Regel bezogen auf diese Distanz angegeben. Die Carrier Sense Rate stellt für eine große Anzahl von Stichproben eine hinreichend genaue Schätzung der Carrier-Sense-Wahrscheinlichkeit  $P(P_r(d) \geq P_{r,cs})$  dar.

*Packet Delivery Rate (PDR)*

Das Verhältnis der Anzahl auf Empfängerseite erfolgreich decodierbarer und fehlerfrei empfangener Frames zur Anzahl an die Empfängerstation gesendeter Frames wird als *Packet Delivery Rate (PDR)* bezeichnet. Für diese Performanzmetrik gilt demnach

$$\text{Packet Delivery Rate} = \frac{\text{Anzahl fehlerfrei empfangener Frames}}{\text{Anzahl gesendeter Frames}} .$$

Im Gegensatz zur Carrier Sense Rate ist die Packet Delivery Rate abhängig von der bei der Übertragung des Frames verwendeten Datenrate  $R_b$ . Damit ein gesendeter Frame fehlerfrei empfangen werden kann, müssen zwei

Bedingungen erfüllt sein: Zunächst einmal muss die Empfangsleistung mindestens dem als *Empfängerempfindlichkeit* bezeichneten datenratenabhängigen Schwellenwert  $P_{r,th}$  entsprechen, d. h. es muss  $P_r \geq P_{r,th}$  gelten. Der Anteil gesendeter Frames, welche diese Bedingung erfüllen, wird als *Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall* bezeichnet. Darüber hinaus setzt ein fehlerfreier Frameempfang allerdings Kollisionsfreiheit und damit ein begrenztes Interferenzniveau für die Dauer des Empfangsvorgangs voraus. Kollisionsfrei ist eine Übertragung dann, wenn  $SIR_{min} \geq SIR_{th}$  gilt, wobei  $SIR_{min}$  das geringste während des Frameempfangs auftretende SIR und  $SIR_{th}$  den datenratenabhängigen SIR-Schwellenwert für einen erfolgreichen Frameempfang bezeichnet. Die PDR wird wegen ihrer Distanzabhängigkeit ebenfalls mit Bezug auf die Entfernung zwischen Sender und Empfänger angegeben. Für große Stichprobenmengen stellt die PDR eine hinreichend genaue Schätzung der Empfangswahrscheinlichkeit dar.

*Packet Delivery  
Rate im  
interferenzfreien Fall*

Eine Kollision des übertragenen Frames entsteht, wenn Interferenzen während des Frameempfangs dazu führen, dass der SIR-Wert den Schwellenwert  $SIR_{th}$  unterschreitet. Dies hat zur Folge, dass der Frame nicht fehlerfrei durch den Empfänger decodiert werden kann, wodurch ein Frameverlust hervorgerufen wird. Der Anteil von Frames, die in Folge einer Kollision nicht erfolgreich empfangen werden können, wird als *Kollisionsrate* bezeichnet:

*Kollisionsrate*

$$\text{Kollisionsrate} = \frac{\text{Anzahl durch Kollision verlorener Frames}}{\text{Anzahl gesendeter Frames}} .$$

Durch die Nutzung von Physical Layer Capture kann im Falle eines zeitlich überlappenden Empfangs zweier oder mehrerer Frames der Frame mit der stärksten Empfangsleistung unabhängig von der Ankunftsreihenfolge der Frames decodiert werden, sofern  $SIR_{min} \geq SIR_{th}$  gilt (siehe hierzu Abschnitt 4.5.2.4). Grundsätzlich werden nur diejenigen interferierenden Frames als durch Kollision verlorene Frames bewertet, deren Empfang im interferenzfreien Fall möglich gewesen wäre ( $P_r \geq P_{r,th}$ ). Daher stellt die Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall eine theoretische Obergrenze für die Kollisionsrate dar. Auch die Kollisionsrate wird wegen ihrer Distanzabhängigkeit in der Regel bezogen auf die Entfernung zwischen Sender und Empfänger angegeben. Sie wird zur empirischen Schätzung der distanzabhängigen Kollisionswahrscheinlichkeit verwendet.

Darüber hinaus kann zwischen *CSMA-Kollisionen* und *Hidden-Station-Kollisionen* unterschieden werden. Eine Hidden-Station-Kollision liegt vor, wenn die interferierende, eine Kollision verursachende Übertragung von einer Hidden Station stammt (vgl. Abschnitt 2.2.4.4). Eine CSMA-Kollision liegt vor, wenn zwei (oder mehrere) Stationen zwar auf Grundlage von Ausbreitungsbedingungen und Positionierung zueinander in der Lage sind, ihre Übertragungen durch Carrier Sensing zu detektieren, die Stationen aber denselben Zeitschlitz für den Übertragungsbeginn ihrer Frames gewählt haben, sodass die Übertragungen annähernd zeitgleich beginnen, miteinander interferieren und eine Kollision verursachen. Die innerhalb der Simulationsumgebung zur Unterscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen verwendete Methodik wird in Abschnitt 4.5.2.6 näher erläutert.

*CSMA- und  
Hidden-Station-  
Kollisionen*

## 4.4.2 Delay-Metriken

Die zuvor beschriebenen framebezogenen Verhältnisgrößen stellen zwar wichtige Metriken zur Bewertung der Dienstgüte in VANETs dar, sie enthalten jedoch keine Information über die im Zusammenhang mit der Übermittlung von Nachrichten entstehenden Verzögerungen (Delays). Aus diesem Grund wird zusätzlich eine Reihe von Metriken betrachtet, welche diese unterschiedlichen Formen von Verzögerungen quantifizieren. Einen Überblick über die verwendeten Delay-Metriken und ihre Wechselbeziehungen gibt Abbildung 23.

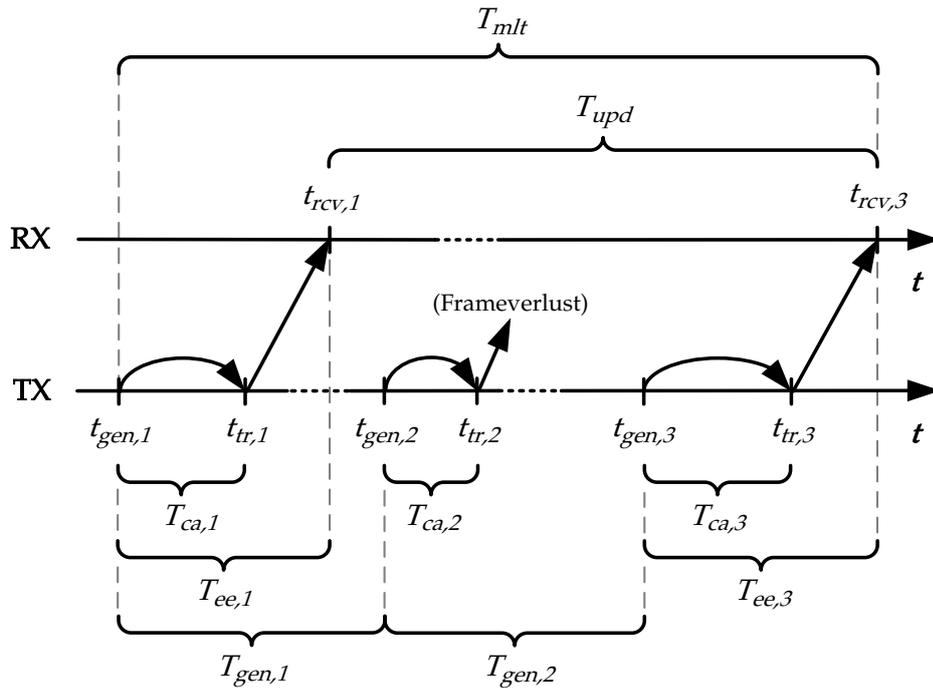


Abbildung 23: Übersicht der verwendeten Delay-Metriken. Gezeigt sind Erzeugungsverzögerung ( $T_{gen}$ ), Channel Access Time ( $T_{ca}$ ), Ende-zu-Ende Delay ( $T_{ee}$ ), Update Delay ( $T_{upd}$ ) und Message Lifetime ( $T_{mlt}$ ). Dabei bezeichnet  $t_{gen,i}$  den Erzeugungszeitpunkt einer Nachricht,  $t_{tr,i}$  den Zeitpunkt des Sendebeginns und  $t_{rcv,i}$  den Zeitpunkt des vollständigen Empfangs eines Frames.

Erzeugungsverzögerung

Ein wesentliches Charakteristikum periodischer Broadcast-Kommunikation, wie sie im Zentrum des Interesses dieser Arbeit steht, ist die *Erzeugungsverzögerung*  $T_{gen}$ , die im Hinblick auf eine bestimmte Station das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichtenerzeugungszeitpunkten  $t_{gen,i}$  und  $t_{gen,i+1}$  bezeichnet:

$$T_{gen,i} = t_{gen,i+1} - t_{gen,i} \quad (4.36)$$

Die Erzeugungsverzögerung wird im Wesentlichen bestimmt durch die endliche Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$ , mit der die Station periodisch Nachrichten generiert.

Während die übrigen im Protokollstack des Senders entstehenden Verzögerungen im Vergleich vernachlässigbar gering sind, erzeugt die Medienzugriffssteuerung signifikante Verzögerungen, die durch den Backoff- und Carrier-Sense-Mechanismus der IEEE 802.11 MAC-Teilschicht verursacht werden. Die vor Übertragungsbeginn beim Zugriff auf das Medium entstehende Verzögerung wird bezeichnet als *Kanalzugriffszeit* oder *Channel Access Time (CAT)*. Sie ist definiert als

$$T_{ca} = t_{tr} - t_{gen} \quad , \quad (4.37)$$

wobei  $t_{gen}$  den Erzeugungszeitpunkt der Nachricht und  $t_{tr}$  den Übertragungsbeginn des Frames bezeichnet (siehe Abbildung 23). Wird der Frame im Sender verworfen, kann keine CAT berechnet werden. Die Höhe der Channel Access Time ist von der Netzlast und einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig und kann daher als Zufallsvariable betrachtet werden, deren Verteilung in Kapitel 5 durch Simulationen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Parameter empirisch ermittelt wird.

Die Ende-zu-Ende-Verzögerung (End-to-End Delay)  $T_{ee}$  bezeichnet die Zeitspanne zwischen der Erzeugung einer Nachricht und dem Zeitpunkt des vollständigen Frameempfangs auf der Empfängerseite. Die Ende-zu-Ende Verzögerung unterscheidet sich im Fall der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Broadcast-Kommunikation ohne Paketweiterleitung nur durch die Übertragungsverzögerung (Transmission Delay)  $T_{tr}$  sowie die Ausbreitungsverzögerung (Propagation Delay)  $T_{prop}$  von der Channel Access Time, sodass

$$T_{ee} = t_{rcv} - t_{gen} = T_{ca} + T_{tr} + T_{prop} \quad (4.38)$$

gilt (siehe Abbildung 23). Die Übertragungsverzögerung  $T_{tr}$  beträgt für die in Kapitel 5 angenommene Nachrichtenlänge von 400 Byte bei einer Brutto-Datenübertragungsrate von 6 Mbps unter Berücksichtigung aller Header und der Präambel des Frames etwa 680  $\mu$ s. Die von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger abhängige Ausbreitungsverzögerung  $T_{prop}$  ist im Vergleich zu anderen auftretenden Arten der Verzögerung praktisch vernachlässigbar und beträgt bei in VANETs üblichen Distanzen zwischen 10 m und 1500 m etwa zwischen 33 ns und 5  $\mu$ s. Die Ende-zu-Ende Verzögerung wird nur im Falle fehlerfrei empfangener Frames berechnet.

Zur Beurteilung der Dienstgüte der Kommunikation in VANETs ist darüber hinaus die Verfügbarkeit von Performanzmetriken wünschenswert, die sowohl bei der Übertragung entstehende Frameverluste als auch Frame Drops sowie auftretende Verzögerungen in einer skalaren Größe abbilden. Eine Metrik, welche diese Anforderungen zumindest teilweise erfüllt, ist das durch das Symbol  $T_{upd}$  gekennzeichnete *Update Delay*, eine in [131] und [95] zur Leistungsbewertung für die periodische Verbreitung von Broadcast-Statusnachrichten vorgeschlagene Verzögerungsmetrik (vgl. hierzu bereits Seite 51 in Abschnitt 3.1.1). Sie wird definiert als zeitlicher Abstand zwischen dem Empfang zweier Frames eines bestimmten Senders aus Sicht eines Empfängers, sodass sich das Update Delay von Frame  $i$  ergibt als

$$T_{upd,i} = t_{rcv,j} - t_{rcv,i} \quad , \quad (4.39)$$

*Channel Access  
Time*

*End-to-End Delay*

*Update Delay*

wobei  $t_{rcv,i}$  den Empfangszeitpunkt von Frame  $i$  und  $t_{rcv,j}$  den Empfangszeitpunkt des nächsten fehlerfrei empfangenen Frames  $j$  bezeichnet, der von derselben Station gesendet wurde wie Frame  $i$  (siehe Abbildung 23).

Durch Update Delays lässt sich die Aktualität der lokal verfügbaren Statusinformationen über die Umgebung des Empfängers quantifizieren. Update Delays spiegeln die Auswirkungen ausbreitungs- und interferenzbedingter Frameverluste ebenso wider wie Frame Drops und von der Nachrichtenerzeugungsrate abhängige Erzeugungsverzögerungen. Übertragungs- und Ausbreitungsverzögerungen sowie Channel Access Times gehen in die Berechnung des Update Delays hingegen nur differentiell ein und bleiben bei Verwendung dieser Metrik somit unberücksichtigt, sofern sie wiederkehrend für aufeinanderfolgende Frames auftreten. Diese Verzögerungen, insbesondere die beim Medienzugriff auftretenden Channel Access Times, können jedoch die Aktualität der zur Verfügung stehenden Informationen und damit die Dienstgüte in VANETs signifikant beeinflussen.

*Message Lifetime*

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit eine weitere verzögerungsbezogene Performanzmetrik verwendet, welche als *Message Lifetime* bezeichnet und durch das Symbol  $T_{mlt}$  dargestellt wird. Im Gegensatz zum Update Delay verwendet diese Metrik als Referenzzeitpunkt für die gemessene Verzögerung statt des Empfangszeitpunktes des ersten zweier empfangener Frames dessen Erzeugungszeitpunkt und spiegelt somit neben der Erzeugungsverzögerung und Frameverlusten auch im Netz auftretende Ende-zu-Ende-Verzögerungen und darin enthaltene Channel Access Times wider. Die Message Lifetime wird definiert als

$$T_{mlt,i} = t_{rcv,j} - t_{gen,i} \quad , \quad (4.40)$$

wobei  $t_{gen,i}$  den senderseitigen Erzeugungszeitpunkt eines fehlerfrei empfangenen Frames  $i$  und  $t_{rcv,j}$  den Empfangszeitpunkt des nächsten fehlerfrei empfangenen Frames  $j$  bezeichnet, der von derselben Station gesendet wurde wie Frame  $i$  (siehe Abbildung 23).

Im Falle periodisch erzeugter Statusnachrichten, wie sie in Form von Cooperative Awareness Messages (CAMs) in VANETs genutzt werden, beschreibt die Message Lifetime somit den Zeitraum zwischen der Erzeugung einer Statusinformation und ihrer darauffolgenden Aktualisierung aus Empfängersicht. Die Metrik charakterisiert daher das erreichte Alter der lokal verfügbaren Statusinformationen über eine bestimmte Station in der Umgebung des Empfängers. Damit kann die Message Lifetime aus Anwendungssicht als durch das Kommunikationsnetz induzierte Verzögerung interpretiert werden, die zusätzlich zu weiteren Verzögerungen wie Reaktionszeiten von Mensch und Fahrzeug auftritt.

Auch die Performanzmetriken Update Delay und Message Lifetime werden wegen ihrer Distanzabhängigkeit in der Regel bezogen auf die Entfernung zwischen Sender und Empfänger angegeben.

*Intertransmission Delay*

Nicht in Abbildung 23 dargestellt ist das *Intertransmission Delay*, welches den Zeitraum zwischen zwei Frameübertragungen eines Senders bezeichnet und definiert ist als

$$T_{int,i} = t_{tr,j} - t_{tr,i} \quad . \quad (4.41)$$

Dabei bezeichnet  $t_{tr,i}$  den Zeitpunkt des Übertragungsbeginns eines Frames und  $t_{tr,j}$  den Zeitpunkt des Übertragungsbeginns des nächsten Frames desselben Senders. Durch das Intertransmission Delay wird somit unabhängig vom Erfolg der Übertragung quantifiziert, in welchem Zeitabstand eine Station auf das gemeinsame genutzte Medium zugreift.

#### 4.4.3 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Performanzmetriken

Tabelle 8 zeigt zusammenfassend einen Vergleich der zuvor vorgestellten und im Rahmen dieser Arbeit zur Leistungsbewertung verwendeten Performanzmetriken im Hinblick auf die Berücksichtigung verschiedener Charakteristika der Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs.

Metrik	Berücksichtigte Charakteristika					
	Ausbreitungsbedingter Frameverlust	Interferenzbedingter Frameverlust (Kollisionen)	Frame Drops	Erzeugungsverzögerung	Channel Access Time	Übertragungs- und Ausbreitungsverzögerung
Carrier Sense Rate	(✓) <sup>a)</sup>	-	-	-	-	-
Interferenzfreie PDR	✓	-	-	-	-	-
Packet Delivery Rate	✓	✓	-	-	-	-
Frame Drop Rate	-	-	✓	-	-	-
Intertransmission Delay	-	-	✓	✓	- <sup>b)</sup>	-
Channel Access Time	-	-	-	-	✓	-
End-to-End Delay	-	-	-	-	✓	✓
Update Delay	✓	✓	✓	✓	- <sup>b)</sup>	- <sup>b)</sup>
Message Lifetime	✓	✓	✓	✓	✓	✓

a) Die Carrier Sense Rate entspricht näherungsweise der interferenzfreien Packet Delivery Rate, falls  $P_{r,cs} = P_{r,th}$  gilt.

b) Nur differentiell (mit der Differenz aufeinanderfolgender Ausprägungen) berücksichtigt.

Tabelle 8: Vergleich der verwendeten Performanzmetriken im Hinblick auf die Berücksichtigung verschiedener Charakteristika der Leistungsfähigkeit periodischer Broadcasts in VANETs.

Wie zuvor bereits erläutert spiegelt die Packet Delivery Rate allgemein das Ausmaß bei der Übertragung auftretender Frameverluste wider, während die interferenzfreie Packet Delivery Rate lediglich den durch Ausbreitungseffekte (Pfadverlust, Shadowing, Fading) verursachten Frameverlust berücksichtigt und die Frame Drop Rate den Anteil noch vor der Übertragung im Sender verworfener Frames quantifiziert. Diese framebezogenen Verhältnisgrößen enthalten jedoch keinerlei Information über bei der Übermittlung der Nachricht entstehende Verzögerungen, deren Bewertung anhand der Metri-

ken Intertransmission Delay, Channel Access Time und End-to-End Delay möglich ist.

Darüber hinaus werden Performanzmetriken verwendet, die sowohl bei der Übertragung entstehende Frameverluste als auch auftretende Verzögerungen sowie Frame Drops in einer skalaren Größe abbilden. Update Delays bilden die Auswirkungen ausbreitungs- und interferenzbedingter Frameverluste ebenso ab wie Frame Drops und von der Nachrichtenerzeugungsrate abhängige Erzeugungsverzögerungen. Im Netz auftretende Ende-zu-Ende-Verzögerungen und darin enthaltene Channel Access Times gehen in die Berechnung des Update Delays jedoch nur mit der Differenz aufeinanderfolgender Ausprägungen ein und bleiben somit in Mittelwerten und bei gleichbleibender Ausprägung für aufeinanderfolgende Frames unberücksichtigt.

Die Message Lifetime hingegen spiegelt im Gegensatz zum Update Delay neben Frameverlusten, Frame Drops und Erzeugungsverzögerungen zusätzlich auch Channel Access Times, Übertragungs- und Ausbreitungsverzögerungen wider. Bei Verwendung dieser Metrik finden somit sämtliche für die Bewertung der Dienstgüte periodischer Broadcasts in VANETs relevanten Aspekte in einem einzelnen skalaren Wert Berücksichtigung. Die Message Lifetime quantifiziert das Alter, welches die durch einen Sender erzeugte Statusinformation aus der Perspektive eines Empfängers erreicht, bevor sie aktualisiert wird, und kann aus Anwendungssicht daher als durch das Kommunikationsnetz kumulativ induzierte Verzögerung interpretiert werden. Damit stellt die Message Lifetime eine sehr gut geeignete Performanzmetrik zur Bewertung von auf Cooperative Awareness basierenden Anwendungen in VANETs dar.

#### 4.4.4 Metriken zur Quantifizierung der Netzlast

*Channel Load*

Der überwiegende Anteil der oben beschriebenen Metriken zur Bewertung der Dienstgüte in VANETs wird signifikant durch die als *Channel Load* oder *Netzlast* bezeichnete Auslastung des gemeinsam von den Stationen genutzten Übertragungsmediums beeinflusst. Während jedoch der Begriff der Channel Load diese Auslastung nur in allgemeiner und abstrakter Form beschreibt, ist für die Leistungsbewertung in Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen die Definition von Metriken zur Quantifizierung der gegebenen Netzlast erforderlich. Die im Rahmen dieser Arbeit zu diesem Zweck verwendeten Metriken werden im Folgenden vorgestellt.

*Nachrichtenerzeugungsdichte*

Sowohl die Verkehrsdichte  $\rho$  als auch die Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  wirken sich unmittelbar auf die Netzlast aus. Daher wird die *Nachrichtenerzeugungsdichte*  $\rho_g$  (kurz auch als *Erzeugungsdichte* bezeichnet) definiert als

$$\rho_g = f_g \cdot \rho \quad , \quad (4.42)$$

wobei  $\rho$  die Verkehrsdichte in Fahrzeugen pro km und  $f_g$  die Nachrichtenerzeugungsrate in Frames pro Sekunde bezeichnen. Die Nachrichtenerzeugungsdichte beschreibt die insgesamt von allen Fahrzeugen in einem Abschnitt definierter Länge erzeugte Anzahl von Nachrichten pro Zeiteinheit, ihre Einheit ist Frames pro Kilometer und Sekunde.

Darüber hinaus wird in diesem Kontext auf die von Jiang et al. [86] vorgeschlagene *Communication Density* oder *Kommunikationsdichte* zurückgegriffen (vgl. Seite 49 in Abschnitt 3.1.1), um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Simulationskonfigurationen in Hinblick auf die erzeugte Netzlast zu ermöglichen. Die Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  wird im Rahmen dieser Arbeit definiert als

$$\rho_{com} = 2 \cdot d_{cs} \cdot f_g \cdot \rho \quad , \quad (4.43)$$

wobei  $\rho$  die Verkehrsdichte in Fahrzeugen pro km,  $f_g$  die Nachrichtenerzeugungsrate in Frames pro Sekunde und  $d_{cs}$  die (mittlere) Carrier-Sense-Reichweite in Kilometern bezeichnet. Die Einheit der Kommunikationsdichte ist Frames pro Sekunde. Die Kommunikationsdichte entspricht nach dieser Definition der mittleren Anzahl erzeugter Frames pro Zeiteinheit, deren Empfangsleistung an einem beliebigen Referenzpunkt in einem eindimensionalen Szenario theoretisch durch den Carrier-Sense-Mechanismus einer Station detektierbar wäre. Für eine gegebene Frame- bzw. Nachrichtenlänge quantifiziert die Kommunikationsdichte präzise die im Netz erzeugte Last und berücksichtigt durch die enthaltene Carrier-Sense-Reichweite auch die verwendete Sendeleistung.

Zu beachten ist, dass diese Definition von jener in [86] dahingehend abweicht, dass mit dem Faktor 2 die beidseitig eines Referenzpunktes erzeugten Frames berücksichtigt werden und statt der von Jiang et al. verwendeten Kommunikationsreichweite die Carrier-Sense-Reichweite in die Berechnung eingeht, um die Unabhängigkeit der Kommunikationsdichte von der verwendeten Datenrate zu erreichen, welche die Kommunikationsreichweite, jedoch nicht die Carrier-Sense-Reichweite beeinflusst.

In der Realität können jedoch Fälle auftreten, die dazu führen, dass ein innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite erzeugter Frame vom Empfänger nicht erkannt werden kann:

- Bei sehr hoher Netzlast kann es vorkommen, dass eine sendende Station nach der Erzeugung eines Frames nicht innerhalb des Erzeugungsintervalls auf den Kanal zugreifen kann ( $T_{ca} > T_{gen}$ ) und dieser Frame daher vom Sender verworfen wird.
- Die Empfangsleistung eines gesendeten Frames ist zwar größer als der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$ , aufgrund einer zeitlichen Überlappung mit einem oder mehreren anderen Frames wird vom Empfänger jedoch nur eine nicht näher bestimmbare Interferenz erkannt.

Beide Fälle führen dazu, dass die Kommunikationsdichte für eine einzelne Station nicht auf direktem Wege messbar ist. Soll jedoch eine Station in die Lage versetzt werden, ihr Verhalten adaptiv an die gegebene Netzlast anzupassen, sind Metriken zur Quantifizierung der Netzlast notwendig, deren Wert für die Station durch lokale Messung verfügbar ist.

Die Empfangsleistung ist für die Quantifizierung der Netzlast in drahtlosen Netzen von grundlegender Bedeutung. In diesem Zusammenhang müs-

*Kommunikationsdichte*

*Lokal messbare Netzlastmetriken*

*Empfangsleistung*

sen jedoch verschiedene Begriffe unterschieden werden. Mit dem Formelzeichen  $P_{r,cum}$  wird die für einen Empfänger wahrnehmbare kumulative Empfangsleistung bezeichnet, die sich zusammensetzt aus der Rauschleistung  $N$ , der Leistung des empfangenen Frames  $P_r$  sowie der Interferenzleistung  $P_I$ . Die Rauschleistung  $N$  ist ein Maß für das unabhängig vom Empfang eines Signals vorhandene Grundrauschen (Noise Floor) im Empfänger. Die empfangene Signalleistung  $P_r$  bezieht sich auf den Frame, zu dessen Signal sich der Empfänger während des Empfangs der Präambel synchronisiert und der im Anschluss vom Empfänger decodiert wird. Sämtliche sonstigen Signale, die auf demselben Kanal empfangen werden, stellen aus Sicht des Empfängers Interferenzen dar, deren kumulative Leistung sich in der Interferenzleistung  $P_I$  widerspiegelt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Interferenzen durch zeitlich überlappende Frameübertragungen betrachtet. Außerdem geht das in Abschnitt 4.5 vorgestellte Simulationsmodell vereinfachend davon aus, dass sämtliche empfangenen Signale zueinander unkorreliert sind, sodass sich die Interferenzleistung als Summe der Leistungen der zeitgleich empfangenen interferierenden Frames ergibt. Für die kumulative Empfangsleistung ergibt sich unter dieser Annahme somit

$$P_{r,cum} = P_r + P_I + N \quad . \quad (4.44)$$

Channel Busy Time

Die *Channel Busy Time*  $\gamma$  wird in [49] als Metrik zur Quantifizierung der Channel Load vorgeschlagen. Sie wird als Anteil der Zeit definiert, währenddessen die im Zeitverlauf aufgrund von beginnenden und endenden Frameübertragungen variierende kumulative Empfangsleistung  $P_{r,cum} = P_{r,cum}(t)$  einem definierten Schwellenwert mindestens gleich ist. Für die auf einen Schwellenwert  $P_{th}$  bezogene Channel Busy Time zu einem beliebigen Beobachtungszeitpunkt  $t$  gilt formal

$$\gamma(t, P_{th}) = \frac{1}{T_{obs}} \int_{t-T_{obs}}^t H(P_{r,cum}(\tau) - P_{th}) d\tau \quad , \quad (4.45)$$

wobei  $T_{obs}$  die üblicherweise zu  $T_{obs} = 1,0$  s gewählte Beobachtungsdauer und  $H(x)$  die Heaviside-Funktion bezeichnet mit

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ 1 & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad . \quad (4.46)$$

Als Schwellenwert  $P_{th}$  werden im Kontext dieser Arbeit sowohl der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  als auch die in [49] definierte Standard-Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,def} = NDL_{def}DccSensitivity = -85$  dBm verwendet. Die daraus resultierenden Channel Busy Times werden mit  $\gamma_{cs}$  bzw.  $\gamma_{def}$  bezeichnet.

Es kann vermutet werden, dass die Verwendung der Channel Busy Time nicht immer eine präzise Beurteilung der Netzlast erlaubt, da diese lediglich den zeitlichen Anteil der Überschreitung eines Schwellenwertes, nicht jedoch den Grad der Überschreitung quantifiziert. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 5.4 näher eingegangen.

## 4.5 SIMULATIONSUMGEBUNG

In diesem Abschnitt wird die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsumgebung zur Modellierung, Untersuchung und Leistungsbewertung von VANETs vorgestellt. Zunächst wird in Abschnitt 4.5.1 die auf einer Kopplung von Verkehrsfluss- und Netzwerksimulation beruhende Architektur der Simulationsumgebung eingeführt. Abschnitt 4.5.2 beschreibt anschließend Funktionsumfang und Methodik der Netzwerksimulation auf Basis des Simulationswerkzeugs OMNeT++, bevor Abschnitt 4.5.3 das Konzept der auf dem Simulator SUMO (Simulation of Urban MObility) aufbauenden Verkehrsflusssimulation zusammenfasst.

### 4.5.1 Architektur

Für eine aussagekräftige und auf die Realität übertragbare Bewertung der Performanz mobiler Ad-hoc-Netze auf Basis von Simulationen ist eine präzise Modellierung der Teilnehmermobilität unverzichtbar. In VANETs wird die Teilnehmermobilität von dem zugrunde liegenden Fahrzeugverkehr bestimmt, welcher aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den am Verkehr partizipierenden Fahrzeugen und dem Verkehrsnetz ein überaus komplexes System darstellt [70, 177]. Die üblicherweise auf dem Gebiet der Mobilkommunikation verwendeten, vergleichsweise einfachen Mobilitätsmodelle wie das Random Walk, Random Waypoint, Gauss-Markov oder Manhattan Modell [11, 22, 67] sind daher nicht für eine realitätsnahe Abbildung der Teilnehmermobilität in VANETs geeignet.

Eine realitätsnahe Nachbildung des Fahrzeugverkehrs ist jedoch mit Methoden der mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung möglich. Im Gegensatz zu makroskopischen und mesoskopischen Modellen bilden mikroskopische Verkehrsflussmodelle das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs nach [5, 70, 177] und eignen sich aus diesem Grund zur Bereitstellung von Mobilitätsdaten in VANETs. Implementierungen mikroskopischer Modellierungsansätze finden sich in verschiedenen zur Untersuchung von Straßenverkehrsnetzen entwickelten Verkehrsflusssimulatoren, auf deren Funktionalität daher bei der Simulation von VANETs zurückgegriffen werden kann [67, 68].

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung zur Leistungsbewertung von VANET stützt sich auf eine Kopplung von Netzwerksimulation und mikroskopischer Verkehrsflusssimulation, um eine realitätsnahe Modellierung der Teilnehmermobilität zu gewährleisten. Die Bereitstellung von Mobilitätsdaten erfolgt dabei durch den Verkehrsflusssimulator SUMO (Simulation of Urban MObility) [9, 101, 160], der an ein Netzwerksimulationsmodell auf Basis des Simulators OMNeT++ [118, 178, 179] angebunden wird. Die daraus resultierende Architektur der Simulationsumgebung zeigt Abbildung 24.

Zur Kopplung von Netzwerk- und Verkehrsflusssimulation dient die von Wegener et al. in [181] vorgestellte Schnittstellenarchitektur TraCI (Traffic Control Interface). TraCI ermöglicht die Interaktion der simultan laufenden Instanzen eines Netzwerk- und eines Verkehrsflusssimulators, indem ein

*Mikroskopische Verkehrsflusssimulation zur Bereitstellung von Mobilitätsdaten*

*Kopplung von Netzwerk- und Verkehrsflusssimulation*

*TraCI: Traffic Control Interface*

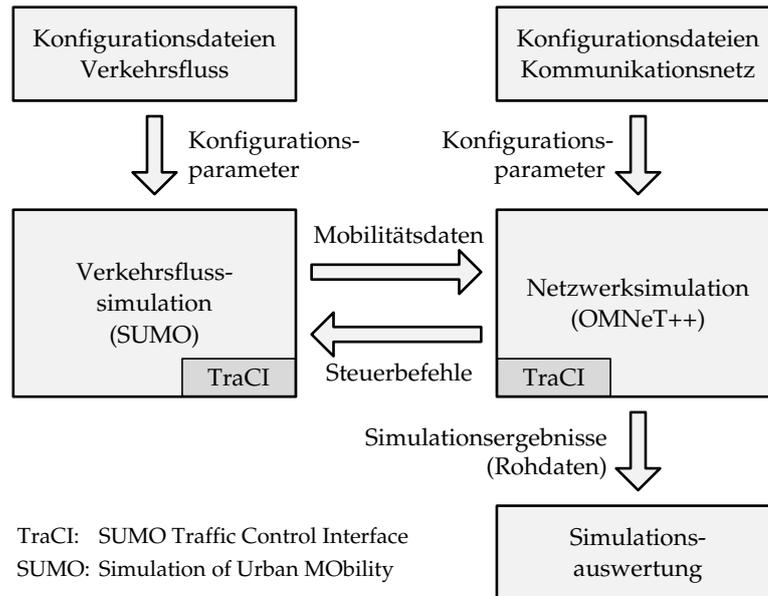


Abbildung 24: Architektur der Simulationsumgebung mit Kopplung von Netzwerk- und Verkehrsflusssimulation.

TraCI-Server, der Bestandteil des Verkehrsflusssimulators ist, und ein TraCI-Client, der Bestandteil des Netzwerksimulators ist, auf Basis des zu diesem Zweck definierten TraCI-Protokolls über eine TCP-Verbindung miteinander kommunizieren.

Der Simulationsablauf wird dabei durch den TraCI-Client gesteuert. Dieser initialisiert den Auf- und Abbau der Verbindung, stellt die Synchronisation der Simulationszeit beider Simulatoren sicher und löst jeweils durch einen entsprechenden Steuerbefehl (Request) die Abarbeitung eines Simulationsschrittes innerhalb des Verkehrsflusssimulators aus, der daraufhin neben einer Bestätigung des Befehls die aktualisierten Positions- und Bewegungsinformationen der im Netz befindlichen Fahrzeuge an den Client zurückliefert (Response). Während der Server den Client auf diese Weise mit den aktuellen Mobilitätsdaten der Fahrzeuge versorgt, erlaubt das TraCI-Protokoll dem Client darüber hinaus, das Verhalten von Fahrzeugen und anderen Objekten innerhalb der Verkehrsflusssimulation durch entsprechende Steuerbefehle zu beeinflussen. Dies ermöglicht beispielsweise eine vom Netzwerksimulator gesteuerte Anpassung der Geschwindigkeit oder der Route eines Fahrzeugs. Von dieser Möglichkeit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch kein Gebrauch gemacht.

Obwohl TraCI als generelle Schnittstellenarchitektur grundsätzlich nicht an die Verwendung bestimmter Simulationswerkzeuge gebunden ist, stellen die Autoren in [181] bereits die Implementierung eines TraCI-Servers für den Verkehrsflusssimulator SUMO vor. Inzwischen bildet TraCI einen festen Bestandteil des SUMO-Softwarepakets, auf den die hier beschriebene Simulationsumgebung zurückgreift. Weitere Details zu TraCI können daher der SUMO-Dokumentation entnommen werden [160].

Die Client-Seite von TraCI stellt eine Erweiterung des verwendeten Netzwerksimulators OMNeT++ dar und wird im Zuge der Beschreibung der für diese Arbeit relevanten OMNeT++-Module in Abschnitt 4.5.2.1 näher erläutert. Der innerhalb der Simulationsumgebung verwendete TraCI-Client ist eng angelehnt an die von Sommer et al. in [156] vorgestellte und öffentlich zur Verfügung gestellte Implementierung der entsprechenden OMNeT++-Module *TraCIScenarioManager* und *TraCIMobility*.

#### 4.5.2 Netzwerksimulation

Die Grundlage der Netzwerksimulation und damit zugleich den Kern der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Simulationsumgebung bildet der objektorientierte, modulare, diskrete und ereignisorientierte Simulator OMNeT++. Der Simulator wird zwar auch auf anderen Anwendungsgebieten verwendet, primär ausgelegt ist OMNeT++ jedoch für die Simulation von Kommunikationsnetzen und hat in diesem Bereich weite Verbreitung gefunden. OMNeT++ steht quelloffen (Open Source) zur Verfügung [118, 178, 179].

Ein Simulationsmodell in OMNeT++ wird aus wiederverwendbaren Komponenten erstellt, die als *Module* bezeichnet werden und durch *Gates* genannte Schnittstellen miteinander verbunden werden können. Die Struktur eines Simulationsmodells wird mithilfe der zu diesem Zweck geschaffenen Spezifikationssprache *NED (Network Description)* definiert. Von besonderer Bedeutung für die Erstellung eines Simulationsmodells in OMNeT++ ist die Möglichkeit, mehrere Module als *Submodules* in einem sogenannten *Compound Module* zusammenzufassen und so eine verschachtelte Modulhierarchie mit einer beliebigen Anzahl von Hierarchiestufen zu erzeugen.

*Modulhierarchie in  
OMNeT++*

Auf der höchsten Stufe dieser Modulhierarchie wird das Simulationsmodell durch ein *System Module* genanntes Compound Module repräsentiert, welches das zu simulierende Netz darstellt. Die Module der niedrigsten Stufe der Modulhierarchie, die im Gegensatz zu Compound Modules keine Submodules enthalten, werden als *Simple Modules* bezeichnet und definieren das Verhalten des Simulationsmodells. Die Implementierung des Verhaltens der Simple Modules erfolgt in C++ unter Verwendung der Klassenbibliothek von OMNeT++, welche die notwendigen Basisklassen zur Verfügung stellt [118, 178, 179].

Die Kommunikation zwischen verschiedenen Modulen ist durch den Austausch von Nachrichten (*OMNeT++-Messages*) möglich, die beliebige Daten enthalten können und entweder über ein Gate oder, wie bei der Modellierung des Funkkanals drahtloser Netze üblich, direkt an das empfangende Modul gesendet werden. OMNeT++-Messages bieten darüber hinaus die Möglichkeit, Nachrichten ineinander zu kapseln und so die Paketerzeugung in einem Protokollstack nachzubilden [118, 178, 179].

*Messages in  
OMNeT++*

Eine wertvolle Unterstützung bei der Modellierung erweiterter endlicher Automaten innerhalb eines Simple Modules bietet die in OMNeT++ enthaltene Implementierung einer Finite State Machine (FSM), mit der sich auf ele-

gante Weise beliebig komplexes Prozessverhalten in Form eines Zustandsübergangsdiagramms in C++ implementieren lässt [118].

*INET Framework*

Die Definition verschiedener Modultypen, deren Instanzen als Komponenten eines Simulationsmodells verwendet werden können, und die mit der modularen Architektur einhergehende Wiederverwendbarkeit erlauben die Entwicklung von Komponentenbibliotheken für verschiedene Anwendungszwecke. Für die Simulation von Kommunikationsnetzen mit OMNeT++ stehen verschiedene umfangreiche Komponentenbibliotheken zur Verfügung. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Kontext das sehr weit verbreitete *INET Framework*, welches Simulationsmodelle einer Vielzahl von Protokollen der Internetprotokollfamilie beinhaltet. Dazu gehören beispielsweise Implementierungen von TCP, UDP, IPv4 und IPv6, außerdem Protokolle der Sicherungsschicht wie PPP, IEEE 802.3 oder IEEE 802.11 sowie Mobilitäts- und Applikationsmodelle. Das INET Framework weist eine hervorragende Eigenschaft für die Simulation von Wireless LANs nach dem Standard IEEE 802.11 auf, da es eine detaillierte Modellierung des Medienzugriffs sowie des MAC-Managements von IEEE 802.11 beinhaltet.

*INETMANET-Framework*

Das *INETMANET-Framework* ist ein von Alfonso Ariza Quintana gepflegter paralleler Entwicklungszweig des INET Frameworks, der neben dessen vollständiger Funktionalität eine Reihe von Erweiterungen zur Modellierung von drahtlosen Netzen und Mobile Ad-Hoc Networks (MANETs) enthält [83, 118]. Diese öffentlich verfügbare Komponentenbibliothek dient als Ausgangsbasis für das in diesem Abschnitt beschriebene Simulationsmodell.

Um das Framework für die Simulation von VANETs verwenden zu können, sind jedoch umfangreiche Erweiterungen und Anpassungen notwendig. Auf Basis des INETMANET-Frameworks wurde daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Komponentenbibliothek geschaffen, welche die realitätsnahe Simulation periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs ermöglicht. Die entwickelten OMNeT++-Module und ihre Funktionalität werden im weiteren Verlauf dieses Abschnitts vorgestellt.

#### 4.5.2.1 *Simulationsmodule*

*Compound Module  
ITS-Station*

Eines der wichtigsten Module des Simulationsmodells ist das Compound Module *ITS-Station*, dessen schematischen Aufbau Abbildung 25 veranschaulicht und dessen Submodules im Folgenden kurz erläutert werden sollen.

Das Simple Module *CAM-Application* ist für die Erzeugung und das Versenden von Cooperative Awareness Messages (CAMs) sowie die Verarbeitung empfangener CAMs verantwortlich. Da das Simulationsmodell nicht die Nachbildung einer bestimmten Applikation anstrebt, sondern sich auf die Modellierung von Cooperative Awareness auf Basis periodisch versendeter Statusnachrichten konzentriert, beschränkt sich die Verarbeitung empfangener CAMs auf deren statistische Erfassung. Details zur Implementierung der Nachrichtenerzeugung finden sich in Abschnitt 4.5.2.2.

Das Simple Module *DENM-Application* unterstützt die Erzeugung, das Versenden, den Empfang und die Verarbeitung von Decentralized Environmental Notification Messages (DENMs). Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses

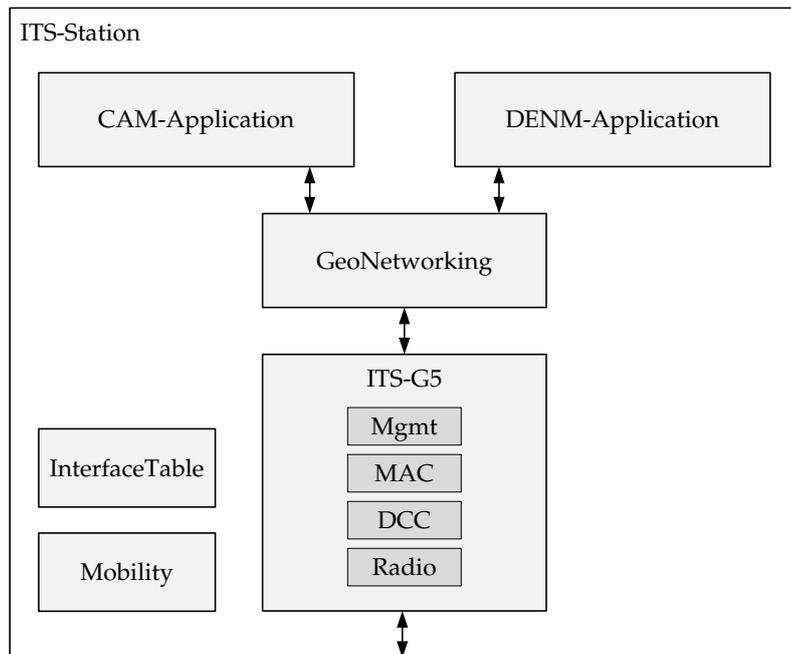


Abbildung 25: Schematischer Aufbau des Compound Modules *ITS-Station* mit Submodules.

Modul jedoch nicht verwendet, da ausschließlich die Performanz periodischer CAM-Broadcasts untersucht wird.

Das Compound Module *GeoNetworking* unterstützt in seiner aktuellen Version die Multi-Hop Weiterleitung von Paketen im GeoBroadcast-Modus gemäß der ETSI-Standardspezifikation in [48]. Da sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung von Single-Hop-Broadcasts konzentriert, wird diese Funktionalität jedoch nicht genutzt.

Das Compound Module *ITS-G5* stellt ein Simulationsmodell einer Kommunikationsschnittstelle dar, welche den Standardspezifikationen ITS-G5 [55] und 802.11p [77] entspricht und die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) sowie die Sicherungsschicht (Data Link Layer) der Station umfasst. Dieses Modul ist von besonderer Bedeutung für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Ein wesentlicher Teil der hierfür notwendigen Funktionalität ist innerhalb der vier enthaltenen Submodules (Simple Modules) verortet, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Das *Management*-Modul steuert in infrastrukturbasierten Netzen Prozesse zur Auffindung von Access Points (Scanning) sowie zur Authentifizierung und Assoziierung der Stationen innerhalb eines Basic Service Sets (BSS) und erzeugt, versendet und verarbeitet die zu diesem Zweck auszutauschenden Management-Frames [76]. Innerhalb eines VANETs kommunizieren die Stationen jedoch im als *Outside the Context of a BSS (OCB)* bezeichneten Modus (vgl. [55, 77] und Abschnitt 2.2.5), sodass ein Rückgriff auf diese Prozesse nicht notwendig ist. Die genutzte Funktionalität des Management-Moduls reduziert sich daher auf die Erzeugung (Encapsulation) von ITS-G5-Frames in Form von MAC Protocol Data Units (MPDUs) [55] und deren Verarbeitung

Compound Module  
*ITS-G5*

(Decapsulation) sowie die Bereitstellung getrennter Warteschlangen (Queues) für ausgehende Daten- und Management-Frames.<sup>4</sup>

Um den Anforderungen periodisch erzeugter Statusnachrichten gerecht zu werden, wurde das Modul außerdem um einen Mechanismus zum Ersetzen veralteter Statusnachrichten erweitert: Erhält das ITS-G5-Modul vom GeoNetworking-Modul ein zu übertragendes Paket, das eine CAM beinhaltet, wird nach der Erzeugung des ITS-G5-Frames zunächst die Ausgangswarteschlange für Datenframes innerhalb des Management-Moduls und anschließend das MAC-Modul geprüft. Wartet bereits ein Frame mit einer älteren CAM auf eine Übertragung, wird dieser verworfen, da die enthaltenen Statusinformationen mit Erzeugung der neueren CAM als veraltet betrachtet werden können, und durch den neuen Frame ersetzt.

Das Modul *MAC (Medium Access Control)* bildet die gleichnamige Teilschicht der Sicherungsschicht ab und beinhaltet die vollständige Funktionalität der Distributed Coordination Function (DCF) von IEEE 802.11, welche den Zugriff auf das gemeinsam genutzte Übertragungsmedium nach den Regeln von CSMA/CA steuert [76]. Wegen der besonderen Bedeutung für diese Arbeit wird auf die Funktionalität des Moduls in Abschnitt 4.5.2.3 näher eingegangen.

Das Modul *DCC (Decentralized Congestion Control)* beinhaltet eine Implementierung von Methoden zur Überlaststeuerung in Anlehnung an die ETSI Technical Specification 102 687 [49]. Das Modul erlaubt eine dynamische Anpassung von Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate, Datenrate und Carrier-Sense-Schwellenwert in Abhängigkeit der Netzlast während der Simulationslaufzeit. Zur Quantifizierung der Netzlast berechnet das Modul darüber hinaus in regelmäßigen Abständen die in Abschnitt 4.4.4 definierte Channel Busy Time. Dabei stellen sowohl die Beobachtungsdauer  $T_{obs}$ , welche für die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen zu  $T_{obs} = 1,0s$  gewählt wird, als auch der Schwellenwert der Empfangsleistung  $P_{th}$  konfigurierbare Modulparameter dar.

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen verwenden das Modul DCC lediglich zur Berechnung und statistischen Erfassung der Channel Busy Time und der übrigen in Abschnitt 4.4.4 definierten lokal messbaren Netzlastmetriken. Eine dynamische Anpassung der vorgenannten Kommunikationsparameter während eines Simulationslaufes erfolgt hingegen nicht.

Ein abstraktes Modell der Bitübertragungsschicht (Physical Layer) von IEEE 802.11 beinhaltet das *Radio-Modul*, welches aus dem vom MAC-Modul über das DCC-Modul weitergeleiteten Frame (MPDU) einen Physical-Layer-Frame, die PLCP Protocol Data Unit (PPDU), erzeugt und mit dessen Übertragung beginnt. Das Modul *ChannelControl* (siehe Seite 116) informiert daraufhin die Radio-Module der übrigen im Netz vorhandenen Stationen über den Übertragungsbeginn. Die Hauptaufgabe des Radio-Moduls besteht in der anschließend zu treffenden Entscheidung über Erfolg oder Misserfolg

<sup>4</sup>In beiden Queues wird grundsätzlich *First In First Out (FIFO)* als Warteschlangendisziplin angewendet. Das Vorhalten einer separaten Warteschlange für Management-Frames dient deren priorisierter Bearbeitung.

des Frameempfangs. Hierzu berechnet das Modul mithilfe des verwendeten Ausbreitungsmodells die Empfangsleistung jedes Frames sowie das während des Frameempfangs gegebene Interferenzniveau. Auf die Funktionsweise des Radio-Moduls wird wegen dessen besonderer Bedeutung für die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen in Abschnitt 4.5.2.4 näher eingegangen.

Das Simple Module *InterfaceTable* verwaltet eine Liste sämtlicher verfügbaren Kommunikationsschnittstellen der Station und erlaubt anderen Modulen den Zugriff auf diese Schnittstellen. Im vorliegenden Fall verfügt die ITS-Station lediglich über ein Loopback- sowie das beschriebene ITS-G5-Interface.

Das *Mobility*-Modul ist für die Verwaltung der Positions- und Bewegungsinformationen der Station verantwortlich, welche über die Traffic Control Interface (TraCI) genannte Schnittstelle [181] vom Verkehrssimulator SUMO [101, 160] bezogen werden. Das Modul basiert mit geringfügigen Änderungen auf dem von Sommer et al. für OMNeT++ entwickelten Simple Module *TraCIMobility* [156].

*Simple Module  
Mobility*

Darüber hinaus sind weitere Module zur Steuerung der Simulation notwendig. Ein typisches VANET-Simulationsszenario beinhaltet neben einer willkürlichen Anzahl von ITS-Stationen je eine Instanz der Modultypen:

- ChannelControl,
- ScenarioManager,
- ThroughputMonitor,
- StatisticCollector.

Das Simple Module *ChannelControl* verwaltet eine Liste sämtlicher Stationen im Netz, die jeweils deren aktuelle Position, den aktuell gewählten Funkkanal<sup>5</sup> sowie eine Liste der in Reichweite befindlichen Nachbarstationen beinhaltet. Beginnt eine der Stationen im Netz mit der Übertragung eines Frames, so informiert das ChannelControl-Modul die Radio-Module sämtlicher benachbarter Stationen nach einer entfernungsabhängigen Ausbreitungsverzögerung über den Übertragungsbeginn, sodass der Decodiervorgang des Frames im Radio-Modul der empfangenden Station begonnen werden kann. Ist ein erfolgreiches Decodieren eines Frames nicht möglich, wird das empfangene Funksignal vom Radio-Modul als Interferenz behandelt. Um auch die Berücksichtigung kleinster Interferenzen im Simulationsmodell zu gewährleisten, wird das ChannelControl-Modul im Rahmen dieser Arbeit so konfiguriert, dass das Modul sämtliche im Netz vorhandenen Stationen als Nachbarn jeder anderen Station im Netz behandelt.

*Simple Module  
ChannelControl*

Für die Anbindung der Netzwerksimulation an den Verkehrsflussimulator SUMO ist das Simple Module *ScenarioManager* verantwortlich, welches die in Abschnitt 4.5.1 skizzierten Aufgaben eines TraCI-Clients übernimmt [181]. Es verbindet OMNeT++ unter Verwendung der TraCI-Schnittstelle über eine TCP-Verbindung mit einer SUMO-Serverinstanz, liest Positions- und Bewegungsdaten sämtlicher Fahrzeuge im Netz und aktualisiert dementsprechend

*Simple Module  
ScenarioManager*

<sup>5</sup>Dies erlaubt dem Simulationsmodell die Unterstützung von Mehrkanalbetrieb, der in dieser Arbeit allerdings nicht untersucht wird.

die Mobility-Module der korrespondierenden ITS-Stationen. Das Modul ist eng angelehnt an das von Sommer et al. zu diesem Zweck entwickelte Simple Module *TraCIScenarioManager* und als von diesem abgeleitete Klasse implementiert [156]. Im Vergleich zur Basisklasse wurde das Modul unter anderem um eine Möglichkeit zur parallelen Abarbeitung mehrerer Simulationsläufe durch verschiedene Simulatorinstanzen und die zu diesem Zweck notwendige automatisierte Zuweisung unterschiedlicher Ports erweitert. Dies erlaubt eine in großem Umfang parallelisierte Simulation auf einem Rechencluster, wie sie für die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen unverzichtbar ist.

Compound Module  
*ThroughputMonitor*

Das Compound Module *ThroughputMonitor* dient der statistischen Erfassung des erzielten Netzdurchsatzes auf der Grundlage der empfangenen Nutzdaten<sup>6</sup> (Goodput). Da eine Berechnung des Durchsatzes durch die im Netz befindlichen ITS-Stationen, die selbst regelmäßig Daten senden und während der Dauer der eigenen Übertragung nicht empfangsbereit sind, keine exakten Ergebnisse liefern kann, wird diese Aufgabe vom *ThroughputMonitor*-Modul wahrgenommen, das keinerlei Daten sendet. Der Aufbau des Moduls ist annähernd identisch mit dem Modul ITS-Station (siehe Abbildung 25), allerdings unterstützt das Modul keine Mobilität, sondern wird ortsfest an zentraler Stelle im Netz positioniert. Zur Erfüllung seiner Aufgabe meldet das *ThroughputMonitor*-Modul mithilfe seines Submodules CAM-Application in periodischen Abständen die empfangene Datenmenge an das Modul *StatisticCollector*, das im Folgenden näher beschrieben wird.

Simple Module  
*StatisticCollector*

Das Simple Module *StatisticCollector* ist ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit vollständig neu entwickeltes, äußerst umfangreiches OMNeT++-Modul zur zentralen Erfassung, Verarbeitung und Verwaltung statistischer Daten, die ihren Ursprung in einem beliebigen anderen Modul innerhalb des untersuchten Netzes haben können. Das *StatisticCollector*-Modul erlaubt eine globale Sicht auf das Verhalten und die Performanz des Netzes und dient zur Berechnung der in Abschnitt 4.4 vorgestellten Performanzmetriken. Details zur Funktionsweise und Implementierung dieses Moduls finden sich in Abschnitt 4.5.2.5.

Tabelle 9 fasst die wichtigsten verwendeten OMNeT++-Module und deren Relation zum INETMANET-Framework noch einmal zusammen. Ausgangsbasis für die OMNeT++-Module der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten VANET-Simulationsumgebung ist die öffentlich verfügbare Version des INETMANET-Frameworks [83] vom 18. März 2011<sup>7</sup>. Art und Umfang der vorgenommenen Änderungen zur Schaffung einer für die Leistungsbeurteilung in VANETs geeigneten Simulationsumgebung erstrecken sich dabei von der Korrektur von Implementierungsfehlern über die Verbesserung der Modellierungsgenauigkeit bis zur Erweiterung um VANET-spezifische Features – entweder auf Grundlage bereits vorhandener Module oder als vollständige Neuimplementierung.

<sup>6</sup>Die betrachteten Nutzdaten und damit der ermittelte Durchsatz beinhalten den in VANETS nicht unbeträchtlichen Security-Overhead.

<sup>7</sup>Siehe Git-Commit 4a5a1d72fcb6c88b759e80ce536eeoc45edf4bo5 vom 18. März 2011 unter <https://github.com/inetmanet>.

OMNeT++-Modul	Relation zu INETMANET		
	Ableitung von INETMANET mit geringfügigen Änderungen	Ableitung von INETMANET mit weitreichenden Änderungen	Vollständige Neuimplementierung
ChannelControl	✓		
ScenarioManager	✓		
Mobility	✓		
InterfaceTable	✓		
Management	✓		
MAC		✓	
Radio		✓	
DCC			✓
GeoNetworking			✓
DENM-Application			✓
CAM-Application			✓
StatisticCollector			✓

Tabelle 9: Zusammenfassung der innerhalb der entwickelten Simulationsumgebung verwendeten OMNeT++-Module und ihrer Relation zur Ausgangsbasis im INETMANET-Framework [83].

Im Folgenden wird das Verhalten des resultierenden Netzwerk-Simulationsmodells im Hinblick auf einige für die durchgeführten Untersuchungen besonders relevante Aspekte näher erläutert.

#### 4.5.2.2 CAM-Erzeugung

Wie in Abschnitt 4.5.2.1 bereits dargelegt wurde, ist das Simple Module *CAM-Application* für die periodische Erzeugung von Cooperative Awareness Messages (CAMs) verantwortlich. Die Erzeugungsfrequenz  $f_g$ , mit der die Statusnachrichten generiert werden, stellt dabei ebenso wie die Nachrichtenlänge in Bytes einen konfigurierbaren Modulparameter dar.

Um eine unerwünschte und in der Realität nicht vorhandene Synchronisation der CAM-Erzeugungszeitpunkte unterschiedlicher Stationen im Netz zu verhindern, folgen die Zeitpunkte der ersten Nachrichtenerzeugung jeder Station einer stetigen Gleichverteilung in einem Intervall der Länge  $1/f_g$ . Darüber hinaus wird das CAM-Erzeugungsintervall mit einem Jitter  $J_{gen}$  beaufschlagt, der ebenfalls einer stetigen Gleichverteilung folgt:

$$J_{gen} \sim \mathcal{U} \left( \frac{-1}{10 \cdot f_g}, \frac{1}{10 \cdot f_g} \right) . \quad (4.47)$$

Für die Erzeugungsverzögerung  $T_{gen}$ , die im Hinblick auf eine bestimmte Station das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichtenerzeugungszeitpunkten beschreibt, gilt demnach:

$$T_{gen} = \frac{1}{f_g} + J_{gen} \Rightarrow T_{gen} \sim \mathcal{U} \left( \frac{9}{10 \cdot f_g}, \frac{11}{10 \cdot f_g} \right) . \quad (4.48)$$

*Jitter der  
Nachrichtenerzeugung  
verzögerung*

Nach Erzeugung einer Statusnachricht wird diese ohne weitere Verzögerungen über das GeoNetworking-Modul an das Modul ITS-G5 übergeben (siehe Abbildung 25), welches für die Erzeugung und Übertragung eines entsprechenden Datenframes verantwortlich ist.

*Durchsatz-  
berechnung*

Wird ein Frame von einer ITS-Station erfolgreich empfangen, leitet diese die enthaltene CAM zwar an ihr CAM-Application Modul weiter, darüber hinaus erfolgt jedoch keine weitere Verarbeitung der Statusnachricht. Im Fall des ThroughputMonitor-Moduls (siehe Abschnitt 4.5.2.1) dient das Simple Module CAM-Application jedoch auch der statistischen Erfassung des erzielten Netzdurchsatzes auf der Grundlage der empfangenen Nutzdaten (Goodput). Zu diesem Zweck meldet das Modul in periodischen Abständen die im konfigurierten Beobachtungsintervall<sup>8</sup> empfangene Anzahl an Nutzdatenbits, welche sich auf die Gesamtlänge einer CAM inkl. des implementierungsabhängigen Security-Overheads beziehen, an das Modul StatisticCollector.

#### 4.5.2.3 Medienzugriff

Die vorliegende Arbeit untersucht die Dienstgüte und Performanz periodischer CAM-Broadcasts in VANETs. Da der Inhalt dieser sicherheitsrelevanten Nachrichten grundsätzlich für jedes Fahrzeug von Bedeutung sein kann, verwenden sämtliche an der Kommunikation teilnehmenden Stationen einen gemeinsamen Funkkanal. Der Zugriff auf das gemeinsam genutzte Übertragungsmedium wird nach den Regeln der Distributed Coordination Function (DCF) von IEEE 802.11 und des damit verbundenen Zugriffsverfahrens CSMA/CA gesteuert [76].

*Aufgaben des  
MAC-Moduls*

Die vollständige Funktionalität der DCF ist im MAC-Modul der ITS-Station implementiert, das zu übermittelnde Frames einzeln aus der entsprechenden Warteschlange des Management-Moduls übernimmt und anschließend das Medienzugriffsverfahren auf Basis von CSMA/CA durchführt, bevor der Frame zur Übertragung an das Radio-Modul weitergegeben wird. Im Fall einer Unicast-Übertragung ist das Modul außerdem für die Handhabung von Bestätigungen (ACK-Frames) sowie die wiederholte Frameübertragung im Fehlerfall zuständig und steuert den RTS/CTS-Frameaustausch, falls die Framelänge den RTS-Schwellenwert überschreitet. Im Fall einer Multicast- oder Broadcast-Adressierung hingegen, wie sie in Form periodischer CAM-Broadcasts Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, entfallen sowohl das Versenden von ACK-Frames als auch die Anwendung des RTS/CTS-Mechanismus (vgl. [76] und Abschnitt 2.2.4.3).

Darüber hinaus unterstützt das MAC-Modul den Regeln des in [76] definierten EDCA-Verfahrens entsprechend die Priorisierung des Medienzugriffs in Abhängigkeit der einem Frame zugeordneten Access Category (AC). Diese Funktionalität ist für die vorliegende Arbeit jedoch lediglich von untergeordneter Bedeutung, da Gegenstand der Untersuchungen ausschließlich CAM-Broadcasts sind. Sämtliche erzeugten Frames werden aus diesem Grund derselben Access Category zugeordnet, sodass sämtliche Frameübertragungen

<sup>8</sup>Grundlage der in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse ist ein Beobachtungsintervall zur Ermittlung des Durchsatzes von  $T_{obs} = 1,0$  s.

unter Verwendung derselben EDCA-Parameter  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  und AIFS erfolgen.

Die wichtigste Aufgabe der Medienzugriffssteuerung besteht in der Durchführung des auf Carrier-Sense-Mechanismus und Backoff-Prozedur beruhenden CSMA/CA-Verfahrens. Daher bildet eine auf der Finite State Machine (FSM) von OMNeT++ basierende Implementierung dieses Verfahrens den Kern des MAC-Moduls. Die für den Carrier-Sense-Mechanismus notwendige Information über den Belegungszustand des Übertragungsmediums erhält das MAC-Modul dabei vom Radio-Modul. Die DCF- und EDCA-Spezifikation des IEEE 802.11 Standards [76] schreibt die Initiierung der Backoff-Prozedur im Anschluss an die folgenden Situationen vor:<sup>9</sup>

- (a) Die MAC-Teilschicht der Station erhält einen neuen zu übertragenden Frame und der Backoff-Timer hat den Wert Null. Die Station prüft daraufhin für die Dauer eines AIFS das Übertragungsmedium und erkennt, dass dieses belegt ist.
- (b) Die Station beendet erfolgreich die Übertragung eines Frames (oder erkennt eine fehlgeschlagene Übertragung).

Die Backoff-Prozedur endet, sobald der Backoff-Timer den Wert Null erreicht und die Station kann anschließend mit der Übertragung beginnen, sofern ein zu übertragender Frame vorhanden ist.

Die Durchführung der Backoff-Prozedur in Situation (b) wird üblicherweise als *Post-Backoff* bezeichnet. Im Unicast-Fall beginnt diese Backoff-Prozedur bei erfolgreicher Übertragung nach dem Empfang einer Bestätigung oder bei fehlgeschlagener Übertragung nach dem Ablauf des entsprechenden Timers. Im Broadcast-Fall, welcher eine Unterscheidung zwischen Erfolg und Misserfolg der Frameübertragung nicht erlaubt, beginnt sie direkt nach dem Ende der Frameübertragung. Abbildung 26a zeigt ein vereinfachtes Prozessdiagramm bei Broadcast-Übertragung nach den Regeln des im IEEE 802.11 Standard [76] spezifizierten CSMA/CA-Medienzugriffsverfahrens mit Post-Backoff.

*Post-Backoff*

Grundsätzlich kann eine Station dabei auf das Medium zugreifen, ohne unmittelbar vor dem Medienzugriff die Backoff-Prozedur durchzuführen. Allerdings setzt dies voraus, dass nach Abschluss einer Übertragung kein weiterer Frame auf eine Übertragung wartet, der Post-Backoff vor Ankunft des nächsten zu übertragenden Frames abgeschlossen ist und der Carrier-Sense-Mechanismus nach Ankunft des zu übertragenden Frames für die Dauer eines AIFS ein freies Medium erkennt, denn anderenfalls tritt Situation (a) ein.

Im Kontext der Untersuchung periodischer Broadcasts kann der Post-Backoff möglicherweise ein wichtiges Detail des CSMA/CA-Verfahrens darstellen. Da die Erzeugungsverzögerung dieser Nachrichten in der Regel deutlich größer ist als die Dauer der Backoff-Prozedur, werden die beiden erstgenannten Voraussetzungen üblicherweise erfüllt. Ein daraus resultierender

<sup>9</sup>Auf die Besonderheiten des Backoff-Verfahrens im Zusammenhang mit Transmission Opportunities (TXOPs) sowie internen Kollisionen zwischen Frames verschiedener EDCA-Prioritätsklassen wird hier nicht näher eingegangen, da diese für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung sind.

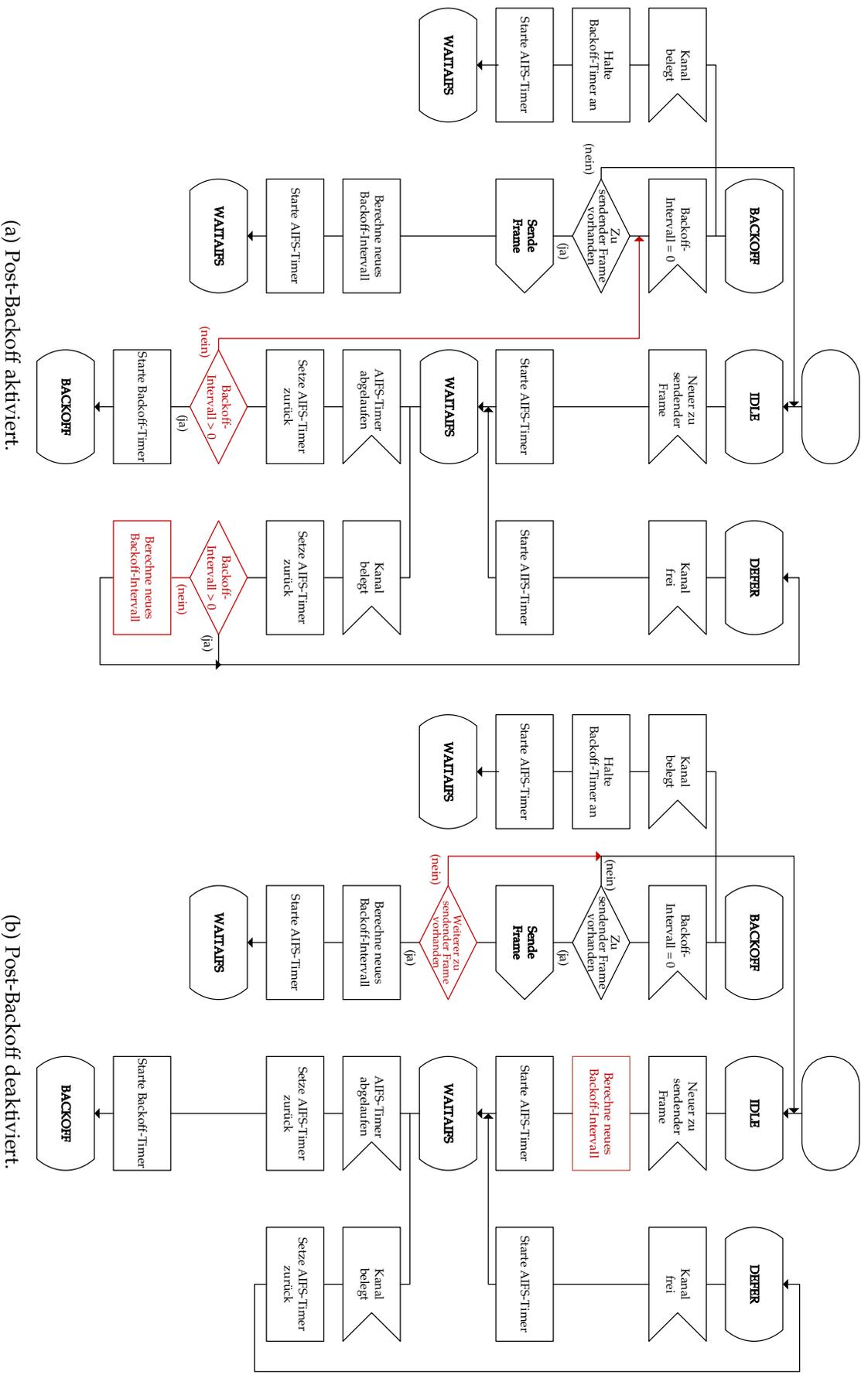


Abbildung 26: Prozessdiagramme des Medienzugriffsverfahrens bei Broadcast-Übertragung mit aktiviertem (a) und deaktiviertem (b) Post-Backoff Mechanismus. Unterschiede zwischen beiden Alternativen sind rot hervorgehoben.

Medienzugriff ohne unmittelbar vorangegangene Backoff-Prozedur ist in Verbindung mit periodischen CAM-Broadcasts daher besonders wahrscheinlich. Dieser Zusammenhang kann aus zwei Gründen problematisch sein: Einerseits ist denkbar, dass ein Medienzugriff ohne unmittelbar vorangegangene Backoff-Prozedur die Kollisionswahrscheinlichkeit erhöht. Andererseits kann dieses Verhalten zu einer geringeren Fairness des Medienzugriffs führen, da bereits auf den Medienzugriff wartende, im Backoff befindliche Stationen benachteiligt werden (Queue-Jumping).

Während das im verwendeten INETMANET-Framework enthaltene Modell der IEEE 802.11 Medienzugriffssteuerung lediglich das oben beschriebene und dem Standard entsprechende Verhalten der DCF abbildet, wurde das MAC-Modul der Simulationsumgebung daher um eine Möglichkeit zur Deaktivierung des Post-Backoffs erweitert. Wird der Post-Backoff deaktiviert, führt die Station vor jeder Frameübertragung die Backoff-Prozedur aus. Ein Prozessdiagramm des Medienzugriffs bei Broadcast-Übertragung mit deaktiviertem Post-Backoff zeigt Abbildung 26b.

Darüber hinaus unterstützt das MAC-Modul den in Abschnitt 4.5.2.1 beschriebenen Mechanismus zum Ersetzen veralteter Statusnachrichten, der vom Management-Modul initiiert wird: Erhält das Management-Modul ein zu übertragendes Paket, welches eine CAM beinhaltet, so wird ein im Management- oder MAC-Modul bereits auf eine Übertragung wartender Frame mit einer älteren CAM verworfen, da die enthaltenen Statusinformationen mit Erzeugung der neueren CAM als veraltet betrachtet werden können, und durch den neuen Frame ersetzt.

*Ersetzen veralteter  
CAMs*

#### 4.5.2.4 *Radio-Modul*

Das *Radio-Modul* stellt ein abstraktes Modell der Bitübertragungsschicht (Physical Layer) von IEEE 802.11 dar und bildet innerhalb der Simulationsumgebung die physikalische Übertragung eines Frames über den Funkkanal ab.

*Aufgaben des  
Radio-Moduls*

Innerhalb des Compound Modules ITS-G5 (siehe Abschnitt 4.5.2.1) wird der zu übertragende Frame (MPDU) nach Durchlaufen der im MAC-Modul implementierten DCF-Medienzugriffsprozedur über das DCC-Modul an das Radio-Modul weitergeleitet, welches durch Hinzufügen notwendiger Steuerinformationen einen Physical-Layer-Frame, die PLCP Protocol Data Unit (PPDU), erzeugt und mit dessen Übertragung über den Funkkanal beginnt. Die denselben Kanal nutzenden Radio-Module der übrigen im Netz vorhandenen Stationen werden anschließend mithilfe des Moduls ChannelControl (siehe Abschnitt 4.5.2.1) über den Übertragungsbeginn informiert.

Mit deutlich höherer Komplexität im Vergleich zu den auf der Seite des Senders durchzuführenden Schritten ist die nach dem Übertragungsbeginn auf der Seite des Empfängers zu treffende Entscheidung über Erfolg oder Misserfolg des Frameempfangs verbunden, welche die Hauptaufgabe des Radio-Moduls bildet. Zu diesem Zweck berechnet das Radio-Modul der empfangenden Station im Anschluss an den Übertragungsbeginn jedes Frames zunächst auf Grundlage des verwendeten Ausbreitungsmodells unter Berück-

sichtigung von Pfadverlust und Fading die Leistung  $P_r$  des empfangenen Signals. Diese wird für die Dauer des Frames als konstant angenommen.

Noise Floor  $N$ ,  
SINR-  
Schwellenwert  
 $SIR_{th}$  und  
Empfängerempfind-  
lichkeit  $P_{r,th}$

Im Zusammenhang mit der Entscheidung über Erfolg oder Misserfolg des Frameempfangs sind darüber hinaus weitere Größen von Bedeutung: Die konstante Rauschleistung  $N$  ist ein Maß für das unabhängig vom Empfang eines Signals vorhandene Grundrauschen (Noise Floor) im Empfänger und fasst den Einfluss von thermischem Rauschen, Rauschzahl des Empfängers und sämtlichen Störeinflüssen zusammen, die ihren Ursprung nicht in der Übertragung von IEEE 802.11 Frames unter Verwendung desselben Kanals haben, wie etwa Nachbarkanalinterferenzen (Adjacent-Channel Interference). Der Schwellenwert  $SIR_{th}$  bezeichnet den für einen erfolgreichen Frameempfang mindestens notwendigen Wert des Störabstands oder Signal to Interference and Noise Ratios (SINR). Die Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th}$  ergibt sich aus diesen Größen als

$$P_{r,th} = SIR_{th} \cdot N \quad . \quad (4.49)$$

Bedingungen für  
den Beginn eines  
Decodiervorgangs

Damit der Empfänger sich auf ein empfangenes Signal synchronisieren und mit dem Decodiervorgang eines Frames beginnen kann, müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

- (a) Die Empfangsleistung  $P_r$  entspricht mindestens der Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th}$ , d. h. es gilt  $P_r \geq P_{r,th}$ .
- (b) Das empfangende Radio-Modul ist nicht gleichzeitig mit der Übertragung eines eigenen Frames beschäftigt.
- (c) Das empfangende Radio-Modul ist nicht bereits mit dem Decodiervorgang eines anderen Frames beschäftigt, dessen Übertragung früher begonnen hat.<sup>10</sup>

Modellierung von  
Framekollisionen

Das Radio-Modul überwacht kontinuierlich das aktuell gegebene Interferenzniveau, welches bei Erzeugung der Modulinstanz mit dem Wert des Noise Floors  $N$  initialisiert wird. Ist eine der drei genannten Bedingungen nicht erfüllt, so wird die Leistung des empfangenen Signals als Gleichkanalinterferenz (Co-Channel Interference) behandelt und das gegebene Interferenzniveau um den ermittelten Wert von  $P_r$  erhöht. Das Simulationsmodell geht dabei vereinfachend davon aus, dass sämtliche empfangenen Signale zueinander unkorreliert sind, sodass sich die Interferenzleistung als Summe der Leistungen der zeitgleich empfangenen interferierenden Frames ergibt.

Nach Beginn eines Decodiervorgangs wird darüber hinaus aus der Empfangsleistung des zu decodierenden Frames und dem gegenwärtig gegebenen Interferenzniveau der Wert des SINRs berechnet und mit jedem Beginn oder Ende einer interferierenden Übertragung aktualisiert. Der zeitliche Verlauf des SINRs während des Decodiervorgangs wird aufgezeichnet, um dessen Minimum  $SIR_{min}$  zum Zeitpunkt des Übertragungsendes des zu decodierenden Frames ermitteln zu können.

<sup>10</sup>Bedingung (c) gilt in dieser Form nur für die ursprüngliche INETMANET-Implementierung, die keine Unterstützung von Physical Layer Capture (PLC) vorsieht. Das Verhalten des Radio-Moduls bei Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten PLC-Erweiterung wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts näher erläutert.

Mit Übertragungsende des zu decodierenden Frames wird auf dieser Grundlage über den Erfolg des Frameempfangs entschieden. Ein erfolgreiches und fehlerfreies Decodieren des Frames ist genau dann möglich, wenn  $SIR_{min} \geq SIR_{th}$  gilt.<sup>11</sup> In diesem Fall wird die enthaltene MPDU an die darüberliegenden Schichten weitergeleitet. Unterschreitet das SINR hingegen während des Decodiervorgangs aufgrund von Interferenzen den Schwellenwert  $SIR_{th}$ , gilt also  $SIR_{min} < SIR_{th}$ , so liegt eine mit einem Verlust der MPDU verbundene Framekollision vor.

Eine weitere Aufgabe des Radio-Moduls besteht darin, das MAC-Modul über den durch *Physical Carrier Sense* ermittelten Belegungszustand des Übertragungsmediums zu informieren. Zu diesem Zweck werden die Zustände IDLE, RECV und TRANSMIT unterschieden und ein auftretender Zustandswechsel umgehend an das MAC-Modul gemeldet. Der Zustand TRANSMIT zeigt dabei das Vorliegen einer eigenen Übertragung an. Zur Unterscheidung der Zustände IDLE und RECV wird die kumulative Empfangsleistung  $P_{r,cum}$  herangezogen, welche sich zusammensetzt aus der Summe aller eventuell vorhandenen Interferenzleistungen, dem Noise Floor und ggf. der Leistung des gegenwärtig decodierten Frames (siehe Abschnitt 4.4.4). Entspricht die kumulative Empfangsleistung mindestens dem Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$ , gilt also  $P_{r,cum} \geq P_{r,cs}$ , so wird der Belegungszustand auf RECV gesetzt, anderenfalls liegt der Zustand IDLE vor.

*Physical Carrier Sense*

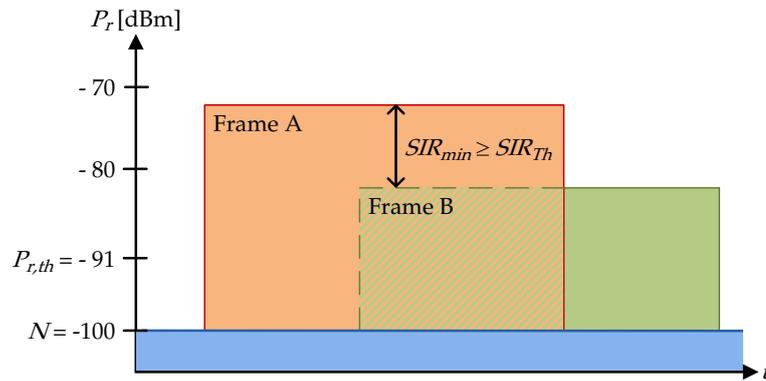
Im Vergleich zur als Ausgangsbasis für die Simulationsumgebung verwendeten Version des INETMANET-Frameworks<sup>12</sup> wurde die vorliegende Implementierung des Radio-Moduls um eine Möglichkeit zur Simulation von Konfigurationen mit  $P_{r,cs} > P_{r,th}$  erweitert, wie sie Gegenstand der in Abschnitt 5.5.4 vorgestellten Untersuchungen zu Auswirkungen des Carrier-Sense-Schwellenwerts sind. Ist der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  größer als die Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th}$ , erlaubt dies einer Station den Beginn einer eigenen Frameübertragung grundsätzlich auch dann, wenn diese bereits mit dem Decodiervorgang eines empfangenen Signals begonnen hat, sofern  $P_{r,cum} < P_{r,cs}$  gilt. Der bis zu diesem Zeitpunkt decodierte Frame wird in diesem Fall Opfer einer Framekollision.

Eine weitere im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Erweiterung des Radio-Moduls betrifft die Modellierung des als *Physical Layer Capture (PLC)* bezeichneten Effektes, dass im Falle einer zeitlichen Überlappung mehrerer Frames unter der Voraussetzung eines ausreichend hohen SINR der Frame mit der höchsten Empfangsleistung unabhängig von der Ankunftsreihenfolge der überlappenden Frames erfolgreich decodiert werden kann, wie Abbildung 27 veranschaulicht.

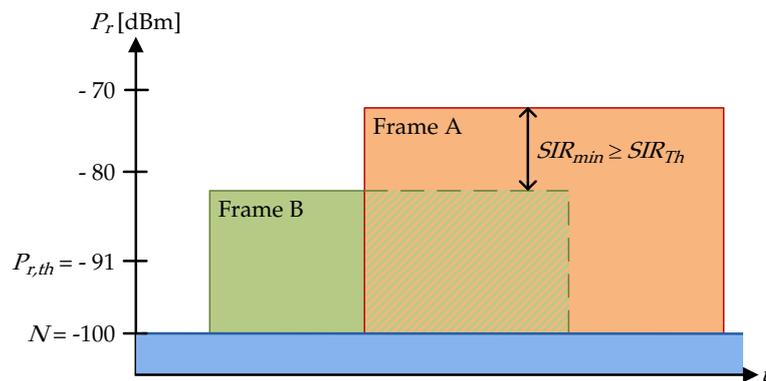
*Modellierung von Physical Layer Capture (PLC)*

<sup>11</sup>Darüber hinaus unterstützt das Simulationsmodell die Modellierung von Bitfehlern unter Annahme einer von  $SIR_{min}$  abhängigen Bitfehlerwahrscheinlichkeit. Von dieser Möglichkeit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch kein Gebrauch gemacht. Dies stellt eine vereinfachende Annahme dar, die jedoch in Anbetracht des in Labortests ermittelten raschen Abfalls der PDR bei Überschreitung des Schwellenwerts vertretbar ist (siehe Abbildung 15 in Abschnitt 4.2.)

<sup>12</sup>Siehe Git-Commit 4a5a1d72fcb6c88b759e80ce536eeoc45edf4b05 vom 18.März 2011 unter <https://github.com/inetmanet>.



(a) Der Empfänger ist auf Frame A synchronisiert, Frame B wird nur als Interferenz wahrgenommen.



(b) Der Empfänger ist auf Frame B synchronisiert, kann sich aber bei Verwendung von PLC auf Frame A resynchronisieren und diesen decodieren.

Abbildung 27: Schematische Darstellung von Physical Layer Capture (PLC): Ohne Modellierung von PLC (ursprüngliche INETMANET-Implementierung) kann Frame A nur in Fall (a), bei Verwendung von PLC in Fall (a) und (b) erfolgreich empfangen werden. Frame B wird in beiden Fällen Opfer einer Kollision.

Die als Ausgangsbasis für die Simulationsumgebung verwendete INET-MANET-Implementierung bildet dieses Verhalten nicht ab, da für die Synchronisierung des Empfängers und den Beginn des Decodiervorgangs vorausgesetzt wird, dass der Empfänger noch nicht mit dem Decodieren eines anderen Frames begonnen hat (siehe Bedingung (c) auf Seite 126). Die ursprüngliche Implementierung erlaubt demnach zwar in Abbildung 27a den fehlerfreien Empfang von Frame A, da dessen Übertragung in diesem Fall früher begonnen hat, trotz eines hinreichend großen SINR jedoch nicht in Abbildung 27b, da der Empfänger hier bereits auf Frame B synchronisiert ist. Frame B wird in beiden Fällen Opfer einer Kollision.

Da heutige IEEE 802.11 Empfänger jedoch üblicherweise von PLC Gebrauch machen [97, 106], ist eine realitätsnahe PLC-Modellierung für die Leistungsbewertung in VANETs unerlässlich. Aus diesem Grund wurde die Implementierung des Radio-Moduls entsprechend erweitert. Bei aktivierter

PLC-Unterstützung kann sich demnach ein Empfänger, der bereits auf ein zu decodierendes Signal der Empfangsleistung  $P_{r,1}$  synchronisiert ist, auf eine später beginnende Frameübertragung der Empfangsleistung  $P_{r,2}$  resynchronisieren, wenn die Bedingung

$$P_{r,2} \geq SIR_{th} \cdot P_{r,1} \quad (4.50)$$

erfüllt ist. Nach erfolgreicher Resynchronisierung wird die Empfangsleistung  $P_{r,1}$  nunmehr als Interferenz behandelt und das aktuelle Interferenzniveau entsprechend erhöht. Darüber hinaus wird der Wert des SINRs neu berechnet und die Aufzeichnung des SINR-Verlaufs neu begonnen.

Im Ergebnis ist bei aktiviertem PLC ein fehlerfreier Empfang von Frame A sowohl in dem durch Abbildung 27a veranschaulichten als auch in dem in Abbildung 27b dargestellten Fall möglich. Frame B wird jedoch auch bei aktiviertem PLC in beiden Fällen Opfer einer Kollision.

#### 4.5.2.5 Statistische Datenerfassung

Einen besonderen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit stellt das Bestreben dar, einen möglichst detaillierten, gleichsam mikroskopischen Einblick in das Verhalten periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs zu erhalten und eine Möglichkeit der quantitativen Beurteilung der ablaufenden Prozesse im Hinblick auf die Performanz des Netzes zu schaffen.

Essenzieller Bestandteil der Funktionalität der entwickelten Simulationsumgebung ist daher die statistische Datenerfassung, deren Kern das Simple Module *StatisticCollector* bildet. Dabei handelt es sich um ein im Rahmen dieser Arbeit vollständig neu entwickeltes, äußerst umfangreiches OMNeT++-Modul zur netzweiten Leistungsbewertung durch Berechnung der in Abschnitt 4.4 vorgestellten Performanzmetriken. Die Grundlage der Leistungsbewertung bildet die zentrale Erfassung und Verarbeitung statistischer Daten, die ihren Ursprung in einem beliebigen anderen Modul innerhalb des untersuchten Netzes haben können.

Zu diesem Zweck nutzt das *StatisticCollector*-Modul das mit der Version 4.1 von OMNeT++ vorgestellte Konzept der OMNeT++-Signale [118]. Das Konzept beruht auf einem Publish/Subscribe-Mechanismus und ermöglicht einen Informationsaustausch zwischen sämtlichen im Netz vorhandenen Simple Modules, unabhängig vom simulierten Datenverkehr oder dem Vorhandensein einer Verbindung zwischen den Modulen. OMNeT++-Signale können von beliebigen Modultypen emittiert werden und werden nach ihrer üblicherweise während der Initialisierung des Moduls durchgeführten Registrierung durch eine Identifikationsnummer und einen Signalnamen identifiziert. Mithilfe eines Signals kann das emittierende Simple Module das Eintreten eines Simulationsereignisses, wie etwa den erfolgreichen Empfang eines Frames, bekanntgeben. Dem Signal können beliebige Daten, die das eingetretene Ereignis näher beschreiben, in Form eines Zeigers auf ein C++-Objekt beigefügt werden.

Der Empfänger des Signals muss dem emittierenden Modul dabei nicht bekannt sein. Ein Simulationsmodul, das über ein bestimmtes Ereignis in

*Bedingung für  
Resynchronisierung  
bei aktiviertem PLC*

*Signalkonzept in  
OMNeT++*

Kenntnis gesetzt werden soll, abonniert das entsprechende durch Identifikationsnummer oder Signalnamen identifizierte Signal und wird infolgedessen durch Aufruf einer Callback-Funktion über jedes Emittieren dieses Signals informiert. Die dem Signal beigefügten Daten werden der Callback-Funktion dabei übergeben.

Das Prinzip der Nutzung von OMNeT++-Signalen zur statistischen Datenerfassung innerhalb der Simulationsumgebung veranschaulicht Abbildung 28. Empfänger aller im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Signale ist das StatisticCollector-Modul, welches sämtliche registrierten Signale abonniert. Emittiert werden die Signale von dem jeweiligen Simple Module, innerhalb dessen das jeweilige für die statistische Datenerfassung relevante Ereignis auftritt.

*Nutzung von Signalen zur statistischen Datenerfassung*

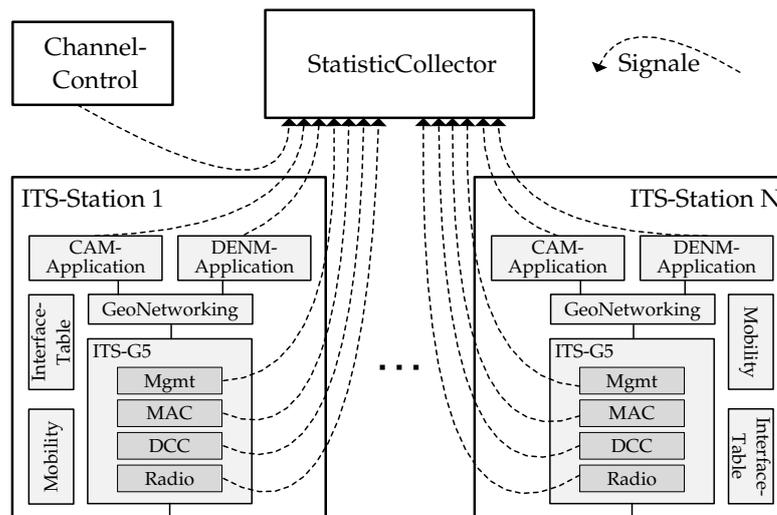


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Nutzung von OMNeT++-Signalen zur zentralen Erfassung statistischer Daten im StatisticCollector-Modul.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Signale mit den dazugehörigen emittierenden OMNeT++-Modulen und den die Signalerzeugung auslösenden Ereignissen fasst Tabelle 10 zusammen. Mit Ausnahme der Signale ThroughputStatistics und UpdatedHostPositions haben alle genannten Signale ihren Ursprung innerhalb des Compound Modules ITS-Station und werden von jeder an der Kommunikation im VANET teilnehmenden Station emittiert, sodass sämtliche auftretenden Sender-Empfänger Beziehungen im Rahmen der Leistungsbewertung berücksichtigt werden. Dies erlaubt die Gewinnung eines großen Stichprobenumfangs bei vergleichsweise kurzer Simulationsdauer.

Das StatisticCollector-Modul nutzt zur Berechnung der verschiedenen Performanzmetriken sowohl den Zeitstempel des Signals als auch die dem Signal angehängten Daten, wie etwa die Position und MAC-Adresse der sendenden Station, die Sequenznummer des Frames sowie weitere vom individuellen Signaltyp abhängige Informationen. Berechnungsgrundlage der verschiedenen in Abschnitt 4.4.2 definierten Delay-Metriken sind die Zeitstempel der Signale CreatedCAM, TransmittedFrame und ReceivedFrame, welche den in Abbildung 23 dargestellten Zeitpunkten  $t_{gen}$ ,  $t_{tr}$  und  $t_{rcv}$  von Nachrichten-

*Berechnung von Delay-Metriken*

Signalname	Emittierendes OMNeT++-Modul	Auslösendes Ereignis
CreatedCAM	CAM-Application	Erzeugung einer CAM
ThroughputStatistics	CAM-Application	Periodische Durchsatzermittlung (nur ThroughputMonitor-Modul)
CreatedDENM	DENM-Application	Erzeugung einer DENM
DroppedFrame	Management	Frame Drop im Management-Modul des Senders
DroppedFrame	MAC	Frame Drop im MAC-Modul des Senders
ChannelLoadStatistics	DCC	Periodische Netzlastermittlung
TransmittedFrame	Radio	Sender beginnt Frameübertragung
DetectedFrame	Radio	Empfänger erkennt Übertragungsbeginn
DetectedReceivableFrame	Radio	Empfänger erkennt Übertragungsbeginn mit $P_r \geq P_{r,th}$
SensedFrame	Radio	Empfänger erkennt Übertragungsbeginn mit $P_r \geq P_{r,cs}$
ReceivedFrame	Radio	Frameempfang erfolgreich abgeschlossen ( $SIR_{min} \geq SIR_{th}$ )
FrameCollision	Radio	Frameempfang fehlgeschlagen durch Kollision ( $SIR_{min} < SIR_{th}$ )
FrameLossDueToBitErrors	Radio	Frameempfang fehlgeschlagen durch Bitfehler
UpdatedHostPositions	ChannelControl	Aktualisierung der Positionen der Stationen im Netz

Tabelle 10: Zusammenfassung der zur statistischen Datenerfassung verwendeten OMNeT++-Signale.

erzeugung, Übertragungsbeginn und vollständigem Frameempfang entsprechen.

Zur Berechnung der in Abschnitt 4.4.1 erläuterten framebezogenen Verhältnisgrößen wird die Anzahl entsprechender Ereignisse im StatisticCollector erfasst. Um Abhängigkeiten von der Position des emittierenden Fahrzeugs oder der Distanz zwischen Sender und Empfänger ermitteln zu können, werden Histogramme verwendet, deren Klassen (Bins) Distanzintervalle repräsentieren. Während die Frame Drop Rate aus der Anzahl emittierter DroppedFrame- und FrameCreated-Signale ermittelt werden kann, muss die Berechnung der auf den Frameempfang bezogenen Metriken die Anzahl potentieller Empfänger einbeziehen. Beginnt ein Radio-Modul mit einer Frameübertragung, werden sämtliche übrigen im Netz vorhandenen Radio-Module vom ChannelControl-Modul über den Übertragungsbeginn informiert und emittieren unabhängig von der Empfangsleistung oder der Entfernung des Senders zum Empfänger das Signal DetectedFrame. Die Anzahl erfasster DetectedFrame-Signale wird daher als Bezugsgröße für die Anzahl der Signale SensedFrame, DetectedReceivableFrame, ReceivedFrame und FrameCollision verwendet, um die Metriken Carrier Sense Rate, Packet Delivery

*Berechnung  
framebezogener  
Verhältnisgrößen*

Rate im interferenzfreien bzw. interferenzbehafteten Fall und Kollisionsrate zu berechnen.

Die in Abschnitt 4.4.4 vorgestellten lokal messbaren Netzlastmetriken werden periodisch durch das DCC-Modul berechnet und mithilfe des Signals ChannelLoadStatistics an das StatisticCollector-Modul gemeldet. Mithilfe des ebenfalls periodisch generierten Signals ThroughputStatistics, dessen Quelle das Compound Module ThroughputMonitor ist, wird das StatisticCollector-Modul über die im Beobachtungsintervall empfangene Datenmenge informiert und berechnet auf dieser Grundlage den Netzdurchsatz (Goodput).

Da die Untersuchung jeder Simulationskonfiguration mehrere Simulationsläufe (Replikationen) umfasst, schreibt das StatisticCollector-Modul die Ergebnisdaten der einzelnen Replikationen nach Abschluss der OMNeT++-Simulation zunächst in separate Ausgabedateien. Für die automatisierte Aggregation der Daten aller Replikationen einer Simulationskonfiguration und die darauf aufbauende Extraktion der verschiedenen Performanzmetriken ist eine Reihe maßgeschneiderter Bash-, awk- und Python-Skripte zuständig.

*Area of Interest*

Eine wichtige Rolle bei der Simulation interferenzlimitierter Funknetze spielt der Umgang mit Randeffekten, die aufgrund der naturgemäß begrenzten Größe des Simulationsszenarios auftreten. Um eine von Randeffekten befreite Bewertung des Netzes zu ermöglichen, erlaubt das StatisticCollector-Modul die Definition einer *Area of Interest* genannten Auswertungszone. In die statistische Auswertung werden grundsätzlich nur Sendeereignisse, die zum Sendezeitpunkt innerhalb der Auswertungszone positionierte Sender betreffen, sowie Empfangsereignisse, die zum Empfangszeitpunkt innerhalb der Auswertungszone positionierte Empfänger betreffen, einbezogen. Eine Ausnahme bilden positionsabhängige Darstellungen von Performanzmetriken, da von Randeffekten betroffene Bereiche hier deutlich erkennbar sind. Die Auswertungszone des im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Autobahnsszenarios (siehe Abschnitt 5.1), das eine Länge von 10 km aufweist, wird auf einen 2 km langen, in der Mitte des Szenarios positionierten Autobahnabschnitt begrenzt.

*WarmUpTime*

Darüber hinaus beginnt die Ergebnisaufzeichnung erst nach Ablauf einer konfigurierbaren Vorlaufzeit, die als *WarmUpTime* bezeichnet wird. Die konfigurierte *WarmUpTime* beinhaltet zum einen die Zeit, die bis zur vollständigen Füllung des Verkehrsnetzes mit durch den Verkehrsflusssimulator eingespeisten Fahrzeugobjekten benötigt wird. Zum anderen beginnen die Stationen bereits eine Sekunde vor Ablauf der *WarmUpTime* mit der Nachrichtenerzeugung, um das Erreichen eines eingeschwungenen Netzzustands zum Beginn der Ergebnisaufzeichnung sicherzustellen.

#### 4.5.2.6 Erkennung von Hidden-Station-Kollisionen

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit interferenzlimitierter Kommunikationsnetze ist eine Betrachtung der Kollisionshäufigkeit von besonderer Bedeutung. Bedingt durch den auf CSMA/CA beruhenden Medienzugriff kann in VANETs darüber hinaus zwischen CSMA-Kollisionen und Hidden-Station-Kollisionen unterschieden werden, wie bereits in Abschnitt 4.4.1 erläutert wurde. Eine CSMA-Kollision entsteht, wenn zwei (oder mehrere) Stationen

zwar grundsätzlich in der Lage wären, ihre Übertragungen wechselseitig mithilfe des Carrier-Sense-Mechanismus zu detektieren, diese Übertragungen jedoch annähernd zeitgleich beginnen, miteinander interferieren und daher eine Kollision verursachen. Im Falle einer Hidden-Station-Kollision hingegen stammt die interferierende, eine Kollision verursachende Übertragung von einer als Hidden Station bezeichneten Station, deren Carrier-Sense-Mechanismus eine bereits begonnene Übertragung aufgrund der Ausbreitungsbedingungen nicht erkannt hat (vgl. Abschnitt 2.2.4.4).

Eine Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen diesen Kollisionsursachen in Verbindung mit einer getrennten Quantifizierung der Häufigkeit von CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen ist für die simulationsgestützte Leistungsbewertung von VANETs besonders wertvoll, denn dies erlaubt sowohl einen tieferen Einblick in das Verhalten des Netzes als auch eine Beurteilung der Auswirkungen verschiedener Parameter auf die Kollisionsentstehung. Aus diesem Grund wurde die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsumgebung mit einer hierfür geeigneten Methodik versehen, deren Funktionsweise im Folgenden skizziert wird.

Um eine Entscheidung darüber treffen zu können, ob eine Kollision von einer Hidden Station verursacht worden ist, muss zunächst der kollisionsverursachende Frame bestimmt werden. Bei Vorhandensein mehrerer interferierender Frames wird angenommen, dass eine auftretende Kollision durch den Interferenzframe mit der höchsten Empfangsleistung verursacht wird. Kommt es zu einer Kollision, weil die empfangende Station selbst mit der Übertragung eines Frames begonnen hat, wird diese Übertragung als kollisionsverursachende Interferenz bewertet. Darüber hinaus muss beurteilt werden, ob der interferierende Frame von einer Hidden Station übertragen wurde. Aufgrund des Vorhandenseins von Fading und nicht notwendigerweise homogenen Sendeleistungen treten im Hinblick auf die Empfangsleistung eines Signals jedoch Asymmetrien auf, die verhindern, dass eine konstante Carrier-Sense-Reichweite zugrunde gelegt werden kann.

Die zur Unterscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen notwendigen Informationen werden daher dem StatisticCollector-Modul von den im Netz vorhandenen Radio-Modulen zur Verfügung gestellt, welche zu diesem Zweck die in Tabelle 11 zusammengefassten OMNeT++-Signale emittieren. Das StatisticCollector-Modul kann ausgehend von diesen Informationen aufgrund seiner globalen Sicht auf das Netz die Kollisionsursache im Einzelfall bestimmen.

Zur Erläuterung der implementierten Methodik wird aufgrund ihrer Komplexität ein Beispiel verwendet, dessen zugrunde liegende Topologie in Abbildung 29a dargestellt ist: Station T überträgt Frame 1, der im interferenzfreien Fall von der empfangenden Station R problemlos decodiert werden kann. Station H erkennt jedoch aufgrund der Ausbreitungsbedingungen die Übertragung von Frame 1 nicht und beginnt daher mit der Übertragung von Frame 2, welche eine Kollision und einen Verlust beider Frames bei Station R verursacht.

*Bestimmung der kollisionsverursachenden Interferenz*

*OMNeT++-Signale zur Unterscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen*

Signalname	Auslösendes Ereignis
AddCollisionCandidate	Empfänger erkennt Übertragungsbeginn mit $P_r \geq P_{r,th}$
RemoveCollisionCandidate	Empfänger erkennt Ende einer Übertragung mit $P_r \geq P_{r,th}$
HiddenStationTransmissionStart	Empfänger erkennt Übertragungsbeginn mit $P_r < P_{r,cs}$
HiddenStationTransmissionEnd	Empfänger erkennt Ende einer Übertragung mit $P_r < P_{r,cs}$
NewStrongestInterferingFrame	Empfänger erkennt Beginn oder Ende der stärksten oder zweitstärksten interferierenden Übertragung

Tabelle 11: Vom Radio-Modul emittierte OMNeT++-Signale zur Unterscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen.

Abbildung 29b zeigt die zeitliche Abfolge der für die Beurteilung der Kollisionsursache relevanten Ereignisse, deren Verarbeitung innerhalb der Simulationsumgebung im Folgenden in vereinfachter Form dargestellt wird.

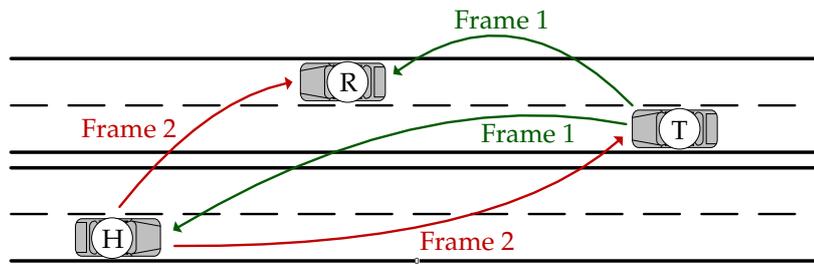
Erfassung von  
Kollisionskandidaten  
aus Sicht des  
Empfängers

Zum Zeitpunkt  $t_0$  beginnt Station T mit der Übertragung von Frame 1, aufgrund der Ausbreitungsverzögerung wird der Übertragungsbeginn allerdings erst zum Zeitpunkt  $t_1$  von Station R erkannt. Es sei angenommen, dass die Leistung  $P_{r,1R}$  des von Station R empfangenen Funksignals die Empfängerempfindlichkeit überschreitet, sodass  $P_{r,1R} \geq P_{r,th}$  gilt. Demnach handelt es sich aus Sicht von Station R um einen als *Kollisionskandidaten* bezeichneten Frame, der zwar im interferenzfreien Fall problemlos empfangen werden kann, aufgrund von Interferenzen jedoch einer Framekollision zum Opfer fallen könnte. Dies gibt das Radio-Modul von Station R bekannt, indem es das Signal *AddCollisionCandidate* emittiert. Das StatisticCollector-Modul verwaltet für jede empfangende Station im Netz eine Liste von Kollisionskandidaten, die Informationen zu dem jeweiligen von einer Kollision bedrohten Frame sowie zu möglicherweise vorhandenen interferierenden Frames enthält. Frame 1 wird nach Empfang des Signals zur Kollisionskandidatenliste von Station R hinzugefügt.

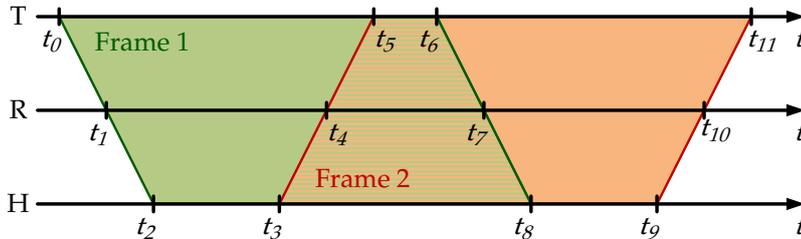
Erfassung aktuell  
vorhandener Hidden  
Stations aus Sicht  
des Senders

Zum Zeitpunkt  $t_2$  erkennt Station H den Übertragungsbeginn von Frame 1. Da dessen Empfangsleistung  $P_{r,1H}$  jedoch niedriger als der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  ist und die durch Station H ermittelte Belegung des Übertragungsmediums daher unverändert im Zustand IDLE verbleibt, handelt es sich bei Station H ab diesem Zeitpunkt um eine Hidden Station aus Sicht von Station T. Diesen Umstand gibt das Radio-Modul mit dem Signal *HiddenStationTransmissionStart* dem StatisticCollector-Modul bekannt, das für jede sendende Station im Netz eine Liste der zum gegenwärtigen Zeitpunkt existierenden Hidden Stations verwaltet. Station H wird daraufhin zur Liste der Hidden Stations von Station T hinzugefügt.

Die von Station H zum Zeitpunkt  $t_3$  begonnene Übertragung von Frame 2 erkennt Station R zum Zeitpunkt  $t_4$ . Es sei angenommen, dass auch die durch Station R ermittelte Empfangsleistung von Frame 2 die Empfängerempfind-



(a) Netztopologie mit Sender T, Empfänger R und Hidden Station H.



(b) Zeitlicher Ablauf der Kollisionentstehung.

Abbildung 29: Entstehung einer Hidden-Station-Kollision: Station H erkennt die Übertragung von Frame 1 nicht, beginnt daher mit der Übertragung von Frame 2 und verursacht so eine Kollision und einen Verlust beider Frames bei Station R.

lichkeit überschreitet, sodass  $P_{r,2R} \geq P_{r,th}$  gilt. Dies gibt das Radio-Modul von Station R wiederum durch das Signal *AddCollisionCandidate* dem StatisticCollector-Modul bekannt, welches Frame 2 daraufhin zur Kollisionskandidatenliste von Station R hinzufügt. Da Station R bereits mit dem Decodieren von Frame 1 begonnen hat, wird Frame 2 als Interferenz behandelt.<sup>13</sup> Damit stellt Frame 2 aus Sicht von Station R ab dem Zeitpunkt  $t_4$  die stärkste Interferenz für den Empfang von Frame 1 dar. Das Radio-Modul, das eine kontinuierlich aktualisierte Liste der gegenwärtig interferierenden Frames mit Verweisen auf die Frames mit der höchsten und zweithöchsten Interferenzleistung<sup>14</sup> vorhält, informiert das StatisticCollector-Modul mit dem Signal *NewStrongestInterferingFrame* über das Vorhandensein eines neuen stärksten Interferenzframes.

Das StatisticCollector-Modul aktualisiert nach dem Empfang dieses Signals die Interferenzinformationen der in der Kollisionskandidatenliste von Station R enthaltenen Frames und hält dabei für jeden Kollisionskandidaten den stärksten bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretenen Interferenzframe fest. Darüber hinaus wird vermerkt, ob dieser Frame von einer Hidden Station stammt. Zu diesem Zweck prüft das StatisticCollector-Modul, ob die zum Sender des Kollisionskandidaten gehörende Liste von Hidden Stations den Sender des stärksten interferierenden Frames enthält. Im Beispiel stellt

*Erfassung der stärksten Interferenz aus Sicht des Kollisionskandidaten*

<sup>13</sup>Hier wird angenommen, dass die Empfangsleistung  $P_{r,2R}$  für eine Resynchronisierung auf Frame 2 durch Physical Layer Capture nicht ausreicht.

<sup>14</sup>Die Kenntnis der zweitstärksten Interferenzquelle ist notwendig, da diese neben dem aktuell decodierten Frame als Kollisionsverursacher für den stärksten Interferenzframe in Betracht kommt.

Frame 2 die stärkste Interferenz für Frame 1 dar und vice versa. In beiden Fällen wird die Interferenz zur späteren Bestimmung der Kollisionsursache als von einer Hidden Station stammend markiert.

Bestimmung der  
Kollisionsursache

Zum Zeitpunkt  $t_7$  endet der Empfang von Frame 1 durch Station R mit einer Framekollision, die das Radio-Modul mit dem Signal *FrameCollision* (siehe Tabelle 10) anzeigt. Das *StatisticCollector*-Modul ist nun in der Lage, zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollision zu unterscheiden, indem es die Interferenzinformation von Frame 1 in der Kollisionskandidatenliste von Station R prüft. Im Beispiel wird so Frame 2 als kollisionsverursachende, durch eine Hidden Station erzeugte Interferenz identifiziert, sodass der Verlust von Frame 1 als Hidden-Station-Kollision bewertet wird. Durch Emitieren des Signals *RemoveCollisionCandidate* veranlasst das Radio-Modul das *StatisticCollector*-Modul anschließend dazu, Frame 1 aus der zu Station R gehörenden Liste von Kollisionskandidaten zu entfernen.

Das Übertragungsende von Frame 1 erkennt Station H zum Zeitpunkt  $t_8$  und emittiert daraufhin das Signal *HiddenStationTransmissionEnd*. Auf den Empfang dieses Signals reagiert das *StatisticCollector*-Modul, indem es Station H aus der zu Station T gehörenden Liste von Hidden Stations entfernt. Nachdem zum Zeitpunkt  $t_{10}$  der Empfang von Frame 2 durch Station R ebenfalls mit einer Kollision endet, erkennt das *StatisticCollector*-Modul auch hier durch Prüfung des entsprechenden Eintrags in der Kollisionskandidatenliste von Station R eine Hidden-Station-Kollision. Schließlich wird auch Frame 2 nach Empfang des Signals *RemoveCollisionCandidate* aus der Kollisionskandidatenliste entfernt.

#### 4.5.3 Verkehrsflusssimulation

Simulation of Urban  
MObility - SUMO

Die Grundlage der Modellierung des Fahrzeugverkehrs bildet die am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte Simulationssoftware SUMO (Simulation of Urban MObility).<sup>15</sup> SUMO ist ein quelloffen (Open Source) zur Verfügung stehender Verkehrsflusssimulator, der auf einem mikroskopischen Modellierungsansatz basiert [9, 100, 101, 102, 160].

Während makroskopische Verkehrsflussmodelle sich auf die Betrachtung aggregierter Größen wie z. B. der Fahrzeugdichte und der mittleren Geschwindigkeit beschränken und mesoskopische Modelle lediglich die statistische Verteilung des individuellen Fahrzeugverhaltens beschreiben, charakterisieren mikroskopische Ansätze zur Modellierung des Verkehrsflusses die Dynamik einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten und deren Wechselwirkungen [67, 70, 177]. Mikroskopische Verkehrsflussmodelle eignen sich daher zur Nachbildung der Teilnehmermobilität in VANETs [67, 68].

Den Kern der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation bilden das für die longitudinale Fahrzeugbewegung verantwortliche *Fahrzeugfolgmodell* (*Car-Following Model*) und das für die laterale Bewegung zuständige *Fahrstreifenwechselmodell* (*Lane-Changing Model*). Die Modellierung der Fahrzeugbewe-

<sup>15</sup>Sämtliche im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen basieren auf der SUMO-Version 0.12.3 vom 10. Februar 2011.

gung erfolgt in SUMO unter Verwendung diskreter Zeitschritte und kontinuierlicher Fahrzeugpositionen [9, 100, 101]. Für die Zwecke dieser Arbeit werden SUMO-Simulationsschritte der Länge  $T_{step} = 0,1$  s verwendet.

Die longitudinale Fahrzeugbewegung wird innerhalb von SUMO durch eine modifizierte Version des Fahrzeugfolgmodells von Krauß [103] bestimmt, welches auf Grundlage der Berechnung eines sicheren Abstands eines Fahrzeugs (Follower) zum vorausfahrenden Fahrzeug (Leader) eine kollisionsfreie Fahrzeugbewegung sicherstellt, indem die Geschwindigkeit des Followers entsprechend angepasst wird [9, 100, 102]. Bei der Berechnung der sogenannten Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeugs werden außerdem die maximale Beschleunigung<sup>16</sup> und Verzögerung des Fahrzeugs, die Reaktionszeit des Fahrers, die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs und die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts berücksichtigt. Darüber hinaus bildet das Modell die Unvollkommenheit des Fahrers dadurch ab, dass die tatsächliche Geschwindigkeit des Fahrzeugs um einen zufallsabhängigen Term von der Wunschgeschwindigkeit abweicht [100].

*Fahrzeugfolgmodell  
(Car-Following  
Model)*

Die laterale Fahrzeugbewegung definiert das im Rahmen der kontinuierlichen Weiterentwicklung von SUMO entstandene Fahrstreifenwechselmodell (Lane-Changing Model), das im Gegensatz zum von Krauß vorgeschlagenen Modell [103] neben taktischen auch strategische Entscheidungen des Fahrers abbildet [100]. Während taktische Entscheidungen sich auf Fahrstreifenwechsel als Teil von Überholvorgängen zur Realisierung eines möglichst schnellen, jedoch gleichzeitig sicheren Fortkommens beziehen, berücksichtigen strategische Entscheidungen die zur Navigation durch das Verkehrsnetz notwendige Fahrstreifenwahl. Details zum in SUMO implementierten Fahrstreifenwechselmodell können den Quellen [99], [100] und [160] entnommen werden.

*Fahrstreifenwechselmodell (Lane-Changing Model)*

Die Szenariospezifikation in SUMO erfolgt anhand von XML-Konfigurationsdateien und umfasst die Beschreibung des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage. Ein Verkehrsnetz wird dabei als gerichteter Graph dargestellt, dessen Knoten (Nodes) Kreuzungen entsprechen, während die Kanten (Edges) des Graphen unidirektionale Straßenabschnitte mit einer festgelegten Anzahl von Fahrstreifen und einer definierten zulässigen Höchstgeschwindigkeit repräsentieren [102]. Zur automatisierten Erzeugung der XML-Netzbeschreibung erlaubt SUMO den Datenimport verschiedener Formate, darunter z. B. das OpenStreetMap-Format [119]. Von dieser Möglichkeit wird aufgrund der vergleichsweise einfachen Topologie des innerhalb dieser Arbeit untersuchten Autobahnszenarios jedoch kein Gebrauch gemacht.

*Spezifikation von  
Verkehrsnetz und  
Verkehrsnachfrage*

Die Spezifikation der Verkehrsnachfrage beinhaltet eine Beschreibung jedes einzelnen in das Netz einzuspeisenden Fahrzeugs, welche wiederum mindestens aus einer Kennung des Fahrzeugs, dem Einspeisezeitpunkt und der aus einer Folge von Kanten bestehenden Route durch das Verkehrsnetz besteht. Darüber hinaus können weitere Attribute, wie beispielsweise der beim Netzein- und -austritt zu verwendende Fahrstreifen, die Länge, Geschwin-

<sup>16</sup>Im Gegensatz zum ursprünglichen Modell von Krauß [103] ist die maximale Beschleunigung des Fahrzeugs im erweiterten Fahrzeugfolgmodell von SUMO geschwindigkeitsabhängig.

digkeit, Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeugs sowie die Reaktionszeit und der Grad der Unvollkommenheit des Fahrers definiert werden. Die Attribute eines Fahrzeugs können zur einfacheren Wiederverwendung in der Definition eines Fahrzeugtyps zusammengefasst werden. Für größere Netze kann die Verkehrsnachfrage auf Basis sogenannter Origin-Destination-Matrizen und verschiedener Routing-Verfahren definiert werden [9, 100, 160]. Auf diese Möglichkeit greift die vorliegende Arbeit jedoch ebenfalls nicht zurück.

Um das Modellierungskonzept von SUMO für die Bewertung periodischer Broadcast-Kommunikation auf Autobahnen nutzbar zu machen, wurde ein entsprechendes SUMO-Verkehrsszenario entworfen, das in Abschnitt 5.1 näher beschrieben wird. Während die Spezifikation des Verkehrsnetzes dabei auf Grundlage statischer SUMO-Konfigurationsdateien erfolgen kann, werden die zur Spezifikation der Verkehrsnachfrage dienenden SUMO-Konfigurationsdateien mithilfe eines Python-Skriptes dynamisch und individuell für jeden Simulationslauf generiert, um dem stochastischen Charakter des Verkehrsflusses durch Verwendung von Zufallsvariablen Rechnung tragen zu können.

*Dynamische  
Generierung von  
SUMO-Konfigurationsdateien*

Das fünfte Kapitel der vorliegenden Arbeit widmet sich der Leistungsbewertung periodischer Broadcast-Kommunikation in ETSI ITS-G5 VANETs auf der Grundlage extensiver Simulationsstudien, welche auf dem in Kapitel 4 erläuterten Modellierungs- und Simulationskonzept beruhen. Zur Gewinnung der im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellten Ergebnisse wurde ausnahmslos die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsumgebung verwendet, deren Aufbau und Funktionsweise Gegenstand der Ausführungen in Abschnitt 4.5 ist.

*Leistungsbewertung  
durch Simulation*

Die durchgeführten Untersuchungen dienen der Beantwortung der bereits auf Seite 45 in Abschnitt 2.4 formulierten Forschungsfragen. Neben einer grundlegenden Bewertung der Performanz von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation bei periodischer Übermittlung von CAM-Broadcasts auf Basis eines realitätsnahen Simulationsmodells steht dabei insbesondere eine quantitative Bewertung der Effekte unterschiedlicher Modellierungs- und Kommunikationsparameter auf die Dienstgüte des Netzes im Vordergrund. Fokussiert werden diesbezüglich insbesondere der Einfluss der gegebenen Netzlast und die damit zusammenhängende Skalierbarkeit des Netzes. Darüber hinaus wird ein Hauptaugenmerk auf die Auswirkungen des verwendeten Ausbreitungsmodells und weiterer Modellierungsaspekte auf der einen Seite sowie konfigurierbarer Kommunikationsparameter wie Sendeleistung, Datenrate, Nachrichtenerzeugungsrate, Carrier-Sense-Schwellenwert und Größe des Contention Windows auf der anderen Seite gerichtet. Im Zentrum des Interesses steht in diesem Zusammenhang die Frage, ob und in welchem Maße sich eine Anpassung dieser konfigurierbaren Kommunikationsparameter zur Bewältigung von Skalierbarkeitsproblemen eignet und welche Parametrierung hierzu zweckmäßig ist.

*Ziele der  
Simulationsstudien*

Die quantitative Erfassung des Einflusses einzelner Parameter erfordert eine Sensitivitätsanalyse innerhalb des zur Verfügung stehenden Parameter-raums. Die Simulationen sind daher methodisch als Parameterstudien angelegt, wobei die aus der jeweiligen Parametrierung resultierende Performanz des Netzes mithilfe der in Abschnitt 4.4 definierten Metriken quantifiziert wird.

*Parameterstudie*

Um den außerordentlich hohen Rechenaufwand bewältigen zu können, der mit dieser Methodik einhergeht, werden sowohl die Simulationen als auch die automatisierte Auswertung der dabei generierten Ausgabedaten unter Einsatz massiver Parallelisierung auf dem Clustersystem der Leibniz Universität IT Services<sup>1</sup> ausgeführt. Das Clustersystem umfasst nahezu 200 Rechenknoten, die jeweils über 12 bis 32 Prozessorkerne verfügen und mit 48 GB bis 1028 GB Arbeitsspeicher ausgestattet sind. Der Umfang der Simulationsstudien macht es außerdem erforderlich, den mit ihrer Durchführung ver-

*Parallelisierung auf  
Clustersystem*

---

<sup>1</sup>Ehemaliges Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen (RRZN).

bundenen manuellen Konfigurationsaufwand auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Die für die Parameterstudien notwendige Konfiguration der einzelnen Simulationsläufe sowie die entsprechende Steuerung der Vielzahl parallel laufender Prozessinstanzen des Netzwerksimulators OMNeT++ und des Verkehrsflusssimulators SUMO erfolgen daher weitestgehend automatisiert mithilfe hierfür geschaffener Bash- und Python-Skripte. Auf dieser Grundlage können auf dem Clustersystem jeweils bis zu 64 Simulationsläufe parallel abgearbeitet und der erforderliche Zeitaufwand somit erheblich reduziert werden. Insgesamt wurde in die Durchführung und Auswertung sämtlicher Simulationen im Kontext der vorliegenden Arbeit ein Rechenaufwand von ca. 142 000 CPU-Stunden (ca. 5917 CPU-Tage) investiert.

#### *Konfidenzintervalle*

Die gewonnenen Ergebnisse werden, soweit sie auf der Berechnung eines Mittelwerts oder einer relativen Häufigkeit beruhen, stets mit Konfidenzintervallen für ein Konfidenzniveau von 95 % dargestellt. Darstellungsbedingt sind allerdings in vielen Fällen die Konfidenzintervalle aufgrund ihrer geringen Länge in den Abbildungen nicht klar erkennbar.

Die im Rahmen der Ergebnisauswertung berechneten arithmetischen Mittelwerte werden zur Berechnung der Konfidenzintervalle als Schätzung eines unbekanntem Erwartungswerts einer Zufallsvariable aufgefasst, deren Varianz und Verteilung ebenfalls unbekannt sind. Dies betrifft die Auswertung der Empfangsleistung, sämtlicher Delay-Metriken<sup>2</sup>, der Channel Busy Time, des Goodputs sowie der Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Frames. Da ausnahmslos im statistischen Sinne umfangreiche Stichproben vorliegen, folgt aus dem zentralen Grenzwertsatz, dass die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts aus den Stichproben als annähernd normalverteilte Schätzfunktion betrachtet werden kann. Zur Berechnung der Länge der Konfidenzintervalle werden in diesen Fällen daher die Quantile der studentischen t-Verteilung herangezogen [122].

Die ebenso für die Leistungsbewertung verwendeten framebezogenen Verhältnisgrößen Packet Delivery Rate, Carrier Sense Rate, Frame Drop Rate und Kollisionsrate stellen hingegen relative Häufigkeiten dar. Als solche können sie jeweils als Schätzwerte für den unbekanntem, die Erfolgswahrscheinlichkeit bezeichnenden Parameter  $p$  einer Binomialverteilung aufgefasst werden. Weil auch hier ausschließlich im statistischen Sinne umfangreiche Stichproben gegeben sind, folgt aus dem Grenzwertsatz von Moivre und Laplace, dass zur (näherungsweise) Berechnung der Länge der Konfidenzintervalle in diesen Fällen die Quantile der Standardnormalverteilung heranzuziehen sind [122].

#### *Aufbau des Kapitels*

Der weitere Verlauf dieses Kapitels gliedert sich wie folgt: Nach einer einführenden Vorstellung des Simulationsszenarios in Abschnitt 5.1 widmet sich Abschnitt 5.2 zunächst der Untersuchung grundlegender Skalierbarkeitseffekte in Abhängigkeit von Verkehrsdichte und Netzlast. In Abschnitt 5.3 wird der Fokus auf Modellierungsaspekte gerichtet und der Einfluss von Ausbreitungsmodellierung sowie Physical Layer Capture auf die Simulationsergebnisse untersucht. Abschnitt 5.4 geht auf Ansätze zur Quantifizierung der Netzlast und ihre Wirkung auf die Dienstgüte des Netzes ein. Den

<sup>2</sup>Zur Definition der verwendeten Performanzmetriken wird auf Abschnitt 4.4 verwiesen.

Schwerpunkt des Kapitels bildet Abschnitt 5.5, welcher die netzlastabhängigen Auswirkungen verschiedener konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Dienstgüte untersucht und auf dieser Grundlage die Eignung dieser Parameter zur Vermeidung oder Bewältigung von Überlastsituationen bewertet.

## 5.1 SIMULATIONSSZENARIO

Untersuchungsgegenstand der im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellten Simulationsstudien zur Leistungsbewertung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs ist ein typisches Autobahnszenario, dessen Rahmenbedingungen jenen der in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten, auf der Bundesautobahn 2 durchgeführten Feldtests entsprechen.

*Autobahnszenario*

### 5.1.1 Verkehrsfluss

Um eine realitätsnahe Modellierung der Teilnehmermobilität zu gewährleisten, wird dabei, wie bereits in Abschnitt 4.5.3 erläutert wurde, auf den Verkehrsflusssimulator SUMO zurückgegriffen. Dieser aktualisiert in diskreten Zeitschritten der Länge  $T_{step} = 0,1\text{ s}$  die Positionen und sonstigen Mobilitätsdaten jedes einzelnen Fahrzeugs und stellt diese Daten während der Simulationslaufzeit dem auf OMNeT++ basierenden Netzwerksimulationsmodell zur Verfügung. Die Grundlage des in SUMO modellierten Verkehrsflussszenarios bilden die Spezifikationen des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage unter Verwendung von SUMO-Konfigurationsdateien.

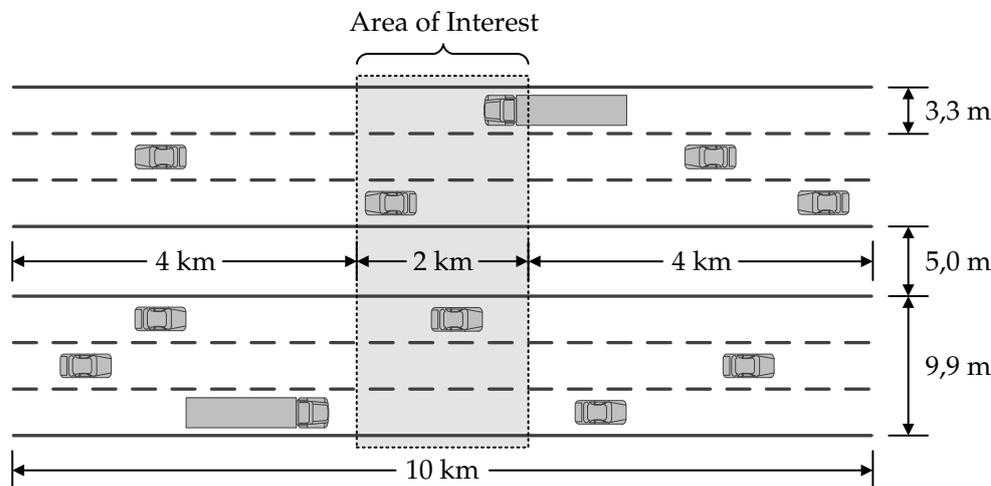


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Autobahnszenarios mit Auswertungszone (Area of Interest) und geometrischen Abmessungen.

Auf diese Weise wird für die Zwecke der vorliegenden Arbeit ein 10 km langer Autobahnabschnitt modelliert, der drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung aufweist und dessen geometrische Abmessungen in Abbildung 30 dargestellt sind. Um eine von Randeffekten unabhängige Bewertung des Netzes zu gewährleisten, wird die statistische Datenauswertung den Ausführungen

*Verkehrsnetz*

in Abschnitt 4.5.2.5 folgend mithilfe des StatisticCollector-Moduls auf eine 2 km lange, in der Mitte des Verkehrsnetzes angeordnete Auswertungszone begrenzt, die als *Area of Interest* bezeichnet wird.

Verkehrsnachfrage

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage umfasst zwei verschiedene Fahrzeugklassen: Pkw und Lkw. Diese unterscheiden sich insbesondere in ihrer Höchstgeschwindigkeit, ihrer maximalen Beschleunigung und Verzögerung sowie ihren Abmessungen. Der Lkw-Anteil an der Verkehrsnachfrage beträgt in sämtlichen untersuchten Simulationskonfigurationen 10 %. Die für die Konfiguration des Fahrzeugfolgemedells verwendeten Höchstgeschwindigkeiten  $v_{max}$  der einzelnen Fahrzeuge folgen einer beidseitig gestutzten Normalverteilung im Intervall  $v_a \leq v_{max} \leq v_b$ , deren Parametrierung Tabelle 12 entnommen werden kann.

	$v_a$ [km/h]	$\mu$ [km/h]	$v_b$ [km/h]	$\sigma$ [km/h]
Pkw	100,0	120,0	140,0	18,0
Lkw	90,0	100,0	110,0	7,2

Tabelle 12: Parametrierung der gestutzten Normalverteilung der Höchstgeschwindigkeiten  $v_{max}$  von Pkw und Lkw mit Erwartungswert  $\mu$ , Standardabweichung  $\sigma$  sowie den Stützpunkten  $v_a$  und  $v_b$ .

Verkehrsdichte und  
Verkehrsstärke

Zur Untersuchung netzlastabhängiger Effekte werden der Modellierung der Verkehrsnachfrage unterschiedliche *Verkehrsdichten* mit Werten zwischen  $\rho = 30^{\text{Fz./km}}$  und  $\rho = 135^{\text{Fz./km}}$  zugrunde gelegt. Die Verkehrsdichte  $\rho$  bezieht sich im Kontext dieser Arbeit stets auf die Gesamtanzahl von Fahrzeugen aller drei Richtungsfahrstreifen und beider Fahrtrichtungen je Kilometer Wegstrecke.

Während die *Verkehrsdichte*  $\rho$  die Anzahl der Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt definierter Länge beschreibt, misst die *Verkehrsstärke*  $q$  die Anzahl der Fahrzeuge, die in einem Zeitintervall definierter Länge einen Straßenquerschnitt passieren.<sup>3</sup> Bei stationärem Verkehrsfluss kann die Verkehrsstärke  $q$  unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung des Straßenverkehrs in der Form

$$q = \bar{v} \cdot \rho \quad (5.1)$$

aus der Verkehrsdichte  $\rho$  und der mittleren momentanen Geschwindigkeit  $\bar{v}$  der Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt berechnet werden [63, 70, 177].

Poisson-Prozess zur  
Einspeisung der  
Fahrzeuge

Im Rahmen des hier betrachteten Simulationsszenarios werden die Fahrzeuge dem Verkehrsnetz alternierend in beiden Fahrtrichtungen am jeweiligen Beginn des Autobahnabschnitts zugeführt. Die Einspeisung der Fahrzeuge folgt einem Poisson-Prozess, dessen Ankunftsrate der Verkehrsstärke  $q = \bar{v} \cdot \rho$  entspricht. Dabei werden Pkw initial in Abhängigkeit ihrer individuellen Höchstgeschwindigkeit  $v_{max}$  auf die drei vorhandenen Richtungsfahrstreifen verteilt, Lkw hingegen werden ausschließlich auf dem rechten Fahrstreifen eingespeist.

<sup>3</sup>Synonym zu *Verkehrsstärke* wird in der deutschsprachigen Literatur auch der Begriff *Verkehrsfluss* verwendet.

Die maximale Verkehrsstärke, die bei gegebenen äußeren Bedingungen vom Querschnitt einer Straße aufgenommen werden kann, wird als *Kapazität* bezeichnet. Übersteigt die Verkehrsnachfrage die Kapazität, kommt es zu einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses, der mit einem Übergang von teilgebundenem oder synchronem Verkehr (Kolonnenverkehr) zu stockendem oder sogar gestautem Verkehr einhergeht. Dieser Wechsel von einem metastabilen in einen instabilen Verkehrsflusszustand ist durch eine erhebliche Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit gekennzeichnet, sodass nach einem solchen Zusammenbruch auch die Verkehrsstärke im Vergleich zum synchronen Verkehr ein deutlich reduziertes Niveau einnimmt. Der Wert der Kapazität eines bestimmten Querschnitts hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab und lässt sich in der Realität nicht exakt, sondern nur näherungsweise bestimmen. In der Literatur werden für Autobahnen je Fahrstreifen Werte zwischen 1500 Fz./h und 2500 Fz./h angegeben [63, 142, 177].

*Kapazität*

Eine Zusammenfassung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Modellierung der Verkehrsnachfrage des Autobahnscenarios verwendeten Verkehrsdichten  $\rho$ , der beobachteten mittleren Geschwindigkeiten  $\bar{v}$  und der daraus resultierenden Verkehrsstärken  $q$  zeigt Tabelle 13. Dabei bezeichnen  $\rho_{lane}$  und  $q_{lane}$  die mittlere Verkehrsdichte bzw. Verkehrsstärke je Fahrstreifen.

*Modellierte Werte von Verkehrsdichte und Verkehrsstärke*

$\rho$ [Fz./km]	$\rho_{lane}$ [Fz./km]	$\bar{v}$ [km/h]	$q$ [Fz./h]	$q_{lane}$ [Fz./h]
30	5,0	112,6	3378	563,0
45	7,5	111,0	4995	832,5
60	10,0	110,0	6600	1100,0
90	15,0	108,8	9792	1632,0
135	22,5	108,2	14607	2434,5

Tabelle 13: Mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit  $\bar{v}$  und Verkehrsstärke  $q$  des Autobahnscenarios für die im Rahmen der Simulationsstudien untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$ .

Während  $\rho = 30$  Fz./km sehr leichtem Verkehr mit einem mittleren Abstand von 200 m zwischen Fahrzeugen auf einem Fahrstreifen entspricht, stellt  $\rho = 135$  Fz./km bei einem mittleren Fahrzeugabstand von lediglich etwa 44 m und einer Verkehrsstärke von mehr als 2400 Fz./h je Fahrstreifen einen metastabilen Hochflusszustand an der Kapazitätsgrenze des Autobahnabschnitts dar [63, 142, 177].

Für auf Cooperative Awareness basierende Anwendungen in VANETs (siehe hierzu Abschnitt 2.2.3) geht ein solcher Hochflusszustand an der Kapazitätsgrenze gleichzeitig mit der höchsten Belastung des Kommunikationsnetzes einher, denn derartige Anwendungen sind naturgemäß mit Mindestanforderungen bezüglich der Aktualität und Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Positions- und sonstigen Statusinformationen benachbarter Fahrzeuge verbunden. Dabei kann angenommen werden, dass die zur Erfüllung dieser Mindestanforderungen erforderliche Nachrichtenerzeugungsrate einer Station annähernd linear mit der Fahrzeuggeschwindigkeit wächst. Demnach

*Höchste Belastung des Kommunikationsnetzes bei maximaler Verkehrsstärke*

erreicht die insgesamt von sämtlichen Stationen erzeugte Anzahl von Nachrichten pro Zeiteinheit, quantifiziert durch die Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  (siehe Gl. 4.42 in Abschnitt 4.4.4), ihr Maximum bei maximaler Verkehrsstärke, d. h. an der Kapazitätsgrenze des Verkehrsnetzes.

Bei stockendem, gestautem oder stehendem Verkehr können Autobahnscenarien zwar signifikant höhere Verkehrsdichten aufweisen als im Falle eines metastabilen Hochflusszustands – jene Verkehrszustände sind jedoch mit wesentlich geringeren Fahrzeuggeschwindigkeiten verbunden und erlauben daher eine Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate, die wiederum eine Entlastung des Kommunikationsnetzes bewirkt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien zur Bewertung netzlastabhängiger Effekte konzentrieren sich daher auf freien sowie metastabilen Verkehr bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten gemäß Tabelle 13 und verzichten auf eine Modellierung höherer Verkehrsdichten.

### 5.1.2 Kommunikation

*Periodische CAM-  
Erzeugung*

Der Gesamtheit der im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellten Simulationsstudien liegt die Annahme zugrunde, dass sämtliche Fahrzeuge periodisch Cooperative Awareness Messages (CAMs) erzeugen und diese mittels ihrer auf ETSI ITS-G5 basierenden Kommunikationssysteme an benachbarte Fahrzeuge übermitteln.

*Single-Hop-  
Broadcast im  
OCB-Modus*

Die Übertragung der Frames erfolgt dabei im OCB-Modus als Single-Hop Broadcast, sodass eine Authentifizierung oder Assoziierung der Stationen mit einem BSS nicht notwendig ist und weder eine Bestätigung noch eine Weiterleitung der empfangenen Daten erfolgt. Darüber hinaus sind dem Simulationsmodell damit die mit der Broadcast-Übertragung einhergehenden Herausforderungen für eine zuverlässige Datenübermittlung immanent: Fehlgeschlagene Übertragungen können vom Sender nicht erkannt und somit auch nicht wiederholt werden, eine Vergrößerung des Contention Windows als Reaktion auf fehlgeschlagene Übertragungsversuche ist ebenfalls nicht möglich. Auch auf das RTS/CTS-Verfahren, welches der Vermeidung von Framekollisionen dient, die durch Hidden Stations hervorgerufen werden, kann nicht zurückgegriffen werden (vgl. hierzu bereits Kapitel 2, insbesondere Abschnitte 2.2.3, 2.2.5 und 2.3).

Wie in Abschnitt 2.2.7 bereits erläutert wurde, sieht die europäische ITS-Architektur für die Übertragung von CAMs ausschließlich die Nutzung des ITS-G5 Control Channels (CCH) vor. Aus diesem Grund konzentrieren sich die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ausschließlich auf den ITS-G5 CCH und die für diesen Kanal vorgesehene Trägerfrequenz von 5,9 GHz.

Im Fokus der im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorstellten Simulationsstudien liegen die Untersuchung der Auswirkungen von Interferenzen auf die Skalierbarkeit des Netzes und dessen netzlastabhängige Dienstgütebewertung. Schätzungen des CAR2CAR Communication Consortiums gehen davon aus, dass die Übertragung von CAMs über 90% der Last auf dem CCH verursachen wird, während der Einfluss von DENM-Übertragungen

auf die Auslastung des CCH praktisch vernachlässigt werden kann [23]. Daher kann innerhalb der Simulationsstudien auf eine Modellierung von über die periodische CAM-Erzeugung hinausgehendem Datenverkehr, z. B. in Form von ereignisgesteuerten Decentralized Environmental Notification Messages (DENMs), verzichtet werden, ohne dass sich dies auf die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse in realen VANETs auf Basis von ITS-G5 auswirkt. Der Datenverkehr des Simulationsszenarios beschränkt sich aus diesem Grund auf die periodische CAM-Erzeugung.

Die Grundlage der in diesem Kapitel dargestellten Simulationsergebnisse bildet, soweit hiervon abweichende explizite Angaben fehlen, das durch Feldtests validierte Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien, dem ein Dual-Slope Pfadverlustmodell nach Gl. 4.20 in Verbindung mit Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität nach Gl. 4.32 zugrunde liegt (siehe Abschnitt 4.3.4). Eine vergleichende Untersuchung der Auswirkungen einer davon abweichenden Ausbreitungsmodellierung erfolgt in Abschnitt 5.3.1.

Tabelle 14 fasst die Standard-Konfigurationsparameter des Simulationsszenarios zusammen. Soweit nicht anders gekennzeichnet, basieren die durchgeführten Simulationen auf diesen Konfigurationswerten.

Ausbreitungsmodell

Standard-Konfigurationsparameter

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes	MAC-Framelänge	474 Bytes
$R_b$	6 Mbps	$P_t$	23 dBm
$f_g$	10 Nachrichten/s	CW	15
Post-Backoff	deaktiviert	PLC	aktiviert
$P_{r,cs}$	-93 dBm	$SIR_{th}$	9 dB
$P_{r,th}$	-91 dBm	$N$	-100 dBm
$T_{sym}$	8 $\mu$ s	$T_{preamble}$	32 $\mu$ s
$T_{slot}$	13 $\mu$ s	$T_{SIFS}$	32 $\mu$ s
$AIFSN$	9	$T_{AIFS}$	149 $\mu$ s
Access Category (AC)	AC_BK	Ausbreitungsmodell	siehe Tabelle 7
$f_c$	5,9 GHz	$B$	10 MHz
$G_t, G_r$	1,0	$h_t, h_r$	1,5 m

Tabelle 14: Standard-Konfigurationsparameter des Simulationsszenarios.

Als *Ausstattungsgrad* wird im VANET-Kontext üblicherweise der Anteil der Fahrzeuge im Straßenverkehr bezeichnet, die mit V2V-Kommunikationssystemen ausgerüstet sind und daher am Nachrichtenaustausch innerhalb des VANETs teilnehmen können.<sup>4</sup> Für die netzlastabhängige Dienstgütebewertung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs ist allerdings ausschließlich eine Betrachtung ausgerüsteter Fahrzeuge von Bedeutung, da nicht ausgerüstete Fahrzeuge lediglich den Verkehrsfluss, jedoch nicht die Performanz der Nachrichtenübermittlung beeinflussen. Für die Zwecke der vorliegenden Arbeit wird daher auf eine Modellierung verschiedener Ausstattungsgrade verzichtet und in allen Simulationskonfigurationen angenommen,

Ausstattungsgrad

<sup>4</sup>Synonym wird in der Literatur zu diesem Zweck auch der Begriff *Penetrationsrate* verwendet.

dass sämtliche Fahrzeuge mit ITS-G5-Kommunikationssystemen ausgerüstet sind und regelmäßig CAMs erzeugen.

Da sich die für die Leistungsbewertung periodischer Broadcast-Kommunikation relevante Dichte ausgerüsteter Fahrzeuge als Produkt von Ausstattungsgrad und Verkehrsdichte errechnen lässt, sind die gewonnenen Simulationsergebnisse ohne Weiteres auf geringere Ausstattungsgrade übertragbar. So können beispielsweise die Ergebnisse für die untersuchten Verkehrsdichten von 30, 45, 60 bzw. 90 Fz./km auf Szenarien mit einer Verkehrsdichte von 135 Fz./km und einem Ausstattungsgrad von 2/9, 1/3, 4/9 bzw. 2/3 übertragen werden.

*Simulationsdauer  
und Vorlaufzeit*

Die Variation der Verkehrsdichte  $\rho$  bildet einen wichtigen methodischen Aspekt der in diesem Kapitel vorgestellten simulationsbasierten Parameterstudien und dient dazu, netzlastabhängige Effekte im Rahmen der Dienstgütebewertung erfassen zu können. Für die meisten der dabei herangezogenen Performanzmetriken hängt allerdings die Anzahl von Stichproben, die in ihre Berechnung einfließen, von der Anzahl der während der Dauer der Simulation von sämtlichen Stationen insgesamt erzeugten Nachrichten ab. Damit unabhängig von der gewählten Verkehrsdichte in jedem Simulationslauf eine annähernd gleich große Anzahl von Stichproben in die Bewertung einfließt, wird die Dauer eines Simulationslaufs  $T_{run}$  nach Tabelle 15 abhängig von der Verkehrsdichte  $\rho$  konfiguriert.

$\rho$	[Fz./km]	30	45	60	90	135
$T_{run}$	[s]	72	48	36	24	16

Tabelle 15: Dauer eines Simulationslaufs  $T_{run}$  in Abhängigkeit der Verkehrsdichte  $\rho$ .

Der eigentliche Simulationslauf und damit die Aufzeichnung der auswertbaren Simulationsdaten beginnt erst nach einer 450 s langen Vorlaufzeit<sup>5</sup>, welche der Herstellung eines stationären Verkehrsstroms innerhalb des Verkehrsnetzes durch eine fortlaufende Einspeisung von Fahrzeugen in den Autobahnabschnitt dient (siehe Abschnitt 5.1.1). Um darüber hinaus einen eingeschwungenen Zustand des Kommunikationsnetzes, insbesondere der Medienzugriffssteuerung, sicherzustellen, wird das Simulationsszenario so konfiguriert, dass die Stationen bereits eine Sekunde vor dem Beginn von Simulationslaufzeit und Datenaufzeichnung die periodische CAM-Erzeugung aufnehmen.

Für jede untersuchte Simulationskonfiguration werden zehn statistisch voneinander unabhängige Simulationsläufe mit identischen Parametern (Replikationen) durchgeführt.

## 5.2 UNTERSUCHUNG GRUNDLEGENDER SKALIERBARKEITSEFFEKTE

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine Untersuchung grundlegender Skalierbarkeitseffekte in Abhängigkeit von Verkehrsdichte und Netzlast bei periodischer Aussendung von Broadcast-Nachrichten in VANETs. Dabei werden

<sup>5</sup>Sogenannte *WarmUpTime*, siehe hierzu bereits Abschnitt 4.5.2.5, Seite 132.

die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Performanzmetriken verwendet und die Zusammenhänge zwischen diesen Metriken exemplarisch erläutert. Im Zentrum des Interesses steht zunächst die grundsätzliche Veranschaulichung des Skalierbarkeitsproblems in VANETs sowie dessen quantitative Beurteilung, während eine detailliertere Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf verschiedene Konfigurationsparameter des Kommunikationsnetzes Gegenstand der sich anschließenden Abschnitte ist.

Abbildung 31 zeigt für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  den distanzabhängigen Verlauf der in Abschnitt 4.4.1 definierten Performanzmetriken Carrier Sense Rate sowie Packet Delivery Rate (PDR) im interferenzfreien und interferenzbehafteten Fall. Die Verkehrsdichte  $\rho$  bezieht sich dabei, wie generell im Kontext dieser Arbeit, auf die Summe aller drei Richtungsfahrstreifen und beider Fahrtrichtungen. Wie in Abschnitt 5.1 bereits erläutert wurde, entspricht  $\rho = 30^{\text{Fz./km}}$  sehr leichtem Verkehr, während  $\rho = 135^{\text{Fz./km}}$  einen Hochflusszustand an der Kapazitätsgrenze des Autobahnabschnitts widerspiegelt.

*Carrier Sense Rate  
und PDR in  
Abhängigkeit der  
Verkehrsdichte*

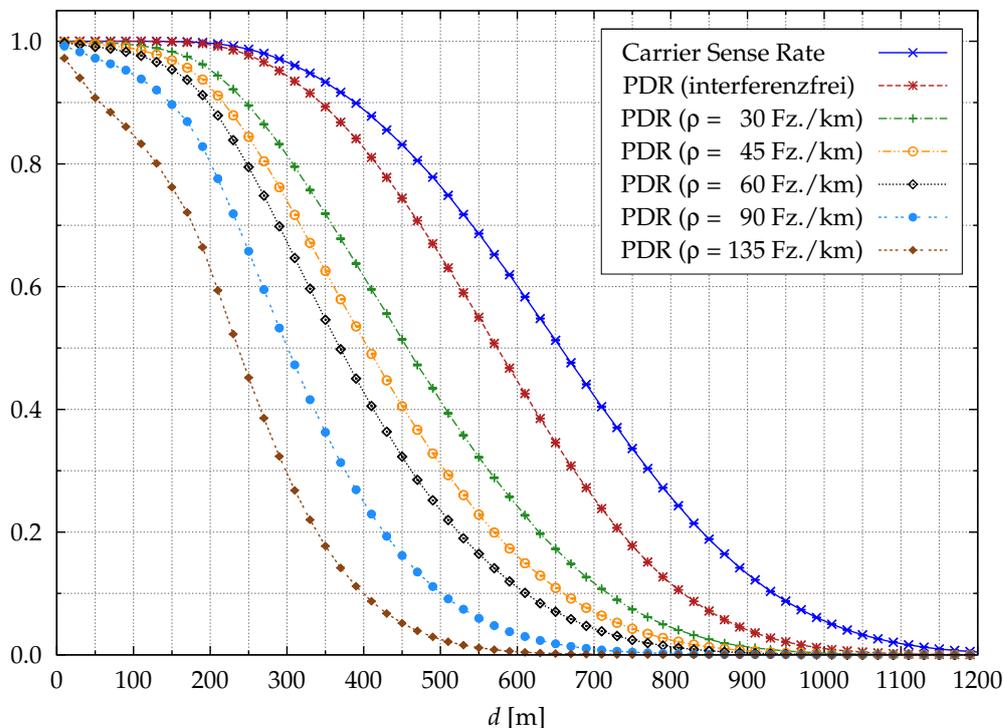


Abbildung 31: Carrier Sense Rate, PDR im interferenzfreien sowie im interferenzbehafteten Fall in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ ,  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  und  $CW = 15$ .

Sämtliche Kommunikationsparameter wurden im gezeigten Beispiel mit  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$ ,  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6 \text{ Mbps}$  für alle Stationen des VANETs einheitlich und konstant konfiguriert. Die resultierenden Nachrich-

tenerzeugungsdichten<sup>6</sup>  $\rho_g = f_g \cdot \rho$  umfassen demnach einen Bereich von  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km·s bis  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s.

Der Einfluss des Signalfadings wird bei der Betrachtung der Carrier Sense Rate deutlich, die als empirische Wahrscheinlichkeit  $P(P_r \geq P_{r,cs})$  aufgefasst werden kann: Aufgrund der Schwankungen der Signalleistung liegt keine deterministische Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$  vor. Stattdessen kann festgestellt werden, dass zum einen Frames aus Entfernungen  $d > d_{cs}$  durch den Carrier-Sense-Mechanismus erkannt, zum anderen Frames aus Entfernungen  $d \leq d_{cs}$  nicht erkannt werden können. Analog gilt dies für die interferenzfreie PDR, die der empirischen Wahrscheinlichkeit  $P(P_r \geq P_{r,th})$  entspricht. Die interferenzfreie PDR stellt daher eine theoretische Obergrenze für die erreichbare PDR bei gegebener Sendeleistung und Datenübertragungsrate sowie gegebenen Ausbreitungsbedingungen dar.

Ist mehr als eine sendende Station im Netz vorhanden, kommt es unter realen Bedingungen hingegen aufgrund von Interferenzen, die durch zeitlich überlappende Übertragungen verursacht werden, zu Framekollisionen und somit zu einer Verringerung der PDR gegenüber dem interferenzfreien Fall.

Aus Abbildung 31 wird deutlich, dass c. p. die Verkehrsdichte  $\rho$  einen signifikanten Einfluss auf die PDR besitzt, da mit einer Erhöhung der Verkehrsdichte eine Steigerung der Netzlast und damit der Kollisionswahrscheinlichkeit einhergeht. Während beispielsweise für eine Entfernung  $d = 350$  m bei einer geringen Verkehrsdichte von  $\rho = 30$  Fz./km noch 72 % der gesendeten Frames erfolgreich dekodiert werden können, sinkt dieser Wert für eine mittlere Verkehrsdichte von  $\rho = 60$  Fz./km auf 55 % und für den Hochflusszustand mit  $\rho = 135$  Fz./km sogar auf 18 %, d. h. im Mittel kann nur noch weniger als jeder fünfte gesendete Frame erfolgreich empfangen werden. Im interferenz- und kollisionsfreien Fall wird in dieser Entfernung hingegen für die gewählte Parameterkombination mit einer Datenrate von  $R_b = 6$  Mbps und einer damit verbundenen Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th} = -91$  dBm noch eine PDR von 89 % erreicht.

Für hohe Verkehrsdichten kann aus diesen Ergebnissen somit bereits anhand der PDR abgeleitet werden, dass eine signifikante Überlastung des Netzes vorliegt, die mit einer deutlichen Verringerung der Dienstgüte des Netzes verbunden ist.

Einen vergleichbaren Einfluss auf die Netzlast und damit auf die Dienstgüte hat die Nachrichtenerzeugungsrate, wie Abbildung 32 veranschaulicht. Die Abbildung zeigt die PDR für zwei verschiedene Verkehrsdichten  $\rho = 30$  Fz./km und  $\rho = 135$  Fz./km sowie unterschiedliche Nachrichtenerzeugungsraten zwischen  $f_g = 2$  Frames/s und  $f_g = 20$  Frames/s. Hieraus resultieren Nachrichtenerzeugungsdichten zwischen  $\rho_g = 60$  Nachrichten/km·s und  $\rho_g = 600$  Nachrichten/km·s für  $\rho = 30$  Fz./km (Abbildung 32a) sowie zwischen  $\rho_g = 270$  Nachrichten/km·s und  $\rho_g = 2700$  Nachrichten/km·s für  $\rho = 135$  Fz./km (Abbildung 32b).

Deutlich erkennbar ist, dass eine Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrate c. p. grundsätzlich eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Frameempfangs bewirkt. Darüber hinaus ist festzustellen, dass der Grad dieser PDR-Verringerung signifikant von der gegebenen Netzlast und

*Carrier Sense Rate  
und PDR in  
Abhängigkeit von  
Erzeugungsrate und  
Verkehrsdichte*

<sup>6</sup>Zur Definition der Nachrichtenerzeugungsdichte siehe bereits Abschnitt 4.4.4.

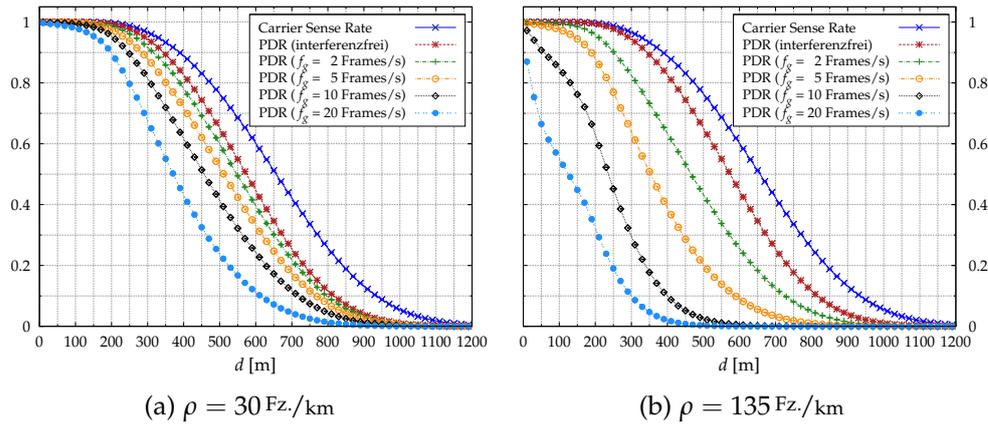


Abbildung 32: Carrier Sense Rate, PDR im interferenzfreien sowie im interferenzbehafteten Fall in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Erzeugungsraten  $f_g$  mit  $R_b = 6$  Mbps,  $P_t = 23$  dBm und  $CW = 15$ .

damit von der Verkehrsdichte  $\rho$  abhängt. So nimmt bei einer Erhöhung der Erzeugungsrates die PDR für  $\rho = 135$  Fz./km (siehe Abbildung 32b) deutlich stärker ab als für  $\rho = 30$  Fz./km (siehe Abbildung 32a). Dies verdeutlicht Tabelle 16 anhand der Auswirkungen einer Verdopplung der Erzeugungsrates von 5 auf 10 Nachrichten pro Sekunde für  $d = 350$  m:

	$\rho = 30$ Fz./km		$\rho = 135$ Fz./km	
	$\rho_g$	PDR	$\rho_g$	PDR
$f_g = 5$ Nachrichten/s	150	0,806	675	0,495
$f_g = 10$ Nachrichten/s	300	0,720	1350	0,159

Tabelle 16: PDR für  $d = 350$  m und Auswirkungen einer Verdopplung der Erzeugungsrates  $f_g$  bei unterschiedlicher Verkehrsdichte  $\rho$  und Erzeugungsdichte  $\rho_g$  [Nachrichten/(km · s)].

Das Beispiel lässt erkennen, dass bei geringer Verkehrsdichte eine Verdopplung der Erzeugungsrates die Verringerung der PDR überkompensiert, denn für  $\rho = 30$  Fz./km erhöht sich die mittlere Anzahl fehlerfrei übertragener Nachrichten pro Sekunde und Sender von 4,03 auf 7,2. Bei sehr hoher Verkehrsdichte, wie sie für  $\rho = 135$  Fz./km vorherrscht, ist jedoch das Gegenteil der Fall, denn hier verringert sich dieser Wert von 2,48 auf 1,59 empfangene Nachrichten pro Sekunde und Sender.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die gegebene Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  einen signifikanten Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Datenübertragung im Netz besitzt und somit in vernünftigen Grenzen zu halten ist.

Durch die PDR wird allerdings nur das Verhältnis der Anzahl erfolgreich empfangener Frames zur Anzahl gesendeter Frames quantifiziert. Die Metrik liefert keine Informationen über Verzögerungen, die bei der Übertragung der Statusinformationen entstehen. Darüber hinaus erlaubt die PDR auch kei-

nerlei Rückschlüsse auf die Anzahl von Frame Drops, also darüber, ob und in welchem Maße erzeugte Statusnachrichten aufgrund exzessiver Kanalzugriffszeiten (Channel Access Times) bereits vor der Übertragung vom Sender verworfen werden. Diese Aspekte haben gleichzeitig aber wesentlichen Einfluss auf die Dienstgüte des Netzes und sind daher bei der Leistungsbewertung zusätzlich zu berücksichtigen.

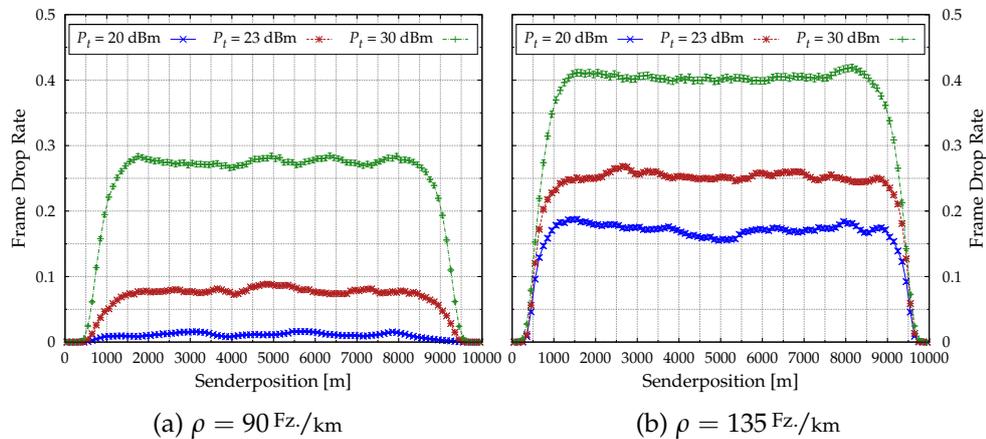


Abbildung 33: Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Position des Senders im 10 km langen Autobahnscenario für verschiedene Verkehrsdichten ( $\rho$ ) und Sendeleistungen ( $P_t$ ) mit  $f_g = 20$  Frames/s,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6$  Mbps.

Frame Drop Rate in  
Abhängigkeit von  
Sendeleistung und  
Verkehrsdichte

Abbildung 33 zeigt die Frame Drop Rate<sup>7</sup> in Abhängigkeit der Position des Senders im gesamten Autobahnscenario der Länge 10 km für zwei verschiedene Verkehrsdichten ( $\rho = 90$  Fz./km und  $\rho = 135$  Fz./km) sowie jeweils drei verschiedene Sendeleistungen ( $P_t = 20$  dBm,  $P_t = 23$  dBm und  $P_t = 30$  dBm) im Fall der höchsten untersuchten Nachrichtenerzeugungsrate ( $f_g = 20$  Frames/s).

Deutlich erkennbar werden dabei Randeffekte im Szenario: Signifikant geringere Frame Drop Rates als im übrigen Bereich des Autobahnscenarios treten für Positionen des Senders auf, die nicht deutlich weiter von den Szenariogrenzen entfernt sind als die Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs}$ . Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass der Zeitanteil eines als belegt wahrgenommenen Übertragungsmediums in der Nähe der Szenariogrenzen durch die geringere Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Stationen kleiner ist als im übrigen Szenario.<sup>8</sup> Mit zunehmender Belegungswahrscheinlichkeit des Mediums nimmt auch die Wahrscheinlichkeit von Frame Drops zu.

Abgesehen von diesen Randeffekten ist im gesamten Szenario eine relativ konstante Frame Drop Rate zu beobachten. Deutlich erkennbar ist, dass sowohl die Verkehrsdichte als auch die Sendeleistung einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Stationen und damit auf die resultierende Frame Drop Rate besitzen. Während die Frame Drop Rate im zentralen Bereich des Szenarios für  $\rho = 90$  Fz./km und  $P_t = 20$  dBm deutlich unter 2 % und damit noch im tolerierbaren Bereich liegt,

<sup>7</sup>Zur Definition dieser Metrik siehe bereits Abschnitt 4.4.1.

<sup>8</sup>Um diese Randeffekte zu umgehen, werden sämtliche Statistiken, sofern nicht wie in diesem Fall anders angegeben, nur innerhalb der als *Area of Interest* bezeichneten Auswertungszone, d. h. für Positionen zwischen 4000 m und 6000 m erhoben (vgl. Abschnitt 5.1.1).

steigt ihr Wert c. p. für  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  und  $P_t = 30 \text{ dBm}$  auf inakzeptable 40 %, was auf ein völlig überlastetes Netz zurückzuführen ist.

Sämtliche sonstigen untersuchten Konfigurationen mit geringerer Erzeugungsrate ( $f_g \leq 10 \text{ Frames/s}$ ) oder Verkehrsdichte ( $\rho \leq 60 \text{ Fz./km}$ ) weisen entweder keine oder lediglich eine vernachlässigbar kleine Anzahl verworfener Frames auf.

Während die hier präsentierten Ergebnisse nur  $CW = 15$  berücksichtigen, kann vermutet werden, dass die Größe des Contention Windows einen signifikanten Einfluss auf die Frame Drop Rate besitzt. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 5.5.5 näher eingegangen.

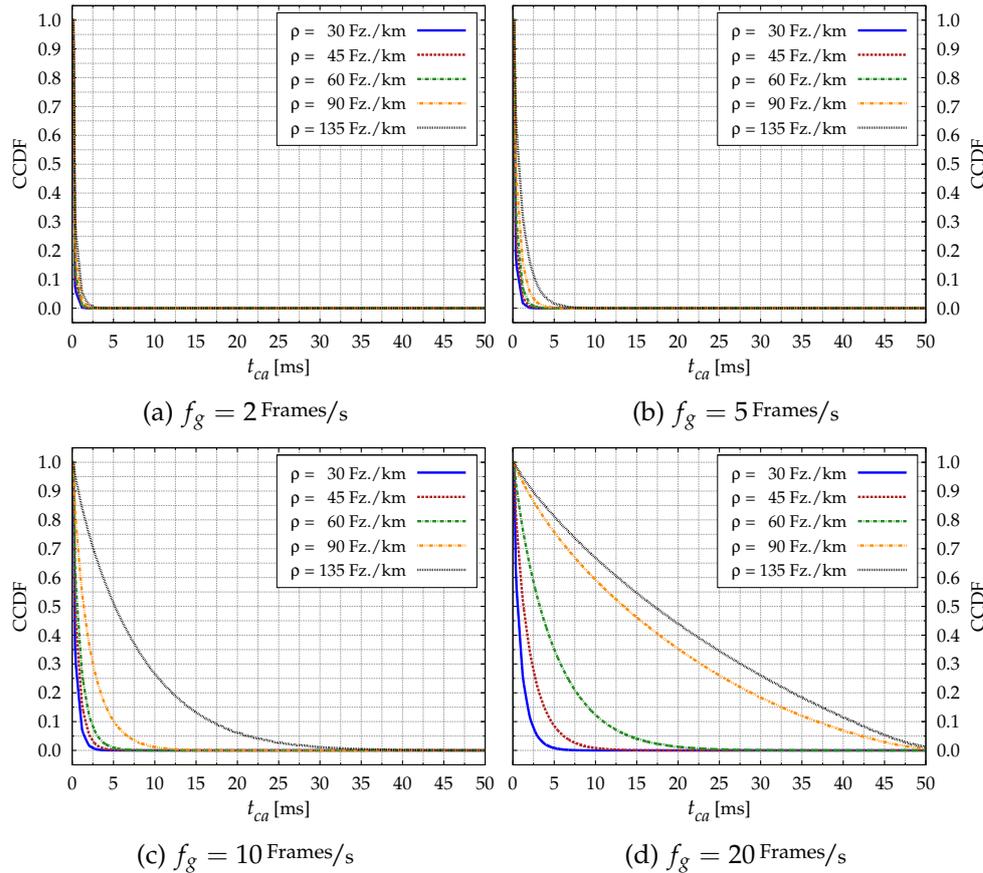


Abbildung 34: Komplementäre Verteilungsfunktion  $P(T_{ca} > t_{ca})$  (CCDF) der Channel Access Time ( $T_{ca}$ ) für verschiedene Erzeugungsraten ( $f_g$ ) und Verkehrsdichten ( $\rho$ ) mit  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ .

Zur näheren Erklärung der Ursachen der beobachteten Frame Drops ist eine Untersuchung der Channel Access Times<sup>9</sup> notwendig. Abbildung 34 zeigt die durch Simulationen empirisch ermittelte komplementäre Verteilungsfunktion  $P(T_{ca} > t_{ca})$  (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) der aus verschiedenen Simulationskonfigurationen resultierenden Channel Access Times. Aus der CCDF kann unmittelbar abgelesen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Channel Access Time einen bestimmten tolerierbaren Wert  $t_{ca}$  überschreitet.

*Channel Access Time in Abhängigkeit von Erzeugungsrate und Verkehrsdichte*

<sup>9</sup>Zur Definition der Channel Access Time siehe Abschnitt 4.4.2.

Während die Parameter Nachrichtenerzeugungsrate, Größe des Contention Windows und Datenübertragungsrate mit  $P_t = 23$  dBm,  $CW = 15$  und  $R_b = 6$  Mbps innerhalb der in Abbildung 34 gezeigten Konfigurationen unverändert bleiben, sind sämtliche in diesem Abschnitt untersuchten Nachrichtenerzeugungsraten zwischen  $f_g = 2$  Frames/s und  $f_g = 20$  Frames/s und Verkehrsdichten zwischen  $\rho = 30$  Fz./km und  $\rho = 135$  Fz./km dargestellt.

Die Ergebnisse lassen mit zunehmender Verkehrsdichte, gleichbedeutend mit einer steigenden Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Stationen, einen weniger steil abfallenden Verlauf der CCDF und damit einen Anstieg der Wahrscheinlichkeit höherer Channel Access Times erkennen. Gleiches gilt für eine Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrate, die ebenfalls signifikant steigende Wahrscheinlichkeiten höherer Werte von  $T_{ca}$  bewirkt.

Besonders deutlich werden diese Auswirkungen anhand einer Betrachtung der 0,95-Quantile der Verteilungen: Während für die dargestellte Konfiguration mit  $f_g = 2$  Frames/s,  $\rho = 30$  Fz./km noch 95 % der Channel Access Times weniger als 0,5 ms betragen, erreicht das 0,95-Quantil für  $f_g = 10$  Frames/s,  $\rho = 90$  Fz./km bereits etwa 6,5 ms und für  $f_g = 20$  Frames/s,  $\rho = 135$  Fz./km sogar 45,8 ms. Diese Effekte können dadurch erklärt werden, dass der CSMA-Medienzugriffsmechanismus einen Übertragungsbeginn nur im Falle eines als frei erkannten Mediums erlaubt, während eine erhöhte Frequenz insgesamt im Netz erzeugter Nachrichten zu einer niedrigeren Wahrscheinlichkeit eines freien Übertragungsmediums führt.

Mit einer zunehmenden Wahrscheinlichkeit hoher Channel Access Times steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass die beim Medienzugriff entstehende Wartezeit die Nachrichtenerzeugungsverzögerung übersteigt. Tritt dieser Fall ein, wird der auf einen Übertragungsbeginn wartende Frame verworfen. Demnach gehen hohe Channel Access Times und hohe Nachrichtenerzeugungsraten mit einer hohen Frame Drop Rate einher (vgl. Abbildung 33). Bei der Interpretation der hier gezeigten Simulationsergebnisse ist zu beachten, dass die Channel Access Time nur berechnet werden kann, wenn der Sender auch tatsächlich mit der Übertragung eines Frames beginnt, nicht hingegen im Falle eines verworfenen Frames.

In direktem Zusammenhang mit der Channel Access Time stehen die auftretenden Ende-zu-Ende-Verzögerungen<sup>10</sup>. Tabelle 17 zeigt die Mittelwerte der End-to-End Delays für die bereits in Abbildung 34 dargestellten Simulationskonfigurationen und vergleicht diese mit den zugehörigen Mittelwerten der Channel Access Times. Für die Beziehung zwischen beiden Metriken gilt der Zusammenhang  $T_{ee} = T_{ca} + T_{tr} + T_{prop}$  mit der Übertragungsverzögerung  $T_{tr}$ , die hier ca. 680  $\mu$ s beträgt, und der Ausbreitungsverzögerung  $T_{prop}$ , deren entfernungsabhängiger Wert zwischen 0,033  $\mu$ s und 4,0  $\mu$ s beträgt.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass bei geringer Netzlast die Channel Access Time nur begrenzten Einfluss auf die Ende-zu-Ende-Verzögerung besitzt, während bei mittlerer und hoher Netzlast die Höhe der Ende-zu-Ende-Verzögerung maßgeblich durch die Channel Access Time bestimmt wird, da bei einer hohen Wahrscheinlichkeit eines belegten Übertragungsmediums die durch das Medienzugriffsverfahren verursachte Wartezeit bis zum Über-

Zusammenhang  
zwischen Ende-zu-  
Ende-Verzögerung  
und Channel Access  
Time

<sup>10</sup>Zur Definition des End-to-End Delays siehe Abschnitt 4.4.2.

$f_g$	$\rho$	$\bar{T}_{ca}$	$\bar{T}_{ee}$	$f_g$	$\rho$	$\bar{T}_{ca}$	$\bar{T}_{ee}$
[Frames/s]	[Fz./km]	[ms]	[ms]	[Frames/s]	[Fz./km]	[ms]	[ms]
2	30	0,29	0,98	10	30	0,50	1,20
2	45	0,31	1,00	10	45	0,71	1,44
2	60	0,33	1,03	10	60	1,00	1,74
2	90	0,38	1,08	10	90	2,16	3,14
2	135	0,47	1,17	10	135	7,30	8,74
5	30	0,36	1,05	20	30	0,97	1,73
5	45	0,42	1,13	20	45	2,00	2,91
5	60	0,50	1,20	20	60	4,73	6,05
5	90	0,72	1,43	20	90	16,55	18,61
5	135	1,15	1,92	20	135	19,59	21,41

Tabelle 17: Mittlere Channel Access Times ( $\bar{T}_{ca}$ ) und mittlere End-to-End Delays ( $\bar{T}_{ee}$ ) für verschiedene Erzeugungsraten ( $f_g$ ) und Verkehrsdichten ( $\rho$ ) mit  $P_t = 23$  dBm,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6$  Mbps.

tragungsbeginn in der Regel ein Vielfaches der Übertragungsdauer eines Frames erreicht. Für  $\rho = 90$  Fz./km und  $f_g = 10$  Frames/s beträgt die mittlere Channel Access Time bereits mehr als das Dreifache und für die höchste hier untersuchte Auslastung des Netzes mit  $\rho = 135$  Fz./km und  $f_g = 20$  Frames/s annähernd das Dreißigfache der Übertragungsdauer eines Frames. Auch in diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass Channel Access Times verworfener Frames nicht berechnet werden können und somit nicht in den Mittelwert eingehen.

Für größere Werte des Contention Windows (hier  $CW = 15$ ) ist mit einer weiteren Zunahme der Channel Access Time zu rechnen. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 5.5.5 näher untersucht.

Darüber hinaus ist auffällig, dass für sämtliche untersuchten Konfigurationen, insbesondere jedoch im Falle hoher Netzlast, die Differenz der Mittelwerte beider Metriken die Summe aus Übertragungs- und Ausbreitungsverzögerung übersteigt, d. h. es gilt  $\bar{T}_{ee} - \bar{T}_{ca} > T_{tr} + T_{prop}$ . Dieser Effekt kann mit der verwendeten Auswertungsmethodik erklärt werden: Grundsätzlich werden zur Auswertung der Channel Access Times alle zum Sendezeitpunkt innerhalb der Auswertungszone positionierten Sender und zur Auswertung der Ende-zu-Ende-Verzögerung alle zum Empfangszeitpunkt innerhalb der Auswertungszone positionierten Empfänger herangezogen (vgl. Abschnitt 4.5.2.5). Dabei führt ein gesendeter Frame zu einer von der Anzahl benachbarter Stationen und weiterer Faktoren abhängiger Anzahl erzeugter Stichproben der Ende-zu-Ende-Verzögerung, da diese für sämtliche im interferenzfreien Fall dekodierbaren Frames ( $P_r \geq P_{r,th}$ ) errechnet wird. Da die Höhe der Channel Access Time positiv mit der Anzahl benachbarter Stationen korreliert, gehen hohe Channel Access Times überdurchschnittlich häufig in die Mittelwertbildung der Ende-zu-Ende-Verzögerungen ein.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit verschiedener Netzkonfigurationen, die sich in ihrer Netzlast und ihren Kommunikationsparametern un-

terscheiden, ist darüber hinaus die Verfügbarkeit von Performanzmetriken wünschenswert, die sowohl bei der Übertragung entstehende Frameverluste als auch Frame Drops sowie auftretende Verzögerungen in einer skalaren Größe abbilden.

Gegenüberstellung  
von Update Delay  
und Message  
Lifetime

Zu diesem Zweck können grundsätzlich zwei verschiedene Verzögerungsmetriken herangezogen werden: Während das *Update Delay* aus Sicht eines Empfängers den zeitlichen Abstand zwischen dem erfolgreichen Empfang zweier Frames eines bestimmten Senders beschreibt, bezeichnet die *Message Lifetime* den zeitlichen Abstand zwischen dem senderseitigen Erzeugungszeitpunkt eines erfolgreich empfangenen Frames und dem Empfangszeitpunkt des nächsten erfolgreich empfangenen Frames desselben Senders.<sup>11</sup> Die Message Lifetime spiegelt somit im Gegensatz zum Update Delay neben ausbreitungs- und interferenzbedingten Frameverlusten, Frame Drops und von der Nachrichtenerzeugungsrate abhängigen Erzeugungsverzögerungen zusätzlich auch im Netz auftretende Ende-zu-Ende-Verzögerungen und darin enthaltene Channel Access Times unmittelbar wider.

Abbildung 35 zeigt einen Vergleich der komplementären Verteilungsfunktionen (CCDF) des Update Delays,  $P(T_{upd} > t)$ , sowie der Message Lifetime,  $P(T_{mlt} > t)$ , für die mittlere Entfernung  $d = 100$  m zwischen Sender und Empfänger und zwei ausgewählte Simulationskonfigurationen mit  $f_g = 20$  Nachrichten/s bei hoher ( $\rho = 135$  Fz./km) und vergleichsweise geringer ( $\rho = 30$  Fz./km) Netzlast.

Aus der Abbildung deutlich erkennbar ist insbesondere bei geringerer Netzlast der einer Gleichverteilung im Intervall  $[-1/(10 \cdot f_g), +1/(10 \cdot f_g)]$  folgende Jitter  $J_{gen}$ , mit dem das CAM-Erzeugungsintervall zur Vermeidung sich periodisch wiederholender Kollisionen beaufschlagt wird (vgl. Abschnitt 4.5.2.2). Darüber hinaus wird deutlich, dass im Falle niedriger Netzlast die Ende-zu-Ende Verzögerungen eine untergeordnete Rolle spielen (siehe auch Tabelle 17), sodass nur ein unwesentlicher Unterschied zwischen Update Delay und Message Lifetime besteht. Da für  $\rho = 30$  Fz./km und  $d = 100$  m zudem nur wenige Frameverluste auftreten (siehe Abbildung 32a), werden Update Delay und Message Lifetime hier im Wesentlichen durch die Erzeugungsverzögerung bestimmt.

Bei hoher Netzlast hingegen wird eine signifikante Differenz zwischen beiden Metriken deutlich, deren Ursache in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Ende-zu-Ende-Verzögerung liegt, welche hier durch die Channel Access Time (CAT) dominiert wird. Da CATs nicht mit ihrem absoluten Wert, sondern nur mit der Differenz aufeinanderfolgender Ausprägungen in die Berechnung der Update Delays eingehen (vgl. Abschnitt 4.4.3), treten im Falle einer negativen Differenz Update Delays auf, die sogar deutlich niedriger sind als die Erzeugungsverzögerung. Die Message Lifetime berücksichtigt Ende-zu-Ende-Verzögerungen und darin enthaltene CATs im Gegensatz zum Update Delay mit ihrem absoluten Wert und spiegelt diese somit auch nach einer Mittelwertbildung wider.

<sup>11</sup>Zur Definition von Update Delay und Message Lifetime siehe Abschnitt 4.4.2 und Abbildung 23.

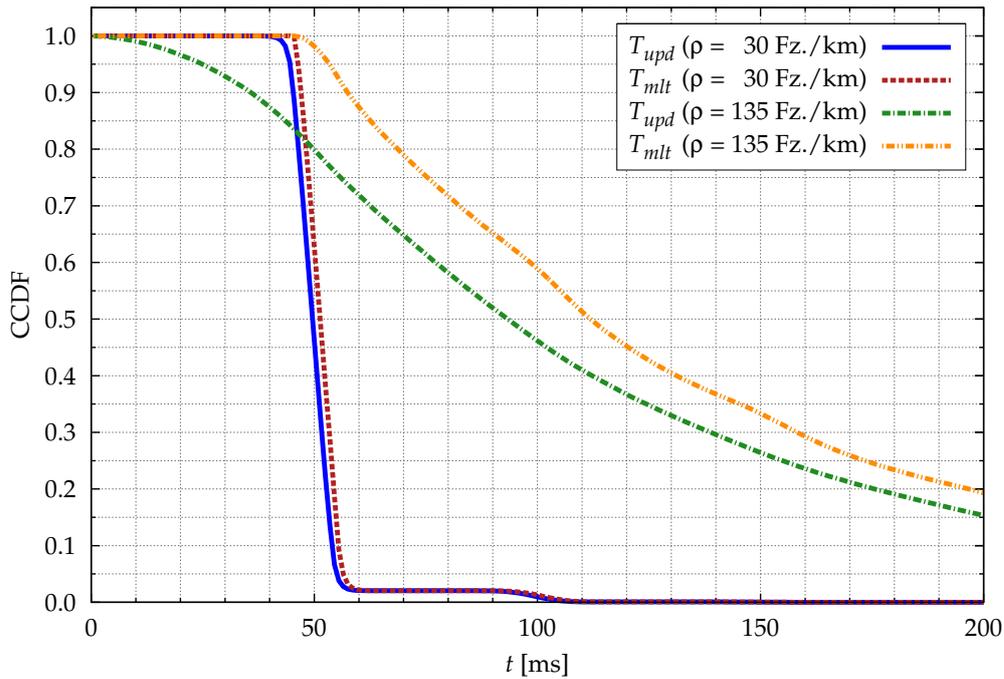


Abbildung 35: Komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF) von Update Delay ( $T_{upd}$ ) und Message Lifetime ( $T_{mlt}$ ) für die mittlere Entfernung  $d = 100$  m bei geringer ( $\rho = 30$  Fz./km) und hoher ( $\rho = 135$  Fz./km) Verkehrsdichte mit  $R_b = 6$  Mbps,  $P_t = 23$  dBm,  $f_g = 20$  Nachrichten/s,  $CW = 15$ .

Da die beim Medienzugriff auftretenden Channel Access Times die Aktualität der zur Verfügung stehenden Informationen und damit die Dienstgüte signifikant beeinflussen können, wird im Rahmen dieser Arbeit bevorzugt die Message Lifetime zur Leistungsbewertung genutzt. Die Message Lifetime quantifiziert aus der Perspektive eines Empfängers das erreichte Alter der lokal verfügbaren Statusinformationen über eine bestimmte Station in der Umgebung des Empfängers und kann daher aus Anwendungssicht als durch das Kommunikationsnetz induzierte Verzögerung interpretiert werden. Bei Verwendung dieser Metrik finden sämtliche bisher untersuchten Aspekte der Leistungsfähigkeit von VANETs in einem einzelnen skalaren Wert Berücksichtigung.

In Abbildung 36 ist die mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für Nachrichtenerzeugungsraten zwischen  $f_g = 2$  Frames/s und  $f_g = 20$  Frames/s sowie Verkehrsdichten zwischen  $\rho = 30$  Fz./km und  $\rho = 135$  Fz./km veranschaulicht. Die Darstellung offenbart erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme der Message Lifetime mit wachsender Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger, hervorgerufen durch eine mit wachsender Entfernung abnehmende Packet Delivery Rate (vgl. Abbildungen 31 und 32).

Darüber hinaus ist ebenfalls zu erkennen, dass eine Erhöhung der Verkehrsdichte insbesondere im Falle hoher Nachrichtenerzeugungsraten aufgrund steigender Kollisionswahrscheinlichkeiten und Channel Access Times eine signifikante Zunahme der Message Lifetime zur Folge hat. Während für eine

*Mittlere Message Lifetime in Abhängigkeit von Erzeugungsrate und Verkehrsdichte*

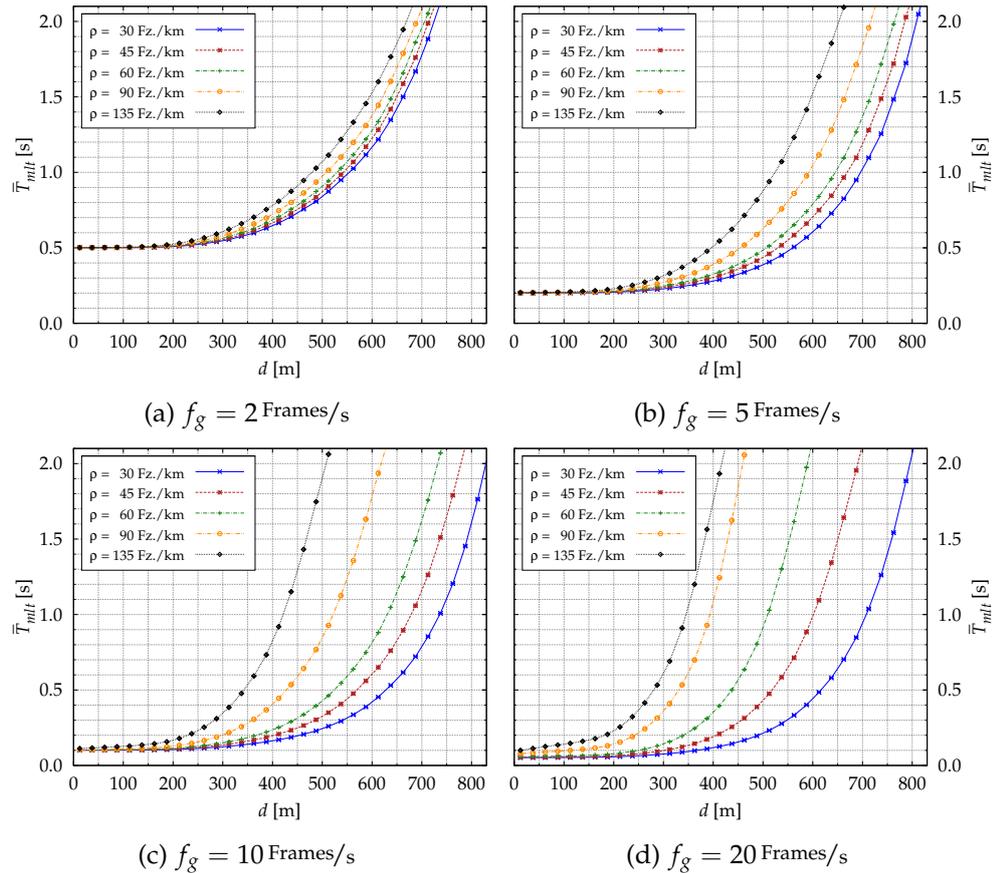


Abbildung 36: Arithmetisches Mittel der Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  für verschiedene Erzeugungsraten ( $f_g$ ) und Verkehrsdichten ( $\rho$ ) mit  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ .

Entfernung  $d = 350 \text{ m}$  und  $f_g = 10 \text{ Frames/s}$  die mittlere Verzögerung zwischen Erzeugung und Aktualisierung der verfügbaren Statusinformation bei einer Verkehrsdichte von  $\rho = 30 \text{ Fz./km}$  nur ca.  $141 \text{ ms}$  beträgt, steigt dieser Wert für  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  c. p. auf ca.  $535 \text{ ms}$ .

Im Hinblick auf eine Variation der Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g$  ist hingegen eine differenziertere Betrachtung notwendig. Zwar folgt für sehr geringe Entfernungen  $d$  aus einer Erhöhung von  $f_g$  grundsätzlich eine Verringerung der Message Lifetime und daher eine Erhöhung der Dienstgüte, für größere Entfernungen sind die Auswirkungen jedoch abhängig von der Netzlast: Während bei geringer Netzlast durch Erhöhung von  $f_g$  wegen der damit einhergehenden Verringerung der Erzeugungsverzögerung eine Verbesserung der Dienstgüte erzielt werden kann, wird dieser Effekt bei hoher Netzlast durch erhöhte Kollisionswahrscheinlichkeiten und Channel Access Times überkompensiert, sodass sich eine Erhöhung der Message Lifetime ergibt. Die netzlastabhängigen Auswirkungen unterschiedlicher Nachrichtenerzeugungsrates werden daher in Abschnitt 5.5.2 näher untersucht.

### 5.3 MODELLIERUNGSASPEKTE

Die Aussagekraft der simulationsbasierten Leistungsbewertung von VANETs und die Validität der auf diesem Wege gewonnenen Ergebnisse hängen maßgeblich davon ab, ob und in welchem Maße das zugrunde liegende Simulationsmodell die für die Performanz des Netzes relevanten Randbedingungen und Charakteristika von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation realitätsnah abbildet.

Im Folgenden werden ausgewählte Modellierungsaspekte untersucht, die von besonderer Bedeutung für die im Fokus der vorliegenden Arbeit stehende Bewertung der Skalierbarkeit von VANETs sind, und ihr Einfluss auf die Simulationsergebnisse quantifiziert. In Abschnitt 5.3.1 werden zunächst die Auswirkungen der den Simulationen zugrunde gelegten Ausbreitungsmodellierung betrachtet, bevor in Abschnitt 5.3.2 auf die Effekte der Berücksichtigung von Physical Layer Capture innerhalb des Simulationsmodells eingegangen wird.

#### 5.3.1 Funkausbreitungseffekte: Pfadverlust und Fading

Einen elementaren Bestandteil simulationsgestützter Untersuchungen der Performanz drahtloser Kommunikation in VANETs bildet die realitätsnahe Modellierung des Funkkanals. Aus diesem Grund wurden in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 bereits die Grundlagen der Ausbreitungsmodellierung in Autobahnszenarien, die den Untersuchungsgegenstand der in diesem Kapitel vorgestellten Simulationsstudien bilden, skizziert. Im darauffolgenden Abschnitt 4.3.3 wurden darüber hinaus Ergebnisse einer Messkampagne vorgestellt, aus denen das in Abschnitt 4.3.4 zusammengefasste Ausbreitungsmodell für VANET-Autobahnszenarien abgeleitet werden konnte.

Somit steht ein empirisch validiertes Ausbreitungsmodell zur Verfügung, welches dem Simulationsmodell des in Abschnitt 5.1 beschriebenen Autobahnszenarios zugrunde gelegt wird, um eine realitätsnahe Leistungsbewertung durchführen zu können. Nicht bekannt ist hingegen, in welchem Maße die Ausbreitungsmodellierung aufgrund ihrer komplexen Auswirkungen auf Medienzugriffssteuerung, Interferenzen und Kollisionen die Ergebnisse der simulationsgestützten Leistungsbewertung in VANETs beeinflusst.

Im Zentrum des Interesses steht deshalb im Folgenden die Frage, wie sensitiv die zur Leistungsbewertung herangezogenen Performanzmetriken auf eine Variation des verwendeten Ausbreitungsmodells reagieren. Eine Beantwortung dieser Frage erlaubt zugleich Rückschlüsse auf die notwendige Sorgfalt bei der Ausbreitungsmodellierung in Simulationsstudien zur Skalierbarkeit von VANETs, wie sie einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bilden. Während alle bisher gezeigten Simulationsergebnisse auf dem durch Feldtests validierten Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien (siehe Abschnitt 4.3.4) basieren, dem ein Dual-Slope Pfadverlustmodell nach Gl. 4.20 in Verbindung mit Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität nach Gl. 4.32 zugrunde liegt, werden in diesem Abschnitt daher die Auswirkungen einer hiervon abweichenden Ausbreitungsmodellierung untersucht [143].

Einfluss des  
Pfadverlustmodells  
im interferenzfreien  
Fall

Abbildung 37 zeigt zunächst anhand der Empfangsleistung (links) und der Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall (rechts) einen Vergleich des empirisch validierten und für die Zwecke dieser Arbeit verwendeten Dual-Slope Pfadverlustmodells mit den in zuvor veröffentlichten VANET-Simulationsstudien am weitesten verbreiteten Pfadverlustmodellen (vgl. hierzu bereits Abschnitt 4.3.1): Herangezogen werden zu diesem Zweck das vereinfachte Two-Ray Ground Modell (siehe z. B. in [2, 110, 139, 140, 141, 170, 185]) und das Log-Distance Pfadverlustmodell (siehe z. B. in [32] mit  $\alpha = 2,15$ , in [95] mit  $\alpha = 2,25$  sowie in [72] mit  $\alpha = 2,31$ ). Zur Nachbildung des Signalfadings wurde in allen vier Fällen Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität nach Gl. 4.32 verwendet.

Signifikante Differenzen der aus den verschiedenen Pfadverlustmodellen resultierenden Empfangsleistungen offenbart Abbildung 37a. Damit verbunden sind deutlich voneinander abweichende mittlere Kommunikationsreichweiten, ablesbar am jeweiligen Punkt des Unterschreitens der Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th}$ .

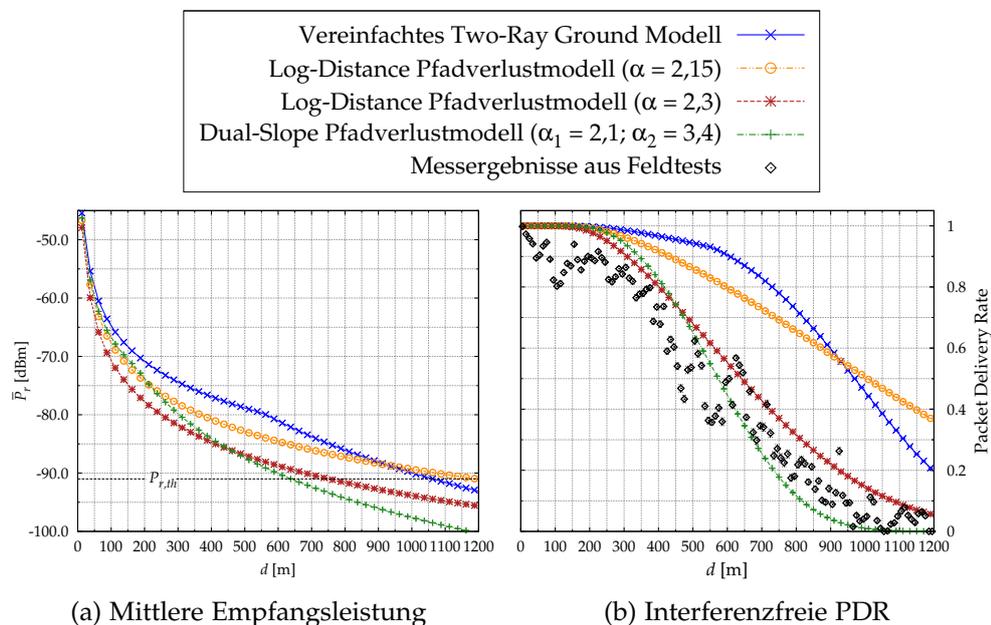


Abbildung 37: Mittlere Empfangsleistung und Kommunikationsreichweite (links) sowie interferenzfreie Packet Delivery Rate (rechts) für verschiedene Pfadverlustmodelle bei Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität ( $m = m(d)$ ) und  $P_t = 23$  dBm,  $R_b = 6$  Mbps ( $P_{r,th} = -91$  dBm).

Wie bereits in Abschnitt 4.3.3.2 erläutert wurde, führt die Verwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells nach Gl. 4.16 mit einer in der Realität nicht beobachtbaren Crossover Distance  $d_c \approx 556$  m zu einer deutlichen Überschätzung der Empfangsleistung insbesondere für mittlere und große Entfernungen und damit zu einer unrealistisch hohen Einschätzung der erzielbaren Kommunikationsreichweite im interferenzfreien Fall. Letzteres gilt in ähnlichem Maße für das Log-Distance Pfadverlustmodell mit  $\alpha = 2,15$ ; für  $\alpha = 2,3$  hingegen wird die erzielbare Kommunikationsreichweite nur geringfügig überschätzt.

Um die Voraussetzungen für eine belastbare und aussagekräftige Nachbildung der Auswirkungen auftretender Interferenzen zu schaffen, ist allerdings eine möglichst realistische Abbildung der Empfangsleistung sowohl in geringer als auch in großer Entfernung notwendig. Diesbezüglich zeigen die drei Vergleichsmodelle im Nah- und/oder Fernbereich jedoch signifikante Abweichungen vom empirisch validierten Dual-Slope Pfadverlustmodell.

Abbildung 37b zeigt einen Vergleich der aus den verschiedenen Pfadverlustmodellen resultierenden Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall, die der empirischen Wahrscheinlichkeit  $P(P_r \geq P_{r,th})$  entspricht, mit den Ergebnissen der in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Autobahn-Feldtests, welche ebenfalls unter interferenzfreien Bedingungen gewonnen wurden.

Auch hier lassen sich erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen erkennen. Das Dual-Slope Pfadverlustmodell, welches dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ausbreitungsmodell für Autobahnscenarien zugrunde liegt, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den empirisch ermittelten Ergebnissen. Auch das Log-Distance Modell mit  $\alpha = 2,3$  liefert eine akzeptable Näherung der PDR im interferenzfreien Fall. Sowohl das vereinfachte Two-Ray Ground Modell als auch das Log-Distance Modell mit  $\alpha = 2,15$  führen jedoch zu einer erheblichen Überschätzung der interferenzfreien PDR und damit der erreichbaren Kommunikationsreichweite.

Bei nicht vernachlässigbarer Netzlast wird die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs hingegen erheblich durch Interferenzen beeinflusst, wie bereits die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Ergebnisse erkennen lassen. Von besonderem Interesse ist daher die Gewinnung von Erkenntnissen über die komplexen Wechselwirkungen zwischen Ausbreitungsmodellierung, Interferenzniveau und Performanz der Kommunikation. Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Skalierbarkeitsaspekten kommt diesem Aspekt naturgemäß besondere Bedeutung zu.

Insbesondere ist in diesem Zusammenhang die Frage von Interesse, in welchem Maße die oben skizzierten Eigenschaften der verwendeten Pfadverlustmodelle die Simulationsergebnisse bei Berücksichtigung von Interferenzen beeinflussen. Abbildung 38 zeigt zur Beantwortung dieser Frage die Auswirkungen der Pfadverlustmodellierung anhand der Packet Delivery Rate im interferenzbehafteten Fall für verschiedene Verkehrsdichten, einhergehend mit unterschiedlicher Netzlast. Gegenstand des Vergleichs sind auch hier das vereinfachte Two-Ray Ground Modell sowie das Log-Distance Pfadverlustmodell mit  $\alpha = 2,15$  und  $\alpha = 2,3$  bei Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität.

Die Ergebnisse offenbaren überaus deutlich den substanziellen Einfluss des verwendeten Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate und damit auf eine elementare Metrik der Leistungsbewertung in VANETs. So führt beispielsweise die Anwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells bei geringer Netzlast (siehe Abbildung 38a) zu einer unrealistisch hohen Packet Delivery Rate, deren absolute Abweichung von den Ergebnissen des Dual-Slope Pfadverlustmodells für Autobahnscenarien bis zu 41 % ( $d = 630$  m) beträgt. Das Log-Distance Pfadverlustmodell hingegen führt insbesondere bei

*Einfluss des  
Pfadverlustmodells  
bei  
Berücksichtigung  
von Interferenzen*

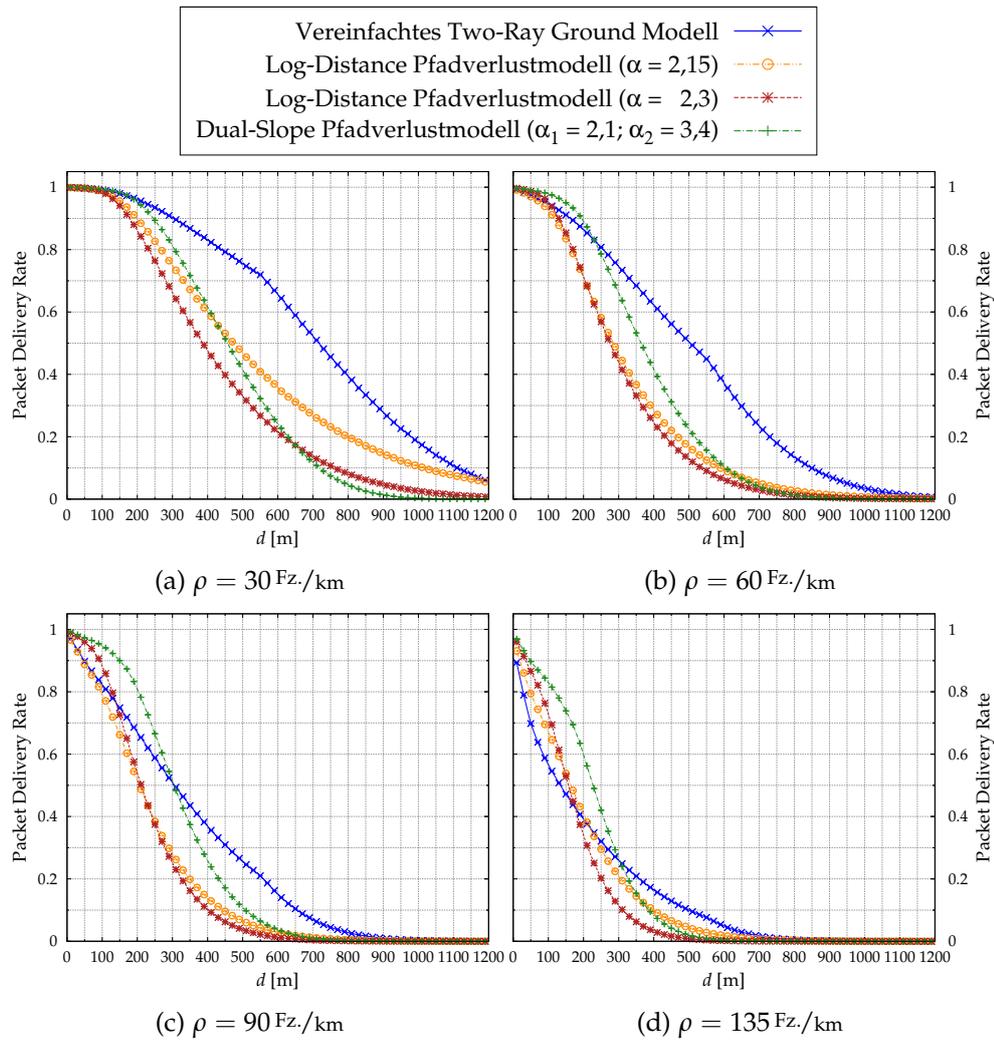


Abbildung 38: Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  bei distanzabhängiger Fading-Intensität ( $m = m(d)$ ) und  $f_g = 10 \text{ Frames/s}$ ,  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ .

mittlerer bis hoher Netzlast (siehe Abbildungen 38b, 38c und 38d) zu einer signifikanten Unterschätzung der erzielbaren Packet Delivery Rate.

Zur näheren Interpretation der Ergebnisse ist eine Unterscheidung zwischen *pfadverlust-* und *interferenzlimitiertem Zustand* des Netzes zweckmäßig. Bei sehr geringer Netzlast, wie sie im Falle der hier gezeigten Konfiguration mit  $f_g = 10 \text{ Frames/s}$  und  $P_t = 23 \text{ dBm}$  für die geringste Verkehrsdichte  $\rho = 30 \text{ Fz./km}$  vorliegt, kann allgemein von einem pfadverlustlimitierten Netz ausgegangen werden. Limitierender Faktor für einen erfolgreichen Frameempfang ist hier im Wesentlichen die Empfangsleistung, sodass ein geringerer Pfadverlust grundsätzlich mit einer höheren Packet Delivery Rate verbunden ist. Während das vereinfachte Two-Ray Ground Modell die Empfangsleistung unabhängig von der Entfernung überschätzt, führt die Verwendung des Log-Distance Pfadverlustmodell mit  $\alpha = 2,15$  zu einer Überschätzung für mittlere und große Entfernungen, für  $\alpha = 2,3$  hingegen zu einer Unter-

*Pfadverlust- und  
interferenzlimitierter  
Netzzustand*

schätzung für geringe und zu einer Überschätzung für hohe Entfernungen (siehe Abbildung 37a). In einem pfadverlustbegrenzten Netz lassen sich diese modellabhängigen Eigenschaften der Empfangsleistung direkt auf den distanzbezogenen Verlauf der Packet Delivery Rate übertragen, wie deutlich aus Abbildung 38a hervorgeht.

Bei höherer Netzlast hingegen nimmt der Einfluss von Interferenzen zu, sodass insbesondere für kleine Entfernungen  $d$  zwischen Sender und Empfänger, die mit geringem Pfadverlust verbunden sind, von einem interferenzlimitierten Netz ausgegangen werden kann. Eine generelle Überschätzung der Empfangsleistung durch das Pfadverlustmodell geht mit einer Überschätzung auftretender Interferenzen einher und führt daher für kleine Entfernungen  $d$  zu einer Unterschätzung der Packet Delivery Rate, wie beispielsweise der Vergleich von vereinfachtem Two-Ray Ground Modell und Dual-Slope Modell in den Abbildungen 38c und 38d verdeutlicht. Mit zunehmender Entfernung wächst jedoch auch bei hoher Netzlast der Einfluss der Pfadverlustlimitierung, sodass für große Entfernungen auch hier eine höhere Empfangsleistung eine höhere Packet Delivery Rate bewirkt.

Diese signifikanten und grundsätzlichen Unterschiede zwischen den verwendeten Ausbreitungsmodellen im Hinblick auf die resultierende Packet Delivery Rate bestehen nicht nur für den Fall des distanzabhängigen Fading-Parameters  $m$ , sondern unabhängig von der Modellierung der Fading-Intensität, wie im Anhang der Arbeit beispielhaft für Nakagami-Fading mittlerer Intensität ( $m = 3$ ) gezeigt wird (siehe Abschnitt A.1, Abbildung 84).

Weitere Einblicke in den Einfluss der Pfadverlustmodellierung auf die Performanz des Netzes erlaubt eine Betrachtung der aus der Anwendung der verschiedenen Modelle resultierenden Kollisionsrate. Auch hier ergeben sich überaus deutliche Unterschiede, wie Abbildung 39 anhand der bereits in Abbildung 38 gezeigten Konfigurationen veranschaulicht.

Im Vergleich zum empirisch validierten Dual-Slope Pfadverlustmodell führt eine Anwendung der Vergleichsmodelle in fast allen Fällen zu einer deutlichen Überschätzung der Auswirkungen von Interferenzen und der daraus resultierenden Kollisionsrate. Deutlich wird auch in diesem Zusammenhang, dass ein geringerer Pfadverlust zwar mit einer höheren Empfangsleistung, jedoch auch mit einem höheren Interferenzniveau verbunden ist, wie beispielsweise die hohen Kollisionsraten im Falle des Log-Distance Pfadverlustmodells mit  $\alpha = 2,15$  zeigen.

Durch den Carrier-Sense-Mechanismus ergeben sich komplexe Auswirkungen des Pfadverlustes und seiner Intensität auf die Entstehung von Kollisionen. Während Hidden Stations bereits bei geringer und mittlerer Netzlast erheblichen Einfluss auf die Kollisionsrate haben, wächst der Einfluss von CSMA-Kollisionen<sup>12</sup> erst mit zunehmender Netzlast. Da CSMA-Kollisionen grundsätzlich bei geringerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger auftreten können als Hidden-Station-Kollisionen, nimmt insbesondere für geringere Entfernungen die Kollisionsrate mit steigender Verkehrsdichte und Netzlast zu.

<sup>12</sup>Zur Definition von Kollisionsrate, CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen siehe Abschnitt 4.4.1.

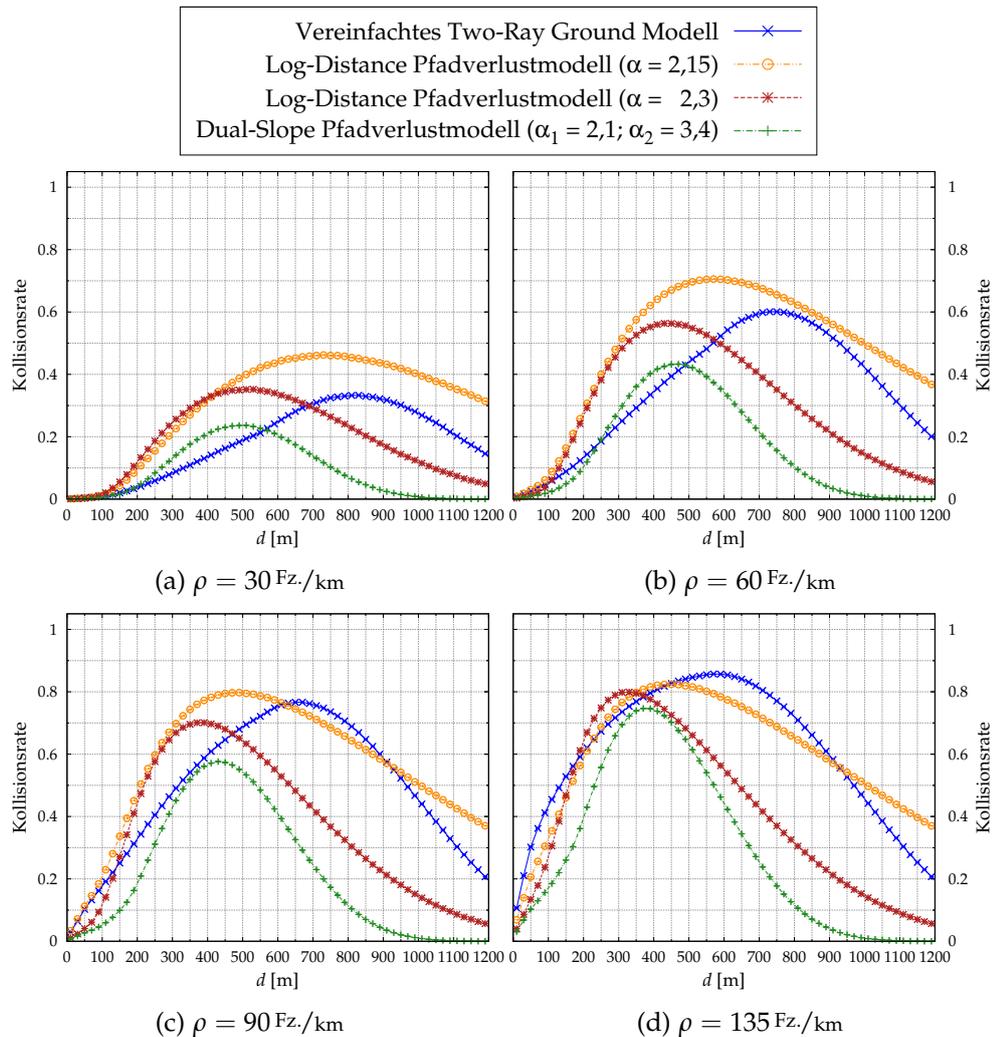


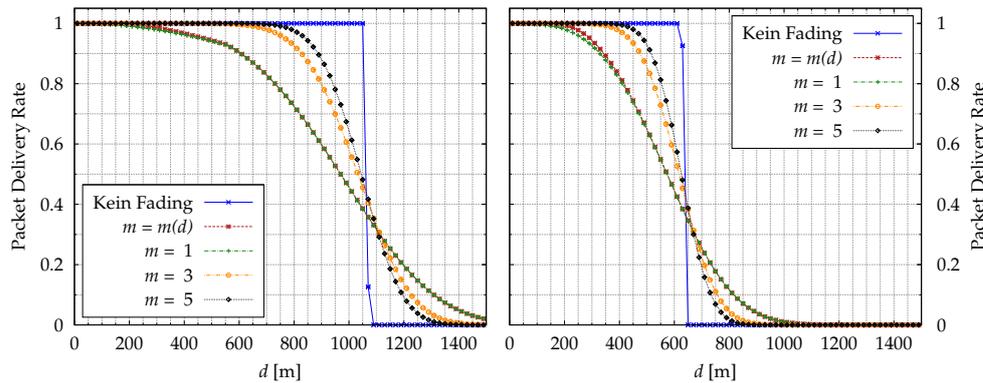
Abbildung 39: Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Kollisionsrate für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  bei distanzabhängiger Fading-Intensität ( $m = m(d)$ ) und  $f_g = 10 \text{ Frames/s}$ ,  $P_t = 23 \text{ dBm}$ ,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ .

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein überaus deutlicher Einfluss der Pfadverlustmodellierung auf die Qualität der Simulationsergebnisse besteht, der gerade bei der Untersuchung netzlastabhängiger Skalierbarkeitsaspekte berücksichtigt werden muss. Eine sorgfältige und hinreichend realitätsnahe Modellierung des distanzabhängigen Pfadverlustes in VANETs ist für Simulationsstudien in diesem Zusammenhang daher von besonderer Bedeutung.

Neben den Auswirkungen des Pfadverlustes stellt der Einfluss der Fading-Intensität auf die Dienstgüte des VANETs einen weiteren interessanten Aspekt dar, auf den an dieser Stelle eingegangen werden soll. Abbildung 40 veranschaulicht bei Nakagami-Fading unterschiedlicher Intensität die Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall unter Verwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells (siehe Abbildung 40a) und des Dual-Slope Pfad-

*Einfluss der Fading-Intensität im interferenzfreien Fall*

verlustmodells (siehe Abbildung 40b) für eine Sendeleistung von 23 dBm und eine Datenrate von 6 Mbps.



(a) Vereinfachtes Two-Ray Ground Modell (b) Dual-Slope Pfadverlustmodell

Abbildung 40: Auswirkungen der Fading-Intensität auf die Packet Delivery Rate im interferenzfreien Fall für verschiedene Pfadverlustmodelle bei  $P_t = 23$  dBm,  $R_b = 6$  Mbps ( $P_{r,th} = -91$  dBm).

Erfolgt keine Modellierung von Fading, ergibt sich ein deterministisches Ausbreitungsmodell in Verbindung mit einer deterministischen Kommunikationsreichweite, die im Falle des vereinfachten Two-Ray Ground Modells etwa 1063 m beträgt und somit die unter realen Bedingungen auf Autobahnen erzielbare Reichweite deutlich übersteigt (vgl. Abschnitt 4.3.3). Bei Anwendung des Dual-Slope Modells ergibt sich hingegen lediglich eine deterministische Kommunikationsreichweite von etwa 638 m.

Die Fading-Intensität wird quantifiziert durch den Parameter  $m$ , wobei  $m = 5$  der geringsten und  $m = 1$  der höchsten Intensität (Rayleigh-Fading) entspricht (vgl. Abschnitt 4.3.2). Mit zunehmender Fading-Intensität ergibt sich ein flacherer Verlauf der interferenzfreien Empfangswahrscheinlichkeit, d. h. starkes Fading der Empfangsleistung führt einerseits zu einer Zunahme von Frameverlusten in geringer Distanz, andererseits jedoch auch zu einer erhöhten Empfangswahrscheinlichkeit für Entfernungen, die größer sind als die deterministische Kommunikationsreichweite.

Ebenfalls dargestellt ist der Fall des distanzabhängigen Fading-Parameters  $m(d) = 2,7 \cdot e^{-0,01(d-1,0)} + 1,0$  aus Gl. 4.32, welcher dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien zugrunde liegt. Der Verlauf der interferenzfreien PDR für  $m = m(d)$  folgt weitgehend dem Rayleigh-Fading entsprechenden Verlauf für  $m = 1$ . Gleichwohl bestehen erhebliche Unterschiede zwischen beiden Modellierungsansätzen, die bei Berücksichtigung von Interferenzen deutlich werden. Dies gilt insbesondere für kleine Entfernungen zwischen Sender bzw. interferierender Station und Empfänger, da hier bei einer Modellierung mit  $m = m(d)$  signifikant geringere Fading-Intensitäten als im Fall von Rayleigh-Fading ( $m = 1$ ) auftreten.

Um eine nähere Beurteilung der Auswirkungen der Fading-Intensität in VANETs zu ermöglichen, ist insbesondere im Zusammenhang mit Skalierbarkeitsbetrachtungen eine Untersuchung des Netzes im interferenzbehafteten Fall notwendig. Abbildung 41 zeigt die simulationsbasiert ermittelte Packet

*Einfluss der Fading-Intensität bei Berücksichtigung von Interferenzen*

Delivery Rate für verschiedene Fading-Intensitäten in Verbindung mit dem Dual-Slope Pfadverlustmodell bei unterschiedlicher Verkehrsdichte. Die Darstellung offenbart, dass der Einfluss der Fading-Intensität auf die Packet Delivery Rate von der Verkehrsdichte und somit von der gegebenen Netzlast abhängt.

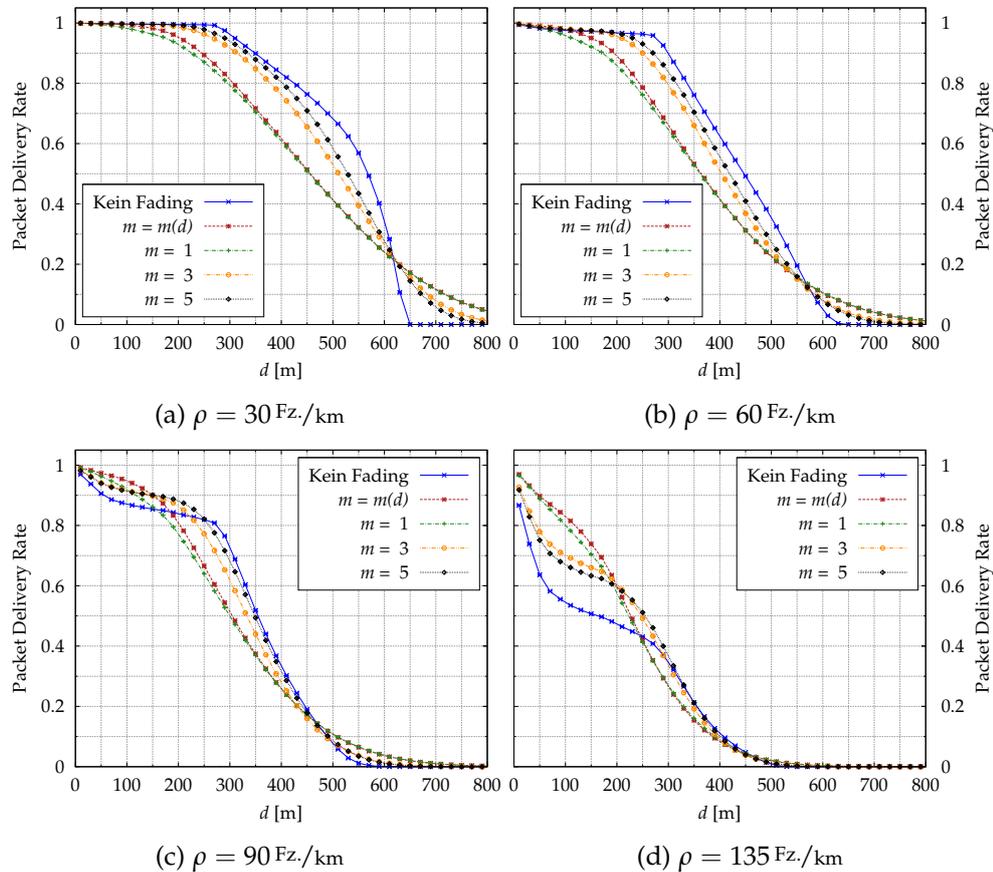


Abbildung 41: Auswirkungen der Fading-Intensität auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  im Dual-Slope Pfadverlustmodell mit  $f_g = 10$  Frames/s,  $P_t = 23$  dBm,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6$  Mbps.

Bei der in Abbildung 41a dargestellten Verkehrsdichte von  $\rho = 30$  Fz./km, welche mit sehr geringer Netzlast verbunden ist, nimmt die Packet Delivery Rate verglichen mit dem in Abbildung 40b gezeigten interferenzfreien Fall aufgrund auftretender Kollisionen zwar bereits in geringerer Entfernung ab, qualitativ bleibt der Verlauf der Kurvenschar aber vergleichbar mit dem interferenzfreien Fall.

Mit zunehmender Netzlast kehrt sich der Einfluss der Fading-Intensität jedoch allmählich um, sodass sich bei hoher Netzlast, welche im Falle der höchsten an dieser Stelle untersuchten Verkehrsdichte von  $\rho = 135$  Fz./km vorherrscht, ein sehr interessanter Effekt offenbart (siehe Abbildung 41d): Für geringe und mittlere Distanzen zwischen Sender und Empfänger resultiert aus einer höheren Fading-Intensität in diesem Fall eine deutlich höhere Packet Delivery Rate – bei hoher Netzlast *erhöht* Fading demnach signifikant die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Nahbereich.

*Erhöhung der Packet Delivery Rate im Nahbereich bei hoher Netzlast durch Fading und Physical Layer Capture*

Dieser Effekt lässt sich im Zusammenhang mit dem in Abschnitt 4.5.2.4 erläuterten Physical Layer Capture (PLC) erklären, bei dessen Anwendung ein Frame höherer Empfangsleistung trotz Vorhandensein eines interferierenden Frames geringerer Empfangsleistung erfolgreich empfangen werden kann, wenn die Differenz zwischen beiden Leistungen den SINR-Schwellenwert übersteigt. Mit zunehmender Fading-Intensität steigt die Varianz der Empfangsleistung, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit größerer Differenzen zwischen den Empfangsleistungen der zeitlich überlappenden Frames und damit die Erfolgswahrscheinlichkeit des Physical Layer Captures erhöht.

Bei Nichtvorhandensein von Fading zeigt sich darüber hinaus besonders deutlich der Einfluss von Hidden Stations und der damit zusammenhängenden robusten Entfernung gegenüber Hidden Stations. Für die hier gezeigten Simulationskonfigurationen kann analytisch aus Gl. 3.7 (siehe Abschnitt 3.1.2, Seite 56) unter Verwendung des Dual-Slope Pfadverlustmodells eine robuste Entfernung gegenüber Hidden Stations von  $d_{robHS} = 257,5\text{m}$  errechnet werden. Ein Überschreiten dieser Entfernung ist verbunden mit einer erheblich beschleunigten Abnahme der Packet Delivery Rate im Distanzverlauf. Da ohne Fading die Packet Delivery Rate in geringerer Entfernung nur durch CSMA-Kollisionen herabgesetzt wird, lässt sich insbesondere aus den Abbildungen 41a und 41b erkennen, dass den Auswirkungen von CSMA-Kollisionen gegenüber jenen von Hidden-Station-Kollisionen nur eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Modellierung von Pfadverlust und Fading in VANET-Simulationsstudien maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Simulationsergebnisse besitzt, der sich auch und gerade bei Berücksichtigung von Interferenzen in signifikanten Unterschieden der ermittelten Dienstgüte niederschlägt. Eine realitätsnahe Ausbreitungsmodellierung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit mit dem empirisch validierten Ausbreitungsmodell für Autobahnscenarien angewendet wird, stellt somit eine unverzichtbare Grundlage der simulationsbasierten Untersuchung von Skalierbarkeitsaspekten in VANETs dar.

*Robuste Entfernung  
gegenüber Hidden  
Stations*

### 5.3.2 Physical Layer Capture

Als Physical Layer Capture (PLC) wird, wie bereits in Abschnitt 4.5.2.4 auf Seite 127 erläutert wurde, der Effekt bezeichnet, dass im Falle einer zeitlichen Überlappung mehrerer Frames unabhängig von deren Ankunftsreihenfolge der Frame mit der höchsten Empfangsleistung unter der Voraussetzung eines ausreichend hohen SINR erfolgreich decodiert werden kann, indem sich der Empfänger ggf. auf eine später beginnende Frameübertragung resynchronisiert.

Da heute gebräuchliche IEEE 802.11 Empfänger in der Regel von PLC Gebrauch machen, liegt es nahe, dieses Verhalten bei der Modellierung des Frameempfangs zu berücksichtigen, um eine realitätsnahe Leistungsbewertung zu ermöglichen. Gleichwohl beinhalten viele Simulationsmodelle, darunter die Implementierung des INETMANET-Frameworks, welche der in Abschnitt 4.5 vorgestellten Simulationsumgebung als Ausgangsbasis diente,

keine Modellierung von PLC, sondern bewerten im Falle eines bereits begonnenen Decodiervorgangs jede später beginnende Frameübertragung als Interferenz.

Bewertung der  
Auswirkungen von  
Physical Layer  
Capture

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Frage, in welchem Maße die Modellierung von PLC die simulationsgestützte Leistungsbeurteilung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs und die dabei gewonnenen Ergebnisse beeinflusst. Diese Fragestellung bildet den Untersuchungsgegenstand dieses Abschnitts.

Abbildung 42 veranschaulicht die Auswirkungen von PLC auf die Performance des Netzes anhand eines Vergleichs der distanzabhängigen PDR, welche jeweils aus Simulationskonfigurationen mit und ohne Berücksichtigung von PLC für verschiedene Sendeleistungen bei unterschiedlicher Verkehrsdichte ermittelt wurde.

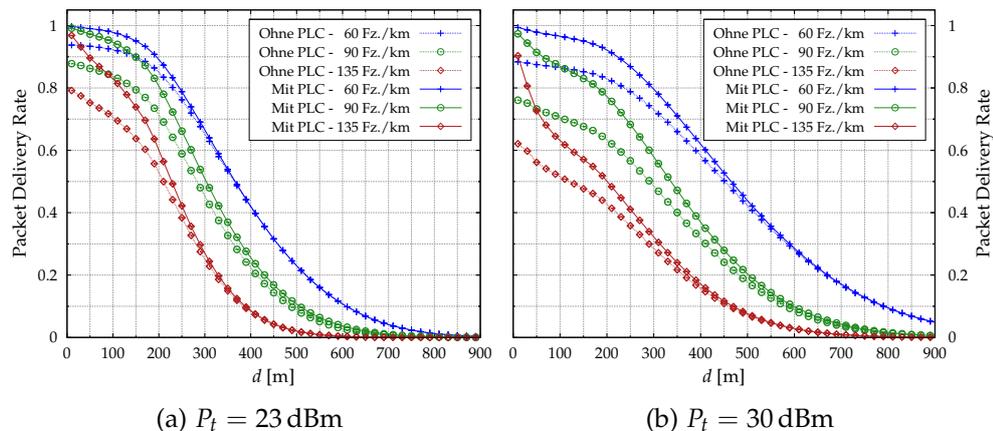


Abbildung 42: Auswirkungen von Physical Layer Capture (PLC) auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Verkehrsdichten und  $f_g = 10$  Frames/s,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6$  Mbps ( $SIR_{th} = 9$  dB).

Erhöhung der  
Packet Delivery Rate  
im Nahbereich durch  
Physical Layer  
Capture

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Berücksichtigung von PLC insbesondere für kleine Entfernungen  $d$  zwischen Sender und Empfänger eine deutliche Erhöhung der PDR zur Folge hat. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass, sofern kein Gebrauch von PLC gemacht wird, im Falle eines bereits begonnenen Decodiervorgangs jede später beginnende Übertragung unabhängig von ihrer Empfangsleistung Opfer einer Kollision wird. Aus geringer Entfernung übertragene Frames sind im Regelfall mit einer hohen Empfangsleistung verbunden, sodass grundsätzlich eine hohe Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten des SINR-Schwellenwerts  $SIR_{th}$  besteht. Dies erlaubt bei Verwendung von PLC eine Resynchronisierung des Empfängers auf die später begonnene Übertragung und damit einen erfolgreichen Frameempfang (vgl. Abschnitt 4.5.2.4). Aus größerer Entfernung übertragene Frames bieten hingegen vergleichsweise selten eine ausreichend hohe Empfangsleistung, wie sie im Falle eines bereits begonnenen Decodiervorgangs für eine Resynchronisierung auf die später begonnene Übertragung erforderlich ist. Somit profitieren insbesondere Stationen aus dem Nahbereich um dem Empfänger von der durch PLC hervorgerufenen Erhöhung der Zuverlässigkeit der Frameübertragung.

Ein Vergleich der verschiedenen in Abbildung 42 dargestellten Konfigurationen offenbart außerdem, dass der Grad der durch PLC erzielbaren Erhöhung der PDR sowohl mit der für die Frameübertragung verwendeten Sendeleistung als auch mit der gegebenen Verkehrsdichte wächst. So ist im absoluten Nahbereich ( $d = 10\text{ m}$ ) für die geringere untersuchte Sendeleistung  $P_t = 23\text{ dBm}$  (siehe Abbildung 42a) bei einer Verkehrsdichte von  $\rho = 60\text{ Fz./km}$  eine absolute Erhöhung der PDR um ca. 6 %, bei dichtem Verkehr mit  $\rho = 135\text{ Fz./km}$  um ca. 18 % möglich. Für  $P_t = 30\text{ dBm}$  (siehe Abbildung 42b) und  $\rho = 135\text{ Fz./km}$  geht die Verwendung von PLC sogar mit einer absoluten Erhöhung der PDR um mehr als 28 % einher.

Je höher demnach die Auslastung des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums und damit das Interferenzniveau innerhalb des Netzes ist, desto höher ist die durch die Verwendung von PLC erzielbare, an einer Erhöhung der PDR gemessene Verbesserung der Zuverlässigkeit der Frameübermittlung.

Zur weiteren Verdeutlichung sind in Abbildung 43 die Auswirkungen von PLC auf die Anzahl von CSMA-Kollisionen, durch Hidden Stations verursachte Kollisionen sowie die Gesamt-Kollisionsrate für die Sendeleistung  $P_t = 30\text{ dBm}$  und die Verkehrsdichte  $\rho = 90\text{ Fz./km}$  gezeigt. Die Darstellung lässt erkennen, dass durch die Verwendung von PLC die Häufigkeit von CSMA-Kollisionen insbesondere für Frameübertragungen aus dem Nahbereich signifikant reduziert wird. Von einer deutlich verringerten Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen profitieren zudem auch Übertragungen aus größerer Entfernung. Im Ergebnis lässt sich somit durch PLC die Gesamt-Kollisionsrate deutlich reduzieren.

*Grad der erzielbaren PDR-Erhö-  
hung wächst mit  
zunehmendem  
Interferenzniveau*

*Reduzierte  
Häufigkeit von  
CSMA- und  
Hidden-Station-  
Kollisionen durch  
PLC*

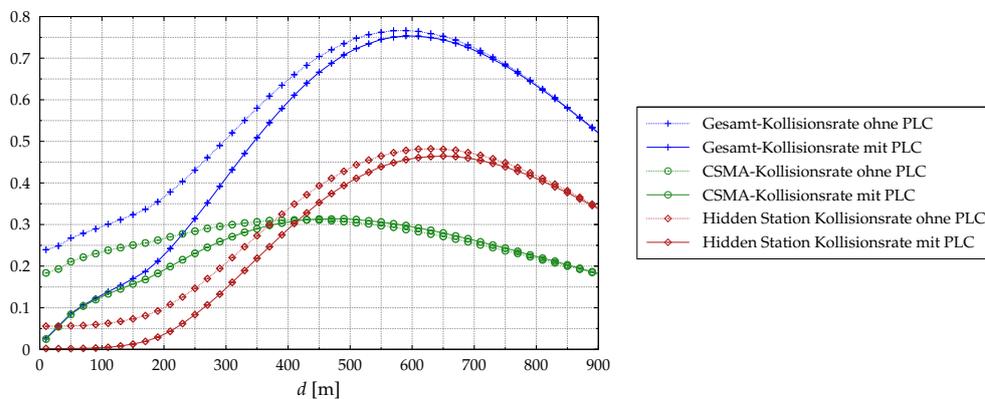


Abbildung 43: Auswirkungen von Physical Layer Capture (PLC) auf die Anzahl von CSMA-Kollisionen, durch Hidden Stations verursachte Kollisionen und die Gesamt-Kollisionsrate für  $\rho = 90\text{ Fz./km}$ ,  $P_t = 30\text{ dBm}$ ,  $f_g = 10\text{ Frames/s}$ ,  $CW = 15$  und  $R_b = 6\text{ Mbps}$  ( $SIR_{th} = 9\text{ dB}$ ).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verwendung von Physical Layer Capture (PLC) für geringe und mittlere Entfernungen zwischen Sender und Empfänger insbesondere bei erhöhtem Interferenzniveau in erheblichem Maße die Kollisionswahrscheinlichkeit verringert und damit die Zuverlässigkeit der Frameübermittlung erhöht. Ohne Berücksichtigung von PLC durch das Simulationsmodell wird somit die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs gerade innerhalb des für kooperative

*Notwendigkeit der  
Modellierung von  
PLC in  
Simulationsstudien*

Sicherheitsanwendungen besonders relevanten Nahbereichs signifikant unterschätzt. Für die Gewinnung realitätsnaher Ergebnisse im Rahmen der simulationsgestützten Leistungsbewertung ist eine Modellierung von PLC daher unverzichtbar.

#### 5.4 QUANTIFIZIERUNG DER NETZAUSLASTUNG

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse lassen erkennen, dass die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit der Kommunikation in VANETs von einer Vielzahl von Parametern abhängen. Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Konfigurationen zu ermöglichen, sind Metriken wünschenswert, welche die mit einer bestimmten Parameterkombination zusammenhängende Netzlast quantifizieren und zugleich unmittelbare Rückschlüsse auf die Dienstgüte des Netzes zulassen.

In diesem Abschnitt wird daher untersucht, ob und in welchem Maße sich die Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$ , die Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  sowie die Channel Busy Time  $\gamma$ , welche als Metriken zur Quantifizierung der Netzlast<sup>13</sup> bereits in Abschnitt 4.4 vorgestellt wurden, für diesen Zweck eignen.

Die als  $\rho_{com} = 2 \cdot d_{cs} \cdot f_g \cdot \rho$  definierte Kommunikationsdichte beschreibt die mittlere Anzahl erzeugter Frames pro Zeiteinheit, deren Empfangsleistung theoretisch durch den Carrier-Sense-Mechanismus einer Station des VANETs detektierbar wäre, und quantifiziert für eine gegebene Framelänge daher auf intuitive und präzise Weise die im Netz erzeugte Last.

Um die Auswirkungen der Kommunikationsdichte auf die Dienstgüte des Netzes bewerten zu können, werden zunächst verschiedene Simulationskonfigurationen untersucht, die sich zwar in mindestens einem der Parameter Sendeleistung  $P_t$ , Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  oder Verkehrsdichte  $\rho$  voneinander unterscheiden, gleichzeitig jedoch eine übereinstimmende Kommunikationsdichte aufweisen. Den drei verwendeten Sendeleistungen  $P_t$  in Höhe von 9,9 dBm, 20,1 dBm und 30,3 dBm entsprechen dabei in Verbindung mit dem zugrunde gelegten Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien<sup>14</sup> (mittlere) Carrier-Sense-Reichweiten  $d_{cs}$  von ca. 300 m, 600 m bzw. 1200 m.

Abbildung 44 zeigt die von der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger abhängige Packet Delivery Rate (PDR), welche aus diesen verschiedenen Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte resultiert, für zwei ausgewählte Kommunikationsdichten  $\rho_{com} = 720 \text{ Frames/s}$  (Abbildung 44a) und  $\rho_{com} = 1440 \text{ Frames/s}$  (Abbildung 44b).

Ein Vergleich der Abbildungen 44a und 44b lässt zunächst erwartungsgemäß erkennen, dass bei gleicher Sendeleistung  $P_t$  eine Erhöhung der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  als Ausdruck einer erhöhten Auslastung des Netzes mit einer Verringerung der PDR und damit der Zuverlässigkeit der Frameübermittlung einhergeht.

Darüber hinaus zeigen die dargestellten Ergebnisse deutlich, dass die Sendeleistung auch bei gleicher Kommunikationsdichte maßgeblich die erzielbare PDR und damit die Zuverlässigkeit des Netzes bestimmt. So bewirkt

<sup>13</sup>Zur Definition dieser Metriken siehe Gl. 4.42, Gl. 4.43 und Gl. 4.45 in Abschnitt 4.4.

<sup>14</sup>Zur Parametrierung des Ausbreitungsmodells siehe Tabelle 7 in Abschnitt 4.3.4.

*Metriken zur  
Quantifizierung der  
Netzlast*

*Konfigurationen mit  
übereinstimmender  
Kommunikations-  
dichte*

*Auswirkungen auf  
die PDR*

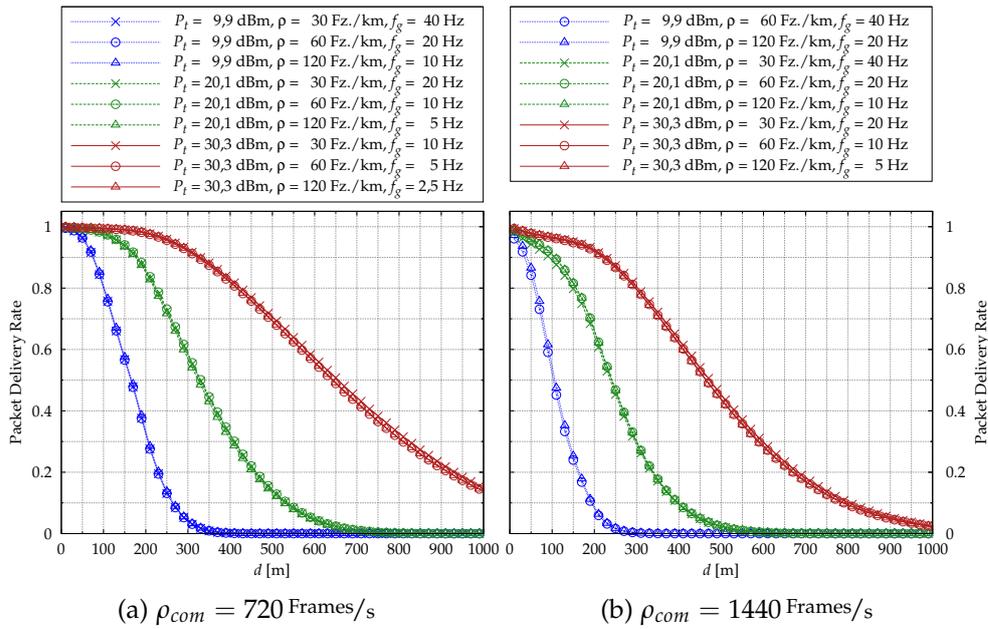


Abbildung 44: Distanzverlauf der Packet Delivery Rate (PDR) für verschiedene Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  mit  $R_b = 6$  Mbps,  $CW = 15$ . Die Sendeleistung  $P_t$  bestimmt bei gleicher Kommunikationsdichte maßgeblich die PDR, bei gleicher Kommunikationsdichte und Sendeleistung ergeben sich identische PDRs.

z. B. bei unveränderter Kommunikationsdichte  $\rho_{com} = 1440$  Frames/s eine Erhöhung der Sendeleistung von 20,1 dBm auf 30,3 dBm für  $d = 250$  m eine relative Erhöhung der PDR um ca. 86 %, da gleichzeitig eine Halbierung der Nachrichtenerzeugungsdichte<sup>15</sup>  $\rho_g = f_g \cdot \rho$  eintritt. Stimmen hingegen sowohl die Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  als auch die Sendeleistung  $P_t$  überein, liegen mithin auch gleiche Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  vor, so ergeben sich identische PDRs. Die Simulationsergebnisse bestätigen insoweit die Erkenntnisse von Jiang et al. [86].

Einen genaueren Einblick in die Zusammenhänge zwischen der gegebenen Kommunikationsdichte und der Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs erlaubt eine Auswertung der Message Lifetime  $T_{mlt}$ . Abbildung 45 zeigt für dieselben ausgewählten Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte die jeweils resultierende mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger.

*Auswirkungen auf  
die Message Lifetime*

Während die obigen Ausführungen zu den Auswirkungen von Kommunikationsdichte und Sendeleistung weitgehend auf die an der Message Lifetime gemessene Dienstgüte des Netzes übertragbar sind, lässt sich eine Übereinstimmung der gewonnenen Ergebnisse hier auch bei gleicher Sendeleistung und Kommunikations- bzw. Nachrichtenerzeugungsdichte nicht feststellen. Vielmehr verdeutlicht die Darstellung den Einfluss der Erzeugungsverzögerung, welche im Wesentlichen durch die Nachrichtenerzeugungsrate be-

<sup>15</sup>Zur Definition der Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  (kurz auch als Erzeugungsdichte bezeichnet) siehe bereits Gl. 4.42 in Abschnitt 4.4.4.

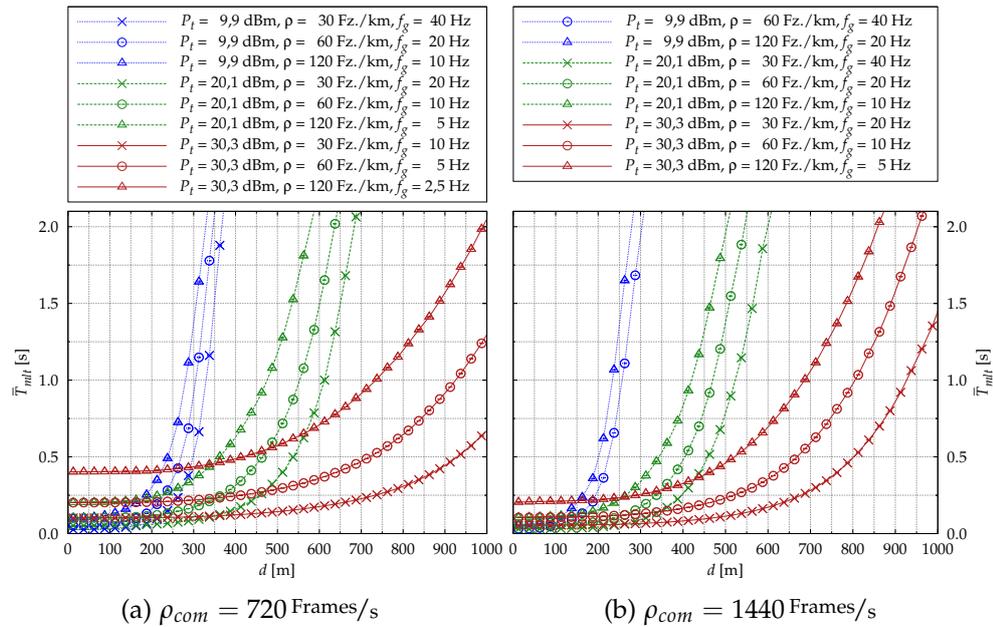


Abbildung 45: Mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  für verschiedene Simulationskonfigurationen gleicher Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  mit  $R_b = 6 \text{ Mbps}$ ,  $CW = 15$ .

stimmt wird, auf die Message Lifetime.<sup>16</sup> Je höher bei gegebener Kommunikationsdichte und Sendeleistung die Nachrichtenerzeugungsraten gewählt werden, desto geringer ist naturgemäß die Nachrichtenerzeugungsverzögerung, sodass die Message Lifetime verringert und damit die Aktualität und Zuverlässigkeit der zur Verfügung stehenden Statusinformationen erhöht werden kann.

Festhalten lässt sich demnach zunächst, dass die Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  zwar intuitiv und präzise die erzeugte Netzlast quantifiziert, jedoch selbst bei bekannter Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsdichte nicht ohne Weiteres zuverlässige Rückschlüsse auf die resultierende Dienstgüte des VANETs zulässt.

Tabelle 18 zeigt für die bereits in Abschnitt 5.2 verwendete Auswahl von Ausprägungen der Parameter Nachrichtenerzeugungsraten  $f_g$ , Verkehrsdichte  $\rho$  und Sendeleistung  $P_t$  die als  $\rho_{com} = 2 \cdot d_{cs} \cdot f_g \cdot \rho$  berechnete Kommunikationsdichte. Den Sendeleistungen 20 dBm, 23 dBm und 30 dBm entsprechen dabei die auf Basis des Dual-Slope Pfadverlustmodells für Autobahnen (siehe Tabelle 7) errechneten Carrier-Sense-Reichweiten  $d_{cs}$  von 596,3 m, 731,1 m und 1173,7 m.

In der Realität ist die innerhalb des VANETs gegebene Kommunikationsdichte für eine einzelne Station selbst bei als bekannt angenommenen Ausbreitungsbedingungen nicht auf direktem Wege messbar (vgl. hierzu bereits Abschnitt 4.4.4, Seite 111). Gleichwohl ist es insbesondere für die Entwicklung effektiver, dezentral organisierter Überlaststeuerungsverfahren erstrebenswert, dass die Stationen über eine möglichst präzise Kenntnis der gegebenen Netzlast verfügen. Von besonderem Interesse ist daher die Frage, ob

<sup>16</sup>Zur Definition der Nachrichtenerzeugungsverzögerung siehe Gl. 4.36 in Abschnitt 4.4.2.

*Kommunikationsdichte allein erlaubt keine Schätzung der Dienstgüte*

$f_g$ [Frames/s]	$P_t$ [dBm]	$\rho_{com}$ [Frames/s]				
		$\rho = 30 \frac{Fz}{km}$	$\rho = 45 \frac{Fz}{km}$	$\rho = 60 \frac{Fz}{km}$	$\rho = 90 \frac{Fz}{km}$	$\rho = 135 \frac{Fz}{km}$
2	20	71,6	107,3	143,1	214,7	322,0
2	23	87,7	131,6	175,5	263,2	394,8
2	30	140,8	211,3	281,7	422,5	633,8
5	20	178,9	268,3	357,8	536,6	805,0
5	23	219,3	329,0	438,7	658,0	987,0
5	30	352,1	528,2	704,2	1056,3	1584,5
10	20	357,8	536,6	715,5	1073,3	1609,9
10	23	438,7	658,0	877,3	1316,0	1974,0
10	30	704,2	1056,3	1408,4	2112,6	3169,0
20	20	715,5	1073,3	1431,0	2146,5	3219,8
20	23	877,3	1316,0	1754,6	2631,9	3947,9
20	30	1408,4	2112,6	2816,9	4225,3	6337,9

Tabelle 18: Kommunikationsdichte für verschiedene Simulationskonfigurationen.

und mit welchen Einschränkungen sich die Kommunikationsdichte aus der lokal messbaren Channel Busy Time (CBT) ableiten lässt.

Zur Beantwortung dieser Frage stellt Abbildung 46 für sämtliche Parameterkonfigurationen nach Tabelle 18 die aus den Simulationen ermittelte Channel Busy Time in Abhängigkeit der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  dar. Gezeigt ist zum einen die auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogene CBT  $\gamma_{cs}$  (Abbildung 46a), zum anderen die auf den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85$  dBm bezogene CBT  $\gamma_{def}$  (Abbildung 46b).

Zusammenhang  
zwischen CBT und  
Kommunikations-  
dichte

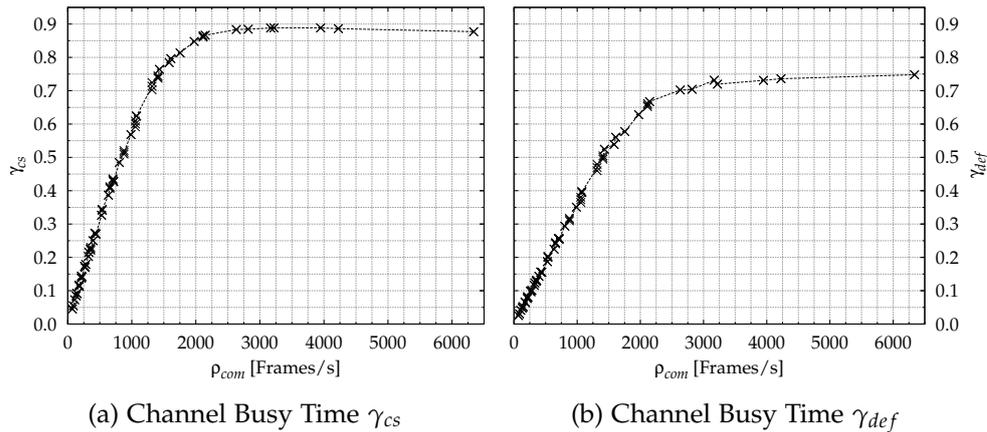


Abbildung 46: Mittlere auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm und den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85$  dBm bezogene Channel Busy Times  $\gamma_{cs}$  (a) und  $\gamma_{def}$  (b) in Abhängigkeit der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  für die Simulationskonfigurationen nach Tabelle 18 mit  $R_b = 6$  Mbps,  $CW = 15$ .

Die Darstellung offenbart, dass in beiden Fällen die CBT bei hoher Netzlast asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der abhängig von dem der Metrik jeweils zugrunde gelegten Schwellenwert ist und hier näherungsweise  $\gamma_{cs,max} \approx 0,89$  bzw.  $\gamma_{def,max} \approx 0,75$  beträgt.

*Asymptotisches Verhalten der CBT*

Dieses asymptotische Verhalten wird im wesentlichen durch zwei charakteristische Eigenschaften des Medienzugriffs von ETSI ITS-G5 und IEEE 802.11 hervorgerufen: Zum einen wächst mit steigender Netzlast die Wahrscheinlichkeit für eine zeitliche Überlappung zweier oder mehrerer Frameübertragungen. Eine solche Überlappung wirkt sich aus der Perspektive des Empfängers nicht auf die CBT aus, sofern der Schwellenwert für ihre Berechnung bereits durch die Empfangsleistung einer einzelnen Übertragung überschritten wird. Zum anderen erhöht sich mit steigender Netzlast die Wahrscheinlichkeit, dass Frames vom Sender wegen eines dauerhaft belegten Übertragungsmediums vor Übertragungsbeginn verworfen werden (Frame Drops), wie bereits in Abschnitt 5.2 gezeigt wurde.<sup>17</sup> Bei sehr hoher Netzlast kann das Auftreten von Frame Drops daher zu einer Entlastung des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums beitragen.

Darüber hinaus wird aus Abbildung 46b bei genauerem Hinsehen erkennbar, dass die Monotonie des von der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  abhängigen Verlaufs der Channel Busy Time  $\gamma_{def}$  bei  $\rho_{com} \approx 1300 \text{ Frames/s}$  kurz unterbrochen wird. Auch diese Beobachtung lässt sich bei Betrachtung von Tabelle 18 und Abbildung 33 in Abschnitt 5.2 mit der sprunghaft zunehmenden Häufigkeit von Frame Drops erklären, die mit der Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrates von  $f_g = 10 \text{ Frames/s}$  auf  $f_g = 20 \text{ Frames/s}$  an dieser Stelle einhergeht und eine Entlastung des Übertragungsmediums bewirkt.

*Strenge Monotonie im relevanten Zielbereich erlaubt Ableitung der Kommunikationsdichte aus der CBT*

Wegen des in Abbildung 46 gezeigten asymptotischen Verhaltens der CBT ist es bei sehr hoher Netzlast nicht ohne Weiteres möglich, den Wert der Kommunikationsdichte oder der Nachrichtenerzeugungsdichte mithilfe einer lokalen Messung der CBT zu ermitteln. Wie allerdings bereits die Simulationsergebnisse der vorangegangenen Abschnitte zeigen und der weitere Verlauf dieses Kapitels noch bestätigen wird, erfordert die Erzielung einer akzeptablen Dienstgüte bei periodischer Broadcast-Kommunikation unter den gegebenen Rahmenbedingungen von ETSI ITS-G5 zumindest eine Begrenzung der Netzlast auf  $\rho_{com} < 2000 \text{ Frames/s}$ . In diesem Bereich gemäßigter Netzlast können sowohl  $\gamma_{def}$  als auch  $\gamma_{cs}$  als streng monoton mit der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  wachsend angesehen werden, wobei sich für  $\gamma_{def}$  sogar ein näherungsweise linearer Verlauf ergibt (siehe Abbildung 46). Eine Bestimmung der CBT erlaubt in diesem Bereich daher unmittelbare Rückschlüsse auf die Kommunikationsdichte. Die gezeigten Simulationsergebnisse bestätigen insoweit die Ergebnisse von Tielert et al. [165].

In dem für Verfahren zur Vermeidung und Bewältigung von Überlastsituationen (Congestion Control) relevanten Zielbereich gemäßigter Kommunikationsdichte kann die gegebene Netzlast somit zumindest approximativ durch eine dezentral organisierte, lokale Messung der Channel Busy Time bestimmt werden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird daher neben der

<sup>17</sup>Zum Auftreten von Frame Drops in den hier betrachteten Simulationskonfigurationen siehe bereits Seite 150 des Abschnitts 5.2.

Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  und der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  auch die Channel Busy Time  $\gamma$  zur Quantifizierung der Netzlast herangezogen.

Darüber hinaus ist eine Anwendung kooperativer Methoden zur Quantifizierung der Auslastung des Netzes möglich. Derartige Methoden sind zwar mit größerem Implementierungsaufwand und zusätzlichem Signalisierungs-overhead verbunden, lassen jedoch zugleich präzisere Ergebnisse erwarten. Eine einfache Möglichkeit stellt in diesem Zusammenhang etwa die Nutzung der für kooperative Anwendungen in VANETs von sämtlichen Stationen vorgehaltenen Nachbarschaftstabellen dar: Stellt jede Station mit den periodisch erzeugten CAMs neben Informationen zu Position und Bewegungszustand des Fahrzeugs auch ihre aktuell verwendete Nachrichtenerzeugungsrate zur Verfügung, so kann aus den Nachbarschaftstabellen die Anzahl der in einem Streckenabschnitt definierter Länge pro Zeiteinheit erzeugten Nachrichten, d. h. die Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$ , abgeleitet werden. Auf kooperative Methoden zur Quantifizierung der Netzlast wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht näher eingegangen.

*Kooperative Methoden zur Bestimmung der Netzauslastung*

## 5.5 VERMEIDUNG VON ÜBERLAST

Die in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels vorgestellten Ergebnisse offenbaren deutlich die mangelnde Skalierbarkeit periodischer Broadcast-Kommunikation sowie die damit verbundenen Herausforderungen für eine möglichst zuverlässige und verzögerungsarme Übermittlung sicherheitsrelevanter Nachrichten in VANETs auf Basis von ETSI ITS-G5.

Bei hoher Netzlast sind aus mehreren Gründen signifikante Beeinträchtigungen der Dienstgüte zu beobachten: Die durch zeitlich überlappende Übertragungen verschiedener Stationen verursachten Multi-User-Interferenzen rufen Framekollisionen hervor und reduzieren auf diese Weise maßgeblich die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung. Mit wachsender Netzlast führt die CSMA/CA-Medienzugriffsprozedur außerdem zu erhöhten Verzögerungen, aus denen wiederum das Auftreten von Frame Drops resultieren kann. Im Ergebnis kann es bei übermäßig hoher Netzlast dazu kommen, dass die Dienstgüte des Netzes, insbesondere im Hinblick auf die Aktualität der zur Verfügung stehenden Statusinformationen benachbarter Fahrzeuge, den Mindestanforderungen von ITS-Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit nicht mehr genügt.

*Beeinträchtigungen der Dienstgüte bei hoher Netzlast*

Sowohl in der Literatur als auch in den zuständigen europäischen Standardisierungsgremien herrscht daher weitestgehende Einigkeit darüber, dass auf Überlaststeuerungsverfahren zurückgegriffen werden muss, um die Netzlast zu begrenzen und Überlastsituationen zu vermeiden (vgl. hierzu Abschnitt 3.2). Kaum Einigkeit besteht jedoch über die zur Dienstgütoptimierung geeignete Parametrierung des Netzes, etwa bezüglich anzustrebender Netzlast-Sollwerte sowie geeigneter Konfigurationswerte von Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsrate. Keine hinreichend validierten Erkenntnisse liegen außerdem darüber vor, ob und inwieweit sich andere als die üblicherweise herangezogenen Konfigurationsparameter Sendeleistung und Nach-

*Überlaststeuerung und Parametrierung des Netzes*

richtenerzeugungsrate zur netzlastabhängigen Dienstgüteo-  
ptimierung und zur Überlaststeuerung eignen.

*Untersuchung  
netzlastabhängiger  
Auswirkungen  
konfigurierbarer  
Kommunikationspa-  
rameter*

Der verbleibende Teil dieses Kapitels widmet sich daher einer eingehenden Untersuchung der netzlastabhängigen Auswirkungen verschiedener konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Performanz des Netzes sowie ihres Potentials zur Überwindung der oben beschriebenen Skalierbarkeitsproblematik. Im Rahmen simulationsbasierter Parameterstudien werden zu diesem Zweck die Parameter Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate, Datenrate, Carrier-Sense-Schwellenwert und Größe des Contention Windows betrachtet. Die in diesem Rahmen gewonnenen Erkenntnisse dienen der Entwicklung, Parametrierung und Optimierung effektiver Methoden zur Vermeidung und Bewältigung übermäßig hoher Netzlast.

### 5.5.1 Sendeleistung

*Auswirkungen der  
Sendeleistung auf  
die Performanz des  
VANETs*

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der abgestrahlten Sendeleistung auf die Performanz des VANETs untersucht. Die Sendeleistung  $P_t$  bezieht sich dabei, wie für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen, auf die äquivalente isotrope Sendeleistung (EIRP) unter Annahme einer perfekten Rundstrahl-Antennencharakteristik.

Bei gegebenen Ausbreitungsbedingungen und gegebener Empfängerempfindlichkeit bestimmt die Sendeleistung unmittelbar die im interferenzfreien Fall erzielbare maximale Kommunikationsreichweite. Gleichzeitig wirkt sich die verwendete Sendeleistung jedoch maßgeblich auf das Interferenzniveau im Netz aus. Übersteigt das Interferenzniveau und damit die Häufigkeit von Framekollisionen ein tolerierbares Niveau, so liegt eine Überlastsituation vor. In diesem Fall erscheint es grundsätzlich zweckmäßig, durch eine Reduzierung der Sendeleistung eine Entlastung des Netzes und damit möglicherweise eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Frameübertragung herbeizuführen. Eine netzlastabhängige Anpassung der Sendeleistung wird daher im Allgemeinen als geeignetes Mittel für die Entwicklung von Mechanismen zur Überlaststeuerung angesehen (vgl. Abschnitt 3.1).

*Netzlastabhängige  
Anpassung der  
Sendeleistung*

Um eine effektive Anpassung der Sendeleistung an die gegebene Netzlast zu ermöglichen, ist die Beantwortung einer Reihe von Fragen notwendig:

- In welchem Umfang beeinflusst die Sendeleistung die erzielbare Kommunikationsreichweite, die Entstehung von Framekollisionen und damit die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs?
- Wie ist die Sendeleistung zu wählen, um eine möglichst hohe Zuverlässigkeit des Netzes zu erreichen und auf wie beeinflusst die gegebene Netzlast diese Entscheidung?
- Können durch eine Anpassung der Sendeleistung effektiv Überlastsituationen vermieden oder die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Überlastfall erhöht werden?

Diese Fragen werden im Folgenden für das in Abschnitt 5.1 vorgestellte Autobahnscenario anhand einer Parameterstudie untersucht, deren zugrun-

de liegende Simulationskonfiguration Tabelle 19 zusammenfasst. Grundlage aller Untersuchungen ist auch hier, soweit nicht anders gekennzeichnet, das in Abschnitt 4.3.4 beschriebene Ausbreitungsmodell für Autobahnscenarien auf Basis des Dual-Slope Pfadverlustmodells.

Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes
MAC-Framelänge	474 Bytes
$R_b$	6 Mbps
$P_{r,cs}$	-93 dBm
CW	15
Post-Backoff	deaktiviert
$\rho$	{30, 60, 90, 135} Fz./km
$f_g$	{10, 20} Nachrichten/s
$P_t$	{13, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 30} dBm

Tabelle 19: Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Sendeleistung  $P_t$ .

Abbildung 47 zeigt für verschiedene Sendeleistungen  $P_t$  die simulationsbasiert ermittelte Packet Delivery Rate (PDR) im interferenzfreien Fall in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger. Die PDR im interferenzfreien Fall stellt bei gegebenen Ausbreitungsbedingungen und gegebener Empfängerempfindlichkeit eine theoretisch erreichbare Obergrenze der PDR dar, da sie lediglich den Anteil von Frames quantifiziert, deren Empfangsleistung mindestens der Empfängerempfindlichkeit entspricht. Framekollisionen werden dabei nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.4.1).

*Auswirkungen auf die PDR im interferenzfreien Fall*

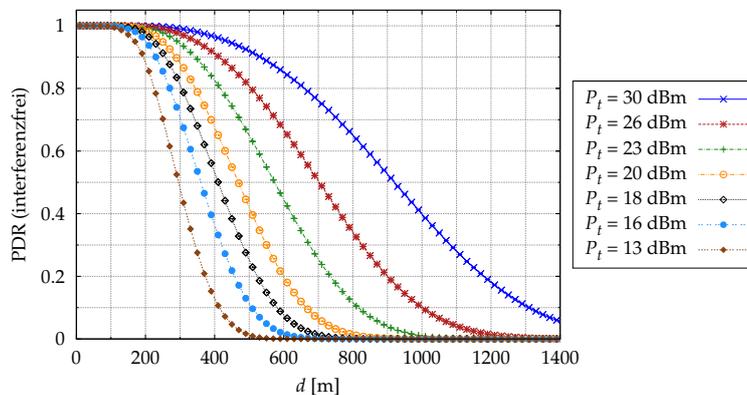


Abbildung 47: PDR im interferenzfreien Fall in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Sendeleistungen  $P_t$ .

Folgerichtig lassen die Simulationsergebnisse deutlich erkennen, dass im interferenzfreien Fall eine Erhöhung der Sendeleistung ohne Einschränkungen eine Erhöhung der Kommunikationsreichweite bewirkt, da diese Maßnahme die Wahrscheinlichkeit durch Pfadverlust und Fading verursachter Frameverluste reduziert.

Auswirkungen auf  
die Häufigkeit von  
Frame Drops

Gleichzeitig verursacht eine Erhöhung der Sendeleistung jedoch eine Zunahme der im Netz auftretenden Interferenzen. Bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte führt eine zu hohe Sendeleistung sogar zu Frame Drops in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit, wie Abbildung 48 anhand verschiedener Verkehrsdichten  $\rho$  und Erzeugungsraten  $f_g$  veranschaulicht. Für  $f_g = 10$  Nachrichten/s treten Frame Drops im Rahmen des untersuchten Parameterraums nur für die höchste untersuchte Verkehrsdichte  $\rho = 135$  Fz./km und erst ab einer Sendeleistung von  $P_t = 28$  dBm auf (siehe Abbildung 48a). Dies entspricht einer Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  von  $2768$  Frames/s bei einer Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km-s.

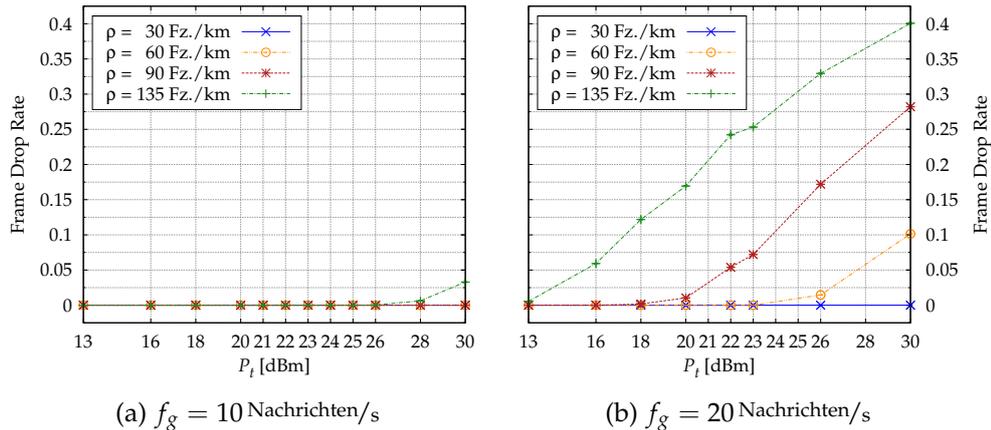


Abbildung 48: Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  und Erzeugungsraten  $f_g$  bei Nachrichtenerzeugungsdichten  $300$  Nachrichten/km-s  $\leq \rho_g \leq 2700$  Nachrichten/km-s.

Eine Erhöhung der Erzeugungsrates auf  $f_g = 20$  Nachrichten/s bewirkt eine deutliche Zunahme der Häufigkeit von Frame Drops, außerdem werden Frames bereits bei geringerer Verkehrsdichte und Sendeleistung verworfen (siehe Abbildung 48b). Feststellbar ist ein Auftreten von Frame Drops hier zudem bereits ab einer Kommunikationsdichte von etwa  $2000$  Frames/s. Wegen der stark erhöhten Häufigkeit von Frame Drops für  $f_g = 20$  Nachrichten/s auch im Falle vergleichsweise geringer Verkehrsdichten und Sendeleistungen werden diese Konfigurationen im Folgenden nicht näher betrachtet, sondern die Untersuchung der Sendeleistung konzentriert sich auf die Standard-Erzeugungsrates  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Auswirkungen auf  
Channel Access  
Time und Channel  
Busy Time

Verursacht wird die beobachtete Entstehung von Frame Drops durch ein deutliches Anwachsen der Netzlast mit steigender Sendeleistung. Dies veranschaulicht Abbildung 49b anhand der auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogenen Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$ , welche der empirischen Wahrscheinlichkeit entspricht, dass der Carrier-Sense-Mechanismus einer Station zu einem zufälligen Betrachtungszeitpunkt ein belegtes Übertragungsmedium vorfindet. Dieser Effekt ist intuitiv nachvollziehbar, denn mit steigender Sendeleistung wächst die Carrier-Sense-Reichweite und damit die Anzahl sendender Stationen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite an.

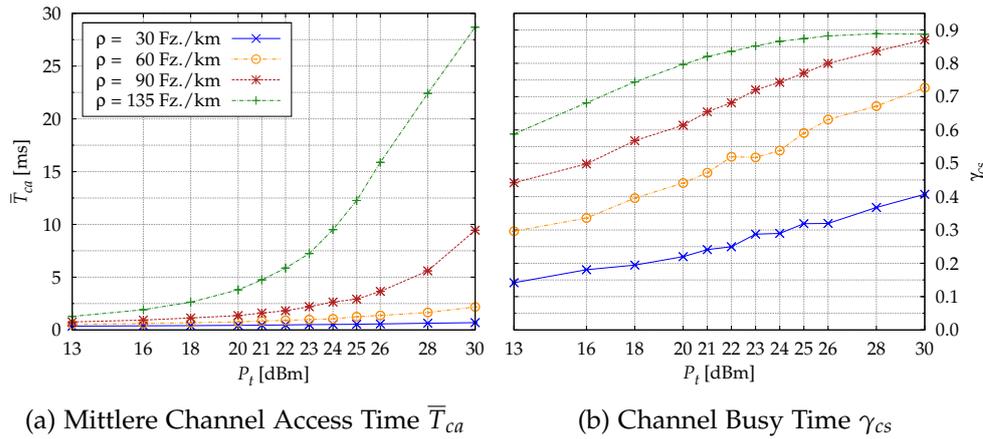


Abbildung 49: Arithmetisches Mittel der Channel Access Time  $\bar{T}_{ca}$  (a) und auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogene Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  (b) in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $300 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

Da gemäß den Regeln des CSMA/CA-Medienzugriffsverfahrens jede Station im Vorfeld eines Medienzugriffs ihr Backoff-Intervall nur im Falle eines als frei erkannten Übertragungsmediums dekrementiert, führt eine Erhöhung der Sendeleistung neben einem Anwachsen der Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  zu einem deutlichen Anstieg der Channel Access Time (CAT). Diesen Zusammenhang veranschaulicht Abbildung 49a anhand des arithmetischen Mittels  $\bar{T}_{ca}$  der CAT, welches mit steigender Sendeleistung signifikant anwächst.

Zur Beurteilung des Einflusses der Sendeleistung auf die Zuverlässigkeit der Frameübertragung ist eine Betrachtung der PDR unter Berücksichtigung von Interferenzen zweckmäßig. Abbildung 50 zeigt die PDR in Abhängigkeit der Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger für  $f_g = 10$  Nachrichten/s und verschiedene Sendeleistungen  $P_t$  bei niedriger und hoher Verkehrsdichte.

Bei geringer Netzlast, wie sie im Falle der in Abbildung 50a gezeigten Konfigurationen für die geringste untersuchte Verkehrsdichte  $\rho = 30$  Fz./km mit einer Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km·s gegeben ist, liegt allgemein ein pfadverlustbegrenztes Netz vor. Limitierender Faktor für einen erfolgreichen Frameempfang ist hier im Wesentlichen die Empfangsleistung, sodass eine höhere Sendeleistung innerhalb des untersuchten Parameterraums grundsätzlich mit einer höheren PDR verbunden ist.

Bei höherer Netzlast hingegen, wie sie im Falle der in Abbildung 50b gezeigten Konfigurationen mit der höchsten untersuchten Verkehrsdichte  $\rho = 135$  Fz./km und  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s vorliegt, nimmt der Einfluss von Interferenzen zu. Hier kann insbesondere für Übertragungen aus geringer Entfernung, die mit geringem Pfadverlust verbunden sind, ein interferenzlimitierter Zustand des Netzes angenommen werden. Eine Erhöhung der Sendeleistung verursacht eine Zunahme von Interferenzen und führt daher unter diesen Bedingungen für geringe Entfernungen  $d$  zu einer erhöhten Kollisionshäufigkeit und einer Abnahme der Packet Delivery Rate.

*Auswirkungen auf die PDR*

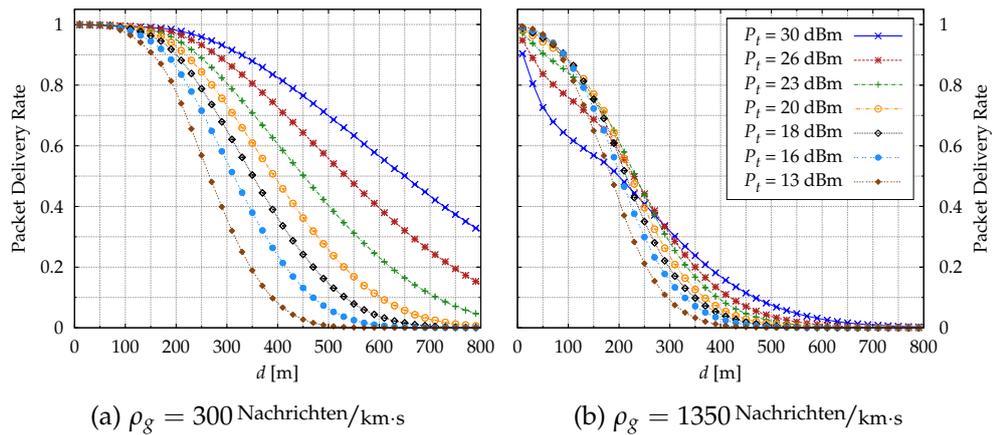


Abbildung 50: Mittlere Packet Delivery Rate (PDR) in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Sendeleistungen  $P_t$  bei geringer (a) und hoher (b) Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Demzufolge hat eine Reduzierung der Sendeleistung eine zuverlässigere Frameübertragung im Nahbereich zur Folge: So bewirkt beispielsweise eine Reduzierung der Sendeleistung von 30 dBm auf 20 dBm, die mit einer Verringerung der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  von  $3169 \text{ Frames/s}$  auf  $1610 \text{ Frames/s}$  verbunden ist, für  $d = 100 \text{ m}$  eine absolute Erhöhung der PDR um 25 %. Mit zunehmender Entfernung wächst jedoch auch bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte der Einfluss der Pfadverlustlimitierung, sodass eine Reduzierung der Sendeleistung gleichzeitig mit einer Verringerung der PDR für größere Entfernungen einhergeht.

Zur weiteren Verdeutlichung der durch eine Variation der Sendeleistung herbeiführten Effekte dient eine Gegenüberstellung von PDR, PDR im interferenzfreien Fall und Kollisionsrate in Verbindung mit einer Unterscheidung zwischen durch Hidden Stations verursachten Kollisionen einerseits und CSMA-Kollisionen, die durch annähernd gleichzeitigen Übertragungsbeginn hervorgerufen werden, andererseits. Abbildung 51 zeigt diese Performanzmetriken im Distanzverlauf bei einer hohen Nachrichtenerzeugungsdichte von  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  für die höchste (a) und geringste (b) untersuchte Sendeleistung.

Abbildung 51a veranschaulicht den Fall eines aufgrund einer Kombination von hoher Sendeleistung ( $P_t = 30 \text{ dBm}$ ) und hoher Nachrichtenerzeugungsdichte deutlich überlasteten Netzes bei sehr hoher Kommunikationsdichte  $\rho_{com} = 3169 \text{ Frames/s}$ . Die Darstellung offenbart zunächst, dass unter diesen Bedingungen sowohl CSMA- als auch Hidden-Station-Kollisionen in großer Häufigkeit auftreten. Die daraus resultierende, inakzeptabel hohe Gesamtkollisionsrate zeigt in Verbindung mit einer hohen PDR im interferenzfreien Fall die Interferenzlimitierung des Netzes für geringe und mittlere Distanzen auf.

Darüber hinaus wird in dieser Darstellung deutlich, dass CSMA-Kollisionen bereits bei erheblich geringerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger auftreten können als Hidden-Station-Kollisionen. Diese Beobachtung

Zusammenhänge  
zwischen  
Sendeleistung,  
Framekollisionen  
und PDR

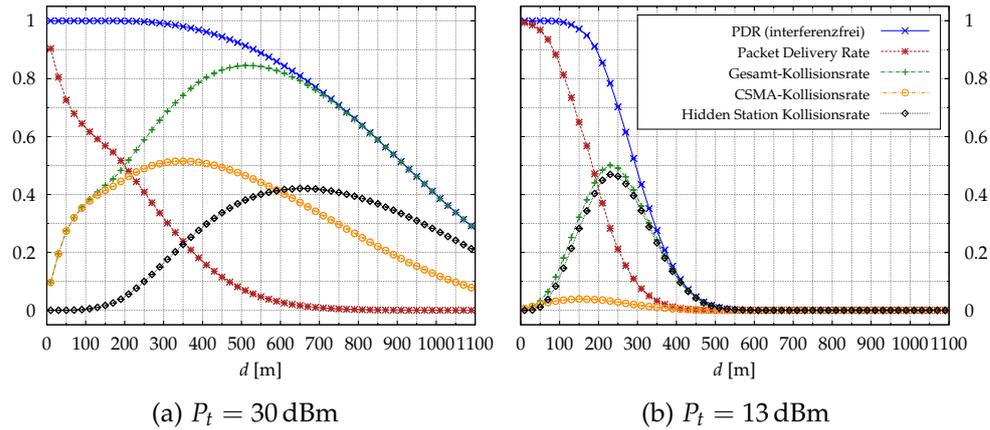


Abbildung 51: PDR im interferenzfreien sowie interferenzbehafteten Fall und Kollisionsraten in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei höchster (a) und geringster (b) Sendeleistung  $P_t$  mit  $\rho = 135$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km.s.

steht in direktem Zusammenhang mit der von der Carrier-Sense-Reichweite und damit von der Sendeleistung abhängigen robusten Reichweite gegen Hidden Stations. Für große Entfernungen konvergiert die Gesamt-Kollisionsrate gegen die PDR im interferenzfreien Fall, d. h. jeder im interferenzfreien Fall empfangbare Frame wird Opfer einer Kollision.

Abbildung 51b zeigt die Folgen einer deutlichen Reduzierung der Sendeleistung auf  $P_t = 13$  dBm, die eine Begrenzung der Kommunikationsdichte auf  $\rho_{com} = 1003$  Frames/s bewirkt. Durch eine deutlich herabgesetzte Carrier-Sense-Reichweite sinkt die Anzahl der innerhalb dieses Bereichs um den Medienzugriff konkurrierenden Stationen, sodass eine fast vollständige Vermeidung von CSMA-Kollisionen erreicht wird. Auch diese Netzkonfiguration weist jedoch eine große Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen auf, welche aufgrund der geringen Carrier-Sense-Reichweite zudem bereits bei deutlich geringerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger auftreten.

Dennoch kann die Gesamt-Kollisionsrate auf diese Weise signifikant verringert werden. Eine Reduzierung der Sendeleistung bewirkt aufgrund der für geringe Entfernungen vorherrschenden Interferenzlimitierung des Netzes somit eine deutliche Erhöhung der PDR und damit eine Verbesserung der Zuverlässigkeit für Übertragungen aus dem Nahbereich ( $d \leq 160$  m). Gleichzeitig ruft dabei jedoch die bereits in mittlerer Entfernung einsetzende Pfadverlustlimitierung eine Verringerung der PDR für größere Entfernungen hervor.

Die aus sämtlichen untersuchten Sendeleistungskonfigurationen resultierenden PDRs sind in Abbildung 52 für verschiedene Verkehrs- und Nachrichtenerzeugungsdichten sowie ausgewählte Entfernungen  $d$  zwischen Sender und Empfänger dargestellt. Im Falle der beiden geringsten untersuchten Erzeugungsdichten bewirkt für sämtliche dargestellten Entfernungen eine Erhöhung der Sendeleistung im untersuchten Parameterraum fast ausnahmslos eine Erhöhung der PDR (siehe Abbildungen 52a und 52b). Mit wachsender Nachrichtenerzeugungsdichte können Übertragungen aus größerer Entfernung zwar noch immer von einer Erhöhung der Sendeleistung

*Kollisionsvermeidung durch Reduzierung der Sendeleistung*

*PDR in Abhängigkeit der Sendeleistung*

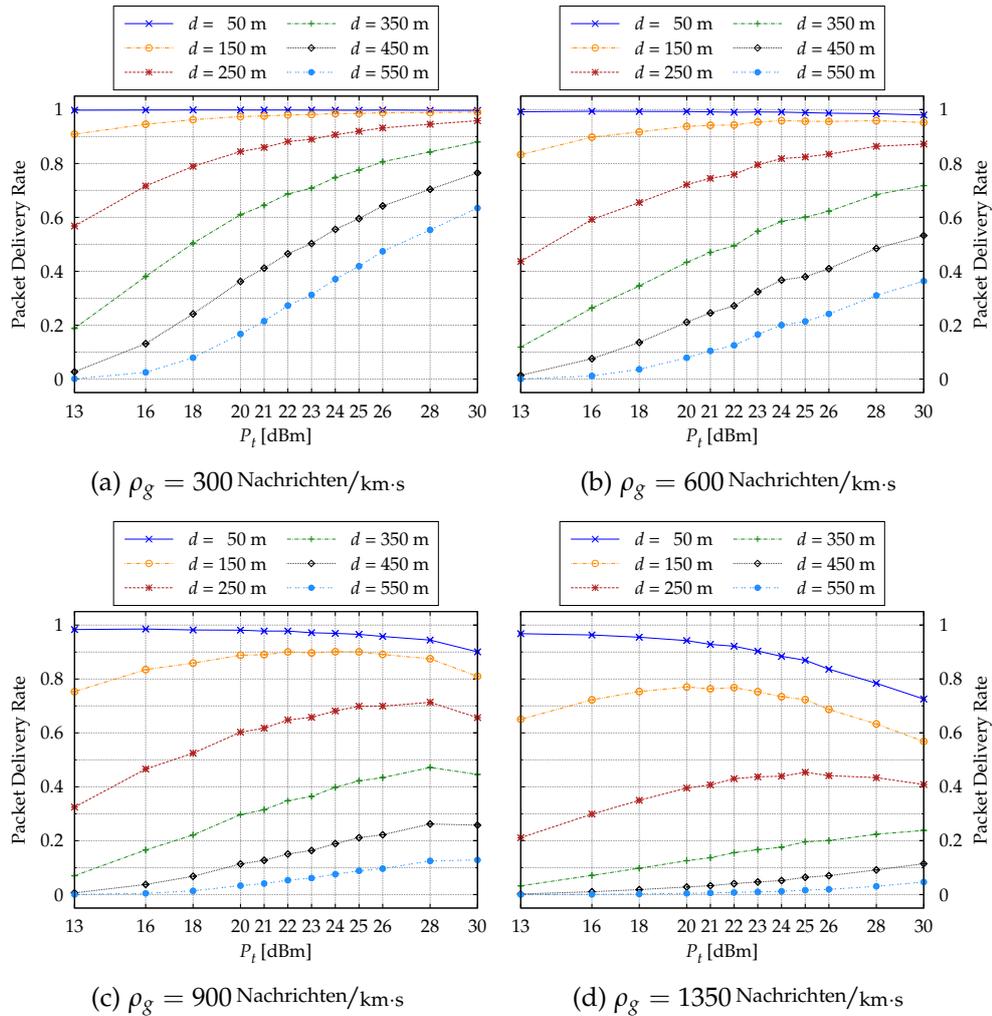


Abbildung 52: Mittlere Packet Delivery Rate in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Nachrichtenerzeugungsichten  $\rho_g$  und Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho = 30$  Fz./km (a),  $60$  Fz./km (b),  $90$  Fz./km (c),  $135$  Fz./km (d).

profitieren, aufgrund zunehmender Kollisionshäufigkeit verursacht eine zu hohe Sendeleistung jedoch eine Verringerung der PDR für Übertragungen aus dem für kooperative Sicherheitsanwendungen besonders bedeutsamen Nahbereich, wie die Abbildungen 52c und 52d deutlich erkennen lassen.

Bei hoher Netzlast kann somit durch eine geeignete Konfiguration der Sendeleistung die Zuverlässigkeit periodischer Broadcasts in VANETs optimiert werden. Zur Beantwortung der Frage, welche Sendeleistung unter gegebenen Bedingungen die Aktualität der zur Verfügung stehenden Statusinformationen maximiert, ist eine Betrachtung der Message Lifetime zweckmäßig.

Abbildung 53 zeigt die mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Verkehrs- und Nachrichtenerzeugungsichten sowie ausgewählte Entfernungen  $d$  zwischen Sender und Empfänger. Die Abbildungen 53a und 53b belegen in Übereinstimmung mit den zuvor in Abbildung 52 dargestellten Ergebnissen, dass für Nachrichtenerzeugungsichten  $\rho_g \leq 600$  Nachrichten/km·s eine Maximierung der Sendeleistung inner-

Message Lifetime in  
Abhängigkeit der  
Sendeleistung

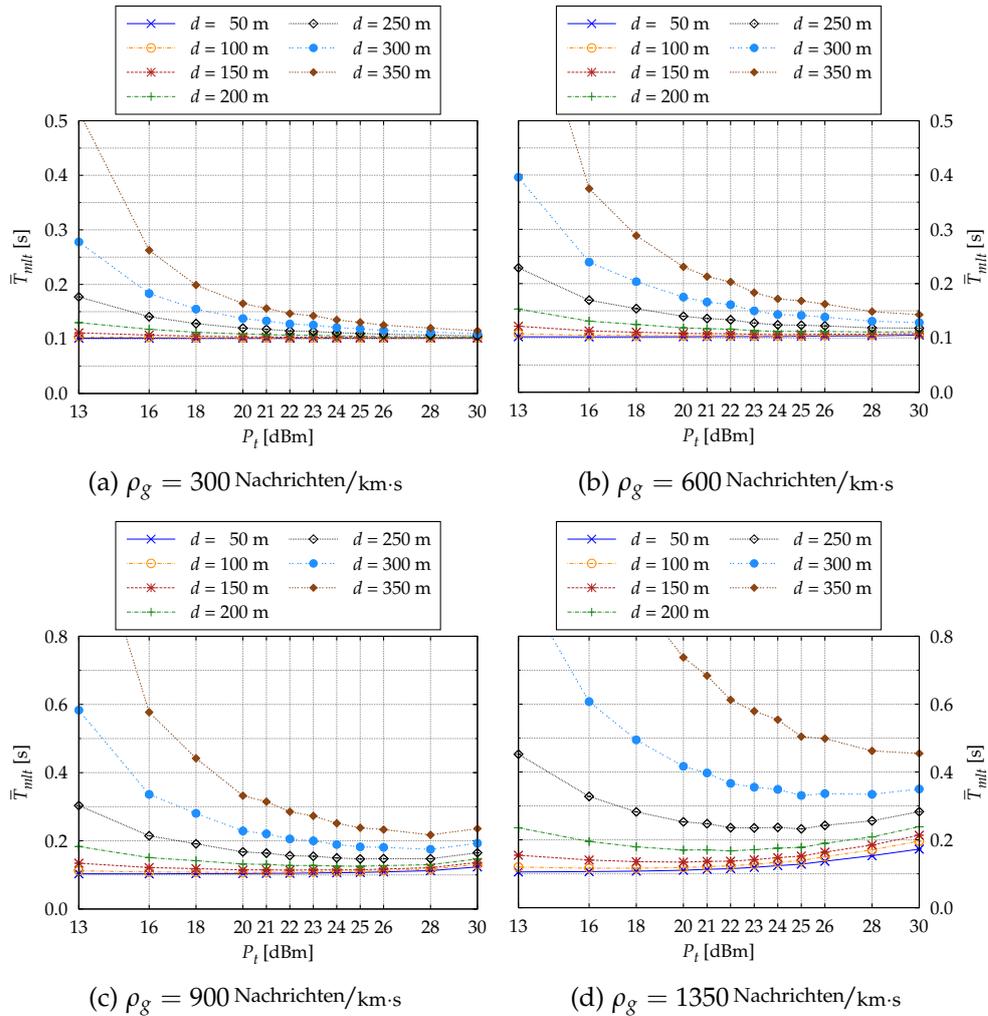


Abbildung 53: Mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Nachrichtenerzeugungsichten  $\rho_g$  und Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho = 30$  Fz./km (a),  $60$  Fz./km (b),  $90$  Fz./km (c),  $135$  Fz./km (d).

halb des untersuchten Parameterraums mit einer Minimierung der Message Lifetime für sämtliche betrachteten Entfernungen einhergeht und somit eine bestmögliche Performanz des Netzes erlaubt.

Bei höherer Nachrichtenerzeugungsichte hingegen, wie sie Grundlage der Abbildungen 53c und 53d ist, bewirkt eine zu hohe Sendeleistung eine Verschlechterung der Message Lifetime für Übertragungen aus dem Nahbereich. Unter Berücksichtigung der besonderen Bedeutung, die der fehlerfreien Übermittlung von Statusnachrichten aus dem unmittelbaren Umfeld des Empfängers im Kontext auf Cooperative Awareness basierender Sicherheitsanwendungen zukommt, werden für  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s mit Sendeleistungen zwischen 23 dBm und 26 dBm sowie für  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s mit Sendeleistungen zwischen 20 dBm und 22 dBm annähernd optimale Ergebnisse erzielt. Dies entspricht Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  zwischen  $1300$  Frames/s und  $1850$  Frames/s. Wird der Aktualität von Informationen aus weiterer Entfer-

nung eine größere Bedeutung beigemessen, ist eine noch höhere Sendeleistung empfehlenswert.

Demnach bewirkt auch bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte eine vergleichsweise hohe Sendeleistung eine Performanzoptimierung des VANETs.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchung unterscheiden sich diesbezüglich deutlich von Ergebnissen früherer Simulationsstudien auf Basis des vereinfachten Two-Ray Ground Pfadverlustmodells<sup>18</sup>. Mittag et al. etwa verwenden in [111] zur Ausbreitungsmodellierung in einem Autobahnscenario das vereinfachte Two-Ray Ground Modell in Kombination mit Nakagami-Fading mittlerer Intensität ( $m = 3$ ). Bei einer vergleichbaren Simulationskonfiguration mit  $R_b = 6$  Mbps,  $CW = 15$  und  $f_g = 10$  Nachrichten/s in Verbindung mit einer Verkehrsdichte von  $\rho = 96$  Fz./km kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass zur Realisierung einer möglichst hohen Zuverlässigkeit der Frameübertragung im Nahbereich eine Reduzierung der Sendeleistung auf 10 dBm notwendig ist. Schmidt-Eisenlohr et al. empfehlen in [141] unter Verwendung desselben Ausbreitungsmodells für eine Konfiguration mit  $R_b = 3$  Mbps,  $CW = 127$  und  $f_g = 8$  Nachrichten/s bei einer geringen Verkehrsdichte von  $\rho = 66$  Fz./km eine Sendeleistung von 8,9 dBm.

Von besonderem Interesse ist demnach eine Beantwortung der Frage, wodurch diese erheblichen Unterschiede hinsichtlich der zur Performanzoptimierung des Netzes geeigneten Sendeleistung hervorgerufen werden.

Erforderlich ist zu diesem Zweck eine vergleichende Bewertung der im Rahmen der verschiedenen Simulationsstudien verwendeten Pfadverlustmodelle. Die in diesem Abschnitt vorgestellte Parameterstudie zu Auswirkungen der Sendeleistung wurde daher – zusätzlich zur Verwendung des in Abschnitt 4.3.4 beschriebenen Ausbreitungsmodells für Autobahnscenarien, das auf dem Dual-Slope Pfadverlustmodell basiert – ebenfalls unter Zugrundelegung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells durchgeführt, welches die Grundlage einer Vielzahl früherer VANET-Simulationsstudien bildet (siehe Abschnitt 4.3.1). In beiden Fällen wurde dabei Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität nach Gl. 4.32 angenommen.

Die Ergebnisse zeigt Abbildung 54 anhand eines Vergleichs der aus beiden Pfadverlustmodellen resultierenden PDR für verschiedene Sendeleistungen  $P_t$  bei hoher Netzlast mit  $\rho = 135$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s.

Bei Anwendung des in Feldtests validierten Ausbreitungsmodells für Autobahnen bewirkt unter den dargestellten Sendeleistungen eine Konfiguration mit  $P_t = 20$  dBm eine größtmögliche Zuverlässigkeit des Netzes (siehe Abbildung 54a). Eine weitere Reduzierung der Sendeleistung bringt keine signifikante Verbesserung im besonders relevanten Nahbereich mit sich, verursacht jedoch eine Reduzierung der PDR für größere Entfernungen.

Die Gegenüberstellung beider Pfadverlustmodelle offenbart, dass die Anwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells zu deutlich abweichenden Schlussfolgerungen führt: Die in Abbildung 54b gezeigten Ergebnisse legen die Notwendigkeit einer weiteren Reduzierung der Sendeleistung auf

*Abweichende  
Ergebnisse früherer  
Simulationsstudien  
und ihre Ursachen*

*Auswirkungen des  
Pfadverlustmodells*

<sup>18</sup>Zur Erläuterung der verschiedenen Pfadverlustmodelle vgl. Abschnitt 4.3.1.

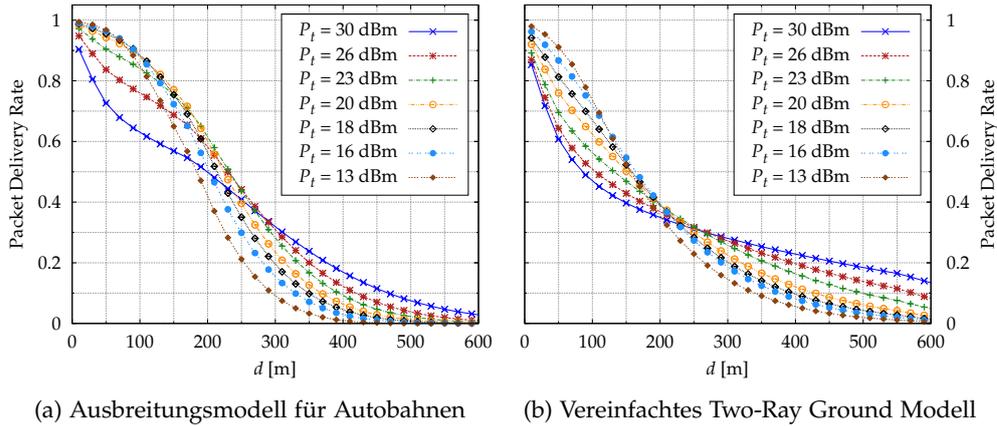


Abbildung 54: Mittlere Packet Delivery Rate (PDR) für verschiedene Sendeleistungen  $P_t$  bei Verwendung des Autobahn-Ausbreitungsmodells (a) und des vereinfachten Two-Ray Ground Modells (b) mit distanzabhängiger Fading-Intensität,  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$ ,  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  und  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

$P_t = 13 \text{ dBm}$  nahe, um die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Nahbereich zu maximieren.

Ein noch detaillierterer Einblick in die Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Beurteilung der Sendeleistung wird möglich, wenn die Zusammenhänge zwischen PDR, PDR im interferenzfreien Fall sowie Gesamt-, CSMA- und Hidden-Station-Kollisionsrate in die Betrachtung einbezogen werden. Abbildung 55 zeigt für beide Pfadverlustmodelle einen Vergleich dieser Performanzmetriken bei einer Sendeleistung von  $P_t = 20 \text{ dBm}$  und hoher Netzlast mit  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

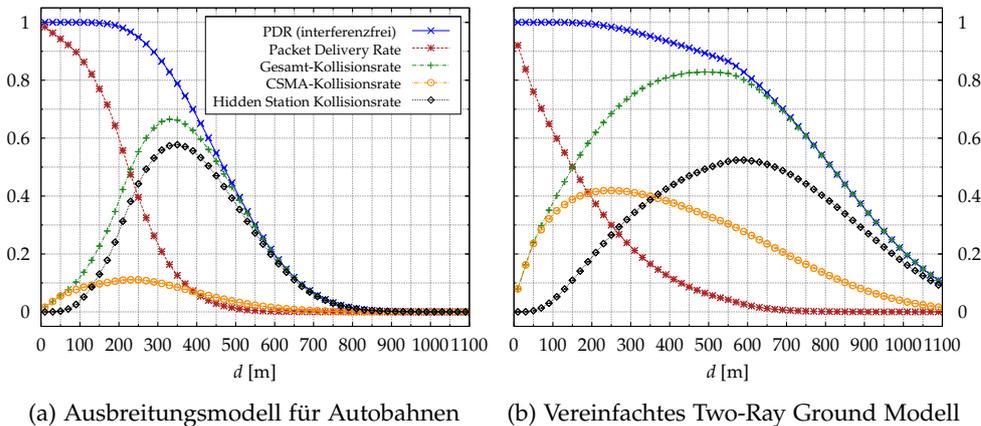


Abbildung 55: PDR im interferenzfreien und interferenzbehafteten Fall sowie Kollisionsraten bei Verwendung des Autobahn-Ausbreitungsmodells (a) und des vereinfachten Two-Ray Ground Modells (b) mit distanzabhängiger Fading-Intensität,  $P_t = 20 \text{ dBm}$ ,  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$ ,  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  und  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

Bereits in Abschnitt 5.3.1 wurde gezeigt, dass im Vergleich mit dem empirisch validierten Ausbreitungsmodell für Autobahnen eine Anwendung des

*Unterschätzung des  
Pfadverlustes führt  
zu Unterschätzung  
der optimalen  
Sendeleistung*

vereinfachten Two-Ray Ground Modells zu einer deutlichen Unterschätzung des in VANET-Autobahnszenarien auftretenden Pfadverlustes führt. Aus der Gegenüberstellung in Abbildung 55 wird darüber hinaus erkennbar, dass diese Unterschätzung weitreichende Folgen für die Quantifizierung der bei gegebener Sendeleistung und Netzlast auftretenden Kollisionen hat. Besonders deutlich tritt in Abbildung 55b eine erhebliche Überschätzung der Häufigkeit von CSMA-Kollisionen bei Anwendung des vereinfachten Two-Ray Ground Modells hervor, die eine zu pessimistische Beurteilung der Gesamtkollisionsrate insbesondere für geringe Entfernungen verursacht. Eine deutliche Unterschätzung der unter den gegebenen Bedingungen zu wählenden Sendeleistung ist die daraus resultierende Folge.

*Zusammenfassende  
Bewertung*

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Sendeleistung die Dienstgüte und Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs maßgeblich beeinflusst und daher ein probates Mittel zur Überlaststeuerung darstellt. Durch eine Anpassung der Sendeleistung können Überlastsituationen zwar nicht vollständig vermieden werden, jedoch ist es bei geeigneter Konfiguration möglich, die Zuverlässigkeit der Frameübertragung deutlich zu erhöhen.

Bei geringer Netzlast bewirkt eine hohe Sendeleistung aufgrund der überwiegenden Pfadverlustlimitierung eine hohe Leistungsfähigkeit des Netzes. Für Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g \leq 600 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  wird eine an der Message Lifetime gemessene Optimierung der Aktualität verfügbarer Statusinformationen durch die höchste untersuchte Sendeleistung  $P_t = 30 \text{ dBm}$  erreicht.

Mit zunehmender Netzlast wächst der Einfluss der Interferenzlimitierung, sodass eine Reduzierung der Sendeleistung zweckmäßig ist, um einen Kompromiss zwischen pfadverlust- und kollisionsbedingten Frameverlusten zu erzielen. Für  $\rho_g = 900 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  erzeugen Konfigurationen mit Sendeleistungen zwischen 23 dBm und 26 dBm annähernd optimale Ergebnisse, während bei noch höherer Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  Sendeleistungen zwischen 20 dBm und 22 dBm zu wählen sind, um eine möglichst hohe Aktualität von Statusinformationen aus dem Nahbereich zu gewährleisten.

Bei höherer Netzlast werden annähernd optimale Ergebnisse somit bei Kommunikationsdichten zwischen  $1300 \text{ Frames/s}$  und  $1850 \text{ Frames/s}$  erreicht. Diesen Werten entsprechen Channel Busy Times  $\gamma_{def}$  und  $\gamma_{cs}$  in Höhe von  $0,46 \leq \gamma_{def} \leq 0,60$  bzw.  $0,70 \leq \gamma_{cs} \leq 0,83$  (vgl. Abbildung 46).

Im Vergleich zu früheren Simulationsstudien in Autobahnszenarien auf Basis des vereinfachten Two-Ray Ground Pfadverlustmodells erweisen sich damit bei gegebener Nachrichtenerzeugungsdichte deutlich höhere Sendeleistungen als zweckmäßig. Ein Vergleich der aus verschiedenen Pfadverlustmodellen resultierenden Simulationsergebnisse offenbart, dass eine Unterschätzung des Pfadverlustes, wie sie durch das vereinfachte Two-Ray Ground Modell verursacht wird, zu einer Unterschätzung der optimalen Sendeleistung um mindestens 7 dB führen kann. Dieses Erkenntnis unterstreicht die Notwendigkeit einer realitätsnahen Ausbreitungsmodellierung im Rahmen von Skalierbarkeitsuntersuchungen in VANETs.

### 5.5.2 Nachrichtenerzeugungsrate

Einen elementaren Parameter periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs stellt die Nachrichtenerzeugungsrate dar. Sie bestimmt das als Erzeugungsverzögerung<sup>19</sup> bezeichnete Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichtenerzeugungszeitpunkten einer Station und beeinflusst daher maßgeblich die Aktualität der einem Fahrzeug über seine Umgebung zur Verfügung stehenden Informationen. Gleichzeitig wirkt sich die verwendete Nachrichtenerzeugungsrate jedoch unmittelbar auf die Netzlast sowie auf die Entstehung von Interferenzen und Framekollisionen aus, wie bereits die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Ergebnisse zeigen.

Im Hinblick auf die Entstehung und Vermeidung von Überlastsituationen ist somit eine Betrachtung der Nachrichtenerzeugungsrate für die Leistungsbewertung in VANETs von besonderem Interesse. In diesem Abschnitt werden daher die Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate auf die Performanz des Netzes auf Basis von Simulationen untersucht. Folgende Fragen, deren Beantwortung einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung effektiver Überlaststeuerungsverfahren bildet, stehen dabei im Vordergrund:

- Wie beeinflusst die Nachrichtenerzeugungsrate die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs?
- Können durch eine Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate effektiv Überlastsituationen vermieden oder die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Überlastfall erhöht werden?
- Wie ist die Nachrichtenerzeugungsrate zu wählen, damit eine möglichst hohe Performanz des Netzes erreicht wird, und wie hängt diese Entscheidung von der gegebenen Verkehrsdichte ab?

Zur Untersuchung dieser Fragen dient eine Parameterstudie, deren Simulationskonfiguration Tabelle 20 zusammenfasst. Der Parameterraum umfasst ein breites Spektrum von Nachrichtenerzeugungsichten  $\rho_g$  zwischen 15 und 2700 Nachrichten/km·s.

Abbildung 56a zeigt die Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  für sämtliche untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$ . Während die überwiegende Mehrheit der untersuchten Konfigurationen keinerlei Frame Drops aufweist, werden für  $\rho = 90 \text{ Fz./km}$  und  $f_g = 20 \text{ Nachrichten/s}$  sowie für  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  und  $f_g \geq 15 \text{ Nachrichten/s}$  mit signifikanter Häufigkeit Frames vom Sender verworfen.

Verursacht wird dieses Verhalten durch ein deutliches Anwachsen der Netzlast mit steigender Nachrichtenerzeugungsrate, wie Abbildung 56b anhand der auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93 \text{ dBm}$  bezogenen Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  veranschaulicht. Wird die höchste untersuchte Verkehrsdichte  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  zugrunde gelegt, so wächst  $\gamma_{cs}$  im betrachteten Parameterraum von 0,06 für  $f_g = 0,5 \text{ Nachrichten/s}$  auf 0,89 für  $f_g = 20 \text{ Nachrichten/s}$  an.

*Auswirkungen der Erzeugungsrate auf die Performanz des VANETs*

*Auswirkungen auf Frame Drop Rate und Channel Busy Time*

<sup>19</sup>Vgl. hierzu bereits Abschnitt 4.4.2.

Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes
MAC-Framelänge	474 Bytes
$P_t$	23 dBm
$R_b$	6 Mbps
$P_{r,cs}$	-93 dBm
CW	15
Post-Backoff	deaktiviert
$\rho$	{30, 60, 90, 135} Fz./km
$f_g$	{ $\frac{1}{2}$ , 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20} Nachrichten/s

Tabelle 20: Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g$ .

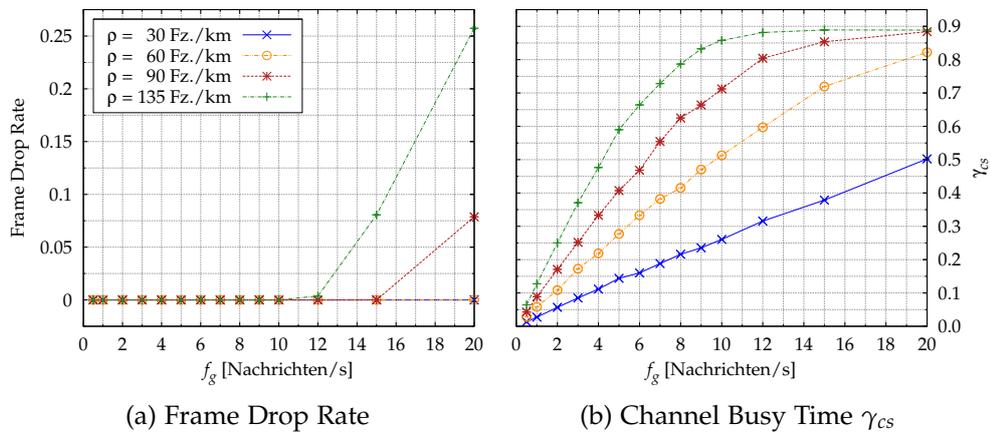


Abbildung 56: Mittlere Frame Drop Rate (a) und auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogene Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  (b) in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $15 \text{ Nachrichten/km.s} \leq \rho \leq 2700 \text{ Nachrichten/km.s}$ .

Auswirkungen auf  
die Channel Access  
Time

Weil jede Station im Vorfeld eines Medienzugriffs ihr Backoff-Intervall nur im Falle eines als frei erkannten Übertragungsmediums dekrementiert, verursacht eine Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrates neben einem Anwachsen der Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  einen erheblichen Anstieg der Channel Access Time (CAT). Dies veranschaulicht Abbildung 57a anhand des arithmetischen Mittels  $\bar{T}_{ca}$  der CAT, welches mit steigender Nachrichtenerzeugungsrates überproportional anwächst.

Auffällig ist für  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$ , dass mit einer Anhebung der Nachrichtenerzeugungsrates von  $f_g = 15 \text{ Nachrichten/s}$  auf  $f_g = 20 \text{ Nachrichten/s}$  eine signifikante Reduzierung der mittleren CAT eintritt. Verursacht wird dieser Effekt durch eine in diesem Parameterbereich deutlich ansteigende Frame Drop Rate (vgl. Abbildung 56a) im Zusammenhang mit der Tatsache, dass für einen verworfenen Frame keine CAT berechnet werden kann. Ein Frame wird immer dann verworfen, wenn seine Übertragung nicht vor Ablauf der Erzeugungsverzögerung  $T_{gen}$  begonnen werden konnte, sodass die Channel Access Time  $T_{ca}$  nach oben begrenzt wird durch  $T_{gen}$ . Unter Berücksichtigung des bei der

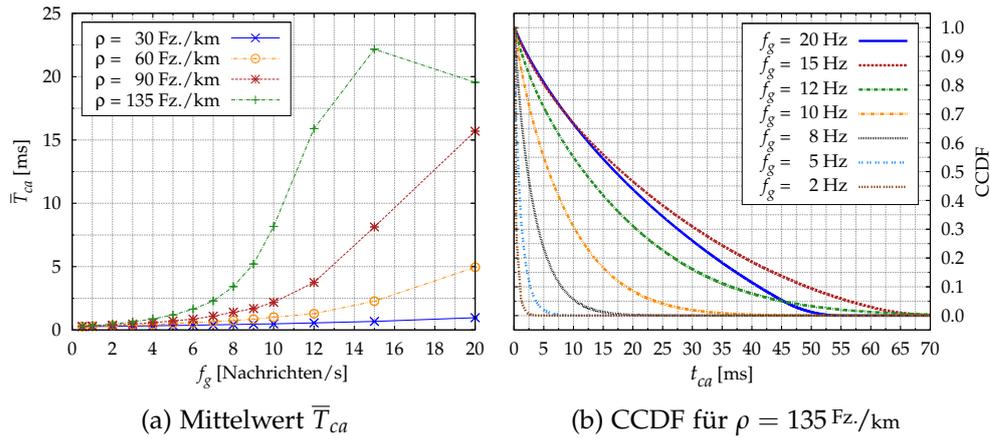


Abbildung 57: Channel Access Time  $T_{ca}$ : Arithmetisches Mittel  $\bar{T}_{ca}$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  (a) und komplementäre Verteilungsfunktion  $P(T_{ca} > t_{ca})$  (CCDF) für  $\rho = 135$  Fz./km (b) in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  mit  $15$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 2700$  Nachrichten/km·s.

Nachrichtenerzeugung verwendeten Jitters  $J_{gen}$  (vgl. Abschnitt 4.5.2.2), der einer Gleichverteilung im Intervall  $[-1/(10 \cdot f_g), +1/(10 \cdot f_g)]$  folgt, gilt demnach

$$T_{ca} < T_{gen} \Leftrightarrow T_{ca} < \frac{1}{f_g} + J_{gen} \Rightarrow T_{ca} < \frac{11}{10 \cdot f_g} \quad (5.2)$$

Mit steigender Netzlast und Nachrichtenerzeugungsrate nähert sich die Verteilung der CAT einer Gleichverteilung im Intervall  $[AIFS, T_{gen})$  an, wie Abbildung 57b anhand der aus den Simulationen ermittelten komplementären Verteilungsfunktion (CCDF) der CAT für  $\rho = 135$  Fz./km und ausgewählte Nachrichtenerzeugungsraten zeigt. Ein Vergleich der dargestellten CCDF für  $f_g = 15$  Nachrichten/s und  $f_g = 20$  Nachrichten/s erklärt das beobachtete Verhalten von  $\bar{T}_{ca}$ .

Zur Beurteilung des Einflusses der Nachrichtenerzeugungsrate auf die Zuverlässigkeit der Kommunikation ist eine Betrachtung der Packet Delivery Rate (PDR) zweckmäßig. Abbildung 58 zeigt die PDR in Abhängigkeit der Erzeugungsrate  $f_g$  für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger und sämtliche untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$  in Verbindung mit Nachrichtenerzeugungsdichten  $15$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 2700$  Nachrichten/km·s. Bereits bei einer sehr geringen Verkehrsdichte von  $\rho = 30$  Fz./km zeigt sich mit steigender Erzeugungsrate eine signifikante Verringerung der PDR, die auf ein erhöhtes Interferenzniveau und ein vermehrtes Auftreten von Framekollisionen zurückzuführen ist. Frameübertragungen aus geringer Entfernung  $d$  sind von dieser Verschlechterung der Zuverlässigkeit aufgrund ihrer höheren Robustheit gegenüber Interferenzen weniger stark betroffen.

Mit zunehmender Verkehrsdichte  $\rho$ , verbunden mit einer erhöhten Anzahl um den Medienzugriff konkurrierender Stationen, verstärkt sich die mit einer Erhöhung der Erzeugungsrate einhergehende Verschlechterung der PDR deutlich. Im Falle der höchsten untersuchten Verkehrsdichte von  $\rho = 135$  Fz./km sinkt die PDR für Übertragungen aus der mittleren Entfernung  $d = 350$  m bereits für  $f_g = 10$  Nachrichten/s deutlich unter 20 %.

*PDR in  
Abhängigkeit der  
Erzeugungsrate*

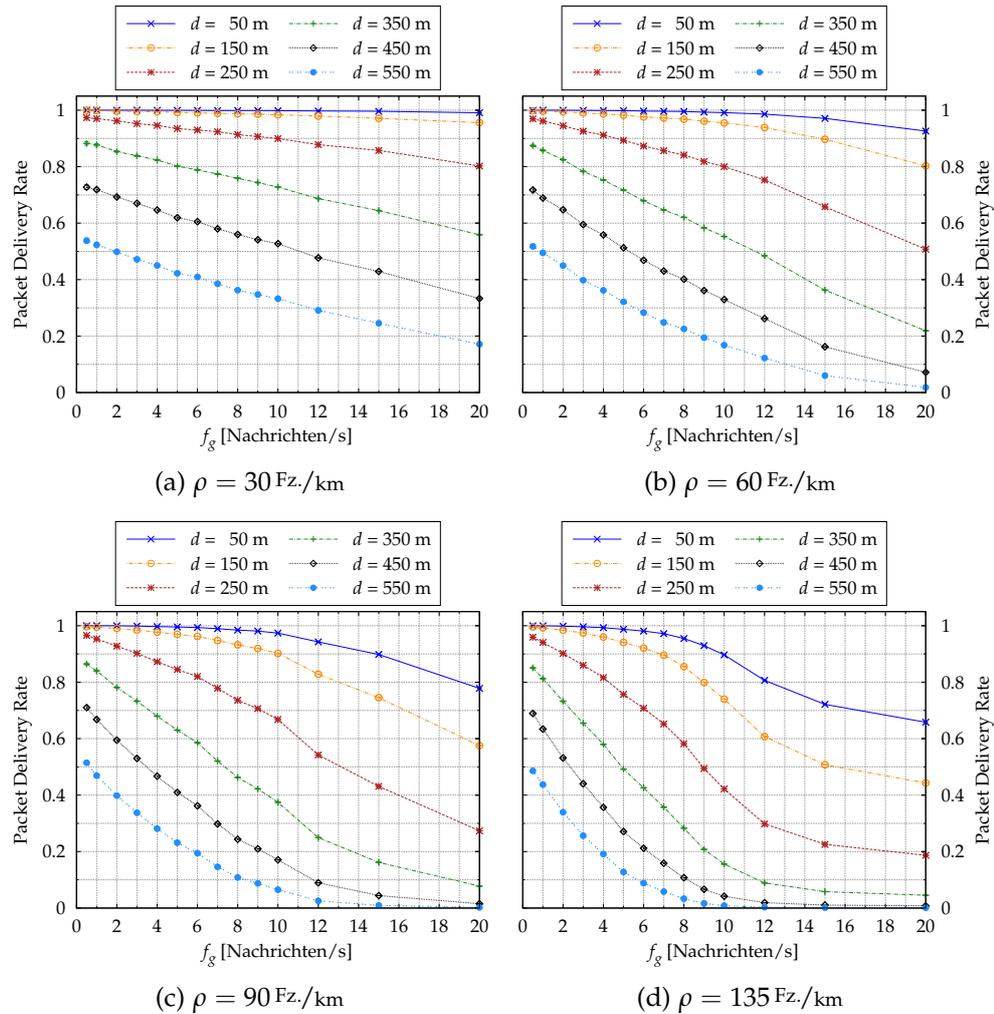


Abbildung 58: Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger und Verkehrsdichten  $\rho$  mit Nachrichtenerzeugungsdichten  $15 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 2700 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse bestätigt sich hier außerdem die bereits in Abschnitt 5.4 dargelegte Erkenntnis, dass c. p. aus übereinstimmenden Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  annähernd identische PDRs resultieren.

Während somit durch eine Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrate eine Reduzierung der Erzeugungsverzögerung bewirkt und damit grundsätzlich die Aktualität der einem Fahrzeug zur Verfügung stehenden Statusinformationen über seine Umgebung erhöht werden kann, wirkt sich diese Maßnahme negativ auf die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung im Netz aus. Im Überlastfall kann demnach durch eine Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate unter Inkaufnahme einer erhöhten Erzeugungsverzögerung die Netzlast reduziert und somit eine Verbesserung der Zuverlässigkeit erreicht werden.

Die Wirksamkeit des notwendigen Kompromisses zwischen Erzeugungsverzögerung und Zuverlässigkeit der Frameübertragung lässt sich durch die

Message Lifetime quantifizieren, denn eine Minimierung der Message Lifetime ist gleichbedeutend mit einer Optimierung der Dienstgüte periodischer Broadcasts im Sinne einer höchstmöglichen Aktualität der verfügbaren Statusinformationen. Abbildung 59 zeigt die Message Lifetime in Abhängigkeit der Erzeugungsrate für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger und sämtliche untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$ .

*Message Lifetime in Abhängigkeit der Erzeugungsrate*

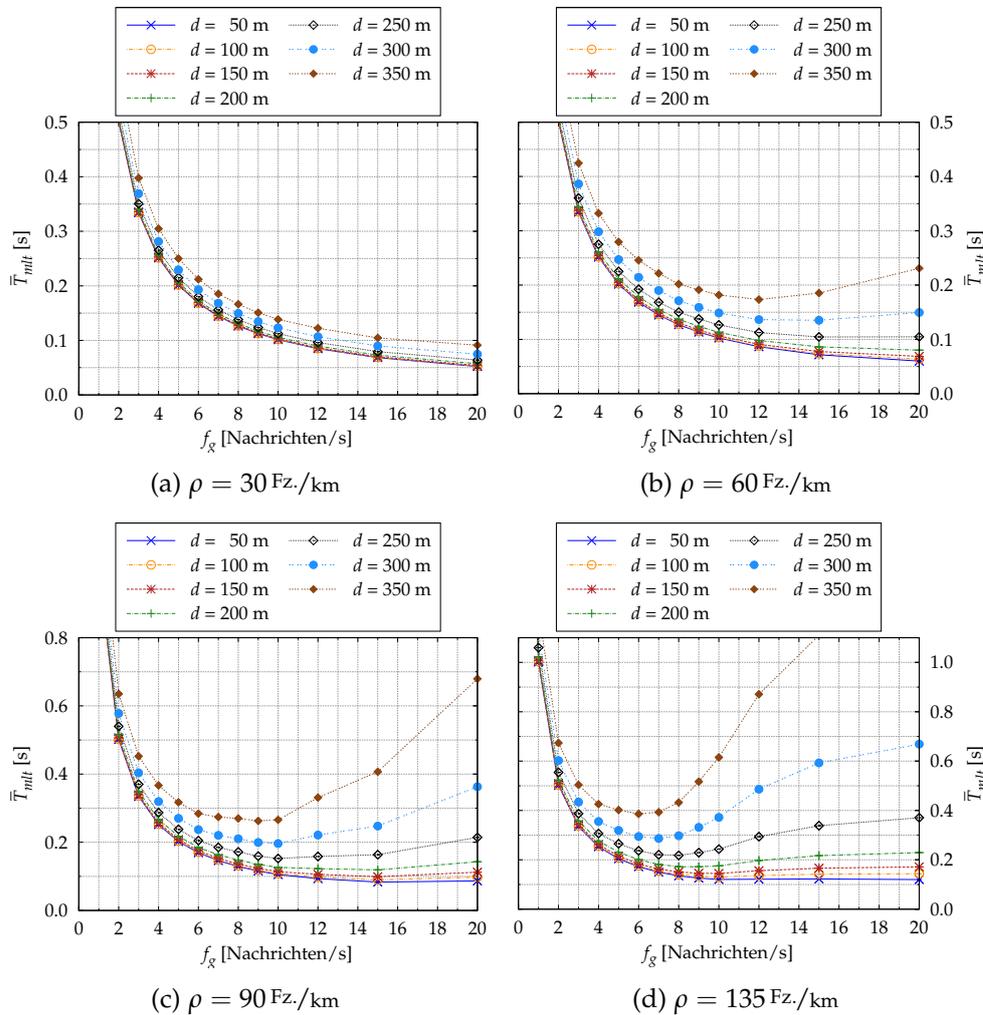


Abbildung 59: Auswirkungen der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  auf die mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger und Verkehrsdichten  $\rho$  mit Nachrichtenerzeugungs-dichten  $15 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 2700 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

Abbildung 59a offenbart, dass bei sehr geringer Verkehrsdichte eine Erhöhung der Nachrichtenerzeugungsrate innerhalb des untersuchten Parameter-raums ohne Einschränkungen zu einer Reduzierung der Message Lifetime führt. Für  $\rho = 30 \text{ Fz./km}$  liefert in diesem Rahmen eine Konfiguration mit  $f_g = 20 \text{ Nachrichten/s}$  optimale Ergebnisse. Im Zusammenhang mit einem niedrigem Interferenzniveau wird dieses Verhalten im Wesentlichen durch eine im Verhältnis zur reduzierten Erzeugungsverzögerung nur geringfügig mit der Nachrichtenerzeugungsrate anwachsende Kollisionsrate hervorgerufen.

Für höhere Verkehrsdichten hingegen setzt mit zunehmender Nachrichtenerzeugungsrate eine Überkompensation der verringerten Erzeugungsverzögerung durch wachsende Kollisionsraten ein. Von diesem Effekt sind größere Entfernungen  $d$  aufgrund ihrer geringeren Robustheit gegenüber Interferenzen in besonderem Maße betroffen.

Mit zunehmender Verkehrsdichte kann demzufolge durch eine Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate eine deutliche Verringerung der Message Lifetime und damit eine Erhöhung der Aktualität der verfügbaren Statusinformationen erzielt werden. Annähernd optimale Ergebnisse ergeben sich im Fall  $\rho = 60 \text{ Fz./km}$  für  $f_g = 15 \text{ Nachrichten/s}$ , im Fall  $\rho = 90 \text{ Fz./km}$  für  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  sowie im Fall  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  für  $f_g = 7 \text{ Nachrichten/s}$ .

Unabhängig von der gegebenen Verkehrsdichte führt somit eine Nachrichtenerzeugungsrate in Höhe von  $\rho_g \approx 900 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  zu näherungsweise optimalen Ergebnissen. Unter Berücksichtigung der Carrier-Sense-Reichweite  $d_{cs} = 731,1 \text{ m}$ , die aus den angenommenen Werten für Sendeleistung und Carrier-Sense-Schwellenwert im Zusammenhang mit dem zugrunde liegenden Ausbreitungsmodell resultiert, ergibt sich rechnerisch eine dienstgüteo-  
 dienstgüteo-optimierende Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  von  $1316 \text{ Frames/s}$ .

Für die höchste untersuchte Verkehrsdichte  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  ist eine Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate auf  $f_g = 7 \text{ Nachrichten/s}$  im Vergleich zur üblicherweise angenommenen Rate  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  verbunden mit einer Reduzierung der Nachrichtenerzeugungsrate  $\rho_g$  von  $1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  auf  $945 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ . Dies entspricht einer Reduzierung der Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  von  $1974 \text{ Frames/s}$  auf  $1382 \text{ Frames/s}$ . Die durch diese Maßnahme erzielbare Verbesserung der Netzperformance veranschaulicht Abbildung 60 anhand der aus beiden Simulationskonfigurationen ermittelten komplementären Verteilungsfunktionen (CCDF) der Message Lifetime.

Dienstgüteo-  
optimierende  
Erzeugungs-  
und Kommunikati-  
onsdichte

CCDF der Message  
Lifetime

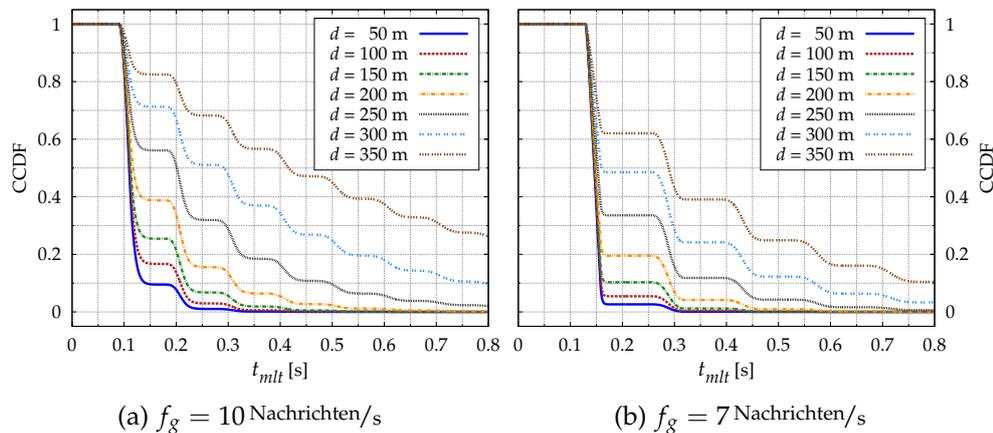


Abbildung 60: Komplementäre Verteilungsfunktion  $P(T_{mlt} > t_{mlt})$  (CCDF) der Message Lifetime  $T_{mlt}$  für  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$  (a) sowie  $f_g = 7 \text{ Nachrichten/s}$  (b) mit  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$ .

Deutlich erkennbar wird insbesondere für mittlere Entfernungen eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung durch eine Vermeidung exzessiver Message Lifetimes: So kann beispielsweise für  $d = 350 \text{ m}$  die Wahrscheinlichkeit einer  $0,5 \text{ s}$  übersteigenden Message Lifetime von  $45 \%$  auf

25% verringert werden. Wegen der damit einhergehenden größeren Erzeugungsverzögerung wird dieser Effekt begleitet von einer geringfügig reduzierten Wahrscheinlichkeit sehr geringer Message Lifetimes für Übertragungen aus sehr geringer Entfernung, die jedoch akzeptabel erscheint.

Über die zuvor beschriebenen Erkenntnisse hinaus ist in diesem Zusammenhang die Frage von Interesse, ob eine Optimierung der Aktualität der verfügbaren Statusinformationen mit einer Maximierung des Netzdurchsatzes einhergeht. In Abbildung 61 ist der in Mbps gemessene und unabhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger ermittelte mittlere Goodput in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  dargestellt. Dieser spiegelt den auf die Payload, welche in Form von CAMs vorliegt, bezogenen und wie in Abschnitt 4.5.2.2 beschrieben an zentraler Stelle im Netz durch das CamApp-Modul gemessenen Netzdurchsatz wider.<sup>20</sup>

*Goodput in  
Abhängigkeit der  
Erzeugungsrate*

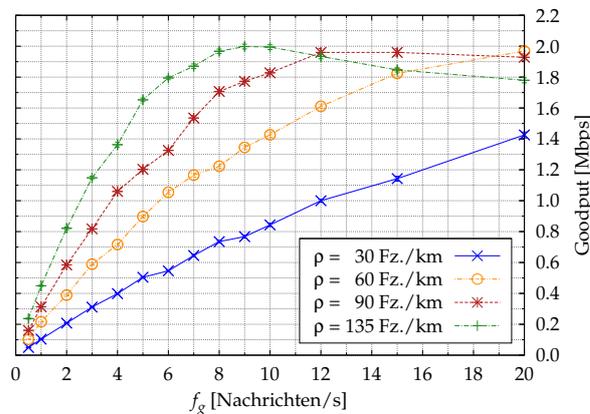


Abbildung 61: Goodput in Mbps in Abhängigkeit der Nachrichtenerzeugungsrate  $f_g$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$ .

Die Abbildung offenbart neben einem maximal erzielbaren Wert von etwa 2 Mbps einen negativen Einfluss von Frame Drops auf den Goodput, der sich insbesondere für  $\rho = 135$  Fz./km und  $f_g \geq 12$  Nachrichten/s bemerkbar macht (vgl. hierzu Abbildung 56a). Darüber hinaus lässt ein Vergleich von Abbildung 61 mit Abbildung 59 deutlich erkennen, dass eine die Message Lifetime minimierende Konfiguration der Nachrichtenerzeugungsrate zwar zu einem vergleichsweise hohen Goodput führt, jedoch nicht gleichbedeutend ist mit dessen Maximierung. Wird eine Maximierung des Goodputs angestrebt, so ist eine signifikant höhere Nachrichtenerzeugungsrate zu wählen. Im Zentrum des Interesses der Optimierung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs steht im Hinblick auf kooperative Sicherheitsanwendungen aber gerade die Aktualität der verfügbaren Statusinformationen aus geringer und mittlerer Distanz, welche durch die distanzabhängige Message Lifetime adäquat quantifiziert wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Nachrichtenerzeugungsrate aufgrund ihrer unmittelbaren Auswirkungen auf Erzeugungsverzögerung und Interferenzniveau maßgeblich die Performanz periodischer Broadcasts

*Zusammenfassende  
Bewertung*

<sup>20</sup>Der Goodput bezieht sich hier auf die CAM-Nachrichtenlänge von 400 Bytes und beinhaltet somit neben den reinen Nutzdaten ebenfalls den Security-Overhead.

in VANETs beeinflusst. Ihre Anpassung stellt daher ein wirksames Mittel zur Bewältigung von Überlastsituationen dar.

Während bei geringer Verkehrsdichte eine Erhöhung der Erzeugungsrate grundsätzlich eine Reduzierung der Message Lifetime bewirkt, ist mit wachsender Verkehrsdichte eine Verringerung der Rate zweckmäßig, um Überlastsituationen zu vermeiden und die Zuverlässigkeit der Frameübertragung zu erhöhen. Der damit einhergehende Kompromiss zwischen Erzeugungsverzögerung und Kollisionshäufigkeit bewirkt eine Optimierung der Dienstgüte des Netzes im Hinblick auf die Aktualität der verfügbaren Statusinformationen. Unter Fokussierung der für kooperative Sicherheitsanwendungen besonders relevanten Distanzen bis 350 m werden diesbezüglich annähernd optimale Ergebnisse bei Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  von etwa 900 Nachrichten/km·s und Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  von etwa 1300 Frames/s erzielt.

### 5.5.3 Datenrate

Im Zusammenhang mit der Leistungsbewertung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs stellt die bei der Übertragung der Daten verwendete Brutto-Datenübertragungsrate  $R_b$ , kurz als Datenrate bezeichnet, einen wichtigen Parameter dar, dessen Auswirkungen in diesem Abschnitt näher untersucht werden.

Die verwendete Datenrate beeinflusst die Performanz des Netzes grundsätzlich durch zwei Effekte: Einerseits erfordert bei gleichbleibender Kanalbandbreite die Realisierung einer höheren Datenrate die Verwendung eines höherwertigen Modulations- und Kodierschemas (MCS), einhergehend mit einer geringeren Robustheit gegenüber Übertragungsstörungen. Bei höherer Datenrate ist daher für ein erfolgreiches Dekodieren eines Datenframes c. p. eine höhere Qualität des empfangenen Signals (im Rahmen dieser Arbeit gemessen an der Empfangsleistung  $P_r$ ) notwendig, wodurch die maximal erzielbare Kommunikationsreichweite herabgesetzt wird. Andererseits ist mit einer höheren Datenrate eine schnellere Übertragung der zu sendenden Daten und damit eine kürzere Belegungsdauer des gemeinsam verwendeten Übertragungsmediums verbunden. Die Verwendung einer höheren Datenrate erlaubt daher grundsätzlich eine Entlastung des Netzes und eine Reduzierung auftretender Interferenzen.

Eine Anpassung der Datenrate  $R_b$  stellt daher ein potentiell geeignetes Mittel zur Handhabung von Überlastsituationen dar, dessen effektive Nutzung allerdings die Beantwortung verschiedener Fragen erfordert:

- In welchem Umfang beeinflusst die Datenrate die erzielbare Kommunikationsreichweite, die Häufigkeit von Kollisionen und damit die Performanz des Netzes?
- Welche Konfiguration der Datenrate erlaubt eine möglichst hohe Zuverlässigkeit periodischer Broadcast-Kommunikation und wie beeinflusst die gegebene Netzlast diese Entscheidung?

- Können durch eine netzlastabhängige Anpassung der Datenrate die Performanz des Netzes erhöht, Überlastsituation vermieden oder ihre Auswirkungen gemindert werden?

Ähnlich zum Vorgehen in den vorhergehenden Abschnitten werden diese Fragen anhand des in Abschnitt 5.1 vorgestellten Autobahnszenarios im Rahmen einer Parameterstudie untersucht, deren Simulationskonfiguration Tabelle 21 zusammenfasst. Dabei werden sämtliche für eine Kanalbandbreite von 10 MHz, wie sie für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation gemäß der Standardspezifikationen ITS-G5 bzw. IEEE 802.11p vorgesehen ist, definierten Datenraten untersucht [55, 76, 77].

Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes
MAC-Framelänge	474 Bytes
$P_{r,cs}$	-93 dBm
CW	15
$f_g$	10 Nachrichten/s
Post-Backoff	deaktiviert
$\rho$	{30, 60, 90, 135} Fz./km
$P_t$	{23, 30} dBm
$R_b$	{3, 4,5, 6, 9, 12, 18, 24, 27} Mbps
$SIR_{th}$	siehe Tabelle 23
$P_{r,th}$	siehe Tabelle 23
$N$	-100 dBm

Tabelle 21: Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Datenrate  $R_b$ .

Den untersuchten Verkehrsdichten entsprechen bei einer Nachrichtenerzeugungsrates von  $f_g = 10$  Nachrichten/s Nachrichtenerzeugungsdichten zwischen  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km·s und  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s. Unter Berücksichtigung der aus den beiden untersuchten Sendeleistungen resultierenden Carrier-Sense-Reichweiten von  $d_{cs} = 731,1$  m und  $d_{cs} = 1173,7$  m ergeben sich (nach Rundung) Kommunikationsdichten zwischen  $\rho_{com} = 439$  Frames/s und  $\rho_{com} = 3169$  Frames/s, wie Tabelle 22 entnommen werden kann.

$\rho_g$ [Nachrichten/km·s]	$\rho_{com}$ [Frames/s]	
	$P_t = 23$ dBm	$P_t = 30$ dBm
300	439	704
600	877	1408
900	1316	2113
1350	1974	3169

Tabelle 22: Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Datenrate untersuchten Simulationskonfigurationen.

Die Empfängerempfindlichkeit  $P_{r,th}$  wurde in Abschnitt 4.5.2.4 definiert als die im interferenzfreien Fall für einen erfolgreichen Frameempfang mindestens notwendige Empfangsleistung. Bei gegebener Rauschleistung  $N$  (Noise Floor) wird die Empfängerempfindlichkeit über den Zusammenhang  $SIR_{th} = \frac{P_{r,th}}{N}$  unmittelbar durch den SINR-Schwellenwert  $SIR_{th}$  bestimmt. Zu einer Kollision kommt es, wenn durch Interferenzen während der Dauer des Empfangs eines Frames dessen SINR unter den Schwellenwert  $SIR_{th}$  fällt. Beide Parameter,  $SIR_{th}$  und  $P_{r,th}$ , werden maßgeblich durch die verwendete Datenrate beeinflusst. Innerhalb des Simulationsmodells werden daher von der Datenrate  $R_b$  abhängige Schwellenwerte verwendet, die sich an den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Ergebnissen der Labortests zur Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit orientieren und Tabelle 23 entnommen werden können.

Abhängigkeit des  
SINR-Schwellen-  
werts von der  
Datenrate

Modulation	Koderate	$R_b$ [Mbps]	$SIR_{th}$ [dB]	$P_{r,th}$ [dBm]
BPSK	1/2	3	7,0	-93,0
BPSK	3/4	4,5	8,0	-92,0
QPSK	1/2	6	9,0	-91,0
QPSK	3/4	9	11,0	-89,0
16-QAM	1/2	12	17,0	-83,0
16-QAM	3/4	18	19,0	-81,0
64-QAM	2/3	24	23,0	-77,0
64-QAM	3/4	27	25,0	-75,0

Tabelle 23: Im Simulationsmodell angenommene Empfängerempfindlichkeiten  $P_{r,th}$  und SINR-Schwellenwerte  $SIR_{th}$  in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$ .

Es kann angenommen werden, dass eine Verbesserung der Empfängerempfindlichkeit bei gegebener Datenrate (gleichbedeutend mit einer Reduzierung des SINR-Schwellenwerts) signifikante Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Netzes besitzt. Dieser Aspekt wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht nähert untersucht.

Auswirkungen auf  
die PDR im  
interferenzfreien Fall

Abbildung 62 zeigt die Auswirkungen der bei der Übertragung eines Frames verwendeten Datenrate auf die Packet Delivery Rate (PDR) im interferenzfreien Fall für Sendeleistungen  $P_t = 23$  dBm und  $P_t = 30$  dBm in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen sendendem und empfangendem Fahrzeug. Der interferenzfreie Fall offenbart eine signifikante Verschlechterung der Zuverlässigkeit der Frameübertragung mit zunehmender Datenrate, die mit einer Reduzierung der erzielbaren Kommunikationsreichweite einhergeht.

Auswirkungen auf  
die Channel Busy  
Time

Da die verwendete Datenrate maßgeblich die Belegungsdauer des gemeinsam genutzten Übertragungsmediums beeinflusst, ist eine Erhöhung der Datenrate mit einer Entlastung des Netzes verbunden. Abbildung 63 verdeutlicht diesen Effekt anhand der aus verschiedenen Datenraten resultierenden Channel Busy Times für beide untersuchten Sendeleistungen  $P_t$  und alle vier untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$ , gleichbedeutend mit Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  zwischen 300 und 1350 Nachrichten/km·s. Dargestellt sind die

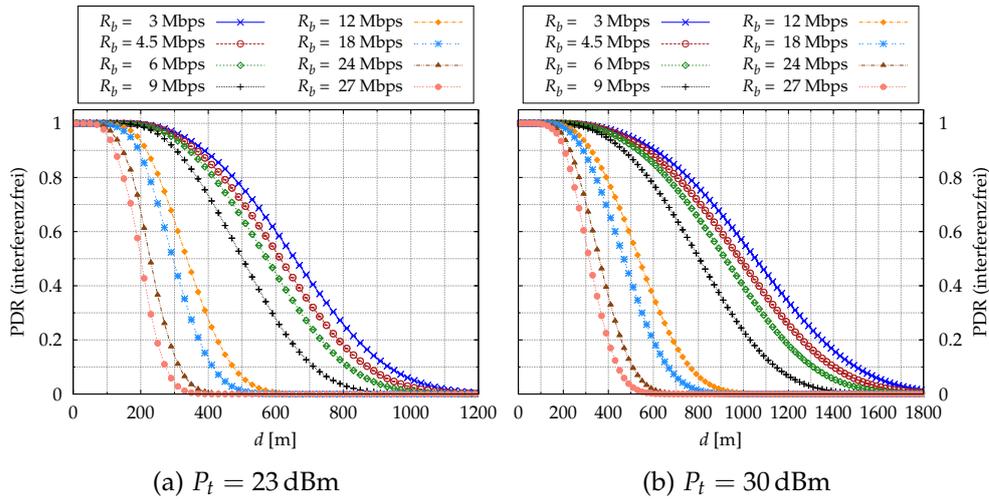


Abbildung 62: PDR im interferenzfreien Fall in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten  $R_b$  bei mittlerer und hoher Sendeleistung  $P_t$ . Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Abszissen.

auf den Standard-Schwellenwert in Höhe von  $-85$  dBm bezogene Channel Busy Time  $\gamma_{def}$  sowie die auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogene Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$ .

Für alle gezeigten Konfigurationen ist erkennbar, dass eine Erhöhung der Datenrate mit einer signifikanten Verringerung der Channel Busy Time einhergeht, während eine zu geringe Datenrate im Falle hoher Kommunikationsdichten zu ausgeprägten Überlastsituationen führen kann.

Die Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  entspricht der empirischen Wahrscheinlichkeit, dass der Carrier-Sense-Mechanismus einer Station zu einem zufälligen Betrachtungszeitpunkt ein belegtes Übertragungsmedium vorfindet. Eine Erhöhung der Datenrate bewirkt demnach auch eine Reduzierung der im Rahmen des CSMA-Medienzugriffs entstehenden Verzögerungen, welche durch die Channel Access Time (CAT) quantifiziert werden.

Abbildung 64 zeigt das arithmetische Mittel  $\bar{T}_{ca}$  der CAT in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$  für die verschiedenen untersuchten Sendeleistungen und Verkehrsdichten. Wird bei Vorhandensein einer hohen Kommunikationsdichte eine zu geringe Datenrate verwendet, kommt es zu exzessiven Verzögerungen beim Kanalzugriff, die durch eine Erhöhung der Datenrate vermieden werden können.

Übersteigt die CAT die Erzeugungsverzögerung, so wird der zu übertragende Frame verworfen, d. h. es treten Frame Drops auf. Im Falle hoher Kommunikationsdichten kann, wie Abbildung 65 veranschaulicht, eine Erhöhung der Datenrate Frame Drops verhindern, indem das Übertragungsmedium entlastet und die resultierenden CATs verringert werden. Bereits bei einer im Vergleich zur üblicherweise verwendeten Standard-Datenrate  $R_b = 6$  Mbps nur geringfügig erhöhten Datenrate von  $R_b = 9$  Mbps treten auch für die höchste untersuchte Kommunikationsdichte von  $\rho_{com} = 3169$  Frames/s

*Auswirkungen auf die Channel Access Time*

*Auswirkungen auf die Häufigkeit von Frame Drops*

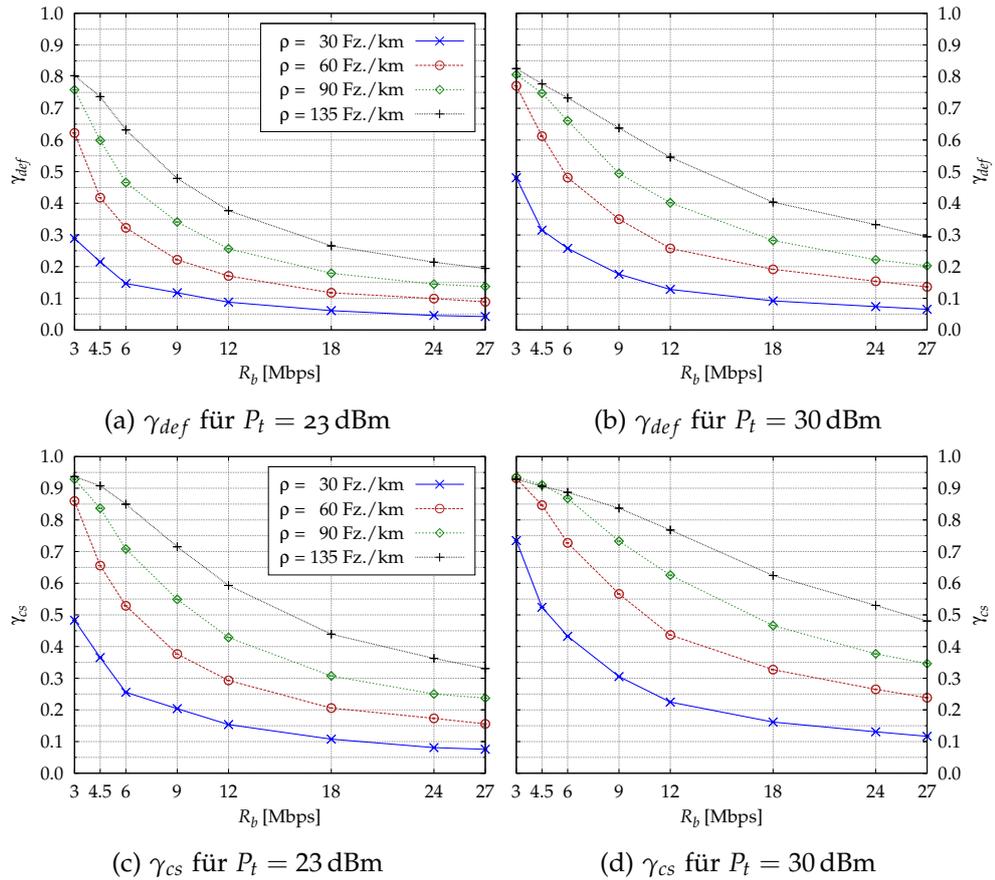


Abbildung 63: Mittlere auf den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85$  dBm und den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm bezogene Channel Busy Times  $\gamma_{def}$  (a,b) und  $\gamma_{cs}$  (c,d) in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$  bei mittlerer und hoher Sendeleistung  $P_t$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $300$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 1350$  Nachrichten/km·s.

( $\rho = 135$  Fz./km,  $P_t = 30$  dBm) keinerlei Frame Drops auf, wie Abbildung 65b erkennen lässt.

Eine Erhöhung der Datenrate bewirkt demnach einerseits eine signifikante Verringerung der PDR im interferenzfreien Fall und damit eine Reduzierung der maximal erzielbaren Kommunikationsreichweite, andererseits führt diese Maßnahme jedoch zu einer Entlastung des Netzes, die sich in einer Reduzierung von Channel Busy Time, Channel Access Time und Frame Drop Rate widerspiegelt.

Darüber hinaus ist von besonderem Interesse, wie sich die verwendete Datenrate auf die Entstehung und Häufigkeit von Framekollisionen auswirkt. Zur Untersuchung dieser Frage ist eine Gegenüberstellung von PDR, PDR im interferenzfreien Fall und Kollisionsrate in Verbindung mit einer Unterscheidung zwischen durch Hidden Stations verursachten Kollisionen und CSMA-Kollisionen zweckmäßig, wie sie Abbildung 66 für die geringste und die höchste durch den Standard definierte Datenrate beinhaltet. Grundlage der in Abbildung 66 gezeigten Simulationsergebnisse ist die höchste in diesem

Zusammenhänge  
zwischen Datenrate,  
Framekollisionen  
und PDR

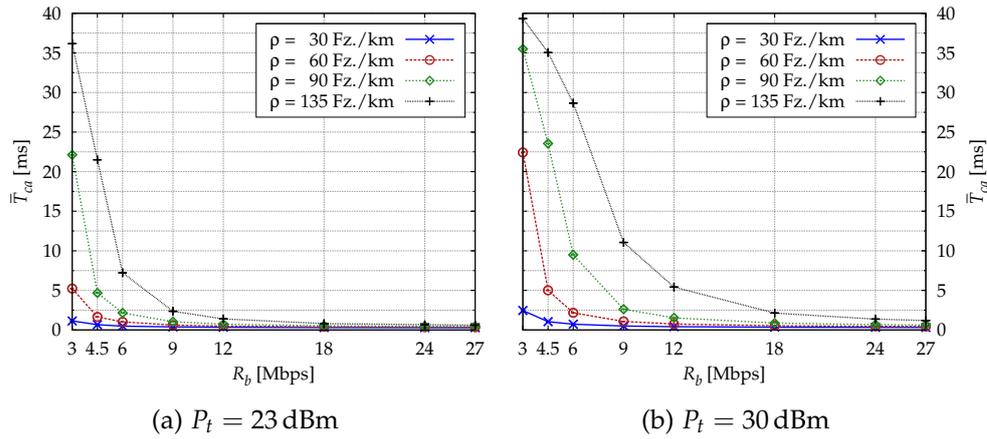


Abbildung 64: Arithmetisches Mittel der Channel Access Time  $\bar{T}_{ca}$  in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und Nachrichtenerzeugungsdichten  $300 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  bei mittlerer (a) und hoher (b) Sendeleistung  $P_t$ .

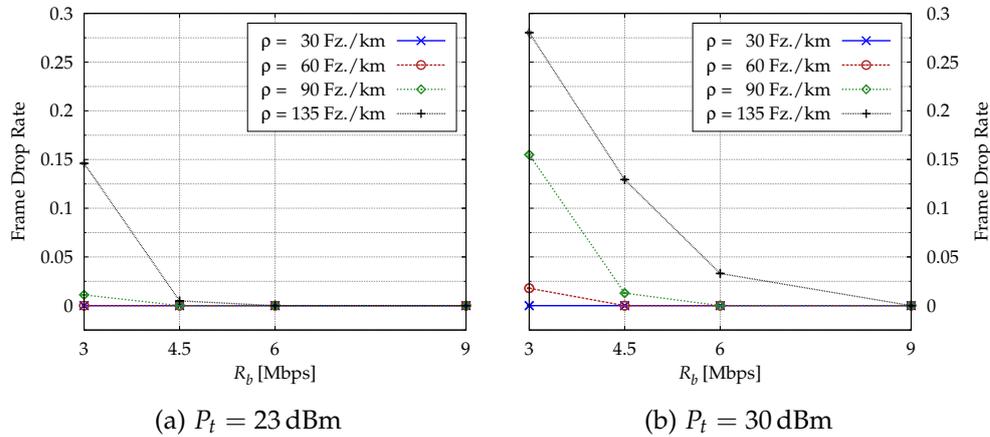


Abbildung 65: Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Datenrate  $R_b$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  bei mittlerer (a) und hoher (b) Sendeleistung  $P_t$  und Nachrichtenerzeugungsdichten  $300 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ . Für höhere als die gezeigten Datenraten treten keine Frame Drops auf.

Abschnitt untersuchte Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  bei einer Sendeleistung  $P_t = 23 \text{ dBm}$ , gleichbedeutend mit einer Kommunikationsdichte  $\rho_{com} = 1974 \text{ Frames/s}$  (vgl. Tabelle 22).

Die geringste untersuchte Datenrate ( $R_b = 3 \text{ Mbps}$ , siehe Abbildung 66a) bewirkt, wie bereits zu Beginn des Abschnitts erläutert wurde, eine größtmögliche PDR im interferenzfreien Fall, da Frames bereits bei sehr geringer Empfangsleistung erfolgreich dekodiert werden können ( $P_{r,th} = -93 \text{ dBm}$ , vgl. Tabelle 23). Gleichzeitig verursacht die damit verbundene lange Frame-Übertragungsdauer eine sehr hohe Netzlast und damit ein sehr hohes Interferenzniveau, welches sich in hohen Kollisionsraten widerspiegelt. Für  $d = 150 \text{ m}$  beträgt die PDR bereits lediglich 50%, da trotz geringer Entfernung jeder

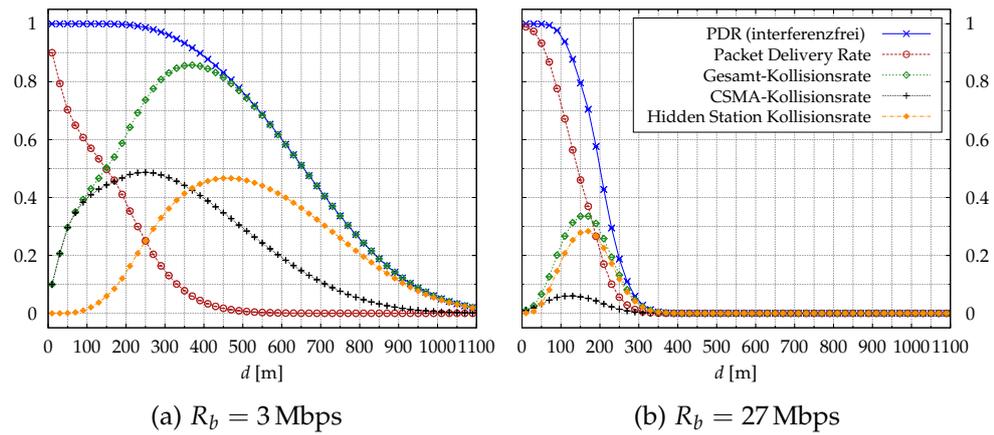


Abbildung 66: PDR im interferenzfreien und interferenzbehafteten Fall sowie Kollisionsraten in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei geringster (a) und höchster (b) Datenrate  $R_b$  mit  $P_t = 23$  dBm,  $\rho = 135$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km.s.

zweite Frame einer Kollision zum Opfer fällt. Sowohl CSMA- als auch Hidden-Station-Kollisionen üben dabei einen erheblichen Einfluss aus. Im Zusammenhang mit der robusten Reichweite gegen Hidden Stations treten Hidden-Station-Kollision in signifikanter Häufigkeit allerdings erst in deutlich größerer Entfernung als CSMA-Kollisionen auf. Zu beachten ist darüber hinaus, dass die hier gezeigte Konfiguration mit  $R_b = 3$  Mbps Frame Drops in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit hervorruft (vgl. Abbildung 65a), die aus Abbildung 66 nicht erkennbar sind.

Bei Verwendung der höchsten untersuchten Datenrate ( $R_b = 27$  Mbps, siehe Abbildung 66b) ergibt sich ein hiervon grundlegend abweichendes Verhalten des Netzes. Da ein erfolgreicher Frameempfang unter diesen Bedingungen eine deutlich höhere Empfangsleistung erfordert ( $P_{r,th} = -75$  dBm, vgl. Tabelle 23), zeigen die Simulationsergebnisse im Distanzverlauf einen sehr schnellen Abfall der PDR im interferenzfreien Fall. Gleichzeitig bewirkt die deutlich reduzierte Frame-Übertragungsdauer eine Entlastung des Netzes und eine erhebliche Verringerung der Kollisionshäufigkeit. CSMA-Kollisionen spielen hier in Anbetracht ihrer geringen Häufigkeit im Vergleich zu Hidden-Station-Kollisionen lediglich eine untergeordnete Rolle. Die resultierende PDR und damit die Zuverlässigkeit der Frameübertragung können so für geringe Entfernungen zwischen Sender und Empfänger bis ca. 130 m deutlich verbessert werden.

Zur Beantwortung der Frage, welche Konfiguration in Abhängigkeit der gegebenen Netzlast die Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs optimiert, kann wiederum die Message Lifetime herangezogen werden. Abbildung 67 zeigt die mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  im Distanzverlauf für sämtliche untersuchten Datenraten  $R_b$  und Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  bei einer Sendeleistung  $P_t = 23$  dBm. Die zugehörigen Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  betragen zwischen  $439$  Frames/s und  $1974$  Frames/s (vgl. Tabelle 22).

*Auswirkungen auf  
die Message Lifetime  
für  $P_t = 23$  dBm*

Bei geringer Erzeugungs- und Kommunikationsdichte, wie sie Grundlage der in Abbildung 67a dargestellten Ergebnisse ist, bewirken geringe Datenraten aufgrund der in diesem Fall überwiegenden Pfadverlustlimitierung des Netzes kleinstmögliche Message Lifetimes und damit eine größtmögliche Zuverlässigkeit der Frameübertragung. Interessanterweise führt bereits bei dieser vergleichsweise geringen Netzlast eine Konfiguration mit  $R_b = 6$  Mbps zu besseren Ergebnissen als  $R_b = 3$  Mbps oder  $R_b = 4,5$  Mbps, da mit der höheren Datenrate nur unwesentlich höhere Anforderungen an den Signal-Störabstand verbunden sind (vgl. Tabelle 23).

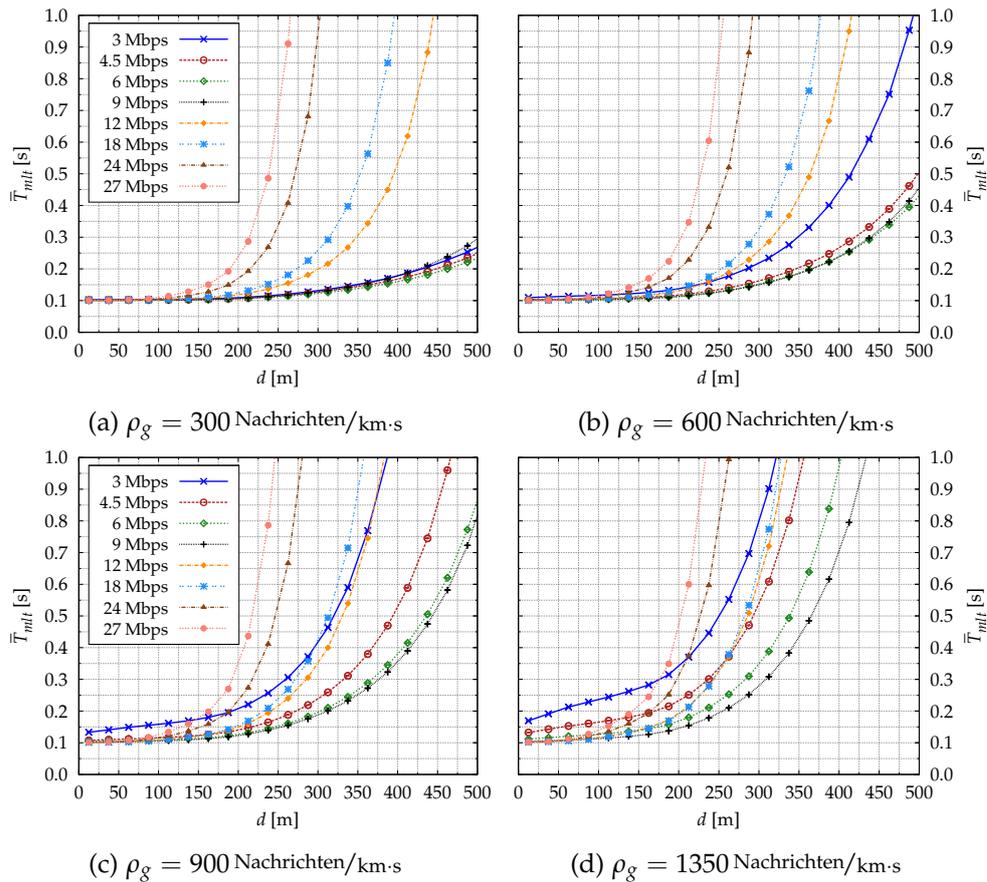


Abbildung 67: Mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mtl}$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten  $R_b$  und Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $P_t = 23$  dBm.

Mit zunehmender Netzlast wächst, wie bereits in den vorherigen Abschnitten erläutert wurde, der Einfluss der Interferenzlimitierung auf die Performance des VANETs. Bereits bei mittlerer Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 600$  Nachrichten/km·s (siehe Abbildung 67b), d. h. für  $\rho_{com} = 877$  Frames/s, führt die geringste Datenrate  $R_b = 3$  Mbps interferenzbedingt zu einer erheblichen Performanzverschlechterung im Vergleich zu der auch hier bestgeeigneten Konfiguration mit  $R_b = 6$  Mbps.

Ein weiterer Anstieg der Nachrichtenerzeugungsdichte bewirkt aufgrund zunehmender Interferenzen eine fortschreitende Verschlechterung der Perfor-

manz geringer Datenraten, sodass eine Erhöhung der Datenrate zweckmäßig ist. Für die beiden höchsten untersuchten Erzeugungsdichten resultieren aus Konfigurationen mit  $R_b = 9$  Mbps bestmögliche Ergebnisse, wie die Abbildungen 67c und 67d offenbaren. Ein deutlicher Performanzgewinn im Vergleich zur Standard-Datenrate  $R_b = 6$  Mbps ergibt sich jedoch nur im Fall  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s, d. h. für  $\rho_{com} = 1974$  Frames/s (siehe Abbildung 67d). Eine darüber hinausgehende Anhebung der Datenrate führt hier aufgrund zu hoher Anforderungen an die Signalqualität nicht zu einer weiteren Verbesserung.

*Auswirkungen auf  
die Message Lifetime  
für  $P_t = 30$  dBm*

Die Bestimmung einer die Dienstgüte des Netzes optimierenden Datenrate hängt jedoch nicht nur von der gegebenen Nachrichtenerzeugungsdichte, sondern auch von der verwendeten Sendeleistung ab. Dies belegen die in Abbildung 68 dargestellten mittleren Message Lifetimes, die unter Verwendung der Sendeleistung  $P_t = 30$  dBm ermittelt wurden. Die zugehörigen Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  betragen hier zwischen  $704$  Frames/s und  $3169$  Frames/s (vgl. Tabelle 22).

Auch bei dieser hohen Sendeleistung resultieren aus Konfigurationen mit  $R_b = 6$  Mbps für die beiden geringsten untersuchten Nachrichtenerzeugungsdichten annähernd optimale Ergebnisse (siehe Abbildungen 68a und 68b). Allerdings können bereits für  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s, gleichbedeutend mit  $\rho_{com} = 2113$  Frames/s, durch eine Erhöhung der Datenrate auf  $R_b = 9$  Mbps signifikante Verbesserungen erzielt werden (siehe Abbildung 68c). Bemerkenswert ist dabei, dass diese Konfiguration für  $d > 200$  m sogar eine größere Zuverlässigkeit der Frameübertragung zur Folge hat als die in Abbildung 67c gezeigte Parametrierung mit  $P_t = 23$  dBm und  $R_b = 9$  Mbps.

Für die höchste untersuchte Erzeugungsdichte  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s führt diese Datenrate ebenfalls zu zufriedenstellenden Ergebnissen (siehe Abbildung 68d). Um die Zuverlässigkeit von Frameübertragungen aus dem sicherheitsrelevanten Nahbereich weiter zu verbessern, kann hier jedoch auch eine weitere Anhebung auf  $R_b = 18$  Mbps zweckmäßig sein. Aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Empfangsleistung verursacht diese Maßnahme allerdings eine Verschlechterung der Performanz für Übertragungen aus größerer Entfernung.

*Zusammenfassende  
Bewertung*

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die zur Frameübertragung verwendete Datenrate  $R_b$  von wesentlicher Bedeutung für die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs ist, da sie in bedeutendem Maße sowohl das Interferenzniveau im Netz als auch die erzielbare Kommunikationsreichweite beeinflusst. Während mit geringen Datenraten aufgrund des robusten Modulations- und Kodierschemas hohe Kommunikationsreichweiten im interferenzfreien Fall und somit bei überwiegender Pfadverlustlimitierung eine hohe Dienstgüte des Netzes verbunden sind, bewirkt eine Erhöhung der Datenrate eine Reduzierung von Interferenzen und damit eine Entlastung des Netzes. Grundsätzlich können daher bei hoher Kommunikationsdichte, gleichbedeutend mit einem interferenzlimitierten Zustand des Netzes, die Kollisionshäufigkeit verringert und die Zuverlässigkeit der Kommunikation verbessert werden, indem höhere Datenraten zur Übertragung verwendet werden.

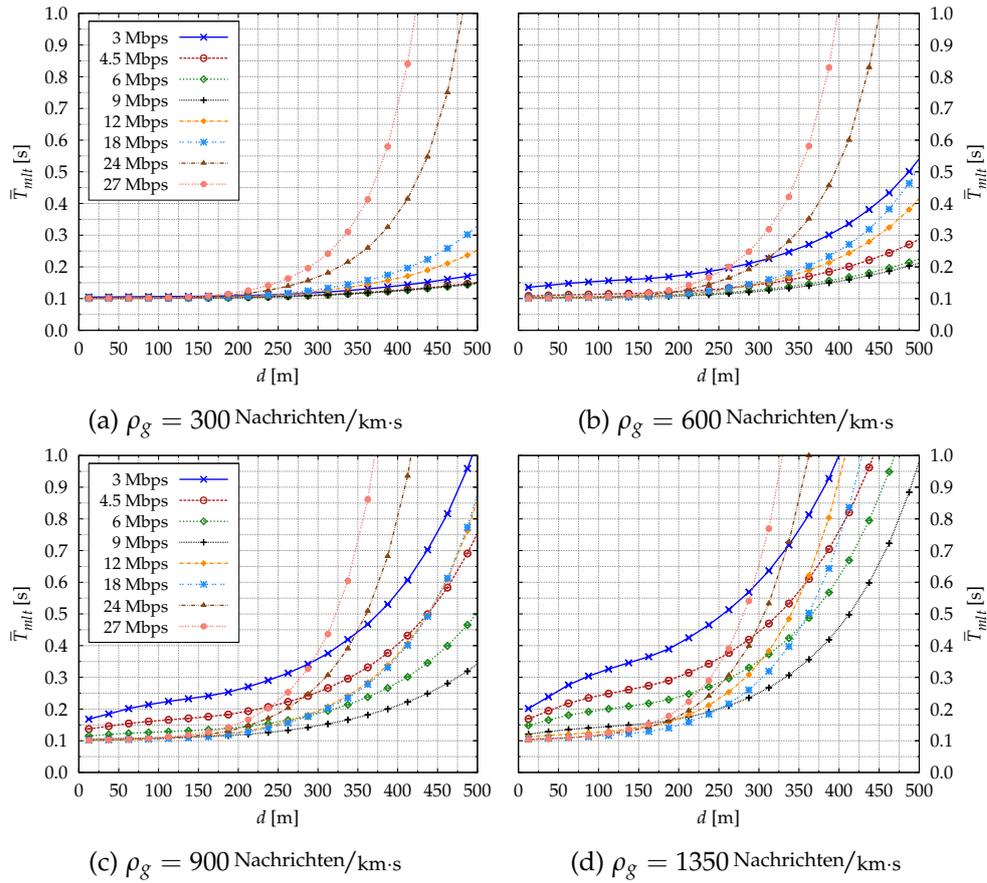


Abbildung 68: Mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger für verschiedene Datenraten  $R_b$  und Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $P_t = 30$  dBm.

Eine Erhöhung der Datenrate ist jedoch aufgrund der gleichzeitig steigenden Anforderungen an den Signal-Störabstand, die im Rahmen dieser Arbeit in Labortests quantifiziert worden sind (siehe Abschnitt 4.2), nur in begrenztem Umfang zweckmäßig.

Für sämtliche in diesem Abschnitt untersuchten Simulationskonfigurationen bewirkt eine Datenrate von  $R_b = 6$  Mbps, wie sie in VANETs üblicherweise als Standardwert herangezogen wird, mindestens akzeptable, teilweise sogar – bezogen auf den untersuchten Parameterraum – optimale Ergebnisse. Bei einer Sendeleistung von  $P_t = 23$  dBm resultiert aus Konfigurationen mit  $R_b = 6$  Mbps für Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g \leq 600$  Nachrichten/km·s eine bestmögliche an der Message Lifetime gemessene Dienstgüte, während für  $\rho_g \geq 900$  Nachrichten/km·s die Performanz des Netzes mit einer geringfügig höheren Datenrate  $R_b = 9$  Mbps optimiert werden kann. Bei einer größeren Sendeleistung von  $P_t = 30$  dBm, verbunden mit einem höheren Interferenzniveau im Netz, kann bei gleicher Nachrichtenerzeugungsdichte eine höhere Datenrate zweckmäßig sein, um das Netz weiter zu entlasten.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass nicht zu vernachlässigende Wechselwirkungen zwischen verwendeter Datenrate, Sendeleistung und

Nachrichtenerzeugungsrate bestehen. In diesem Zusammenhang legt eine vergleichende Betrachtung der aus den verschiedenen Simulationskonfigurationen resultierenden Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  (siehe Tabelle 22) nahe, dass der Wert der leistungsoptimierenden Datenrate unmittelbar von der im Netz gegebenen Kommunikationsdichte abhängt. Eine Konfiguration der Datenrate in Abhängigkeit der durch die Kommunikationsdichte quantifizierten Netzlast erscheint daher grundsätzlich zweckmäßig.

Die Simulationsergebnisse zeigen jedoch auch, dass durch eine netzlastabhängige Anpassung der Datenrate zwar die Dienstgüte periodischer Broadcasts in VANETs verbessert, Überlastsituationen jedoch nicht grundsätzlich vermieden werden können. Ergänzend müssen daher weitere Maßnahmen, wie beispielsweise eine netzlastabhängige Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate oder der Sendeleistung (vgl. hierzu Abschnitte 5.5.1 und 5.5.2), getroffen werden.

Gleichwohl hängt die Wirksamkeit einer Erhöhung der Datenrate bei hoher Netzlast von den damit verbundenen Anforderungen der verwendeten übertragungstechnischen Hardware an die Qualität des empfangenen Signals ab. Während sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnisse an der Leistungsfähigkeit herkömmlicher verfügbarer IEEE 802.11 Hardware orientieren, erscheint es erstrebenswert, in zukünftigen Studien die diesbezüglichen Auswirkungen von Verbesserungen der datenratenabhängigen Empfängerempfindlichkeit zu bewerten.

#### 5.5.4 Carrier-Sense-Schwellenwert

In diesem Abschnitt werden anhand einer Simulationsstudie die Auswirkungen unterschiedlicher Carrier-Sense-Schwellenwerte auf die Performanz des VANETs untersucht.

*Auswirkungen des  
Carrier-Sense-  
Schwellenwerts auf  
die Performanz des  
VANETs*

Wie in Abschnitt 4.5.2.4 bereits erläutert wurde, bezeichnet der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  die kumulative Empfangsleistung, ab welcher die Medienzugriffssteuerung einer Station ein belegtes Übertragungsmedium annimmt und somit keinen eigenen Übertragungsbeginn zulässt. Der Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  unterliegt ebenso wie der SINR-Schwellenwert  $SIR_{th}$  physikalischen Grenzen im Zusammenhang mit der verwendeten Übertragungstechnik und kann daher nicht beliebig klein gewählt werden.

Eine Reduzierung des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  hat – unter der Bedingung der übertragungstechnischen Realisierbarkeit – zur Folge, dass im Rahmen des Medienzugriffs empfindlicher auf laufende Übertragungen reagiert wird. Durch eine Erhöhung der mittleren Carrier-Sense-Reichweite berücksichtigt die Medienzugriffssteuerung auch Übertragungen aus größerer Entfernung. Daher kann angenommen werden, dass durch eine Reduzierung des Carrier-Sense-Schwellenwerts eine Minderung des negativen Einflusses von Hidden Stations auf die Netzperformance möglich ist.

Darüber hinaus ist jedoch auch denkbar, dass eine Erhöhung des Carrier-Sense-Schwellenwerts ein geeignetes Mittel zur Handhabung von Überlastsituationen darstellt, etwa um Frame Drops zu vermeiden und dabei gleichzeitig unter Nutzung von Physical Layer Capture (PLC) umliegenden Stationen

trotz zeitlich überlappender Übertragungen einen erfolgreichen Frameempfang zu ermöglichen.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich folgende Fragen:

- Welchen Einfluss hat der Carrier-Sense-Schwellenwert auf die Entstehung von CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen?
- Kann die Performanz des Netzes durch eine Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts verbessert werden und welche Form der Anpassung ist in Abhängigkeit der Netzlast zu diesem Zweck geeignet?

Diese Fragen werden im weiteren Verlauf dieses Abschnitts anhand einer Parameterstudie untersucht, deren Konfiguration Tabelle 24 zusammenfasst.

Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes
MAC-Framelänge	474 Bytes
$P_t$	23 dBm
$R_b$	6 Mbps
$SIR_{th}$	9 dB
$N$	-100 dBm
$CW$	15
Post-Backoff	deaktiviert
$\rho$	{30, 60, 90, 135} Fz./km
$f_g$	{10, 20} Nachrichten/s
$P_{r,cs}$	$-99 \text{ dBm} \leq P_{r,cs} \leq -65 \text{ dBm}$

Tabelle 24: Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$ .

Da vermutet werden kann, dass zwischen dem Zustand des Kommunikationsnetzes, insbesondere der gegebenen Netzlast, und den Auswirkungen einer Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts nicht zu vernachlässigende Wechselbeziehungen bestehen, werden die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen bei unterschiedlicher Netzlast durchgeführt. Aus den untersuchten Verkehrsdichten  $\rho$  und Nachrichtenerzeugungsraten  $f_g$  resultieren Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g = f_g \cdot \rho$  zwischen  $\rho_g = 300 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  und  $\rho_g = 2700 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ . Unter Berücksichtigung der Carrier-Sense-Reichweite von  $d_{cs} = 731,1 \text{ m}$  ergeben sich (nach Rundung) Kommunikationsdichten zwischen  $\rho_{com} = 439 \text{ Frames/s}$  und  $\rho_{com} = 3948 \text{ Frames/s}$ , wie Tabelle 25 entnommen werden kann.

Besondere Aufmerksamkeit wird im Verlauf dieses Abschnitts dem für die Dienstgüte des Netzes besonders relevanten Auftreten von Frame Drops und Kollisionen gewidmet. Dabei wird wiederum zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen unterschieden, um einen möglichst exakten Einblick in die netzlastabhängigen Auswirkungen unterschiedlicher Carrier-Sense-Schwellenwerte zu erhalten. Details zu dieser Unterscheidung können den Abschnitten 4.4.1 und 4.5.2.6 entnommen werden.

$f_g$ [Frames/s]	$\rho_{com}$ [Frames/s]			
	$\rho = 30 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 60 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 90 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 135 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$
10	438,7	877,3	1316,0	1974,0
20	877,3	1754,6	2631,9	3947,9

Tabelle 25: Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen des Carrier-Sense-Schwellenwerts untersuchten Simulationskonfigurationen.

Auswirkungen auf  
die Häufigkeit von  
Frame Drops

Wie die Simulationsergebnisse aus Abbildung 69 für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  und Nachrichtenerzeugungsraten  $f_g$  zeigen, wirkt sich der Carrier-Sense-Schwellenwert bei hoher Netzlast unmittelbar auf die Frame Drop Rate aus.

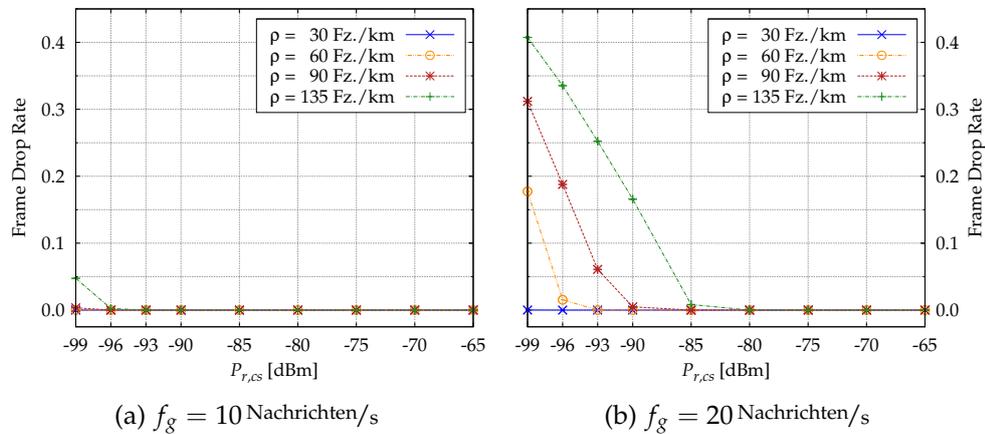


Abbildung 69: Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  und Erzeugungsraten  $f_g$ .

Wird mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s die kleinere der beiden untersuchten Nachrichtenerzeugungsraten verwendet, so treten nur für  $P_{r,cs} = -99$  dBm und  $\rho = 135 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$  nennenswerte Frame Drops in vergleichsweise geringer Häufigkeit auf (siehe Abbildung 69a). Für  $f_g = 20$  Nachrichten/s hingegen führen kleinere Carrier-Sense-Schwellenwerte bei mittlerer und hoher Verkehrsdichte zu inakzeptabel hohen Frame Drop Rates (siehe Abbildung 69b). Durch Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwertes wird die Frame Drop Rate maßgeblich reduziert, sodass für  $P_{r,cs} \geq -80$  dBm sogar im Falle der höchsten untersuchten Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 2700$  Nachrichten/km·s, gleichbedeutend mit einer Kommunikationsdichte in Höhe von  $\rho_{com} = 3948$  Frames/s, keine Frame Drops auftreten.

Aufgrund der erhöhten Gesamtzahl übertragener Frames ist eine Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwertes jedoch mit einer Erhöhung des Interferenzniveaus verbunden. Zur umfassenden Bewertung der Performanz des Netzes ist es daher erforderlich, die Auswirkungen von Änderungen des

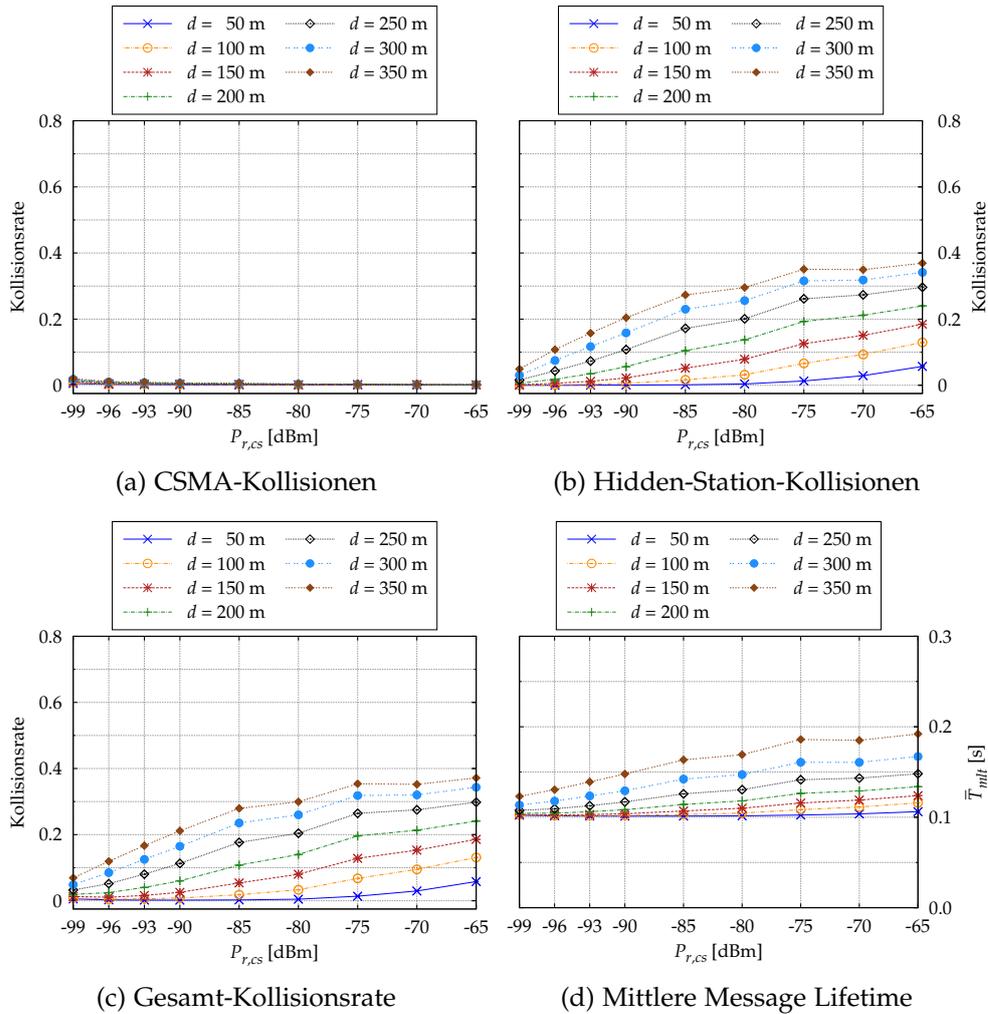


Abbildung 70: Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei geringer Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km $\cdot$ s mit  $\rho = 30$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Carrier-Sense-Schwellenwerts auf die Entstehung von Framekollisionen zu betrachten.

Abbildung 70 zeigt zunächst für die geringste hier untersuchte Nachrichtenerzeugungsdichte von  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km $\cdot$ s und eine Sendeleistung von  $P_t = 23$  dBm die von der Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger abhängigen Kollisionsraten sowie die mittlere Message Lifetime als Funktion des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$ . Aus dieser Konfiguration resultiert eine Kommunikationsdichte von  $\rho_{com} = 439$  Frames/s (siehe Tabelle 25).

Bei geringer Netzlast, wie sie im gezeigten Beispiel gegeben ist, kann der Einfluss von CSMA-Kollisionen gegenüber dem Einfluss von Hidden-Station-Kollisionen vollständig vernachlässigt werden, wie die Abbildungen 70a und 70b deutlich erkennen lassen. Eine Anhebung von  $P_{r,cs}$  ist wegen der daraus resultierenden Reduzierung der Carrier-Sense-Reichweite mit einem signifikanten Anstieg der Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen ver-

*Auswirkungen auf  
Framekollisionen  
und Message  
Lifetime bei geringer  
Netzlast*

bunden, sodass eine Minimierung von  $P_{r,cs}$  eine Minimierung der Gesamtkollisionsrate und somit eine Optimierung der Zuverlässigkeit des Netzes bewirkt, wie Abbildung 70c veranschaulicht. Obwohl eine Verringerung von  $P_{r,cs}$  eine Erhöhung der Kanalzugriffszeit zur Folge hat, zeigt Abbildung 70d, dass mit einer Minimierung von  $P_{r,cs}$  bei geringer Netzlast auch eine Minimierung der Message Lifetime einhergeht.

*Auswirkungen bei erhöhter Netzlast*

Bei höherer Netzlast hingegen, wie sie Grundlage der in Abbildung 71 gezeigten Ergebnisse mit  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s und  $\rho_{com} = 1316$  Frames/s ist, treten bei Verwendung kleiner Carrier-Sense-Schwellenwerte CSMA-Kollisionen in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit auf (siehe Abbildung 71a). Wird der Schwellenwert angehoben, sinkt die Anzahl konkurrierender Stationen innerhalb der Carrier-Sense-Reichweite und damit die Wahrscheinlichkeit von CSMA-Kollisionen, während die Wahrscheinlichkeit von Hidden-Station-Kollisionen steigt. Im Zusammenhang mit der robusten Reichweite gegenüber Hidden Stations profitieren Übertragungen aus geringer Entfernung besonders stark von diesem Effekt.

Da im Rahmen kooperativer Sicherheitsanwendungen eine hohe Zuverlässigkeit insbesondere für geringe Entfernungen anzustreben ist, kann für  $P_{r,cs} = -93$  dBm von einer annähernd optimalen Konfiguration ausgegangen werden, denn diese ist für  $d \leq 200$  m mit der geringsten Gesamtkollisionsrate sowie der geringsten mittleren Message Lifetime verbunden, wie den Abbildungen 71c und 71d entnommen werden kann.

*Auswirkungen bei hoher Netzlast*

Die in Abbildung 72 dargestellten Ergebnisse für  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s und  $\rho_{com} = 1974$  Frames/s veranschaulichen, dass sich der beobachtete Trend mit steigender Netzlast fortsetzt: Der Einfluss von CSMA-Kollisionen nimmt zwar zu, dennoch kann durch eine weitere Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  die Häufigkeit von CSMA-Kollisionen bis zur Vernachlässigbarkeit reduziert werden. Trotz einer erhöhten Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen können so die Gesamtkollisionsrate und die Message Lifetime für Übertragungen aus geringer Entfernung verringert werden.

Für  $P_{r,cs} > -90$  dBm wird die Performanzverbesserung, die in Bezug auf Übertragungen aus dem unmittelbaren Nahbereich um den Empfänger erzielbar ist, jedoch bereits begleitet von einer signifikanten Zunahme der Häufigkeit von Kollisionen für Übertragungen aus Entfernungen  $d \geq 100$  m, sodass eine weitere Anhebung des Schwellenwerts auch bei der hier gegebenen hohen Netzlast nicht zweckmäßig erscheint.

*Auswirkungen bei extrem hoher Netzlast*

Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang die Frage von Interesse, ob bei noch höherer, d.h. bei extrem hoher Netzlast die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung durch eine weitere Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwerts effektiv verbessert werden kann. In Abbildung 73 sind daher Gesamtkollisionsraten und Message Lifetimes in Abhängigkeit des Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  für stark überlastete Netzkonfigurationen mit Erzeugungsdichten von 1800 und 2700 Nachrichten/km·s bei einer Erzeugungsrate von  $f_g = 20$  Nachrichten/s dargestellt. Aus diesen Konfigurationen resultieren Kommunikationsdichten in Höhe von 2632 Frames/s bzw. 3948 Frames/s.

Für Übertragungen aus geringer Entfernung kann auch hier eine Reduzierung von Kollisionsrate und Message Lifetime erzielt werden, indem der

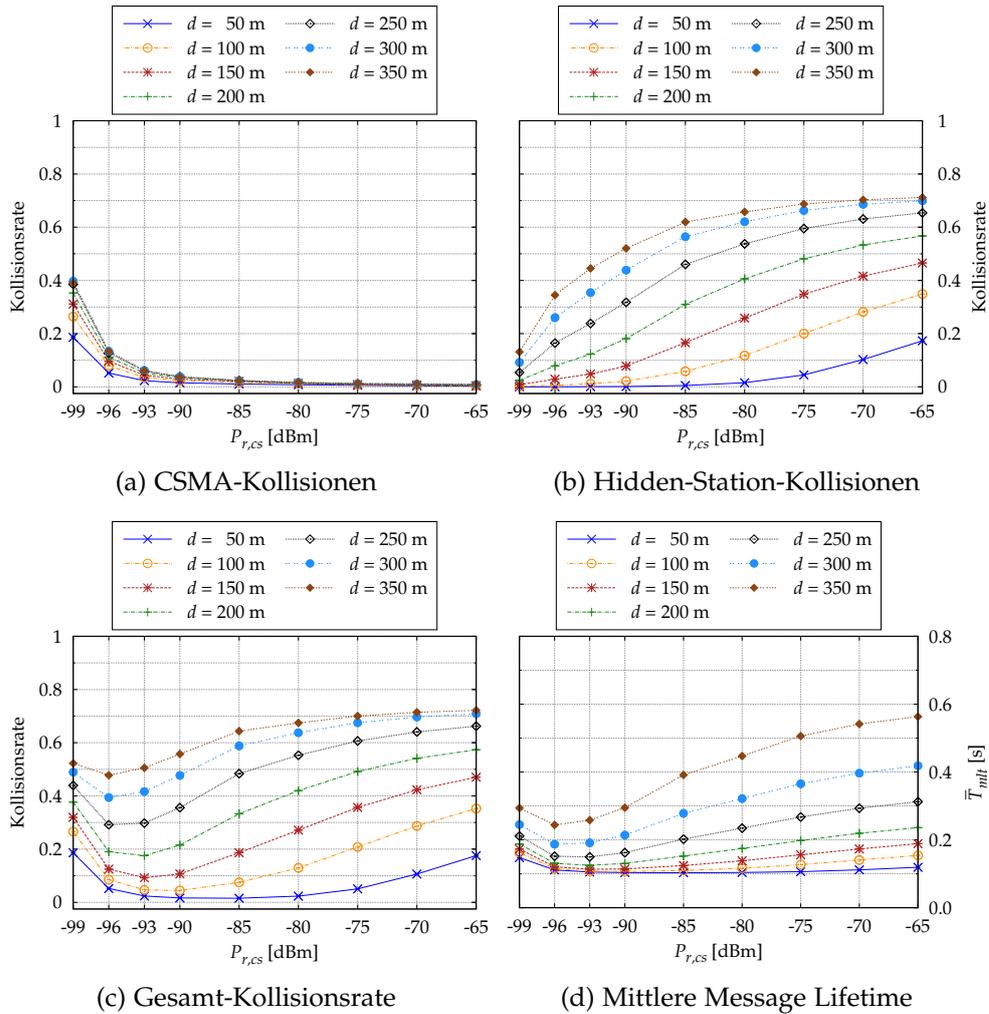


Abbildung 71: Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s mit  $\rho = 90$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Carrier-Sense-Schwellenwert für  $\rho = 90$  Fz./km und  $\rho = 135$  Fz./km bis auf  $P_{r,cs} = -85$  dBm bzw.  $P_{r,cs} = -80$  dBm heraufgesetzt wird. Eine signifikante Verbesserung der Message Lifetime ist allerdings nur in dem Parameterbereich beobachtbar, in welchem auch die Anzahl von Frame Drops reduziert wird, wie ein Vergleich der Abbildung 69b mit den Abbildungen 73c und 73d erkennen lässt.

Auch dieser Performancegewinn wirkt sich allerdings zu Lasten der Kollisionsrate und damit der Zuverlässigkeit von Übertragungen aus größeren Entfernungen aus. Wegen der zunehmenden Kollisionswahrscheinlichkeit verursacht eine Erhöhung des Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  außerdem ein starkes Anwachsen der Message Lifetimes für größere Entfernungen. Stark ausgeprägte Überlastsituationen, wie sie den hier untersuchten Netzkonfigurationen zugrunde liegen, können somit allein durch eine Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts nicht zufriedenstellend bewältigt werden.

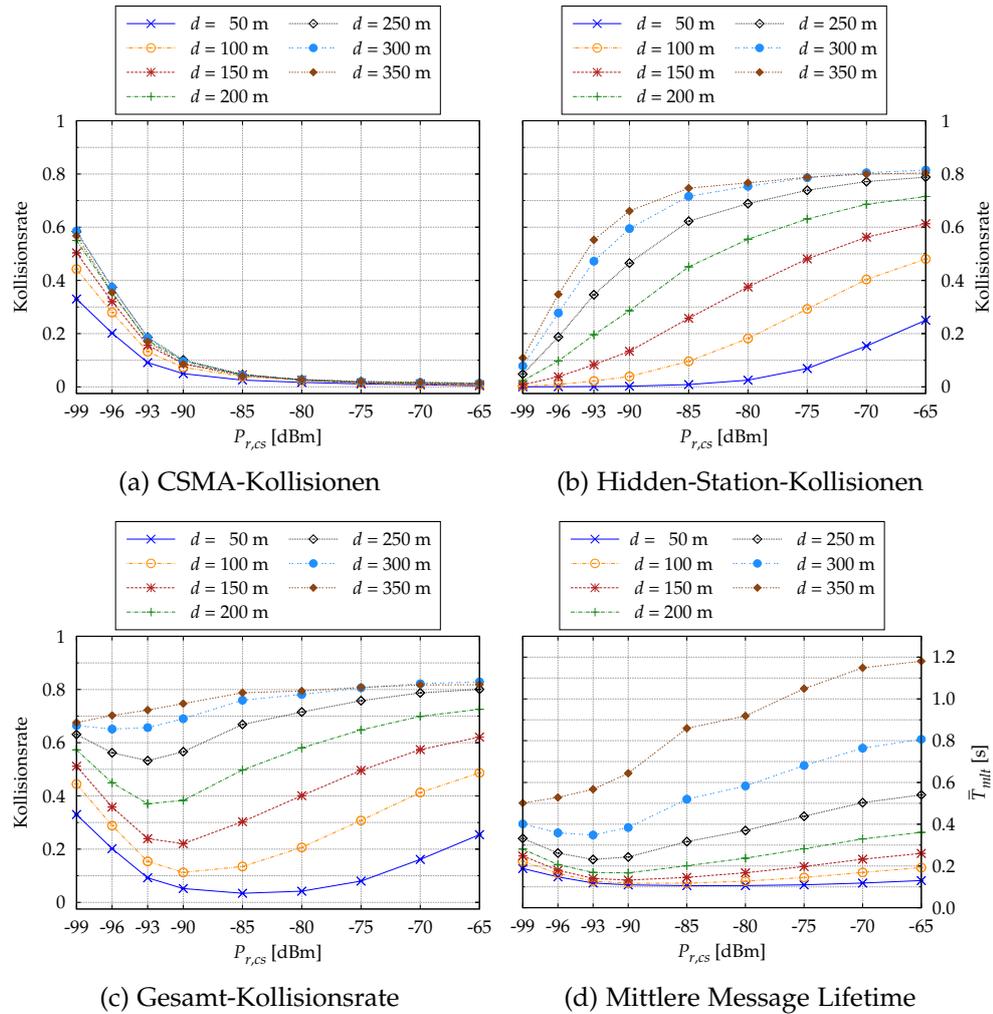


Abbildung 72: Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km $\cdot$ s mit  $\rho = 135$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Zusammenfassende  
Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch eine netzlastabhängige Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts eine Verbesserung der Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs möglich ist. Grundsätzlich ist dabei mit wachsender Netzlast eine Anhebung des Schwellenwerts zweckmäßig, welche sich allerdings nur in engen Grenzen und insbesondere für geringe Distanzen zwischen Sender und Empfänger positiv auf die Zuverlässigkeit der Informationsübermittlung auswirkt. Gleichwohl kann eine Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwerts dazu beitragen, in Überlastsituationen eine ausreichende Zuverlässigkeit für Frameübertragungen aus dem unmittelbaren Nahbereich um den Empfänger sicherzustellen.

Die Wirksamkeit der Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts zur Bewältigung von Überlastsituationen ist demnach begrenzt. Erforderlich sind zu diesem Zweck daher weitere Maßnahmen, etwa in Form einer Anpassung

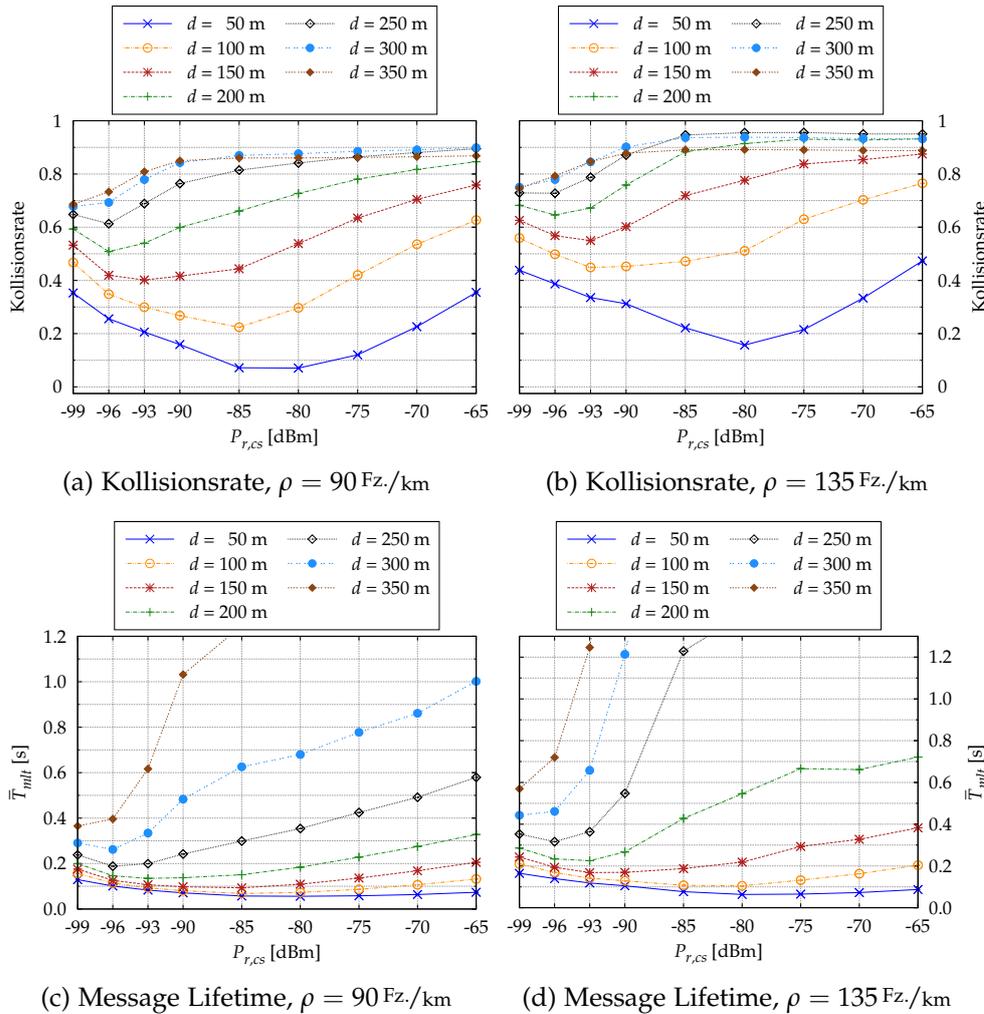


Abbildung 73: Gesamt-Kollisionsraten (a,b) sowie mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  (c,d) in Abhängigkeit des Carrier-Sense-Schwellenwerts  $P_{r,cs}$  bei sehr hohen Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g = 1800$  Nachrichten/km·s (a,c) und  $\rho_g = 2700$  Nachrichten/km·s (b,d) mit  $f_g = 20$  Nachrichten/s,  $P_t = 23$  dBm,  $R_b = 6$  Mbps,  $CW = 15$ .

der Nachrichtenerzeugungsrate oder der Sendeleistung, wie bereits in den Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 erläutert wurde.

### 5.5.5 Größe des Contention Windows

Der Binary Exponential Backoff (BEB) Algorithmus stellt ein wichtiges Mittel zur Überlaststeuerung bei Unicast-Kommunikation in herkömmlichen IEEE 802.11 WLANs dar: Infolge einer fehlgeschlagenen Frameübertragung wird die Größe des Contention Windows  $CW$  ausgehend von einem Anfangswert  $CW_{min}$  bis zu einem Maximalwert  $CW_{max}$  vergrößert, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen reduziert werden kann.

Wie in Abschnitt 2.2.4 bereits erläutert wurde, erlaubt der für Broadcast-Kommunikation genutzte unbestätigte Übermittlungsmodus von IEEE 802.11

*BEB-Algorithmus  
für Broadcasts nicht  
nutzbar*

bzw. ITS-G5 dem Sender keine Erkennung von Übertragungsfehlern, sodass der BEB-Algorithmus nicht angewendet werden kann. Periodisch ausgesendete Broadcast-Frames in VANETs, wie sie Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind, werden daher nicht wiederholt und grundsätzlich bei gleichbleibender Größe des Contention Windows mit  $CW = CW_{min}$  versendet.

*Anpassung des  
Contention  
Windows an die  
Netzlast*

Dennoch stellt die Größe des Contention Windows einen potentiell zur Handhabung von Überlastsituationen in VANETs nutzbaren Parameter dar. So ist beispielsweise denkbar, dass eine Anpassung des Contention Windows nicht infolge der Erkennung eines Übertragungsfehlers, sondern in Abhängigkeit der gegebenen Netzlast durchgeführt wird.

Ausgehend von diesen Überlegungen ergibt sich eine Reihe von Fragen, deren Beantwortung im Vorfeld der Entwicklung von Mechanismen zur Überlaststeuerung unverzichtbar ist:

- Auf welche Weise und in welchem Umfang beeinflusst die Größe des Contention Windows die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs?
- Welche Größe des Contention Windows ist geeignet, um eine möglichst hohe Zuverlässigkeit des Netzes zu erreichen und welchen Einfluss hat die gegebene Netzlast auf diese Frage?
- Ist es möglich, Überlastsituationen durch eine Anpassung der Größe des Contention Windows zu vermeiden oder die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Überlastfall zu verbessern?

Diese Fragen werden im Folgenden anhand einer Parameterstudie untersucht, deren zugrunde liegende Simulationskonfiguration Tabelle 26 zusammenfasst.

Parameter	Wert
Nachrichtenlänge (Payload)	400 Bytes
MAC-Framelänge	474 Bytes
$P_t$	23 dBm
$R_b$	6 Mbps
$P_{r,cs}$	-93 dBm
Post-Backoff	deaktiviert
$\rho$	{30, 60, 90, 135} Fz./km
$f_g$	{10, 20} Nachrichten/s
CW	{0, 1, 3, 7, 15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023}

Tabelle 26: Konfigurationsparameter der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Größe des Contention Windows CW.

Auch die folgenden Untersuchungen wurden bei unterschiedlicher Netzlast durchgeführt, da nicht zu vernachlässigende Wechselbeziehungen zwischen einer Anpassung der Größe des Contention Windows und der gegebenen Netzlast erwartet werden können. Die aus den verschiedenen Simu-

lationskonfigurationen resultierenden Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  können Tabelle 27 entnommen werden.

$f_g$ [Frames/s]	$\rho_{com}$ [Frames/s]			
	$\rho = 30 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 60 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 90 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$	$\rho = 135 \frac{\text{Fz.}}{\text{km}}$
10	438,7	877,3	1316,0	1974,0
20	877,3	1754,6	2631,9	3947,9

Tabelle 27: Kommunikationsdichten der im Rahmen der Simulationsstudie zu Auswirkungen der Größe des Contention Windows untersuchten Simulationskonfigurationen.

In Analogie zu den im vorangegangenen Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen zum Carrier-Sense-Schwellenwert ist davon auszugehen, dass die in diesem Abschnitt untersuchte Größe des Contention Windows die Häufigkeiten von Frame Drops und Kollisionen maßgeblich beeinflusst. Diesen für die Zuverlässigkeit des Netzes besonders bedeutsamen Performanzindikatoren widmen daher auch die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen besondere Aufmerksamkeit. Abbildung 74 zeigt für zwei verschiedene Erzeugungsraten  $f_g$  und vier verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  die mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows CW.

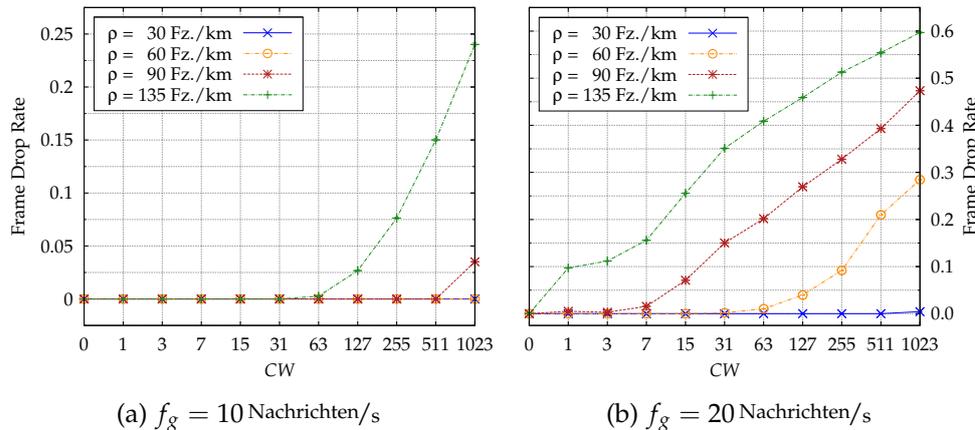


Abbildung 74: Mittlere Frame Drop Rate in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows CW für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  und Erzeugungsraten  $f_g$  mit Nachrichtenerzeugungsdichten  $300 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s} \leq \rho_g \leq 2700 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$ .

Die Darstellung veranschaulicht, dass sich die Größe des Contention Windows ab einem von der gegebenen Netzlast abhängigen Schwellenwert unmittelbar auf die Frame Drop Rate auswirkt. Während bei Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g \leq 600 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  unabhängig von CW keinerlei Frame Drops auftreten, werden bei  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  für  $CW > 63$  mit signifikanter Häufigkeit Frames verworfen (siehe Abbildung 74a). Bei sehr hoher Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g \geq 1800 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  können Frame Drops nur durch eine sehr geringe Größe des Contention Windows vermieden wer-

*Auswirkungen auf die Häufigkeit von Frame Drops*

den (siehe Abbildung 74b). Eine Anhebung von CW zur Handhabung von Überlastsituationen ist demnach ohne die Inkaufnahme von Frame Drops nur in begrenztem Rahmen möglich.

Auswirkungen auf  
die PDR

Abbildung 75 zeigt die netzlastabhängigen Auswirkungen des Contention Windows auf die Packet Delivery Rate (PDR) für die Nachrichtenerzeugungsrates  $f_g = 10$  Nachrichten/s und verschiedene Verkehrs- und Nachrichtenerzeugungsdichten.

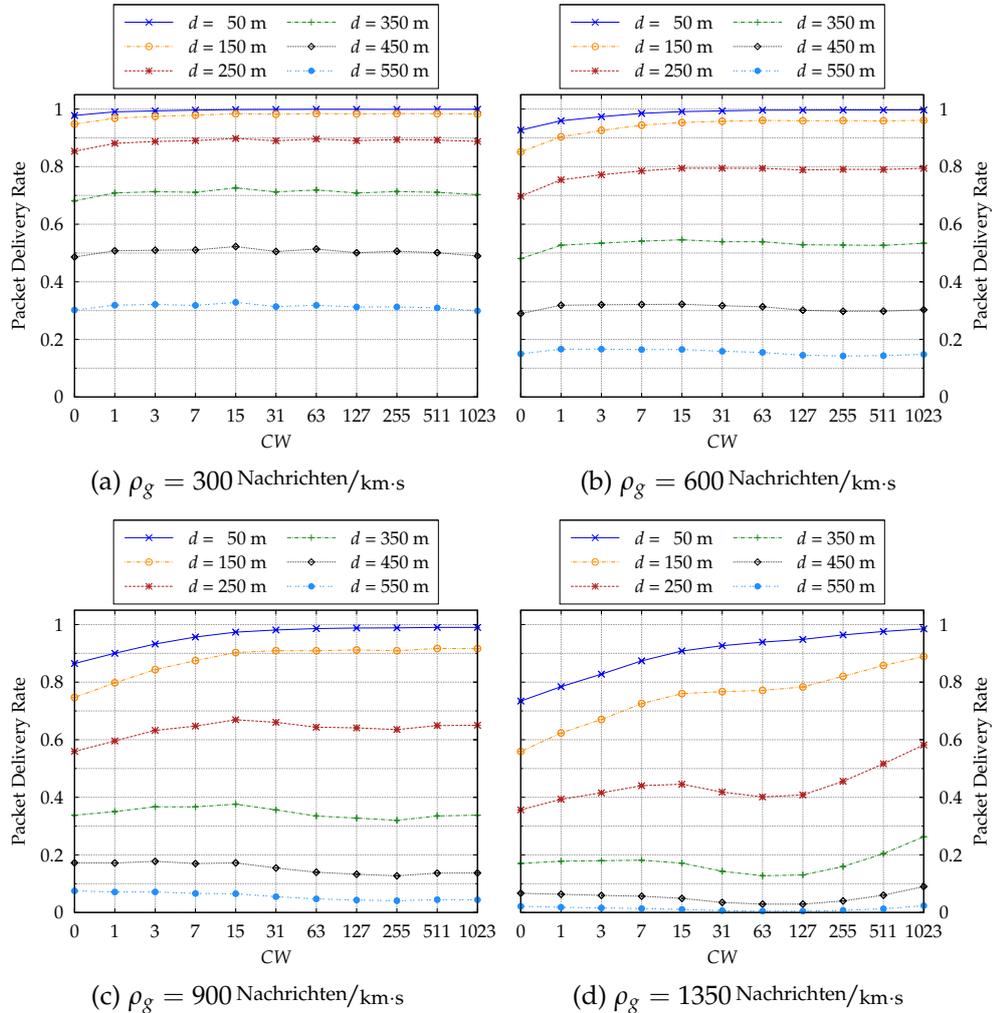


Abbildung 75: Packet Delivery Rate in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows CW für verschiedene Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  und Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $\rho = 30$  Fz./km (a),  $60$  Fz./km (b),  $90$  Fz./km (c),  $135$  Fz./km (d).

Bei geringer Netzlast hat die Größe des Contention Windows lediglich vernachlässigbaren Einfluss auf die PDR, wie Abbildung 75a für die Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 300$  Nachrichten/km·s verdeutlicht. Auch für  $CW = 0$ , gleichbedeutend mit einer Deaktivierung des dem CSMA/CA-Medienzugriff inhärenten Backoff-Mechanismus, ist hier nur eine geringfügige Verringerung der PDR um etwa drei Prozentpunkte im Vergleich zu größeren Contention Windows beobachtbar. Dieses Verhalten ist bemerkenswert, da auch bei dieser Netzkonfiguration für Entfernungen  $d \geq 250$  m Kollisionen mit

signifikanter Häufigkeit auftreten. Bei der unten folgenden Betrachtung der Kollisionswahrscheinlichkeiten wird dieser Aspekt daher noch einmal aufgegriffen.

Mit steigender Netzlast führt eine Vergrößerung des Contention Windows zwar zu einer Erhöhung der PDR, dies jedoch nur in sehr begrenztem Umfang. Für  $\rho_g = 600$  Nachrichten/km·s und  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s erzeugt eine Parametrierung mit  $CW = 15$  annähernd optimale Ergebnisse, während für  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s durch eine weitere Vergrößerung des Contention Windows eine geringfügige Erhöhung der PDR im Nahbereich erzielt werden kann, die sich jedoch zu Lasten von Übertragungen aus größerer Distanz auswirkt. Darüber hinaus offenbart Abbildung 75d, dass für  $CW \geq 127$  eine signifikante Verbesserung der Packet Delivery Rate eintritt, die jedoch mit dem Einsetzen von Frame Drops (vgl. Abbildung 74a) einhergeht. Da eine direkte Vergleichbarkeit somit nicht gegeben ist, kann hieraus nicht auf eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Frameübertragung geschlossen werden. Ohne Inkaufnahme von Frame Drops hingegen lassen die Ergebnisse nur begrenztes Potential einer Anpassung des Contention Windows zur Vermeidung von Framekollisionen erkennen.

Zur Erklärung der geringen Auswirkungen einer Vergrößerung des Contention Windows ist eine Betrachtung der beim Medienzugriff entstehenden Channel Access Times (CATs) zweckmäßig. Abbildung 76 veranschaulicht die Abhängigkeit des arithmetischen Mittels  $\bar{T}_{ca}$  der CAT von der Größe des Contention Windows für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$ , denen Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  zwischen 300 Nachrichten/km·s und 1350 Nachrichten/km·s sowie Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  zwischen 439 Frames/s und 1974 Frames/s entsprechen.

*Auswirkungen auf  
die Channel Access  
Time*

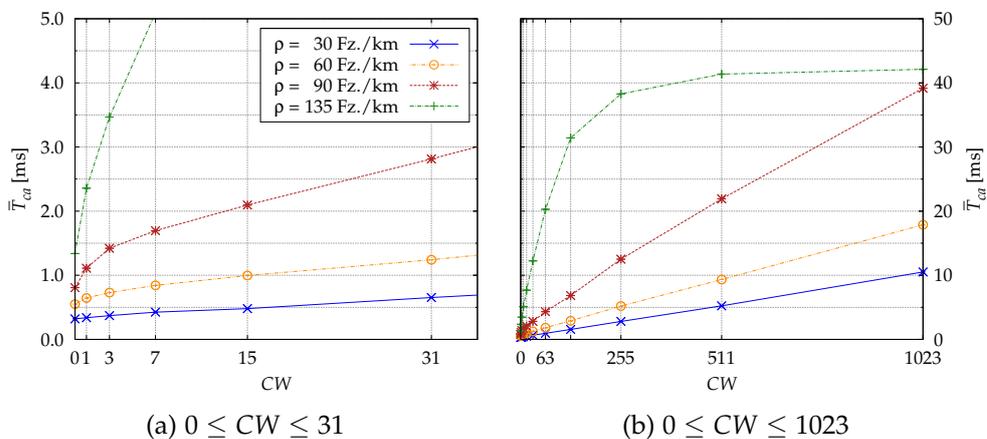


Abbildung 76: Mittlere Channel Access Time  $\bar{T}_{ca}$  in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows  $CW$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $300$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 1350$  Nachrichten/km·s und  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Deutlich erkennbar ist, dass die mittlere CAT fast im gesamten Parameterbereich annähernd linear mit der Größe des Contention Windows wächst. Abweichungen von diesem Verhalten sind lediglich für sehr geringe Größen des Contention Windows ( $CW < 7$ ) sowie für solche Konfigurationen festzustel-

len, die mit einer signifikanten Häufigkeit von Frame Drops verbunden sind. Dies ist hier für  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  (gleichbedeutend mit  $\rho_g = 1350 \text{ Nachrichten/km}\cdot\text{s}$  bzw.  $\rho_{com} = 1974 \text{ Frames/s}$ ) und  $CW > 63$  der Fall. Verursacht wird dieser Effekt durch die Tatsache, dass für einen verworfenen Frame keine CAT berechnet werden kann, sodass die Channel Access Time  $T_{ca}$  nach oben begrenzt wird durch die Erzeugungsverzögerung  $T_{gen}$ , wie bereits im Zusammenhang mit den Auswirkungen verschiedener Nachrichtenerzeugungsraten auf Seite 186 in Abschnitt 5.5.2 erläutert wurde.

Abbildung 77 zeigt anhand der aus den Simulationen ermittelten komplementären Verteilungsfunktion (CCDF) der CAT, dass sich mit steigender Netzlast und Größe des Contention Windows die Verteilung der CATs auch hier einer Gleichverteilung im Intervall  $[AIFS, T_{gen})$  annähert.

CCDF der Channel  
Access Time

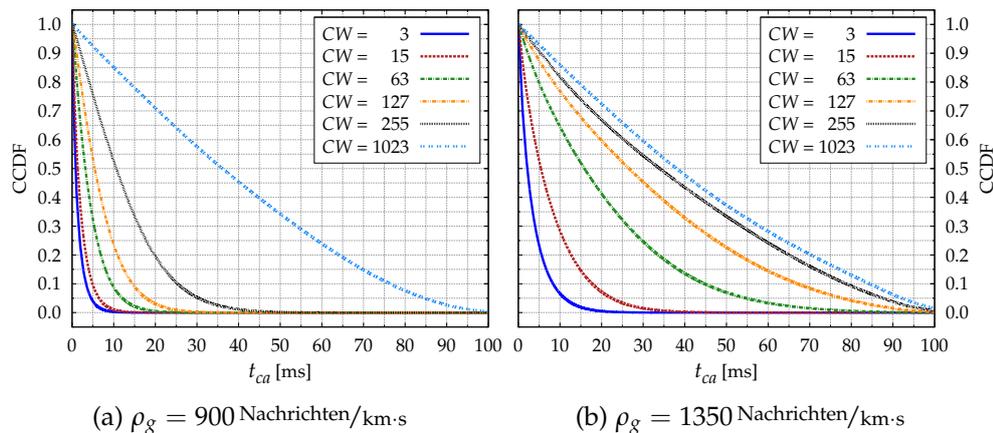


Abbildung 77: Komplementäre Verteilungsfunktion  $P(T_{ca} > t_{ca})$  (CCDF) der Channel Access Time ( $T_{ca}$ ) für verschiedene Größen des Contention Windows  $CW$  und Nachrichtenerzeugungsdichten  $\rho_g$  mit  $\rho = 90 \text{ Fz./km}$  (a) bzw.  $\rho = 135 \text{ Fz./km}$  (b) und  $f_g = 10 \text{ Nachrichten/s}$ .

Die Ergebnisse lassen somit einen überaus deutlichen Einfluss der Größe des Contention Windows auf die CAT erkennen. Im Falle periodisch erzeugter Nachrichten, wie sie Grundlage der hier untersuchten Netzkonfigurationen sind, steigt mit zunehmender Wartezeit auf den Übertragungsbeginn eines Frames auch die Gesamtzahl der während dieses Zeitintervalls im Netz erzeugten und damit um den Medienzugriff konkurrierenden Frames.

Zur näheren Untersuchung dieses Verhaltens wurde innerhalb der Simulationsumgebung das gewichtete arithmetische Mittel der Anzahl zeitgleich um den Medienzugriff konkurrierender Frames je Kilometer Länge des betrachteten Autobahnabschnitts erfasst und ausgewertet, welches mit  $\bar{k}_{cf,km}$  bezeichnet wird<sup>21</sup>. Bei der Berechnung von  $\bar{k}_{cf,km}$  werden alle auf einen Übertragungsbeginn wartenden Frames vom Zeitpunkt ihrer Erzeugung bis zum Zeitpunkt ihres Übertragungsbeginns oder Verwurfs berücksichtigt.

Die in Abbildung 78 dargestellten Ergebnisse offenbaren, dass ein annähernd linearer Anstieg der CAT mit  $CW$ , wie ihn Abbildung 76 erkennen lässt, einhergeht mit einem annähernd linearen Anstieg der Anzahl um den

Anzahl um den  
Medienzugriff  
konkurrierender  
Frames

<sup>21</sup>Die beobachtete Anzahl konkurrierender Frames wurde zu diesem Zweck mit der jeweiligen Beobachtungsdauer gewichtet.

Medienzugriff konkurrierender Frames. Dieser Effekt begrenzt bei periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs maßgeblich die Wirksamkeit einer Vergrößerung des Contention Windows zur Handhabung von Überlastsituationen.

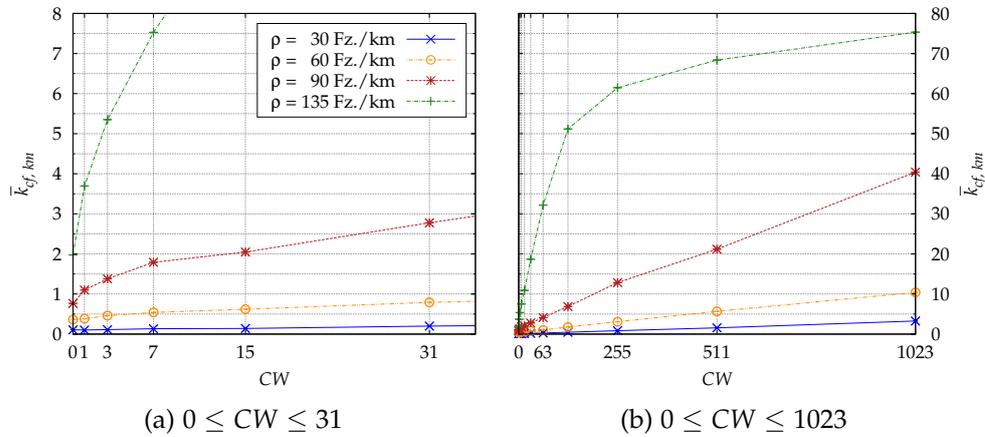


Abbildung 78: Mittlere Anzahl  $\bar{k}_{cf,km}$  zeitgleich um den Medienzugriff konkurrierender Frames pro Kilometer Strecke in Abhängigkeit von  $CW$  für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  mit  $f_g = 10$  Nachrichten/s und  $300$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 1350$  Nachrichten/km·s.

Noch deutlicher werden die Auswirkungen der Größe des Contention Windows, wenn die Anzahl möglicher Zeitpunkte für den Übertragungsbeginn eines Frames in die Darstellung einbezogen wird. Beträgt die Größe des Contention Windows  $CW$  Slots, so kommen grundsätzlich  $CW + 1$  unterschiedliche Zeitpunkte für einen Übertragungsbeginn in Frage, aus denen die Station zufällig einen Zeitpunkt auswählt. Der Quotient  $\bar{k}_{cf,km}/(CW+1)$ , der in Abbildung 79a in Abhängigkeit von  $CW$  dargestellt ist, beschreibt somit die auf einen Kilometer Strecke bezogene mittlere Anzahl von Frames, die zeitgleich um einen für den Übertragungsbeginn nutzbaren Zeitschlitz konkurrieren. Er stellt somit ein direktes Maß für das Risiko eines annähernd gleichzeitigen Übertragungsbeginns von zwei oder mehr Stationen dar.

Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass mit einer Vergrößerung von  $CW$  der Quotient  $\bar{k}_{cf,km}/(CW+1)$  für kleine Werte von  $CW$  schnell abnimmt, während für  $CW > 31$  nur noch im Falle der höchsten dargestellten Netzlast mit  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s eine signifikante Reduzierung des Quotienten festzustellen ist, die für  $CW > 63$  zudem auf Kosten von Frame Drops erfolgt.

Demnach kann durch eine Vergrößerung des Contention Windows in begrenztem Maße eine Entzerrung der Übertragungszeitpunkte – im Sinne einer Verbesserung ihrer zeitlichen Verteilung – erreicht werden. Diese zeitliche Entzerrung geht für  $\rho_g \geq 900$  Nachrichten/km·s einher mit einer erkennbaren Erhöhung der Channel Busy Time (CBT), wie Abbildung 79b anhand der CBT  $\gamma_{def}$  veranschaulicht. Die CBT  $\gamma_{def}$  bezieht sich dabei auf die in [49] definierte Standard-Empfängerempfindlichkeit in Höhe von  $-85$  dBm (vgl. Abschnitt 4.4.4).

Über diese Beobachtungen hinaus ist zur Beurteilung der Auswirkungen der Größe des Contention Windows auf die Dienstgüte und Performanz des

Entzerrung der Übertragungszeitpunkte und Auswirkungen auf die Channel Busy Time

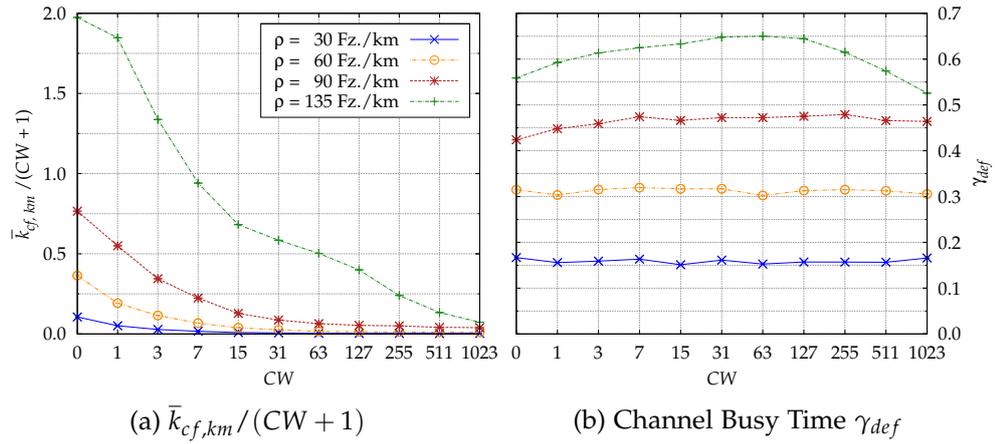


Abbildung 79: Mittlere Anzahl konkurrierender Frames pro Kilometer Strecke und für den Übertragungsbeginn verfügbarem Zeitschlitz  $\bar{k}_{cf,km}/CW+1$  (a) sowie auf den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85$  dBm bezogene Channel Busy Time  $\gamma_{def}$  (b) in Abhängigkeit von CW für verschiedene Verkehrsdichten  $\rho$  und  $f_g = 10$  Nachrichten/s mit  $300$  Nachrichten/km·s  $\leq \rho_g \leq 1350$  Nachrichten/km·s.

Auswirkungen auf  
Framekollisionen  
und Message  
Lifetime bei erhöhter  
Netzlast

Netzes eine Betrachtung von Kollisionsraten und Message Lifetimes – insbesondere im Falle hoher Netzlast – von besonderem Interesse. Diese Metriken sind in Abhängigkeit von CW für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger und  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s mit  $\rho = 90$  Fz./km und  $f_g = 10$  Nachrichten/s in Abbildung 80 dargestellt. Die Kommunikationsdichte dieser Konfiguration beträgt  $\rho_{com} = 1316$  Frames/s.

Abbildung 80a lässt erkennen, dass unabhängig von der Distanz  $d$  die Häufigkeit von CSMA-Kollisionen für  $CW < 31$  durch eine Vergrößerung des Contention Windows deutlich reduziert werden kann, während eine weitere Anhebung von CW keine signifikante Verbesserung bewirkt. Dieses Verhalten ist eine direkte Folge der oben dargestellten Zusammenhänge zwischen Größe des Contention Windows, Channel Access Time sowie Anzahl konkurrierender Frames und spiegelt das in Abbildung 79a dargestellte Verhalten des Quotienten  $\bar{k}_{cf,km}/(CW+1)$  wider.

Gleichzeitig offenbaren die in Abbildung 80b dargestellten Simulationsergebnisse, dass eine Vergrößerung des Contention Windows mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen verbunden ist. Übertragungen aus geringerer Entfernung zeigen sich im Zusammenhang mit der gegen Hidden Stations robusten Reichweite weniger anfällig für durch Hidden Stations verursachte Interferenzen und sind daher von diesem negativen Effekt weniger stark betroffen.

Verursacht wird die zunehmende Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen im Wesentlichen dadurch, dass ein (quasi-)gleichzeitiger Übertragungsbeginn zweier oder mehrerer Stationen zu einer effektiven Erhöhung der Carrier-Sense-Reichweite führt, wie Abbildung 81 veranschaulicht: Wählen  $TX_1$  und  $TX_2$ , deren Entfernung zueinander  $x$  beträgt, denselben Zeitschlitz für den Beginn ihrer Übertragung, so kann es zu einer CSMA-Kollision kommen. Gleichzeitig erhöht sich die effektive Carrier-Sense-Reichweite für bei-

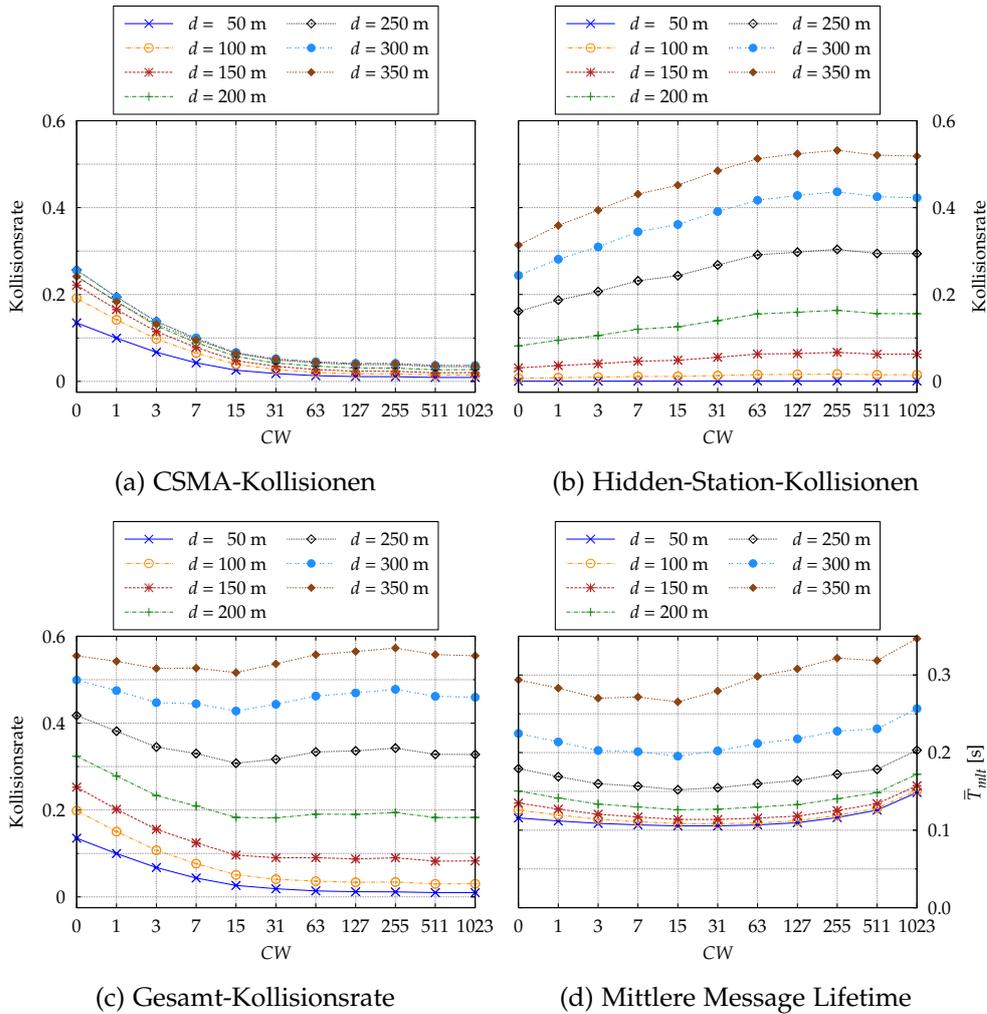


Abbildung 80: Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows CW für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s mit  $\rho = 90$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

de Stationen von  $d_{cs}$  auf  $d_{cs} + x$ , sodass Hidden Stations erst in größerer Entfernung auftreten können, wodurch die Hidden-Station-Kollisionswahrscheinlichkeit reduziert wird.<sup>22</sup> Eine Vergrößerung des Contention Windows bewirkt jedoch eine verringerte Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Übertragungsbeginns und somit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Hidden-Station-Kollisionen.

Dieser Effekt wird verstärkt durch die mit einer Vergrößerung des Contention Windows verbundene Zunahme der Channel Busy Time (CBT) (siehe Abbildung 79b): Eine Erhöhung der CBT bewirkt zugleich eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Hidden-Station-Übertragung mit einer anderen laufenden Übertragung interferiert, sodass mit einer zunehmenden Wahrscheinlichkeit von Hidden-Station-Kollisionen zu rechnen ist.

<sup>22</sup>In dieser Darstellung wird vereinfachend von einer deterministischen Carrier-Sense-Reichweite ausgegangen, welche aufgrund des in Realität und Simulationsmodell vorhandenen Signalfadings in dieser Form nicht gegeben ist.

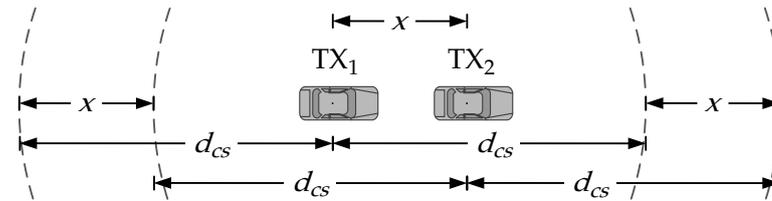


Abbildung 81: Erhöhung der effektiven Carrier-Sense-Reichweite: Bei gleichzeitigem Übertragungsbeginn von TX<sub>1</sub> und TX<sub>2</sub> erhöht sich die effektive Carrier-Sense-Reichweite für beide Stationen von  $d_{CS}$  auf  $d_{CS} + x$ .

Eine Betrachtung der Gesamt-Kollisionsrate in Abbildung 80c verdeutlicht, dass für  $CW < 31$  eine Vergrößerung des Contention Windows durch eine Vermeidung von CSMA-Kollisionen eine Verbesserung der Zuverlässigkeit der Nachrichtenübermittlung bewirkt. Übertragungen aus geringer Entfernung profitieren in besonderem Maße von diesem Effekt. Mit wachsender Entfernung wird die reduzierte Häufigkeit von CSMA-Kollisionen allerdings zunehmend durch Hidden-Station-Kollisionen kompensiert, sodass für größere Entfernungen und  $CW > 15$  eine Vergrößerung des Contention Windows sogar eine Erhöhung der Gesamt-Kollisionsrate bewirkt.

Das beobachtete Verhalten des Netzes spiegelt sich unmittelbar im Verlauf der in Abbildung 80d gezeigten Message Lifetime wider, welcher darüber hinaus jedoch deutlich die negativen Auswirkungen der mit der Größe des Contention Windows wachsenden CAT aufzeigt (vgl. Abbildung 76). Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass für  $\rho_g = 900$  Nachrichten/km·s mit Ausnahme von  $CW = 1023$  keine Frame Drops auftreten.

Eine Vergrößerung des Contention Windows kann demnach nur eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von CSMA-Kollisionen, die durch annähernd gleichzeitigen Übertragungsbeginn mehrerer Stationen verursacht werden, nicht jedoch eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Hidden-Station-Kollisionen bewirken. Dieses Verhalten erklärt ebenfalls die in Abbildung 75a bei niedriger Netzlast ( $\rho_g = 300$  Nachrichten/km·s) beobachtete weitgehende Unabhängigkeit der Packet Delivery Rate von der Größe des Contention Windows: Wie bereits in Abschnitt 5.5.4 gezeigt wurde (siehe Abbildung 70), ist für geringe Netzlast die Häufigkeit von CSMA-Kollisionen gegenüber der Häufigkeit von Hidden-Station-Kollisionen absolut vernachlässigbar, sodass sich eine Vergrößerung des Contention Windows nicht positiv auf die Zuverlässigkeit des Netzes auswirken kann.

Noch deutlicher treten die oben beschriebenen Auswirkungen der Größe des Contention Windows auf die Entstehung von Kollisionen bei einer weiteren Erhöhung der Netzlast hervor, wie sie Grundlage der in Abbildung 82 dargestellten Ergebnisse mit  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s,  $\rho = 135$  Fz./km und  $f_g = 10$  Nachrichten/s ist. Diese Konfiguration entspricht einer Kommunikationsdichte von  $\rho_{com} = 1974$  Frames/s.

Wie die Simulationsergebnisse offenbaren, kann zwar durch eine weitere Vergrößerung des Contention Windows bis  $CW = 1023$  eine Reduzierung der Häufigkeit von CSMA-Kollisionen herbeigeführt werden (siehe Abbildung 82a), diese führt jedoch wegen einer erhöhten Häufigkeit von Hidden-

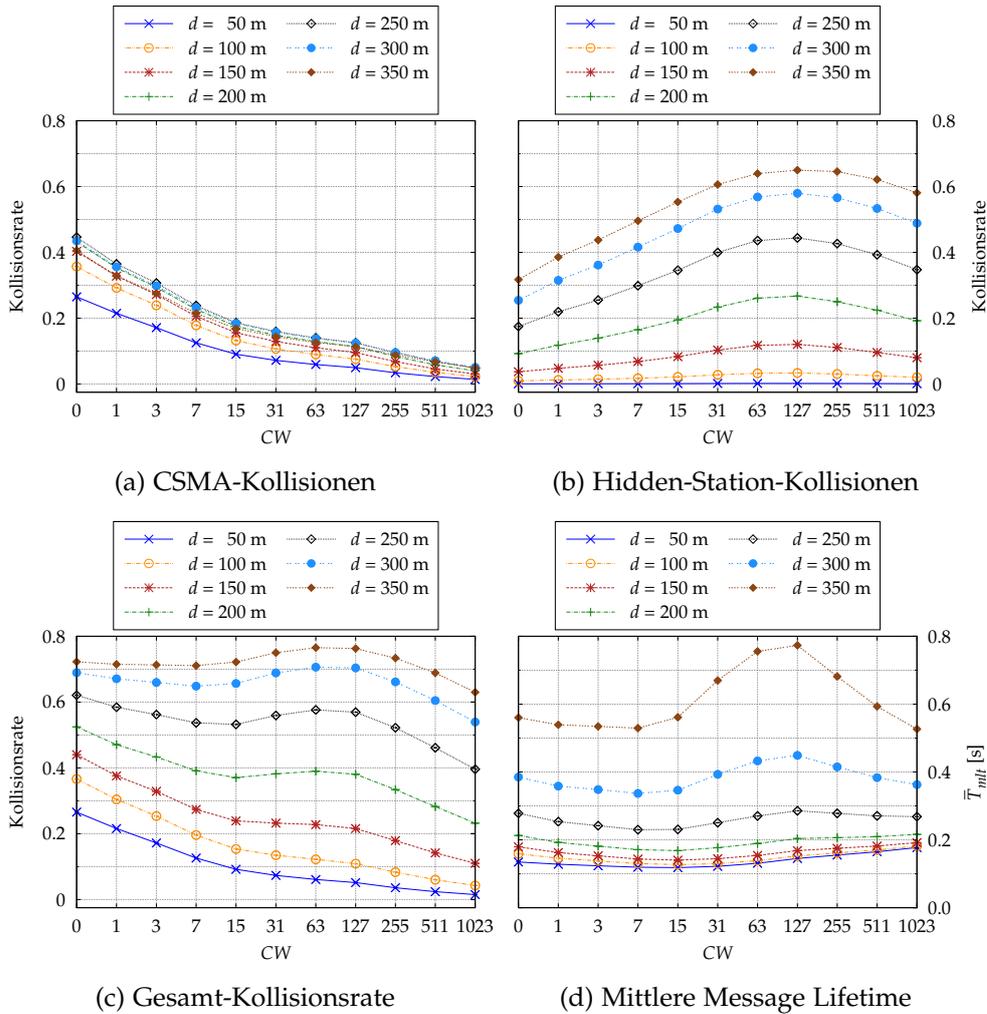


Abbildung 82: Kollisionsraten und mittlere Message Lifetime  $\bar{T}_{mlt}$  in Abhängigkeit der Größe des Contention Windows CW für verschiedene Distanzen  $d$  zwischen Sender und Empfänger bei hoher Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g = 1350$  Nachrichten/km·s mit  $\rho = 135$  Fz./km,  $f_g = 10$  Nachrichten/s.

Station-Kollisionen (siehe Abbildung 82b) nur in begrenztem Umfang zu einer Reduzierung der Gesamt-Kollisionsrate (siehe Abbildung 82c). Da über diese Beobachtungen hinaus mit der Größe des Contention Windows eine Zunahme der CAT eintritt (vgl. Abbildung 76), kann für  $CW > 15$  keine signifikante Verbesserung der Performanz des Netzes erreicht werden, wie eine Betrachtung der Message Lifetimes in Abbildung 82d zeigt.

Für  $CW \geq 127$  treten Frame Drops in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit auf (vgl. Abbildung 74a) und führen zu einer Entlastung des Übertragungsmediums, wodurch eine in Abbildung 82c deutlich erkennbare Reduzierung der Gesamt-Kollisionswahrscheinlichkeit eintritt. Übertragungen aus größerer Entfernung profitieren in besonderem Maße von dieser Entlastung, da sie überdurchschnittlich häufig Opfer von Kollisionen werden. Das Auftreten von Frame Drops ist daher mit einer deutlichen Verringerung der Message Lifetime für große Entfernungen, jedoch auch mit einem Anstieg

*Auswirkungen auf  
Framekollisionen  
und Message  
Lifetime bei hoher  
Netzlast*

der Message Lifetime für geringe Entfernungen verbunden, wie aus Abbildung 82d hervorgeht.

*Zusammenfassende  
Bewertung*

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Größe des Contention Windows die Dienstgüte und Performanz des Netzes im Hinblick auf die Entstehung von Frame Drops, Kanalzugriffsverzögerungen (CATs) und Kollisionen unmittelbar beeinflusst.

Um eine möglichst hohe Zuverlässigkeit des Netzes zu erreichen, ist prinzipiell mit zunehmender Netzlast eine Vergrößerung des Contention Windows zweckmäßig. Gleichwohl wirkt sich diese Maßnahme nur in sehr engen Grenzen positiv auf die Performanz des Netzes aus, sofern keine Frame Drops in Kauf genommen werden sollen. In diesem Fall liefern Konfigurationen mit  $CW = 15$  unabhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger annähernd optimale Ergebnisse, wodurch die Eignung von  $CW = 15$  als im Kontext dieser Arbeit verwendete Standardkonfiguration für periodische Broadcast-Kommunikation in VANETs bestätigt wird.

Bei hoher Netzlast kann durch eine weitere Anhebung von CW das Auftreten von Frame Drops und somit eine Entlastung des Netzes erzwungen werden, aus der eine Verringerung der Kollisionswahrscheinlichkeit folgt. Gemessen an der hieraus resultierenden Message Lifetime führt diese Entlastung jedoch – insbesondere im Hinblick auf den für kooperative Sicherheitsanwendungen besonders relevanten Nahbereich – nicht zu einer Verbesserung der Dienstgüte des Netzes. Andere Maßnahmen zur Entlastung des Netzes, wie etwa eine Verringerung der Nachrichtenerzeugungsrate oder der Sendeleistung (vgl. Abschnitte 5.5.1 und 5.5.2) erscheinen in diesem Kontext deutlich effektiver.

Eine Anpassung des Contention Windows allein stellt somit kein geeignetes Mittel zur Vermeidung von Überlastsituationen bei periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs dar, sodass andere Maßnahmen getroffen werden müssen.

#### 5.5.6 *Fazit*

Im Verlauf dieses Abschnitts wurden anhand mehrerer Parameterstudien die netzlastabhängigen Auswirkungen unterschiedlicher konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Performanz periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs untersucht, quantifiziert und bewertet. Auf dieser Grundlage konnten wertvolle Erkenntnisse über das jeweilige Potential, das eine netzlastabhängige Anpassung dieser Parameter für die Vermeidung oder Bewältigung von Überlastsituationen bietet, gewonnen werden.

*Komplexe  
Wechselwirkungen*

Im Rahmen eines diesbezüglichen Fazits lässt sich zunächst festhalten, dass die untersuchten Kommunikationsparameter die Leistungsfähigkeit des Netzes nicht nur auf sehr unterschiedliche Weise, sondern auch in sehr unterschiedlichem Maße beeinflussen. Zu konstatieren sind dabei komplexe Wechselwirkungen zwischen Parametrierung der Stationen, gegebener Netzlast und resultierender Dienstgüte. In diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung zwischen pfadverlustlimitiertem und interferenzlimitiertem Zustand des VANETs von grundlegender Bedeutung: Während in einem pfadverlust-

limitierten Netz nur wenig Rücksicht auf das Interferenzniveau genommen werden muss, wird mit zunehmender Interferenzlimitierung eine Begrenzung der Netzlast notwendig, um die Bereitstellung einer akzeptablen Dienstgüte zu ermöglichen. Im Kontext auf periodischer Broadcast-Kommunikation basierender Cooperative-Awareness-Anwendungen manifestiert sich die Dienstgüte in der Aktualität der aus Sicht eines Fahrzeugs verfügbaren Statusinformationen, welche in geeigneter Weise durch die Message Lifetime quantifiziert werden kann.

Die im Verlauf dieses Abschnitts untersuchten Kommunikationsparameter eignen sich in sehr unterschiedlichem Maße, um die Netzlast zu begrenzen und Überlastsituationen zu vermeiden oder deren Auswirkungen zu mildern. Tabelle 28 zeigt zunächst in einer zusammenfassenden Gegenüberstellung den Einfluss der untersuchten Kommunikationsparameter auf die verschiedenen zur Quantifizierung der Netzlast herangezogenen Metriken<sup>23</sup>, d. h. auf die Nachrichtenerzeugungsdichte  $\rho_g$ , die Kommunikationsdichte  $\rho_{com}$  sowie die Channel Busy Time  $\gamma$ , und unterscheidet zu diesem Zweck zwischen unmittelbarem, mittelbarem und fehlendem Einfluss des jeweiligen Parameters. Dabei bezeichnen  $\gamma_{def}$  und  $\gamma_{cs}$  die auf den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85$  dBm bzw. auf den Carrier-Sense-Schwellenwert  $P_{r,cs}$  bezogene Channel Busy Time.

*Einfluss der untersuchten Parameter auf die Netzlast*

Parameter	Netzlast <sup>a)</sup>			
	$\rho_g$	$\rho_{com}$	$\gamma_{def}$	$\gamma_{cs}$
Sendeleistung	–	✓	✓	✓
Nachrichtenerzeugungsrate	✓	✓	✓	✓
Datenrate	–	–	✓	✓
Carrier-Sense-Schwellenwert	–	–	(✓)	✓
Größe des Contention Windows	–	–	(✓)	(✓)

a) ✓/(✓)/– : unmittelbarer/mittelbarer/kein Einfluss.

Tabelle 28: Einfluss der in Abschnitt 5.5 untersuchten Kommunikationsparameter auf die durch die Metriken  $\rho_g$ ,  $\rho_{com}$ ,  $\gamma_{def}$  und  $\gamma_{cs}$  quantifizierte Netzlast.

Ein lediglich mittelbarer Einfluss der Größe des Contention Windows auf die Channel Busy Time  $\gamma$  lässt sich vor dem Hintergrund der in Abschnitt 5.5.5 vorgestellten Ergebnisse insofern konstatieren, als eine Veränderung der Größe des Contention Windows diesbezüglich Effekte hervorruft, deren Ausmaß vergleichsweise gering und deren Wirkungen zueinander gegenläufig sind: Einerseits bewirkt eine Vergrößerung des Contention Windows eine zeitliche Entzerrung der Frameübertragungen und dadurch eine geringfügige Erhöhung der Channel Busy Time, andererseits kann eine übermäßige Vergrößerung des Contention Windows das Auftreten von Frame Drops hervorrufen, die das gemeinsam genutzte Übertragungsmedium entlasten – im Interesse einer Dienstgüteo-optimierung allerdings vermieden werden sollten.<sup>24</sup> In ana-

*Mittelbarer Einfluss auf die Channel Busy Time*

<sup>23</sup>Zur Definition der netzlastquantifizierenden Metriken siehe Abschnitt 4.4.4.

<sup>24</sup>Vgl. hierzu insbesondere Abbildungen 74 und 79b.

loger Weise treffen diese Erkenntnisse auch auf den Carrier-Sense-Schwellenwert zu, bei dessen Verringerung ähnliche Effekte wie bei einer Vergrößerung des Contention Windows beobachtet werden können.<sup>25</sup> Auf die Channel Busy Time  $\gamma_{cs}$  hingegen wirkt sich eine Veränderung des Carrier-Sense-Schwellenwerts wegen der damit einhergehenden Veränderung der Bezugsgröße dieser Metrik naturgemäß nicht nur mittelbar, sondern unmittelbar aus.

Mit steigender Netzlast erhöht sich das Interferenzniveau innerhalb des VANETs, woraus grundsätzlich eine Verringerung der Zuverlässigkeit der Frameübermittlung folgt. Dennoch kann eine Erhöhung der Netzlast mit einer Verbesserung der Dienstgüte verbunden sein: So wirken sich etwa Erhöhungen der Sendeleistung oder der Nachrichtenerzeugungsrate positiv auf die Kommunikationsreichweite bzw. die Nachrichtenerzeugungsverzögerung aus und können somit trotz herabgesetzter Zuverlässigkeit eine Verringerung der Message Lifetime hervorrufen.

*Dienstgüteeoptimierende  
Netzlast*

Gemessen an der mittleren Message Lifetime wird eine bestmögliche Dienstgüte des Netzes näherungsweise für Kommunikationsdichten  $\rho_{com}$  in einem Wertebereich von  $1300 \text{ Frames/s} \leq \rho_{com} \leq 1850 \text{ Frames/s}$  erzielt. Diesen Zahlenwerten entsprechen Channel Busy Times  $\gamma_{def}$  und  $\gamma_{cs}$  in Höhe von  $0,46 \leq \gamma_{def} \leq 0,60$  bzw.  $0,70 \leq \gamma_{cs} \leq 0,83$ .<sup>26</sup> Um sicherzustellen zu können, dass periodische Broadcast-Kommunikation in ITS-G5-VANETs den Anforderungen kooperativer Sicherheitsanwendungen gerecht wird, sollten diese Werte nicht signifikant überschritten werden.

Die ETSI Technical Specification (TS) 102 687<sup>27</sup> sieht im Vergleich zu diesen Ergebnissen eine signifikant geringere maximal zulässige Channel Busy Time vor, die sich ebenfalls auf den Standard-Schwellenwert  $P_{r,def} = -85 \text{ dBm}$  bezieht und mit  $\gamma_{def,max} = 0,4$  beziffert wird [49].

*Potential der  
Nachrichtenerzeugungsrate*

Eine netzlastabhängige Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate stellt vor dem Hintergrund der im Verlauf dieses Abschnitts vorgestellten Simulationsergebnisse und im Vergleich mit den übrigen untersuchten Kommunikationsparametern das wirksamste Mittel zur Bewältigung oder proaktiven Vermeidung von Überlastsituationen dar.<sup>28</sup> Während bei vorherrschender Pfadverlustlimitierung eine Erhöhung der Erzeugungsrate grundsätzlich eine Reduzierung der Message Lifetime bewirkt, ist mit zunehmender Interferenzlimitierung eine Verringerung der Rate zweckmäßig, um einen Kompromiss zwischen Erzeugungsverzögerung und Kollisionshäufigkeit zu erzielen und auf diese Weise die Dienstgüte zu optimieren.

*Potential der  
Sendeleistung*

Die für die Frameübertragung verwendete Sendeleistung erweist sich ebenfalls als probates Mittel zur Überlaststeuerung.<sup>29</sup> Während im Fall eines pfadverlustlimitierten Netzes aus einer maximalen Sendeleistung eine bestmögliche Dienstgüte resultiert, kann mit zunehmender Interferenzlimitierung durch eine Reduzierung der Sendeleistung ein Kompromiss zwischen pfadverlustbedingten und kollisionsbedingten Frameverlusten herbeigeführt werden, der eine Optimierung der Dienstgüte für den besonders sicherheits-

<sup>25</sup>Vgl. hierzu insbesondere Abbildung 69.

<sup>26</sup>Die angegebenen Werte von  $\gamma_{cs}$  beziehen sich auf  $P_{r,cs} = -93 \text{ dBm}$ .

<sup>27</sup>Vgl. hierzu bereits Abschnitt 2.2.6.

<sup>28</sup>Vgl. hierzu Abschnitt 5.5.2.

<sup>29</sup>Vgl. hierzu Abschnitt 5.5.1.

relevanten Nahbereich um den Sender bewirkt. Bei geeigneter Konfiguration können mithilfe einer Anpassung der Sendeleistung Überlastsituationen zwar nicht vollständig vermieden, ihre negativen Auswirkungen jedoch durch eine zuverlässigere Frameübermittlung deutlich gemindert werden. Im Vergleich zu früheren Simulationsstudien, die auf einer abweichenden, empirisch nicht validierten Ausbreitungsmodellierung basieren, erweisen sich dabei zum einen deutlich höhere Sendeleistungen als zweckmäßig, zum anderen erscheint das Potential einer netzlastabhängigen Anpassung der Sendeleistung zur Überlaststeuerung insgesamt geringer als bisher angenommen.

Darüber hinaus kann eine netzlastabhängige Anpassung der Datenrate einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Überlaststeuerung und Dienstgütoptimierung leisten.<sup>30</sup> Bei geringer Kommunikationsdichte und überwiegender Pfadverlustlimitierung kann durch geringe Datenraten eine robuste Frameübertragung in Verbindung mit hohen Kommunikationsreichweiten angestrebt und auf diese Weise eine bestmögliche Dienstgüte erzielt werden. Bei hoher Kommunikationsdichte und damit verbundener Interferenzlimitierung des Netzes hingegen kann durch eine höhere Datenrate der gemeinsam genutzte Funkkanal entlastet und auf diese Weise die Dienstgüte für den Nahbereich um den Sender optimiert werden. Da mit einer Erhöhung der Datenrate eine erhebliche Steigerung der Anforderungen an den Signal-Störabstand einhergeht, ist eine netzlastabhängige Anpassung der Datenrate allerdings nur in begrenztem Umfang zweckmäßig und die Effektivität dieser Maßnahme eingeschränkt.

*Potential der Datenrate*

Diese Ergebnisse gelten vorbehaltlos nur bei Zugrundelegung der im Kontext der vorliegenden Arbeit verwendeten IEEE 802.11 Hardware. Zukünftige Studien müssen die Frage beantworten, inwieweit sich eine verbesserte Leistungsfähigkeit der verwendeten Übertragungstechnik auf das Potential auswirkt, das eine Anpassung der Datenrate für die Vermeidung oder Bewältigung von Überlastsituationen bietet.

Durch eine netzlastabhängige Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts hingegen kann lediglich in engen Grenzen eine Verbesserung der Dienstgüte erzielt werden.<sup>31</sup> Bei erhöhter Netzlast lässt sich – ausgehend von dem den Simulationsstudien dieses Kapitels zugrunde gelegten Standard-Schwellenwert  $P_{r,cs} = -93$  dBm – durch eine moderate Anhebung des Carrier-Sense-Schwellenwerts eine Optimierung der Dienstgüte für den unmittelbaren Nahbereich um den Sender herbeigeführen. Für Verfahren zur Überlaststeuerung kann einer Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts allerdings lediglich eine unterstützende Funktion zukommen.

*Potential des Carrier-Sense-Schwellenwerts*

Im Vergleich der im Verlauf dieses Abschnitts untersuchten Kommunikationsparameter bietet die Größe des Contention Windows das geringste Potential für eine Überlaststeuerung bei periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs.<sup>32</sup> Dessen ungeachtet ist festzuhalten, dass eine geeignete Konfiguration dieses Parameters, die unter den Rahmenbedingungen der hier untersuchten Simulationsszenarien mit  $CW = 15$  als gegeben angesehen werden

*Potential der Größe des Contention Windows*

---

<sup>30</sup>Vgl. hierzu Abschnitt 5.5.3.

<sup>31</sup>Vgl. hierzu Abschnitt 5.5.4.

<sup>32</sup>Vgl. hierzu Abschnitt 5.5.5.

kann, von grundlegender Bedeutung für die Performanz des Netzes ist. Darüber hinaus können bei hoher Netzlast durch eine Vergrößerung des Contention Windows zwar gezielt Frame Drops hervorgerufen werden, signifikante Verbesserungen der an der Message Lifetime gemessenen Dienstgüte lassen sich durch eine netzlastabhängige Anpassung der Größe des Contention Windows jedoch nicht erzielen.

Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildete die netzlastabhängige Bewertung der Dienstgüte in Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzen, die als Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) bezeichnet werden.

Die drahtlose Ad-hoc-Vernetzung von Fahrzeugen in VANETs eröffnet die Möglichkeit, den Straßenverkehr durch den Einsatz kooperativer Systeme sicherer, effizienter und komfortabler zu gestalten. Einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit können kooperative Sicherheitsanwendungen leisten, die auf einer periodischen Übermittlung von Statusnachrichten durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation beruhen. Der Austausch dieser Statusnachrichten, welche in der Terminologie der europäischen ITS-Protokollarchitektur als Cooperative Awareness Messages (CAMs) bezeichnet werden, bewirkt eine räumliche und zeitliche Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts des Fahrers und dient auf diese Weise der proaktiven Vermeidung von Verkehrsunfällen.

In Europa stellt die von ETSI standardisierte Funktechnologie ITS-G5 die favorisierte Lösung dar, um eine Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umwelt durch VANETs zu realisieren. ETSI ITS-G5 basiert auf dem Standard IEEE 802.11 und ist eng an dessen Erweiterung IEEE 802.11p angelehnt.

Kooperative Sicherheitsanwendungen stellen in Bezug auf die erforderliche Zuverlässigkeit, akzeptable Verzögerung und angestrebte Reichweite der Nachrichtenübermittlung anspruchsvolle Anforderungen an die Dienstgüte des Netzes. Demgegenüber führen hochdynamische Netztopologien, ungünstige Ausbreitungseigenschaften, Multi-User-Interferenzen und die Broadcast-Natur sicherheitsrelevanter Kommunikation dazu, dass die Erfüllung dieser Anforderungen in VANETs auf Grundlage von ITS-G5 mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die begrenzte Skalierbarkeit periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs, deren negative Auswirkungen auf die Dienstgüte sich vor allem bei hoher Netzlast manifestieren und folglich die Entwicklung von Maßnahmen zur Handhabung von Überlastsituationen erforderlich machen.

Vor diesem Hintergrund ist eine belastbare Bewertung der unter realistischen Bedingungen in VANETs erzielbaren Dienstgüte für Entwicklungs- und Optimierungszwecke von elementarer Bedeutung. Insbesondere erfordert die Entwicklung effektiver Maßnahmen zur Handhabung von Überlastsituationen ein möglichst detailliertes Verständnis und eine exakte Quantifizierung netzlastabhängiger Effekte, die sich auf die Dienstgüte des Netzes auswirken. Simulationen stellen ein effektives Werkzeug zur Gewinnung entsprechender Erkenntnisse über die Performanz von VANETs dar und bildeten daher den methodischen Schwerpunkt dieser Dissertation.

*Anwendungspotential von VANETs*

*ETSI ITS-G5 und IEEE 802.11*

*Anforderungen und Herausforderungen*

*Begrenzte Skalierbarkeit*

*Netzlastabhängige Dienstgütbewertung durch Simulation*

## 6.1 MODELLIERUNG VON BROADCAST-KOMMUNIKATION IN VANETS

*Modellierung*

Die Aussagekraft der mithilfe von Simulationsstudien gewonnenen Ergebnisse und ihre Übertragbarkeit auf die Realität hängen maßgeblich von der Qualität des zugrunde liegenden Simulationsmodells ab. Nach einem Überblick über relevante Grundlagen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und einer zusammenfassenden Darstellung verwandter Arbeiten im zweiten und dritten Kapitel widmete sich das vierte Kapitel der vorliegenden Dissertation aus diesem Grund der Modellierung von Broadcast-Kommunikation in VANETS.

*Messumgebung für Labor- und Feldtests*

In diesem Rahmen wurde eine für Labor- und Feldtests geeignete Messumgebung geschaffen, die es ermöglicht, empirisch validierte Modelle für die simulationsgestützte Leistungsbewertung zu gewinnen. Mit ihrer Hilfe wurde zunächst in Labortests die datenratenabhängige Empfängerempfindlichkeit der verwendeten IEEE 802.11 Interfacekarten bestimmt, um dem Simulationsmodell diesbezüglich realitätsnahe Schwellenwerte zugrunde legen zu können.

*Durchführung von Feldtests*

Unter Verwendung der entwickelten Messumgebung wurden darüber hinaus Feldtests durchgeführt und dabei die in der Realität gegebenen Ausbreitungsbedingungen von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf Autobahnen empirisch ermittelt. Durch einen Vergleich der aus dieser Messkampagne gewonnenen Ergebnisse mit Pfadverlustmodellen, die in früheren VANET-Simulationsstudien verwandter Arbeiten zur Charakterisierung des Funkkanals herangezogen wurden, konnte aufgezeigt werden, dass zwischen den bisher genutzten Modellen und den in der Realität beobachtbaren Bedingungen inakzeptable Abweichungen bestehen.

*Empirisch validiertes Ausbreitungsmodell*

Motiviert durch die diesbezüglichen Schwächen bisher verfügbarer Simulationsmodelle konnte aus den Ergebnissen der Feldtests ein Ausbreitungsmodell für die simulationsgestützte Leistungsbewertung abgeleitet werden, welches die realen Ausbreitungsverhältnisse im Hinblick auf Pfadverlust und Fading des Signals mit hinreichender Genauigkeit abbildet. Das empirisch validierte Ausbreitungsmodell für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnszenarien basiert auf einem Dual-Slope-Pfadverlustmodell in Verbindung mit Nakagami-Fading, dessen Intensität mit wachsender Entfernung zunimmt.

*Performanzmetriken*

Um eine aussagekräftige Bewertung der Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETS zu ermöglichen, wurden individuell an diese Aufgabe angepasste Performanzmetriken für die simulationsgestützte Leistungsbewertung eingeführt, die vornehmlich der Quantifizierung von Frameverlusten, Verzögerungen und Netzlast dienen. Dies beinhaltet unter anderem eine Definition der Message Lifetime, welche aus Sicht des Empfängers das erreichte Alter der lokal verfügbaren Informationen über den Status benachbarter Fahrzeuge charakterisiert. Da die Message Lifetime neben Erzeugungsverzögerungen und Frameverlusten auch im Netz auftretende Ende-zu-Ende-Verzögerungen und darin enthaltene Channel Access Times in einer skalaren Größe widerspiegelt, eignet sie sich hervorragend für die Dienstgütebewertung periodischer Broadcast-Kommunikation.

*Message Lifetime*

Auf dieser Grundlage wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein umfangreiches Simulationsmodell sowie eine darauf aufbauende Simulationsumgebung für VANETs entwickelt. Deren Architektur stützt sich auf eine Kopplung von Netzwerksimulation und mikroskopischer Verkehrsflusssimulation, um eine realistische Modellierung der Teilnehmermobilität gewährleisten zu können. Die Bereitstellung von Mobilitätsdaten erfolgt dabei durch den Verkehrsflusssimulator SUMO, der an ein Netzwerksimulationsmodell auf Basis des Simulators OMNeT++ angebunden wurde.

*Kopplung von  
Netzwerk- und Ver-  
kehrsflusssimulation*

Als Ausgangspunkt für die Implementierung des Netzwerksimulationsmodells diente das öffentlich verfügbare INETMANET-Framework. Auf dessen Grundlage konnte durch umfangreiche Erweiterungen und Anpassungen eine Komponentenbibliothek geschaffen werden, welche die relevanten Teile der europäischen ITS-Protokollarchitektur detailgetreu abbildet und durch eine realitätsnahe Ausbreitungsmodellierung eine aussagekräftige Simulation auf ITS-G5 basierender Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs ermöglicht. Aufgrund der fehlenden Unterstützung für diese Funktionalität im INETMANET-Framework gehört zu den vorgenommenen Erweiterungen auch eine Modellierung von Physical Layer Capture (PLC). Einen wichtigen Bestandteil der entwickelten Simulationsumgebung bildet außerdem die Implementierung einer komplexen Auswertungsmethodik, welche die Voraussetzungen für einen detaillierten, gleichsam mikroskopischen Einblick in das Verhalten periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs schafft und dabei die Berechnung einer Vielzahl von Performanzmetriken zulässt. Auf diese Weise konnte unter anderem eine Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen CSMA- und Hidden-Station-Kollisionen und zur Quantifizierung ihrer jeweiligen Häufigkeit bereitgestellt werden.

*Implementierung  
des Netzwerk-  
simulationsmodells*

Im Ergebnis steht damit eine leistungsfähige Simulationsumgebung zur Verfügung, die eine effiziente und aussagekräftige Dienstgütebewertung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs erlaubt und deren zugrunde liegendes Simulationsmodell die hierfür relevanten Bedingungen und Charakteristika realitätsnah abbildet.

*Leistungsfähige  
Simulationsumgebung  
für VANETs*

## 6.2 LEISTUNGSBEWERTUNG DURCH SIMULATION

Das fünfte Kapitel dieser Arbeit widmete sich unter Verwendung des zuvor entwickelten Modellierungs- und Simulationskonzeptes der simulationsgestützten Leistungsbewertung periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs. Den Untersuchungsgegenstand der extensiven Simulationsstudien bildete ein Autobahnscenario, dessen Rahmenbedingungen jenen der im vierten Kapitel vorgestellten Feldtests entsprechen. Dabei wurden zur Untersuchung netzlastabhängiger Effekte unterschiedliche Verkehrsdichten zugrunde gelegt und angenommen, dass jedes Fahrzeug periodisch CAMs erzeugt und auf Basis von ITS-G5 übermittelt.

*Leistungsbewertung  
anhand extensiver  
Simulationsstudien*

Um die Skalierbarkeitsproblematik in VANETs grundsätzlich zu veranschaulichen und ihr Ausmaß bewerten zu können, wurden anhand der im vierten Kapitel eingeführten Performanzmetriken zunächst die Auswirkungen der Verkehrsdichte und der Nachrichtenerzeugungsrate auf die Perform-

*Untersuchung  
grundlegender  
Skalierbarkeitseffekte*

anz des Netzes quantifiziert und diesbezüglich grundlegende Zusammenhänge dargelegt. Die Ergebnisse zeigten einen maßgeblichen Einfluss der durch die Nachrichtenerzeugungsdichte bestimmten Netzlast auf Paketverluste, Channel Access Times und Message Lifetimes, der bei hoher Verkehrsdichte zu Überlastsituationen und damit zu einer inakzeptablen Dienstgüte führen kann.

*Einfluss der Ausbreitungsmodellierung*

Anschließend konzentrierten sich die Untersuchungen auf ausgewählte Modellierungsaspekte. Zunächst wurde der Einfluss der Ausbreitungsmodellierung auf die Qualität der simulationsgestützten Dienstgütebewertung evaluiert, indem Simulationen unter Verwendung verschiedener Pfadverlustmodelle und Fading-Intensitäten durchgeführt wurden. Dabei offenbarten sich sowohl bei geringer als auch bei hoher Netzlast maßgebliche Unterschiede zwischen den verwendeten Ausbreitungsmodellen und es konnte gezeigt werden, dass die aus einer Anwendung etablierter Pfadverlustmodelle resultierenden Ergebnisse substanziell von jenen abweichen, die sich bei Nutzung des empirisch validierten Ausbreitungsmodells für Autobahnszenarien auf Basis eines Dual-Slope-Pfadverlustmodells ergeben. Die Untersuchungen dokumentierten zudem erhebliche Auswirkungen der Fading-Intensität auf die Dienstgüte des Netzes. Insoweit wurde insbesondere der intuitiven Erwartungen zuwiderlaufende Effekt ersichtlich, dass bei hoher Netzlast die Zuverlässigkeit der Kommunikation innerhalb des für kooperative Sicherheitsanwendungen besonders relevanten Nahbereichs um den Sender durch Fading nicht beeinträchtigt wird, sondern sogar signifikant verbessert werden kann.

Die Modellierung von Pfadverlust und Fading beeinflusst somit maßgeblich die Qualität der Simulationsergebnisse. Aus diesem Grund stellt eine realitätsnahe Ausbreitungsmodellierung, wie sie die vorliegende Arbeit mit dem durch Feldtests validierten Ausbreitungsmodell für Autobahnszenarien bereitstellt, eine unverzichtbare Grundlage für die simulationsbasierte Dienstgütebewertung in VANETs dar.

*Einfluss von Physical Layer Capture*

Des Weiteren konnte anhand der gewonnenen Simulationsergebnisse aufgezeigt werden, dass die Nutzung von Physical Layer Capture (PLC) eine erhebliche Verbesserung der erzielbaren Dienstgüte bewirkt. Sofern das Simulationsmodell keine Berücksichtigung von PLC vorsieht, wird die Zuverlässigkeit der Frameübermittlung gerade innerhalb des besonders relevanten Nahbereichs um den Sender signifikant unterschätzt. Demnach ist eine Modellierung von PLC im Rahmen von Simulationsstudien unabdingbar, um die netzlastabhängige Dienstgüte und Skalierbarkeit periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs belastbar bewerten zu können.

*Quantifizierung der Netzlast*

Im weiteren Verlauf des Kapitels wurde außerdem untersucht, ob und in welchem Maße sich die zuvor definierten Metriken Nachrichtenerzeugungsdichte, Kommunikationsdichte sowie Channel Busy Time eignen, um die mit einer bestimmten Parametrierung des VANETs einhergehende Netzlast quantitativ zu bewerten und hieraus unmittelbare Rückschlüsse auf die resultierende Dienstgüte ziehen zu können. Anhand zu diesem Zweck durchgeführter Simulationen wurde herausgearbeitet, dass die Kommunikationsdichte zwar intuitiv und präzise die erzeugte Netzlast quantifiziert, aus ihrem Wert

jedoch auch bei bekannter Sendeleistung und Nachrichtenerzeugungsdichte nicht ohne Weiteres die an der Message Lifetime gemessene Dienstgüte des Netzes abgeleitet werden kann. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Channel Busy Time bei gemäßigter Netzlast streng monoton und zum Teil annähernd linear mit der Kommunikationsdichte wächst, bei hoher Netzlast allerdings asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt. Innerhalb des für Überlaststeuerungsverfahren relevanten Zielbereichs gemäßigter Netzlast kann somit die Channel Busy Time, welche den Stationen des VANETs im Gegensatz zur Kommunikationsdichte durch lokale Messungen unmittelbar zugänglich ist, als Metrik für eine aussagekräftige Quantifizierung der Netzlast genutzt werden, da sich die Kommunikationsdichte eindeutig und zuverlässig aus der Channel Busy Time bestimmen lässt.

Vor dem Hintergrund der zuvor dargelegten Skalierbarkeitsproblematik periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs widmete sich der verbleibende Teil des fünften Kapitels, der zugleich dessen Schwerpunkt bildete, einer eingehenden Untersuchung und Bewertung der netzlastabhängigen Auswirkungen verschiedener konfigurierbarer Kommunikationsparameter auf die Performanz des Netzes. Dabei wurden im Rahmen umfangreicher Simulationsstudien die Parameter Sendeleistung, Nachrichtenerzeugungsrate, Datenrate, Carrier-Sense-Schwellenwert und Größe des Contention Windows betrachtet und ihr jeweiliges Potential zur Bewältigung und Vermeidung von Skalierbarkeitsproblemen und Überlastsituationen bewertet.

Auf Grundlage dieser Parameterstudien konnten Wertebereiche der Kommunikationsdichte und der Channel Busy Time als Maß für die dienstgüteoptymierende Netzlast identifiziert werden, welches nicht signifikant überschritten werden sollte, um sicherzustellen, dass periodische Broadcast-Kommunikation in VANETs auf Basis von ITS-G5 den Anforderungen kooperativer Sicherheitsanwendungen genügt.<sup>1</sup>

Des Weiteren offenbarten die Simulationsergebnisse, dass eine netzlastabhängige Anpassung der Nachrichtenerzeugungsrate im Vergleich mit den übrigen untersuchten Kommunikationsparametern das wirksamste Mittel zur Bewältigung oder proaktiven Vermeidung von Überlastsituationen darstellt. Als ebenfalls für Überlaststeuerungszwecke geeignet erwies sich darüber hinaus eine Anpassung der für die Frameübertragung verwendeten Sendeleistung. Den Ergebnissen früherer Simulationsstudien gegenüber, die auf einer von dieser Arbeit abweichenden und empirisch nicht validierten Ausbreitungsmodellierung basieren, erscheint eine Reduzierung der Sendeleistung als Maßnahme zur Überlaststeuerung jedoch deutlich weniger effektiv als bisher angenommen.

Erkennbar wurde außerdem, dass eine netzlastabhängige Anpassung der Datenrate – indem diese mit steigender Netzlast erhöht wird – einen begrenzten, gleichwohl wertvollen Beitrag zur Überlaststeuerung und Dienstgüteoptymierung leisten kann, während sich eine Anpassung des Carrier-Sense-Schwellenwerts – indem dieser bei erhöhter Netzlast moderat angehoben wird – aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Wirksamkeit nur mit Einschränkungen für Überlaststeuerungsverfahren eignet.

*Vermeidung von  
Überlast*

*Dienstgüteoptymierende  
Netzlast*

*Nachrichtenerzeugungsrate und  
Sendeleistung*

*Datenrate und  
Carrier-Sense-  
Schwellenwert*

<sup>1</sup>Einzelheiten und Zahlenwerte können Abschnitt 5.5.6 entnommen werden.

*Größe des  
Contention  
Windows*

Im Hinblick auf die Größe des Contention Windows gelang es schließlich aufzuzeigen, dass die geeignete Konfiguration dieses Parameters zwar von grundlegender Bedeutung für die Performanz des Netzes ist, seine Anpassung an die Netzlast jedoch zur Verbesserung der Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs kaum zweckmäßig ist. Die Größe des Contention Windows weist daher unter den untersuchten Kommunikationsparametern das geringste Potential zur Handhabung von Überlastsituationen auf.

### 6.3 AUSBLICK

*Skalierbarkeits-  
problematik in  
VANETs*

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen die mangelnde Skalierbarkeit periodischer Broadcast-Kommunikation in VANETs auf Basis von IEEE 802.11 und ETSI ITS-G5. Während VANETs bei geringer Netzlast grundsätzlich einen pfadverlustlimitierten Zustand aufweisen, in welchem den Auswirkungen von Interferenzen lediglich eine untergeordnete Bedeutung zukommt, können Multi-User-Interferenzen bei hoher Netzlast gravierende Beeinträchtigungen der Dienstgüte hervorrufen, die einen interferenzlimitierten Zustand des Netzes charakterisieren. Diese Beeinträchtigungen der Dienstgüte manifestieren sich in einer geringen Zuverlässigkeit der Frameübermittlung, hohen Verzögerungen sowie dem Auftreten von Frame Drops und können im Überlastfall das für kooperative Sicherheitsanwendungen akzeptable Maß überschreiten.

*Nachgeordnete  
Bedeutung von  
Skalierbarkeit für  
Markteinführung*

Vollumfänglich kommt diese Skalierbarkeitsproblematik jedoch erst zum Tragen, wenn eine große Anzahl entsprechend ausgerüsteter Fahrzeuge um das gemeinsam genutzte Übertragungsmedium konkurriert. Die daraus erwachsenden Herausforderungen sind für die erste Generation von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystemen auf Basis von ETSI ITS-G5 demnach lediglich von sekundärer Relevanz, denn nach ihrer Markteinführung ist zunächst mit einem geringen, allerdings stetig wachsenden Ausstattungsgrad zu rechnen. Aus diesem Grund kommt vorerst dem Einsatz hoher Sendeleistungen sowie robuster Modulations- und Kodierschemata eine vorrangige Bedeutung zu, um in einem pfadverlustlimitierten Netz größtmögliche Kommunikationsreichweiten zu erzielen.

*Notwendigkeit von  
Überlaststeuerung  
in späteren  
Entwicklungsstufen*

Mittelfristig ist hingegen ein möglichst großer Anteil mit entsprechenden Kommunikationssystemen ausgerüsteter Fahrzeuge im Straßenverkehr erforderlich, um das mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs verbundene Potential vollständig erschließen zu können. Dies gilt insbesondere für Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, die auf Cooperative Awareness basieren. Spätere Entwicklungsstufen der Systeme müssen daher Überlastsituationen, die aus dem Zusammentreffen hoher Ausstattungsgrade und hoher Verkehrsdichten resultieren, sowie ihre gravierenden Auswirkungen auf die Dienstgüte periodischer Broadcast-Kommunikation berücksichtigen.

Als Ergebnis der in dieser Dissertation vorgestellten Untersuchungen stehen detaillierte Erkenntnisse über die netzlastabhängige Dienstgüte und Performanz von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in VANETs zur Verfü-

gung. Diese Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung, Parametrierung und Optimierung effektiver Überlaststeuerungsverfahren, die der Vermeidung und Bewältigung übermäßig hoher Netzlast dienen. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass Überlaststeuerungsverfahren, die auf einer netzlastabhängigen Anpassung einzelner konfigurierbarer Kommunikationsparameter beruhen, keine Patentlösung der bestehenden Skalierbarkeitsproblematik darstellen, sondern lediglich ihre negativen Auswirkungen mindern können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen der untersuchten Kommunikationsparameter auf die Dienstgüte des Netzes überwiegend isoliert voneinander betrachtet. Gleichwohl lassen die Simulationsstudien erkennen, dass Überlaststeuerungsverfahren auf der Grundlage einer netzlastabhängigen Anpassung mehrerer miteinander kombinierter Parameter eine besonders hohe Wirksamkeit versprechen könnten. Die zuvor dargestellten Ergebnisse legen zu diesem Zweck eine Kombination der Parameter Nachrichtenerzeugungsrate und Sendeleistung nahe, die durch eine ergänzende Anpassung der Datenrate und des Carrier-Sense-Schwellenwerts unterstützt werden sollte. In zukünftigen Studien erscheint daher die Quantifizierung des Potentials einer solchen multiplen und netzlastabhängigen Parameteranpassung zur Überwindung der bestehenden Skalierbarkeitsproblematik von ITS-G5-VANETs erstrebenswert.

Darüber hinaus deuten die gewonnenen Ergebnisse darauf hin, dass der Einsatz von Überlaststeuerungsverfahren als alleiniges Mittel nicht genügen könnte, um durch Überlastsituationen verursachte Beeinträchtigungen der Dienstgüte auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, wenn hohe Ausstattungsgrade in Verbindung mit hohen Verkehrsdichten, wie sie für Autobahn- oder Innenstadtverkehr typisch sind, erreicht werden. Für spätere Generationen von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystemen könnte daher eine Steigerung des erzielbaren Netzdurchsatzes auf Grundlage erhöhter Brutto-Datenübertragungsraten unumgänglich werden. Ermöglicht würde dies zum einen durch eine Erhöhung der für die Funkübertragung genutzten Kanalbandbreite, die für ITS-G5-Systeme derzeit lediglich 10 MHz beträgt, zum anderen durch übertragungstechnische Verbesserungen der datenratenabhängigen Empfängerempfindlichkeit, welche die Verwendung höherer Datenraten bei gleichbleibender Zuverlässigkeit der Frameübermittlung erlauben.

Die in dieser Dissertation vorgestellten Untersuchungen konzentrierten sich auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Autobahnszenarien. Zukünftige Studien müssen die Bewertung der netzlastabhängigen Dienstgüte und Leistungsfähigkeit von VANETs daher auf anderweitige Verkehrsszenarien ausweiten, die deutlich abweichende Bedingungen aufweisen können. Hierzu gehören insbesondere Innenstadtszenarien, welche aufgrund des gravierenden Einflusses von Abschattungen, die durch städtische Bebauung verursacht werden, mit besonderen Herausforderungen bezüglich ihrer Modellierung einhergehen.

*Multiple Parameteranpassung zur Überlaststeuerung*

*Notwendige Steigerung des Netzdurchsatzes*

*Dienstgütebewertung anderweitiger Verkehrsszenarien*



### A.1 HERLEITUNGEN ZUM TWO-RAY GROUND REFLECTION PFADVERLUST-MODELL

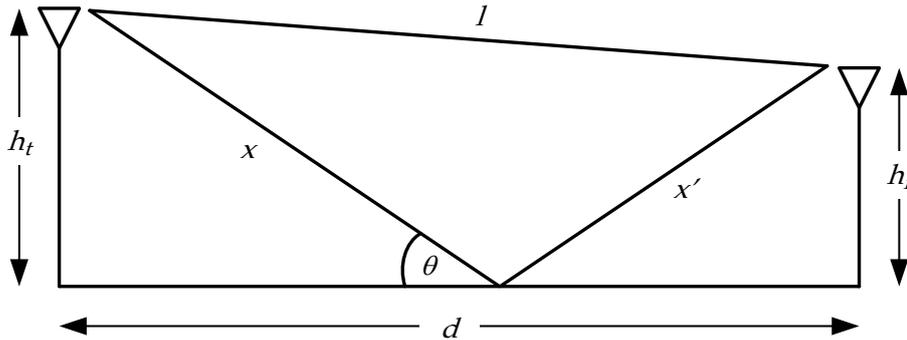


Abbildung 83: Two-Ray Ground Reflection Pfadverlustmodell [66].

Unter der Annahme, dass die durch die Bodenreflexion verursachte Verzögerung  $\tau$  (Delay Spread) deutlich kleiner ist als die inverse Kanalbandbreite  $B^{-1}$ , d. h.  $\tau \ll B^{-1}$ , gilt für das (komplexe) Basisbandsignal  $u(t) \approx u(t - \tau)$ . Mit dieser Näherung und der Annahme einer isotropen Antennencharakteristik kann die durch die Überlagerung der unreflektierten und der reflektierten Signalkomponente resultierende Empfangsleistung beschrieben werden als

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + R \frac{e^{-j\Delta\phi}}{x + x'} \right|^2. \quad (\text{A.1})$$

Dabei kennzeichnen  $l$  bzw.  $x + x'$  die Länge der Wege, welche die LOS-Komponente bzw. die am Boden reflektierte Signalkomponente zwischen Sender und Empfänger zurücklegen (siehe Abbildung 83) und  $R$  den Reflexionskoeffizienten des Bodens mit

$$R = \frac{\sin \theta - Z}{\sin \theta + Z}, \quad (\text{A.2})$$

wobei

$$Z = \begin{cases} \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta} / \epsilon_r & \text{bei vertikaler Polarisation der Antenne} \\ \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta} & \text{bei horizontaler Polarisation der Antenne} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

mit der relativen Permittivität  $\epsilon_r$  des Bodens gilt.  $\Delta\phi$  beschreibt die Phasenverschiebung zwischen den beiden empfangenen Signalkomponenten mit

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(x + x' - l)}{\lambda}, \quad (\text{A.4})$$

welche durch die unterschiedlichen Laufzeiten beider Komponenten entsteht [66, 130]. Mit der Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger sowie den Sende- und Empfangsantennenhöhen  $h_t$  und  $h_r$  gelten die geometrischen Beziehungen

$$(x + x')^2 = (h_t + h_r)^2 + d^2 \quad \text{und} \quad (\text{A.5})$$

$$l^2 = (h_t - h_r)^2 + d^2, \quad (\text{A.6})$$

woraus nach kurzer Umformung

$$x + x' = d \cdot \sqrt{1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{d^2}} \quad \text{und} \quad (\text{A.7})$$

$$l = d \cdot \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \quad (\text{A.8})$$

folgt. Unter der Annahme, dass  $d$  deutlich größer als  $h_t$  und  $h_r$  ist, können diese Ausdrücke hinreichend genau mithilfe eines Taylor-Polynoms ersten Grades unter Ausnutzung von  $\sqrt{1+z} \approx 1 + z/2$  approximiert werden. Für die Differenz zwischen den Längen der von den beiden Signalkomponenten zurückgelegten Wege gilt folglich

$$\begin{aligned} x + x' - l &= d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{d^2}} - \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \right) \\ &\approx d \cdot \left( \left( 1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{2d^2} \right) - \left( 1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{2d^2} \right) \right) \\ &= \frac{2h_t h_r}{d}. \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Einsetzen in Gl. A.4 liefert

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}. \quad (\text{A.10})$$

Im asymptotischen Grenzfall gilt darüber hinaus (siehe Abbildung 83)

$$\lim_{d \rightarrow \infty} (x + x') = \lim_{d \rightarrow \infty} l = d \quad \text{sowie} \quad \lim_{d \rightarrow \infty} \theta = 0$$

und unabhängig von  $\epsilon_r$  (siehe Gl. A.2 und Gl. A.3)

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} R = -1.$$

Für die Empfangsleistung ergibt sich daher durch Einsetzen in Gl. A.1 für sehr große  $d$  die Näherung

$$\begin{aligned} P_r &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + R \frac{e^{-j\Delta\phi}}{x + x'} \right|^2 \\ &\approx P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 - e^{-j\Delta\phi} \right|^2 \\ &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 |1 - \cos(\Delta\phi) + j \sin(\Delta\phi)|^2 \\ &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left( (1 - \cos(\Delta\phi))^2 + \sin^2(\Delta\phi) \right) \\ &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 2 \cdot (1 - \cos(\Delta\phi)), \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

die sich durch Verwendung der Beziehung  $\cos(2z) = 1 - 2\sin^2(z)$  vereinfachen lässt zu

$$\begin{aligned} P_r &\approx P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 2 \cdot \left( 1 - \left( 1 - 2\sin^2 \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right) \right) \right) \\ &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 4 \cdot \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right). \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Für kleine  $\Delta\phi$  ( $d \gg h_t h_r$ ) ergibt sich schließlich

$$P_r \approx P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (\Delta\phi)^2 \quad (\text{A.13})$$

und Einsetzen von Gl. A.10 in Gl. A.13 liefert

$$P_r \approx P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left( \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}. \quad (\text{A.14})$$

## A.2 AUTOBAHNSZENARIO: ERGÄNZENDE SIMULATIONSAUSWERTUNGEN

Auswirkungen des Pfadverlustmodells bei mittlerer Fading-Intensität ( $m = 3$ )

Ergänzend zu den in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Simulationsergebnissen veranschaulicht Abbildung 84 die Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Fahrzeugdichten  $\rho$  bei mittlerer Fading-Intensität ( $m = 3$ ). Auch hier ist sehr deutlich ein substanzieller Einfluss des verwendeten Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate und damit auf die Leistungsfähigkeit der Nachrichtenübermittlung erkennbar.

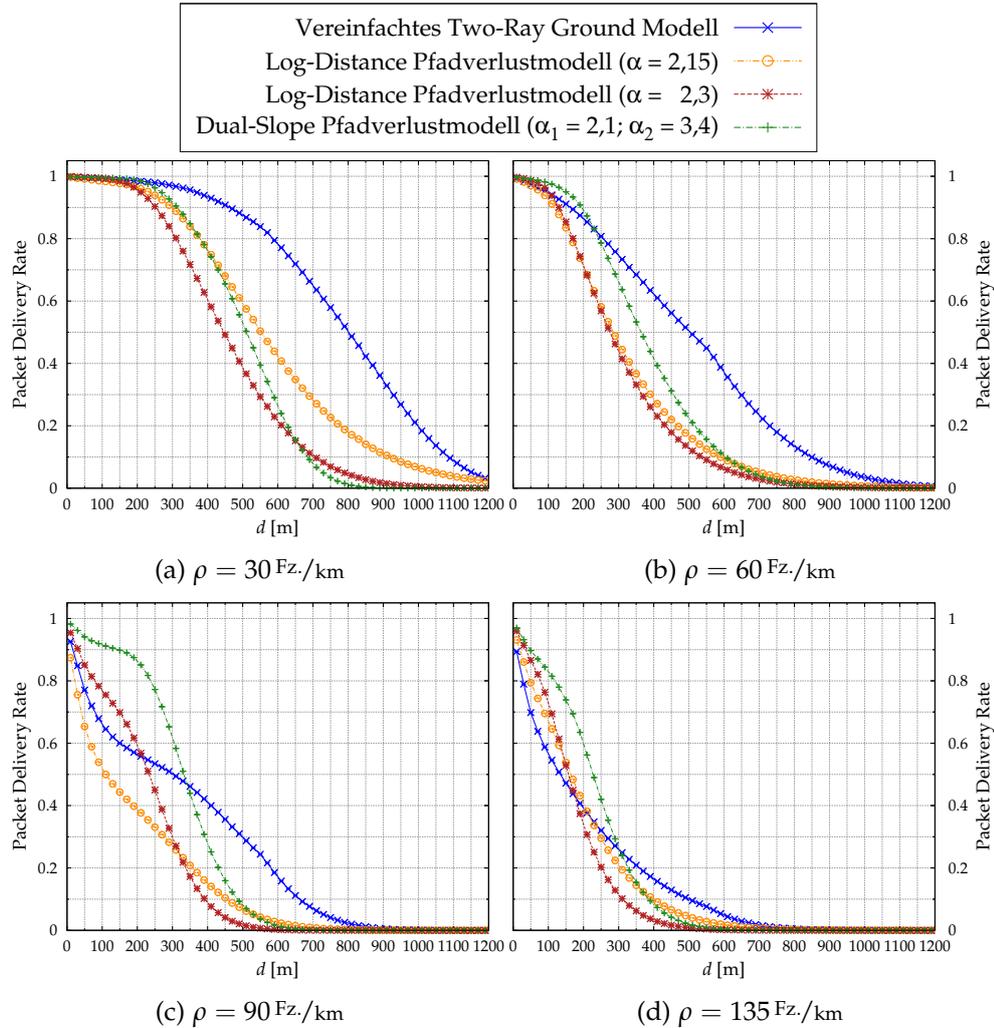


Abbildung 84: Auswirkungen des Pfadverlustmodells auf die Packet Delivery Rate für verschiedene Fahrzeugdichten  $\rho$  bei mittlerer Fading-Intensität ( $m = 3$ ) und  $f_g = 10$  Frames/s,  $P_t = 23$  dBm,  $CW = 15$ ,  $R_b = 6$  Mbps.

Ein Vergleich mit den in Abschnitt 5.3.1 gezeigten Ergebnissen (siehe insbesondere Abbildung 38), denen Nakagami-Fading distanzabhängiger Intensität zugrunde liegt, verdeutlicht, dass die dort erläuterten Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen der unterschiedlichen Pfadverlustmodelle und ihrer Ursachen unabhängig von der Fading-Intensität Gültigkeit besitzen. Einzelheiten können daher Abschnitt 5.3.1 entnommen werden.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] Guillermo Acosta-Marum und Mary Ann Ingram. Six Time- and Frequency-Selective Empirical Channel Models for Vehicular Wireless LANs. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2(4):4–11, 2007. ISSN 1556-6072. doi: 10.1109/MVT.2008.917435.
- [2] Natalya An, Jens Mittag, Felix Schmidt-Eisenlohr und Marc Torrent Moreno. Accurate Knowledge of Radio Channel and Network Conditions - When Does it Matter? In *8th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*, Bardonecchia, Italien, 2011. doi: 10.1109/WONS.2011.5720178.
- [3] Roberto Baldessari, Damiano Scanferla, Long Le, Wenhui Zhang und Andreas Festag. Joining Forces for VANETs: A Combined Transmit Power and Rate Control Algorithm. In *Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2010)*, Hamburg, 2010.
- [4] Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson und David M. Nicol. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 5. Aufl., 2009. ISBN 9780136062127.
- [5] Jaume Barceló. Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. In Jaume Barceló (Hrsg.), *Fundamentals of Traffic Simulation*, Seiten 1–62. Springer New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6141-9.
- [6] Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano und Ivan Stojmenovic (Hrsg.). *Mobile Ad Hoc Networking*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2004. ISBN 9780471656890. doi: 10.1002/0471656895.
- [7] Ramon Bauza und Javier Gozalvez. Traffic Congestion Detection in Large-Scale Scenarios Using Vehicle-to-Vehicle Communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012. ISSN 1084-8045. doi: 10.1016/j.jnca.2012.02.007.
- [8] Marc Bechler (Hrsg.). *COMeSafety: European ITS Communication Architecture - Overall Framework, Proof of Concept Implementation*. EC FP6 Deliverable, EC Information Society Technologies Programme, 2010.
- [9] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann und Daniel Krajzewicz. SUMO - Simulation of Urban MObility - an Overview. In *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, Seiten 55 – 60, Barcelona, Spanien, 2011.
- [10] Carl Friedrich Benz (Erfinder) / Benz & Co. Rheinische Gasmotorenfabrik Mannheim (Patentinhaber). *Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb*. Angemeldet am 29. Januar 1886, erteilt am 2. November 1886. DRP Nr. 37435, Kaiserliches Patentamt, Berlin.

- [11] Andras Berl. Modeling Mobility. In Klaus Wehrle, Mesut Günes und James Gross (Hrsg.), *Modeling and Tools for Network Simulation*, Seiten 327–339. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-12330-6.
- [12] Laura Bernado, Thomas Zemen, Fredrik Tufvesson, Andreas F. Molisch und Christoph F. Mecklenbräuer. Delay and Doppler Spreads of Non-Stationary Vehicular Channels for Safety Relevant Scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Seiten 1–1, 2013. ISSN 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2013.2271956.
- [13] Vaduvur Bharghavan, Alan Demers, Scott Shenker und Lixia Zhang. MACAW: a Media Access Protocol for Wireless LAN's. In *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications - SIGCOMM '94*, Seiten 212–225, New York City, NY, USA, 1994. ACM. ISBN 0897916824. doi: 10.1145/190314.190334.
- [14] Giuseppe Bianchi. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547, 2000. ISSN 07338716. doi: 10.1109/49.840210.
- [15] Katrin Bilstrup, Elisabeth Uhlemann, Erik G. Ström und Urban Bilstrup. Evaluation of the IEEE 802.11p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication. In *IEEE 68th Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2008*, Seiten 1–5. IEEE, 2008. ISBN 978-1-4244-1721-6. doi: 10.1109/VETEFC.2008.446.
- [16] Katrin Bilstrup, Elisabeth Uhlemann, Erik G. Ström und Urban Bilstrup. On the Ability of the 802.11p MAC Method and STDMA to Support Real-Time Vehicle-to-Vehicle Communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009:1–14, 2009. ISSN 1687-1472. doi: 10.1155/2009/902414.
- [17] Achim Brakemeier. White Paper on Network Design Limits and VANET Performance. *CAR 2 CAR Communication Consortium White Paper*, v0.6 (2009-01), 2009.
- [18] Holger Busche, Chonlatee Khorakhun und Hermann Rohling. Congestion Control in a Self-Organized Car-to-Car Radio Network. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2009)*, Hamburg, 2009.
- [19] Holger Busche, Chonlatee Khorakhun und Hermann Rohling. Self-Organized Update Rate Control for Inter-Vehicle Networks. In *Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2010)*, Hamburg, 2010.
- [20] Giorgio Calandriello, Panos Papadimitratos, Jean-Pierre Hubaux und Antonio Lioy. On the Performance of Secure Vehicular Communication Systems. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 8(6): 898–912, 2011. ISSN 1545-5971. doi: 10.1109/TDSC.2010.58.

- [21] Frederico Cali, Marco Conti und Enrico Gregori. Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(6):785–799, 2000. ISSN 10636692. doi: 10.1109/90.893874.
- [22] Tracy Camp, Jeff Boleng und Vanessa Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5):483–502, 2002. ISSN 1530-8669. doi: 10.1002/wcm.72.
- [23] CAR 2 CAR Communication Consortium. *Position Paper on ETSI ITS G5 Channel Usage*. 2013.
- [24] CAR 2 CAR Communication Consortium. *C2C-CC Manifesto - Overview of the C2C-CC System*. 2007. URL <http://www.car-2-car.org>.
- [25] Qi Chen, Felix Schmidt-Eisenlohr, Daniel Jiang, Marc Torrent Moreno, Luca Delgrossi und Hannes Hartenstein. Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in ns-2. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems - MSWiM '07*, Seite 159, New York City, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 9781595938510. doi: 10.1145/1298126.1298155.
- [26] Lin Cheng, Benjamin Henty, Daniel Stancil, Fan Bai und Priyantha Mudalige. Mobile Vehicle-to-Vehicle Narrow-Band Channel Measurement and Characterization of the 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication (DSRC) Frequency Band. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(8):1501–1516, 2007. ISSN 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2007.071002.
- [27] Lin Cheng, Benjamin Henty, Reginald Cooper, Daniel D. Stancil und Fan Bai. Multi-Path Propagation Measurements for Vehicular Networks at 5.9 GHz. In *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008)*, Seiten 1239–1244. IEEE, 2008. ISBN 978-1-4244-1997-5. doi: 10.1109/WCNC.2008.223.
- [28] Lin Cheng, Benjamin E. Henty, Fan Bai und Daniel D. Stancil. Highway and Rural Propagation Channel Modeling for Vehicle-to-Vehicle Communications at 5.9 GHz. In *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Seiten 1–4. IEEE, 2008. ISBN 978-1-4244-2041-4. doi: 10.1109/APS.2008.4619037.
- [29] Panayotis Christidis und Juan Nicolás Ibáñez Rivas. *Measuring Road Congestion*. Report EUR 25550 EN, JRC Scientific and Policy Reports, Joint Research Centre der Europäischen Kommission. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012. ISBN 9789279270154. doi: 10.2791/15282.
- [30] David Eckhoff, Nikoletta Sofra und Reinhard German. A Performance Study of Cooperative Awareness in ETSI ITS G5 and IEEE WAVE. In

*10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Seiten 196–200. IEEE, mar 2013. ISBN 978-1-4799-0749-6. doi: 10.1109/WONS.2013.6578347.

- [31] Stephan Eichler. Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard. In *IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2007*, Seiten 2199–2203, 2007.
- [32] Tamer ElBatt, Siddhartha K. Goel, Gavin Holland, Hariharan Krishnan und Jayendra Parikh. Cooperative Collision Warning Using Dedicated Short Range Wireless Communications. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006)*, New York City, NY, USA, 2006. ACM. ISBN 1595935401. doi: 10.1145/1161064.1161066.
- [33] Electronic Communications Committee. *ECC Decision of 14 March 2008 on the Harmonised Use of the 5875-5925 MHz Frequency Band for Intelligent Transport Systems (ITS)*. ECC/DEC/(08)01, 2008.
- [34] Electronic Communications Committee. *ECC Recommendation (08)01: Use of the Band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)*. ECC/REC/(08)01, 2008.
- [35] Vinko Erceg, Larry J. Greenstein, Sony Y. Tjandra, Seth R. Parkoff, Ajay Gupta, Boris Kulic, Arthur A. Julius und Renee Bianchi. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(7):1205–1211, July 1999. ISSN 07338716. doi: 10.1109/49.778178.
- [36] Europäische Kommission. *EU Transport in Figures – Statistical Pocketbook 2014*. ISBN 978-92-79-37506-4. doi: 10.2832/63317.
- [37] Europäische Kommission. *EU Transport in Figures – Statistical Pocketbook 2015*. ISBN 978-92-79-43914-8. doi: 10.2832/90922.
- [38] Europäische Kommission. *Mitteilung der Kommission COM/2008/0886 – Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme in Europa*. 2008.
- [39] European Commission. *Commission Decision 2008/671/EC of 5 August 2008 on the Harmonised Use of Radio Spectrum in the 5875 - 5905 MHz Frequency Band for Safety-related Applications of Intelligent Transport Systems (ITS)*. 2008.
- [40] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions*. ETSI Technical Report 102 638 V1.1.1, 2009.
- [41] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*. ETSI European Standard EN 302 665 V1.1.1, 2010.

- [42] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); European Profile Standard for the Physical and Medium Access Control Layer of Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band*. ETSI Standard ES 202 663 V1.1.0 (2010-01), 2010.
- [43] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Threat, Vulnerability and Risk Analysis (TVRA)*. ETSI Technical Report 102 893 V1.1.1, 2010.
- [44] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements*. ETSI Technical Specification TS 102 636-1 V1.1.1, 2010.
- [45] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 2: Scenarios*. ETSI Technical Specification TS 102 636-2 V1.1.1, 2010.
- [46] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture*. ETSI Technical Specification TS 102 636-3 V1.1.1, 2010.
- [47] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security Services and Architecture*. ETSI Technical Specification TS 102 731 V1.1.1, 2010.
- [48] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality*. ETSI Technical Specification TS 102 636-4-1 V1.1.1, 2011.
- [49] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Range; Access Layer Part*. ETSI Technical Specification 102 687 V1.1.1 (2011-07), 2011.
- [50] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service*. ETSI European Standard EN 302 637-3 V1.0.0 (Draft), 2012.
- [51] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Stage 3 Mapping for IEEE 1609.2*. ETSI Technical Specification TS 102 867 V1.1.1, 2012.
- [52] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Trust and Privacy Management*. ETSI Technical Specification TS 102 941 V1.1.1, 2012.
- [53] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Harmonized Channel Specifications for Intelligent Transport*

*Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band*. ETSI Technical Specification TS 102 724 V1.1.1, 2012.

- [54] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*. ETSI European Standard EN 302 637-2 Vo.0.13 (Draft), 2013.
- [55] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport Systems (ITS); Access Layer Specification for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band*. ETSI European Standard ES 302 663 V1.2.1 (Final Draft), 2013.
- [56] European Telecommunications Standards Institute. *Intelligent Transport System (ITS); Users & Applications Requirements; Facility Layer Structure, Functional Requirements and Specifications*. ETSI Technical Specification 102 894 V1.0.6 (Draft), 2013.
- [57] Yaser P. Fallah, Ching-Ling Huang, Raja Sengupta und Hariharan Krishnan. Congestion Control Based on Channel Occupancy in Vehicular Broadcast Networks. In *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2010*, Seiten 1–5. IEEE, 2010. ISBN 978-1-4244-3573-9. doi: 10.1109/VETECE.2010.5594504.
- [58] Yaser P. Fallah, Ching-Ling Huang, Raja Sengupta und Hariharan Krishnan. Analysis of Information Dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks With Application to Cooperative Vehicle Safety Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(1):233–247, 2011. ISSN 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2010.2085022.
- [59] Federal Communications Commission. *Amendment of Parts 2 and 90 of the Commission's Rules to Allocate the 5.850-5.925 GHz Band to the Mobile Service for Dedicated Short Range Communications of Intelligent Transportation Services*. FCC 99-305 Report and Order, ET Docket No. 98-95, RM-9096, 1999.
- [60] Michael Feiri, Jonathan Petit und Frank Kargl. Evaluation of Congestion-based Certificate Omission in VANETs. In *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Seiten 101–108. IEEE, 2012. ISBN 978-1-4673-4996-3. doi: 10.1109/VNC.2012.6407417.
- [61] Andreas Festag und Soeren Hess. ETSI Technical Committee ITS: News From European Standardization for Intelligent Transport Systems (ITS). *IEEE Communications Magazine, Global Communications Newsletter*, 47(6): 1–4, 2009. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2009.5116819.
- [62] Andreas Festag, Long Le und Maria Goleva. Field Operational Tests for Cooperative Systems: A Tussle Between Research, Standardization and Deployment. In *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2011)*, Seite 73, New York City, NY, USA, 2011. ACM Press. ISBN 9781450308694. doi: 10.1145/2030698.2030710.

- [63] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. Ausgabe 2001, Fassung 2009, FGSV-Verlag, Köln, 2009.
- [64] Harald T. Friis. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5):254–256, 1946.
- [65] Matthew S. Gast. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. O'Reilly, 2. Aufl., 2005. ISBN 0596100523.
- [66] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, Stanford University, CA, 2005. doi: 10.2277/0521837162.
- [67] Jérôme Härri. Vehicular Mobility Modeling for VANET. In Hannes Hartenstein und Kenneth P Laberteaux (Hrsg.), *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*, Seiten 107–156. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. ISBN 9780470740637. doi: 10.1002/9780470740637.ch5.
- [68] Jérôme Härri, Fethi Filali und Christian Bonnet. Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: a Survey and Taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(4):19–41, 2009. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2009.090403.
- [69] Hannes Hartenstein und Kenneth P. Laberteaux. A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(6):164–171, 2008. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2008.4539481.
- [70] Dirk Helbing. *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997. ISBN 978-3-642-63834-3. doi: 10.1007/978-3-642-59063-4.
- [71] Soeren Hess, Gérard Segarra, Knut Evensen, Andreas Festag, Thomas Weber, Scott Cadzow, Martin Arndt und Anthony Wiles. Towards Standards for Sustainable ITS in Europe. In *16th ITS World Congress and Exhibition*, Stockholm, Schweden, 2009.
- [72] Ching-Ling Huang, Yaser P. Fallah, Raja Sengupta und Hariharan Krishnan. Information Dissemination Control for Cooperative Active Safety Applications in Vehicular Ad-Hoc Networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 2009 (IEEE GLOBECOM 2009)*, Seiten 1–6. IEEE, 2009. ISBN 978-1-4244-4148-8. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425750.
- [73] Ching-Ling Huang, Yaser P. Fallah, Raja Sengupta und Hariharan Krishnan. Adaptive Intervehicle Communication Control for Cooperative Safety Systems. *IEEE Network*, 24(1):6–13, 2010. ISSN 0890-8044. doi: 10.1109/MNET.2010.5395777.
- [74] Ching-Ling Huang, Yaser P. Fallah, Raja Sengupta und Hariharan Krishnan. Intervehicle Transmission Rate Control for Cooperative Active Safety System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3):645–658, 2011. ISSN 1524-9050. doi: 10.1109/TITS.2010.2070873.

- [75] IEEE Computer Society. *Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 2: Logical Link Control*. IEEE Standard 802.2 - ISO/IEC 8802-2:1998, 1998.
- [76] IEEE Computer Society. *Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Standard 802.11-2007, 2007.
- [77] IEEE Computer Society. *Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. IEEE Standard 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007), 2010.
- [78] IEEE Computer Society. *Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Standard 802.11-2012, 2012.
- [79] IEEE Vehicular Technology Society. *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services*. IEEE Std 1609.3-2010, 2010.
- [80] IEEE Vehicular Technology Society. *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation*. IEEE Std 1609.4-2010, 2010.
- [81] IEEE Vehicular Technology Society. *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture*. IEEE Std 1609.0-2013, 2013.
- [82] IEEE Vehicular Technology Society. *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages*. IEEE Std 1609.2-2013, 2013.
- [83] INETMANET Framework for OMNEST/OMNeT++ 4.0. URL <https://github.com/inetmanet>. Zuletzt aufgerufen am 11.04.2013.
- [84] International Organization for Standardization (ISO). *Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model*. ISO/IEC International Standard 7498-1, 1994.
- [85] IT++ Library. URL <http://itpp.sourceforge.net>. Zuletzt aufgerufen am 11.10.2013.
- [86] Daniel Jiang, Qi Chen und Luca Delgrossi. Communication Density: A Channel Load Metric for Vehicular Communications Research. In 2007

- IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. IEEE, 2007. ISBN 978-1-4244-1454-3. doi: 10.1109/MOBHOC.2007.4428734.
- [87] Daniel Jiang, Qi Chen und Luca Delgrossi. Optimal Data Rate Selection for Vehicle Safety Communications. In *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2008)*, Seite 30, New York City, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 9781605581910. doi: 10.1145/1410043.1410050.
- [88] Karl-Dirk Kammeyer. *Nachrichtenübertragung*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 5. Aufl., 2011. ISBN 978-3834808967.
- [89] Georgios Karagiannis, Onur Altintas, Eylem Ekici, Geert Heijenk, Boan-goat Jarupan, Kenneth Lin und Timothy Weil. Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(4): 584–616, 2011. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2011.061411.00019.
- [90] Johan Karedal, Fredrik Tufvesson, Nicolai Czink, Alexander Paier, Charlotte Dumard, Thomas Zemen, Christoph Mecklenbrauer und Andreas Molisch. A Geometry-Based Stochastic MIMO Model for Vehicle-to-Vehicle Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(7):3646–3657, 2009. ISSN 1536-1276. doi: 10.1109/TWC.2009.080753.
- [91] Phil Karn. MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio. In *ARRL 9th Computer Networking Conference*, London, Ontario, Canada, 1990.
- [92] Sanjit Kaul, Marco Gruteser, Vinuth Rai und John Kenney. Minimizing Age of Information in Vehicular Networks. In *8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON 2011)*, Seiten 350–358. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4577-0094-1. doi: 10.1109/SAHCN.2011.5984917.
- [93] Chonlatee Khorakhun, Holger Busche und Hermann Rohling. Congestion Control for VANETs Based on Power or Rate Adaptation. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2008)*, Hamburg, 2008.
- [94] Leonard Kleinrock und Fouad A. Tobagi. Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics. *IEEE Transactions on Communications*, 23(12):1400–1416, December 1975. ISSN 0096-2244. doi: 10.1109/TCOM.1975.1092768.
- [95] Bernhard Kloiber, Thomas Strang, Fabian de Ponte-Müller, Cristina Rico Garcia und Matthias Röckl. An Approach for Performance Analysis of ETSI ITS-G5A MAC for Safety Applications. In *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST 2010)*, Kyoto, Japan, 2010.

- [96] Bernhard Kloiber, Thomas Strang, Matthias Röckl und Fabian de Ponte-Müller. Performance of CAM Based Safety Applications Using ITS-G5A MAC in High Dense Scenarios. In *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 654–660. IEEE, June 2011. ISBN 978-1-4577-0890-9. doi: 10.1109/IVS.2011.5940461.
- [97] Andrzej Kochut, Arunchandar Vasan, A. Udaya Shankar und Ashok Agrawala. Sniffing Out the Correct Physical Layer Capture Model in 802.11b. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2004)*, Seiten 252–261. IEEE, 2004. ISBN 0-7695-2161-4. doi: 10.1109/ICNP.2004.1348115.
- [98] Timo Kosch, Ilse Kulp, Marc Bechler, Markus Strassberger, Benjamin Weyl und Robert Lasowski. Communication Architecture for Cooperative Systems in Europe. *IEEE Communications Magazine*, 47(5):116–125, 2009. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2009.4939287.
- [99] Daniel Krajzewicz. Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. In *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft, 2. Berliner Fachtagung für Fahrermodellierung*, Seiten 104–115. Verein Deutscher Ingenieure [Fortschritt-Berichte VDI / 22]: Fortschritt-Berichte / VDI ; Nr. 28 : Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, 2009.
- [100] Daniel Krajzewicz. Traffic Simulation with SUMO - Simulation of Urban Mobility. In Jaume Barceló (Hrsg.), *Fundamentals of Traffic Simulation*, Seiten 269–293. Springer New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6141-9.
- [101] Daniel Krajzewicz, Georg Hertkorn, Christian Rössel und Peter Wagner. SUMO (Simulation of Urban MObility) - an Open-Source Traffic Simulation. In *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM2002)*, Seiten 183–187, 2002. ISBN 90-77039-09-0.
- [102] Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch und Laura Bieker. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3/4):128–138, 2012.
- [103] Stefan Krauß. *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Forschungsbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; zugl. Diss., Universität Köln, Köln, 1998.
- [104] Jürgen Kunisch und Jörg Pamp. Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz. In *IEEE 68th Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2008*, Seiten 1–5. IEEE, 2008. ISBN 978-1-4244-1721-6. doi: 10.1109/VETEFC.2008.64.
- [105] Averill M. Law. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 5. Aufl., 2014. ISBN 978-1259254383.

- [106] Jeongkeun Lee, Wonho Kim, Sung-Ju Lee, Daehyung Jo, Jiho Ryu, Taekyoung Kwon und Yanghee Choi. An Experimental Study on the Capture Effect in 802.11a Networks. In *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization - WinTECH '07*, Seite 19, New York City, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 9781595937384. doi: 10.1145/1287767.1287772.
- [107] Linux Wireless Website - ath5k. URL <http://linuxwireless.org/en/users/Drivers/ath5k>. Zuletzt aufgerufen am 08.02.2012.
- [108] Christoph F. Mecklenbräuker, Andreas F. Molisch, Johan Karedal, Fredrik Tufvesson, Alexander Paier, Laura Bernado, Thomas Zemen, Oliver Klemp und Nicolai Czink. Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance. *Proceedings of the IEEE*, 99(7):1189–1212, 2011. ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2010.2101990.
- [109] Jens Mittag. *Characterization, Avoidance and Repair of Packet Collisions in Inter-Vehicle Communication Networks*. Dissertation, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012. ISBN 978-3-86644-880-3.
- [110] Jens Mittag, Felix Schmidt-Eisenlohr, Moritz Killat, Jérôme Härrri und Hannes Hartenstein. Analysis and Design of Effective and Low-Overhead Transmission Power Control for VANETs. In *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on VehiculAr Inter-NETworking (VANET 2008)*, Seiten 39–48, New York City, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 978-1-60558-191-0. doi: 10.1145/1410043.1410051.
- [111] Jens Mittag, Felix Schmidt-Eisenlohr, Moritz Killat, Marc Torrent Moreno und Hannes Hartenstein. MAC Layer and Scalability Aspects of Vehicular Communication Networks. In Hannes Hartenstein und Kenneth P Laberteaux (Hrsg.), *VANET - Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*, Seiten 219–272. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2010. ISBN 9780470740637. doi: 10.1002/9780470740637.
- [112] Jens Mittag, Stylianos Papanastasiou, Hannes Hartenstein und Erik G. Strom. Enabling Accurate Cross-Layer PHY/MAC/NET Simulation Studies of Vehicular Communication Networks. *Proceedings of the IEEE*, 99(7):1311–1326, 2011. ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2010.2103291.
- [113] Andreas F. Molisch. *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, Ltd, Piscataway, NJ, 2. Aufl., 2010. ISBN 978-0-4707-4187-0.
- [114] Andreas F. Molisch, Fredrik Tufvesson, Johan Karedal und Christoph F. Mecklenbräuker. A Survey on Vehicle-to-Vehicle Propagation Channels. *IEEE Wireless Communications*, 16(6):12–22, 2009. ISSN 1536-1284. doi: 10.1109/MWC.2009.5361174.
- [115] Minoru Nakagami. The m-distribution - A general formula of intensity distribution of rapid fading. In W. C. Hoffman (Hrsg.), *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Elmsford, NY, 1960. Pergamon Press.

- [116] B. Clifford Neuman. Scale in Distributed Systems. In Thomas L. Casavant und Mukesh Singhal (Hrsg.), *Readings in Distributed Computing Systems*. IEEE Computer Society Press, 1994. ISBN 0818630329.
- [117] NS-3 Network Simulator. URL <http://www.nsnam.org>. Zuletzt aufgerufen am 11.08.2013.
- [118] OMNeT++ Network Simulation Framework. URL <http://www.omnetpp.org>. Zuletzt aufgerufen am 20.04.2013.
- [119] OpenStreetMap Website. URL <http://www.openstreetmap.org>. Zuletzt aufgerufen am 30.04.2013.
- [120] Alexander Paier. *The Vehicular Radio Channel in the 5 GHz Band*. Dissertation, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, Technische Universität Wien, 2010.
- [121] Alexander Paier, Johan Karedal, Nicolai Czink, Helmut Hofstetter, Charlotte Dumard, Thomas Zemen, Fredrik Tufvesson, Andreas F. Molisch und Christoph F. Mecklenbräuer. Car-to-Car Radio Channel Measurements at 5 GHz: Pathloss, Power-Delay Profile, and Delay-Doppler Spectrum. In *2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Seiten 224–228. IEEE, 2007. ISBN 978-1-4244-0978-5. doi: 10.1109/ISWCS.2007.4392335.
- [122] Lothar Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3*. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 6. Aufl., 2011. ISBN 978-3-8348-1227-8.
- [123] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2. Aufl., 2000. ISBN 047198857X.
- [124] PC Engines Alix.3D3 Product File. URL <http://pcengines.ch/alix3d3.htm>. Zuletzt aufgerufen am 08.02.2012.
- [125] Charles E. Perkins (Hrsg.). *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley Professional, Boston, MA, USA, 2001. ISBN 0201309769.
- [126] Al Petrick und Bob O'Hara. *The IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion*. Standards Information Network, IEEE Press, New York City, NY, USA, 2. Aufl., 2005. ISBN 0-7381-4449-5.
- [127] QualNet - Scalable Network Technologies, Inc. URL <http://web.scalable-networks.com/content/qualnet>. Zuletzt aufgerufen am 29.12.2013.
- [128] Radiotap Website. URL <http://www.radiotap.org/>. Zuletzt aufgerufen am 09.02.2012.
- [129] Ram Ramanathan und Jason Redi. A Brief Overview of Ad Hoc Networks: Challenges and Directions. *IEEE Communications Magazine*, 40(5): 20–22, May 2002. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2002.1006968.

- [130] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 2. Aufl., 2002. ISBN 978-0-1304-2232-3.
- [131] Cristina Rico Garcia, Andreas Lehner, Patrick Robertson und Thomas Strang. Performance of MAC Protocols in Beaconing Mobile Ad-Hoc Multibroadcast Networks. In *Proceedings of the Third International Multiple Access Communications Workshop (MACOM 2010)*, Barcelona, Spanien, 2010. Springer, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6235. doi: 10.1007/978-3-642-15428-7\_26.
- [132] RUDE & CRUDE Website. URL <http://rude.sourceforge.net/>. Zuletzt aufgerufen am 09.02.2012.
- [133] SAE International. *Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. SAE Standard J2735, 2009.
- [134] Jochen Schiller. *Mobile Communications*. Addison-Wesley, London, 2. Aufl., 2003. ISBN 978-0-3211-2381-7.
- [135] Robert K. Schmidt, T. Köllmer, T. Leinmüller, B. Böddeker und G. Schäfer. Degradation of Transmission Range in VANETs Caused by Interference. *PIK-Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, 32(4): 224–234, December 2009. ISSN 0930-5157. doi: 10.1515/piko.2009.0043.
- [136] Robert K. Schmidt, Robert Lasowski, Tim Leinmüller, Claudia Linnhoff-Popien und Günter Schäfer. An Approach for Selective Beacon Forwarding to Improve Cooperative Awareness. In *Submitted to IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2010.
- [137] Robert K. Schmidt, Tim Leinmüller, Bert Böddeker und Günter Schäfer. Adapting the Wireless Carrier Sensing for VANETs. In *In Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2010)*, 2010.
- [138] Robert K. Schmidt, Bernhard Kloiber, Florian Schüttler und Thomas Strang. Degradation of Communication Range in VANETs Caused by Interference 2.0 - Real-World Experiment. In *3rd International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars 2011)*, 2011.
- [139] Felix Schmidt-Eisenlohr. *Interference in Vehicle-to-Vehicle Communication Networks*. Dissertation, Univ.-Verl. Karlsruhe, 2010. ISBN 978-3-86644-571-0.
- [140] Felix Schmidt-Eisenlohr und Hannes Hartenstein. Simulation-Based Capacity Estimates for Local Broadcast Transmissions. In *Proceedings of the 7th ACM International Workshop on VehiculAr Inter-NETworking (VANET 2010)*, Seiten 21–30, New York City, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-4503-0145-9. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1860058.1860063>.

- [141] Felix Schmidt-Eisenlohr, Marc Torrent Moreno, Jens Mittag und Hannes Hartenstein. Simulation Platform for Inter-Vehicle Communications and Analysis of Periodic Information Exchange. In *2007 Fourth Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*, Seiten 50–58. IEEE, 2007. ISBN 1-4244-0860-1. doi: 10.1109/WONS.2007.340475.
- [142] Werner Schnabel und Dieter Lohse. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1 - Straßenverkehrstechnik*. Beuth Verlag, Berlin, Kirschbaum Verlag, Bonn, Berlin, 3. Aufl., 2011. ISBN 978-3-410-17271-0.
- [143] Henrik Schumacher und Hugues Tchouankem. Highway Propagation Modeling in VANETS and Its Impact on Performance Evaluation. In *10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Seiten 178–185. IEEE, 2013. ISBN 978-1-4799-0749-6. doi: 10.1109/WONS.2013.6578344.
- [144] Henrik Schumacher, Christian Priemer und Eric N. Slottke. A Simulation Study of Traffic Efficiency Improvement Based on Car-to-X Communication. In *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2009)*, Seiten 13–22, New York City, NY, USA, 2009. ACM. ISBN 9781605587370. doi: 10.1145/1614269.1614274.
- [145] Henrik Schumacher, Hugues Tchouankem, Jörg Nuckelt, Thomas Kürner, Tetiana Zinchenko, André Leschke und Lars Wolf. Vehicle-to-Vehicle IEEE 802.11p Performance Measurements at Urban Intersections. In *IEEE Int. Conf. on Communications (ICC) 2012 - Workshop on Intelligent Vehicular Networking (WIVN)*, Seiten 7131–7135. IEEE, 2012. doi: 10.1109/ICC.2012.6364714.
- [146] Miguel Sepulcre und Javier Gozalvez. On the Importance of Application Requirements in Cooperative Vehicular Communications. In *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, Seiten 124–131. IEEE, 2011. ISBN 978-1-61284-189-2. doi: 10.1109/WONS.2011.5720180.
- [147] Miguel Sepulcre, Jens Mittag, Paolo Santi, Hannes Hartenstein und Javier Gozalvez. Congestion and Awareness Control in Cooperative Vehicular Systems. *Proceedings of the IEEE*, 99(7):1260–1279, 2011. ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2011.2116751.
- [148] John S. Seybold. *Introduction to RF Propagation*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005. ISBN 9780471743699. doi: 10.1002/0471743690.
- [149] Mihail Sichitiu und Maria Kihl. Inter-Vehicle Communication Systems: a Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(2):88–105, 2008. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2008.4564481.

- [150] Gursharan S. Sidhu, Richard F. Andrews und Alan B. Oppenheimer. *Inside AppleTalk*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2. Aufl., 1990. ISBN 0-201-55021-0.
- [151] Katrin Sjöberg. *Medium Access Control for Vehicular Ad Hoc Networks*. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013. ISBN 978-91-7385-832-8.
- [152] Katrin Sjöberg, Elisabeth Uhlemann und Erik G. Ström. Delay and Interference Comparison of CSMA and Self-Organizing TDMA When Used in VANETs. In *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Seiten 1488–1493. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4244-9539-9. doi: 10.1109/IWCMC.2011.5982758.
- [153] Katrin Sjöberg, Elisabeth Uhlemann und Erik G. Ström. How Severe Is the Hidden Terminal Problem in VANETs When Using CSMA and STDMA? In *IEEE 74th Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2011*, Seiten 1–5. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4244-8327-3. doi: 10.1109/VETECE.2011.6093256.
- [154] Katrin Sjöberg-Bilstrup, Elisabeth Uhlemann und Erik G. Ström. Scalability Issues of the MAC Methods STDMA and CSMA of IEEE 802.11p When Used in VANETs. In *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*, Seiten 1–5. IEEE, 2010. ISBN 978-1-4244-6824-9. doi: 10.1109/ICCW.2010.5503941.
- [155] Christoph Sommer und Falko Dressler. Using the Right Two-Ray Model? A Measurement based Evaluation of PHY Models in VANETs. In *17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011), Poster Session*, Las Vegas, NV, 2011. ACM.
- [156] Christoph Sommer, Reinhard German und Falko Dressler. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(1):3–15, 2011. ISSN 1536-1233. doi: 10.1109/TMC.2010.133.
- [157] Daniel D. Stancil, Fan Bai und Lin Cheng. Communication Systems for Car-2-X Networks. In Marc Emmelmann, Bernd Bochow und C. Christopher Kellum (Hrsg.), *Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond*, Seiten 45–81. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2010.
- [158] Razvan Stanica, Emmanuel Chaput und Andre-Luc Beylot. Properties of the MAC Layer in Safety Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):192–200, 2012. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194402.
- [159] Gordon L. Stüber. *Principles of Mobile Communication*. Springer, New York City, NY, USA, 3. Aufl., 2011.
- [160] SUMO - Simulation of Urban MObility. URL <http://sumo.sourceforge.net/>. Zuletzt aufgerufen am 08.04.2013.

- [161] Vikas Taliwal, Daniel Jiang, Heiko Mangold, Chi Chen und Raja Sengupta. Empirical Determination of Channel Characteristics for DSRC Vehicle-to-Vehicle Communication. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, Seite 88, New York City, NY, USA, 2004. ACM. ISBN 1581139225. doi: 10.1145/1023875.1023890.
- [162] Hugues Tchouankem, Tetiana Zinchenko, Henrik Schumacher und Lars Wolf. Effects of Vegetation on Vehicle-to-Vehicle Communication Performance at Intersections. In *IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Seiten 1–6. IEEE, 2013. ISBN 978-1-4673-6187-3. doi: 10.1109/VTCFall.2013.6692173.
- [163] tcpdump & libpcap Website. URL <http://www.tcpdump.org/>. Zuletzt aufgerufen am 09.02.2012.
- [164] Tessa Tielert, Daniel Jiang, Qi Chen, Luca Delgrossi und Hannes Hartenstein. Design Methodology and Evaluation of Rate Adaptation Based Congestion Control for Vehicle Safety Communications. In *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Seiten 116–123. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4673-0047-6. doi: 10.1109/VNC.2011.6117132.
- [165] Tessa Tielert, Daniel Jiang, Hannes Hartenstein und Luca Delgrossi. Joint Power/Rate Congestion Control Optimizing Packet Reception in Vehicle Safety Communications. In *Proceedings of the 10th ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, Systems, and Applications (VANET 2013)*, Seite 51, New York City, NY, USA, 2013. ACM Press. ISBN 9781450320733. doi: 10.1145/2482967.2482968.
- [166] Ilenia Tinnirello und Giuseppe Bianchi. Rethinking the IEEE 802.11e EDCA Performance Modeling Methodology. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18(2):540–553, 2010. ISSN 1063-6692. doi: 10.1109/TNET.2009.2029101.
- [167] Fouad A. Tobagi und Leonard Kleinrock. Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution. *IEEE Transactions on Communications*, 23(12):1417–1433, 1975.
- [168] Chai-Keong Toh. *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.
- [169] Peter Tondl. *Dezentrale Verteilung von Verkehrsinformationen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation*. Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik - Reihe 2, Kommunikationsnetze. Dissertation, Universität Hannover: Shaker, 2006. ISBN 3832251510.
- [170] Marc Torrent Moreno. *Inter-Vehicle Communications: Achieving Safety in a Distributed Wireless Environment*. Dissertation, Univ.-Verl. Karlsruhe, 2007. ISBN 3866441754.

- [171] Marc Torrent Moreno, Daniel Jiang und Hannes Hartenstein. Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-Based Vehicular Ad-Hoc Networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, Seiten 10–18, Philadelphia, PA, USA, 2004. ACM. ISBN 1-58113-922-5. doi: 10.1145/1023875.1023878.
- [172] Marc Torrent Moreno, Moritz Killat und Hannes Hartenstein. The Challenges of Robust Inter-Vehicle Communications. In *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2005*, Seiten 319–323. IEEE, 2005. ISBN 0-7803-9152-7. doi: 10.1109/VETEFC.2005.1557524.
- [173] Marc Torrent Moreno, Paolo Santi und Hannes Hartenstein. Fair Sharing of Bandwidth in VANETs. In *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2005)*, Seiten 49–58, New York City, NY, USA, 2005. ACM. doi: 10.1145/1080754.1080762.
- [174] Marc Torrent Moreno, Steven Corroy, Felix Schmidt-Eisenlohr und Hannes Hartenstein. IEEE 802.11-Based One-Hop Broadcast Communications: Understanding Transmission Success and Failure Under Different Radio Propagation Environments. In *Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '06*, Seite 68, New York City, NY, USA, 2006. ACM Press. ISBN 1595934774. doi: 10.1145/1164717.1164731.
- [175] Marc Torrent Moreno, Paolo Santi und Hannes Hartenstein. Distributed Fair Transmit Power Adjustment for Vehicular Ad Hoc Networks. In *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Seiten 479–488. IEEE, 2006. ISBN 1-4244-0626-9. doi: 10.1109/SAHCN.2006.288504.
- [176] Marc Torrent Moreno, Jens Mittag, Paolo Santi und Hannes Hartenstein. Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7):3684–3703, 2009. ISSN 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2009.2017545.
- [177] Martin Treiber und Arne Kesting. *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-05227-9. doi: 10.1007/978-3-642-05228-6.
- [178] Andras Varga. The OMNeT++ Discrete Event Simulation System. In *Proceedings of the European Simulation Multiconference*, Seiten 319–324, Prag, Tschechien, 2001. SCS - European Publishing House.
- [179] Andras Varga. OMNeT++. In Klaus Wehrle, Mesut Günes und James Gross (Hrsg.), *Modeling and Tools for Network Simulation*, Seiten 35–59. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-12330-6.
- [180] Yi Wang, Akram Ahmed, Bhaskar Krishnamachari und Konstantinos Psounis. IEEE 802.11p Performance Evaluation and Protocol Enhance-

- ment. In *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2008)*, Seiten 317–322. IEEE, 2008.
- [181] Axel Wegener, Michal Piórkowski, Maxim Raya, Horst Hellbrück, Stefan Fischer und Jean-Pierre Hubaux. TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators. In *CNS '08: Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, Seiten 155–163, New York City, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 1-56555-318-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1400713.1400740>.
- [182] Klaus Wehrle, Mesut Günes und James Gross (Hrsg.). *Modeling and Tools for Network Simulation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-12330-6. doi: 10.1007/978-3-642-12331-3.
- [183] Theodore Willke, Patcharinee Tientrakool und Nicholas Maxemchuk. A Survey of Inter-Vehicle Communication Protocols and Their Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(2):3–20, 2009. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2009.090202.
- [184] Lars Wischhof und Hermann Rohling. Congestion Control in Vehicular Ad Hoc Networks. In *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES'05)*, Seiten 58–63. IEEE, 2005. ISBN 0-7803-9435-6. doi: 10.1109/ICVES.2005.1563614.
- [185] Qing Xu, Tony Mak, Jeff Ko und Raja Sengupta. Vehicle-to-Vehicle Safety Messaging in DSRC. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, Seite 19, New York City, NY, USA, 2004. ACM. ISBN 1581139225. doi: 10.1145/1023875.1023879.
- [186] Wenhui Zhang, Andreas Festag, Roberto Baldessari und Long Le. Congestion Control for Safety Messages in VANETs: Concepts and Framework. In *8th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Seiten 199–203, Phuket, Thailand, 2008. doi: 10.1109/ITST.2008.4740256.

## WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG

---

Name	Henrik Schumacher
Geburtsdatum	31. Juli 1979
Geburtsort	Hildesheim
12/2005 bis 02/2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Fachgebiet Kommunikationsnetze des Instituts für Kommunikationstechnik der Leibniz Universität Hannover  Forschungsschwerpunkt: Fahrzeug-zu-X- Kommunikation auf Basis von IEEE 802.11
10/2002 bis 11/2005	Studium an der Universität Hannover: Studiengang Wirtschaftsingenieur, Studienrichtung Elektrotechnik  Wahlpflichtfächer: Informationstechnik, Produktionswirtschaft  Diplomarbeit am Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover zum Thema Sprachübertragung in IEEE 802.11 WLANs
10/2000 bis 09/2002	Studium und Vordiplom an der Technischen Universität Braunschweig: Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Elektrotechnik
06/1999	Erlangung der allgemeinen Hochschulreife am Gymnasium Große Schule in Wolfenbüttel