Serviceorientiertes Mehrkanal-Beaconing in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen

Robert Lasowski

Dissertation

München 2012

Serviceorientiertes Mehrkanal-Beaconing in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen

Robert Lasowski

Dissertation

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik
der Ludwig–Maximilians–Universität
München

vorgelegt von
Robert Lasowski
München

Tag der Einreichung: 11. Mai 2012
Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2012

1. Berichterstatterin: Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien - LMU München
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz - TU Darmstadt

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als externer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile und Verteilte Systeme des Instituts für Mathematik, Informatik und Statistik an der Ludwig-Maximilians-Universität München entstanden. In dieser Zeit habe ich in unterschiedlichster Form Unterstützung und Motivation von verschiedenen Personen erfahren, denen es hiermit zu danken gilt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, die es mir ermöglicht hat meine wissenschaftliche Tätigkeit an ihrem Lehrstuhl zu beginnen und mich immer darin unterstützt hat mein Thema nach meinen Interessen auszurichten. Ich danke ihr herzlichst für die spannenden und lehrreichen Diskussionen, sowie die motivierenden Worte, die mich stets mit guter Hoffnung voran schreiten ließen.

Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr. Ralf Steinmetz, der sich bereit erklärt hat meine Arbeit als Zweitgutachter zu betreuen und Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Kriegel, der den Vorsitz meiner Prüfungskommission übernommen hat.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Markus Straßberger, Dr. Timo Kosch und Dr. Robert K. Schmidt, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mit mir sowohl inhaltliche als auch grundsätzliche Themen meiner Promotion diskutiert haben.

Bedanken möchte ich mich auch nicht zuletzt bei allen Lehrstuhlkollegen, die mich herzlich aufgenommen haben und mich trotz externer Promotion sowohl fachlich als auch durch gemeinsame Unternehmungen in das Leben am Lehrstuhl integriert haben. Besonders danken will ich an dieser Stelle Markus Duchon und Florian Gschwandtner, die mit mir - sei es auf gemeinsame Tagungsreisen oder durch gemeinsame Forschungsarbeiten - den Weg der Promotion beschritten haben.

Danken will ich vor allem auch meinen Eltern und meiner Schwester, die immer an mich geglaubt haben und nie am erfolgreichen Abschluss meiner Promotion gezweifelt haben. Besonderen Dank an dieser Stelle möcht ich meiner Freundin Natascha Perera aussprechen, die mich moralisch zu jeder Zeit ausnahmslos unterstützt hat und mit mir durch alle Höhen und Tiefen der Promotion gegangen ist.

Neben meiner Familie und meiner Freundin möchte ich mich auch bei all meinen Freunden und Arbeitskollegen bedanken, die mich trotz meiner eingeschränkten Zeit immer wieder mit offenen Armen empfangen haben und mir somit den notwendigen Ausgleich ermöglicht haben. An dieser Stelle möchte ich besonders Daniel Lukas und Dietmar Kollmeier hervorheben, die mich beide auf ihre Weise durch diese Zeit begleitet haben.

Zusammenfassung

Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander ist ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz. Dafür tauschen Fahrzeuge mit ihren Nachbarn Positions- und Zustandsinformationen aus, um eine Wissensbasis zur Berechnung von Kollisionswahrscheinlichkeiten aufzubauen. Um kritische Situationen erkennen zu können, ist es notwendig, Informationen zuverlässig empfangen zu können. Allerdings werden zur Umsetzung derartiger Systeme typischerweise WLAN-basierte Ad-hoc-Netze verwendet, welche vor allem bei einer hohen Anzahl an Teilnehmern keine zuverlässige Übertragung von Nachrichten gewährleisten.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beaconing-Algorithmus zu entwickeln, welcher es ermöglicht bei jeder Fahrzeugdichte die geforderte Wissensbasis zur Erkennung von sicherheitskritischen Situationen aufzubauen.

Aufbauend auf der Spezifizierung der Situationen zur Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung und den damit definierten Metriken zur Beurteilung von Beaconing Algorithmen, wird zunächst die Güte von Beaconing-Ansätzen mit unterschiedlichen statischen Beacon-Wiederholratn untersucht. Es wird gezeigt, dass dieser Ansatz die Anforderungen nach einem gleichbleibenden Informationsdurchsatz bei hohen Fahrzeugdichten nicht erfüllen kann. Um trotz der unzuverlässigen Nachrichtenübertragung den geforderten Informationsdurchsatz in Abhängigkeit der individuellen Situation eines jeden Fahrzeugs zu gewährleisten, wird in dieser Arbeit ein serviceorientierter Beaconing-Ansatz eingeführt. Hierbei wird jeweils eine Variante für die entsprechende spezifizierte Situation definiert.

Es wird gezeigt, dass der serviceorientierte Ansatz unter Nutzung von einem Kommunikationskanal bei niedrigen und mittleren Fahrzeugdichten eine Verbesserung des Informationsdurchsatzes erzielen kann. Bei hohen Fahrzeugdichten sinkt der Mehrwert allerdings aufgrund des hohen Nachrichtenaufkommens. Auf diesen Erkenntnissen wird eine Mehrkanal-Variante des Beaconing-Ansatzes vorgeschlagen. Hierbei sollen zur Serviceerbringung gesonderte Kanäle genutzt werden, um die Kommunikationslast besser verteilen zu können. Nach einer ausgiebigen Evaluierung der Mehrkanalnutzung in Fahrzeuge-Ad-hoc-Netzen und unter Berücksichtigung der dabei existierenden Einschränkungen kann gezeigt werden, dass die Mehrkanal-Variante des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes signifikante Verbesserungen für den Informationsdurchsatz sowohl in der Kollisionserkennungs- als auch Kollisionsvermeidungsphase über alle Fahrzeugdichten erzielen kann.

Abstract

The interconnection of vehicles is an important topic concerning the enhancement of traffic safety and traffic efficiency. Therefore, vehicles exchange position and state information with each other to establish an awareness level for the calculation of collision probabilities with their neighbors. To recognize critical safety situations it is essential to receive information reliably. However, these systems are typically based on wireless ad-hoc networks that cannot guarantee reliable packet transmission. This is especially the case in situations where a high number of communication nodes exist.

The aim of this work at hand is the definition of a beaconing algorithm that enables the establishment of a desired awareness level for critical safety situations especially in high density traffic scenarios.

First, representative scenarios for collision detection and collision avoidance were specified and metrics for the evaluation of the beaconing algorithms were defined. Based on these metrics the performance of beaconing algorithms with different static periodical update rates was evaluated. It is presented that these kinds of beaconing algorithms cannot provide sufficient results with respect to the required constant information throughput in high density traffic situations. To provide a high awareness level for each vehicle in its individual situation in spite of an unreliable communication channel a service-oriented beaconing approach is defined in this work. It is based on a request/response communication scheme to compensate particular packet loss. Hereby, a broadcast and a unicast occurrence of the algorithm are defined accordingly to the corresponding representative scenarios.

It is presented that the service-oriented beaconing approach provides a significant benefit with respect to the information throughput for low and middle traffic density situations. However, in high density situations the benefit of this approach is decreasing due to the increased communication overhead. This is a result of using one single communication channel. To achieve a high awareness level also in high density traffic situations, a significant modification was defined. Therefore, the usage of multiple communication channels was introduced to distribute the communication load over several channels. It is specified to send all service responses on a dedicated service channel to reduce the load on the control channel where the service requests are transmitted. After an extensive evaluation of the multi-channel utilization in vehicle ad-hoc networks using IEEE 802.11p it is shown that the multi-channel version of the service-oriented beaconing approach can achieve significant benefits concerning the information throughput for the collision detection and collision avoidance scenarios even in high density traffic situations.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen WLAN-basierter Fahrzeug-Ad-hoc-Netze **5**
2.1 Einführung 5
2.1.1 Aktivitäten im Bereich der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze 6
2.1.2 Systemvoraussetzungen 8
2.1.3 Komponenten 9
2.2 Anwendungssicht 10
2.3 Netzwerksicht 16
2.3.1 IEEE 802.11p 17
2.3.2 CSMA/CA 19
2.3.3 Mehrkanalnutzung 20
2.3.4 Signalausbreitung in drahtlosen Kommunikationsnetzen 23
2.4 Problemstellung 26
2.5 Kriterien für den Beaconing-Algorithmus 27
2.6 Zusammenfassung 29

3 Beaconing-Ansätze in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen **31**
3.1 Anpassung der Beacon-Wiederholrate 31
3.2 Anpassung der Beacon-Sendeleistung 32
3.3 Multihop Beaconing 33
3.4 Kontextadaptives Beaconing 34
3.5 Bidirektionale Ansätze 35
3.6 Zusammenfassung 36

4 Serviceorientierter Beaconing-Ansatz **37**
4.1 Situationsdefinition 38
4.1.1 Kollisionserkennung 40
4.1.2 Kollisionsvermeidung 41
4.2 Statische Wiederholraten 42
4.3 Serviceorientiertes Beaconing 45
4.3.1 Servicedefinition 46
4.3.2 Beacon Forwarding Service 48

4.3.3 Beacon Rate Control Service . . . 53
4.4 Zusammenfassung . . . 57

5 Evaluierung der gleichzeitigen Nutzung benachbarter Kanäle 59
5.1 Interferenzen bei der Mehrkanalnutzung . . . 60
5.2 Evaluierung des RX-TX-Szenarios . . . 66
5.2.1 Simulationsaufbau . . . 68
5.2.2 Ergebnisse . . . 69
5.3 Zusammenfassung . . . 76

6 Serviceorientiertes Mehrkanal-Beaconing 79
6.1 Servicedefinition . . . 80
6.1.1 Service-Request-Nachrichtenformat . . . 80
6.1.2 Service User . . . 81
6.1.3 Service Provider . . . 81
6.2 Mehrkanal Beacon Forwarding Service . . . 82
6.3 Mehrkanal Beacon Rate Control Service . . . 87
6.4 Zusammenfassung . . . 92

7 Selektivität bei der Kollisionserkennung 95
7.1 Positionsgenauigkeit . . . 96
7.2 Kontextmodell . . . 99
7.2.1 Digitale Karten . . . 99
7.2.2 Fahrzeugumfeld . . . 100
7.2.3 Fahrzeugdaten . . . 101
7.2.4 Statistiken . . . 101
7.3 Senderseitige Extrapolation . . . 102
7.4 Paketformat . . . 102
7.5 Evaluierung . . . 105
7.6 Zusammenfassung . . . 109

8 Simulationsumgebung 111
8.1 JiST Simulationsumgebung . . . 112
8.2 SWANS Netzwerksimulator . . . 114
8.3 STRAW Mobilitätssimulator . . . 116
8.4 Alternative Simulationsumgebungen . . . 118
8.5 Mehrkanalmodell Anpassung . . . 118
8.6 Zusammenfassung . . . 122

9 Zusammenfassung und Ausblick 125
9.1 Zusammenfassung . . . 125
9.2 Ausblick . . . 128

Abbildungsverzeichnis

2.1 Car2X Systemlandschaft des Car2Car Communication Consortiums nach [23] 9
2.2 Anwendungslandschaft Car2X. Quelle:[5] 11
2.3 Schema der kooperativen Kollisionserkennung 16
2.4 Hidden-Node Szenario 17
2.5 CSMA/CA-Prinzip in IEEE 802.11 19
2.6 Spezifikation der Kanäle in IEEE 802.11p 21
2.7 Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung von Kommunikationskanälen in IEEE 802.11p 22
2.8 Signaldämpfung auf kurzer Distanz (25 Meter) 24
2.9 Signaldämpfung auf langer Distanz (300 Meter) 24
2.10 Problemstellung der Dissertation 26

4.1 Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=100m) 43
4.2 Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=200m) 43
4.3 Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=300m) 44
4.4 SafetyRisk: Statisches Beaconing (Radius=100m) 45
4.5 Nachrichtenanzahl für statische Beacon-Wiederholraten 45
4.6 Format der Service-Request-Nachricht 48
4.7 Szenario für den Beacon Forwarding Service 49
4.8 Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=100m) 51
4.9 Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=100m) 51
4.10 Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=200m) 52
4.11 Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=200m) 52
4.12 Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=300m) 53
4.13 Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=300m) 53
4.14 SafetyRisk: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=10Hz) 56
4.15 Nachrichtenanzahl: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=10Hz) 56
4.16 SafetyRisk: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=4Hz) 57
4.17 Nachrichtenanzahl: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=4Hz) 57

5.1 Veranschaulichung der IEEE 802.11p Kanäle 60
5.2 IEEE 802.11p Spektrum Maske der Klasse C 61
5.3 Adjacent Channel Interference für benachbarte Kanäle. Quelle [109] 62

5.4 Interferenz-Szenario für unterschiedliche Antennenabstände 63
5.5 Repräsentative Fahrzeugkonstellationen im Hinblick auf RX-TX-Szenarien 64
5.6 Interferenzlevel im Hinblick auf den ED-Schwellenwert 65
5.7 Interferenzlevel im Hinblick auf den RSS-Schwellenwert 65
5.8 Relevante Szenarien zur Evaluierung der gleichzeitigen Kanalnutzung . . . 69
5.9 Szenario 1: RX-INT-Distanz=4m 70
5.10 Szenario 1: RX-INT-Distanz=2m 70
5.11 Szenario 1: RX-INT-Distanz=1m 70
5.12 Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (CCH Sicht) 72
5.13 Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (CCH Sicht) 72
5.14 Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (CCH Sicht) 72
5.15 Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (SCH2 Sicht) 73
5.16 Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (SCH2 Sicht) 73
5.17 Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (SCH2 Sicht) 73
5.18 Szenario 3: RX-INT-Distanz=4m 74
5.19 Szenario 3: RX-INT-Distanz=2m 74
5.20 Szenario 3: RX-INT-Distanz=1m 74
5.21 Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht) 75
5.22 Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht) 75
5.23 Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht) 75
5.24 Empfangswahrscheinlichkeit für mindestens eine Nachricht auf SCH2 (TX-RX-Distanz=150m) 76
5.25 Empfangswahrscheinlichkeit für mindestens eine Nachricht auf SCH2 (TX-RX-Distanz=300m) 76

6.1 Spezifikation Service-Request-Nachricht für Mehrkanal-Beaconing-Variante 80
6.2 Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=100m) 85
6.3 Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=100m) 85
6.4 Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=200m) 86
6.5 Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=200m) 86
6.6 Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=300m) 87
6.7 Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=300m) 87
6.8 SafetyRisk: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz) 89
6.9 SafetyRisk: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz) 89
6.10 Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz) . . 90
6.11 Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz) . . 90
6.12 SafetyRisk: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz) 91
6.13 SafetyRisk: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz) 91
6.14 Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz) . . . 92
6.15 Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz) . . . 92

7.1 Fahrstreckenvorhersage basierend auf Standard-Beacon-Attributen 97
7.2 Definition relevanter Kontextklassen 99

7.3 Fahrtstreckenvorhersage mit digitalen Karten 100
7.4 Fahrtstreckenvorhersage mit erweitertem Wissen 100
7.5 Paketformate für die Übertragung von Fahrtstreckenvorhersagen 102
7.6 Größe des generierten Overheads durch das Paketformat 7.5(a) 104
7.7 Größe des generierten Overheads durch das Paketfomat 7.5(b) 104
7.8 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; α=100%) 105
7.9 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; α=100%) 105
7.10 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 70\%$) 106
7.11 Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 70\%$) 106
7.12 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 50\%$) 106
7.13 Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 50\%$) 106
7.14 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 70\%$) 106
7.15 Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 70\%$) 106
7.16 Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 50\%$) 107
7.17 Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 50\%$) 107

8.1 Übersicht JiST Architektur nach [104] 114
8.2 Übersicht der SWANS Systemkomponenten 115
8.3 Verwendete STRAW-Straßentopology 117
8.4 SWANS Dual-Radio Anpassung 121

Tabellenverzeichnis

2.1 Applikationsanforderungen an die Nachrichtenübertragung nach [24] 13
2.2 Klassifizierung von Anwendungen nach ETSI [74] 14
2.3 Definition der CAM-Wiederholrate nach ETSI [74] 15
2.4 IEEE 802.11p OFDM-Datenraten 18

4.1 Anforderung an Beacon-Senderate in Abhängigkeit der jeweiligen Situation 39
4.2 Beurteilung der Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen 58

5.1 IEEE 802.11p Spektrum Maske der Klasse C 61

6.1 Beurteilung der Mehrkanal-Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen 93

7.1 Beurteilung der Mehrkanal-Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen und variabler Selektivitätswerte 108

8.1 Beurteilung unterschiedlicher Evaluierungsmöglichkeiten für Algorithmen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen 112
8.2 Auszug aus den Konfigurationsmöglichkeiten des STRAW-Bewegungsmodells 118
8.3 Überblick der Standard Simulationsparameter 122

Kapitel 1

Einleitung

Fahrzeug-Ad-hoc-Netze sind konzipiert, um die Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz zu verbessern. Im Gegensatz zu passiven und reaktiven Sicherheitssystemen z.B. zum Airbag oder zum Antiblockiersystem besitzen Fahrzeug-Ad-hoc-Netze einen proaktiven Charakter. Hierbei wird der telematische Horizont des Fahrers durch den Austausch von Zustandsnachrichten zwischen den Fahrzeugen über drahtlose Netzwerke erweitert. Durch diese Informationen kann der Fahrer frühzeitig auf potenzielle Gefahrensituationen hingewiesen werden und diese vermeiden [2]. Die in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeug-Ad-hoc-Netze sind in der Literatur u.a. auch unter den Begriffen Car2Car, Car2X, Vehicle2Vehicle (V2V), Vehicle2Infrastructure (V2I), Dedicated Short Range Communication (DSRC) und Vehicular-ad-hoc-networks (VANETS) zu finden. Grundsätzlich wird im Bereich der sicherheitsrelevanten Anwendungen zwischen lokalen Gefahrenwarnungen und kooperativen Sicherheitsanwendungen unterschieden. Im ersten Fall wird anhand von Sensoren eine gefährliche Situation vom jeweiligen Fahrzeug detektiert und die aggregierte Information an die Nachbarfahrzeuge übertragen. Im zweiten Fall werden anhand sogenannter Applikations-Beacons (im Folgenden Beacons genannt) von jedem Fahrzeug zyklisch Statusinformationen, z.B. über die aktuelle Position, die Beschleunigung und die Geschwindigkeit, versendet. Anhand dieser Informationen kann jeder Empfänger im nächsten Schritt die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit dem entsprechenden Nachbarfahrzeug berechnen. Aufgrund der hohen Mobilität und der Dynamik der Fahrzeuge ist es für die genaue Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit erforderlich, dass Beacons mit einer hohen Aktualität empfangen werden, um einen geforderten Durchsatz an Informationen in der jeweiligen Situation zu ermöglichen. Dies führt dazu, dass vor allem mit steigender Anzahl von Fahrzeugen eine hohe Last auf dem Kommunikationsmedium erzeugt wird. Dies resultiert wiederum in Paketverlusten auf dem Kommunikationskanal, welche u.a. durch Signalinterferenzen verursacht werden.

Die Lösung der widersprüchlichen Anforderungen hinsichtlich der Erhöhung des Informationsdurchsatzes und der Minimierung der Netzwerklast nimmt einen besonderen Stellenwert bei der Entwicklung der kooperativen Sicherheitsanwendungen und den damit verbundenen Beaconing-Verfahren ein und bildet gleichzeitig die wissenschaftliche Problemstellung der hier vorliegenden Arbeit. Bislang bekannte Ansätze folgen grundsätzlich

dem push-Prinzip, bei dem jedes Fahrzeug eigenständig über den Sendezeitpunkt eines Beacons entscheidet. Weiterhin wird für den Austausch von Beacons stets ein einziger Kommunikationskanal zur Nachrichtenübertragung genutzt.

Der in dieser Dissertation erarbeitete neuartige Beaconing-Ansatz basiert auf einem Paradigmenwechsel. Es wird ein serviceorientiertes pull-Prinzip eingeführt, welches die gleichzeitige Nutzung mehrerer paralleler Kanäle ermöglicht. Die Grundidee des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes erlaubt es, die Beacon-Wiederholrate situationsadaptiv auf Anfrage von Nachbarfahrzeugen anzupassen und zu steuern. Somit können erwartete Beacon-Nachrichten, die z.B. durch Interferenzen auf dem Kommunikationskanal nicht zugestellt werden konnten, einfach von den einzelnen Fahrzeugen identifiziert werden und ein nochmaliges Senden dieser Nachricht kann angefordert werden. Um dieses Prinzip auf das Beaconing abzubilden, wird ein Request/Response-Protokoll mit den dazugehörigen Rollen eines Service Users und eines Service Providers definiert. Ergänzend wird die Service-Request-Nachricht spezifiziert, welche anhand der belegten Attribute die Art der Serviceerbringung steuert. Es werden zwei Varianten des serviceorientierten Ansatzes, der Beacon Forwarding Service (BFS) und der Beacon Rate Control Service (BRCS), vorgestellt. Diese können in unterschiedlichen Situationen verwendet werden. BFS ist ein Broadcast-Service, welcher die Wissensbasis von Nachbarfahrzeugen nutzt, um erwartete aber nicht erhaltene Beacons anzufragen. Hierbei wird von einem beliebigen Nachbarn eine Weiterleitung der Information vorgenommen, falls dieser eine Service-Anfrage erhält und selbst die gültige Information besitzt. Dieser Service dient in erster Linie zur Nachverfolgung der Bewegungen einzelner Nachbarn, um auf dieser Wissensbasis entsprechende Kollisionswahrscheinlichkeiten zu berechnen. BRCS ist als Unicast- bzw. Multicast-Service definiert. Hierbei kann ein Fahrzeug einen oder mehrere Nachbarn direkt adressieren und für eine bestimmte Dauer eine gewünschte Beacon-Wiederholrate anfordern. Dieser Service wird verwendet, wenn bereits eine erhöhte Kollisionswahrscheinlichkeit berechnet wurde und somit höchst aktuelle Bewegungsinformationen der potenziellen Kollisionspartner benötigt werden. In diesem Zusammenhang könnte dem Fahrer eine entsprechende Aktion, z.B. Vollbremsung oder Ausweichmanöver, vorgeschlagen werden, um auf die sicherheitskritische Situation reagieren zu können.

In dieser Arbeit wurden als Evaluierungsgrundlage zwei sicherheitskritische Situationen ausgewählt, die unterschiedliche Anforderungen an den Informationsdurchsatz aufweisen. Hierbei handelt es sich im Speziellen um die Situation der Kollisionserkennung und der Kollisionsvermeidung. Zur Evaluierung wurden des Weiteren zwei Metriken aufgestellt, die es erlauben, die Güte der Beaconing-Ansätze in den jeweiligen Situationen zu beurteilen. Anhand zahlreicher Simulationen wurden zunächst unterschiedliche zyklische Beacon-Wiederholraten, die dem push-Prinzip folgen, betrachtet. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden mit der erarbeiteten serviceorientierten pull-basierten Lösung verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass unter der Nutzung eines einzelnen Kommunikationskanals der serviceorientierte Ansatz gerade bei niedrigen bis mittleren Fahrzeugdichten signifikante Vorteile bietet. Bei der Betrachtung höherer Fahrzeugdichten weist das erzielte Ergebnis allerdings Verbesserungspotenzial auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Kommunikationsaufwand, der durch das Request/Response-Prinzip verursachte wird, zu viel Last

auf dem Kommunikationskanal generiert. Somit wird die Übertragungswahrscheinlichkeit sowohl einer Request- als auch einer Response-Nachricht verringert.

Zur Lösung dieses Problems wurde der serviceorientierte Ansatz auf mehrere parallele Kanäle portiert und analysiert. Die gleichzeitige Nutzung von mehreren parallelen Kanälen für das Beaconing stellt den zweiten Paradigmenwechsel dar. Zur Evaluierung wurde zunächst anhand eines eigens umgesetzten Mehrkanalmodells in der Simulationsumgebung JiST/SWANS grundsätzlich die gegenseitige Beeinflussung der benachbarten Kanäle bei gleichzeitiger Nutzung evaluiert. Eine derartige Betrachtung auf der Basis von Simulationsmodellen existiert in der Literatur noch nicht, und stellt gleichzeitig einen weiteren wichtigen wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass zwei direkt benachbarte Kanäle aufgrund des Kanalübersprechens (auch Adjacent Channel Interference) nicht mit gleicher Sendeleistung betrieben werden können. Bei nicht direkt benachbarten Kanälen ist dieser Effekt allerdings weniger gravierend. Unter Beachtung dieser Rahmenbedingung wurden weitere Simulationen für den serviceorientierten Beaconing-Ansatz auf mehreren Kanälen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit der gewünschten Kommunikationsreichweite sowohl direkt benachbarte Kanäle (für kurze Distanzen) als auch nicht direkt benachbarte Kanäle (für längere Distanzen) genutzt werden können. In diesem Zusammenhang konnten signifikante Verbesserungen des Informationsdurchsatzes auch für hohe Fahrzeugdichten erzielt werden.

Ein weiterer Fokus der Arbeit liegt auf dem des Aspekts der Selektivität bei der Service-Nutzung. Hierbei wurde betrachtet, wie sich der Informationsdurchsatz entwickelt, wenn es möglich ist, aus einer Menge von Fahrzeugen, die sich in einem Betrachtungsradius befinden, nur die relevanten Nachbarn zu selektieren. Dieser Aspekt ist aus Sicht der Kontext- und Situationsabhängigkeit bedeutend, da im Mittel in realen Szenarien nicht mit allen Nachbarfahrzeugen eine Kollisionsgefahr besteht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Fahrzeuge, die sich z.B. voneinander entfernen oder plötzlich abbiegen, keine Gefahr darstellen. Für die Einschätzung bzw. Beurteilung von Kollisionspartnern ist allerdings eine hohe Anzahl von Informationen über das Umfeld und die einzelnen Fahrzeuge notwendig. Müssten diese Informationen alle über das Netzwerk übertragen werden, so hätte das eine enorme Last auf dem Kommunikationsmedium zur Folge. Aus diesem Grund wird das grundsätzliche Potenzial von Fahrstreckenvorhersagen und der dafür notwendige Kontext betrachtet. Um die Netzwerkressourcen zu schonen, wird dafür der senderseitige Ansatz zur Vorhersage von Fahrzeugbewegungen angenommen und die daraus resultierende Erhöhung der Beacon-Nachrichtengröße betrachtet. Unter der Annahme, dass dieser Ansatz eine Erhöhung der Selektivität ermöglicht, werden abschließend die jeweiligen Varianten des Beacon Forwarding Services in Abhängigkeit unterschiedlicher Selektivitätsgrade auf Basis von weiteren Simulationen analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass durch den Ausschluss von irrelevanten Fahrzeugen eine weitere Verbesserung des Informationsdurchsatzes ermöglicht wird. Durch den serviceorientierten Ansatz wurden Ergebnisse erreicht, die die Ergebnisse aller in dieser Arbeit betrachteten statischen Beaconing-Ansätze bei Weitem übertreffen.

Der in dieser Arbeit vorgestellte serviceorientierte Mehrkanal-Beaconing-Ansatz bildet

eine ganzheitliche Lösung zur Erfüllung der situationsabhängigen Anforderungen von kooperativen Sicherheitsanwendungen im Hinblick auf den gewünschten Informationsdurchsatz. Sowohl durch das hohe Maß an Flexibilität bezüglich der Kanalwahl als auch durch die Charakteristik der Serviceerbringung bietet dieser Ansatz eine robuste und skalierbare Lösung für die betrachteten Situationen der Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert: Die Grundlagen der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze und die im System beteiligten Komponenten werden in Kapitel 2 dargestellt. Dabei wird der Fokus vor allem auf die Anforderungen der sicherheitskritischen Applikationen und die Einschränkungen der zugrunde liegenden Netzwerktechnologie detailliert beschrieben. Im Ergebnis wird die wissenschaftliche Fragestellung der vorliegenden Arbeit im Bezug auf die Erhöhung des Informationsdurchsatzes bei hohen Fahrzeugdichten formuliert und entsprechende Kriterien zur Beurteilung der Güte von Beaconing-Algorithmen definiert. Kapitel 3 liefert einen Überblick über bisher existierende Beaconing-Ansätze und diskutiert deren Vor- und Nachteile. Kapitel 4 nimmt zunächst eine Klassifizierung der zu betrachtenden relevanten Situationen vor, welche in die Phasen der Kollisionserkennung und -vermeidung augefteilt werden. Für die einzelnen Situationen werden jeweils konkrete Metriken definiert, anhand derer der geforderten Informationsdurchsatz der Applikation im Verlauf der Arbeit gemessen werden kann. Der serviceorientierte Beaconing-Ansatz wird eingeführt, anhand der aufgestellten Metriken evaluiert und mit unterschiedlichen statischen Beaconing-Varianten verglichen. Nach der Diskussion der Ergebnisse werden in Kapitel 5 die Grundlagen der Mehrkanal-Nutzung in IEEE 802.11p vorgestellt und die daraus resultierenden Einschränkungen im Hinblick auf die Anforderungen der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze in detaillierten Simulationen dargelegt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse wird in Kapitel 6 der erweiterte serviceorientierte Beaconing-Ansatz unter Nutzung von mehreren Kanälen spezifiziert und die dadurch erzielten Verbesserungen werden im Hinblick auf den Informationsdurchsatz präsentiert. Abschließend wird in Kapitel 7 die Untersuchung des vorgeschlagenen Beaconing-Ansatzes unter dem Aspekt einer höheren Selektivität bei der Auswahl von potenziellen Kollisionspartnern evaluiert. Die Simulationsumgebung, die für alle in dieser Arbeit vorgenommenen Evaluierungen eingesetzte wurde, wird in Kapitel 8 beschrieben. Des Weiteren wird das im Zuge der Arbeit umgesetzte und integrierte Mehrkanal-Modell erläutert. Kapitel 9 fasst den wissenschaftlichen Beitrag der Arbeit und die erzielten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Optimierungsfelder und Themen, die zukünftige Forschungsgebiete darstellen.

Kapitel 2

Grundlagen WLAN-basierter Fahrzeug-Ad-hoc-Netze

2.1 Einführung

Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit ihrer Umwelt ist ein wichtiger Themenbereich in der Wirtschaft und Wissenschaft, welcher seine Historie in dem Feld der Telematik und der Mobilen-Ad-hoc-Netze (MANETS) hat [1][29]. Ziel dabei ist es, dem Fahrzeug und seinem Fahrer jegliche Art von Informationen bereitzustellen, welche in seinen individuellen Situationen von Nutzen sein können und ihn in einem stets komplexer werdenden Verkehrsumfeld unterstützen. Es existiert eine Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten [4] [26] [9] [24] [21]. Dabei kann das vernetzte Fahrzeug seinen Insassen sowohl Komfortanwendungen wie z.B. Internetzugang, Point-of-Interest-Suche und Vehrkehrsinformationen bieten, als auch Informationen über ein existierendes Stauende, das aktuelle Wetter und vereiste Fahrbahnabschnitte bereitstellen. Im Allgemeinen kann aber zwischen den zwei Anwendungsklassen der fahraufgaben- und nicht fahraufgabenbezogenen Anwendungen unterschieden werden [5]. Erstere sollen es ermöglichen, ein Fahrzeug zielgerichtet und unfallfrei bei Einhaltung der gültigen Verkehrsregeln zu bewegen [5], was unter dem Begriff der Fahrerassistenzsysteme zusammengefasst werden kann [3]. Letztere dienen grundsätzlich dazu, die korrekte Betriebsfähigkeit und die Steigerung der Wirtschaftlichkeit bzw. Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten [5]. Hierzu können z.B. Komfortanwendungen und werkstattbezogene Diagnose- und Programmiersysteme gezählt werden.

Zum Austausch der Informationen zwischen den beteiligten Fahrzeugen und Infrastrukturkomponenten werden unterschiedliche Ausprägungen von drahtlosen Kommunikationsnetzen verwendet. Es sind sowohl zellulare Netze (GPRS, UMTS, LTE) als auch WLAN-basierte Netze (802.11a/b/g/n, 802.11p) denkbar, und kommen bereits zum Teil serienmässig zum Einsatz [13] [14] [15] [16]. Bei der Wahl der geeigneten Kommunikationstechnologie ist vor allem auf die Anforderung der jeweiligen Anwendungsklassen bzw. sogar einzelner individueller Anwendungen zu achten. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bislang keine Netzwerktechnologie existiert, welche die Anforderungen aller Anwendungen

stets optimal bedienen kann [36]. Aus diesem Grund kann von einem hybriden System ausgegangen werden, welches unterschiedliche drahtlose Kommunikationstechnologien bereitstellt [7] [9] [21].

Die hier vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Klasse der kooperativen Assistenzsysteme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Hierbei tauschen kooperative Sicherheitsanwendungen typischerweise periodisch Positions- und Zustandsinformationen aus (im Folgenden Beacons genannt), um ein ganzheitliches Wissen über Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe aufzubauen. Auf dieser Wissensgrundlage kann jedes Fahrzeug potenzielle Kollisionssituationen erkennen, um so rechtzeitig auf eine Gefahrensituation reagieren zu können. Wegen der hohen Dynamik der Fahrzeuge und der nur eingeschränkt deterministischen Bewegungsmuster ist es notwendig, Beacons mit hoher Aktualität und somit kurzen Übertragungszeiten zu empfangen. Aus diesem Grund werden zur Erfüllung dieser Anforderungen in erster Linie WLAN-basierte Netze als Kommunikationstechnologie eingesetzt [23] [9]. In dem Umfeld der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze wird der dafür speziell entwickelte IEEE 802.11p Standard [67] verwendet. Obwohl dieser Standard u.a. kurze Latenzzeiten und einen schnellen Verbindungsaufbau gewährleistet, liegt es in der Natur von WLAN-basierten Kommunikationsnetzen der IEEE 802.11 Familie [65], dass die Zuverlässigkeit einer Nachrichtenübertragung nicht garantiert ist [25]. Dies wiederum stellt ein Problem für die korrekte und zuverlässige Funktionalität der kooperativen Sicherheitsanwendungen dar. Die Erarbeitung eines Lösungsvorschlags für dieses Problem ist die wissenschaftliche Herausforderung der vorliegenden Dissertation.

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über den grundsätzlichen Aufbau von Fahrzeug-Ad-hoc-Systemen und die damit möglichen umsetzbaren Anwendungen. Des Weiteren werden die Anforderungen der kooperativen Sicherheitsanwendungen diskutiert und die Grundlagen des eingesetzten IEEE 802.11p Standards vorgestellt. Nach der Betrachtung der Anwendungs- und Netzwerkschicht, wird abschließend die in der vorliegende Arbeit betrachtete wissenschaftliche Problemstellung formuliert. Diese soll anhand des aufgestellten serviceorientierten Mehrkanal-Beaconing-Ansatzes gelöst werden. Die Beurteilung der Güte des vorgestellten Ansatzes wird im Laufe der Arbeit anhand der definierten Kriterien und Metriken vorgenommen (siehe auch Kapitel 4).

2.1.1 Aktivitäten im Bereich der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze

Die Erforschung und Erprobung der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze wurde in der Vergangenheit auf internationaler Ebene in einer Vielzahl von Projekten und Aktivitäten betrachtet [8]. Hierbei wurden die einzelnen Aspekte unter dem Blickwinkel der Evaluierung der Systeme auf der Basis von Prototypen betrachtet, und es wurde mit ihrer Standardisierung begonnen. Im Folgenden soll ein Auszug der wichtigsten Projekte und Standardisierungsinstanzen vorgestellt werden:

- NoW: Das Network on Wheels Forschungsprojekt (NoW) [10] ist ein nationaler Zusammenschluss von Automobilherstellern, Zulieferern und Universitäten in Deutschland. Es hat sich zum Ziel gesetzt, in erster Linie die technischen Fragen bezüglich der

Kommunikationsprotokolle und Sicherheitsaspekte im Rahmen der Fahrzeugnetze zu betrachten und Lösungsansätze zu erarbeiten. Das im Zeitraum von 2004 bis 2008 durchgeführte Projekt hat neben wichtigen Erkenntnissen im Bereich der Nachrichtenverbreitungsstrategien in WLAN-basierten Fahreugnetzen auch die prototypische Umsetzbarkeit derartiger Systeme nachgewiesen. Ein Hauptergebnis ist die erarbeitete offene Kommunikationsplattform, welche neben der Umsetzung sicherheitsrelevanter Anwendungen auch Infotainment-Funktionen ermöglicht [11]. Das Projekt bildet somit eine Grundlage für Standardisierungsdiskussionen innerhalb der IEEE [17] und des Car2Car Communication Consortium [21] und bildet die Grundlage für mögliche zukünftige Markteinführungsstrategien.

- VSCP: Das Vehicle Safety Communication Project [24] ist ein in den USA formiertes Konsortium, welches u.a. aus vielen namhaften internationalen Automobilherstellern besteht. Das im Jahre 2002 gestartete Projekt hat sich primär zum Ziel gesetzt, die Potenziale der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze zu analysieren und die vielversprechendsten Anwendungen vor allem im Bereich der Verkehrssicherheit zu spezifizieren und zu priorisieren. Eine detaillierte Analyse der Anforderungen der jeweiligen Anwendungen im Hinblick auf das Kommunikationsnetz wurde vorgenommen und repräsentative Szenarien für Fahrzeug-Ad-hoc-Netze wurden definiert.

- C2C-CC: Das Car2Car Communication Consortium (C2C-CC) [21] ist ein Non-Profit-Industriekonsortium, welches aus einer Inititive aller relevanten Automobilhersteller Europas im Jahre 2002 gegründet wurde. Es hat sich zum Ziel gesetzt, die laufenden Projekte und Aktivitäten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu unterstützen und durch die Fahrzeug-Infrastruktur-Ansätze zu erweitern. Ein Hauptaugenmerk liegt auf der engen Zusammenarbeit mit den Standardisierungsgremien, wobei hier die ETSI TC-ITS [19] besonders hervorzuheben ist.

- simTD: Das nationale Projekt Sichere-Intelligente-Mobilität - Testfeld Deutschland (simTD) [9] führt einen der größten Feldtests im Bereich der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze durch. Mit einer Vielzahl vom Industriepartnern und Forschungseinrichtungen soll im Zeitraum von 2008 bis 2013 eine seriennahe Entwicklung sowohl von Kommunikationskomponenten als auch Applikationen umgesetzt werden. Des Weiteren soll im Rahmen einer Evaluierungsphase die Machbarkeit und der generierte Nutzen derartiger Systeme evaluiert werden.

- COMeSafety2: Als europäisches Vorhaben ist das COMeSafety2 Projekt [20] (Nachfolger von COMeSafety) ein wichtiges Gremium zur Harmonisierung und Unterstützung der in Europa laufenden Aktivitäten im Rahmen der intelligenten Transport-Systeme (ITS). Darüber hinaus soll im Rahmen des Vorhabens auch der Abgleich und die Harmonisierung zwischen den in den USA und Europa erarbeiteten Konzepten stattfinden.

- IEEE: Die Ergebnisse des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [17] zählen zu den bisher wichtigsten Aktivitäten für die globale Entwicklung WLAN-basierter Fahrzeugnetze. Eines der Kernergebnisse ist der erarbeitete IEEE 802.11p Standard, welcher es auf MAC- und PHY-Schicht ermöglicht, globale Kompatibilität herzustellen. Eine weitere Standardisierungsaktivität ist die Arbeit an der IEEE 1609 Protokollfamilie [71] [72], welche u.a. die Ebenen oberhalb der MAC-Schicht betrachtet.

- ETSI: Vor allem die aktuellen Aktivitäten im Rahmen des European Telecommunications Standards Institute (ETSI) [18] bilden einen wichtigen Meilenstein für die europäische Variante der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze. Diese Plattform bietet die Möglichkeit, durch erfolgreiche Standardisierungsarbeiten den Markteintritt und die Serienfertigung der Systeme in Europa zu beginnen.

Trotz der bereits umfangreich durchgeführten Spezifikations- und Evaluierungstätigkeiten bleiben in Bezug auf spezielle Punkte immer noch offene Fragen. Eine dieser Fragestellungen soll in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden.

2.1.2 Systemvoraussetzungen

Für die korrekte Arbeitsweise und Umsetzung von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen ist eine Reihe von technischen Voraussetzungen notwendig. Im Folgenden sollen diese kurz erläutert werden (siehe [23], [59], [12]):

- Konnektivität: Fähigkeit eines Fahrzeugs, über einen drahtlosen Kommunikationskanal Informationen bereitzustellen und zu empfangen. In der Regel wird dies unter Verwendung des WLAN Standards IEEE 802.11p ermöglicht, schließt aber weitere Kommunikationstechnologien nicht aus.

- Zugang zur Sensorik: Möglichkeit, auf die Informationen der im Fahrzeug verbauten Sensorik zugreifen und dekodieren zu können. Diese Daten können dann entweder aggregiert oder im Rohformat in Abhängigkeit der Anforderung entsprechender Anwendungen über das drahtlose Netz verbreitet werden. Beispielhaft werden in [23] die folgenden Signale genannt: Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Warnblinker, ABS, ESP, Regensensordaten, Bremskraftdaten. Die Informationen innerhalb einer Nachricht sind nicht auf die aufgeführten Signale begrenzt und können je nach Bedarf und Verfügbarkeit erweitert werden.

- Uhrensynchronisation: Existenz einer einheitlichen globalen Zeit in jedem Fahrzeug, um die zeitliche Relevanz von empfangenen Nachrichten überprüfen und beurteilen zu können. Typischerweise wird hierfür die GPS-Zeit verwendet.

- Positionierungssystem: Zugriff auf eine gültige und korrekte Position zu jedem beliebigen Zeitpunkt, um die geographische Relevanz von empfangenen Nachrichten

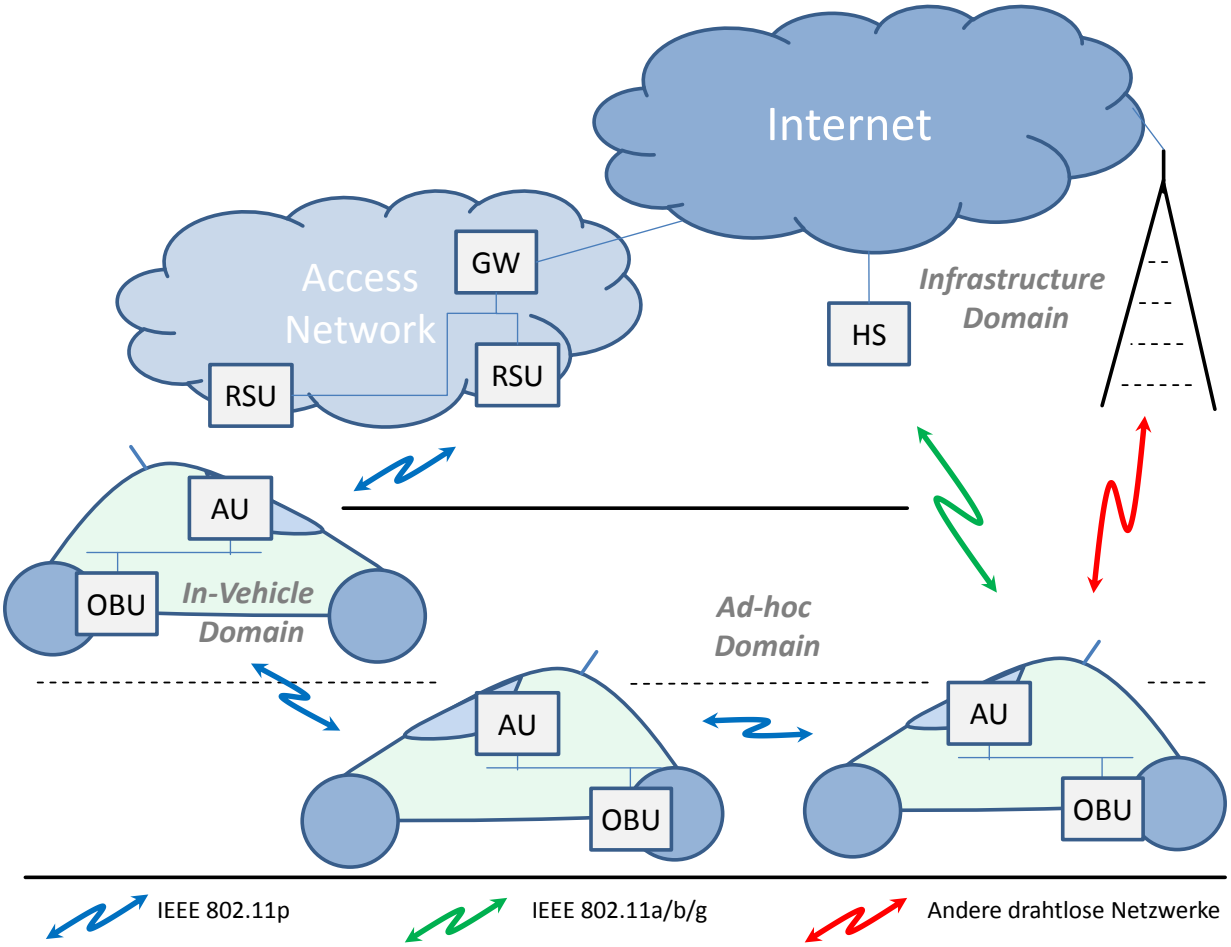


Abbildung 2.1: Car2X Systemlandschaft des Car2Car Communication Consortiums nach [23]

.

überprüfen und beurteilen zu können. Hierbei ist die Definition der korrekten Position nicht allgemeingültig spezifiziert. Diese kann jedoch unter Angabe der geschätzten Abweichung zur realen Position bereitgestellt werden.

2.1.3 Komponenten

Zum besseren Verständnis der hier vorliegenden Arbeit soll zunächst das Gesamtsystem der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze betrachtet und vorgestellt werden. Abbildung 2.1 zeigt den im Car2Car Communication Consortium [21] erarbeiteten Vorschlag einer Referenzarchitektur, die aus fünf Kernkomponenten besteht und sich in drei Domänen gliedert. Die einzelnen Komponenten und ihre Funktionen werden im Folgenden kurz charakterisiert:

- AU: Die Applikation Unit (AU) bietet die Möglichkeit, einzelne Anwendungen auszuführen. Darunter können sowohl sicherheitsrelevante als auch andere Anwendungen

verstanden werden. Eine AU ist stets Teil eines Fahrzeugs und über die In-Vehicle Domain mit der On-board Unit (OBU) verbunden. Bei der Auswahl der Hardware ist hierbei keine Einschränkung gegeben. Diese kann sowohl eine permanent verbaute Head-Unit eines Fahrzeugs sein, aber auch ein mobiles Endgerät darstellen, welches dynamisch ins Fahrzeug eingebunden wird. Innerhalb einer In-Vehicle Domäne können mehrere AUs existieren, um unterschiedliche Anwendungen und Funktionen abbilden zu können.

- OBU: Die On-board Unit (OBU) stellt die Kommunikationseinheit innerhalb eines Fahrzeugs dar. Diese ist mindestens mit einem 802.11p-Kommunikationsmodul bestückt und dafür zuständig, eingehende Nachrichten aus der Ad-hoc- bzw. Infrastruktur-Domäne an die angeschlossenen AUs weiterzuleiten. Jede OBU ist mit einem minimalen Set an Funktionen ausgestattet, die z.B. die Herstellung von Ad-hoc-Verbindungen, die Bereitstellung geographischer Routing Protokolle und Securitymechanismen ermöglichen. Eine OBU kann neben der IEEE 802.11p Kommunikationsschnittstelle auch weitere Kommunikationstechnologien bereitstellen. Dazu zählen neben den WLAN-basierten Systemen (z.B. IEEE 802.11a/b/g) [68] [69] auch zellulare Kommunkationsnetze (z.B. UMTS und LTE) [73]. Neben der Möglichkeit der Nachrichtenübertragung stellt die OBU darüber hinaus einen Zugang zur Fahrzeugsensorik und dem Positionierungssystem her.

- RSU: Die Road-Side Unit (RSU) ist grundsätzlich an eine statische geographische Position gebunden und typischerweise entlang von Fahrbahnen aufgestellt. Ähnlich wie die OBU besitzt die RSU mindestens ein IEEE 802.11p Kommunikationsmodul und bietet optional die Möglichkeit, empfangene Nachrichten aus der Ad-hoc-Domäne in die Infrastruktur-Domäne weiterzuleiten. Dafür ist allerdings eine Verbindung mit dem Internet notwendig. RSUs bieten neben der reinen Weiterleitung von Nachrichten innerhalb der Ad-hoc-Domäne auch die Möglichkeit, Basisdienste abzubilden, um z.B. Informationen über aktuelle Ampelphasen oder Straßenbauarbeiten zu verbreiten.

- HS/GW: Hotspots (HS) und Gateways (GW) bieten Zugänge in die Backend-Systeme der Infrastruktur-Domäne. Hierbei kann ein HS direkt mit einer OBU kommunizieren, um Informationen über das Internet zur Verfügung zu stellen. Das Gateway bietet z.B. die Möglichkeit, RSUs untereinander zu verbinden oder diesen einen Internetzugang zu ermöglichen.

Wie Abbildung 2.1 schematisch darstellt, wird die Kommunikation zwischen OBUs und RSUs über das IEEE 802.11p Protokoll und somit auch über ein WLAN-Ad-hoc-Netzwerk abgebildet. Die direkte Kommunikation zwischen OBUs wird auch als Vehicle2Vehicle (V2V) bezeichnet, wobei die Kommunikation zwischen OBUs und RSUs als Vehicle2Infrastructure (V2I) bezeichnet wird.

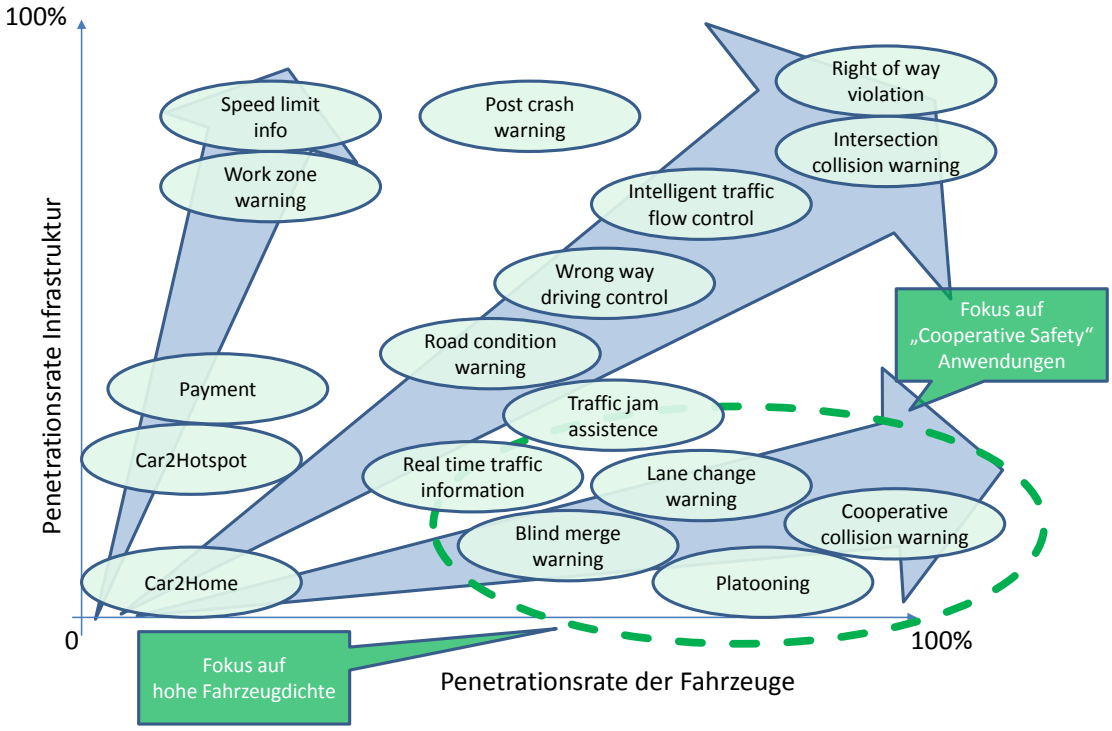


Abbildung 2.2: Anwendungslandschaft Car2X. Quelle:[5]

2.2 Anwendungssicht

Mit Hilfe von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen lässt sich eine Vielzahl an Applikationen umsetzen, welche dem Fahrer in unterschiedlichen Situationen einen entsprechenden Nutzen bringen sollen. Abbildung 2.2 zeigt einen Auszug einer möglichen Anwendungslandschaft, welche grundsätzlich zwischen V2V- und V2I-Anwendungen unterscheidet. Zusätzlich dazu wird noch der Aspekt der Penetrationsrate der Systeme berücksichtigt. In Abhängigkeit dieser Faktoren werden die einzelnen Anwendungen gemäß ihrer Anforderungen eingeordnet. Je höher die geforderte Penetrationsrate der Fahrzeuge ist, desto höher ist auch der kooperative Charakter der Anwendung. Beispielsweise fordert die Co-operive Collision Warning Anwendung eine ganzheitliche Systempenetration von Fahrzeugen bei relativ niedriger Ausstattung der Infrastruktur. Die Speed Limit Info Anwendung hingegen geht von dem genau umgekehrten Szenario aus. Genaue Beschreibungen der Anwendungen können u.a. in [23], [24], [74] und [9] nachgelesen werden.

Eine erweiterte Klassifizierung der Anwendungen wurde in [23] von dem Car2Car Communication Consortium vorgenommen:

- V2V Cooperative Awareness: Diese Anwendungsklasse tauscht Nachrichten zwischen den Fahrzeugen ohne eine persistente Kommunikationsverbindung aus. Es werden vom Sender typische Fahrzeug- bzw. Sensordaten in einer Nachricht mittels Braodcast- bzw. Geocast-Verbreitungsalgorithmen [56], [57], [58], [10], [81] versendet und vom

Empfänger auf ihre Relevanz hin überprüft. Typischerweise können hier z.B. Anwendungen wie Co-operative (Forward) Collision Warning, Emergency Electronic Breaklight, Lane Change Assistance und Cooperative Adaptive Cruise Control genannt werden.

- V2V Unicast Exchange: Im Gegensatz zu den V2V Co-operative Awareness Anwendungen wird in dieser Klasse eine dedizierte logische Verbindung zwischen Fahrzeugen aufgebaut. Hierbei kann ein Sender aufgrund von situationsabhängigen Daten einen Verbindungsaufbau zu einem seiner Nachbarn initiieren. Während der bestehenden Verbindung können Unicast-Nachrichten zwischen den ausgewählten Partnern ausgetauscht werden. Typische Anwendungen sind Pre-Crash Sensing/Warning, Platooning und Instant Messaging.

- V2V Decentralized Environmental Notification: Diese Anwendungsklasse beinhaltet die Verbreitung von Ereignissen innerhalb des Netzwerks. Ereignisse können anhand von einzelnen Fahrzeugen und deren Sensordaten detektiert und innerhalb eines geographischen Gebiets verbreitet werden. Es wird wiederum das Geocast-Verfahren angewendet um Information innerhalb eines definierten geographischen Gebietes zu verbreiten. Sowohl Fahrzeuge als auch RSUs können als Weiterleitungsknoten dienen und mittels Store-and-Forward-Strategien [10] [56] Informationen zwischenspeichern und z.B. an Fahrzeuge weiterleiten, die erstmalig in das zuvor definierte Gebiet einfahren.

- V2I (one-way): Diese Anwendungsklasse verbreitet Informationen von einer RSU zu den jeweiligen Fahrzeugen mittels Broadcast- und Geocast-Algorithmen. Es wird keine persistente Verbindung zwischen den Teilnehmern aufgebaut, so dass sich beispielsweise Anwendungen wie Green Light Optimal Speed Advisory und V2I Traffic Optimization realisieren lassen.

- Local RSU Connection: Diese Klasse bietet die Möglichkeit, eine bidirektionale Verbindung zwischen Fahrzeugen und RSUs herzustellen. Hierbei können vor allem nicht sicherheitsrelevante Anwendungen wie z.B. Car2Home, Remote Diagnostics, Drivethrough Payment und Tolling umgesetzte werden.

Ergänzend zur Klassifizierung des C2C-CC definiert das VSCP in [24] genauere Anforderungen der einzelnen Anwendungen im Hinblick auf die folgenden Kriterien:

- Kommunikationsart (unidirektional/bidirektional)
- Übertragungsmodus (eventbasiert/periodisch)
- Wiederholrate
- Latenzzeiten
- Verbreitungsradius

	Kommunikationsart	Modus	Wiederholrate	Latenzzeit	Radius
Cooperative (Forward) Collision Warning	unidirektional	periodisch	10 Hz	100 ms	150 m
Emergancy Elecronic Breaklight	unidirektional	event-basiert	10 Hz	100 ms	300 m
Lane Change Assistance	unidirektional	periodisch	10 Hz	100 ms	150 m
Cooperative Adaptive Cruise Control	unidirektional	periodisch	10 Hz	100 ms	150 m
Pre-Crash Sensing/Warning	bidirektional	periodisch	50 Hz	20 ms	150 m
Platooning	uni-/bidirektional	periodisch	50 Hz	20 ms	100 m
Post-Crash Warning	unidirektional	event-basiert	1 Hz	500 ms	300 m
Road Condition	unidirektional	event-basiert	1 Hz	1000 ms	200 m
Intersection Signal Violation Warning	unidirektional	periodisch	10 Hz	100 ms	250 m

Tabelle 2.1: Applikationsanforderungen an die Nachrichtenübertragung nach [24]

Tabelle 2.1 stellt die einzelnen Anforderungen der für die vorliegende Arbeit relevanten Sicherheitsanwendung dar. Anforderungen weiterer Anwendungen können in [24] nachgelesen werden. Auffällig bei der Klassifizierung der VSCP sind die hohen Wiederholraten bei dem periodischen Beacon-Versand der kooperativen Sicherheitsanwendungen, welche eine Frequenz von bis zu 50 Hz erreichen können. Darüber hinaus wird eine Kommunikationsreichweite von bis zu 300 m definiert. Im Hinblick auf die Aktualität der Nachrichten werden Latenzzeiten von bis zu 20 ms spezifiziert.

Eine besonders relevante Klassifizierung von Anwendungen ist von der ETSI in [74] vorgenommen worden. Die ETSI spezifiziert dafür ein sog. Basic Set of Applications (BSA), wobei die Kategorie Road Safety einen hohen Stellenwert besitzt. Tabelle 2.2 zeigt eine weitere Unterteilung der Road Safety-Klasse in die zwei Subklassen Driving Assistence - Co-operative Awareness (CA) und Driving Assistence - Road Hazard Warning (RHW). Diesen zwei unterschiedlichen Subklassen sind eigene Nachrichtentypen zugeordnet, wobei die ETSI grundsätzlich im sicherheitsrelevanten Umfeld zwischen den Co-operative Awareness Messages (CAMs) [76] und den Decentralized Environmental Notifications (DENs) [75] unterscheidet.

- CAMs - werden in erster Linie dazu genutzt, die Positionsdaten und Zustandsinformationen eines Fahrzeugs periodisch an seine Nachbarn zu verteilen, damit jeder Empfänger über die Existenz und den Zustand seiner Nachbarn informiert ist. Es

Anwendungs-klasse	**Subklasse**	**Anwendung**
Active Road Safety	Driving assistence-Co-operative Awareness	Emergency vehicle warning Slow vehicle indication Intersection collision warning Motorcycle approaching indication
Active Road Safety	Driving assistence-Hazard Warning	Emergency electronic brake lights Wrong way driving warning Stationary vehicle - accident Stationary vehicle - vehicle problem Traffic condition warning Signal violation warning Roadwork warning Collision risk warning Decentralized floating car data (Hazardous location, Precipitations, Road adhesion, Visibility, Wind)

Tabelle 2.2: Klassifizierung von Anwendungen nach ETSI [74]

wird gefordert, dass jedes Fahrzeug, welches in einem ITS-Netzwerk teilnimmt, fähig ist CAMs zu versenden. Es existiert eine gemeinsame Variante des CAM-Formats für alle Anwendungen einer bestimmten Klasse. Tabelle 2.3 zeigt eine Zuordnung einiger relevanter Anwendungen, die CAMs verschicken. Aufgrund ihres Charakters werden CAMs im Folgenden als Beacons verstanden.

- DENs - werden primär von den Road Hazard Warning Anwendungen genutzt. Im Gegensatz zu dem periodischen Charakter der CAMs ist die DEN-Nachricht eventgetriggert. Hierbei werden nicht wie bei der CAM Rohdaten versendet, sondern aggregierte Situationsinformationen, welche von einem Fahrzeug anhand der Auswertung seiner Sensordaten detektiert worden sind. Eine DEN soll unter den Fahrzeugen verbreitet werden, solange ihre Lebensdauer nicht abgelaufen bzw. die detektierte Situation nicht revidiert worden ist.

Die Zuordnung von speziellen Nachrichtentypen zu entsprechenden Anwendungen ist ein wichtiger Aspekt für die weiteren Betrachtungen der vorliegenden Arbeit. Hierbei ist vor allem die Aussage interessant, dass CAMs von jedem Fahrzeug mit einer bestimmten Wiederholrate versendet werden müssen. Tabelle 2.3 zeigt die geforderten CAM-Wiederholraten für die einzelnen Active Road Safety-Anwendungen. Es ist zu erkennen, dass für unterschiedliche Anwendungen auch unterschiedliche Wiederholfrequenzen (zwischen 2 Hz und 10 Hz) angenommen werden. Daraus wird ersichtlich, dass die CAM-Wiederholrate situationsabhängig gesteuert werden muss.

Use case	min Frequency (Hz)	min Latency (ms)
Emergency vehicle warning	10	100
Slow vehicle indication	2	100
Intersection collision warning	10	100
Motorcycle approaching indication	2	100
Collision Risk Warning	10	100

Tabelle 2.3: Definition der CAM-Wiederholrate nach ETSI [74]

Kooperative Sicherheitsanwendungen

Kooperative Anwendungen zur Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung besitzen einen hohen Stellenwert unter den betrachteten Applikationen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen [28]. Nach der Beurteilung des VSCP in [24] sind hier vor allem die Anwendungen Pre-Crash Sensing und Co-operative Forward Collision Warning mit höchster Priorität zu betrachten. Beide Anwendungen sollen anhand von ausgetauschten Positions- und Zustandsinformationen sicherheitskritische Kollisionssituationen erkennen und somit den Fahrer frühzeitig über eine potenzielle Gefahr informieren. Dazu tauschen die Fahrzeuge Applikations-Beacons aus, um das Wissen über die Bewegung ihrer Nachbarfahrzeuge aufzubauen. Auf dieser Informationsbasis kann jeder Empfänger anhand von Prädiktionen eine wahrscheinliche Fahrtstrecke (Extrapolation) für jeden seiner Nachbarn berechnen [27]. In gleicher Form wird diese Extrapolation der Fahrstrecke auch für das eigene Fahrzeug vorgenommen. Abbildung 2.3 stellt die Kollisionsdetektion schematisch dar. Aufgrund der eingeschränkt deterministischen Bewegungen von Fahrzeugen kann mit steigendem Vorhersagehorizont auch der Schätzfehler der prädizierten Fahrtstrecke steigen. Somit wird ein Korridor definiert, in dem sich die jeweiligen Fahrzeuge mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Zeitraum bewegen. Legt man diese Berechnungen übereinander, so wird eine Kollisionszone definiert, in der es zu potenziellen sicherheitskritischen Situationen kommen kann, wenn die jeweiligen Fahrzeuge sich zum gleichen Zeitpunkt in dieser Zone befinden. Die Abweichungen können auf die Faktoren des Positionsfehlers, des Ausrichtungsfehlers und der Verfälschung der Position bei der Nachrichtenübertragung (bedingt durch die Latenzzeit) zurückgeführt werden [27]. Letzteres kann vor allem auftreten, wenn sich während der Übertragung die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ändert.

Um eine möglichst genaue Schätzung der Fahrtstrecken durchführen zu können, werden möglichst aktuelle Informationen von den potenziellen Kollisionspartnern benötigt. Um diese sicherzustellen, können z.B. erhöhte Beacon-Wiederholraten vorgesehen werden. Die genaue Wiederholrate ist allerdings in den einzelnen Projekten unterschiedlich definiert. Wie Tabelle 2.3 zeigt, schwankt die Wiederholrate nach ETSI zwischen 2 Hz und 10 Hz, während laut VSCP die Wiederholraten zwischen 10 Hz und 50 Hz variieren. Neben der Senderate werden auch in Abhängigkeit der einzelnen Projekte unterschiedliche Kommunikationsdistanzen definiert. Im Speziellen wird bei VSCP eine Distanz zwischen ≈50 m und ≈150 m definiert, wobei in [24], [64], [78] und [59] eine Distanz von bis zu 300 m für kooperative Sicherheitsanwendungen definiert wird. Berechnungen in [27] ergeben für

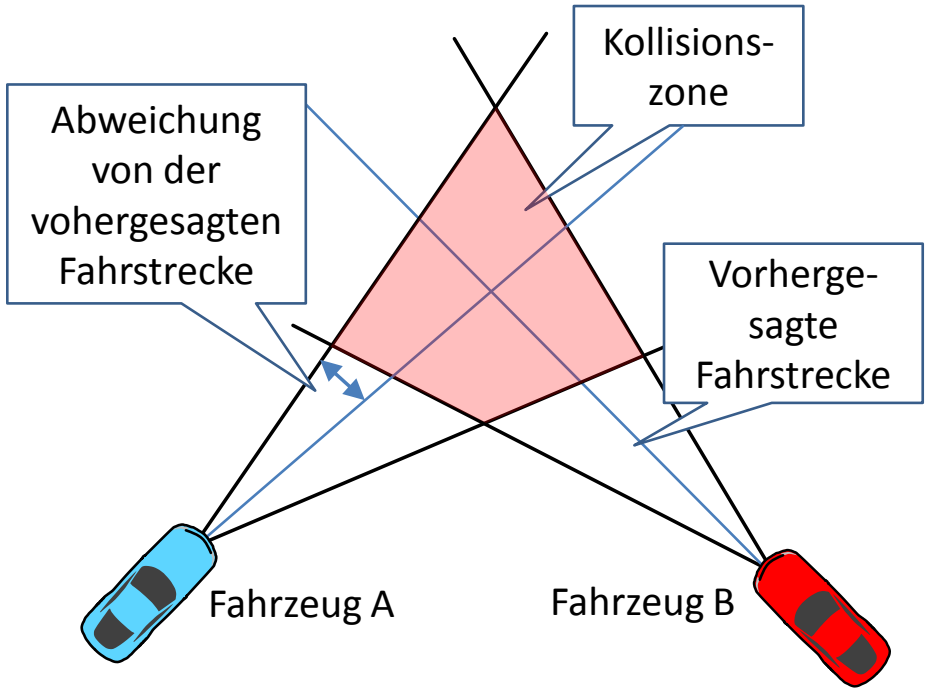


Abbildung 2.3: Schema der kooperativen Kollisionserkennung

die Kollisionserkennung an Kreuzungen mit rechtwinkliger Straßentopologie ebenfalls eine Reichweite von $\approx$ 300 m.

2.3 Netzwerksicht

Der Einsatz drahtloser Kommunikationsnetze stellt eine Herausforderung im Hinblick auf einen zuverlässigen Informationsaustausch dar [83] [38] [39]. Kooperative Anwendungen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen basieren auf einem altruistischen Prinzip [5]. Darunter wird verstanden, dass ein Fahrzeug, welches Daten erhebt und aggregiert, selber keinen Mehrwert davon zieht. Erst ein anderes Fahrzeug, welches diese Daten empfängt und auswertet, kann davon einen Nutzen haben. Aufgrund des kooperativen Charakters muss demnach jede Information innerhalb des Netzwerks verbreitet werden. Die zuverlässige Übertragung von geforderten Informationen ist ein wichtiger Aspekt des Gesamtsystems zur Gewährleistung der korrekten Funktionalität der sicherheitskritischen Anwendungen.

Anders als bei drahtgebundenen Netzen ist der Erfolg einer Nachrichtenübertragung nicht gewährleistet [54] [38], da das Kommunikationsnetz unterschiedlichen Störeinflüssen unterliegt. Diese können insbesondere in Paketverlusten resultieren, welche beispielsweise durch das Fehlen eines koordinierenden Master-Knotens und dem sich daraus ergebenden gleichzeitigen Medienzugriff der Netzwerkteilnehmer verursacht werden. Ein weiterer Grund für den Verlust von Nachrichten sind die sogenannten Hidden-Node-Situationen [52] [53]. Hidden-Nodes (siehe Abbildung 2.4) entstehen, wenn ein Empfängerknoten (hier

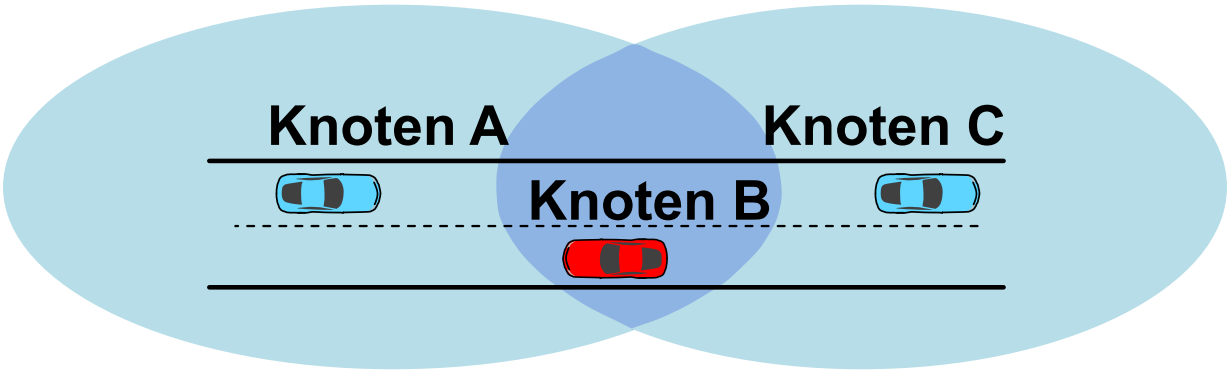


Abbildung 2.4: Hidden-Node Szenario

B) sich zwischen zwei Sendern (hier A und C) befindet, die sich gegenseitig nicht hören können. So kann es vorkommen, dass diese gleichzeitig auf das Kommunikationsmedium zugreifen und die Signale sich bei dem Empfänger überlagern.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass ein Sender einer Nachricht nicht in der Lage ist, zu erkennen, ob ein Empfänger diese erfolgreich zugestellt bekommen wird. Deshalb ist es bei der Entwicklung von Beaconing-Algorithmen stets wichtig, die Möglichkeiten und die Einschränkungen der verwendeten Kommunikationstechnologie zu kennen und zu beachten. Im Folgenden sollen einige der Kernaspekte diskutiert werden, die für die Arbeit relevant sind.

2.3.1 IEEE 802.11p

Durch die ständigen Positionswechsel der Knoten innerhalb eines Fahrzeug-Ad-hoc-Netzes wird die Topologie des Netzes einer kontinuierlichen Veränderung unterzogen. Bedenkt man weiterhin die hohen Relativgeschwindigkeiten, so ist es notwendig, zwischen den Netzwerkteilnehmern einen schnellen Verbindungsaufbau und eine robuste Kommunikation zu gewährleisten. Dies soll durch den Einsatz des IEEE 802.11p Protokolls ermöglicht werden [6]. IEEE 802.11p [67] gehört zur IEEE 802.11 Protokollfamilie [65] und stellt eine Erweiterung des IEEE 802.11a Standards [68] dar. Hier wurden zur Erfüllung der speziellen Anforderungen der Fahrzeug-Netze Änderungen auf der PHY- und der MAC- Schicht des OSI-Referenzmodells vorgenommen. Diese werden in den folgenden Absätzen, soweit sie für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind, kurz vorgestellt.

PHY-Schicht

Der Physical Layer (PHY-Schicht) bildet die unterste Schicht im OSI-Referenzmodell [66] und ist dafür verantwortlich, die Protokolle auf dem Übertragungsmedium zu definieren. Dies führt grundsätzlich zur Spezifikation der digitalen 0 und 1 [59]. Ableitend von IEEE 802.11, spezifiziert IEEE 802.11p das OFDM Protokoll auf dem 5 GHz-Frequenzbereich. Genauer gesagt, handelt es sich dabei um die Frequenz von 5.850 GHz bis 5.925 GHz. Das

Modulation	Bits (OFDM Symbol)	Kodier-ungsrate	Daten-Bits	Datenrate (10MHz)	SNIR [dB]
BPSK	48	1/2	24	3	5
BPSK	48	3/4	36	4,5	6
QPSK	96	1/2	48	6	8
QPSK	96	3/4	72	9	11
16-QAM	192	1/2	96	12	15
16-QAM	192	3/4	144	18	20
64-QAM	288	1/2	192	24	25
64-QAM	288	3/4	216	27	N/A

Tabelle 2.4: IEEE 802.11p OFDM-Datenraten

Frequenzband ist speziell für sicherheitsrelevante Anwendungen sowohl in den USA als auch in Europa lizenziert [60] [61] und ermöglicht für die Teilnehmer eine gewisse Exklusivität der Nutzung. Dadurch sollen in erster Linie Störungen durch Fremdkommunikation reduziert werden. Im Gegensatz zu den in den USA reservierten 75 MHz stehen in Europa aktuell 30 MHz zur Verfügung, welche optional durch weitere 20 MHz ergänzt werden können. Grundsätzlich stehen 10 MHz und 20 MHz breite Kanäle zur Verfügung (siehe Abbildung 2.6), wobei in der Praxis typischerweise 10 MHz-Kanäle aufgrund ihrer verbesserten Robustheit bevorzugt werden [63] [62]. Dies führt zu einer Reduzierung der maximalen Datenrate auf 27 MBit/s. Die einzelnen Datenraten hängen hierbei sowohl von dem eingesetzten Modulationsverfahren als auch von den verwendeten Verfahren zur Fehlerkorrektur ab. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über die möglichen Kombinationen von Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren und weist die daraus resultierenden Datenraten aus. Nach Evaluierungen in [37] soll eine Datenrate von 6 MBit/s für Fahrzeug-Ad-hoc-Netze am besten geeignet zu sein.

MAC-Schicht

Der Media Access Control Layer (MAC-Schicht) liegt direkt über der PHY-Schicht im OSI-Referenzmodell [66] und hat u.a. die Aufgabe, den konkurrierenden Zugriff auf das Kommunikationsmedium zu regeln. Als Medienzugriffsverfahren wird das CSMA/CA verwendet, welches im folgenden Abschnitt im Detail beschrieben wird. Für die einzelnen Nachrichtenpakete können bei IEEE 802.11p Prioritätsklassen definiert werden, welche der Spezifikation des IEEE 802.11e Standards [70] folgen. Hierbei kann zusätzlich zum verteilten Medienzugriff des CSMA/CA auch innerhalb einer Station um den Kanalzugriff konkurriert werden. Dieses Verfahren ist auch unter dem Begriff Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) bekannt. Nachrichten mit höherer Priorität besitzen dabei kürzere Wartezeiten und können im Schnitt früher auf den Kanal zugreifen [79] [80]. Dies ermöglicht es, eine reine FIFO-Warteschlange zu umgehen und Nachrichten zu bevorzugen, auch wenn diese nicht in der zeitlich logischen Abfolge als erste zum Versand an die MAC-Schicht übergeben wurden. Ergänzend zum EDCA kann auch von den darüber liegenden Schich-

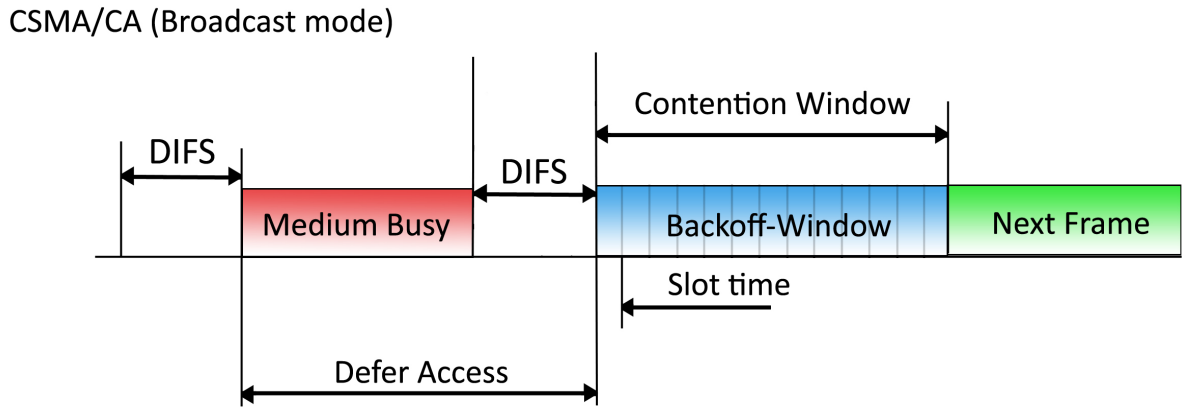


Abbildung 2.5: CSMA/CA-Prinzip in IEEE 802.11

ten die Sendeleistung, die Datenrate und der zu verwendende Kommunikationskanal für jede Nachricht einzeln festgelegt werden. Dies hilft der Applikation, z.B. auf die aktuelle Netzwerksituation zu reagieren. Bei hohen Interferenzen auf dem Kanal könnte man z.B. eine höhere Sendeleistung und eine geringere Datenrate wählen, um den Erfolg der Nachrichtenübertragung zu erhöhen. Als Entscheidungsgrundlage liefert die MAC-Schicht die aktuellen Informationen über den jeweiligen Kanalzustand an ihre übergeordneten Schichten.

2.3.2 CSMA/CA

CSMA/CA steht für Carrier Sensing Multiple Access/Collision Avoidance und soll den gleichzeitigen Zugriff auf ein gemeinsames Medium koordinieren [77]. CSMA/CA konzentriert sich auf die Vermeidung von Paketkollisionen und bedient sich dabei des Listen-before-Talk-Prinzips (erst hören, dann sprechen). Der CSMA/CA-Mechanismus spezifiziert zwei unterschiedliche Modi, die Distributed Coordination Function (DCF) für den verteilten und die Point Coordination Function (PCF) für den koordinierten Medienzugriff. Speziell der Ablauf der DCF ist für Fahrzeug-Ad-hoc-Netze relevant, da diese ohne einen Master bzw. Koordinator bei der Zugriffssteuerung auskommen sollen. Im Folgenden soll der DCF-Ablauf im Detail betrachtet werden.

Distributed Coordination Function

Zur verteilten Koordination des Zugriffs auf das Kommunikationsmedium wird grundsätzlich das Prinzip der Variation von Zugriffszeiten angewendet. Dabei soll jeder Knoten eine zufällige Wartezeit wählen, bevor er auf das Kommunikationsmedium zugreift. Durch die Wahl unterschiedlicher Wartezeiten soll der gleichzeitige Medienzugriff verhindert und ein hinreichendes Maß an Fairness für die konkurrierenden Knoten geschaffen werden. Der Algorithmus basiert auf den folgenden grundlegenden Bestandteilen, die schematisch in Abbildung 2.5 dargestellt sind:

- DCF Interframe Space (DIFS): Zeitdauer von fester Länge, welche von allen Knoten abgewartet werden muss, bevor gesendet werden darf.
- Contention Window (CW): Dynamische Zeitdauer aus Zeitscheiben in einem definierten Intervall.
- Backoff: Zufälliger Wert, der aus dem aktuell geltendem CW-Intervall ausgewählt wird.

Die individuelle Medienzugriffszeit für einen Knoten besteht aus der festen Dauer eines DIFS und in der Regel aus der dynamischen Dauer des gewählten Backoffs. Will ein Knoten eine Nachricht versenden, so muss dieser zuerst überprüfen, ob das Kommunikationsmedium frei ist. Ist dies der Fall, so wird der Kanal für die Dauer eines DIFS überwacht. Ist nach dem Ablauf dieser Wartezeit das Medium immer noch frei, so kann mit der Übertragung begonnen werden. Im Falle, dass das Medium beim Sendewunsch belegt ist, wird der Kanal so lange abgehört, bis die Übertragung abgeschlossen ist. Danach wird eine Wartezeit pro Knoten definiert, die sich aus dem DIFS und einem Backoff errechnet. Falls nach dieser Zeitdauer das Medium noch frei ist, kann der Sendevorgang beginnen. Wird allerdings das Medium durch einen konkurrierenden Knoten zwischenzeitlich belegt, so wird der zu dem Zeitpunkt verbleibende Backoff gespeichert. Nach Beendigung der Übertragung wird kein neuer Backoff generiert, sondern die verbleibende Zeit runtergezählt. Durch diesen Algorithmus soll gewährleistet werden, dass zum einen der gleichzeitige Medienzugriff verhindert wird und zum anderen die Knoten, die länger warten, auch schneller auf den Kanal zugreifen können.

Die Wahl der jeweiligen CW-Dauer kann sowohl die Latenz einer Nachrichtenübertragung als auch die Kollisionswahrscheinlichkeit beeinflussen. Wird z.B. ein kurzes Contention Window gewählt, so kann bei einer geringen Kanallast die Übertragungslatenz verkürzt werden, da im Mittel die Wartezeiten bis zum Medienzugriff reduziert werden. Mit gleichem Contention Window können aber bei vielen Netzwerkknoten die Paketkollisionen auf dem Kommunikationskanal erhöht werden, da die Wahrscheinlichkeit, den gleichen Backoff-Wert zu wählen, im Mittel höher ist als bei größeren CW-Intervallen [45]. Unter der Annahme, dass in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen eine hohe Anzahl an Knoten existiert, bietet das CSMA/CA somit keine optimale Lösung.

2.3.3 Mehrkanalnutzung

Der IEEE 802.11p Standard spezifiziert insgesamt sieben Kommunikationskanäle, die aus einem Control Channel (CCH) und sechs Service Channels (SCHs) bestehen, die zu unterschiedlichen Zwecken genutzt werden. Während der CCH eine besondere Funktion besitzt und nur für hoch relevante und sicherheitskritische Informationen benutzt werden kann, sind die SCHs bezüglich der Nachrichteninhalte freier definiert. Zur Nutzung der jeweiligen Kanäle existieren zwei grundsätzliche Konzepte, Single und der Dual Radios. Ersteres bedeutet, dass pro Fahrzeug genau eine Funkeinheit vorhanden ist und somit zu jedem Zeitpunkt nur ein Kommunikationskanal genutzt werden kann. Das zweite Konzept ermöglicht

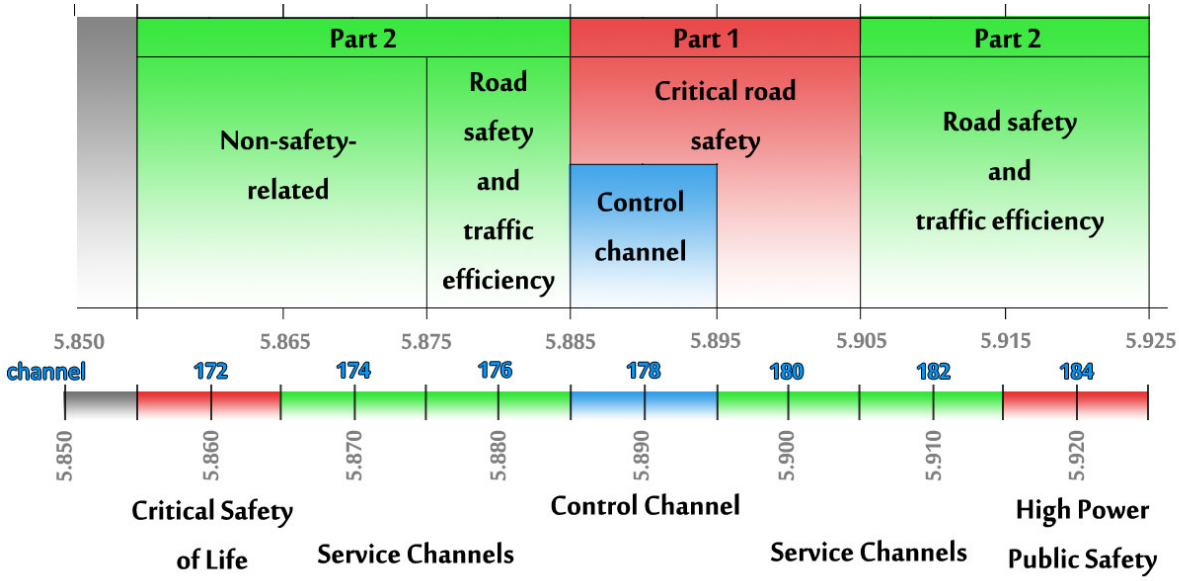


Abbildung 2.6: Spezifikation der Kanäle in IEEE 802.11p

es darüber hinaus durch die Existenz von einer weiteren Funkeinheit zwei Kanäle gleichzeitig zu nutzen.

Weil immer mehr Kommunikationskanäle als Funkeinheiten zur Verfügung stehen und ein Fahrzeug die Kanäle dynamisch in Abhängigkeit der von den darauf verbreiteten Informationen nutzen soll, ist ein Synchronisationsmechanismus (Channel-Switching-Konzept) notwendig. Dieser soll gewährleisten, dass jedes Fahrzeug über die auf den einzelnen Kanälen zur Verfügung stehenden Informationen Kenntnis hat und ein Umschalten der Funkhardware auf den bevorzugten Kanal ermöglicht wird. Eine kurze Übersicht über die beiden Konzepte wird in den folgenden Abschnitten gegeben.

Single Radios

Ein grundlegendes Channel-Switching-Konzept wurde im IEEE 1609 Standard spezifiziert [72]. Im Grunde wird hierbei ein neuer Nachrichtentyp zwecks Bekanntmachung von Informationen definiert, welcher auch unter der Bezeichnung Service Announcement bekannt ist [9]. Ein Service Announcement trägt vor allem die Informationen über die auf den jeweiligen SCHs zur Verfügung stehenden Inhalte und wird ausschließlich auf dem CCH übertragen. Somit kann allen Fahrzeugen mitgeteilt werden, dass Nachrichten eines bestimmten Typs für einen bestimmten Zeitraum auf einem der SCHs zur Verfügung stehen. Ein Empfängerknoten, der sich für diesen Nachrichtentyp interessiert, könnte sein Radio im nächsten Schritt auf den entsprechenden Service-Kanal umschalten, um die Informationen zu empfangen.

IEEE 1609 definiert dafür ein festes Schema zum Wechseln zwischen CCH und SCHs. Hierbei ist jede Sekunde in Synchronisationsintervalle (Sync-Intervalle) von 100 ms Dauer

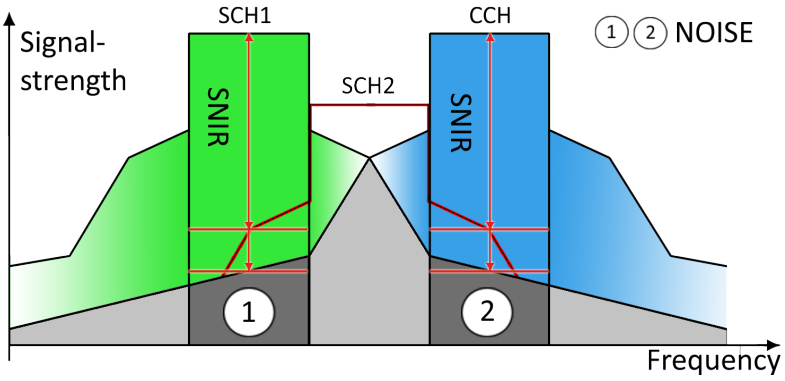


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung von Kommunikationskanälen in IEEE 802.11p

unterteilt. Jedes Sync-Intervall besteht wiederum aus zwei Perioden mit jeweils 50 ms. Es wird zwischen der CCH-Periode und der SCH-Periode unterschieden. Es ist vorgeschrieben, dass jedes Fahrzeug in der CCH-Periode auf dem CCH lauscht. Dadurch sollen sowohl Informationen von hoher Priorität als auch Service Announcements zwischen allen Fahrzeugen ausgetauscht werden können. Innerhalb der darauf folgenden SCH-Periode kann jedes Fahrzeug wählen, auf welchen SCH es hören möchte. Beide Perioden wechseln sich jeweils alle 50ms ab. Zur zeitlichen Synchronisation wird die GPS-Zeit genutzt. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht es, den Nachrichtendurchsatz durch die parallele Nutzung von Service-Kanälen zu erhöhen. Hierbei kann der maximale Datendurchsatz wie folgt errechnet werden:

$$\frac{(ANZ_{SCHs} * 50[ms] + ANZ_{CCH} * 50[ms]) * 10}{1000[ms]} * DataRate[MBit/sec] \qquad (2.1)$$

Nimmt man eine Anzahl von 6 Service-Kanälen an, so steigt der theoretische Datendurchsatz um den Faktor 3,5 im Vergleich zu einem einzelnen durchgängig genutzten Kommunikationskanal. Trotz der Erhöhung des Durchsatzes bringt der von IEEE 1609 spezifizierte Ansatz das folgende Problem mit sich: Grundsätzlich wird durch die spezifizierte CCH-Periode von 50 ms die zur Verfügung stehende Kommunikationsbandbreite für hochpriore Nachrichten auf dem CCH halbiert. Dieses führt darüber hinaus durch das erzwungene Wechseln zwischen CCH und SCH zu zeitlichen Verzögerungen auf dem sicherheitsrelevanten Control-Kanal. Somit können Situationen entstehen, in denen Nachrichten auf dem CCH versendet werden sollen, man jedoch erst auf die nächste CCH-Periode warten muss - kann bis zu 50 ms dauern - auch wenn keine Informationen auf den SCHs verbreitet werden. Betrachtet man das Szenario mit hoher Fahrzeugdichte, wo viele hochpriore Nachrichten gleichzeitig pro Konten versendet werden, könnten die Sendewarteschlangen des CCH anwachsen und nicht innerhalb einer CCH-Periode abgebaut werden. Bei der nächsten CCH-Periode kann es dann zu einem Burst-Szenario kommen, bei dem alle Fahrzeuge die angestauten Nachrichten loswerden wollen. Dieses erhöht die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Medienzugriffs und somit die Möglichkeit der Paketverluste im Netzwerk.

Dual Radios

Das IEEE 1609 Konzept zielt in erster Linie auf einen Single-Radio-Aufbau ab. Um die Vorteile der mehrfachen Kanäle zur Erhöhung der Bandbreite zu nutzen, kann ein Dual-Radio-Aufbau verwendet werden. Bei diesem stehen pro Fahrzeug zwei Radios zur Verfügung, die unterschiedliche Kanäle gleichzeitig nutzen können. Beim Einsatz von zwei Radios kann die folgende Formel zur Berechnung der theoretisch zur Verfügung stehenden Bandbreite genutzt werden:

$$\frac{(ANZ_{SCHs} * + ANZ_{CCH})}{1000[ms]} * DataRate[MBit/sec] \tag{2.2}$$

Nimmt man 6 Service-Kanäle und einen Control-Kanal an, so steht theoretisch die volle siebenfache Kanalbandbreite zur Verfügung. Ein etablierter Ansatz zur Nutzung der zur Verfügung stehenden Kanäle ist die Zuordnung eines Radios auf den Control-Kanal (Control Radio) und eines der Radios auf die Service-Kanäle (Service Radio). In diesem Zusammenhang bleibt das Control Radio immer auf dem CCH geschaltet, wobei das Service Radio je nach Belieben zwischen den SCHs umschalten kann [92] [93]. Unter dieser Voraussetzung ist die in IEEE 1609 getroffene Aufteilung in CCH- und SCH-Perioden mit den damit verbundenen festen Kanalumschaltzeitpunkten nicht mehr relevant. Das Konzept zur Bekanntmachung von zur Verfügung stehenden Informationen auf den unterschiedlichen SCHs durch die Nutzung von Service Announcements kann aber sinnvollerweise übernommen werden. Da der CCH durchgängig genutzt werden kann, löst das Dual-Radio-Konzept die bei dem Single-Radio auftretende Problematik des Anstauens von Nachrichten in den CCH-Warteschlangen. Es kommt somit zu keinen zeitlichen Verzögerungen und keinen konzentrierten Burst-Situationen.

Bei der gleichzeitigen Nutzung der zur Verfügung stehenden Kanäle kann allerdings nicht davon ausgegangen werden, dass diese völlig voneinander unabhängig sind. Wie Abbildung 2.7 zeigt, wird bei einem Sendevorgang in einem bestimmten Kanal die Leistungsenergie auch in den Nachbarkanal übertragen. Dieser Effekt wird Nebensprechen oder Adjacent Channel Interference (ACI) genannt und in Kapitel 5 ausgiebig diskutiert. Dabei werden die Einschränkungen bei der Mehrkanalnutzung aufgezeigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dieser Effekt nicht nur für Dual-Radios, sondern auch für Single-Radios gilt. Im zweiten Fall tritt dieser Effekt auf, wenn während der SCH-Periode zwei benachbarte Service-Kanäle genutzt werden.

2.3.4 Signalausbreitung in drahtlosen Kommunikationsnetzen

Die Fähigkeit, eine Nachricht über ein drahtloses Netzwerk empfangen und dekodieren zu können, ist definiert über den Signal-Rauschabstand, welcher auch als Signal-to-Noise-Interference-Ratio (SNIR) bekannt ist. Dabei beschreibt SNIR das Verhältnis zwischen der Signalstärke eines Empfangssignals (hier in dB), auch Received Signal Strength (RSS) genannt, und dem an der gleichen Position vorherrschenden Rauschen und den Störsignalen innerhalb des Kanals. Im Falle, dass das Empfangssignal um den Wert von SNIR höher

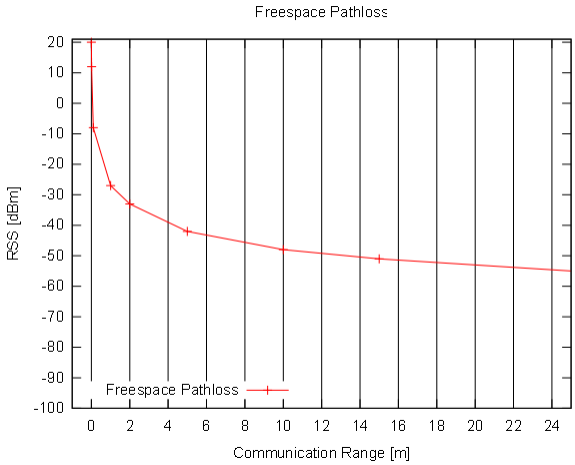


Abbildung 2.8: Signaldämpfung auf kurzer Distanz (25 Meter)

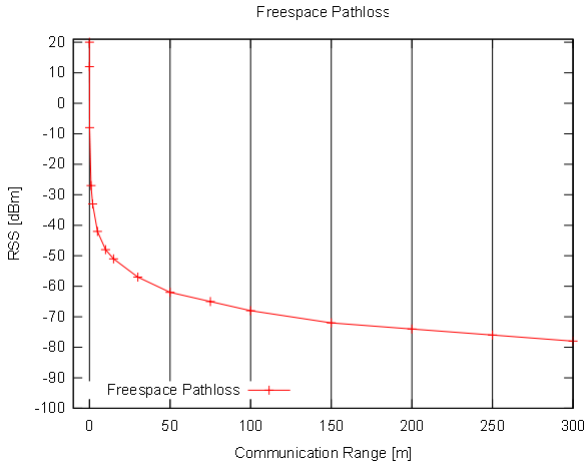


Abbildung 2.9: Signaldämpfung auf langer Distanz (300 Meter)

ist als das aktuelle Rauschen, kann das Nachrichtenpaket von der Empfängerhardware decodiert werden. Die RSS hängt hierbei von zwei Kernaspekten ab. Zum einen von der Sendeleistung TX_{power} eines Pakets und zum anderen von der Dämpfung der Sendeenergie im Raum. Letztere kann unter Berücksichtigung der Pathloss- und der Fading-Faktoren (siehe folgende Absätze) berechnet werden. Somit ergeben sich für RSS und SNIR die in den Gleichungen 2.3 und 2.4 dargestellten einfachen Zusammenhänge.

$$RSS = TX_{Power} - Pathloss - Fading \tag{2.3}$$

$$SNIR = RSS - Noise \tag{2.4}$$

Eine solche Betrachtung der Signalausbreitung ist allerdings nur unter optimalen Bedingungen gültig, in denen keine Abschattung oder Einflüsse der Mehrwegeausbreitung auf das Signal wirken. Zum besseren Verständnis sollen die einzelnen Aspekte der Signalausbreitung kurz vorgestellt werden.

Die Dämpfung eines Signals beschreibt den Verlust der Leistungsdichte einer elektromagnetischen Welle im freien Raum. Im einfachsten Fall wird davon ausgegangen, dass keine weiteren Störeinflüsse wie Luftfeuchtigkeit, Gase oder Reflexionen die Ausbreitung des Signals beeinflussen, was in der Betrachtung der Freiraumdämpfung resultiert. Dabei wird angenommen, dass ein isotroper Strahler [31] [32] existiert, der durch eine gleichmäßige und verlustfreie Wellenausbreitung in alle Richtungen charakterisiert ist. Es wird eine Kugel um den Sender beschrieben, auf der jeder Empfänger in gleichem Abstand zum Sender die gleiche Energie absorbiert. Der Verlust der Sendeleistung hängt hierbei proportional zu dem Quadrat der Entfernung d [m] zwischen Sender und Empfänger und dem Quadrat der verwendeten Frequenz f [Hz] ab. Zur Berechnung der Freiraumdämpfung ATT_f kann die folgende Formel genutzt werden, wobei die Konstante c der Lichtgeschwindigkeit

entspricht:

$$ATT = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \tag{2.5}$$

Üblicherweise wird die Signaldämpfung in dB ausgedrückt und resultiert nach Umformung der Gleichung 2.5 in der folgenden Darstellung:

$$ATT[dB] = 20\log 10(d) + 20\log 10(f) + 32.44 \tag{2.6}$$

Die Evaluierung von drahtlosen Netzen auf Basis der Freiraumdämpfung kann zur Verfälschung der Ergebnissen führen. Dies ist der Fall, da in der Realität eine Vielzahl von Störfaktoren existiert, die die Ausbreitung und den Empfang eines Signals beeinflussen kann [31]. Die Hauptfaktoren dabei sind:

- Abschattung: Der Abschattungseffekt entsteht in Situationen, in denen zwischen Sender und Empfänger keine direkte Sichtverbindung existiert. Dies ist der Fall, wenn z.B. Gebäude, andere Fahrzeuge oder sonstige Objekte sich dauerhaft oder temporär zwischen den kommunizierenden Knoten befinden. Man spricht bei diesen Situationen auch von Non-Line-Of-Sight-Szenarien (NLOS). Der Einfluss auf die Empfangssignalstärke ist hierbei zum einen von der Beschaffenheit des Objektes und zum anderen von der verwendeten Wellenlänge abhängig. Grundsätzlich wird das Signal bei hohen Wellenlängen stärker gedämpft.

- Reflektion: Reflektionen entstehen, wenn ein Signal auf ein Objekt trifft und dabei die Ausbreitungsrichtung ändert. Vorteil dabei ist, dass Signale dabei z.B. um Ecken herum empfangen werden können. Die Signalstärke wird allerdings bei jeder Reflexion reduziert.

- Streuung: Abhängig von der Größe der Objekte und der Wellenlänge werden Signale in mehrere kleine bzw. schwächere Signale gespalten, welche in unterschiedliche Richtungen verlaufen. Die Streuung ist abhängig von der Größe eines Objekts und der Wellenlänge des Signals. Ist das Objekt kleiner als die Wellenlänge, kann dieser Effekt zum Tragen kommen [30].

- Beugung: Der Beugungseffekt tritt auf, wenn eine Signalwelle z.B. von der Spitze eines Berges umgelenkt wird und somit wieder ins Tal hinabstrahlt.

Die aufgezählten Faktoren führen vor allem dazu, dass ein ausgesendetes Signal sich nicht geradlinig ausbreitet und stets gestreut wird, sodass es zu einer Mehrwegeausbreitung kommt. Ein versendetes Signal kann dabei mehrfach zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einem Empfänger ankommen.

Die konkreten Einflüsse auf die Signalausbreitung sind abhängig von der jeweiligen Umgebung, in der sich der Sender und der Empfänger befinden. Grundsätzlich können diese Effekte in zwei Klassen aufgeteilt werden, das Large-Scale Fading und das Small-Scale Fading [31]. Das Large-Scale Fading (auch Pathloss genannt) betrachtet hierbei die

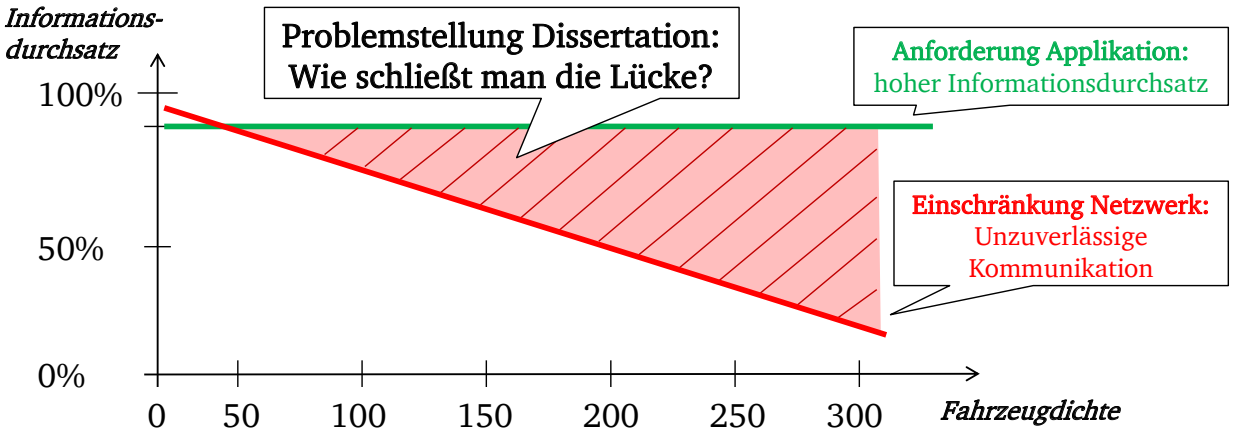


Abbildung 2.10: Problemstellung der Dissertation

Schwankungen der Signalstärke in Abhängigkeit von der Distanz zwischen zwei Knoten und berücksichtigt eventuelle Abschattungseffekte. Das Small-Scale Fading konzentriert sich entsprechend auf kurze Distanzen und berücksichtigt konstruktive und destruktive Interferenzen. Unter konstruktiven Interferenzen versteht man, dass die Signalstärke durch sich überlagernde Signale zunimmt, während destruktive Interferenzen zur Reduktion der Signalstärke bzw. Auslöschung des Signals führen [33] [31].

Ist die Umgebung bekannt, so kann theoretisch die exakte bei einem Empfänger ankommende Signalstärke berechnet werden [31]. Allerdings wird dieser Ansatz aufgrund seiner Komplexität nur selten für bestimmte Spezialfälle eingesetzt [34].

Um eine Annäherung an die Signalausbreitung zu ermöglichen, existieren unterschiedliche Modelle, die keine exakte Kenntnis der Umgebung erfordern, sondern auf generalisierten statistischen Werten in typischen Situationen basieren [31]. Die detaillierte Diskussion der einzelnen Modelle ist nicht Bestandteil der hier vorliegenden Arbeit, kann u.a. aber in [31] im Detail nachgelesen werden. Es sei angemerkt, dass für alle weiteren simulativen Evaluierungen in dieser Arbeit das deterministische Two-Ray-Ground Pathloss-Modell und das probabilistische Rayleight Fading-Modell verwendet wurden. Dies sind typische umgesetzte Modelle [35] in den bekannten Simulationsumgebungen für Fahrzeug-Ad-hoc-Netze wie NS2 [96], GloMoSim [97] und JiST/SWANS [102].

2.4 Problemstellung

Im Folgenden soll die in dieser Arbeit betrachtete wissenschaftliche Problemstellung beschrieben werden. Wie bereits diskutiert, sollen kooperative Sicherheitsanwedungen dazu beitragen, kritische Situationen im Straßenverkehr zuverlässig zu erkennen und zu vermeiden. Dazu ist es notwendig, dass jedes Fahrzeug in jeder Situation aktuelle Informationen über alle seine relevanten Nachbarn besitzt. Dies soll sowohl in Situationen mit einer geringen als auch einer hohen Fahrzeugdichte gelten. Typischerweise werden zum Aufbau des kooperativen Wissens spezielle Positions- und Zustandsnachrichten (Beacons) zwischen

den Fahrzeugen ausgetauscht. Da allerdings mit zunehmender Fahrzeugdichte die Anzahl der zu übertragenden Beacons im Kommunikationskanal steigt, erhöht sich aufgrund der begrenzten Netzwerkressourcen die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten bei der Übertragung.

Es müssen somit Maßnahmen getroffen werden, um Paketverluste zu kompensieren, damit relevante Informationen mit hoher Wahrscheinlichkeit übertragen werden können. Hierbei ist nicht zwangsläufig gefordert, die Wahrscheinlichkeit eines einzelnen zu übertragenden Beacons zu gewährleisten, sondern vielmehr einen hohen Informationsdurchsatz trotz der bestehenden unzuverlässigen Kommunikation sicherzustellen. Die Anforderungen im Hinblick auf den in der jeweiligen Situation geforderten Informationsdurchsatz werden in Kapitel 4 definiert und Metriken zur Beurteilung der Erreichung der Anforderungen aufgestellt.

Abbildung 2.10 zeigt schematisch die Gegenüberstellung des Abfall des Informationsdurchsatzes im Netzwerk (rote Linie) und des gewünschten zu erzielenden Ergebnisse aus Sicht der Anwendung (grüne Linie). Um das gewünschte Ergebnis erzielen zu können, wird im Rahmen der Arbeit der serviceorientierte Mehrkanal-Beaconing-Ansatz vorgestellt und evaluiert.

2.5 Kriterien für den Beaconing-Algorithmus

Im folgenden Absatz werden Kriterien definiert, die grundsätzlich zur Beurteilung eines Beaconing-Ansatzes sinnvoll erscheinen und aus den Anforderungen der kooperativen Sicherheitsanwendungen abgeleitet sind. Anhand dieser Kriterien soll eine qualitative Beurteilung auf der Basis von Simulationsergebnissen vorgenommen werden und der ganzheitliche Lösungsansatz bewertet werden. Die qualitative Beurteilung wird mit Hilfe der folgenden drei Kategorien vorgenommen:

- + : zufriedenstellend
- o : ausreichend
- - : ungenügend

Der qualitative Bewertungsansatz wurde aufgrund des Mangels von belastbaren definierten quantitativen Anforderungen bzgl. der einzelnen im folgenden aufgestellten Kriterien ausgewählt und soll eine Einschätzung der Eignung einzelner Aspekte ermöglichen.

Nutzenorientierung

Der Beaconing-Algorithmus soll durch die Übertragung von Nachrichten den einzelnen Fahrzeugen einen Nutzen bringen. Dadurch soll verhindert werden, dass der eingeschränkte Kommunikationskanal unnötig durch irrelevante Nachrichten belastet wird. Der generierte Nutzen kann auf zwei unterschiedliche Weisen betrachtet werden:

- Zum einen unter Betrachtung des entstehenden individuellen Nutzens für ein Fahrzeug, welches als einzelnes an einer Information interessiert ist.
- Zum anderen durch die Betrachtung des globalen Nutzens mit Hinblick auf die Relevanz einer Nachricht für alle sich in der Umgebung des Senders befindenden Fahrzeuge.

In der Beurteilung der Beaconing-Ansätze soll zwischen den beiden Kriterien differenziert werden.

Informationsdurchsatz

Im Hinblick auf die fachliche Anforderung einer Anwendung ist die abstrahierte Betrachtung des Informationsdurchsatzes sinnvoll. Der Begriff des Informationsdurchsatzes kann hierbei als Aufbau von Wissen verstanden werden, welches durch unterschiedliche Anforderungen in der jeweiligen Situation definiert ist. Beispielsweise können darunter die Anforderungen im Hinblick auf das durchschnittliche Beacon-Nachrichtenalter oder die prozentuale Menge an bekannten Fahrzeugen in einem definierten Umkreis verstanden werden. Die Definition des im Einzelnen geforderten Informationsdurchsatzes und die dazugehörigen Metriken werden in Kapitel 4 für die zwei speziell betrachteten Situationen der Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung eingeführt. Das Kriterium der Optimierung des Informationsdurchsatzes bildet das wichtigste Kriterium für die hier bearbeitete Fragestellung.

Skalierbarkeit

Das erarbeitete Protokoll soll vor allem in jeglichen in der Praxis vorkommenden Situationen einsetzbar sein. Dies soll sowohl für wenig als auch für viel befahrene Straßen gelten. Eine Charakteristik ist dabei die in der jeweiligen Situation vorherrschende Verkehrsdichte, welche wiederum einen starken Einfluss auf die Kanallast und somit auch auf den Paketverlust hat. Es soll sichergestellt werden, dass der Algorithmus bei einer wachsenden Fahrzeuganzahl trotzdem die gewünschten Ergebnisse liefert. Es wird eine lineare Abhängigkeit zwischen der Fahrzeugdichte und dem erzielten Informationsdurchsatz in einer definierten Entfernung angestrebt. Ein weiterer Aspekt der Skalierbarkeit ist die Nutzung des Beaconing-Ansatzes unter Betrachtung von unterschiedlichen Kommunikationsdistanzen. Somit soll es möglich sein, den geforderten Informationsdurchsatz über eine für die Anwendung relevante Distanz zu gewährleisten, um frühzeitig auf sicherheitskritische Situationen reagieren zu können.

Kompatibilität

Der Beaconing-Algorithmus soll zwar einen hohen Informationsdurchsatz in den sicherheitsrelevanten Situationen gewährleisten, soll aber keine Exklusivität des Kommunikationskanals benötigen. Obwohl Beacon-Nachrichten mit höherer Priorität behandelt werden,

soll stets für andere sicherheitsrelevante Anwendungen, z.B. für lokale Gefahrenwarnungen, die Möglichkeit bestehen, ihre Informationen zu verbreiten. Zur Beurteilung dieses Kriteriums können die unterschiedlichen Ansätze im Hinblick auf die generierte Last auf dem Kanal miteinander verglichen werden. Es sei angemerkt, dass das Kriterium der Kompatibilität aus der Gesamtsicht aller Anwendungen zwar relevant ist, jedoch kein K.O. Kriterium für den Beaconing-Algorithmus darstellt. Hintergrund dafür ist die Priorisierung der unterschiedlichen Anwendungsklassen und die daraus resultierende Erkenntnis, dass sicherheitsrelevante und vor allem kooperative Kollisionserkennungsanwendungen die höchste Priorität besitzen [24]. Somit kann ein Beaconing-Algorithmus auch als geeignet angesehen werden, wenn er in bestimmten Situationen eine Exklusivität des Kanals benötigt.

2.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat eine Übersicht über Fahrzeug-Ad-hoc-Netze gegeben. Nach der Vorstellung der beteiligten Komponenten innerhalb des Systems wurden sowohl die Anwendungssicht als auch die Netzwerksicht im Detail betrachtet. Im Ergebnis wurde die im Hinblick auf die kooperativen Sicherheitsanwendungen geforderte Zuverlässigkeit der Informationsübertragung im Gegensatz zu den eingesetzten unzuverlässigen drahtlosen Kommunikationsnetze als Hauptproblem identifiziert. Speziell im Hinblick auf die mit hoher Priorität betrachteten Anwendungen zur kooperativen Kollisionserkennung und die dadurch eingesetzten Beaconing-Strategien stellt dies ein Problem dar, das nicht vernachlässigt werden darf. Des Weiteren wurden zur Beurteilung der eingesetzten Beaconing-Strategien Kriterien aufgestellt, welche sich an den Anforderungen der Anwendungen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen orientieren.

Um die definierten Anforderungen umsetzen zu können, wird in der vorliegenden Arbeit eine Kombination von zwei Paradigmenwechseln auf dem Gebiet des Beaconings vorgeschlagen. Es werden die einzelnen Lösungsansätze der

- Serviceorientiertierung und
- der Mehrkanalnutzung

vorgestellt und im Detail anhand von Simulationen unter Betrachtung der definierten Kriterien evaluiert. Die Kombination der Lösungsansätze stellt eine nutzenorientierte Beaconing-Strategie dar. Es wird ein hybrides push/pull-Verfahren eingesetzt, welches es erlaubt, sowohl periodisch Beacons mit einer niedrigen Wiederholrate als auch zusätzliche Beacons in Abhängigkeit von der Situation zu versenden. Letzteres soll als pull-Prinzip den serviceorientierten Ansatz abbilden und es ermöglichen, individuelle Situationen einzelner Fahrzeuge zu betrachten. Durch die Nutzung mehrerer paralleler Kommunikationskanäle soll gewährleistet werden, dass durch die Lastverteilung auf die Kanäle Paketverluste reduziert werden können. Dadurch soll ermöglicht werden, den globalen Nutzen innerhalb des Netzwerks zu erhöhen und den geforderten Informationsdurchsatz im Hinblick auf die Robustheit und Skalierbarkeit des Beaconing-Ansatzes zu gewährleisten.

Kapitel 3

Beaconing-Ansätze in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen

Die Optimierung von Beaconing-Strategien ist ein wichtiges Feld auf dem Gebiet der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze. Ausgangssituation sind hierbei die definierten Anforderungen der einzelnen sicherheitsrelevanten Anwendungen. Wie bereits beschrieben, existieren unterschiedliche Auffassungen von der Beacon-Wiederholrate, welche sich im Intervall von 1Hz und 10Hz bewegen und teilweise in besonders kritischen Situationen bis zu 50Hz ansteigen sollen. Betrachtet man Szenarien, in denen sich lediglich wenige Fahrzeuge innerhalb eines Ad-hoc-Netzes befinden, so scheinen die Anforderungen vom Netzwerk erfüllt werden zu können. Steigt allerdings die Anzahl der Kommunikationspartner, wird auch die Last auf dem Kommunikationskanal entsprechend erhöht. Dies hat zur Folge, dass durch eine höhere Interferenzwahrscheinlichkeit von Paketen auch die Zuverlässigkeit der Übertragung abnimmt. In [46] wird davon ausgegangen, dass die zuverlässige Übertragung von Informationen das Hauptkriterium für die Service-Qualität in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen darstellt. Evaluierungen in [38] und [40] haben gezeigt, dass die Zuverlässigkeit einer Nachrichtenübertragung von dem Kommunikationsradius und der generierten Last auf dem Kanal abhängt. Im Speziellen sinkt die Distanz, in der eine zuverlässige Kommunikation möglich ist, mit dem Anstieg der zu übertragenden Nachrichtenanzahl. Aus diesem Grund ist es essentiell, die Netzwerkressourcen optimal zu nutzen, um den Inforamtionsdurchsatz für sicherheitsrelevante Anwendungen zu steigern. Im Folgenden sollen existierende Beaconing-Ansätze vorgestellt und diskutiert werden, die auf unterschiedliche Arten an die Lösung dieser Fragestellung herantreten.

3.1 Anpassung der Beacon-Wiederholrate

Khorakhun et al. stellen in [44] die Idee vor, die Wiederholrate von Beacons auf der Basis der vorherrschenden Kanallast zu regeln. Ziel soll sein, die global generierte Kanallast gegen eine vorgegebene maximale Auslastung des Kommunikationskanals zu konvergieren. Auf dieser Grundlage wird eine optimale durchschnittliche Beacon-Wiederholrate berech-

net und diese als Stellgröße an alle Knoten im Netzwerk übertragen. Jedes Fahrzeug kann somit seine Beacon-Wiederholrate an die vorgegebene Durchschnittsrate anpassen. Obwohl die Optimierung der Kanallast innerhalb des Netzwerks eine wichtige Rolle spielt, wird in diesem Ansatz die Anforderung der Anwendungen in Hinblick auf die zu übertragenden Informationen gänzlich außer Acht gelassen. Basierend auf diesem Ansatz ist es nicht möglich, kontextabhängig zu entscheiden, ob es in bestimmten Situationen sinnvoll bzw. notwendig wäre, die Beacon-Wiederholrate einzelner Fahrzeuge anzuheben.

Einen anderen Ansatz zur adaptiven Beacon-Wiederholrate verfolgt die vorläufige Spezifikation der ETSI [76]. Die Wiederholrate der einzelnen Sendeknoten soll auf der Basis mehrerer Regeln gesteuert werden, die von den aktuellen Sensordaten eines Fahrzeugs abhängig sind. Folgende Regeln werden für die Bestimmung des Sendezeitpunkts eines Beacons definiert:

- Senden, wenn der Zeitpunkt zu dem letzten versendeten Beacon $\geq 1s$ ist.
- Nicht senden, wenn die Zeitdifferenz zwischen zwei Beacons $\geq 0.1s$ ist.
- Senden, wenn der absolute Unterschied zwischen der aktuellen Fahrtrichtung (bezogen auf Norden) und der Fahrtrichtung des letzten versendeten Beacons $\geq 4\circ$ ist.
- Senden, wenn der Unterschied zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und der Position des zuletzt versendeten Beacons $\geq 5m$ ist.
- Senden, wenn der Unterschied zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsinformation aus dem zuletzt versendeten Beacon $\geq 1\frac{m}{s}$ ist.

Der Überprüfungszyklus der einzelnen Regeln wird in einem Intervall von 100 ms durchgeführt. Nach Regel 1 und 2 sind somit die äußeren Intervallgrenzen der Wiederholraten durch 1Hz und 10Hz definiert. Die Beaconing-Strategie der ETSI definiert eine Senderatenanpassung in Abhängigkeit der Informationen, die für eine sicherheitsrelevante Anwendungen von Interesse sein könnten und erhöht die Beacon-Wiederholrate nur, falls gewisse Grenzwerte überschritten werden. Betrachtet man das Prinzip der empfängerseitigen Extrapolation von Fahrstrecken, so können z.B. durch die Mitteilung der geänderten Fahrtrichtung bzw. Geschwindigkeit neue Kollisionswahrscheinlichkeiten berechnet werden. Ein Schwachpunkt diese Ansatzes ist allerdings, dass nicht auf die Umgebungsinformationen eingegangen und somit beispielsweise nicht betrachtet wird, ob überhaupt ein Nachbar existiert, der an einer Beaconinformation interessiert ist.

3.2 Anpassung der Beacon-Sendeleistung

Die Anpassung von Sendeleistungen für einzelne Nachrichtentypen kann sinnvoll sein, wenn die Last auf dem Kommunikationskanal global reduziert werden soll. Die Idee hierbei ist, eine optimale Sendeleistung zu finden, die es ermöglicht, nur mit diesen Fahrzeugen zu kommunizieren, welche sich in einem definierten Radius um den Sender befinden. So kann

die Größe einer Kommunikationszelle angepasst und die Störsignale können in anderen Zellen reduziert werden.

Li et al. präsentieren in [47] und [48] ein analytisches Modell zur Anpassung der Sendeleistung, um die One-hop-Distanz in CSMA-basierten Netzen zu optimieren. Auf dieser Basis soll dann über alle Knoten im Netzwerk eine Anpassung der Sendeleistung vorgenommen werden. Allerdings fordert dieser Ansatz die Existenz von ausschließlich statischen Knoten und deckt somit nicht die Mobilitätsanforderungen von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen ab.

Torrent-Moreno et al. präsentieren in [49] das FPAV-Protokoll (Fair Power Adjustment for Vehicular Environments), welches die Sendeleistung für jeden einzelnen Knoten innerhalb eines Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerks definiert. Mit diesem Protokoll soll sowohl die minimale als auch die maximale Kommunikationsreichweite für jedes Fahrzeug individuell optimiert werden. Auch in diesem Ansatz kann die Last auf dem Kommunikationskanal unter einen definierten Schwellwert gesenkt werden.

Bei den Ansätzen zur dynamischen Anpassung der Sendeleistungen im Hinblick auf die generierte Last auf dem Kommunikationskanal steht allerdings die Anforderung der sicherheitsrelevanten Anwendungen in einzelnen kritischen Situationen nicht im Vordergrund. Somit kann nicht sichergestellt werden, dass alle notwendigen Informationen zu jedem Zeitpunkt bei den entsprechenden Fahrzeugen existent sind.

3.3 Multihop Beaconing

Das Weiterleiten von Beacons über mehrere Hops ist eine Möglichkeit, Informationen in einem bestimmten geographischen Umfeld zu verbreiten. Weiterhin kann der Ansatz der Weiterleitung von Beacons auch Abschattungsszenarien abdecken. Wollen beispielsweise Fahrzeuge miteinander Nachrichten austauschen, deren Kommunikationsweg z.B. von Gebäuden oder anderen Fahrzeugen verdeckt ist, können die erforderlichen Informationen über einen dritten Knoten übertragen werden. Dieses ist bei Beaconing-Ansätzen, die sich ausschließlich auf das einmalige Senden einer Nachricht konzentrieren, nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

Osafune et al. präsentieren eine grundlegende Idee zur Weiterleitung von Nachrichten über mehrere Instanzen in [50] und [51]. Das MHVB-Protokoll (Multi-Hop Vehicular Broadcast) ist in erster Linie ein Ansatz dafür, Nachrichten mit möglichst minimaler Kanallast in weiten geographischen Gebieten zu verbreiten. Hierbei werden auf Basis von Positionsinformationen und der daraus berechneten Entfernung zwischen Sender und Empfänger Prioritäten für Knoten bestimmt, die als Weiterleitungsinstanzen in Frage kommen. Um möglichst weite Distanzen zu überwinden, sollen Knoten mit der höchsten Entfernung vom Sender bevorzugt werden. Wird die Weiterleitung vollzogen, unterdrücken alle anderen Knoten, welche das Paket ebenfalls hätten weiterleiten können, ihren Sendevorgang.

Basierend auf der Idee von MHVB wurde von Mittag et al. in [82] eine Evaluierung eines Multi-hop Beaconing-Ansatzes durchgeführt. Dabei wurden auf der Basis von Metriken zum durchschnittlichen Nachrichtenalter und des generierten Wissens über die Nachbar-

fahrzeuge pro Knoten die Ergebnisse mit einem One-hop Beaconing-Ansatz verglichen. Diesem Ansatz lag die Idee zugrunde, dass weiterzuleitende Nachrichten mit reduzierter Sendeleistung versendet werden. Die Studie zeigt, dass eine Weiterleitung von allen sich im Netzwerk befindenden Beacons im Vergleich zur One-hop Variante keine Verbesserung zeigt. Allerdings wurde im Rahmen dieser Arbeit der Aspekt der Situationsabhängigkeit und der damit verbundenen selektiven und nutzenorientierten Weiterleitung von Beacons nicht betrachtet.

3.4 Kontextadaptives Beaconing

Die kontextadaptive Anpassung der Senderate bietet eine weitere Möglichkeit der Regulierung der Last auf dem Kommunikationskanal bei gleichzeitiger Betrachtung des Nutzens einer Nachricht. Hierbei soll jeder Knoten vor dem Senden den Nutzen seiner Information für die existierenden Nachbarn kalkulieren und auf dieser Basis entscheiden, ob gesendet werden soll oder nicht.

Nutzenorientierte Algorithmen zur Nachrichtenverbreitung in Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzen wurden u.a. in [41], [42], [84], [85] und [86] vorgestellt und diskutiert. Eichler et al. stellen z.B. in [43] ein altruistisches Kommunikationsschema vor, welches eine Entscheidungsgrundlage für den Sendevorgang der pro Knoten zur Verfügung stehenden Nachrichten anhand von berechneten Prioritäten ermöglicht. Jeder Sender nimmt dabei eine Schätzung des potenziell zu generierenden Nutzens auf Basis eines Kontextmodells vor. Hierbei können mehrere Kontextebenen für die Priorisierung verwendet werden. Grundlegend wird zwischen dem Kontext aus empfangenen Nachrichten, den eigenen Fahrzeuginformationen und den Umfeldinformationen unterschieden. Die Gewichtung der jeweiligen Kontextparameter ergibt im letzten Schritt einen normalisierten Wert, welcher wiederum als Grundlage für den Medienzugriff verwendet werden kann. Im Speziellen soll auf dieser Basis das Contention Window (CW) des CSMA-Verfahrens dynamisch angepasst werden können. Da Nachrichten mit niedrigem Nutzen einen höheren CW-Wert erhalten, kann somit der Medienzugriff für Nachrichten mit einem höheren Nutzen priorisiert und der globale Nutzen im Netzwerk erhöht werden.

Schmidt et al. stellen in [87] ein weiteres situationsabhängiges Beaconing-Schema vor. Ähnlich zu [43] werden als Entscheidungsgrundlage unterschiedliche Kontextattribute genutzt. Die vorgeschlagene Strategie soll in erster Linie in sicherheitskritischen Situationen angewendet werden und nutzt sowohl eigene Fahrdynamikdaten als auch Umfeldinformationen, welche z.B. auch die aktuelle Verkehrsdichte berücksichtigen. Im Gegensatz zu [43] wird hier nicht die dynamische Priorisierung von Nachrichten betrachtet.

Um die Beacon-Wiederholrate im Netzwerk zu reduzieren, schlagen Rezaei et al. in [94] einen kontextadaptiven Algorithmus zur Anpassung der Beacon-Sendezeitpunkte basierend auf Fahrstreckenvorhersagen vor. Sowohl Sender als auch Empfänger berechnen diese anhand von exakt gleichen Algorithmen auf der Basis der jeweiligen Informationen eines Beacons. Da die Algorithmen jeweils die gleichen Ergebnisse liefern, weiß ein Sender immer, von welchen Fahrstreckenvorhersagen seine Empfänger ausgehen. Detektiert der

Sender nun eine Abweichung seiner realen von der berechneten Fahrstrecke, so kann davon ausgegangen werden, dass die Empfänger ungültige Informationen besitzen. In diesem Fall wird ein neues Beacon versendet, welches die korrigierten Informationen beinhaltet. Obwohl dieser Ansatz zu einer reduzierten Last auf dem Kanal führen kann, ist er für den Aufbau von kooperativem Wissen nicht geeignet. Speziell in Situationen, in denen z.B. aufgrund von Interferenzen eine Nachricht von einem Nachbarknoten nicht empfangen werden kann, würde ein Empfänger stets mit ungültigen Informationen arbeiten. Vor allem in Szenarien mit hoher Fahrzeugdichte kann dies zu stark verfälschten Ergebnissen führen.

3.5 Bidirektionale Ansätze

Die bidirektionale Kommunikation in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen bietet eine Möglichkeit der Umsetzung von zuverlässiger Nachrichtenübertragung. In diesem Zusammenhang wurde eine zuverlässige Weiterleitung von Nachrichten über mehrere Hops von Korkmaz et al. in [88] vorgestellt. Der Hauptgedanke hierbei ist, dass eine Exklusivität des Zugriffs auf den Übertragungskanal ermöglicht wird. Dieser Ansatz orientiert sich an dem RTS/CTS Verfahren von CSMA/CA und führt die Begriffe Ready-to-Broadcast (RTB) und Clear-to-Broadcast (CTB) ein. Jeder Knoten, der eine Nachricht im Netzwerk über längere Distanzen verbreiten will, sendet an seine Nachbarn ein RTB-Paket, welches immer die geographische Position des Senders beinhaltet. Jeder Empfänger kann dann auf dieser Basis seine Entfernung zum Sender kalkulieren. Als Reaktion auf ein RTB-Paket sendet jedes Fahrzeug ein Störsignal, welches auch als Black-burst in [89] und [90] bezeichnet wird. Die Länge des Bursts wird anhand der Entfernung zum Sender berechnet. Je größer die Entfernung desto länger die Dauer des Störsignals auf dem Kanal. Der Knoten mit der höchsten Entfernung soll nach Beendigung der Übertragung seines Störsignals den Kommunikationskanal im freien Zustand vorfinden. Ist dies der Fall, antwortet dieser mit dem CTB-Paket, welches wiederum seine ID enthält. Auf dieser Grundlage weiß der Sender des RTB-Paketes, welcher Knoten die Weiterleitung übernehmen soll und sendet an diesen die zu übertragenden Daten. Im letzten Schritt wird die Weiterleitung mit einer ACK-Nachricht quittiert. Der Algorithmus geht jedoch aufgrund der erhöhten Anzahl an Nachrichten pro Übertragungsvorgang und der von jedem Knoten zu versendenden Störsignale nicht optimal mit der zur Verfügung stehenden Kommunikationsbandbreite um. Dieser scheint somit lediglich für ausgewählte Szenarien geeignet zu sein, in denen das RTB/CTB Verfahren selten eingesetzt werden muss. Gerade in Hinblick auf den generierten Overhead in Szenarien mit hoher Fahrzeugdichte kann dies schnell zu einer Überlastung des Kommunikationskanals führen.

Ein weiterer Ansatz zum zuverlässigen Broadcast von Nachrichten wird von Seungjin et al. in [91] vorgestellt. Es wird ein One-hop-Algorithmus eingeführt, welcher mit negativen Quittierungen (NACKs) arbeitet. Es wird vorgeschlagen, dass jeder Knoten, der eine Paketkollision entdeckt, diesen Zustand durch das Senden eines NACKs mitteilt. Erhält der Sender des ursprünglichen Datenpakets eine negative Quittierung, so kann er davon ausgehen, dass ein nochmaliges Senden des Datenpakets notwendig ist. Dieser Vorgang

wird solange ausgeführt, bis keiner der Nachbarknoten mehr ein NACK-Paket versendet oder eine maximale Anzahl von Wiederholungen des Datenpakets erreicht wird. Es ist zu erkennen, dass dieses Protokoll die Anforderungen der Fahrzeug-Ad-hoc-Netze im Hinblick auf die Skalierung der Knotenanzahl nicht erfüllen kann. Die Last auf dem Kommunikationskanal würde durch die erhöhte Anzahl an Kollisionen und die daraus resultierenden NACK-Nachrichten zunehmend steigen. Ein weiterer Schwachpunkt des Algorithmus ist die Mobilität der einzelnen Knoten. Hat sich z.B. der Sender des ursprünglichen Datenpakets zwischenzeitlich aus der Kommunikationsreichweite des Empfängers bewegt, so kann auch keine wiederholte Übertragung durchgeführt werden.

3.6 Zusammenfassung

Die dynamische Anpassung der Beacon-Wiederholrate in Abhängigkeit der vorherrschenden Situation ist ein essentieller Schritt zur Optimierung des Informationsdurchsatzes in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen. Somit stellen nutzenorientierte Algorithmen den ersten wichtige Schritt zur Erarbeitung einer zufriedenstellenden Beaconing-Strategie dar. Allerdings ist trotz der existierenden kontext- und situationsadaptiven Ansätze stets die Unsicherheit gegeben, ob eine zu versendende Nachricht für einen Empfänger wirklich von Nutzen ist. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass alle vorgestellten Ansätze immer von einer senderzentrierten Berechnung des Nutzens ausgehen und somit immer nur auf Schätzungen eines potenziellen Nutzens für Empfänger basieren.

Neben der Nutzenorientierung ist die Gewährleistung einer hohen Übertragungswahrscheinlichkeit von Informationen ein Kernaspekt der kooperativen Sicherheitsanwendungen. Allerdings kann eine zuverlässige Übertragung von einzelnen Paketen auf den unteren OSI-Schichten in drahtlosen Netzen nur schwer umgesetzt werden. Wenn überhaupt, dann ist dies nur mit viel Kommunikationsaufwand verbunden.

Aus diesem Grund wird in der hier vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass der Kommunikationskanal als grundsätzlich unzuverlässig einzustufen ist. Im Gegenzug wird versucht, auf der Anwendungsebene ein Vorgehen zu definieren, das trotz dieser Annahme die Übertragung aller notwendigen Informationen für die kooperativen Sicherheitsanwendungen in kritischen Situationen gewährleisten kann. Der im folgenden Kapitel vorgestellte serviceorientierte Beaconing-Ansatz soll darüber hinaus dazu beitragen, die Schätzungsunsicherheit des Nutzens einer zu versendenden Nachricht zu minimieren. Dies soll anhand eines Request/Response-Verfahrens zur Steuerung der Beacon-Sendezeitpunkte von Nachbarfahrzeugen auf Anfrage von Interessenten erfolgen.

Kapitel 4

Serviceorientierter Beaconing-Ansatz

Ein Beaconing Algorithmus soll es ermöglichen, den kooperativen Anwendungen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen einen entsprechenden Informationsgehalt in sicherheitskritischen Situationen zur Verfügung zu stellen. Insbesondere ist der Aspekt der Skalierbarkeit und der Robustheit zu berücksichtigen, um zuverlässig kritische Situationen im Straßenverkehr erkennen und vermeiden bzw. vermindern zu können. Wie bereits diskutiert, existieren für unterschiedliche Anwendungen in Abhängigkeit der Situation auch unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich des benötigten Wissens über die Fahrzeuge in unmittelbarer Umgebung. Klassischerweise wird dieses Wissens über die periodisch versendeten Beacons aufgebaut. Hierbei werden im Allgemeinen Wiederholraten zwischen 2 Hz und 10 Hz angenommen, wobei für sicherheitsrelevante kooperative Anwendungen die obere Intervallgrenze von 10 Hz und mehr definiert ist [21] [24]. Die Anwendung statischer Beacon-Wiederholraten scheint allerdings mit Hinblick auf die begrenzt zur Verfügung stehende Kommunikationsbandbreite nicht sinnvoll zu sein. Dies beruht auf der Tatsache, dass einerseits durch die erhöhte Anzahl an Fahrzeugen und die damit verbundene Last auf dem Kommunikationskanal die Verluste von Nachrichten zunehmen und andererseits das statische Senden von Beacons nicht notwendigerweise einen Nutzen für die benachbarten Fahrzeuge generiert. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Beacon-Wiederholrate dynamisch zu steuern, um den Kommunikationskanal nur zu belasten, wenn es auch einen potenziellen Interessenten für die Information gibt.

Eine Kernherausforderung, die sich daraus ergibt, ist die exakte Erkennung von Informationsbedarf auf jedem einzelnen Empfängerfahrzeug. Das genaue Erkennen von Informationsbedarf ist abhängig von den folgenden zwei Aspekten:

- Situationserkennung
- Zuverlässigkeit der Übertragung

Das korrekte Erkennen einer Situation ist ausschlaggebend für die Entscheidung, ob ein Beacon gesendet werden soll oder nicht. Es sollte dabei unterschieden werden, ob ein Fahrzeug sich in einer sicherheitskritischen Situation befindet, in der das Versenden der eigenen Positions- und Zustandsinformationen für diesen einen Mehrwert bringt. Ist dies der

Fall, so sollte es dem Beaconing-Ansatz möglich sein, darauf mit einer erhöhten Beacon-Wiederholrate oder der Anpassung des Sendezeitpunkts eines Beacons zu reagieren. In Situationen, in denen es notwendig ist, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls periodisch alle versendeten Beacons zu empfangen, muss auch die Zuverlässigkeit einer Beacon-Übertragung betrachtet werden. Konnte beispielsweise ein Beacon aufgrund von Interferenzen einem Empfänger nicht zugestellt werden, müsste der Sendevorgang wiederholt werden. Die Übertragungswahrscheinlichkeit eines Beacons soll in jedem beliebigen Netzwerkzustand berechnet bzw. eingeschätzt werden können. Aufgrund der Betrachtung von individuellen Situationen und der Wahrscheinlichkeit der Beaconübertragung könnte der Nutzen durch die verwendete Beaconing-Strategie erhöht werden.

Um diese Anforderung zu erfüllen, soll, wie zum Teil in den bislang existierenden Ansätzen vorgestellt, ein kontextadaptives Beaconing verwendet werden. Somit können Berechnungen über den Nutzen einer zu versendenden Nachricht vorgenommen und die Beacon-Wiederholrate gesteuert werden. Da allerdings diese Berechnungen immer nur auf Annahmen eines Senders basieren, scheint dieser Ansatz komplex und unzuverlässig, da von jedem Fahrzeug zum einen die aktuelle Situation seiner Nachbarn und zum andern die Wahrscheinlichkeit der Nachrichtenübertragung berechnet werden muss.

Um einen möglichst hohen Nutzen eines zu versendenden Beacons zu erzielen, wird in dem folgenden Kapitel ein Paradigmenwechsel auf dem Gebiet des Beaconings in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen eingeführt. Dieser besteht darin, dass im Gegensatz zu der senderbasierten Steuerung des Beacon-Versands ein empfängerbasierter Ansatz zugrunde gelegt wird. Dieser beruht auf einem Request/Response-Protokoll und bildet ein serviceorientiertes Verhalten ab. Der Ansatz erlaubt es, die Beacon-Wiederholrate bzw. -Weiterleitung situationsadaptiv auf Anfrage von Nachbarfahrzeugen anzupassen. Hierbei wird eine Anfrage immer dann gestellt, wenn bei einem Fahrzeug ein entsprechender Informationsbedarf besteht.

Der serviceorientierte Beaconing-Ansatz wird im Folgenden im Detail vorgestellt und in zwei grundsätzliche Ausprägungen unterteilt. Diese sollen die Anforderungen eines Fahrzeugs in zwei repräsentativen Situationen zur Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung erfüllen. Die Situationen werden im Vorfeld klassifiziert. Die Güte der Ansätze in den jeweiligen Situationen wird anhand von zwei aufgestellten Metriken betrachtet. Nach einer ausgiebigen Evaluierung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes, werden im Anschluss der Mehrwert anhand der in Kapitel 2 definierten Kriterien bewertet und das Verbesserungspotenzial aufgezeigt.

4.1 Situationsdefinition

Der Informationsbedarf eines Fahrzeugs ist abhängig von seiner jeweiligen Situation. Zur Bestimmung des jeweils benötigten Informationsbedarfs werden zunächst zwei Hauptkriterien betrachtet. Zum einen betrifft dies die Distanz zweier Fahrzeuge zueinander, zum anderen die potenzielle Kollisionswahrscheinlichkeit. Aus diesen Kriterien können dann repräsentative Situationen definiert werden, die spezielle Anforderungen an die Beaconing-Strategie stellen.

	Distanz > 100m	**Distanz ≤ 100m**
Kollisionswahrscheinlichkeit (niedrig)	Kollisionserkennung	Kollisionserkennung
Kollisionswahrscheinlichkeit (hoch)	Kollisionserkennung	Kollisionsvermeidung

Tabelle 4.1: Anforderung an Beacon-Senderate in Abhängigkeit der jeweiligen Situation

Relevanter Betrachtungsradius

Der relevante Betrachtungsradius resultiert aus der Relativgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge und der pro Sekunde zurückzulegenden Strecke. Bei einer Relativgeschwindigkeit von 100 $\frac{km}{h}$ wird eine Distanz von ca. 28m in der Sekunde zurückgelegt, wenn zwei Fahrzeuge auf gerade Strecke direkt aufeinander zufahren. Diese Geschwindigkeit entspricht z.B. einem Stadt-Szenario, wo eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 $\frac{km}{h}$ angenommen werden kann. Geht man von einem solchen Szenario aus, so würde man bei der Betrachtung einer Distanz von 100 m eine Zeitspanne zur potenziellen Kollision von 3,6 Sekunden erhalten. Vergrößert man die betrachtete Distanz auf 300 m, so ergibt dies eine Kollisionszeit von ca. 11 Sekunden. Je größer also die Distanz zwischen Fahrzeugen, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass die Kollisionspartner über die Zeit ihre Route ändern und somit keine sicherheitskritische Situation gegeben ist. Nach der in Kapitel 2 vorgenommenen Betrachtung, ist für kooperative Sicherheitsanwendungen ein relevanter Betrachtungsradius zwischen 50 m und 300 m anzunehmen.

Kollisionswahrscheinlichkeit

Um die Anforderungen an den Informationsbedarf zu optimieren, ist im Weiteren die Betrachtung der potenziellen Kollisionspartner notwendig. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht nur Fahrzeuge betrachtet werden, die eine entsprechende Entfernung untereinander aufweisen, sondern auch eine prognostizierte Fahrstrecke berücksichtigt wird. Hierbei können z.B. Fahrzeuge, die sich voneinander wegbewegen, grundsätzlich aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.

Klassifizierung der Situationen

Aufgrund der Kriterien der Distanz und der Kollisionswahrscheinlichkeit wird eine Klassifizierung der sicherheitskritischen Situationen in die Kollisionserkennung und die Kollisionsvermeidung vorgenommen. Tabelle 4.1 zeigt, dass in Situationen, in denen eine Distanz > 100 m zwischen zwei Fahrzeugen besteht, grundsätzlich von der Kollisionserkennung ausgegangen werden kann. Weiterhin wird dieser Phase auch eine Distanz von ≤ 100 m zugeordnet, wenn keine kritische Kollisionswahrscheinlichkeit besteht. Überschreitet diese jedoch einen kritischen Wert innerhalb eines Radius ≤ 100 m, so ist diese Situation der Kollisionsvermeidung zuzuordnen. Aufgrund dieser Klassifizierung wird im Folgenden ein zweistufiges Beaconing-Verfahren vorgeschlagen, welches den Informationsbedarf einer Anwendung entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Situation berücksichtigt.

4.1.1 Kollisionserkennung

In der Phase der Kollisionserkennung wird davon ausgegangen, dass es für einen Knoten von Interesse ist, die Fahrzeuge in seiner Umgebung zu beobachten. Auf dieser Basis kann wegen des durchgängigen Beobachtungszeitraums festgestellt werden, ob ein Nachbarfahrzeug eine potenzielle Kollisionsgefahr darstellt. In dieser Phase ist es relevant, die regulär ausgesendeten Beacons der Nachbarfahrzeuge zu empfangen, um die Beobachtung nahtlos durchführen zu können. Hierbei ist der Empfang der ausgesendeten Standard-Beacons ausreichend.

Metrik zur Kollisionserkennung

Um die Güte eines Algorithmus in der Kollisioinserkennungsphase zu messen, wird für die vorliegende Arbeit die Metrik der Awareness-Qualität eingeführt [112]. Diese soll es ermöglichen, eine Aussage darüber treffen zu können, ob ein Beaconing-Ansatz die Anforderung erfüllt, dass alle relevanten Nachbarn in einem definierten Radius einem Fahrzeug bekannt sind. Die Kenntnis eines Nachbarn wird definiert über die Gültigkeit eines von ihm empfangenen Beacons. Diese Gültigkeitsdauer (Validity-Time) ist Bestandteil eines jeden Beacons und gibt den Zeitraum ab der Generierung des Beacons an, indem z.B: die Positions- und Zustandsinformationen für weitere Berechnungen genutzt werden können. Die Awareness-Qualität definiert zu jedem Zeitpunkt t für jedes Fahrzeug i das Verhältnis zwischen seinen real existierenden Nachbarn V und den ihm tatsächlich bekannten Nachbarn N. Hierbei beschreibt i ein Fahrzeug aus der Menge aller Fahrzeug V_{sim}, die in einer Simulation existieren. Zusätzlich wird ein Betrachtungsradius d definiert, der ein bestimmtes Gebiet um i beschreibt, in dem es von Interesse ist, seine Nachbarn zu kennen. Bildet man diesen Quotienten so ergibt sich pro Fahrzeug das prozentuale Wissen ($Awareness$) über die ihn umgebenden Nachbarn als:

$$Awareness_{d,t}(i) = \frac{|\mathcal{N}_i^d(t)|}{|\mathcal{V}_i^d(t)|}$$

Wie bereits erwähnt, kann es sein, dass es nicht immer notwendig ist, alle Fahrzeuge innerhalb seines Betrachtungsradius zu kennen. Dies kann z.B. dadurch bedingt sein, dass zwei Knoten sich in entgegengesetzter Richtung voneinander wegbewegen oder auf unterschiedlichen Straßen fahren, die sich laut Straßentopologie nicht miteinander kreuzen. Ist dies der Fall, so besteht für die Fahrzeuge auch keine Kollisionsgefahr. Um dieses Szenario abzubilden, wird durch den Parameter α ein Prozentsatz an Fahrzeugen spezifiziert, die tatsächlich im Schnitt für eine Anwendung relevant sind. Beispielsweise bedeutet $\alpha = 100\%$, dass von einem Beaconing-Algorithmus gefordert wird, jedes Nachbarfahrzeug innerhalb eines Betrachtungsradius zu kennen. Demnach bedeute $\alpha = 50\%$, dass im Schnitt nur jeder zweite Nachbar bekannt sein muss. Wird der jeweilige Prozentsatz der zu kennenden Nachbarfahrzeuge pro Messschritt von einem Algorithmus erreicht, so gilt dieser als erfolgreich und die Gleichung resultiert in dem Wert 1. Ist dies nicht der Fall, nimmt die Gleichung den

Wert 0 ein. Somit ist eine schärfere Aussage über einen Beaconing-Ansatz möglich.

$$AwarenessQuality_{\alpha,d,t}(i) = \begin{cases} 1 & Awareness_{d,t}(i) \geq \alpha \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Im letzten Schritt wird ein Durchschnitt über alle einzelnen Werte der Awareness-Qualität jeweiliger Fahrzeuge gebildet, der die Güte eines Algorithmus darstellt.

$$AwarenessQuality = \frac{\sum_{i \in V_{sim}} AwarenessQuality(i)}{|V_{sim}|}$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die Einführung des Schwellenwertes α mit dem Gedanken der Selektivität verbunden ist, welcher in Kapitel 7 im Detail diskutiert wird.

4.1.2 Kollisionsvermeidung

In der Phase der Kollisionsvermeidung wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug sich in einer bereits kritischen Distanz befindet und eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit besteht. An dieser Stelle ist es von Interesse, die Bewegung der einzelnen Fahrzeuge mit einer höheren Aktualität zu beobachten um im kritischen Fall schnellstmöglich reagieren zu können. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zur Beobachtung der Positionsänderungen eine erhöhte Beacon-Senderate der einzelnen Kollisionspartner notwendig ist.

Metrik zur Kollisionsvermeidung

Zur Bestimmung der Güte eines Beaconing-Algorithmus in der Kollisionsvermeidungsphase wird in der vorliegenden Arbeit das Sicherheitsrisiko ($SafetyRisk$) gemessen [107], welches aufgrund der Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Nachbarfahrzeug berechnet wird. Wird ein entsprechender Schwellenwert für die Kollisionswahrscheinlichkeit T_{coll} mit mindestens einem Nachbarn $n \in N$ überschritten, so werden diese Nachbarn als Kollisionspartner $c \in C$ bezeichnet. Ein wichtiges Kriterium hierbei ist die Aktualität des Wissens $InfoAge$ über die Bewegung der jeweiligen Kollisionspartner c. Die $InfoAge$ wird als Alter einer Nachricht definiert, welche sich aus dem Versendezeitpunkt t_{trans} eines Beacons und dem Messzeitpunkt t_{mess} auf dem Empfängerfahrzeug berechnet. Diese Messung wird für jedes einzelne Fahrzeug i aus der Menge aller Fahrzeuge der Simulation V_{sim} vorgenommen, für die mindestens ein Kollisionspartner zum Messzeitpunkt existiert. Es ergibt sich die folgende Gleichung:

$$InfoAge_{t_{mess},c}(i) = t_{mess}(i) - t_{trans}(c)$$

Existieren zu einem Messzeitpunkt mehrere Kollisionspartner für ein bestimmtes Fahrzeug, so wird die durchschnittliche Aktualität des Wissens $InfoAge$ über alle $c \in C$ gebildet und als SafetyRisk für i zum Zeitpunkt t_{mess} definiert:

$$SafetyRisk_{t_{mess}}(i) = \frac{\sum_{c \in \mathcal{C}} InfoAge_{t_{mess},c}(i)}{|\mathcal{C}|}$$

Die Güte des Beaconing-Algorithmus erhält man, indem man das durchschnittliche Informationsalter aller Kollisionspartner für alle Fahrzeuge in der Simulation $i \in V_{sim}$ bildet.

$$SafetyRisk = \frac{\sum_{i \in V_{sim}} SafetyRisk(i)}{|V_{sim}|}$$

4.2 Statische Wiederholraten

Zur Beurteilung der einzelnen Beaconing-Strategien wird im Folgenden zunächst die Güte unterschiedlicher statischer Senderatenkonfigurationen betrachtet. Hierbei werden die statischen Wiederholraten von 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz betrachtet. Dabei ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Signalausbreitung zu erwarten, dass die Ergebnisse sich abhängig vom Betrachtungsradius unterscheiden. Die unterschiedlichen Wiederholraten werden unter Berücksichtigung der Distanzen von 100 m, 200 m und 300 m evaluiert. Ebenfalls wird die Skalierung der Ansätze betrachtet, die sich in erster Linie auf die steigende Fahrzeugdichte bezieht. Hierbei wird auf einer Fläche von 2 km auf 2 km die Fahrzeuganzahl in 50er Schritten von 100 bis 300 Fahrzeugen variiert. Im Folgenden wird die Fahrzeuganzahl auf der genannten Fläche als Fahrzeugdichte bezeichnet. Für jedes Beacon wird eine Gültigkeitsdauer von 500 ms angenommen. Die zugrunde liegende Simulationsumgebung wird im Detail in Kapitel 8 beschrieben. Die Ergebnisse sollen als Richtwert zur Evaluierung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes dienen.

Awareness-Qualität

Abbildungen 4.1 bis 4.3 stellen die Awareness-Qualität dar, die durch die unterschiedlichen Beacon-Wiederholraten für die jeweiligen Betrachtungsradien erzielt werden kann. Zum besseren Verständnis werden die Ergebnisse aus Sicht der Beacon-Wiederholrate und des Betrachtungsradius gesondert analysiert:

- Die Messungen ergeben, dass die Awareness-Qualität beispielsweise bei der Betrachtung der 2Hz-Wiederholfrequenz mit dem Anstieg der Fahrzeugdichte abnimmt. Dies war grundsätzlich zu erwarten und kann auf die steigende Signalüberlagerung und die dadurch entstehenden Interferenzen zurückgeführt werden. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, kann dies sowohl am gleichzeitigen Kanalzugriff als auch an den entstehenden Hidden-Node-Situationen liegen. Da sich die Betrachtung der Awareness-Qualität in erster Linie auf die Übertragung einer Information bezieht und somit nicht die einzelnen verlorenen Pakete analysiert werden, könnte ein redundantes Senden von Inhalten den Verlust einzelner Pakete kompensieren. In diesem Zusammenhang sollten die Ergebnisse für höhere Beacon-Wiederholraten eine Verbesserung der Awareness-Qualität bringen. Vergleicht man die Resultate für den statischen Beaconing-Ansatz mit der Wiederholrate von 3 Hz und 5 Hz, so sieht man eine geringfügige Verbesserung im Vergleich zu einer 2Hz-Frequenz. Allerdings steigt die Verbesserung nicht linear mit der Beacon-Wiederholrate an. Es ist eine Erhöhung

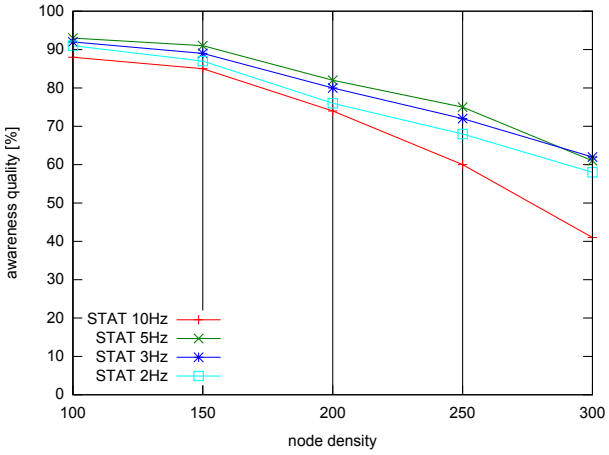


Abbildung 4.1: Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=100m)

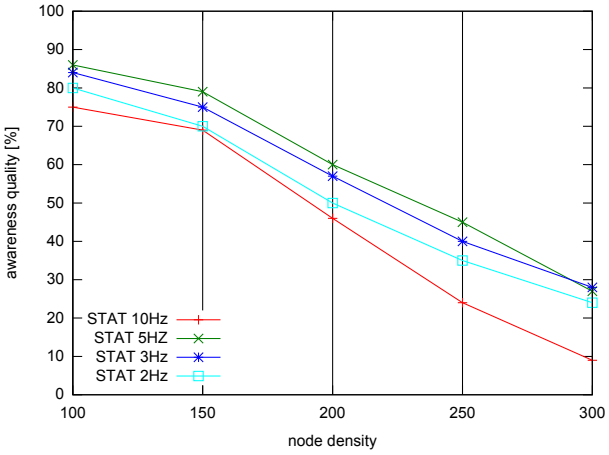


Abbildung 4.2: Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=200m)

der Awareness-Qualität im Bereich von ca. 5% bis 10% zu beobachten. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Last auf dem Kommunikationskanal durch die erhöhte Anzahl der versendeten Nachrichten zu einer erhöhten Kollisionswahrscheinlichkeit der Pakete führt. Abbildung 4.5 stellt die Anzahl der für die jeweilige Wiederholrate versendeten Nachrichten dar. Es wird die durchschnittliche Anzahl an Nachrichten pro Minute betrachtet, die von den Applikationen zum Senden an die Netzwerkschicht übergeben wurde. Der geschilderte Effekt der erhöhten Netzwerklast und dem überproportionale Nachrichtenverlust lässt sich insbesondere für die Wiederholrate von 10 Hz beobachten. In diesem Szenario kann sogar trotz erhöhter Redundanz keine Verbesserung der Awareness-Qualität beobachtet werden. Im Gegenteil, es lässt sich sogar eine Verschlechterung um $> 15\%$ feststellen. Diesen Effekt kann man den Abbildungen 4.1 und 4.2 vor allem in Bezug auf die Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen entnehmen.

- Im Hinblick auf die unterschiedlichen Betrachtungsradien ist das Verhältnis zwischen den einzelnen Wiederholraten gleich. Die absoluten Werte der Messungen sinken mit der Erhöhung der Entfernung zwischen den Knoten. Hierbei werden im Vergleich zum Radius von 100 m bei einem Radius von 300 m deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt. Im Betrachtungsradius von 100 m kann für die Wiederholraten von 2 Hz, 3 Hz und 5 Hz noch eine Awareness-Qualität von ca. 90% bei den Fahrzeugdichten bis zu 150 Knoten erreicht werden. Ähnliche Werte ergeben sich auch für die 5Hz-Wiederholrate und den Radius von 200 m für eine Fahrzeugdichte von 100 Knoten. In allen anderen Szenarien ist allerdings eine deutliche Verschlechterung der Awareness-Qualität erkennbar, die bis zu einem Wert von 2% sinkt. Dieser wird bei der Wiederholrate von 10 Hz, einem Radius von 300 m und einer Fahrzeugdichte von 300 Knoten gemessen. Lediglich bei dem Betrachtungsradius von 100 m kann es bei einer Wiederholrate von 2 Hz, 3 Hz und 5 Hz durchgängig über alle Fahrzeugdichten

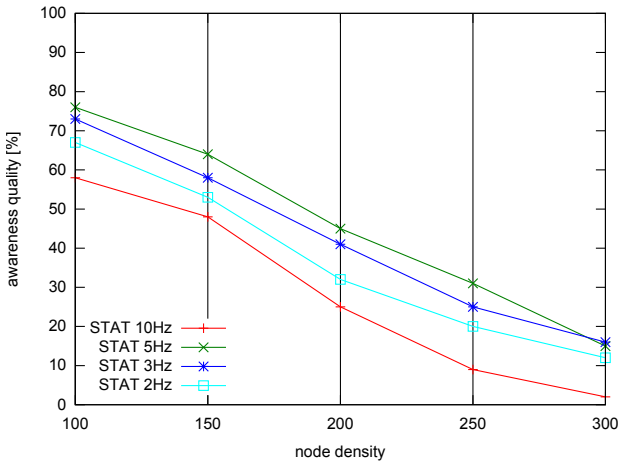


Abbildung 4.3: Awareness Qualität: Statisches Beaconing (Radius=300m)

zu einer Awareness-Qualität von $\geq 50\%$ kommen.

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln diskutiert, sind die hier erreichten Ergebnisse aus Anwendungssicht nicht akzeptabel. Vor allem ist hier der Aspekt der Skalierbarkeit nicht hinreichend erfüllt.

SafetyRisk

Zusätzlich zur Betrachtung der Awareness-Qualität wird jetzt die Güte der einzelnen statischen Beacon-Wiederholraten im Hinblick auf die SafetyRisk analysiert. Der vorherigen Betrachtung entsprechend werden auch in diesem Fall die Beacon-Wiederholraten von 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz herangezogen. Da die SafetyRisk auf Situationen bezogen wird, in denen sich Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe zueinander befinden und eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit besteht, wird die Analyse ausschließlich auf dem Betrachtungsradius von 100 m angewendet. Um weiterhin nur Fahrzeuge mit erhöhter Kollisionswahrscheinlichkeit in Betracht zu ziehen, wird ein zusätzliches Filterkriterium definiert. Dieses besagt, dass nur die Fahrzeuge als potenzielle Kollisionspartner gewertet werden, die sich in einem Betrachtungswinkel von $\pm 45°$ in Fahrtrichtung des detektierenden Fahrzeugs befinden. Weiterhin werden aus dieser Untermenge nur die Fahrzeuge betrachtet, welche sich nicht von dem detektierenden Fahrzeug wegbewegen. Diese Einschränkung soll eine erste Annäherung an ein realistisches potenzielles Kollisionsszenario darstellen. Es bietet eine beispielhafte Betrachtung, welche durch die Modellierung von realen Situationen weiter präzisiert werden kann, sodass durch die Erhöhung der Selektivität die betrachtete Untermenge weiter reduziert werden kann. Eine solche präzise Modellierung dieser Szenarien steht allerdings nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis der Simulationen im Hinblick auf die erzielte SafetyRisk. Wie bereits in der Betrachtung der Awareness-Qualität gesehen, verschlechtert sich der Messwert auch für die SafetyRisk mit steigender Fahrzeugdichte. Dies ist ebenfalls auf

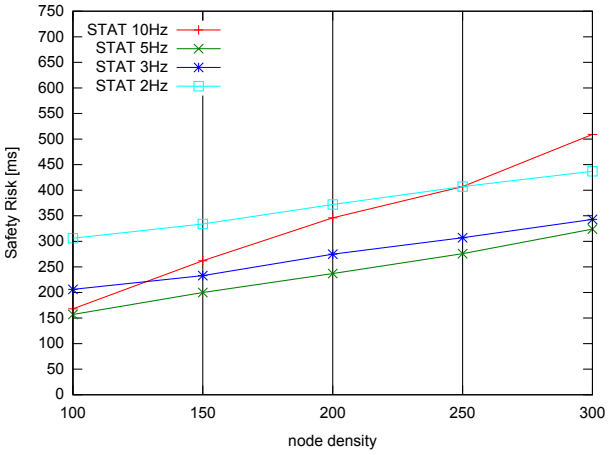


Abbildung 4.4: SafetyRisk: Statisches Beaconing (Radius=100m)

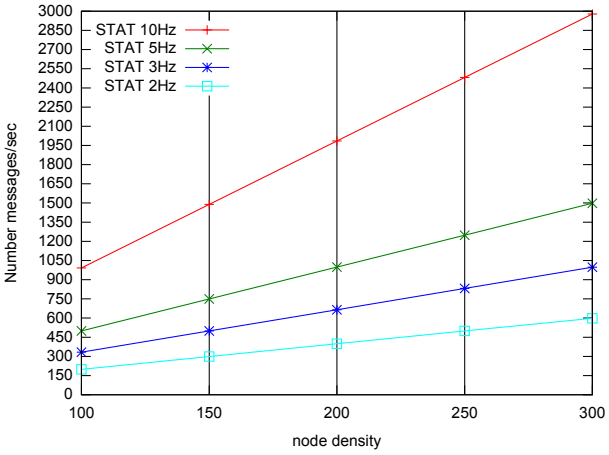


Abbildung 4.5: Nachrichtenanzahl für statische Beacon-Wiederholraten

die Last auf dem Kommunikationskanal zurückzuführen, wo die Wahrscheinlichkeit eines Paketverlustes mit der Anzahl der Nachrichten auf dem Netzwerk zunimmt. Auch hier kann gezeigt werden, dass der Einsatz von redundanten Nachrichten durch Erhöhung der Beacon Wiederholrate von 2 Hz auf 3 Hz bzw. 5 Hz ein Verbesserung der Messwerte liefert. Betrachtet man eine Wiederholrate von 2 Hz, so ergibt sich bei einer Fahrzeugdichte von 100 Fahrzeugen eine durchschnittliche SafetyRisk von 300 ms. Wächst die Fahrzeugdichte auf 300 Fahrzeuge, so erhöht sich der Wert auf 450 ms. Erhöht man die Wiederholrate um 50% auf 3 Hz, so kann eine Verbesserung um 100 ms über alle Fahrzeugdichten erreicht werden. Bei der Erhöhung um 150%, also auf 5 Hz ergibt sich allerdings nur noch maximal eine Verbesserung von 150 ms im Falle einer Fahrzeugdichte von 100 Fahrzeugen zu beobachten. Bei 300 Fahrzeugen kann kein signifikanter Unterschied zwischen 5 Hz und 3 Hz erkannt werden. Bei einer weiteren Steigerung der Beaconrate auf 10 Hz ergibt sich entsprechend den Ergebnissen für die Awareness-Qualität wieder eine Verschlechterung der SafetyRisk. Gerade bei größeren Fahrzeugdichten von 250 und 300 Fahrzeugen werden sogar Werte erreicht, die den Ergebnissen der 2Hz-Wiederholrate gleichen oder sogar noch schlechter sind. Vergleicht man die Anzahl gesendeter Beacons pro Sekunde (siehe Abbildung 4.5), so kann in diesem speziellen Fall, trotz fünffacher Anzahl an Nachrichten, kein Mehrwert geschaffen werden. Im Gegenteil, der Kanal wird sogar für andere sicherheitsrelevante Nachrichten versperrt und stört den Empfang der Nachbarfahrzeuge. Somit sind auch im Hinblick auf die SafetyRisk bei der Anwendung einer statischen Beacon-Wiederholrate die Kriterien für die Skalierbarkeit und die Kompatibiliät nicht hinreichend erfüllt.

4.3 Serviceorientiertes Beaconing

Betrachtet man die Ergebnisse der evaluierten statischen Beaconing-Ansätze so ist erkennbar, dass die Erhöhung des individuell benötigten Informationsbedarfs nicht durch die reine

Erhöhung der Nachrichtenmenge zu erzielen ist. Denn hierbei wird durch redundante Nachrichten zusätzliche Last auf dem Kommunikationskanal generiert, die nicht zwangsläufig von Nutzen für jedes Fahrzeug ist.

In den folgenden Absätzen soll das serviceorientierte Beaconing-Prinzip im Detail erläutert und gezeigt werden, dass auf dieser Basis ein nutzenorientierter Beaconing-Ansatz umgesetzt werden kann.

4.3.1 Servicedefinition

Der serviceorientierte Ansatz beruht auf der Annahme, dass jeder Knoten selbst am besten weiß, welche Informationen er benötigt bzw. welche von den benötigten und erwarteten Informationen er nicht empfangen konnte. Somit können z.B. durch Interferenzen auf dem Kommunikationskanal verlorene Nachrichten leicht identifiziertt werden. Gleiches gilt auch für Nachrichtenverluste, die durch Abschattungsaspekte z.B. Gebäude oder andere Fahrzeuge verursacht werden. Um dieses Prinzip in Form von Beaconing abzubilden, wird ein Request/Response-Protokoll definiert, welches einem jeden Knoten erlaubt, bei seinen Nachbarn um Informationen nachzufragen. Dieses Prinzip stellt den Paradigmenwechsel zwischen den bisherigen existierenden ***push***- und dem hier vorgestellten ergänzenden ***pull***-Ansatz dar. In diesem Zusammenhang werden die beiden Rollen eines Service Users und eines Service Providers definiert. Ergänzend wird die Service-Request-Nachricht spezifiziert, welche anhand der belegten Attribute die Art der Serviceerbringung steuert. Bezogen auf die oben vorgenommene Klassifizierung der Situationen (Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung) werden entsprechend zwei Service-Ausprägungen vorgeschlagen.

Service Provider

Es wird definiert, dass jeder aktive Knoten innerhalb des Ad-hoc-Netzwerks die Rolle eines Service Providers einnimmt. Die Aufgabe des Service Providers ist es in erster Linie die Anfragen von Service Usern zu beantworten. Dafür ist die folgende Funktionalität notwendig:

- Horchen auf versendete Service-Request-Nachrichten.
- Auswerten der Attribute aus der empfangenen Service-Request-Nachricht.
- Überprüfen, ob die angefragten Beacon-Informationen in ausreichender Aktualität verfügbar sind.
- Erbringung des Services anhand der definierten Parameter einer Service-Request-Nachricht.

Besitzt ein Service Provider die angefragte Information, so kann er diese dem Service User zur Verfügung stellen. Ist die Information allerdings nicht vorhanden oder deren Gültigkeitsdauer bereits abgelaufen, wird der Service nicht erbracht. Im Fall der Nichterbringung

eines Services findet keine weitere Kommunikation zwischen Service User und Service Provider statt. Trotz des serviceorientierten pull-Prinzips ist es jedoch nicht möglich, auf eine statische Basis-Beacon-Wiederholrate zu verzichten. Diese ergibt sich daraus, dass eine bestimmte Beacon-Information bei einem Service Provider nur angefragt werden kann, wenn der Service User den Provider bereits kennt. Aus diesem Grund soll jeder Knoten eine Basis-Beacon-Wiederholrate von 2 Hz zur Verfügung stellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Basis-Beacon-Wiederholrate ist die Tatsache, dass Knoten, die neu in die Kommunikationsreichweite eines Fahrzeugs eintreten, möglichst zeitnah über deren Existenz informiert werden müssen. Wäre dies nicht gegeben, so würden neue Knoten u.U. die existierenden Fahrzeuge auf unbestimmte Zeit nicht erkennen und somit auch nicht auf potenzielle Kollisionen reagieren können.

Service User

Jeder aktive Knoten im Ad-hoc-Netzwerk kann die Rolle eines Service Users einnehmen. Ein Service User sendet Service-Request-Nachrichten an die entsprechenden Nachbarknoten und wartet anschließend auf die Serviceerbringung. Dafür sind die folgenden Funktionalitäten zu erbringen:

- Überwachung des individuell bestehenden Informationsbedarfs.
- Unterscheidung zwischen relevanten Knoten und potenziellen Kollisionspartnern.
- Überwachung der von den relevanten Knoten zu empfangenden Beacons.
- Generierung und Senden von Service-Request-Nachrichten.
- Empfangen der angefragten Informationen.

Durch diesen Ansatz kann jedes Fahrzeug seine individuelle Situation selber beobachten und einschätzen. Kommt es hier zu Nachrichtenverlusten von erwarteten Informationen, so wird dieses sofort erkannt und durch einen Service Request korrigiert. Im Falle, dass genauere Informationen benötigt werden, kann auch dies über einen Service Request abgebildet werden. Aus diesem Grund kann der Service User zwischen zwei Arten von Services unterscheiden, dem Beacon Forwarding Service (BFS) und dem Beacon Rate Control Service (BRCS), welche in den folgenden Absätzen genauer beschrieben werden.

Service-Request-Nachrichtenformat

Das Paketformat der Service-Request-Nachricht ist in gleicher Form für beide definierten Service-Ausprägungen spezifiziert. Wie bereits erwähnt, könnte die Service-Request-Nachricht auch als Erweiterung der bereits in IEEE 1609.4 definierten Service-Announcement-Nachricht verstanden werden. Diese wird zur Publikation der auf den unterschiedlichen Kommunikationskanälen existierenden Informationen in einem Mehrkanalszenario verwendet. Abbildung 4.6 veranschaulicht das Format der hier vorgeschlagenen Service-Request-Nachricht mit den dazugehörigen Attributen:

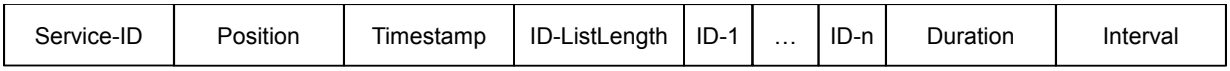


Abbildung 4.6: Format der Service-Request-Nachricht

- Service ID: Identifikationsnummer des geforderten Services [BFS;BRCS].
- Position: Aktuelle Position des Service Users. Wird zur Filterung des Betrachtungsradius genutzt. Fahrzeuge, die sich außerhalb des Radius befinden, fungieren nicht als Service Provider.
- Timestamp: Angabe über den Generierungszeitpunkt der Service-Request-Nachricht.
- ID-ListLength: Anzahl der adressierten bzw. angefragten Service Provider.
- ID: Identifikator des adressierten bzw. angefragten Service Providers.
- Duration: Dauer der Serviceerbringung in Millisekunden. Ist der Wert 0, so wird der Service durch das einmalige Senden der angefragten Nachricht erbracht.
- Interval: Zeitintervall in Millisekunden, mit der die gewünschte Information innerhalb der Service-Dauer wiederholt werden soll. Ist der Wert 0, so wird der Service durch das einmalige Senden der angefragten Nachricht erbracht.

Durch die Nutzung dieses Paktformats können die Services BFS und BRCS in gleicher Weise angestoßen werden. Abhängig von dem gewünschten Service werden die Inhalte der Attribute entsprechend interpretiert. Da der Service Provider immer seine Antwort in Form eines regulären Beacons erbringt, ist es nicht notwendig, ein gesondertes Beacon-Format zur Serviceerbringung zu spezifizieren. Im Folgenden werden allerdings zur Vereinfachung zwischen (Standard-)Beacons und Service-Beacons sprachlich unterschieden.

4.3.2 Beacon Forwarding Service

Der Beacon Forwarding Service (BFS) dient in erster Linie dazu, die entsprechende Awareness-Qualität aufzubauen. Hierbei ist das Ziel, alle von einem Fahrzeug erwarteten Beacon-Nachrichten diesem auch zuzustellen. Dieser Service wird der Kollisionserkennungsphase zugeordnet und dient der Nachverfolgung der sich im Umkreis eines Fahrzeugs befindenden Nachbarn. Die so aufgebaute Awareness-Qualität kann dann im nächsten Schritt zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit mit potenziellen Kollisionspartnern dienen. Wie bereits erwähnt, wird dieser Mechanismus in einem Betrachtungsradius zwischen 100 m und 300 m eingesetzt. Die Hauptidee des Services ist, das globale Wissen der Nachbarfahrzeuge zu nutzen um verlorene Beacon-Nachrichten durch eine Weiterleitung zu empfangen. Da Paketverluste in einem drahtlosen Netzwerk immer lokal betrachtet werden müssen, ist davon auszugehen, dass eine Nachricht, die z.B. aufgrund von Interferenzen oder Abschattung nicht zu einem bestimmten Empfänger übertragen werden konnte, trotzdem mit

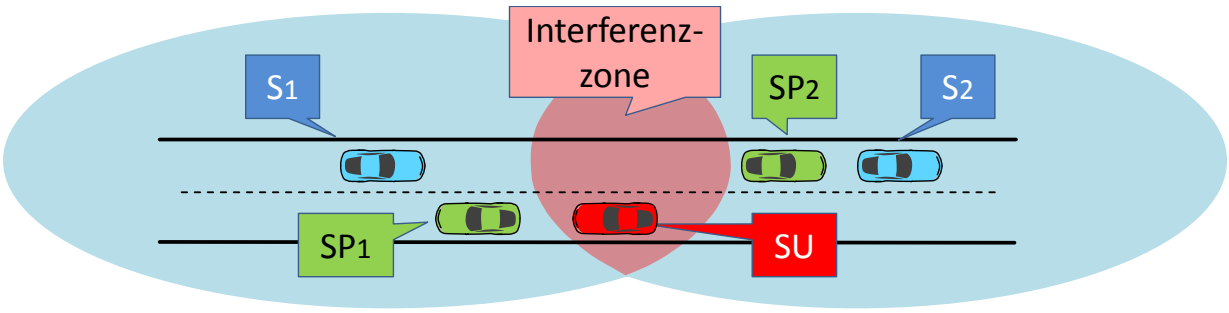


Abbildung 4.7: Szenario für den Beacon Forwarding Service

einer gewissen Wahrscheinlichkeit von seinen Nachbarn empfangen wurde. Diese Tatsache wird in dem Beacon Forwarding Service ausgenutzt. Der Ablauf des Beacon Forwarding Service soll an einem Beispielszenario in Abbildung 4.7 dargestellt werden:

- Alle Fahrzeuge senden periodische Beacon-Broadcasts mit einer Wiederholrate von 2 Hz aus.
- Jeder Empfänger (hier SU) speichert die empfangenen Beacons inklusive der Sender-IDs und der Gültigkeitsdauer (ValidityTime) in einer sog. Nachbarschaftstabelle ab. Unter Nutzung einer Beacon-Wiederholrate von 2 Hz wird eine ValidityTime von 500 ms angenommen.
- Läuft die ValidityTime eines Beacons ab, so erwartet SU ein weiteres Beacon des entsprechenden Senders. Wird dieses Update z.B. aufgrund von Hidden-Node-Situationen nicht empfangen, so wird dies als Paketverlust gewertet. In Abbildung 4.7 wäre dies der Fall, wenn S_1 und S_2 gleichzeitig auf den Kanal zugreifen, da sie sich gegenseitig nicht sehen können.
- SU sendet eine Service-Request-Nachricht mit den IDs S_1 und S_2 an alle seine Nachbarn (hier an die Service Provider mit der ID SP_1 und SP_2).
- Da die Nachbarn SP_1 und SP_2 nicht von der Hidden Node Situation betroffen sind, haben sie die Beacons von S_1 und S_2 empfangen und in der Nachbarschaftstabelle ablegen können. SP_1 und SP_2 leiten im nächsten Schritt die angefragten Beacons an SU weiter.

Der Beacon Forwarding Service stellt einen Broadcast Service dar, bei dem keine Notwendigkeit besteht, einen bestimmten Service Provider zu adressieren. Durch das Aussenden der Service-Request-Nachricht kann jeder Service Provider, der die spezifizierte Nachricht vorhält, diese weiterleiten. Der Service User muss hierfür in der ID-Liste der Service-Request-Nachrichten die relevanten IDs dieser Fahrzeuge aufführen, die er aktuell benötigt. Es ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass in diesem Fall der Service Provider einen Request empfängt, wo dieser selber in der Liste der IDs vorkommt. In diesem Fall

kann er ebenfalls sein bereits versendetes Beacon wiederholen. Um das Netzwerk nicht zu strapazieren, werden standardmässig die Felder Duration und Interval der Service-Request-Nachricht beim Beacon Forwarding Service mit dem Wert 0 belegt. Dies schont die Netzwerkressourcen besonders bei hohen Fahrzeugdichten, in denen viele potenzielle Service Provider existieren.

Evaluierung

Zur Beurteilung der Beacon-Forwarding-Strategie wird im Folgenden die Güte wieder unter Berücksichtigung der Radien von 100 m, 200 m und 300 m betrachtet. Es wird die gleiche Simulationsumgebung verwendet, die bereits zur Evaluierung der unterschiedlichen statischen Beaconing-Strategien genutzt wurde. Als Referenzwert dient jeweils die Performance des statischen Beaconings mit einer Wiederholfrequenz von 2 Hz. Als Metrik wird die Awareness-Qualität und die verursachte Last auf dem Kommunikationskanal aufgrund der versendeten Nachrichten aller Fahrzeuge pro Sekunde angewendet. Es sei angemerkt, dass eine statische Wiederholrate von 5 Hz etwas bessere Ergebnisse liefert. Diese Konfiguration wird allerdings wegen der generierten Kanallast in der Gesamtbetrachtung als nicht geeignet angesehen. Nichtsdestotrotz können die erzielten Ergebnisse der statischen Wiederholraten von 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz bei Bedarf jederzeit in den Abbildungen 4.1 - 4.3 nachgesehen werden.

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 100 m

Abbildung 4.8 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Forwarding Service mit einem angenommenen Betrachtungsradius von 100 m. Wie bereits erwähnt, nimmt die erzielte Awareness-Qualität für den statischen Beaconing-Ansatz mit der Erhöhung der Fahrzeugdichte um ca. 30% ab. Im Detail ergibt dies eine Awareness-Qualität von 90% für 100 Fahrzeuge und 60% für 300 Fahrzeuge. Betrachtet man die Ergebnisse für den Beacon Frorwarding Service, so kann eine deutliche Verbesserung um bis zu 20% erreicht werden. Für eine Fahrzeugdichte von 100 Fahrzeugen wird eine Awareness-Qualität von $> 95\%$ erreicht. Dieser Wert konnte bisher mit keinem der im Vorfeld betrachteten statischen Beacon-Wiederholraten erzielt werden. Des Weiteren kann der Graphik entnommen werden, dass auch bei Fahrzeugdichten von bis zu 200 Fahrzeugen eine Awareness-Qualität von $\geq 90\%$ aufgebaut werden kann. Gerade bei höheren Fahrzeugdichten zwischen 200 und 300 Fahrzeugen kann eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Bei 300 Fahrzeugen wird hierbei immer noch eine Awareness Qualität von $\approx 80\%$ erzielt. Betrachtet man die in Abbildung 4.9 dargestellte Kanallast, so ist wie erwartet zu erkennen, dass die Nachrichtenanzahl, die von dem Beacon Forwarding Service generiert wird, immer über dem statischen 2Hz-Beaconing-Ansatz liegt. Die Gesamtkanallast für den Beacon Forwarding Service bildet sich hierbei aus der Summe der 2Hz-Basiswiederholrate, den Service-Requests und den Service-Beacons. Diese ist allerdings immer noch unter der verursachten Kanallast der 5Hz-Beaconing-Variante (siehe Abbildung 4.5). Insbesondere ist zu erkennen, dass die Service-Request-Nachrichten und Service-Beacons nicht linear von der Anzahl der Fahrzeu-

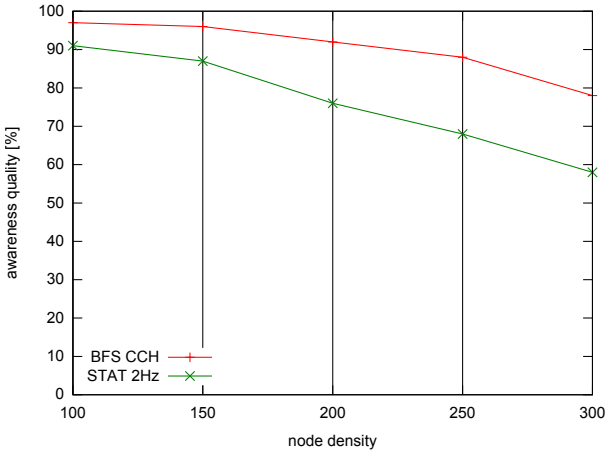


Abbildung 4.8: Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=100m)

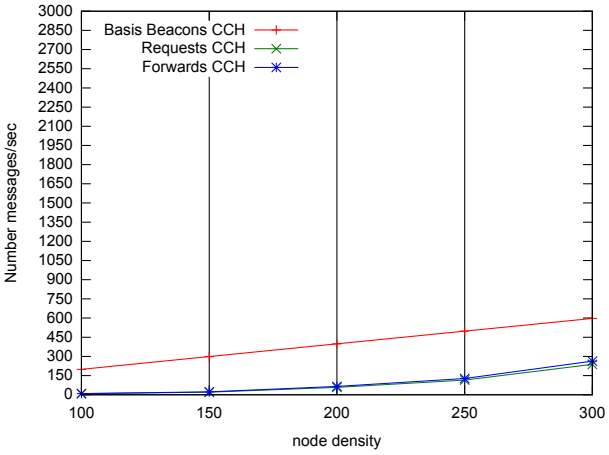


Abbildung 4.9: Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=100m)

ge abhängen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass mit zunehmender Fahrzeuganzahl auch die Paketverluste auf dem Kommunikationskanal ansteigen. In diesem Fall werden diese durch eine erhöhte Anzahl von Service-Request-Nachrichten und die daraus resultierenden Beacon-Weiterleitungen ausgeglichen. Die Gesamtzahl der vom Beacon Forwarding Service generierten Nachrichten liegt somit $\approx 60\%$ über der Nachrichtenanzahl des statischen 2Hz-Beaconing-Ansatzes. Dies entspricht ungefähr der Anzahl an Nachrichten, die von dem 3Hz-Beaconing-Ansatz verursacht werden, wobei dieser gerade bei einer Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen ca. 15% schlechter ist als der serviceorientierte Ansatz. Durch den Abfall der Awareness-Qualität in Abhängigkeit von der Fahrzeugdichte beim Beacon Forwarding Service ist davon auszugehen, dass die hier generierte Last durch die Service-Request-Nachrichten und die Service-Beacons zusätzliche Paketverluste verusacht. Somit kann nicht jeder Request und jede Weiterleitung dem Empfänger zugestellt werden. Ist dies nicht der Fall, würde das Ergebnis der Awareness-Qualität gleich hoch über alle Farzeugdichten liegen.

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 200 m

Abbildung 4.10 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Forwarding Service mit einem angenommenen Betrachtungsradius von 200 m. Es ist zu erkennen, dass bei geringen bis mittleren Fahrzeugdichten zwischen 100 und 250 Fahrzeugen der serviceorientierte Ansatz deutlich bessere Ergebnisse liefert als der statische 2Hz-Beaconing-Ansatz. Gerade bei 200 Fahrzeugen ist eine Verbesserung von $> 30\%$ zu sehen. In dem Bereich zwischen 100 und 200 Fahrzeugen kann sogar eine Awareness-Qualität zwischen 85% und 95% erzielt werden. Dies bedeutet somit lediglich eine Verschlechterung um $< 10\%$ im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Betrachtungsradius von 100 m (siehe Abbildung 4.8). Im Vergleich ist bei dem statischen 2Hz-Beaconing-Ansatz eine Verschlechterung um bis zu 25% bei einem Betrachtungsradius von 100 m zu 200 m festzustellen. Betrachtet man allerdings

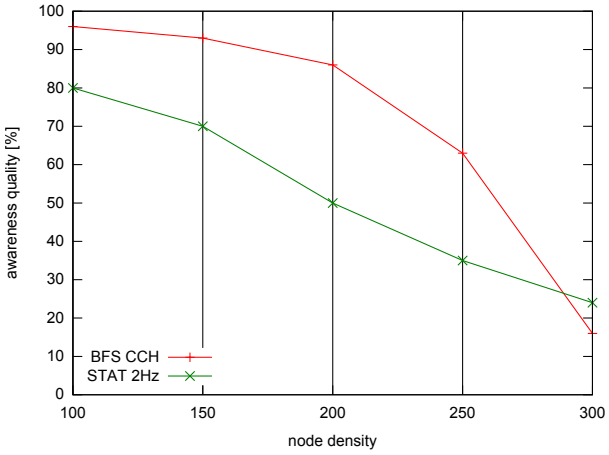


Abbildung 4.10: Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=200m)

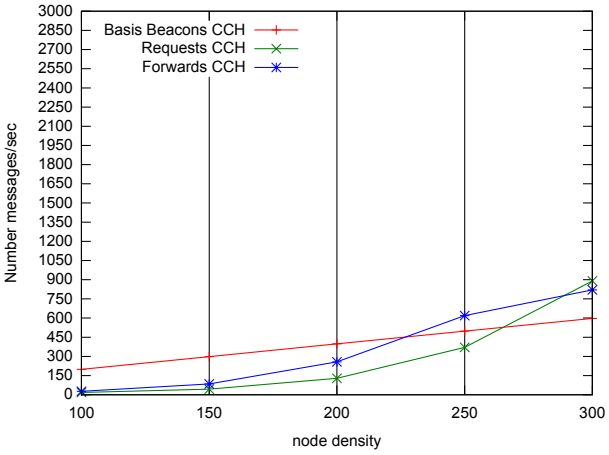


Abbildung 4.11: Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=200m)

die Ergebnisse für die Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen, so wird ersichtlich, dass die Awareness-Qualität des Beacon Forwarding Ansatzes sogar unter die des statischen 2Hz-Beaconing-Ansatzes fällt. Die Erklärung dafür liegt in der verursachten Kanallast (siehe Abbildung 4.11). Hier steigt die Gesamtnachrichtenanzahl auf dem Kommunikationskanal für 300 Fahrzeuge auf ca. das Dreifache der Last an, die von dem 2Hz-Beaconing-Ansatz verursacht wird. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass im Gegensatz zu dem Betrachtungsradius von 100 m (siehe Abbildung 4.9) die Anzahl der Service-Request-Nachrichten und der Service-Beacons ab einer Fahrzeugdichte von 150 Fahrzeugen nicht mehr gleich ist. Die Anzahl der Service-Beacons steigt stärker an als die Anzahl der Requests. Dies ist damit zu erklären, dass bei einem größeren Betrachtungsradius auch die Anzahl an potenziellen Service Providern steigt. Empfangen diese einen Service-Request so leitet jeder einzelne Service Provider, der die angefragten Beacons besitzt, diese Informationen weiter. Wie zu erkennen ist, funktioniert dieser Ansatz noch bis zu einer Anzahl von 200 Fahrzeugen, bei der die Gesamtnachrichtenanzahl noch niedrig genug ist und die Paketverluste auf dem Kanal nicht so signifikant sind. Steigt die Kanallast wie im Beispiel mit 250 Fahrzeugen, kann trotz höherer Anzahl an Service-Requests und den damit verbundenen Beacon-Weiterleitungen die Awareness-Qualität nicht beibehalten werden. Hier ist davon auszugehen, dass sowohl die Service-Requests als auch die Beacon-Weiterleitung aufgrund von Paketinterferenzen nicht mehr gesamthaft empfangen werden können. Dieser Effekt kommt besonders bei der Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen zur Geltung. Hier ist die Anzahl der Service-Requests und der Beacon-Weiterleitungen nahezu gleich. Die Anzahl der Weiterleitungen sollte allerdings die der Service-Requests deutlich übersteigen, da bei einer höheren Fahrzeugdichte mehr potenzielle Service Provider existieren. Man kann daraus ersehen, dass in dieser Situation die Kanallast so hoch ist, dass speziell die Service-Request-Nachrichten so häufig verloren gehen, dass sie bei dem Service Provider nicht mehr ankommen und somit keine Weiterleitung von Beacons vorgenommen werden kann.

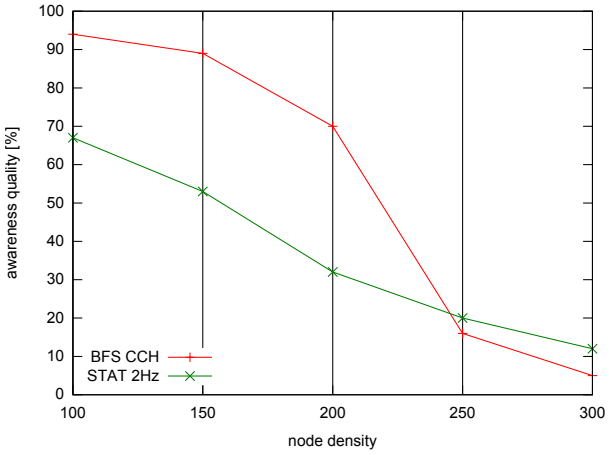


Abbildung 4.12: Awareness-Qualität: CCH-BFS (Radius=300m)

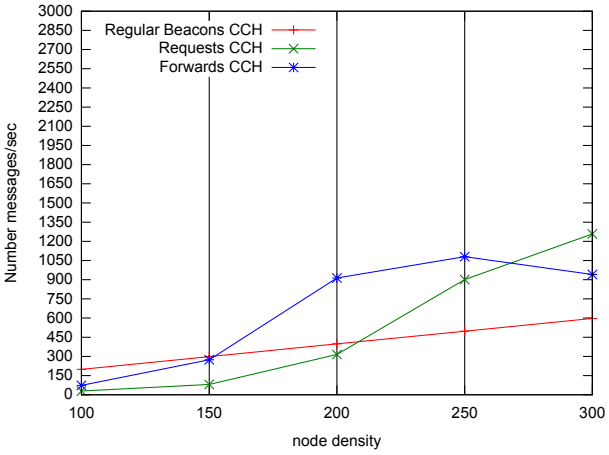


Abbildung 4.13: Nachrichtenanzahl: CCH-BFS (Radius=300m)

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 300 m

Abbildung 4.12 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Forwarding Service mit einem angenommenen Betrachtungsradius von 300 m. Es wird gezeigt, dass bei einer Fahrzeugdichte zwischen 100 und 200 Fahrzeugen der Beacon Forwarding Service bis zu 35% bessere Ergebnisse liefert als der statische Beaconing-Ansatz. Hier ist besonders auffällig, dass man mit dem statischen Ansatz bei 100 Fahrzeugen eine Awareness-Qualität von lediglich 70% erhält. Im Gegensatz dazu wird durch den serviceorientierten Ansatz bei der Fahrzeugdichte von 100 und 150 Fahrzeugen eine Awareness-Qualität von $\geq 90\%$ gewährleistet. Allerdings ist wieder zu erkennen, dass bei 250 und 300 Fahrzeugen der serviceorientierte Ansatz sogar unter die Ergebnisse des 2Hz-Beaconing-Ansatzes fällt. Bei der Betrachtung von Abbildung 4.13 werden die im vorigen Absatz erkannten zusammenhänge zwischen Kannallast und Awareness-Qualität bestätigt. Bei einer Fahrzeugdichte von 200 Fahrzeugen sieht man, dass trotz einer hohen Anzahl an Beacon-Weiterleitungen die Awareness-Qualität nicht bei 90% aufrechterhalten werden kann, weil die Beacon-Weiterleitungen der Service Provider nicht vollständig von den Service Usern empfangen werden konnten. Im Falle einer erhöhten Fahrzeugdichte kann man erkennen, dass die Anzahl der Beacon-Weiterleitungen in Relation zu der Anzahl an Service-Requests abnimmt. Bei 300 Fahrzeugen fällt die Menge an Beacon-Forwards sogar unter die der Service-Requests. Es ist zu vermuten, dass wegen der erhöhten Last auf dem Kommunikationskanal die Service-Requests von den Service Providern nicht mehr empfangen werden können.

4.3.3 Beacon Rate Control Service

Der Beacon Rate Control Service (BRCS) soll dazu dienen, eine höhere Genauigkeitsinformation über die Bewegung ausgewählter Nachbarfahrzeuge zu erzielen. Eine solche Genauigkeit ist in erster Linie in Situationen von Interesse, in denen eine erhöhte Kollisionswahr-

scheinlichkeit zwischen zwei Fahrzeugen gegeben ist. Durch die genaueren Positions- und Bewegungsinformationen soll es dem Fahrzeug, welches eine potenzielle Kollision erkannt hat, ermöglicht werden, den Fahrer korrekt und frühzeitig auf die Situation aufmerksam zu machen. Aus diesem Grund wird der Beacon Rate Control Service in der Kollisionvermeidungsphase eingesetzt, die durch einen Betrachtungsradius von 100 m charakterisiert ist. Die Kernidee dieses Services ist es, die Beacon-Wiederholraten ausgewählter Fahrzeuge so zu steuern, dass eine möglichst hohe Aktualität der erwarteten Beacon-Nachrichten erzielt wird. Im Gegensatz zum Beacon Forwarding Service, wo anhand des Broadcast-Charakters jedes Fahrzeug als Service Provider dienen kann, wird hier jeder Kollisionspartner explizit adressiert, welches dem Unicast-Prinzip entspricht. Für den Beacon Rate Control Service wird der folgenden Ablauf spezifiziert:

- Alle Fahrzeuge senden periodische Beacon-Broadcasts mit einer Wiederholfrequenz von 2 Hz aus.
- Jeder Empfänger (also jeder Service User) speichert die empfangenen Beacons inklusive der Sender-IDs und der ValidityTime in einer sogenannten Nachbarschaftstabelle ab.
- *SU* berechnet zyklisch die Kollisionswahrscheinlichkeit mit seinen Nachbarfahrzeugen. Übersteigt die Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Nachbarfahrzeug einen gewissen Schwellenwert, so ist es notwendig, eine höhere Bewegungsgenauigkeit anzufragen.
- *SU* sendet dafür eine Service-Request-Nachricht an den potenziellen Kollisionspartner mit der entsprechen ID. Das adressierte Fahrzeug dient nun als Service Provider.
- *SU* kann in seiner Service-Request-Nachricht weiterhin die gewünschte Beacon-Wiederholrate und die Dauer der Serviceerbringung definieren.
- Werden mehrere Kollisionspartner identifiziert, so wird eine Service-Request-Nachricht im Sinne eines Multicasts generiert, indem eine Liste von Service-Provider-IDs übergeben wird.
- Empfängt ein Fahrzeug die Service-Request-Nachricht, so wird zunächst der Service-Typ ausgewertet (in diesem Fall entspricht dieser dem Wert BRCS). Stimmt die angefragte ID mit seiner Fahrzeug-ID überein, so erbringt *SP* den gewünschten Service. Nach Ablauf der Service-Dauer wird wieder die Standard-Beaconrate von 2 Hz eingestellt.
- Empfängt ein Fahrzeug eine Service-Request-Nachricht, die nicht an ihn adressiert ist, wird diese ignoriert.

Im Gegensatz zum Beacon Forwarding Service ist es beim Beacon Rate Control Service von Interesse, über einen bestimmten Zeitraum eine erhöhte Anzahl an Beacons von einem Service Provider zu erhalten. Aus diesem Grund werden auch die Felder Duration und

Interval der Service-Request-Nachricht nicht mit dem Wert 0 vorbelegt. Eine sinnvolle Konfiguration dieser Werte wird im folgenden Absatz evaluiert.

Evaluierung

Zur Beurteilung des Beacon Rate Control Service wird im Folgenden der Ansatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Service-Beacon-Wiederholraten von 4Hz und 10 Hz evaluiert. Weiterhin wird die Dauer der Serviceerbringung von 500 ms und 1000 ms betrachtet. In diesem Zusammenhang wird darüber hinaus analysiert, in welchen Abständen eine Service-Request-Nachricht von einem Service User ausgesendet werden sollte. Wird diese zu oft ausgesendet, besteht die Gefahr, dass der Kommunikationskanal mit unnötigen Paketen belastet wird, ohne dass ein Mehrwert für die Applikation geschaffen wird. Wird jedoch eine Service-Anfrage zu selten ausgesendet, so kann es sein, dass eine der Anfragen verloren geht und der Zeitraum bis zum nächsten Service-Request abgewartet werden muss. Aus diesem Grund werden zwei unterschiedliche Request-Intervalle von 500 ms und 1000 ms untersucht. Die Simulationsumgebung entspricht dem in Kapitel 8 beschriebenen Aufbau, der auch bereits zur Evaluierung der unterschiedlichen statischen Beacon-Strategien verwendet wurde. Als Referenzwert dienen wieder die Ergebnisse der statischen 2Hz-Beacon-Wiederholrate. Diese Wiederholrate wird als Referenz ausgewählt, da diese auch als Grundlage für den BFS dient. Würde man sie erhöhen, so hätte das wiederum negativen Einfluss auf die Awareness-Qualität. Zur Beurteilung der Ergebnisse wird entsprechend die Metrik der SafetyRisk genutzt und analog zur Evaluierung des Beacon-Forwarding-Ansatzes die verursachte Last auf dem Kommunikationskanal betrachtet.

Evaluierung des BRCS für eine Service-Beacon-Wiederholrate von 10 Hz

Zunächst erfolgt die Evaluierung des Beacon Rate Control Services unter Betrachtung eines Service-Intervalls von 10 Hz. Dies bedeutet, dass ein Service Provider nach dem Empfang einer an ihn adressierten Service-Request-Nachricht für die definierte Service-Dauer Beacons im Abstand von 100 ms aussendet. Abbildung 4.14 zeigt die Ergebnisse für diese Parametrisierung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Werte für die Service-Dauer und das Request-Intervall des Service Users. Zunächst ist zu beobachten, dass die SafetyRisk für eine statische Beacon-Wiederholrate von 2 Hz mit zunehmender Fahrzeugdichte von 300 ms auf ca. 450 ms steigt. Im Vergleich dazu bietet der Beacon Rate Control Service bei Fahrzeugdichten von 100 und 150 Fahrzeugen eine Verbesserung von bis zu 150 ms. Für die Fahrzeugdichte von 200 Fahrzeugen erzielt der serviceorientierte Ansatz einen ähnlichen Wert wie das statische Beaconing. Allerdings werden für die Anzahl von 250 und 300 Fahrzeugen mit einer SafetyRisk von bis zu 700 ms im Vergleich zum statischen Beaconing deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt. Vergleicht man die Konfiguration mit einem Service-Request-Intervall und einer Service-Dauer von jeweils 500 ms, so erzielt diese Parametrisierung ähnliche Ergebnisse wie die Konfiguration, bei der beide Werte auf 1000 ms gesetzt sind. Die im Schnitt schlechtesten Ergebnisse liefert allerdings die Konfiguration mit einem Service-Request-Intervall von 500 ms und einer Service-Dauer von 1000 ms.

Abbildung 4.14: SafetyRisk: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=10Hz)

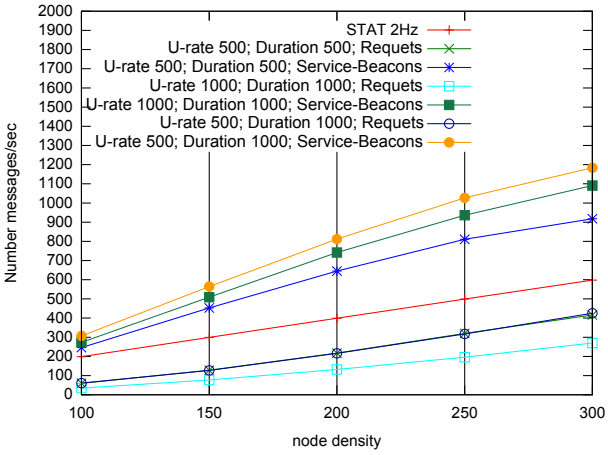


Abbildung 4.15: Nachrichtenanzahl: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=10Hz)

Betrachtet man die jeweils mit den genannten Ansätzen verursachte Nachrichtenmenge aus Abbildung 4.15, so wird deutlich, dass die zuletzt beschriebene Konfiguration auch die höchste Last auf dem Kommunikationskanal generiert. Obwohl hier die größte Anzahl an Service-Beacons ausgesendet wird, scheinen diese nicht bei den Service Usern anzukommen. Grundsätzlich kann folglich davon ausgegangen werden, dass eine Service-Beacon-Wiederholrate von 10 Hz vor allem bei hohen Fahrzeugdichten nicht geeignet ist.

Evaluierung des BRCS für eine Service-Beacon-Wiederholrate von 4Hz

Abbildung 4.16 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Rate Control Service mit der Service-Beacon-Wiederholrate von 4Hz. Hierbei sendet der adressierte Service Provider für die definierte Service-Dauer alle 250 ms ein Beacon Update. Betrachtet man eine Fahrzeugdichte von 100 Fahrzeugen, so ist kein nennenswerter Unterschied zu der Service-Beacon-Wiederholrate von 10 Hz festzustellen. Bei einer Fahrzeugdichte ab 150 Fahrzeugen ist allerdings eine deutliche Verbesserung zu erkennen. Dies wird vor allem deutlich bei einer Fahrzeuganzahl von 250 und 300 Fahrzeugen. Vergleicht man die in Abbildung 4.17 generierte Last auf dem Kommunikationskanal, so kann man feststellen, dass diese einen signifikanten Unterschied zu der generierten Last der 10Hz-Service-Beacon-Wiederholrate aufweist. Hierbei liegen sowohl die Anzahl der Service-Request-Nachrichten als auch der Service-Beacons für alle Konfigurationen der Service-Dauer und des Request-Intervalls unterhalb der Nachrichtenanzahl des statischen Beaconing-Ansatzes. Im Vergleich erzielt wieder die Konfiguration mit dem Service-Request-Intervall und der Service-Dauer von 1000 ms ab einer Fahrzeugdichte von 200 Fahrzeugen die besten Ergebnisse. Diese Konfiguration erzielt über alle Fahrzeugdichten bessere Ergebnisse als der statische 2Hz-Beaconing-Ansatz. Betrachtet man allerdings die Ergebnisse aus Abbildung 4.4 für die statische Beacon-Wiederholrate von 5 Hz, so liefert diese gerade für höhere Fahrzeugdichten etwas bessere Ergebnisse. Ziel sollte somit sein, diese Ergebnisse trotz einer Basis-Beacon-

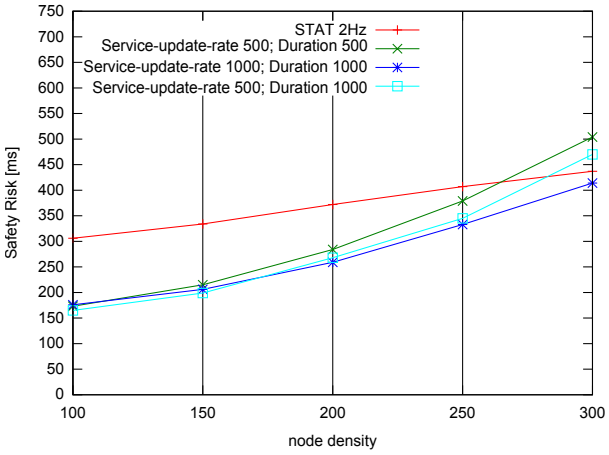


Abbildung 4.16: SafetyRisk: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=4Hz)

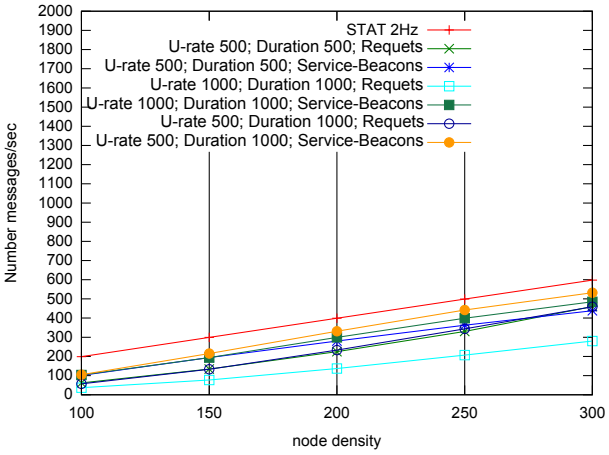


Abbildung 4.17: Nachrichtenanzahl: CCH-BRCS (Service-Beacon-Rate=4Hz)

Wiederholrate von 2 Hz zu erreichen.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Varianten des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes vorgestellt, die in unterschiedlichen Situationen (der Kollisionserkennung und der Kollisionsvermeidung) entsprechend den Anforderungen sicherheitsrelevanter Anwendungen zugeordnet werden können. Beide Ansätze basieren neben dem bisher angewendeten push-Prinzip, auf einem Request/Response-Protokoll, welches das pull-Prinzip beim Beacon-Versand ermöglicht. Der Beacon Forwarding Service (BFS) dient dazu, in der Kollisionserkennungsphase einen durchgängigen Empfang von regulär ausgesendeten Beacons pro Fahrzeug in einer definierten Umgebung zu gewährleisten. Der Beacon Rate Control Service (BRCS) soll darüber hinaus eine möglichst hohe Aktualität der Beacon-Informationen für speziell identifizierte Fahrzeuge erzielen. BFS stellt einen Broadcast Service dar, welcher die Weiterleitung von benötigten aber nicht erhaltenen Beacons auf allen sich innerhalb einer definierten Distanz befindenden Nachbarfahrzeugen anstoßen kann. Somit wird das global vorhandene Wissen innerhalb einer Zelle genutzt. Der Vorteil dabei ist, dass keine direkte Kommunikatiosnverbindung notwendig ist, obwohl ein Beacon eines bestimmten Fahrzeugs angefragt wird. Somit können beispielsweise über einen längeren Zeitraum bestehende Interferenzsituationen zwischen zwei Fahrzeugen umgangen werden. Der BRCS hingegen stellt einen Unicast/Multicast-Service dar, welcher es ermöglicht, eine bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeugen aufzubauen. Ein Empfänger kann gezielt und abhängig von seiner Situation die Beacon-Wiederholrate seiner potenziellen Kollisionspartner steuern, um so optimal auf diese reagieren zu können.

Die Ergebnisse der Evaluierung der unterschiedlichen serviceorientierten Beaconing-Varianten zeigen, dass wegen des Charakters der empfängerseitigen Situationserkennung

	Nutzen (lokal)	Nutzen (global)	Informations-durchsatz	Skalierbar-keit	Kompatibi -lität
BFS-100	+	-	+	+	o
BFS-200	+	-	+	o	-
BFS-300	+	-	-	-	-
BRCS-4Hz	+	-	o	o	o
BRCS-10Hz	+	-	-	-	-

Tabelle 4.2: Beurteilung der Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen

grundsätzlich der lokale Nutzen des Sendens eines Beacons gegeben ist. In Bezug auf den Beacon Forwarding Service wurden die Kommunikaionsradien von 100 m, 200 m und 300 m betrachtet. Es zeigt sich, dass bei der geringeren Distanz von 100 m eine entsprechend hohe Awareness-Qualität (Informationsdurchsatz) erreicht wird, die auch in Bezug auf die steigende Fahrzeugdichte (Skalierbarkeit) aufrecht erhalten wird. Aus Sicht der generierten Kanallast (Kompatibilität) erzielt der Service in dieser Variante zufriedenstellende Ergebnisse. Es ist allerdings zu erkennen, dass mit steigendem Kommunikationsradius von 200 m und 300 m die Ergebnisse in Hinblick auf alle Kriterien schlechter ausfallen.

Der Beacon Rate Control Service wurde in Bezug auf zwei unterschiedliche Service-Beacon-Wiederholraten von 4Hz und 10 Hz betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass die BRCS-10Hz-Variante zu viel Last auf dem Kommunikationskanal generiert und somit nur bei niedrigen Fahrzeugdichten zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Die BRCS-4Hz-Variante kann bei mittleren Fahrzeugdichten zu Verbesserungen führen, ist allerdings ab einer Anzahl von 250 Fahrzeugen als nicht mehr zufriedenstellend einzustufen. Grund dafür ist die damit verbundene hohe Last auf dem Kommunikationskanal, die zu entsprechenden Verlusten bei den versendeten Service-Request-Nachrichten und den Service-Beacons führt.

Ziel der weiteren Forschung dieser Arbeit ist es, die Kanallast besser zu verteilen um eine höhere Empfangswahrscheinlichkeit für alle Nachrichtentypen zu erhalten. Dazu wird im Folgenden die Nutzung von mehreren parallelen Kommunikationskanälen untersucht und die Umsetzung des serviceorientieren Mehrkanal-Beaconings evaluiert. Neben der besseren Lastverteilung soll die Mehrkanal-Variante auch dazu beitragen, den globalen Nutzen im Netzwerk zu optimieren. Hier sollen zum Austausch angeforderte Informationen auf dedizierten Kanälen verbreitet werden, welche in erster Linie von Fahrzeugen genutzt werden, die am Inhalt der Nachrichten interessiert sind. Ein wichtiger Aspekt bei der Umsetzung des Mehrkanal-Beaconings ist die Berücksichtigung der gegenseitigen Störeinflüsse bei der parallelen Nutzung von benachbarten Kanälen und die daraus resultierenden Einschränkungen im Hinblick auf die Empfangswahrscheinlichkeit von Nachrichten. Letzteres soll im folgenden Kapitel im Detail betrachtet werden und als Grundlage für den serviceorientierten Mehrkanal-Beaconing-Ansatz dienen.

Kapitel 5

Evaluierung der gleichzeitigen Nutzung benachbarter Kanäle

Der IEEE 802.11p Standard spezifiziert mehrere Kommunikationskanäle, die zum Nachrichtenaustausch in einem Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerk genutzt werden können. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, handelt es sich in der Praxis um sieben 10 MHz breite Kanäle, die in 10 MHz Abständen aneinander gereiht sind. Im Gegensatz zu z.B. IEEE 802.11b handelt es sich nicht um virtuelle Kanäle, die per Spezifikation teilweise überlappen können, sondern um eigenständige Frequenzbereiche. Demnach könnte man annehmen, dass die spezifizierten Kanäle - wie in drahtgebundenen Netzen - als von einander isoliert betrachtet werden können. Somit könnte über alle Leitungen gleichzeitig kommuniziert werden, ohne dass ein Signal auf einer Leitung die Kommunikation auf einer anderen Leitung beeinflusst. Dieses Verhalten gilt allerdings nicht für drahtlose Netze, wo jeder Sendevorgang in einem speziellen Kanal ein Rauschen bzw. Störsignal in den Nachbarkanälen generiert. Dieser Effekt wird aufgrund von Nebensprechen bzw. Adjacent Channel Interference (ACI) verursacht. ACI ist in erster Linie durch die Tatsache bedingt, dass Signale auf der Luftschnittstelle nicht rechteckig sind, sondern einer bestimmten Spektralmaske entsprechen. Diese wird nach unten hin breiter als die 10 MHz Kanalbreite und tritt somit in die benachbarten Kanalfrequenzen ein. Dies generiert Rauschen auf dem angrenzenden Kanal und beeinflusst die Kommunikation. ACI kann als signifikantes Problem in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen eingestuft werden [98], da das generierte Rauschen ein weiterer Aspekt ist, der zu Paketverlusten führen kann. Es ist demnach von hoher Bedeutung, die Einflüsse und Einschränkungen der gleichzeitigen Nutzung von parallelen Kommunikationskanälen zu verstehen, um entsprechende Anforderungen an Algorithmen zur korrekten Funktionalität von sicherheitsrelevanten Anwendungen definieren zu können. Es sei angemerkt, dass die im Folgenden - auf Basis einer im Verlauf der Arbeit aufgebauten Simulationsumgebung - vorgestellten Evaluierungsergebnisse in keiner der bislang betrachteten Arbeiten in einer solchen Detailtiefe vorgefunden werden konnte.

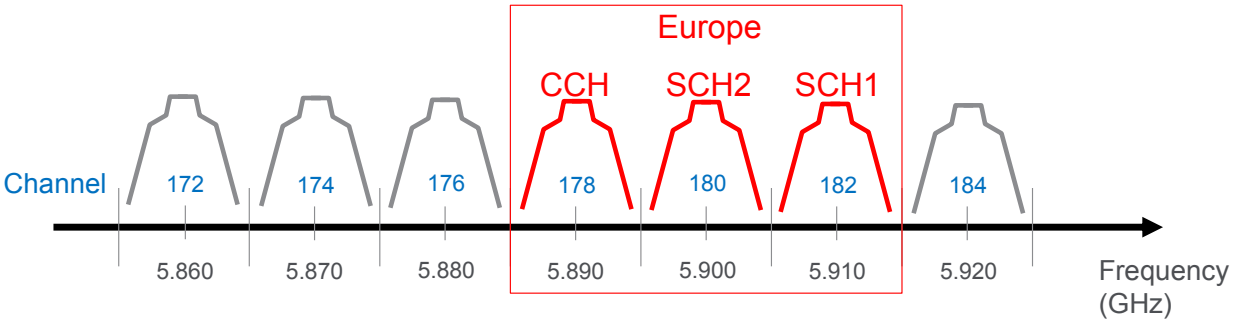


Abbildung 5.1: Veranschaulichung der IEEE 802.11p Kanäle

5.1 Interferenzen bei der Mehrkanalnutzung

Bei der Evaluierung der Auswirkung der gleichzeitigen Nutzung von mehreren benachbarten Kanälen gelten grundsätzlich die gleichen Prinzipien wie bei einzelnen Kommunikationskanälen (siehe Kapitel 2). In erster Linie wird stets die Möglichkeit betrachtet, ein versendetes Signal empfangen und dekodieren zu können. Wie bereits beschrieben, hängt dies vom Verhältnis der Empfangssignalstärke (Received Signal Strength - RSS) zu dem existierenden Rauschen (Noise) in einem Kanal ab. Dieses wird u.a. durch Störungen aus gleichzeitig durchgeführten Signalübertragungen, also durch Interferenzen, verursacht. Demzufolge wird das Verhältnis zwischen RSS und Noise auch als Signal-to-Noise-and-Interference-Ratio (SNIR) bezeichnet. Der tatsächliche Schwellenwert von SNIR ist abhängig von der zugrunde liegenden Hardware und der verwendeten Datenrate, liegt aber typischerweise bei 8dB (siehe Tabelle 2.4). In der weiteren Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass die Signalempfangsstärke in gleicher Form wie in Kapitel 2 durch die Gleichung 2.3 zu berechnen ist. Allerdings muss zusätzlich eine Berechnung des Rauschens durchgeführt werden, welches von den benachbarten Kanälen verursacht wird. Hierbei ist es notwendig, die Signal-Spektralmasken zu betrachten. Im IEEE 802.11p Standard wurden vier Spektralmasken für das 5.9 GHz-Band definiert, welche in die Klassen A bis D unterteilt wurden. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft die Spektralmaske der Klasse C des IEEE 802.11p Standards, welche für die Nutzung in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen typischerweise verwendet werden. Es ist zu erkennen, dass in einem Intervall von ±4.5MHz in Bezug auf die Mitte des Frequenzbandes die Signalstärke um 0 dB von der ursprünglichen angelegten Signalstärke abweicht. Für ein Offset von ±5MHz wird das Signal um 26 dB gedämpft. Weiterhin ist eine Dämpfung von 32dB für das Offset von ±5.5MHz und 40 dB für den Offset von ±10 MHz spezifiziert. Im Weiteren wird die Spektralmasken-Dämpfung in Bezug auf ein bestimmtes Offset als SMD_{Offset} bezeichnet. Abbildung 5.3 veranschaulicht die Überlappung von Spektralmasken benachbarter Kanäle, die mit unterschiedlicher Sendeleistung (20 dBm und 5 dBm) betrieben werden. In dieser Darstellung wird allerdings davon ausgegangen, dass beide Sender auf exakt der gleichen Position stehen. Unter dieser Annahme kann das durch ACI verursachte Rauschen anhand der folgenden Gleichung

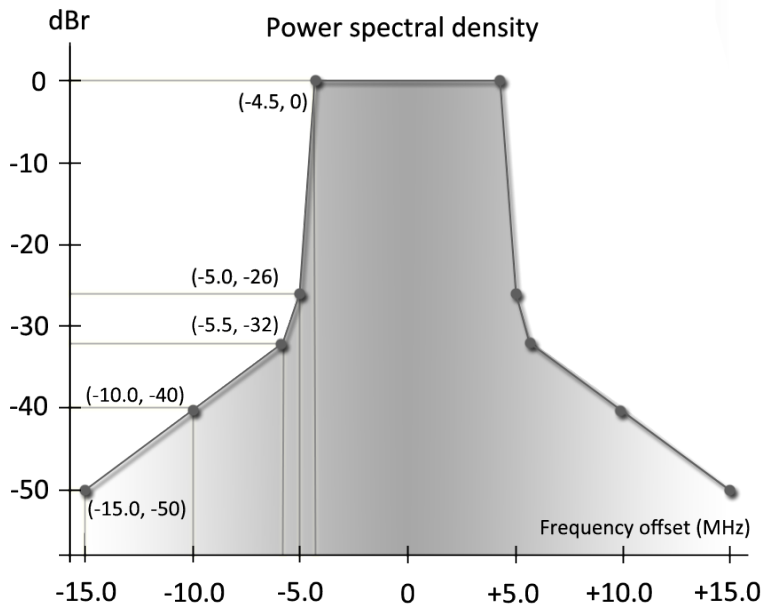


Abbildung 5.2: IEEE 802.11p Spektrum Maske der Klasse C

MHz	**4.5**	**5.0**	**5.5**	**10**	**15**
Class A	0	-10	-20	-28	-40
Class B	0	-16	-20	-28	-40
Class C	0	-26	-32	-40	-50

Tabelle 5.1: IEEE 802.11p Spektrum Maske der Klasse C

bestimmt werden:

$$ACI = TX_{power} - SMD_{Offset} \tag{5.1}$$

Hierbei beschreibt TX_{power} die angelegte Sendeleistung in einem benachbarten Kanal.

In der Praxis kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Sender und Empfänger immer räumlich voneinander getrennt sind. Unter dieser Voraussetzung muss, wie in Kapitel 2 durch Formel 2.3 beschrieben, die Signaldämpfung für die Übertragung eines Signals in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger (RSS) betrachtet werden. Demzufolge kann die verursachte ACI in einem Kanal nach der Gleichung (5.2) berechnet werden.

$$ACI = RSS - SMD_{Offset} \tag{5.2}$$

Für die Betrachtung der parallelen Nutzung von Kommunikationskanälen bedeutet dies, dass das Empfangssignal innerhalb eines bestimmten Kanals, z.B. dem Control-Kanal RSS_{CCH}, an der Position des Empfängerknotens mindestens um den Wert SNIR höher sein muss als das vom benachbarten Kanal generierte Rauschen z.B. ACI_{SCH2}. Demnach hängt das erfolgreiche Dekodieren einer Nachricht innerhalb eines Kanals von den folgenden drei Aspekten ab:

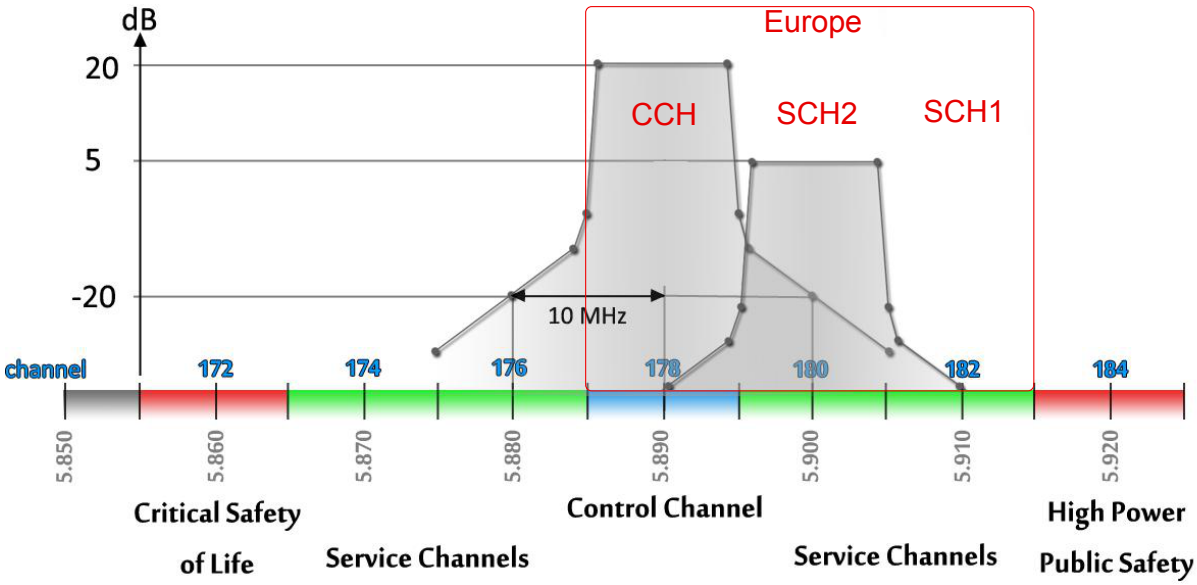


Abbildung 5.3: Adjacent Channel Interference für benachbarte Kanäle. Quelle [109]

1. Entfernung zwischen Sender (z.B. TX_{CCH}) und Empfänger (z.B. RX_{CCH}) innerhalb eines Kanals.

2. Entfernung vom Empfänger (z.B. RX_{CCH}) zum Störknoten auf einem benachbarten Kanal (z.B. INT_{SCH2}).

3. Angelegte Sendeleistung auf den Kanälen (z.B. $TX_{powerCCH}$ und $TX_{powerSCH2}$).

Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft den Einfluss von ACI bei unterschiedlich konfigurierter Sendeleistung der Kanäle CCH und SCH2. Hierbei hat der Sender (TX) eine Sendeleistung von 5 dBm auf dem SCH2 und der Störknoten (INT) 20 dBm auf dem CCH. Beide Kurven stellen den jeweiligen Signalstärkeverlauf (unter Annahme des Freespace-Pathloss-Modells) auf dem SCH2 dar. Wie bereits diskutiert, muss ein gewisser SNIR-Schwellenwert zwischen dem Nutz- und dem Störsignal gegeben sein, damit das Nutzsignal von dem Empfänger (RX) dekodiert werden kann. SNIR ist dabei sowohl von dem RX-INT- als auch von dem TX-RX-Abstand abhängig. Beträgt der RX-INT-Abstand z.B. 4 m, so kann der Abstand zwischen TX und RX $\approx$ 30 m betragen. Wird der RX-TX-Abstand allerdings überschritten, so ist das von INT generierte Rauschen so hoch, dass es nicht mehr möglich ist, das Nutzsignal zu decodieren. Verringert man auf der anderen Seite den RX-INT-Abstand, so muss gleichzeitig auch der Abstand zwischen TX-RX verkleinert werden, um den gewünschten SNIR Schwellenwert zu erreichen.

Um den gegenseitigen Einfluss der parallelen Nutzung von Kommunikationskanälen genauer zu bewerten, werden drei Szenarien in Abbildung 5.5 definiert, die unterschiedliche Rollen der benachbarten Fahrzeuge untersuchen. Alle Szenarien betrachten vier Fahrzeuge, die jeweils mit einem Kommunikationssystem ausgerüstet sind. Jeweils zwei Fahrzeuge

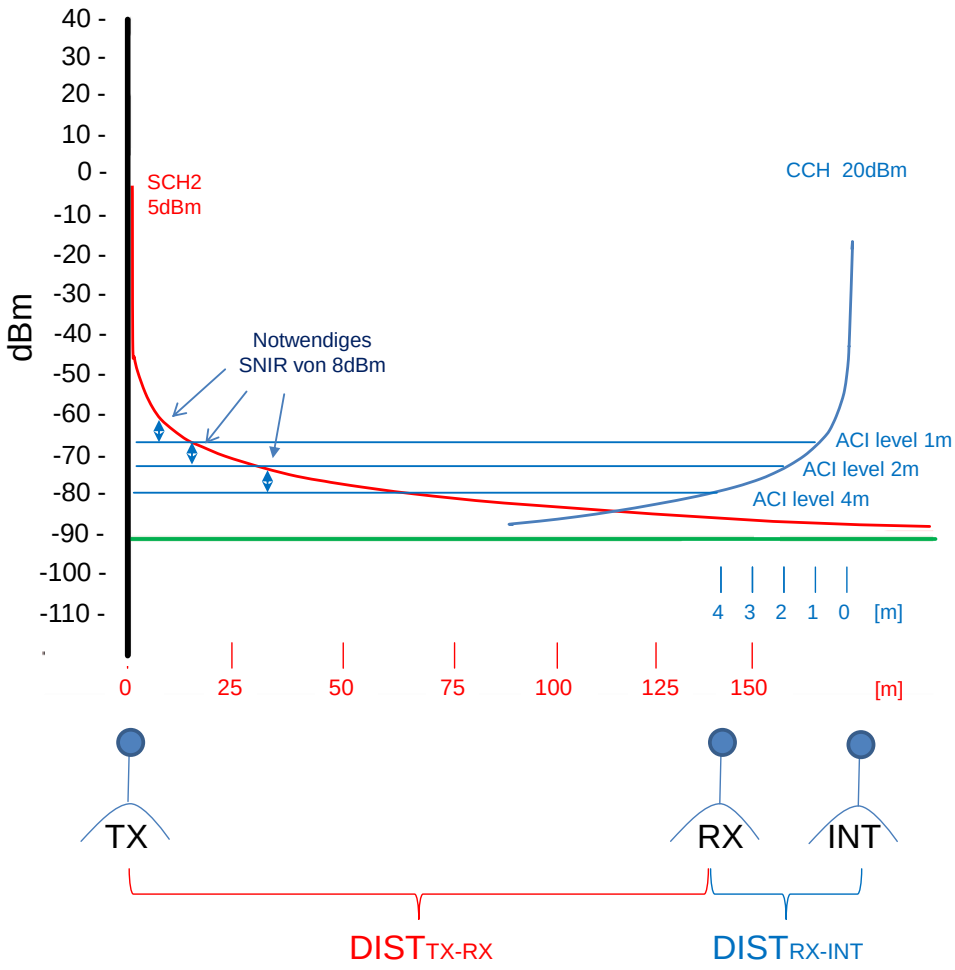


Abbildung 5.4: Interferenz-Szenario für unterschiedliche Antennenabstände

kommunizieren auf einem Kanal. Wie in Abbildung 5.5 beispielhaft dargestellt ist, kommunizieren die Knoten Nr. 1 und Nr. 2 auf dem CCH und die Knoten Nr. 3 und Nr. 4 auf dem SCH. Wie bereits beschrieben, steigt das durch ACI verursachte Rauschen in einem Nebenkanal mit der Reduzierung der Entfernung zwischen zwei Knoten. In diesem Zusammenhang betrachten wir insbesondere die Knoten Nr. 1 und Nr. 3, die unmittelbar nebeneinander platziert sind. Es gilt zu untersuchen, welche Situationen in der gleichzeitigen Nutzung von benachbarten Kanälen besonders kritisch sind. Es werden die folgende Szenarien betrachtet:

1. TX-TX: Knoten Nr. 1 und Nr. 3 versuchen gleichzeitig Nachrichten zu übertragen
2. RX-TX: Knoten Nr. 1 versucht Nachrichten zu empfangen, während Knoten Nr. 3 zeitgleich Nachrichten überträgt
3. RX-RX: Knoten Nr. 1 und Nr. 3 versuchen gleichzeitig Nachrichten zu empfangen

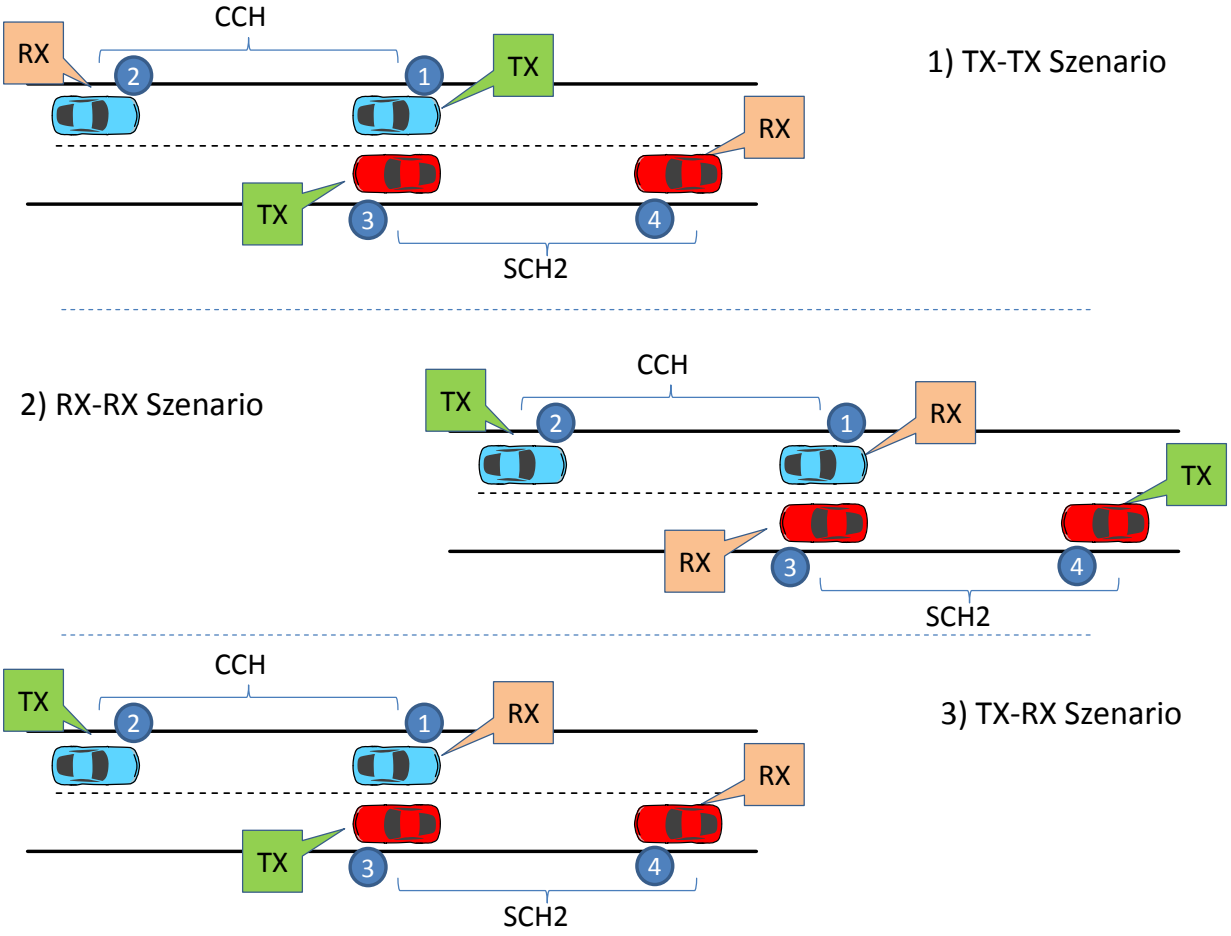


Abbildung 5.5: Repräsentative Fahrzeugkonstellationen im Hinblick auf RX-TX-Szenarien

TX-TX-Szenario

Im TX-TX-Szenario versuchen zwei nahe aneinander liegende Knoten bzw. Antennen gleichzeitig einen Sendevorgang durchzuführen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei beiden Knoten um das Senden eines Signal handelt und somit nichts empfangen werden muss, ist die Auswirkung von ACI hinsichtlich der Dekodierung einer Nachricht nicht relevant. Speziell die Betrachtung des SNIR ist an dieser Stelle nicht notwendig. Nichtsdestotrotz ist es sinnvoll, den Einfluss unter einem weiteren Aspekt zu untersuchen. Hierbei handelt es sich um den Channel-Busy-Wert, welcher der Detektion eines belegten Kanals dient. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, nutzt IEEE 802.11p das CSMA/CA-Medienzugriffsverfahren, welches dem Listen-before-Talk-Prinzip folgt. Dieses schreibt vor, dass zunächst vor jedem Sendevorgang überprüft wird, ob das Medium frei ist. Dabei wird gemessen, ob die existierende Störenergie den festgelegten Schwellenwert der sogenannten Energy Detection (ED) überschreitet. Ist dies der Fall, wird der Kanal als belegt gewertet und eine Übertragung kann nicht durchgeführt werden. In diesem Fall greift der Backoff-Prozess, wobei der Übertragungsversuch auf die nächste berechnete Zeitscheibe zurückge-

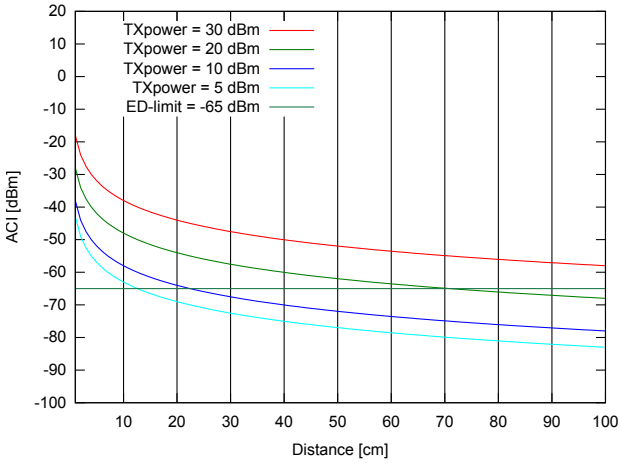


Abbildung 5.6: Interferenzlevel im Hinblick auf den ED-Schwellenwert

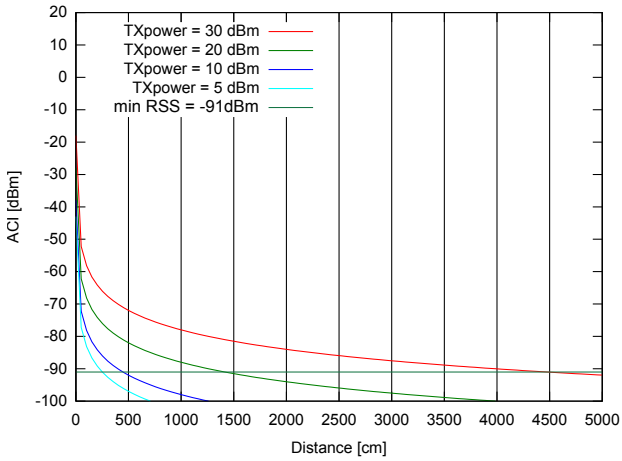


Abbildung 5.7: Interferenzlevel im Hinblick auf den RSS-Schwellenwert

stellt wird. Abbildung 5.6 zeigt das Verhältnis von Sendeleistung zu Entfernung und das dadurch generierte Rauschen von zwei unmittelbar benachbarten Kanälen. Die Berechnung basiert auf der vorgestellten Freiraumdämpfung und der Spektralmaske der Klasse C. Zur Bewertung der einzelnen Kurven wurde ein ED-Schwellenwert von -65 dBm gewählt, welcher in der Praxis einen typischen Richtwert darstellt. Die Abbildung 5.6 zeigt, dass der ED-Schwellenwert bei einer Antennenentfernung von 25 cm bei einer Sendeleistung von 10 dBm unterschritten wird. Dies bedeutet, dass die Störsignalenergie auf dem benachbarten Kanal bei einer Sendeleistung von 10 dBm nach 25 cm so abgeschwächt ist, dass der Kanal nicht als belegt gewertet wird. Verdoppelt man allerdings die Sendeleistung auf 20 dBm, so steigt die geforderte Antennenentfernung auf mindestens 70 cm. Bei einer Sendeleistung von 30 dBm ergibt sich eine Entfernung von 220 cm. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Antennenentfernung hier auch als RX-INT-Distanz verstanden werden kann. Unterschreitet man diese Antennenentfernung bei der entsprechenden Sendeleistung, kann es bei gleichzeitigem Sendewunsch auf benachbarten Kanälen dazu kommen, dass der Kanal als belegt verstanden wird. Tritt dieser Fall ein, so wird dieser Konflikt mit dem Standard Backoff-Verfahren des CSMA/CA gelöst und bedarf keiner weiteren Maßnahmen. Sobald der Kanal wieder frei ist, kann das zurückgestellte Paket versendet werden. Somit kommt es zu einer Verzögerung beim Sendevorgang. Da die Paketgröße in den Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen wenige 100 Byte groß ist, ist nur mit einer geringen Verzögerung beim Medienzugriff zu rechnen.

Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass das hier beschriebene TX-TX-Szenario keine kritische Situation für die Nutzung von benachbarten Kanälen darstellt.

RX-TX-Szenario

Das RX-TX-Szenario ist ebenfalls durch zwei nah zusammenliegende Knoten (bzw. Antennen der jeweiligen Knoten) definiert. Hierbei wird über eine Antenne auf einem Kanal

empfangen, während über die andere Antenne auf einem angrenzenden Kanal gesendet wird. Um die Auswirkungen bewerten zu können, muss im Gegensatz zu dem TX-TX-Szenario, wo der ED-Schwellenwert betrachtet worden ist, nun der RSS-Schwellenwert betrachtet werden. Dieser definiert die Signalstärke, die ein eingehendes Signal mindestens haben muss, um dekodiert werden zu können. Diese Grenze liegt in der Praxis bei ≈ -91 dBm, kann aber je nach Empfänger und Konfiguration schwanken. Abbildung 5.7 zeigt die Auswirkungen von ACI auf einen benachbarten Kanal. Es wird verdeutlicht, dass selbst bei einer Sendeleistung von 5 dBm die Antennen um ca. 2,5 m auseinander liegen müssen, damit das generierte Störsignal unter den RRS-Schwellenwert fällt. Erhöht man die Sendeleistung auf 10 dBm, 20 dBm oder 30 dBm, so steigt die geforderte Distanz zwischen den Antennen von 5m über 15m bis auf 40 m. Nimmt man einen Wert von 20 dBm als Richtwert für die Sendeleistung auf einem Kanal an, so erscheint das TX-RX-Szenario als kritisch, da direkt benachbarte Fahrzeuge eine geringe Distanz zueinander aufweisen. Gerade in einem Dual-Radio-Ansatz ist es notwendig, diesen Fall genau zu betrachten, da hier die beiden Antennen aufgrund der baulichen Aspekte höchstens so breit sein können wie das Fahrzeug selbst. Der Effekt der unterschiedlichen Antennenabstände wird nochmal in Abbildung 5.4 verdeutlicht.

RX-RX-Szenario

Das RX-RX-Szenario stellt in erster Linie keine kritische Situation dar, da beide nah beieinander liegenden Antennen keine Signale aussenden. Nichtsdestotrotz kann das RX-RX-Szenario als Sonderfall des TX-RX-Szenarios betrachtet werden, wenn die Sender jeweils zu nah an dem Empfänger im Nachbarkanal sind.

5.2 Evaluierung des RX-TX-Szenarios

Die Untersuchung von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen und den damit verbundenen Algorithmen konzentrierte sich überwiegend auf die Nutzung von einzelnen Kanälen. Hierfür gibt es eine Vielzahl an Simulations- und Testergebnissen, die ein sehr gute Informationen über die bestehenden Möglichkeiten und Einschränkungen bereitstellen. Im Gegensatz dazu ist die Evaluierung von Mehrkanalsystemen und den darauf aufsetzenden Algorithmen noch nicht im gleichen Maße vorangeschritten. Im Folgenden sollen kurz zwei relevante Analysen vorgestellt werden.

Le et al. präsentieren in [95] eine theoretische Analyse des ACI-Effekts bei der Nutzung benachbarter Kanäle in IEEE 802.11p. Die Analyse ist auf der Basis von Berechnungen der Signalausbreitung in drahtlosen Netzwerken und des theoretisch generierten Rauschens unter Beachtung der Definition der Spektralmasken durchgeführt worden. Hierbei wurden sowohl direkt benachbarte Kanäle als auch nicht direkt benachbarte Kanäle unter der Annahme einer Kanalbandbreite von 10 MHz betrachtet. Das Ergebnis der Analyse sagt aus, dass die direkt benachbarten Kanäle mit unterschiedlicher Sendeleistung betrieben werden müssen, um gegenseitige Störeffekte zu minimieren. In diesem Zusammenhang wird eine

Sendeleistungsdifferenz von 15 dB bei den direkt benachbarten Kanälen (CCH und SCH2) vorgeschlagen. Gleiche Differenz gilt entsprechend für die Kanäle SCH2 und SCH1 (z.B. CCH = 20 dBm; SCH2 = 5 dBm; SCH1 = 20 dBm). Aus den Berechnungen geht hervor, dass unter Beachtung der Sendeleistungsunterschiede die Interferenzen vernachlässigbar sind, wenn die Entfernung des Störknotens ca. 2 m von dem empfangenden Knoten auf dem benachbarten Kanal entspricht. Hierbei gilt, dass der Störknoten mit einer entsprechend reduzierten Signalstärke um 15 dB sendet. Es wird darauf hingewiesen, dass allerdings bei der umgekehrten Betrachtung der Kanal mit der höheren Sendeleistung auch ein hohes Störpotenziel auf den benachbarten schwächeren Kanal aufweist. Diesbezüglich werden allerdings keine weiteren Ergebnisse präsentiert. Eine weitere interessante Frage nach dem Verhalten bei höheren Fahrzeugdichten, wo es zu Signalüberlagerungen kommen kann, wird in dieser Arbeit nicht beantwortet.

Ausführliche Messergebnisse werden in [98] präsentiert, wo der ACI-Effekt in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen auf der Basis von prototypischen Implementierungen und realer Funkhardware gemessen werden konnte. Der Testaufbau bestand aus drei Fahrzeugen, von denen zwei Fahrzeuge (TX/RX) auf dem gleichen Kanal und ein weiteres Fahrzeug (INT) auf einem benachbarten Kanal konfiguriert waren. Das Hauptaugenmerk der Messungen lag auf der Beobachtung der Paketfehlerrate (PER), die auftritt, wenn ein Empfangsvorgang des RX-Knotens von einem gleichzeitigen Sendevorgang des INT-Knotens gestört wird. Hierzu wurden die unterschiedlichen Abstände der jeweiligen Knoten zueinander untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass die Kommunikation auf einem Kanal durch den ACI-Effekt gestört wird, wenn der Quotient aus der TX-RX-Distanz und der RX-INT-Distanz einen Wert von 10 oder höher annimmt. Würde die TX-RX-Distanz beispielhaft 100 m und die RX-INT-Distanz 20 m betragen (Quotient = 5), so soll das generierte Rauschen nicht signifikant sein. Unterschreitet die INT-RX-Distanz allerdings einen Wert von 10 m, so steigt die PER auf $\geq 10\%$ in 100% aller Messungen. Diese Ergebnisse beziehen sich auf die Konfiguration zweier direkt benachbarter Kommunikationskanäle bei jeweils gleicher Sendeleistung. Aufgrund der Tatsache, dass die Spektralmaske in der Realität - vor allem bei prototypischer Hardware - von der Spezifikation abweichen kann, ist mit leichten Unterschieden zwischen der theoretischen und praktischen Analyse zu rechnen. Der Vergleich der beiden Untersuchungen aus [98] und [95] zeigt allerdings, dass in beiden Studien die gleiche Tendenz bzgl. des ACI-Effektes zu beobachten ist.

Für die Untersuchung der in dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung nach dem ACI-Effekt bei hoher Fahrzeugdichte und deren Auswirkung auf den erarbeiteten Mehrkanal-Beaconing-Ansatz sind allerdings die existierenden Ergebnisse nicht ausreichend. Vor allem die flexible Positionierung der Funkantennen und die Auswirkung auf einen Kanal mit abgeschwächter Sendeleistung wurden bislang nicht hinreichend beantwortet. Aus diesem Grund war es notwendig, eine Simulationsumgebung zu erstellen, welche die Umsetzung jedes relevanten Szenarios ermöglicht. Die detaillierte Beschreibung der Simulationsumgebung ist in Kapitel 8 aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass es notwendig war, eine eigene Implementierung des Mehrkanalmodells vorzunehmen, da zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit keine alternativen Simulationsframeworks bekannt waren, die ein entsprechendes Modell bereits implementiert hatten. Ziel der Verwendung

einer Simulationsumgebung war es, eine detaillierte Untersuchung der Einschränkungen auf dem SCH2 im RX-TX-Szenario vorzunehmen und die Auswirkung unterschiedlich konfigurierter Sendeleistungen detailliert zu betrachten. Weiterhin soll der Unterschied zwischen Fahrzeugen mit einem Funkradio (single radios) und Fahrzeugen mit zwei Funkradios (dual radios) untersucht werden.

5.2.1 Simulationsaufbau

Der Simulationsaufbau entspricht dem RX-TX-Szenario aus Abbildung 5.5. Dieser Aufbau richtet sich nach der Konstellation von Fahrzeugen, welche in der prototypischen Betrachtung in [98] verwendet wurde. Wie bereits erwähnt, werden drei Fahrzeuge betrachtet, von denen zwei Fahrzeuge (TX und RX) auf dem CCH und eins (INT) auf dem SCH kommuniziert. Das Szenario sieht vor, dass TX kontinuierlich sendet und RX ausschließlich empfängt. Um die entsprechenden Interferenzen von einem Nachbarkanal zu generieren, sendet INT ebenfalls kontinuierlich. Dieser ist mit einem definierten Abstand von RX positioniert, welcher auf dem CCH empfängt. Ziel der Simulation soll sein, die Paketfehlerrate auf RX in Abhängigkeit der Entfernung zum TX zu messen. Anders ausgedrückt, die Messungen sollen zeigen, wie weit ein Sender von einem Empfänger (bezogen auf den gleichen Kommunikationskanal) entfernt sein kann, um Pakete mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit empfangen zu können, obwohl vom Nachbarkanal durch gleichzeitiges Senden Rauschen generiert wird. Der Versuch soll weiterhin die Performance auf dem Interferenzkanal unter Vollauslastung betrachten. Um eine Vollauslastung des Kanals zu simulieren, sendet der Interferenzknoten alle 2 ms eine Nachricht mit der Größe von 1500 Byte. Dies ergibt einen Durchsatz von 6 MBit/s, was auch der Kanalkonfiguration entspricht. Der mobile Knoten sendet parallel dazu Beacons mit einer Größe von 300 Byte. Die Performance der einzelnen Konfigurationen wurde anhand der folgenden Evaluierungskriterien beurteilt:

- Minimale Kommunikationsreichweite von 300 m auf dem CCH entsprechend [24] [64] [59].
- Maximale Paketfehlerrate von 10% pro Kanal entsprechend [98].

Zur Evaluierung der gegenseitigen Einflüsse bei gleichzeitiger Kanalnutzung wurden drei Szenarien definiert, die in Abbildung 5.8 dargestellt sind.

- Szenario 1: Betrachtung der direkt benachbarten Kanäle CCH und SCH2. Es wird auf beiden Kanälen die gleiche Sendeleistung angelegt und entsprechend variiert. Ziel ist es, zu evaluieren, ob eine Konfiguration existiert, welche die zuvor definierten Evaluierungskriterien erfüllt bzw. welche Einschränkungen daraus resultieren.
- Szenario 2: Betrachtung von direkt benachbarten Kanälen mit unterschiedlicher Sendeleistung. Es werden vor allem die daraus resultierenden Einschränkungen sowohl auf den CCH als auch auf den SCH2 separat betrachtet. Ziel ist es, eine Konfiguration zu finden, die den CCH bis zu 300 m nicht signifikant beeinträchtigt. Es soll darüber

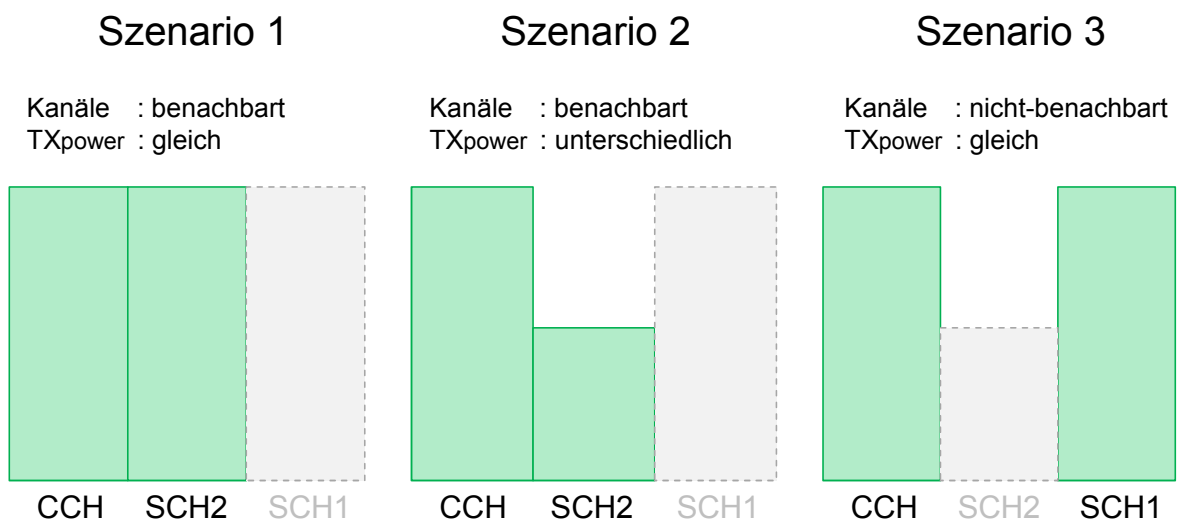


Abbildung 5.8: Relevante Szenarien zur Evaluierung der gleichzeitigen Kanalnutzung

hinaus betrachtet werden, welche Auswirkungen diese Konfiguration auf den SCH2 hat.

- Szenario 3: Betrachtung der nicht direkt benachbarten Kanäle CCH und SCH1. Hierbei soll die Betrachtung analog zu Szenario 1 durchgeführt werden. Es soll untersucht werden, ob diese Kanäle angesichts der definierten Evaluierungskriterien mit gleicher Sendeleistung betrieben werden können.

Ein wichtiger Parameter bei der Untersuchung ist die bereits diskutierte Entfernung zwischen der Empfangsantenne des Knotens auf dem CCH und der interferierenden Antenne des Knotens auf dem SCH. Dies ist wichtig, um sowohl Single-Radio-Szenarien als auch Dual-Radio-Szenarien abbilden zu können. Bei der Evaluierung wurde deshalb eine Entfernung zwischen den Antennen von 4 m, 2 m und 1 m betrachtet. Der äußere Abstand von 4 m wurde gewählt, da dieser einer durchschnittlichen Fahrbahnbreite einer Straße entspricht und stellt somit die kürzeste Distanz zweier Antennen in einem Single-Radio-Aufbau dar. Die Distanzen von 2 m und 1 m sollen Ergebnisse für einen Dual-Radio-Aufbau liefern, bei dem zwei Antennen auf einem Fahrzeug montiert sind und somit enger zusammenstehen.

5.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen jeweils pro definiertem Szenario präsentiert. In allen Graphiken ist auf der x-Achse die Kommunikationsreichweite in Form der TX-RX-Distanz abgebildet. Auf der y-Achse ist die jeweilige Empfangswahrscheinlichkeit der Pakete dargestellt, welche auf der Basis der Paketfehlerrate berechnet wird. Hierbei wird das Verhältnis aus der Summe der von TX versendeten Beacons und der

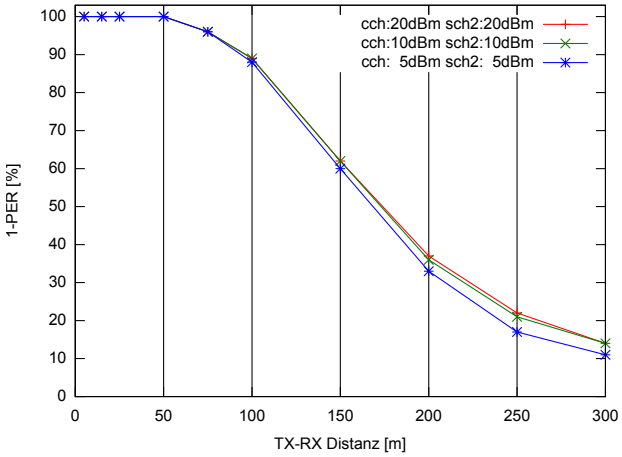


Abbildung 5.9: Szenario 1: RX-INT-Distanz=4m

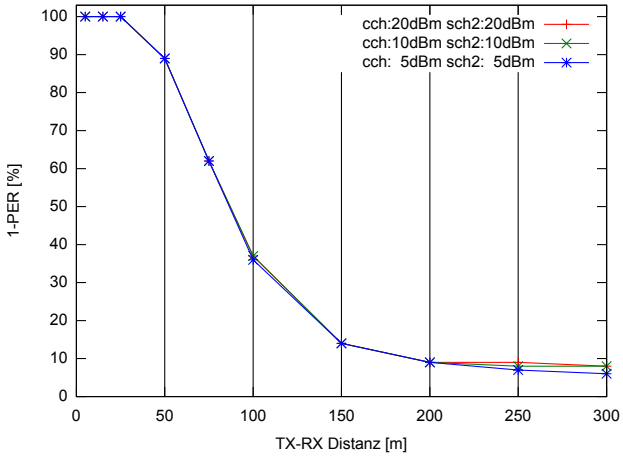


Abbildung 5.10: Szenario 1: RX-INT-Distanz=2m

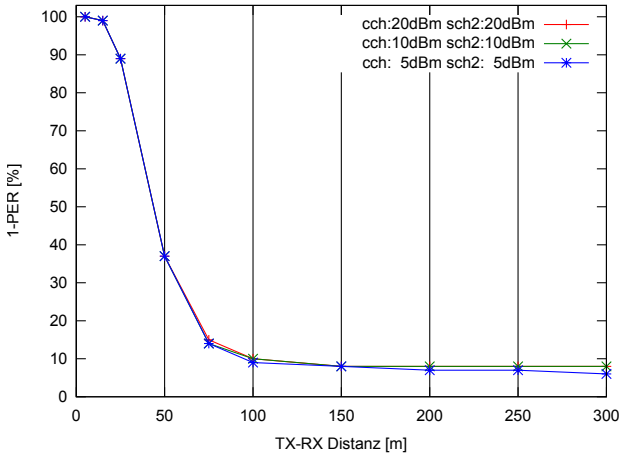


Abbildung 5.11: Szenario 1: RX-INT-Distanz=1m

tatsächlich von RX empfangenen Beacons gebildet. Das verwendet Signalausbreitungsmodell entspricht dem TwoRay-Pathloss- und Rayleight-Fading-Modell, welche die Empfangsstärke eines Signals statistisch variieren. Die Legende innerhalb der Abbildungen gibt die jeweils für die Simulation angelegte Sendeleistung pro Kanal an.

Szenario 1

Abbildung 5.9 zeigt die Evaluierungsergebnisse für die Verwendung der gleichen Sendeleistungen auf den beiden direkt benachbarten Kanälen CCH und SCH2. Hierbei wird ein RX-INT-Abstand von 4 m betrachtet. Es werden im Speziellen auf CCH und SCH2 jeweils die Sendeleistungen von 20 dBm, 10 dBm und 5 dBm verglichen. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, verlaufen alle Graphen bis zu einer TX-RX-Distanz von 100 m identisch. Erst ab einer TX-RX-Distanz von 150 m kann ein leichter Unterschied zwischen den verwen-

deten Sendeleistungen erkannt werden. Vor allem wird deutlich, dass die Performance bei der Nutzung einer TX_{power} von 5 dBm mit steigender TX-RX-Distanz im Vergleich zu den höheren Sendeleistungen stärker abnimmt. Grundsätzlich wird deutlich, dass diese Konfiguration die gewünschte Paketfehlerrate von 10% lediglich bis zu einer TX-RX-Distanz von ca. 100 m erreicht. Betrachtet man zusätzlich die Ergebnisse für näher zusammenstehende Antennen anhand einer RX-INT-Distanz von 2 m (siehe Abbildung 5.10) und 1 m (siehe Abbildung 5.11), so verringert sich die Kommunikationsdistanz von ca. 50 m im ersten Fall auf ca. 25 m im zweiten Fall. Unter Beachtung dieser Ergebnisse kann geschlußfolgert werden, dass die Nutzung von direkt benachbarten Kanälen mit gleicher Sendeleistung sowohl für einen Single-Radio-Ansatz als auch für einen Dual-Radio-Ansatz nicht geeignet ist.

Szenario 2

Um eine höhere Kommunikationsreichweite auf dem CCH zu erhalten, wird in Szenario 2 die Nutzung von unterschiedlichen Sendeleistungen auf den direkt benachbarten Kanälen untersucht. Es werden unterschiedliche TX_{power}-Abstände von 20 db, 15 dB und 10 dB betrachtet. Hierbei wird stets auf dem CCH die jeweils höhere Sendeleistung angenommen und auf dem SCH2 die entsprechend reduzierte Sendeleistung verwendet. Abbildungen 5.12 - 5.14 zeigen die Ergebnisgraphen aus Sicht des CCH. Bei einem RX-INT-Abstand von 4 m (siehe Abbildung 5.12) zeigt sich, dass für alle untersuchten TX_{power}-Unterschiede über die komplette Kommunikationsdistanz von 300 m immer eine PER $\leq$ 10% erreicht werden kann. Weiterhin erzielen die Sendeleistungsunterschiede von 15 dB und 20 dB sogar durchgängig ein PER von 0% (in dieser Graphik leider schwer sichtbar zu machen). Reduziert man den Sendeleistungsunterschied auf 10 dB, so nimmt die PER ab einer TX-RX-Distanz von 200 m zu. In diesem Fall ist das beim Empfänger ankommende Signal nicht mehr ausreichend hoch, um gegenüber dem generierten Rauschen des Nachbarkanals immer korrekt dekodiert zu werden. Dieser Effekt wird in Abbildung 5.13 deutlicher. Das Rauschen auf dem CCH wird hier erhöht, weil die RX-INT-Distanz auf 2 m verringert wird. Wie zu erkennen ist, erzielt ein Sendeleistungsunterschied von 10 dB nur noch eine TX-RX-Distanz von 150 m. Wird allerdings eine Sendeleistungsdifferenz von 15 dB oder höher angenommen, so kann weiterhin über die volle Kommunikationsreichweite eine PER $\leq$ 15% erreicht werden. Reduziert man die RX-INT-Distanz auf 1 m (siehe Abbildung 5.14), so liefert nur noch eine TX_{power}-Differenz von 20 dB akzeptable Ergebnisse auf dem CCH.

Die Einführung einer reduzierten Sendeleistung auf dem direkt benachbarten SCH2 ist - wie die Ergebnisse zeigen - eine notwendige Maßnahme, um die Störeinflüsse auf dem CCH zu verringern. Im Umkehrschluß muss aber auch die Auswirkung des stärkeren CCH auf den schwächeren SCH2 betrachtet werden. Abbildungen 5.15 - 5.17 zeigen, dass durch das vom CCH verursachte erhöhte Rauschen auf SCH2 die Kommunikationsreichweite signifikant reduziert wird. Diese wird auf lediglich 40 m für einen Sendeleistungsunterschied von 10 dB und einer RX-INT-Distanz von 4 m beschränkt (siehe Abbildung 5.15). Steigt die Sendeleistungsdifferenz auf 15 dB oder 20 dB, so minimiert sich die Kommunikationsreichweite auf ca. 20 m bzw. 10 m. Verkleinert man wiederum die RX-INT Distanz auf 2 m und 1 m so werden Reichweiten von höchstens 20m erreicht.

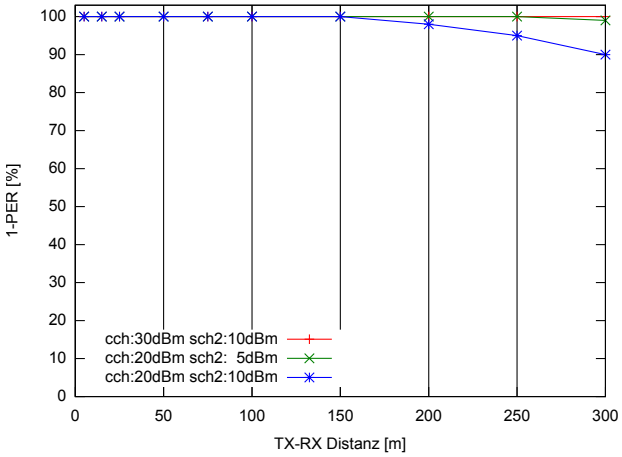


Abbildung 5.12: Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (CCH Sicht)

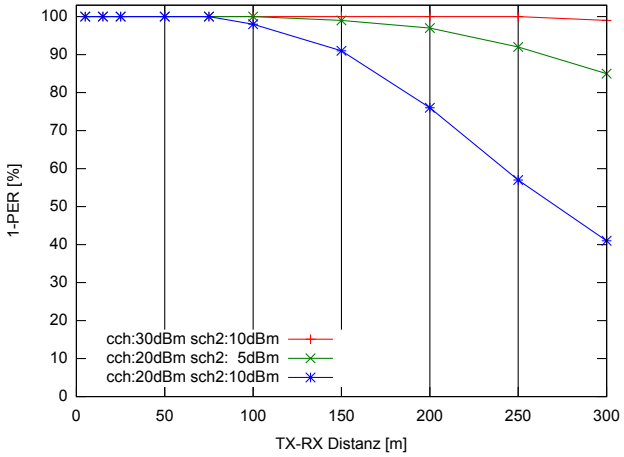


Abbildung 5.13: Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (CCH Sicht)

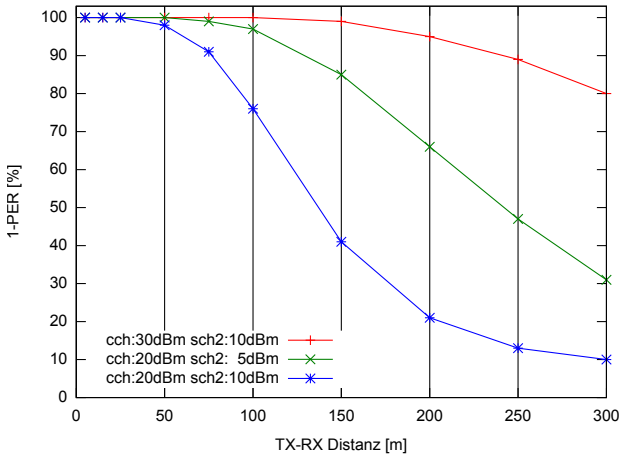


Abbildung 5.14: Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (CCH Sicht)

Szenario 3

Die Ergebnisse zum Szenario 3 werden in den Abbildungen 5.18 - 5.20 dargestellt. Hierbei werden die zwei nicht direkt benachbarten Kanäle CCH und SCH1 mit den gleichen Sendeleistungen betrachtet. Da wieder auf beiden Kanäle die gleiche Leistung angelegt wird, muss nicht wie in Szenario 2 zwischen der CCH- und SCH-Sicht unterschieden werden, da die Einflüsse symmetrisch sind. Wegen der größeren Entfernung der Kanäle ist auch das durch den SCH1 generierte Rauschen aufgrund der Eigenschaften der Spektralmaske geringer. Dies führt dazu, dass bei einem RX-INT-Abstand von 4 m und der Kommunikationsreichweite von 300 m die PER jeweils für die Sendeleistungen von 20 dBm und 10 dBm unter 10% liegt (siehe Abbildung 5.18). Auffällig ist das vergleichbar schlechte Ergebnis für die Sendeleistung von 5 dBm. Es ist zu erkennen, dass ab einer Kommunikationsreichweite von 250 m die PER signifikant steigt. Der gleiche Effekt ist der Abbildung 5.19 zu ent-

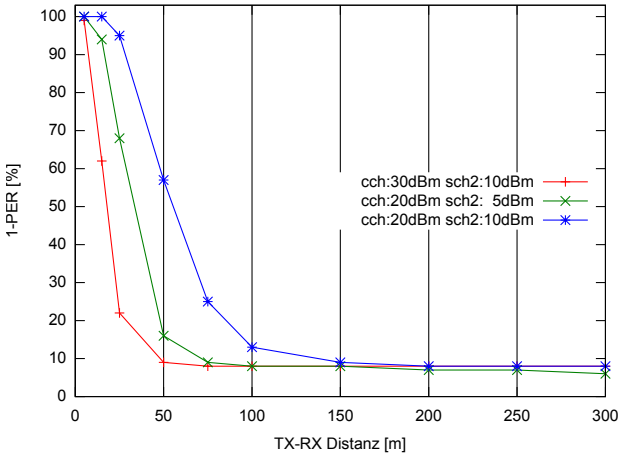


Abbildung 5.15: Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (SCH2 Sicht)

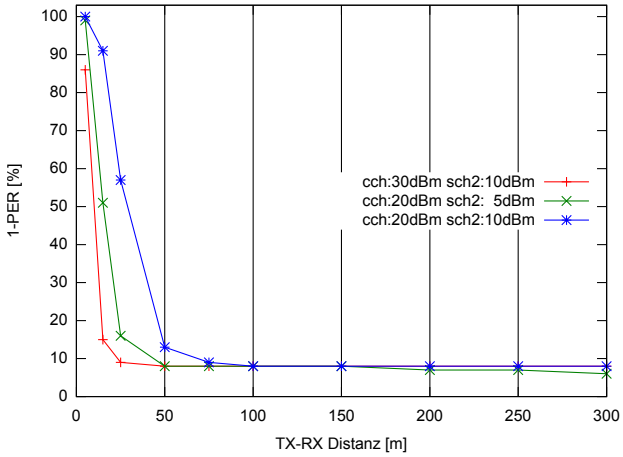


Abbildung 5.16: Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (SCH2 Sicht)

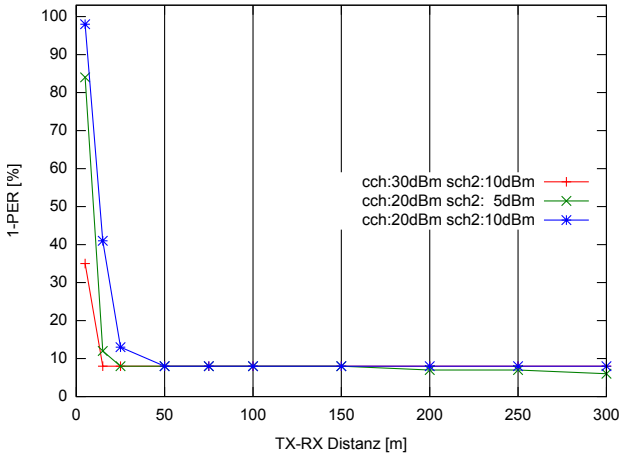


Abbildung 5.17: Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (SCH2 Sicht)

nehmen, wo ein RX-INT-Abstand von 2 m angenommen wird. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass bei beiden betrachteten RX-INT-Distanzen das verursachte Rauschen auf dem Nachbarkanal so gering ist, dass es kaum Einfluß auf den CCH hat. Die trotzdem steigende PER ist somit in ertser Linie auf die Dämpfung zurückzuführen, die aus dem regulären Pfadverlust resultiert. Nach der Freespace-Formel ergibt sich nämlich eine theoretische Kommunikationsreichweite von ca. 250 m - 270 m, falls eine Sendeleistung von 5 dBm angenommen wird. Betrachtet man die Sendeleistungseinstellung von 20 dBm und 10 dBm bei einem RX-INT-Abstand von 2 m, so erzielen beide Konfigurationen ein akzeptables Ergebnis. Reduziert man allerdings den RX-INT-Abstand auf 1 m, so ist auch bei diesem Szenario der ACI-Effekt deutlich zu bemerken. Hierbei werden also für keine der angenommenen Sendeleistungen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt.

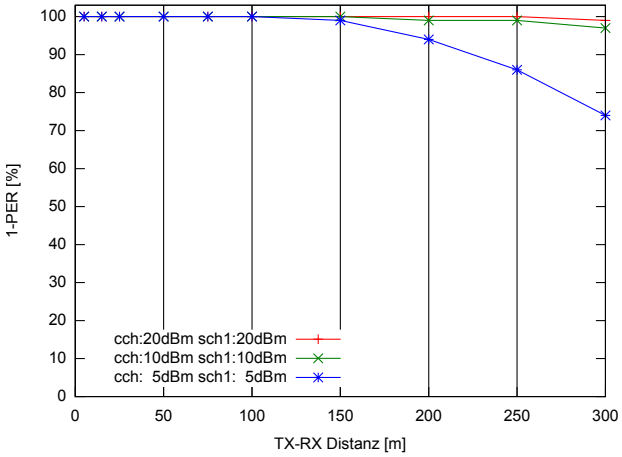


Abbildung 5.18: Szenario 3: RX-INT-Distanz=4m

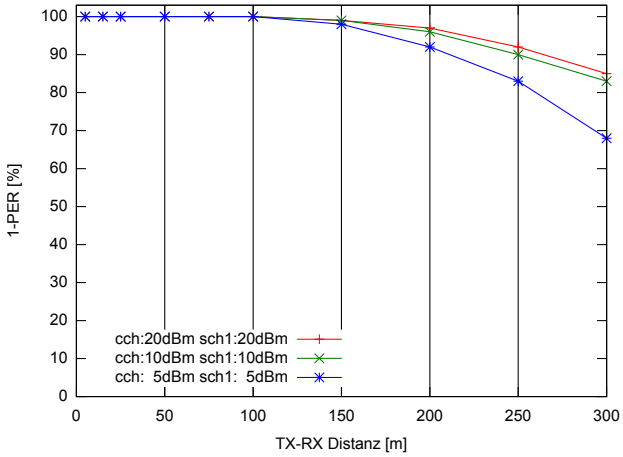


Abbildung 5.19: Szenario 3: RX-INT-Distanz=2m

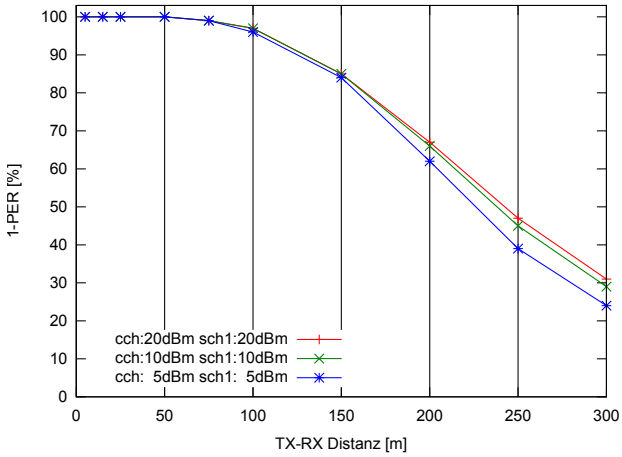


Abbildung 5.20: Szenario 3: RX-INT-Distanz=1m

Auswirkungen variabler Kanalauslastung

Wie man erkennen kann, ist bei der parallelen Nutzung von direkt benachbarten Kanälen eine Konfiguration mit unterschiedlichen Sendeleistungen notwendig. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse, dass für das Erzielen von einer PER von $\approx 10\%$ bei einer Kommunikationsreichweite von 300 m mindestens eine Differenz von 15 dB bei einem RX-INT Abstand von 2 m angenommen werden muss. In dem vorliegenden Fall würde dies zu akzeptablen Ergebnissen auf dem CCH führen. Die umgekehrte Betrachtung zeigt allerdings, dass der SCH2 lediglich auf kurzen Distanzen genutzt werden kann. Im Folgenden soll die Sicht des SCH2 noch unter dem Aspekt der Kanalauslastung auf dem CCH betrachtet werden. Da in der Praxis eine volle Auslastung eines Kanals nicht kontinuierlich besteht, soll betrachtet werden, wie sich die Abhängigkeit zwischen Kanalauslastung auf dem CCH und der PER auf dem SCH2 verhält. Es ist wichtig zu erwähnen, dass diese Betrachtung nur für den

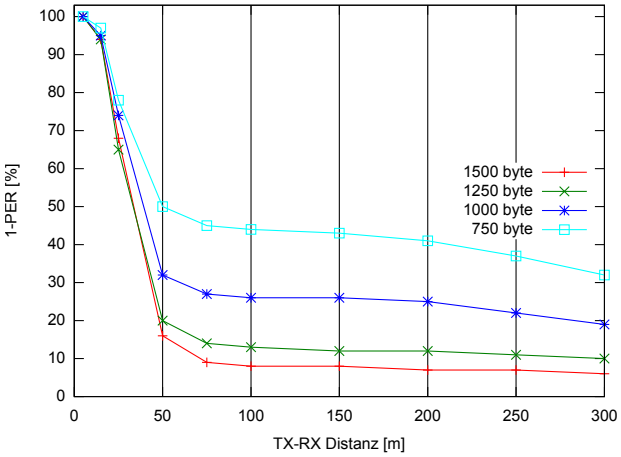


Abbildung 5.21: Szenario 2: RX-INT-Distanz=4m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht)

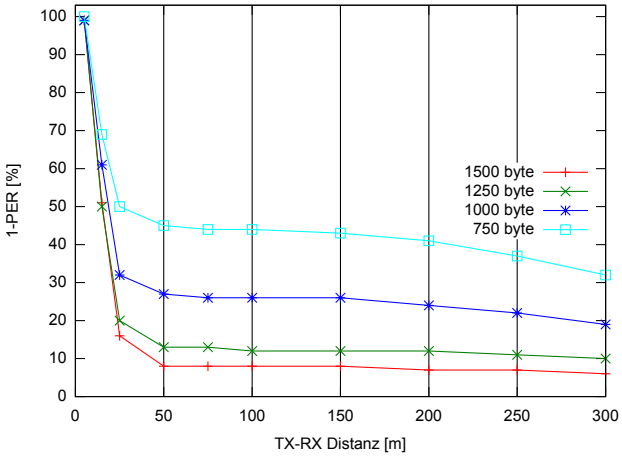


Abbildung 5.22: Szenario 2: RX-INT-Distanz=2m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht)

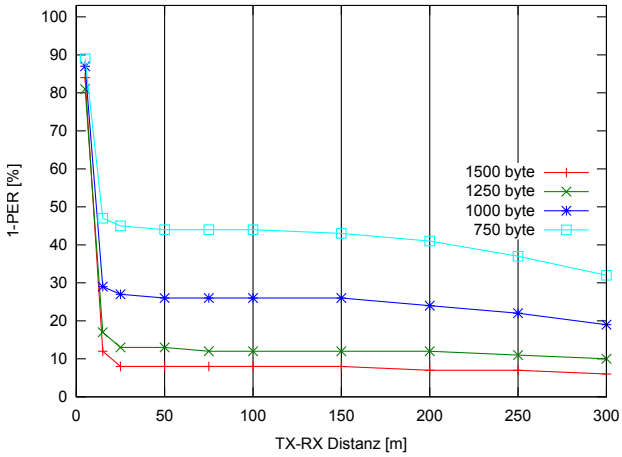


Abbildung 5.23: Szenario 2: RX-INT-Distanz=1m (variable Paketgröße, SCH2 Sicht)

SCH2 vorgenommen wird, da dieser mit niedriger Priorität belegt ist. Auf dem hochprioren CCH hingegen darf in keinem Fall eine erfolgreiche Übertragung einer Nachricht durch Interferenzen aus dem Nachbarkanal gestört werden. Abbildungen 5.21 - 5.23 zeigen die Ergebnisse der PER auf dem SCH2 für unterschiedliche Paketgrößen auf dem CCH. Es wird eine Sendeleistung von 20 dBm auf dem CCH und 5 dBm auf dem SCH2 angenommen. Die Paketgröße wird von 1500 Byte, 1250 Byte, 1000 Byte und 750 Byte variiert. Dies entspricht bei einer Datenrate von 6 MBit/s einer Kanalauslastung zwischen 100% bis 50%. Wie den Graphen zu entnehmen ist, sieht man bei reduzierter Kanalauslastung eine deutliche Reduzierung der PER auf dem SCH2. Ab einer Kommunikationsreichweite von 100 m sind die Ergebnisse sogar nahezu unabhängig von der RX-INT-Distanz. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Kanalauslastungen, kann eine PER von $\approx 55\%$ bei einer

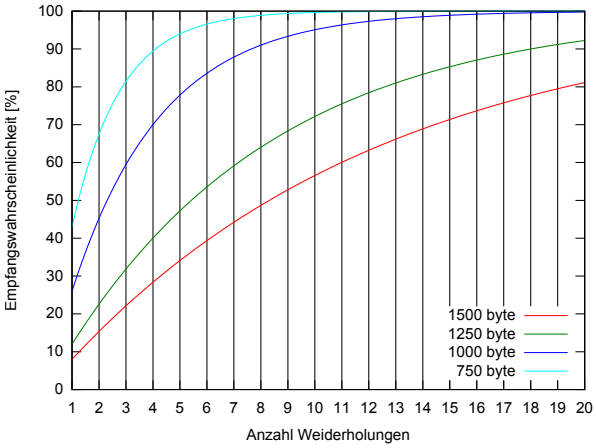


Abbildung 5.24: Empfangswahrscheinlichkeit für mindestens eine Nachricht auf SCH2 (TX-RX-Distanz=150m)

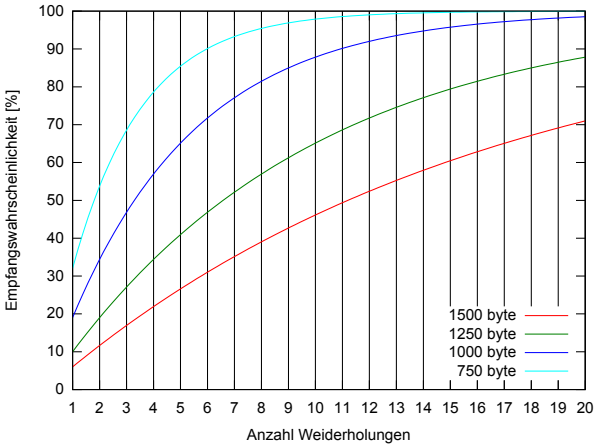


Abbildung 5.25: Empfangswahrscheinlichkeit für mindestens eine Nachricht auf SCH2 (TX-RX-Distanz=300m)

RX-TX-Distanz von 150 m erzielt werden. Bei einer Distanz von 300 m kann durch die Halbierung der Kanallast auf dem CCH eine Reduzierung der PER um $\approx 20\%$ erzielt werden. In diesem Zusammenhang ist allerdings eine Empfangswahrscheinlichkeit einer einzelnen Nachricht von $\leq 50\%$ immer noch zu niedrig, um den SCH2 in gleicher Art und Weise wie den CCH zu nutzen. Betrachtet man allerdings die Möglichkeit, eine Nachricht öfter zu wiederholen und somit Redundanz einzuführen, so steigt die Empfangswahrscheinlichkeit einer Information mit der Anzahl der Wiederholungen.

In Abbildung 5.24 und 5.25 sind die Wahrscheinlichkeiten p für den Empfang von mindestens einer Nachricht in Abhängigkeit der Kanalauslastung für die Kommunikationsreichweite von 150 m und 300 m aufgeführt. Die Wahrscheinlichkeit wird hierbei anhand der Formel zur Gegenwahrscheinlichkeit berechnet:

$$p = 1 - PER^n \tag{5.3}$$

Die Variable n definiert hierbei die Anzahl an Wiederholungen der gleichen Nachricht. Wie man in den Abbildungen erkennen kann, ist bei einer mittleren CCH-Auslastung von 50% bzw. 66% (entspricht einer Paketgröße von 750 Byte und 1000 Byte) und einer Kommunikationsreichweite von 150 m bei einer Wiederholung von 4 bis 8 Nachrichten eine Empfangswahrscheinlichkeit von $\approx 90\%$ zu erreichen. Für eine Entfernung von 300 m steigt die Anzahl der Wiederholungen auf 7 bis 11 an. Bei höheren CCH-Auslastungen von 82% bzw. 100% (entspricht einer Paketgröße von 1250 Byte und 1500 Byte) sind allerdings ≥ 20 Nachrichten notwendig.

5.3 Zusammenfassung

Die gleichzeitige Nutzung von parallelen Kommunikationskanälen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen bietet die Möglichkeit, die Kommunikationslast auf unterschiedliche Kanäle auf-

zuteilen. Allerdings können Kanäle in drahtlosen Netzen nicht als isolierte Leitungen betrachtet werden, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Vielmehr generiert das Senden auf einem Kanal Rauschen in einem benachbarten Kanal. Dieses Rauschen beeinflusst vor allem die Empfangswahrscheinlichkeit von Fahrzeugen (RX), die sich in der Nähe eines Störknotens (INT) befinden. Das Ausmaß des Rauschens ist zum einen von dem Abstand der jeweiligen Kanäle und zum anderen von der Entfernung des Störknotens zum Empfänger (RX-INT-Abstand) abhängig.

Die in diesem Kapitel durchgeführte Evaluierung ergibt, dass direkt benachbarte Kanäle nicht mit gleicher Sendeleistung betrieben werden können. Deshalb ist bezüglich der Sendeleistung eine Differenz von 15 dB nötig. Um den priorisierten CCH in einer Kommunikationsdistanz von 300 m nahezu störfrei zu nutzen, muss der benachbarte SCH2 mit einer 15 dB schwächeren Sendeleistung betrieben werden. Die Betrachtung der Auswirkungen des demnach stärkeren CCH auf den SCH2 ergibt, dass der SCH2 nur eingeschränkt nutzbar ist, da die Zuverlässigkeit der Übertragung einer einzelnen Nachricht durch das erhöhte Rauschen stark reduziert wird. Weitere Betrachtungen ergeben allerdings, dass die Zuverlässigkeit der Übertragung einer Information durch das redundante Senden der gleichen Nachricht erhöht werden kann. Dies gilt unter der Annahme, dass der CCH nicht durchgängig voll ausgelastet ist, welches in der Realität durchaus der Fall ist. Diese Beobachtungen gelten nicht für die Betrachtung von nicht direkt benachbarten Kanälen z.B. des CCH und des SCH1. Diese beiden Kanäle können bei einem RX-INT-Abstand von $\approx 2m$ mit gleicher Sendeleistung betrieben werden.

Im folgenden Kapitel soll der vorgestellte serviceorientierte Beaconing-Ansatz als Mehrkanal-Variante betrachtet werden. Hierbei sollen die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse und Rahmenbedingungen als Eingangsgrößen für die Evaluierung dienen. Dieser erweiterte Ansatz soll mit Hinblick auf die definierten Kriterien des Informationsdurchsatzes, der Skalierbarkeit und der Nutzenorientierung betrachtet werden, um eine Aussage darüber treffen zu können, in welchen Situationen welche Beaconing-Variante am besten geeignet ist.

Kapitel 6

Serviceorientiertes Mehrkanal-Beaconing

Bei der Betrachtung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes als Einkanal-Variante (siehe Kapitel 4) wurde deutlich, dass trotz der signifikanten Verbesserung der Ergebnisse bei niedrigen und mittleren Fahrzeugdichten für den Beacon Forwarding Service und den Beacon Rate Control Service keine nennenswerte Verbesserung für eine erhöhte Anzahl von Fahrzeugen erzielt werden konnte. Zum Teil wurden sogar in Szenarien mit vielen Kommunikationspartnern im Vergleich zu dem statischen 2Hz-Beaconing schlechtere Ergebnisse erzielt. Die Analyse ergab, dass in erster Linie diese Verschlechterung mit der auf dem Kommunikationskanal generierten Last zusammenhängt. Hierbei kann sogar von einem „Teufelskreis“ gesprochen werden, der zu dem folgenden Verhalten führt:

- Aufgrund von Kanalinterferenzen können von mehreren Service Usern keine Nachrichten erhalten werden.
- Die Service User erkennen den Informationsbedarf und senden Service-Request-Nachrichten aus.
- Ein Vielzahl von Service Providern empfängt die Service-Requests und antwortet mit den entsprechenden Service-Beacons.
- In den meisten Fällen ist die Anzahl der Service-Beacons höher als die der Service-Request, was zu einer signifikanten Belastung des Kommunikationskanals führt. Es kommt wiederum zu Signalinterferenzen, und die Service-Beacons können zusätzlich zu den Standard-Beacons nicht mehr empfangen werden.
- Es entsteht ein noch größerer Informationsbedarf, der noch mehr Service-Requests bewirkt. Teilweise ist die Kanallast so hoch, dass nicht mal mehr die Service-Request-Nachrichten zu den Service Providern durchkommen können.
- Durch den immer größeren Informationsbedarf wird nur noch Overhead generiert, und die einzelnen Nachrichten können nicht mehr transportiert werden.

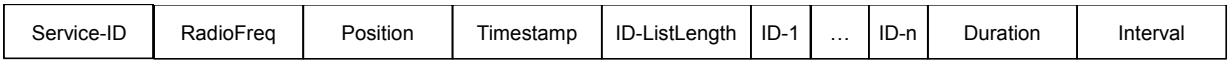


Abbildung 6.1: Spezifikation Service-Request-Nachricht für Mehrkanal-Beaconing-Variante

Dieses Aufschaukeln des Systems muss vermieden werden, um eine skalierbare Beaconing-Lösung zu gewährleisten. Aus diesem Grund soll das serviceorientierte Beaconing-Konzept auf mehrere Kanäle abgebildet werden. Ziel ist es, die durch die Service-Beacons verursachte Kommunikationslast auf einen der Service-Kanäle auszulagern. Wie bereits beschrieben, haben gerade bei hohen Fahrzeugdichten diese Nachrichten den größten Anteil an der Kommunikationslast. Bei der Portierung des Ansatzes auf mehrere Kanäle stellt sich unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 5 die Hauptfrage, welche Service-Kanäle für welche Situationen am besten geeignet sind.

Im folgenden Kapitel soll das serviceorientierte Mehrkanal-Beaconing-Konzept im Detail beschrieben werden, anhand von zahlreichen Simulationen evaluiert und mit der in Kapitel 4 dargestellten Einkanal-Variante verglichen werden.

6.1 Servicedefinition

Die Servicedefinition entspricht zum großen Teil dem in Kapitel 4 definierten Ablauf, in dem vom Service User das pull-Prinzip zur Steuerung der Beacon-Sendezeitpunkte seiner Service Provider genutzt wird. Um aber die Bandbreite mehrerer Kanäle voll auszunutzen, wird für die Mehrkanal-Variante ein Dual-Radio-Ansatz vorausgesetzt. Hierbei existieren, wie bereist beschrieben, zwei Funkmodule pro Fahrzeug, wobei ein Funkmodul (im Folgenden Control Radio genannt) durchgängig auf dem CCH betrieben wird und das zweite Funkmodul (im folgenden Service Radio genannt) immer zwischen den jeweiligen zur Verfügung stehenden Service-Kanälen hin und her schaltet. Da für die Nutzung des Service Radios mindestens zwei Service-Kanäle existieren, ist es notwendig, den Service User und den Service Provider für das Senden und Empfangen von Service-Beacons zeitlich auf den entsprechende Kanal zu synchronisieren. Aus diesem Grund wird eine Erweiterung des Service-Request-Nachricht vorgenommen.

6.1.1 Service-Request-Nachrichtenformat

Abbildung 6.1 stellt das erweiterte Format der Service-Request-Nachricht dar. Dieses Format gleicht bis auf das Attribut *RadioFreq* im Grunde dem in Kapital 4 beschriebenen Nachrichtenformat. Dieses Attribut soll als Wert die Frequenz des Service-Kanals enthalten, auf dem ein Service erbracht wird. Somit kann ein Service User aktiv steuern, auf welchem Kanal der Service Provider seine Service-Beacons versendet. Diese Konzept bietet eine einfache und flexible Lösung zur dynamischen Steuerung der Nutzung unterschiedlicher Service-Kanäle. Ein Vorteil dabei ist, dass jede Serviceerbringung auf einem unterschiedlichen Kanal stattfinden kann. Es werden keine festen Kanäle pro Service und

Service User definiert. Dies hat zur Folge, dass flexibel auf die jeweilige Situation, z.B. aktuelle Kanallast oder geforderte Kommunikationsreichweite, reagiert werden kann.

6.1.2 Service User

Die Rolle und die damit verbundene Basisfunktionen des Service Users bleibt grundsätzlich in Bezug zu der in Kapitel 4 vorgenommenen Definition unverändert. Demnach sind einem Service User zusammenfassend die folgenden Funktionen zugeordnet:

- Identifikation und Beobachtung von potenziellen Kollisionspartnern
- Auswahl des entsprechenden Services (BFS oder BRCS)
- Versenden einer entsprechenden Service-Anfrage

Durch die Nutzung weiterer Kommunikationskanäle kommen allerdings ergänzende Funktionen hinzu. Da Service-Beacons vorzugsweise auf einem der Service-Kanäle verbreitet werden sollen, ist es notwendig, dass der Service User einen entsprechenden Kommunikationskanal für die Serviceerbringung spezifiziert. Dieser Kanal muss dann für die Dauer der definierten Serviceerbringung vom Service User abgehört werden. Nach Ablauf der Service-Dauer kann das Service Radio wieder auf einen beliebigen anderen Service-Kanal geschaltet werden. Somit sind die folgende Schritte notwendig:

- Beobachtung und Identifizierung eines geeigneten Service-Kanals
- Spezifikation des Service-Kanals zur Serviceerbringung innerhalb der Service-Request-Nachricht
- Umschalten des Service Radios für die Dauer der Serviceerbringung auf den spezifizierten Service-Kanal

Um sicherzustellen, dass eine Service-Request-Nachricht auch von allen Fahrzeugen zu jedem Zeitpunkt theoretisch empfangen werden kann, wird dieser Nachrichtentyp ausschließlich auf dem CCH versendet. Da jedes Fahrzeug mit dem Control Radio durchgängig auf dem CCH horcht, kann unter der Annahme, dass keine Signalinterferenzen existieren, gewährleistet werden, dass alle Teilnehmer die Service-Anfrage erhalten können. Würde im Gegenteil die Service-Request-Nachricht auf einem der Service-Kanäle versendet werden, wäre eine zeitliche Synchronisation der Teilnehmer auf den entsprechenden Service-Kanal notwendig.

6.1.3 Service Provider

Auch die Definition der vom Service Provider zu erbringenden Funktionen entspricht im Grunde der Spezifikation aus Kapitel 4. Hierbei sind zusammenfassend die folgenden Funktionen zu erfüllen:

- Horchen auf den Kanal und Auswertung von Service-Request-Nachrichten
- Überprüfung der Relevanz und der Möglichkeit der Serviceerbringung
- Erbringung des Services gemäß der spezifizierten Anforderungen

Im Falle der Nutzung mehrerer Kanäle ist es zusätzlich notwendig, dass der Service Provider entsprechend der Spezifikation des Service Users seinen Service auf dem jeweiligen Service-Kanal erbringt. Dazu müssen folgende Zwischenschritte durchgeführt werden:

- Auswertung des RadioFreq-Attributs aus der Service-Request-Nachricht eines Service Users
- Umschalten des Service Radios auf den spezifizierten Service-Kanal für die gewünschte Dauer der Serviceerbringung
- Umschalten des Service Radios nach Ablauf der Service-Dauer auf einen beliebigen Kanal

Wie bereits diskutiert, wird davon ausgegangen, dass der Austausch von Beacons zur Ermöglichung von Detektion und zur Vermeidung potenzieller Kollisionen eine hohe Priorität besitzt. Demnach ist das unmittelbare Umschalten des Service Providers zur Serviceerbringung auf dem definierten Kanal erforderlich. Auch wenn dabei Informationen verloren gehen, die auf einem anderen Service-Kanal bereitgestellt werden. Nichtsdestotrotz kann davon ausgegangen werden, dass in einzelnen Situationen für den Service Provider Informationen, z.B. über eine Vollbremsung in unmittelbarer Nähe, wichtiger sind, als eine Service-Anfrage zu beantworten. In diesem Fall kann eine dynamische Priorisierung stattfinden, auf deren Basis entschieden wird, ob ein Umschalten des Service Radios vorgenommen werden soll oder nicht. Auch eine globale Prioritätenliste ist denkbar, in der feste Prioritäten für einen Nachrichtentyp oder eine bestimmte Applikation festgelegt werden. Da aber die Beacon-Nachrichten mit höchster Priorität behandelt werden, liegt die Definition dieser Prioritäten nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

6.2 Mehrkanal Beacon Forwarding Service

Wie bereits in Kapitel 4 definiert, soll der Beacon Forwarding Service in erster Linie dazu dienen, Beacons, die vom Service User erwartet wurden, aber aufgrund von Interferenzen nicht übermittelt werden konnten, bei den entsprechenden Service Providern anzufragen. Dafür nutzt BFS anhand eines Broadcasts der Service-Request-Nachricht alle sich im definierten Radius befindenden Fahrzeuge, die eine Weiterleitung der angefragten Beacons vornehmen können. Auf dieser Grundlage profitiert der Service User von der steigenden Anzahl an Nachbarfahrzeugen. Werden allerdings bei hoher Fahrzeugdichte von jedem potenziellen Service Provider über eine längere Dauer mit einer hohen Frequenz Beacons weitergeleitet, so wird eine hohe Last auf dem Kommunikationskanal generiert. Aus diesem

Grund wird BFS als Einmalservice definiert, der lediglich eine Weiterleitung der angefragten Beacons vornimmt. Somit wird, wie in Kapitel 4 definiert, die Service-Dauer und das Service-Intervall auf den Wert 0 gesetzt. Bei der Nutzung von mehreren Kanälen ist es notwendig, die jeweiligen Kommunikationspartner zeitlich auf einen entsprechen Kommunikationskanal zu synchronisieren. Der Ablauf der Mehrkanal-BFS-Variante wird demnach wie folgt spezifiziert und am Beispiel des Szenarios aus Abbildung 4.7 dargestellt:

- Alle Fahrzeuge senden periodisch Beacon-Broadcasts mit einer Wiederholfrequenz von 2 Hz aus.
- Jeder Empfänger (hier SU) speichert die empfangenen Beacons inklusive der Sender-IDs und der ValidityTime in einer sogenannten Nachbarschaftstabelle ab.
- Läuft die ValidityTime eines Beacons ab, so erwartet *SU* ein weiteres Beacon der entsprechenden Sender. Wird dieses Update nicht empfangen, so wird dies als Paketverlust gewertet. In unserem Beispiel würde dies dem Fall entsprechen, in dem S_1 und S_2 gleichzeitig auf den Kanal zugreifen. Dadurch entsteht eine Hidden-Node-Situation für SU.
- Zwischenzeitlich wählt *SU* auf Basis von definierten Kriterien einen Service-Kanal aus, auf dem er den zu erbringenden Service erwartet (hier z.B. SCH2).
- *SU* sendet auf dem CCH eine Service-Request-Nachricht mit den IDs S_1 und S_2 an alle seine Nachbarn (hier an die Service Provider mit der ID SP_1 und SP_2) und spezifiziert den Service-Typ der Service-Request-Nachricht als BFS. Das RadioFreq Attribut wird mit der Frequenz des SCH2 belegt.
- Nach dem Aussenden der Service-Anfrage schaltet *SU* sein Service Radio auf den SCH2 um und wartet auf die entsprechenden Beacon-Weiterleitungen.
- Die Nachbarn SP_1 und SP_2, die nicht von der Hidden-Node-Situation betroffen waren und somit die Beacons von S_1 und S_2 empfangen konnten, schalten ihr Service Radio ebenfalls auf den SCH2 und leiten im nächsten Schritt die angefragten Beacons an *SU* weiter.
- Ist die einmalige Weiterleitung erfolgt, so steht es in der Entscheidungsgewalt des Service Providers, ob er das Service Radio weiterhin auf dem SCH2 belassen will, oder z.B. aufgrund anderer Service-Anfragen oder Service-Bereitstellungen das Radio auf einen anderen Kanal umschaltet.
- *SU* hingegen belässt sein Service Radio für eine Mindestdauer auf dem spezifizierten Service-Kanal. Dies ist notwendig, da man die Roundtrip-Zeiten im Netzwerk berücksichtigen muss, um alle potenziellen Beacon-Weiterleitungen zu empfangen.
- Nach Ablauf der Mindestdauer kann auch *SU* entscheiden, welcher Service-Kanal als nächster genutzt werden soll.

Aufgrund der kurzen Zeiten der Service-Erbringung wird der Service Provider nur minimal in den Prozess eingebunden. Die durch den Einsatz von mehreren Kanälen erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Absätzen dargestellt.

Evaluierung

Zur Evaluierung der Beacon-Forwarding-Strategie auf mehreren Kanälen wird im Folgenden wieder der Informationsdurchsatz unter Berücksichtigung der Betrachtungsradien von 100 m, 200 m und 300 m analysiert. Die Güte des Services wird zum einen auf dem zum CCH direkt benachbarten Kanal SCH2 (BFS-SCH2) als auch auf dem zum CCH nicht direkt benachbarten Kanal SCH1 (BFS-SCH1) evaluiert. Anhand der angepassten Simulationsumgebung zur Mehrkanalnutzung konnte die gegenseitige Beeinflussung der Nachbarkanäle bei gleichzeitigem Sende- bzw. Empfangsvorgang abgebildet werden. Als Referenzwerte dienen diesmal sowohl die Ergebnisse der statischen Beacon-Wiederholrate mit einer Frequenz von 2 Hz als auch die erzielten Ergebnisse des serviceorientierten Beaconings als Einkanal-Version (BFS-CCH). Wie zuvor wird als Metrik entsprechend die Awareness-Qualität und die verursachte Kanallast pro Sekunde verwendet.

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 100 m

Abbildung 6.2 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Forwarding Service mit einem angenommenen Betrachtungsradius von 100 m. Wie bereits diskutiert, sinkt bei dem statischen Beaconing-Ansatz und bei der BFS-CCH-Variante die Awareness-Qualität mit der steigenden Anzahl an Fahrzeugen. Hierbei ist beim statischen Beaconing ein Abfall der Awareness-Qualität von ursprünglich ca. 90% bei 100 Fahrzeugen auf $\leq 60\%$ bei 300 Fahrzeugen festzustellen. Bei der BFS-CCH-Variante ist trotz einer Verbesserung auf $\geq 90\%$ bei 100 Fahrzeugen ein Performanceabfall auf $\leq 80\%$ bei 300 Fahrzeugen zu beobachten. Nichtsdestotrotz kann durch den serviceorientierten Ansatz gerade bei hohen Fahrzeugdichten eine deutliche Optimierung erreicht werden. Betrachtet man die Mehrkanal-Varianten BFS-SCH2 und BFS-SCH1, so ist zu erkennen, dass erstmalig auch für eine Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen eine Awareness-Qualität von $\approx 90\%$ erzielt werden kann. In der Awareness-Qualität ist lediglich ein Unterschied von $\approx 5\%$ zwischen einer Fahrzeugdichte von 100 zu 300 Fahrzeugen zu verzeichnen, was ein überaus zufriedenstellendes Ergebnis bedeutet. Es kann weiterhin gezeigt werden, dass zwischen den beiden Anätzen BFS-SCH1 und BFS-SCH2 so gut wie kein Unterschied in Bezug auf die erzielte Awareness-Qualität zu erkennen ist.

Abbildung 6.3 stellt die von den einzelnen Ansätzen generierte Anzahl an Service-Request-Nachrichten und die damit verbundene Anzahl an Beacon-Weiterleitungen dar. Es wird gezeigt, dass sowohl für BFS-SCH2 als auch BFS-SCH1 ein niedriger Nachrichtenaufwand entsteht. Die Nachrichten steigen - ähnlich der BFS-CCH-Variante (siehe Abbildung 4.9) - nur leicht bei steigender Fahrzeugdichte an. Des Weiteren ist hinsichtlich der Nachrichtenanzahl der Ansätze BFS-SCH2 und BFS-SCH1 kein nennenswerter Unterschied zu erkennen. In diesem speziellen Fall entspricht sogar die Anzahl der Service-

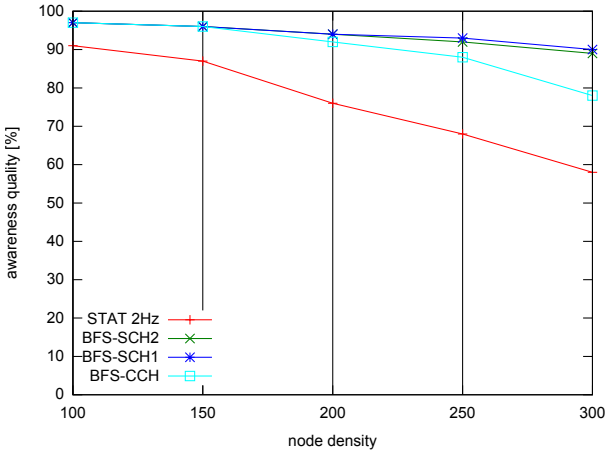


Abbildung 6.2: Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=100m)

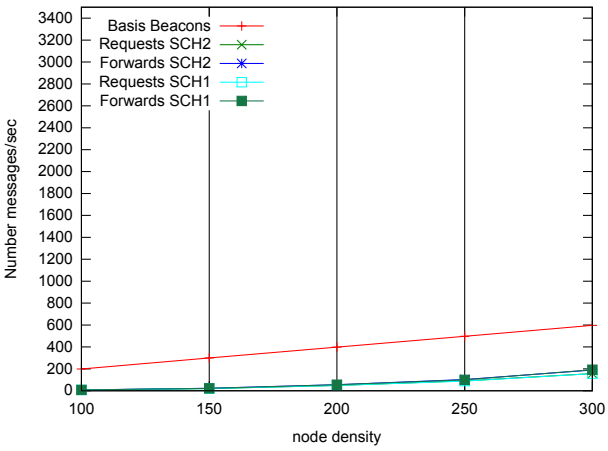


Abbildung 6.3: Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=100m)

Requests der Anzahl der Beacon-Weiterleitungen. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die auf dem CCH generierte Kanallast, die bei BFS-CCH durch die zusätzlichen Beacon-Weiterleitungen verursacht wird, bereits zu hoch ist. Im Gegensatz dazu kann die Verteilung der Last auf mehrere Kanäle eine Verbesserung erzielen. Weiterhin ist bei geringem Kommunikationsaufwand keine nennenswerte Beeinflussung des SCH2 seitens des CCH durch Nebensprechen (ACI) zu beobachten. Wie bereits gezeigt, nimmt der Effekt von ACI auf dem SCH2 mit sinkender Kanallast auf dem CCH ab. Somit scheint die hier auf dem CCH verursachte Kommunikationslast keinen negativen Einfluss auf den SCH2 zu haben.

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 200 m

Die Abbildung 6.4 zeigt die Evaluierungsergebnisse für den Beacon Forwarding Service mit einem angenommenen Betrachtungsradius von 200 m. Auf dieser Entfernung ist ein deutlicher Abfall der Awareness-Qualität beim statischen Beaconing-Ansatz von ursprünglich $\approx$ 80% bei 100 Fahrzeugen auf 25% bei 300 Fahrzeugen zu erkennen. Im Vergleich dazu liefert die BFS-CCH-Variante eine signifikante Verbesserung für die Fahrzeugdichte bis zu 250 Fahrzeugen. Wie allerdings zu sehen ist, sind die vom BFS-CCH-Ansatz erzielten Ergebnisse nicht durchgängig konstant und fallen für 250 und 300 Fahrzeuge deutlich ab. Vergleicht man hingegen die von der BFS-SCH2 Variante erzielten Werte, so kann wiederum eine signifikate Erhöhung der Awareness-Qualität auf $\approx$ 80% bei 300 Fahrzeugen erzielt werden. Weiterhin kann eine nochmalige Verbesserung um 5% durch den Einsatz von BFS-SCH1 erreicht werden.

Die in Abbildung 6.5 dargestellte Kanallast lässt erkennen, dass im Falle von BFS-SCH2 etwas mehr Service-Requests bei hohen Fahrzeugdichten im Vergleich zu BFS-SCH1 versendet werden. Dies führt dazu, dass bei einer erhöhten Anzahl an potenziellen Service Providern (im Vergleich zum Betrachtungsradius von 100 m) eine verhältnismäßig hohe An-

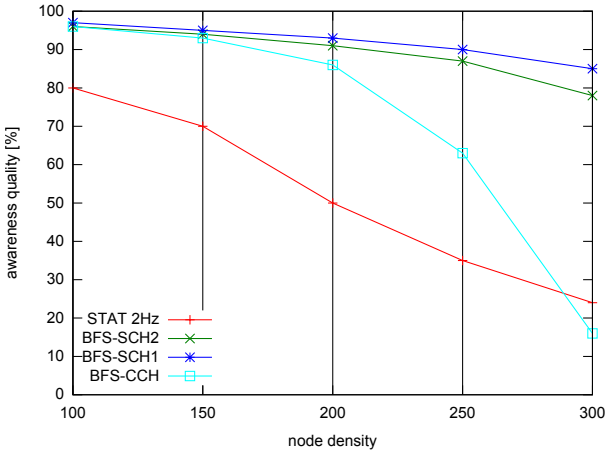


Abbildung 6.4: Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=200m)

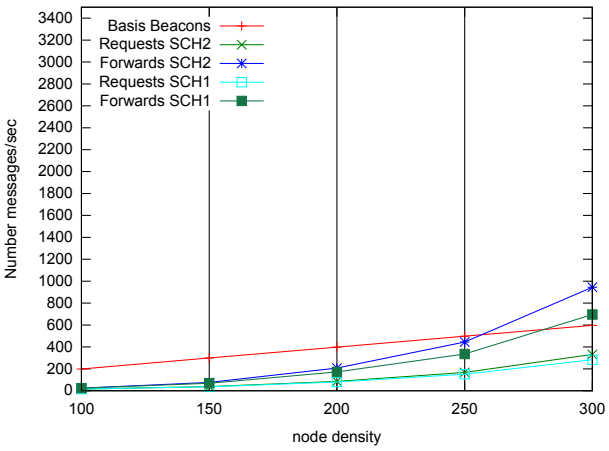


Abbildung 6.5: Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=200m)

zahl an Beacon-Weiterleitungen bei der BFS-SCH2-Variante im Vergleich zur BFS-SCH1-Variante generiert werden. Wie gezeigt, wird trotzdem im Falle BFS-SCH2 eine geringere Awareness-Qualität erreicht als bei BFS-SCH1. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Hinblick auf die erhöhte Distanz die Wahrscheinlichkeit für einen Paketverlust auf SCH2 höher ist als SCH1. Dieses kann wiederum auf eine Kombination des ACI-Effektes und auf Signalinterferenzen innerhalb des SCH2 zurückgeführt werden. Ersteres wird durch die gestiegene Kommunikationslast auf dem CCH verursacht; letzteres ist dagegen auf die hohe Anzahl der Beacon-Weiterleitungen zurückzuführen.

Evaluierung des BFS für einen Betrachtungsradius von 300 m

Die Evaluierungsergebnisse für den Betrachtungsradius von 300 m werden in Abbildung 6.6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die BFS-CCH-Variante im Vergleich zum statischen Beaconing-Ansatz bei den Fahrzeugdichten bis zu 200 Fahrzeugen eine Verbesserung der Awareness-Qualität zu erzielen ist. Allerdings fällt die Performance von BFS-CCH ab 250 Fahrzeugen deutlich ab und sinkt sogar unter den Wert des statischen Beaconings. Dieser Effekt ist durch den Einsatz der Mehrkanal-Varianten wieder aufzuheben. Hierbei liefert die BFS-SCH2-Variante für 250 Fahrzeuge wieder eine signifikante Verbesserung, fällt aber bei 300 Fahrzeugen auf etwa den gleichen Wert wie das statische Beaconing. Es ist zum ersten Mal ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Mehrkanal-Varianten zu erkennen. Im Speziellen kann durch den Einsatz der BFS-SCH1-Variante eine deutliche Verbesserung um $\approx 50\%$ für 300 Fahrzeuge erreicht werden. Hierbei wird eine Awareness-Qualität von $> 60\%$ erzielt. Auch bei einer Fahrzeugdichte von 250 Fahrzeugen ergibt sich eine Verbesserung von $\approx 30\%$. Im Falle des Betrachtungsradius von 300 m scheint die BFS-SCH1 Variante besonders gut geeignet zu sein. Vor allem bei einer Fahrzeugdichte von bis zu 250 Fahrzeugen ergibt sich durchgängig eine Awareness-Qualität von $\geq 90\%$, die, verglichen mit BFS-CCH und dem statischen Beaconing-Ansatz, eine Verbesserung

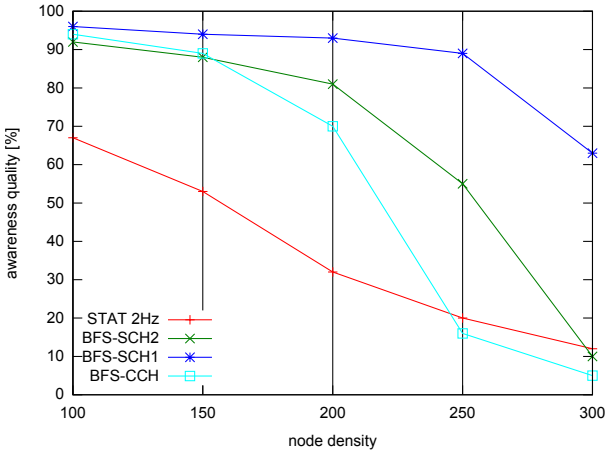


Abbildung 6.6: Awareness-Qualität: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=300m)

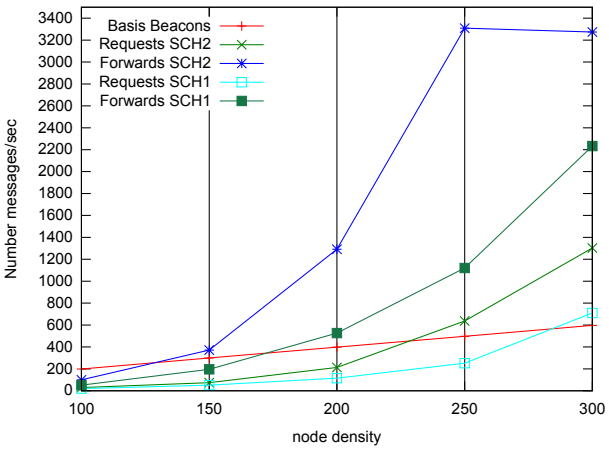


Abbildung 6.7: Nachrichtenanzahl: BFS Mehrkanal-Variante (Radius=300m)

der Awareness-Qualität von 75% bedeutet.

Betrachtet man die in Abbildung 6.7 aufgeführte Nachrichtenmenge, so ist erkennbar, dass deutliche Unterschiede sowohl in Bezug auf die Anzahl an Service-Requests als auch auf die Anzahl der Beacon-Weiterleitungen zwischen den zwei Mehrkanal-Varianten existieren. Aufgrund des signifikanten Anstiegs der Service-Request-Nachrichten ist beim BFS-SCH2 auch eine hohe Anzahl an Beacon-Weiterleitungen zu erkennen. Diese liegt weit über der Zahl der BFS-SCH1-Variante. Es ist außerdem zu beobachten, dass trotz der weiter steigenden Anzahl an Service Requests bei einer Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen die Anzahl der Beacon-Weiterleitungen - relativ betrachtet - wieder abnimmt. Dies kann, wie bereits bei der BFS-CCH-Variante diskutiert (siehe 4.11 und 4.13), auf die steigende Signalinterferenz auf den CCH zurückgeführt werden.

Ein weiterer Effekt, der zu dem drastischen Abfall der Awareness-Qualität für BFS-SCH2 führt, ist die steigende Entfernung der Service Provider und die relativ schwache TX_{power} von 5 dBm auf dem SCH2. Wie erwähnt, ist bei dieser Sendeleistung die Kommunikationsdistanz auf ca. 270 m eingeschränkt. Leiten Service Provider, die sich ungefähr in dieser Distanz zum Service User befinden, ein Beacon weiter, so kann dieses leicht aufgrund des Kanalrauschens nicht mehr empfangen werden. Ein weiterer Effekt ist die erhöhte Anzahl der Hidden-Node-Situationen, die gerade bei kleinen Kommunikationsreichweiten zunehmen. Obwohl der BFS-SCH2 im Vergleich zum BFS-CCH eine Verbesserung darstellt, ist dieser nur eingeschränkt für den Betrachtungsradius von 300 m einsetzbar. Wobei diese Lücke durch den BFS-SCH1 geschlossen werden kann.

6.3 Mehrkanal Beacon Rate Control Service

Der Beacon Rate Control Service ist zur Steuerung der Beacon-Wiederholrate ausgewählter Nachbarfahrzeug vorgesehen. Er ist in Situationen von besonderem Interesse, in denen

eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit besteht. Somit wird für BRCS auch ein unmittelbarer Betrachtungsradius von 100 m angenommen. Zur Adressierung der Fahrzeuge wird ein Unicast- bzw. Multicast-Prinzip verwendet. Hierbei dienen ausschließlich die adressierten potenziellen Kollisionspartner als Service Provider und nicht - wie bei der BFS-Variante - alle sich in der Umgebung befindenden Fahrzeuge. Es ist wichtig, dass von den identifizierten Kollisionspartnern Informationen mit hoher Aktualität erhalten werden, damit auf dieser Basis dem Fahrer Ausweichmanöver oder ähnliches vorschlagen werden kann. Somit ist es notwendig, dass die Beacons der möglichen Kollisionspartner während der Zeitdauer der kritischen Situation mit einem entsprechenden Intervall versendet werden. Im Gegensatz zur BFS-Variante ist demnach die Service-Dauer und das Service-Intervall variabel und kann vom Service User definiert werden. Analog zur BFS-Mehrkanal-Variante steht auch bei der Nutzung von mehreren Kanälen bei BRCS die Frage der zeitlichen Synchronisation auf einen entsprechenden Kanal an vorderster Stelle. Der Ablauf der BRCS-Mehrkanal-Variante wird demnach wie folgt definiert:

- Alle Fahrzeuge senden periodische Beacon Broadcasts mit einer Wiederholfrequenz von 2 Hz aus.

- Jeder *SU* (also jeder Empfänger) berechnet zyklisch die Kollisionswahrscheinlichkeit in Bezug auf seine Nachbarfahrzeuge. Übersteigt die Kollisionswahrscheinlichkeit einen gewissen Schwellenwert, so soll bei den identifizierten Kollisionspartnern ein höheres Service-Intervall angefragt werden.

- Auf Basis der vorhergehenden Beobachtungen der einzelnen zur Verfügung stehenden Kanäle spezifiziert *SU* den entsprechenden Service-Kanal in der Service-Request-Nachricht, auf dem der Service vom Service Provider erbracht werden soll.

- Dieser Service-Request von *SU* wird dann unter Angabe der Beacon-Wiederholrate, der Service-Dauer und der ID des potenziellen Kollisionspartners (also Service Providers) versendet. Die Service-Request-Nachricht wird analog zur BFS-Mehrkanal-Variante stets auf dem CCH verbreitet, da alle Fahrzeuge verpflichtet sind, diesen Kanal durchgängig abzuhören.

- Werden mehrere mögliche Kollisionspartner identifiziert, so wird eine Multicast Service-Request-Nachricht generiert, in der eine Liste von Service-Provider-IDs übergeben wird.

- Nach dem Versenden der Service-Request-Nachricht schaltet der Service User sein Service Radio auf den vorher definierten Service-Kanal und wartet für die definierte Service-Dauer auf die Erbringung des Services.

- Empfängt ein Fahrzeug die Service-Request-Nachricht, so wird nach der positiven Auswertung des Service-Typs und der angefragten SP-IDs das Service Radio auf den gewünschten Kanal umgeschaltet und eigene Beacons werden mit der angeforderten Service-Wiederholrate versendet. Nach Ablauf der Service-Dauer wird wieder

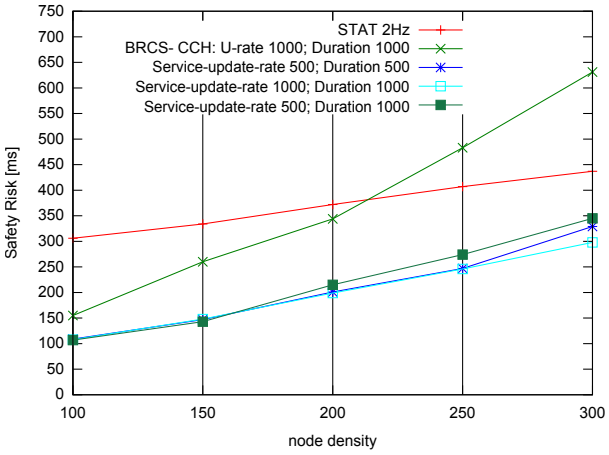


Abbildung 6.8: SafetyRisk: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz)

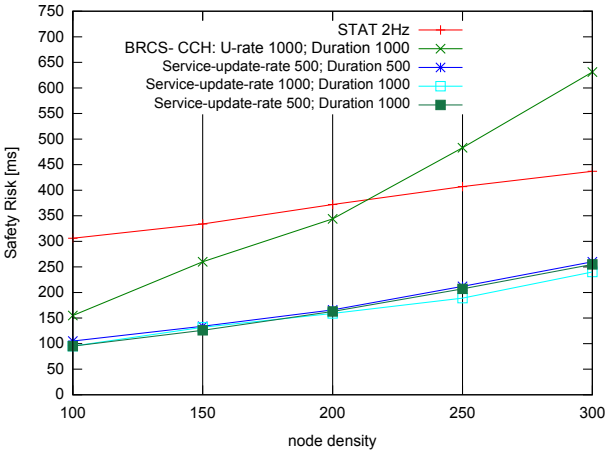


Abbildung 6.9: SafetyRisk: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz)

die Standard-Beacon-Rate von 2 Hz eingestellt. Außerdem kann *SP* des Weiteren entscheiden, auf welchen Kanal er das Service Radio als Nächstes umschalten will.

- Auch *SU* kann nach Ablauf der Service-Dauer entscheiden, auf welchen Service-Kanal als Nächstes umgeschaltet werden soll. Besteht allerdings nach Ablauf der Service-Dauer weiterhin eine potenzielle Kollisionsgefahr mit den identifizierten Fahrzeugen, so wird die Service-Anfrage von *SU* erneut gestellt.

Im Gegensatz zur BFS-Variante generiert BRCS eine über die Service-Dauer kontinuierliche Belastung auf dem Kommunikationskanal. Diese Belastung kann allerdings wieder relativiert werden, da die Menge an Service Providern beschränkt ist.

Evaluierung

Zur Beurteilung der Güte des Beacon Rate Control Services wird analog zu Kapitel 4 eine Service-Beacon-Wiederholrate von 4 Hz und 10 Hz betrachtet. Zusätzlich wird die Dauer der Serviceerbringung und des Service-Request-Intervalls jeweils zwischen 500 ms und 1000 ms variiert. Wie auch für den Beacon Forwarding Service werden die beiden Service-Kanäle SCH2 und SCH1 genutzt. Entsprechend werden die Ergebnisse in den Abbildungen anhand der Ergebnisgraphen BRCS-CCH, BRCS-SCH2 und BRCS-SCH1 dargestellt. Als Referenzwert zur Beurteilung der Performance der jeweiligen Varianten dienen wiederum das Ergebnis des 2Hz-Beaconing-Ansatzes wie auch die erzielten Ergebnisse der BRCS-CCH-Variante. Wie bereits in Kapitel 4 wird als Metrik die SafetyRisk und die verursachte Kanallast pro Sekunde verwendet.

Evaluierung des BRCS für eine Service-Beacon-Wiederholrate von 10 Hz

Zunächst werden die Ergebnisse für die Service-Beacon-Wiederholrate von 10 Hz betrachtet. Abbildung 6.8 stellt die Evaluierungsergebnisse für die BRCS-SCH2-Variante dar.

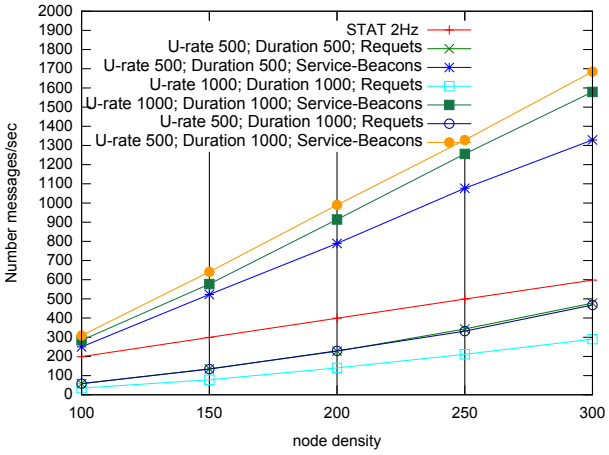


Abbildung 6.10: Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz)

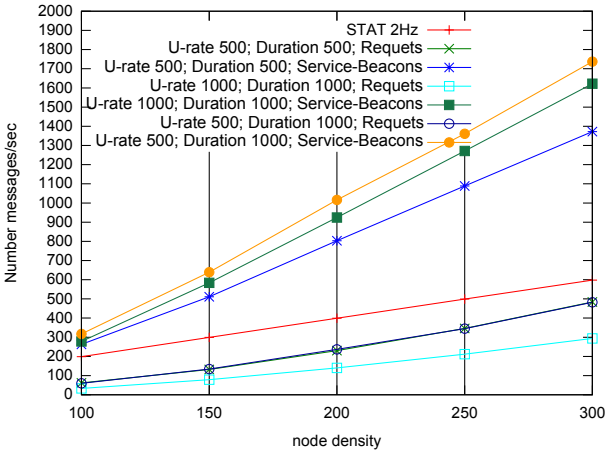


Abbildung 6.11: Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=10Hz)

Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu der BRCS-CCH-Variante hier kontinuierlich bessere Ergebnisse als mit dem statischen Beaconing-Ansatz erzielt werden. Insbesondere fällt auf, dass bei der niedrigen Fahrzeugdichte von 100 Fahrzeugen eine Verbesserung der SafetyRisk auf 100 ms erzielt wird. Dies gilt im gleichen Maße für die Performance der BRCS-SCH1-Variante (siehe Abbildung 6.9), welche den nicht direkt benachbarten Kanal zum CCH nutzt. Vergleicht man die Ergebnisse bei hohen Fahrzeugdichten von 300 Fahrzeugen, so kann man feststellen, dass bei der BRCS-SCH2-Variante in Abhängigkeit der Parametrisierung eine SafetyRisk zwischen 300 und 350 ms erzielt wird. Analog zu dem BRCS-CCH-Ansatz bietet die Konfiguration mit einem Service-Request-Intervall und einer Service-Dauer von 1000 ms die besten Ergebnisse. Bei einer Konfiguration mit einem Service-Request-Intervall von 500 ms und einer Service-Dauer von 1000 ms werden vergleichsweise die schlechtesten Werte für die SafetyRisk erzielt. Im Gegensatz dazu ist bei dem BRCS-SCH1 zwischen den einzelnen Parametrisierungen kein nennenswerter Unterschied festzustellen. Alle drei Konfigurationen erreichen eine SafetyRisk von $\approx$ 250 ms, die etwas besser ist als bei der BRCS-SCH2-Variante.

Abbildungen 6.10 und 6.11 zeigen die entsprechende Anzahl von Nachrichten, die durch die jeweiligen Service-Varianten generiert werden. Grundsätzlich ist zwischen BRCS-SCH2 und BRCS-SCH1 kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Es ist lediglich zu sehen, dass bezüglich der Service-Beacons die BRSC-SCH1-Variante bei den entsprechenden Konfigurationen stets etwas höher liegt als die BRCS-SCH2-Variante. Im allgemeinen wird deutlich, dass bei beiden Varianten die Service Beacons ein hohe Kommunikationslast auf den Service-Kanälen generieren. Obwohl sich die Nachrichtenanzahl nicht merklich voneinander unterscheidet, ist trotzdem eine bessere Performance bei der BRCS-SCH1-Variante zu verzeichnen. Auch hier kann die schlechtere Performance auf dem SCH2 sowohl auf den entstehenden ACI-Effekt wie auch auf die verringerte Sendeleistung zurückgeführt werden.

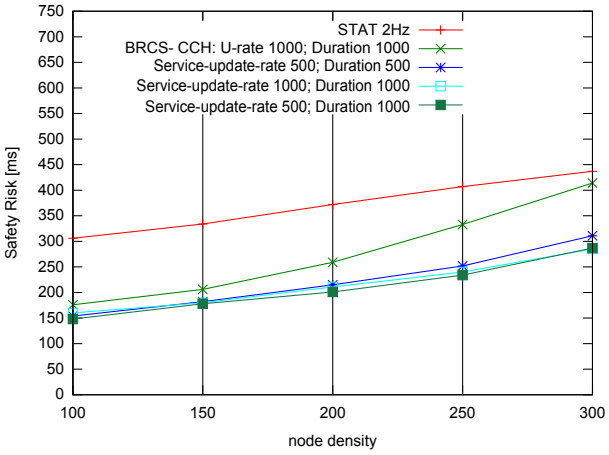


Abbildung 6.12: SafetyRisk: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz)

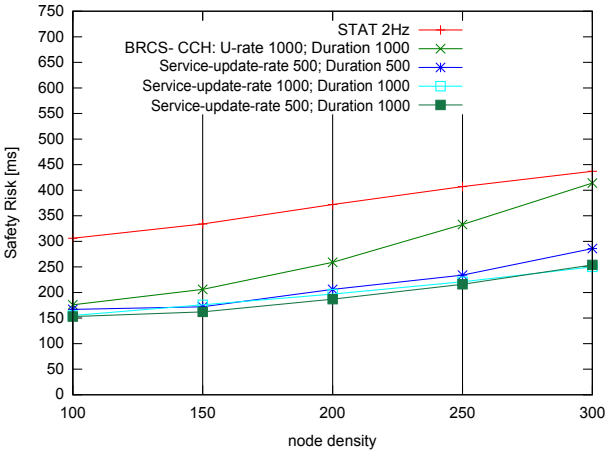


Abbildung 6.13: SafetyRisk: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz)

Evaluierung des BRCS für eine Service-Beacon-Wiederholrate von 4 Hz

Die Abbildungen 6.12 und 6.13 stellen die Evaluierungsergebnisse für die beiden BRCS-Mehrkanal-Varianten unter Nutzung einer Service-Beacon-Wiederholrate von 4 Hz dar. Es zeigt sich, dass sowohl die Ergebnisse für BRCS-SCH2 (siehe 6.12) als auch für BRCS-SCH1 (siehe Abbildung 6.13) eine deutliche Verbesserung in Relation zum statischen Beaconing liefern. Diese beträgt in etwa 100 ms bis 150 ms. Weiterhin erzielen die Mehrkanal-Varianten speziell bei höheren Fahrzeugdichten ab 200 Fahrzeugen eine signifikante Verbesserung der SafetyRisk gegenüber der BRCS-CCH-Variante. Im Unterschied zu BRCS-SCH2 kann durch die Nutzung des SCH1 in der BRCS-SCH1 sogar eine SafetyRisk von 250 ms für 300 Fahrzeuge erzielt werden. Wie bereits bei der BRCS-CCH Variante in Abbildung 4.16 dargestellt, liefert auch hier die Konfiguration mit einem Service-Request-Intervall und einer Service-Dauer von 500 ms etwas schlechtere Ergebnisse als die Konfigurationen der restlichen Parametrisierungen.

Betrachtet man die in Abbildung 6.14 und 6.15 dargestellte Nachrichtenanzahl der entsprechenden Service-Varianten, so wird deutlich, dass im Vergleich mit der 10Hz-Service-Beacon-Wiederholrate deutlich weniger Nachrichten auf den Kommunikationskanälen generiert werden. Speziell die Anzahl der Service Beacons auf den Service-Kanälen kann hier signifikant reduziert werden, wobei die Anzahl der Service-Request-Nachrichten gleich bleibt. In diesem Zusammenhang merkt man auch einen geringfügigen Einfluss der reduzierten Sendeleistung auf dem SCH2 und dessen direkte Nachbarschaft zum CCH.

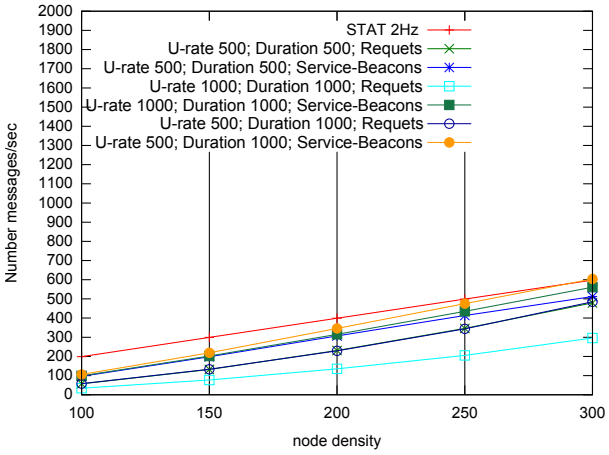


Abbildung 6.14: Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH2-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz)

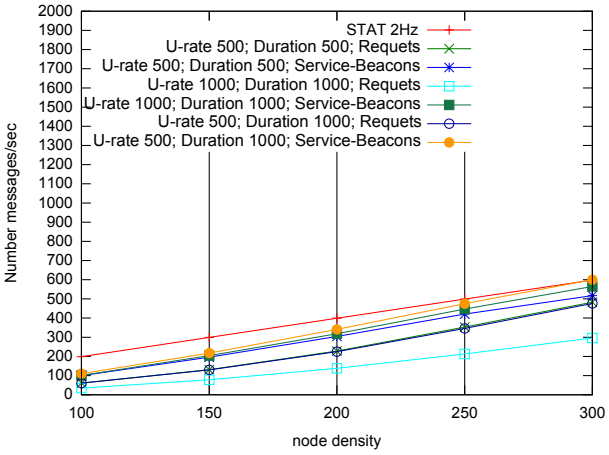


Abbildung 6.15: Nachrichtenanzahl: BRCS-SCH1-Variante (Service-Beacon-Rate=4Hz)

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der serviceorientierte Mehrkanal-Beaconing-Ansatz vorgestellt, welcher die in Kapitel 4 diskutierte Einkanal-Variante erweitert. Durch diese Erweiterung ist es möglich, die Erbringung des jeweiligen Services und somit das Versenden von Service-Beacons auf dedizierte Kommunikationskanäle auszulagern. Auf diese Kanäle können dann adressierte und an dem Service interessierte Fahrzeuge ihre Funkradios einstellen. Ist ein Fahrzeug an den Inhalten nicht interessiert, so kann es auf einem anderen Kanal senden und hören. Dadurch wird neben der Lastverteilung auch der globale Nutzen im Netzwerk erhöht. Im Speziellen wurden der definierte Beacon Forwarding Service und der Beacon Rate Conrol Service jeweils auf den Kanälen SCH2 und SCH1 betrachtet. Hierbei bildet der SCH2 einen direkt benachbarten Kanal zum CCH und muss aufgrund der Untersuchungen in Kapitel 5 mit reduzierter Sendeleistung betrieben werden. Der SCH1 ist nicht direkt zum CCH benachbart und kann mit gleicher Sendeleistung wie der CCH betrieben werden.

Alle untersuchten Mehrkanal-Varianten wiesen deutliche Verbesserungen im Hinblick auf die Kriterien des Informationsdurchsatzes und der Skalierbarkeit im Vergleich zur Einkanal-Variante auf. Die qualitative Beurteilung der Ansätze in Tabelle 7.1 zeigt, dass der BFS innerhalb eines Betrachtungsradius von 200 m sowohl für die BFS-SCH1- als auch die BFS-SCH2-Varianten zufriedenstellende Ergebnisse liefert, obwohl bei BFS-SCH2 eine etwas höhere Last auf dem Service-Kanal generiert wird. Die durch die Service-Request-Nachrichten erzeugte Last auf dem CCH ist im Hinblick auf die Kompatibilität noch als zufriedenstellend einzustufen. Die Ergebnisse für den Betrachtungsradius von 300 m lassen allerdings einen deutlichen Unterschied zwischen BFS-SCH1 und BFS-SCH2 erkennen. Während BFS-SCH1 noch akzeptable Werte im Hinblick auf den Informationsdurchsatz, die Skalierbarkeit und die Kompatibilität liefert, ist der BFS-SCH2 für diesen Batrachtungsradius nicht mehr geeignet.

Auch die Mehrkanal-Varianten des BRCS erzielen im Vergleich zur Einkanal-Variante

	Nutzen (lokal)	Nutzen (global)	Informations-durchsatz	Skalierbar-keit	Kompatibi-lität
BFS-SCH1-100	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-100	+	+	+	+	+
BFS-SCH1-200	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-200	+	+	+	+	+
BFS-SCH1-300	+	+	+	o	o
BFS-SCH2-300	+	+	o	-	-
BRCS-SCH1-4Hz	+	+	+	+	+
BRCS-SCH2-4Hz	+	+	+	+	+
BRCS-SCH1-10Hz	+	+	+	+	-
BRCS-SCH2-10Hz	+	+	+	o	-

Tabelle 6.1: Beurteilung der Mehrkanal-Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen

deutlich bessere Ergebnisse. Es wurde verdeutlicht, dass die Ergebnisse für eine Service-Beacon-Wiederholrate von 4 Hz ähnlich gute Ergebnisse für die Mehrkanal-Varianten liefern wie eine 10Hz-Wiederholrate. Letztere kann sogar bei einer Fahrzeugdichte von bis zu 200 Fahrzeugen leichte Verbesserungen erzielen. Allerdings sollte diese aufgrund der hohen generierten Nachrichtenanzahl an Service-Beacons nicht bei hohen Fahrzeugdichten verwendet werden. Hier ist eher eine Service-Beacon-Wiederholrate von 4 Hz zu empfehlen. Da auch bei dieser Konfiguration keine relevanten Unterschiede zwischen BRSC-SCH2 und BRSC-SCH1 zu erkennen sind, können beide Varianten gleichermaßen angewendet werden.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass durch den situationsadaptiven Beaconing-Ansatz unter Nutzung von mehreren Kommunikationskanälen trotz einer relativ niedrigen Standard-Beacon-Wiederholrate von 2 Hz, eine deutliche Verbesserung im Hinblick auf die Erreichung der Anforderungen kooperativer Sicherheitsanwendungen ermöglicht wird. Dies gilt sowohl in der Kollisionserkennungs- als auch in der Kollisionsvermeidungsphase. Lediglich in Bezug auf den Betrachtungsradius von 300 m in der Kollisionserkennungsphase konnten keine durchgängig zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass in den bisher betrachteten Simulationsszenarien die Kenntnis über alle sich in diesem Radius befindlichen Fahrzeuge gefordert war. Somit war es nicht möglich, einzelne Fahrzeuge aus der Betrachtung auszuschließen, die grundsätzlich keine Kollisionsgefahr darstellen, da sie sich z.B. von dem Betrachtungsfahrzeug wegbewegen. Um eine solche Selektivität zu erreichen, ist ein Konzept zur zuverlässigen Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit notwendig. Ist dieses gegeben, kann auch eine korrekte Identifizierung der Fahrzeuge vorgenommen werden, die tatsächlich als potenzielle Kollisionspartner betrachtet werden. Dies führt zu einer reduzierten Nachfrage im Beacon Forwarding Service und die Interferenzen auf dem Kommunikationskanal sinken. Die Evaluierung des Beacon Forwarding Services auf der Basis der Idee einer erhöhten Selektivität wird in dem folgenden Kapitel vorgenommen.

Kapitel 7

Selektivität bei der Kollisionserkennung

Die Evaluierung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes hat gezeigt, dass eine deutliche Verbesserung im Hinblick auf den Informationsdurchsatz erzielt werden kann. Dies wird ermöglicht indem das Aussenden von Beacons durch aktives Nachfragen in Abhängigkeit des Nutzens gesteuert wird. Somit kann jedes Fahrzeug, welches an den Positions- bzw. Zustandsinformationen eines Nachbarfahrzeugs interessiert ist, anhand einer Service-Request-Nachricht das erneute Senden oder das Weiterleiten von Beacons bei seinen Nachbarn initiieren.

Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass in Situationen, in denen eine hohe Anzahl an zu beobachtenden Fahrzeugen existiert, auch die Menge an Service-Requests zunimmt und Last auf dem Kommunikationskanal verursacht wird. Dieses wirkt sich wiederum negativ auf die Zuverlässigkeit einer Nachrichtenübertragung aus und verringert den gewünschten Informationsdurchsatz. Dieses trifft vor allem zu, wenn der Betrachtungsradius des Beacon Forwarding Services steigt und gleichzeitig die Fahrzeugdichte zunimmt. In solchen Situationen nimmt trotz der Lastverteilung auf die Kanäle SCH2 und SCH1 die Awareness-Qualität ab.

Um das zu verhindern, wäre es sinnvoll zu wissen, mit welchen Fahrzeugen in unmittelbarer Zukunft grundsätzlich keine Kollisionsgefahr besteht, um diese aus der Menge der zu beobachtenden Fahrzeuge zu eliminieren. Wäre die Umsetzung einer solchen Selektivität möglich, so wäre es nicht mehr notwendig, durchgängig alle Beacon-Informationen jedes Nachbarn zu erhalten bzw. anzufragen. Typische Szenarien wären beispielsweise die Fälle, in denen ein beobachtetes Fahrzeug über eine Brücke fährt, frühzeitig abbiegt oder an einer Ampel stehen bleibt und somit die Fahrspur des Beobachters nicht kreuzen würde. Des Weiteren könnte man die Selektivität auf der Basis von Ausschlussverfahren erhöhen, die z.B. besagen, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit zwischen zwei Fahrzeugen, die durch weitere Fahrzeuge oder Ampeln getrennt sind, sinkt. Demnach wären diese Fahrzeuge in der jeweils aktuellen Situation keine potenziellen Kollisionspartner und somit aus der Beobachtung ausgeschlossen.

Um eine derartige Selektion vornehmen zu können, ist die Menge an Informationen

entscheidend. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass je höher die Anzahl an Kontextinformationen ist, desto höher ist die Zuverlässigkeit der Auswahl von potenziellen Kollisionspartnern. Geht man allerdings davon aus, dass alle diese Informationen über das Netzwerk verbreitet werden, so belastet dies den Kanal signifikant.

Zur Lösung des Problems wird in diesem Kapitel das Konzept der senderseitigen Fahrstreckenprognose betrachtet, welches auszugsweise bereits in dem Beacon-Format von SAE [99] vorgesehen ist. Dieser Ansatz beruht darauf, dass jedes Fahrzeug entgegen den bisher diskutierten Ansätzen seine potenzielle Fahrstrecke selber schätzt und als Teil seines Beacons den Nachbarfahrzeugen mitteilt.

Es wird eine genaue Betrachtung der Vorteile und Möglichkeiten dieses Ansatzes vorgenommen und die resultierende Nachrichtengröße betrachtet. Dazu werden zwei unterschiedliche Paketformate definiert, die es erlauben eine abstrakte Fahrstreckenvorhersage umzusetzen.

Abschließend wird die Betrachtung unterschiedlicher Selektivitätsgrade untersucht und die damit erzielte Awareness-Qualität sowohl für den statischen als auch für den serviceorientierten Ansatz analysiert.

7.1 Positionsgenauigkeit

Die Genauigkeit der Vorhersage einer Fahrzeugposition zu einem definierten Zeitpunkt hängt von mehreren Faktoren ab. Insbesondere ist das Alter einer Information entscheidend, auf deren Basis eine Fahrstrecke kalkuliert wird. Je älter die Information, desto ungenauer die Vorhersage, was durch die hohe Dynamik der Fahrzeuge im Starßenverkehr bedingt ist. Dazu zählt sowohl die Individualität eines jeden Autofahrers, der abhängig von seiner Gewohnheit oder emotionalen Entscheidungen die entsprechende Fahrtroute wählt, als auch die uneinheitliche Straßentopologie. Daher wird im Folgenden bei der Vorhersage der Fahrzeugposition grundsätzlich zwischen zwei Kernaspekten unterschieden:

- Fahrtroutenschätzung
- Fahrtdistanzschätzung

Die Fahrtroute beschreibt hierbei eine geographische Trajektorie, die einem realen Straßenverlauf entsprechen soll. Dies ist notwendig, um bei einer Schätzung geographische Punkte auszuschließen, die ein Fahrzeug nicht einnehmen kann, da es sich z.B. um keine befahrbare Fläche handelt. Im nächsten Schritt soll auf dieser Fahrtroute die Position zum bestimmten Zeitpunkt berechnet werden. Dabei sind unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen, die einen hohen Einfluss auf das Fahrverhalten haben können. Beispielsweise sind starkes Abbremsen, ein Abbiegewunsch oder Stausituationen zu nennen, die die Vorhersage einer Fahrzeugposition auf der Fahrtroute erschweren.

Eine erste Berechnung der Fahrtroute kann mit der Menge von Kontextattributen durchgeführt werden, welche bereits in der standardisierten CAM-Nachricht enthalten sind [76]. Dazu zählen z.B. die aktuelle Position p, die Richtung h, die Geschwindigkeit v, die

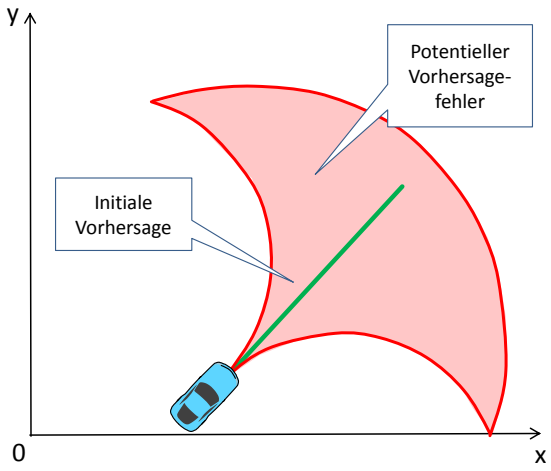


Abbildung 7.1: Fahrstreckenvorhersage basierend auf Standard-Beacon-Attributen

Beschleunigung a und die Gierrate y. Auf Basis dieser Attribute kann man eine zurückzulegende Strecke s über ein Zeitintervall t wie folgt berechnen:

$$s = \frac{1}{2}(a * t)^2 + v * t \tag{7.1}$$

Weiterhin kann man anhand des Lenkwinkels, der Richtung und der Gierrate eine Kreisbahn berechnen (siehe [118]), auf der sich ein Fahrzeug bewegen kann.

Es ist allerdings zu beachten, dass diese Berechnung nur durchführbar ist, wenn alle Parameter über das betrachtete Zeitintervall t konstant sind. Somit ist nicht abgebildet, dass Fahrzeuge wegen einer roten Ampel oder eines bremsenden Fahrzeugs ihre Geschwindigkeit oder ihre Richtung ändern. Genau dieser Aspekt ist aber in der Realität, vor allem in innerstädtischen Szenarien, z.B. aufgrund von Straßengeometrien, Verkehrsdichten und des individuellen Fahrerverhaltens zu erwarten. In diesem Fall wäre es notwendig, einen Lösungsraum aufzuspannen, welcher die maximale Änderung der Parameter über die Zeit abbildet und somit jede wahrscheinliche Position des Fahrzeugs enthält. Dies ist schematisch in Abbildung 7.1 illustriert. Es ist zu erkennen, dass ein solcher Ansatz nicht zu einer zufriedenstellenden Vorhersage der Fahrtstrecken führen kann, da der Vorhersagefehler zu groß werden kann. Um diesen Fehler zu minimieren, müssen entweder die Vorhersagedauer verkürzt oder weitere Informationen für die potenzielle Änderung der Parameter über die Zeit betrachtet werden.

Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit einer Vorhersage der Positionsinformationen acc_σ können sich bei den Anwendungen unterscheiden. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, die Genauigkeit für Positionsvorhersagen für kooperative Sicherheitsanwendungen zu definieren. Vielmehr soll ein Konzept zur Optimierung der Vorhersagequalität von Fahrstrecken analysiert werden, welches gleichzeitig nur einen minimalen Overhead bzgl. der Nachrichtengröße generiert. Dieses Konzept soll flexibel für die jeweiligen Anforderungen der Anwendungen angepasst werden können. Der Schwellenwert σ bezeichnet die Abweichung zwischen einer reellen Position pos_r und der vorhergesagten Position pos_v eines

Fahrzeugs zu einem bestimmten Zeitpunkt t. Die Gleichung (7.3) stellt den Zusammenhang im Detail dar. Die Genauigkeit einer vorhergesagten Position acc_σ wird hierbei auf einen Wert im Intervall von [0;1] normiert. Zur Berechnung von acc_σ wird zunächst eine Distanzfunktion $dist(x, y)$ definiert. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich bei den Variablen x und y um Punkte auf der Erdkugel handelt deren Abstand berechnet werden soll, liegt es nahe, die Distanz anhand der Orthodorme durchzuführen. Die Orthodorme beschreibt dabei die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer Kugel und wird mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie berechnet. In unserem Fall gehen wir allerdings davon aus, dass die Abweichung nur wenige Meter beträgt und somit die Krümmung der Erdkugel vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund dient die Euklidische Distanz zweier Punkte als Distanzfunktion. Demnach gilt:

$$dist(pos_v, pos_r) = \sqrt{(pos_{v_1} + pos_{r_1})^2 + ... + (pos_{v_n} + pos_{r_n})^2} \tag{7.2}$$

Die Normierung von acc_σ wird vorgenommen, indem die Entfernung zwischen der reellen Position und der berechneten Position im Verhältnis zu der maximal zulässigen Abweichung σ gestellt wird und der Quotient von dem Wert 1 abgezogen wird. Dieses gilt allerdings nur für $dist(pos_v, pos_r) \leq \sigma$. Überschreitet die Abweichung den geforderten Schwellenwert $dist(pos_v, pos_r) > \sigma$, so ist das Ergebnis 0. Es gilt:

$$acc_\sigma = \begin{cases} 1 - \frac{dist(pos_v, pos_r)}{\sigma} & for\ dist(pos_v, pos_r) \leq \sigma \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{7.3}$$

Somit strebt acc_σ gegen 1, wenn die Abweichung zwischen pos_v und pos_r klein ist, und gegen 0 wenn die Abweichung steigt bzw. $\geq \sigma$ ist.

Um die Genauigkeit der Vorhersage einer Fahrstrecke AoF zu berechnen, wird das arithmetische Mittel aus der Anzahl der betrachteten Positionen k zum jeweiligen Zeitpunkt t betrachtet.

$$AoF_\sigma(k) = \frac{\sum_{t=1}^{k} acc_\sigma(t)}{k} \tag{7.4}$$

Es ist offensichtlich, dass die Vorhersage der Fahrtstrecke bei gleichbleibendem σ von der Genauigkeit der Schätzung von pos_v abhängt. Diese ist in erster Linie durch die folgenden zwei Aspekte bedingt

1. Die Genauigkeit von acc_σ fällt mit der Funktion des zeitlichen Abstands zwischen dem Informationsalter und dem Vorhersagezeitpunkt t_i für jedes sich bewegende Fahrzeug. Offensichtlich ist die Genauigkeit höher, je kürzer das Intervall ist. Sie kann als folgende Relation abgebildet werden:

$$acc_\sigma(t_i) \geq acc_\sigma(t_{i+1}) \geq ... \geq acc_\sigma(t_{i+k}) \tag{7.5}$$

2. Die Genauigkeit einer Vorhersage acc_σ hängt des Weiteren von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Informationen ab. Somit kann AoF für den gleichen Vorhersagezeitpunkt erhöht werden, indem man eine größere Informationsbasis C_i zur Berechnung heranzieht. Dabei beschreibt i die Anzahl der zur Verfügung stehenden

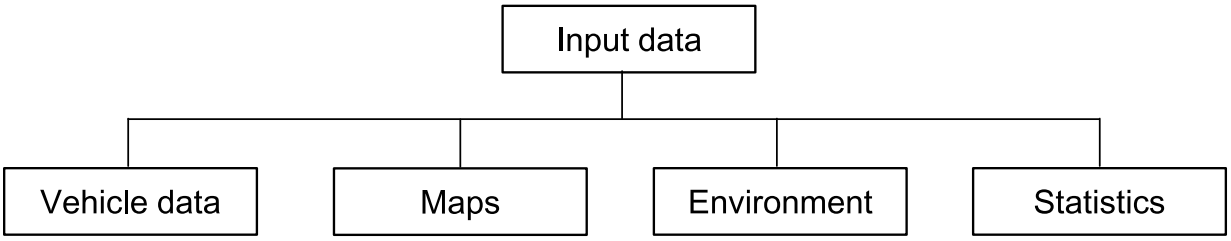


Abbildung 7.2: Definition relevanter Kontextklassen

Attribute. Es gilt die folgende Relation:

$$AoF_{\sigma,C_i}(k) \leq AoF_{\sigma,C_{i+1}}(k) \tag{7.6}$$

In der weiteren Betrachtung soll das senderseitige Konzept zur Vorhersage von Fahrtstrecken betrachtet werden, welches mit einer hohen Anzahl von Kontextattributen arbeitet. Im Folgenden sollen zur Vorhersage relevante Attribute diskutiert werden.

7.2 Kontextmodell

Die Menge der relevanten Kontextattribute ist der Schlüsselfaktor zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit über ein Fahrtstrecke. Abbildung 7.2 stellt die vier Hauptkontextklassen dar, welche zur Berechnung einer Positionsvorhersage in Betracht gezogen werden. Die hier präsentierten Kontextklassen erheben allerdings nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und können mit dem Fortschritt in der Sensor- und Technologieentwicklung in Zukunft ergänzt werden. In dieser Klassifizierung wird zwischen Sensorinformationen eines Fahrzeugs, digitalen Karten, Umfeldinformationen und Fahrerstatistiken unterschieden, auf deren Basis eine Bewegungs- und Fahrtroutenvorhersage abgebildet wird.

7.2.1 Digitale Karten

Zur Verbesserung der Schätzung einer Straßengeometrie ist die Zuhilfenahme von digitalen Karten ein vielversprechender Ansatz. Hierbei kann die existierende Straßengeometrie einfach anhand der hinterlegten Informationen aus der Karte entnommen werden (siehe Abbildung 7.3). Dieser Ansatz wird heute bereits in Navigationssystemen genutzt, um den kurzzeitigen Verlust eines GPS-Signals, z.B. in Tunneln oder Häuserschluchten, auszugleichen. Trotz allem stößt dieser Ansatz an seine Grenzen, wenn plötzlich mehrere mögliche Fahrtstrecken existieren, wie dies z.B. an einer Kreuzung der Fall ist. An dieser Stelle sind weitere Informationen notwendig, um die tatsächliche bzw. sehr wahrscheinliche zukünftige Fahrtroute eines Fahrzeugs zu bestimmen. Ein Ansatzpunkt kann die Nutzung von Navigationssysteminformationen sein (siehe Abbildung 7.4).

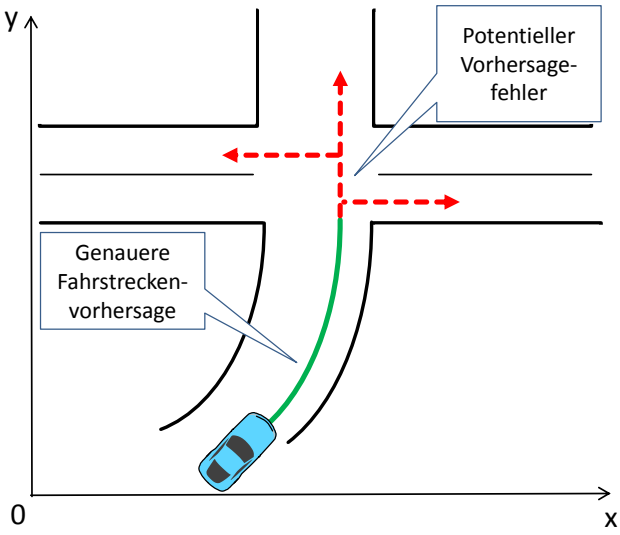


Abbildung 7.3: Fahrtstreckenvorhersage mit digitalen Karten

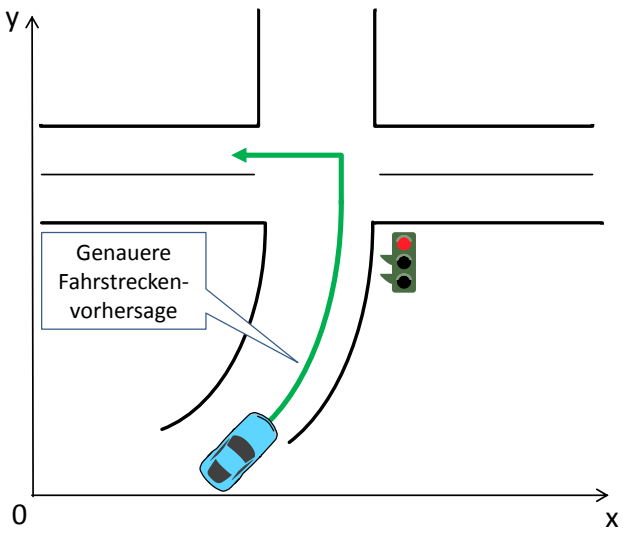


Abbildung 7.4: Fahrtstreckenvorhersage mit erweitertem Wissen

7.2.2 Fahrzeugumfeld

Die Vorhersage der genauen Fahrzeugposition auf einer Fahrtroute stellt einen weiteren Kernaspekt der Positionsschätzung dar. Wie bereits erwähnt, kann die Bewegung eines Fahrzeugs anhand der Formel (7.1) berechnet werden, wenn die Parameter wie z.B. Geschwindigkeit und Beschleunigung konstant sind. In einer realen Fahrtsituation können diese allerdings nicht als konstant angenommen werden und unterliegen ständigen Veränderungen. Aufgrund dessen ist es notwendig, zusätzliche Informationen über das existierende Umfeld eines Fahrzeugs zu betrachten. Hierbei kann das Wissen über die existierende Anzahl von Nachbarn im definierten Radius oder deren Bewegungsparameter hinzugezogen werden. Somit kann man ableiten, ob und wie viele Fahrzeuge sich vor einem selbst befinden und mit welcher Geschwindigkeit sich diese fortbewegen. Ist ein Fahrzeug in unmittelbarer Nähe auf der eigenen Fahrbahn, welches z.B. zum Stehen gekommen ist um einzuparken, ist es wahrscheinlich, dass man selber einen Bremsvorgang oder ein Ausweichmanöver einleitet. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Bewegungsvorhersage. Weiterhin können Informationen über aktuelle Ampelphasen, z.B. über die damit verbundenen Rot- oder Grünzeiten, genutzt werden, um zu bestimmen, ob ein Fahrzeug potenziell an einer Ampel stehen bleibt oder gar beschleunigt, um noch über die grüne Ampel zu kommen. Ähnliches gilt für Informationen über Baustellen, Lichtsignalanlagen mit wechselnden Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Bahnübergänge. Diese Information kann man den zyklisch versendeten Beacon-Nachrichten der jeweiligen Nachbar- und Infrastrukturknoten entnehmen.

7.2.3 Fahrzeugdaten

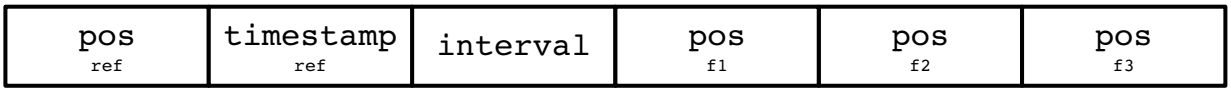
Bei fahrzeugbezogenen Informationen kann grundsätzlich zwischen statischen und dynamischen Daten unterschieden werden.

Statische Daten beschreiben Attribute, die sich potenziell über einen längeren Zeitraum, z.B. eine Fahrt, nicht ändern. In diesem Sinne werden Attribute wie Fahrzeugtyp, Fahrzeugdimensionen, Motorleistung und Bremskraft als statisch betrachtet. Obwohl die Werte dieser Attribute sich nicht oft ändern, stellen sie einen relevanten Eingangswert für die Berechnung von Kollisionswahrscheinlichkeiten dar. Beispielsweise können die Länge und der Typ eines Fahrzeugs dafür entscheidend sein, ob man mit dem Fahrzeug kollidiert oder nicht. Wenn man speziell zwischen LKWs mit Anhänger und PKWs ohne Anhänger unterscheidet, kann dies relevant sein. Somit muss man statische Daten eines Fahrzeugs mindestens ein Mal empfangen haben, um diese Werte lokal abspeichern zu können.

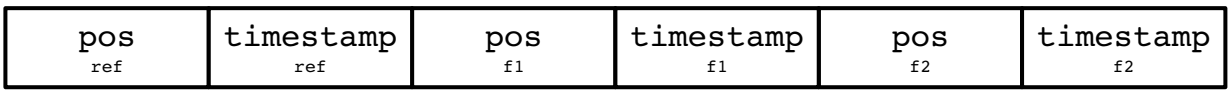
Im Gegensatz zu statischen Informationen können dynamische Daten als sich häufig ändernde Informationen verstanden werden. Demnach können alle elektronischen Sensoren, die im Fahrzeug verbaut werden, als dynamische Datenbereitsteller angesehen werden. Hierbei ist es unerheblich, ob diese Sensoren zyklisch, z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit, oder ereignisorientiert, z.B. ABS-Informationen, bereitstellen. Neben der Standard-Sensorik wie z.B. Blinker, Bremspedal und Motorzustand können auch erweiterte Sensoren wie z.B. Radar und Video- oder Wärmekameras ausgewertet werden. Vor allem können Letztere bei der Vorhersage von Fahrtbewegungen vorteilhaft sein, indem beispielsweise Informationen über unvorhergesehene Ereignisse (Gegenstände oder Personen auf der Fahrbahn) liefern und somit auf das Bremsverhalten schließen lassen.

7.2.4 Statistiken

Ein weiterer Eingangsparameter zur Berechnung der Fahrstrecke ist die Auswertung von individuellen Fahrerprofilen, basierend auf erstellten Statistiken. Unter Berücksichtigung des individuellen Verhaltens eines Fahrers kann auf dessen Reaktion in bestimmten Situationen geschlossen werden. Betrachtet man z.B. einen Fahrer mit einem sportlichen Fahrstil, ist es eher wahrscheinlich, dass dieser, unter Berücksichtigung der Verkehrsregeln, versuchen wird, über eine gelbe Ampel zu kommen. Im Gegensatz dazu würde ein eher defensiver Fahrer potenziell abbremsen und erst nach der Rotphase weiterfahren. Anhand der Profilinformationen kann man eine individuelle Berechnung der Fahrtstrecken für jede einzelne Person durchführen. Des Weiteren kann die Auswertung der Profile dazu beitragen, wahrscheinliche Fahrtrouten zu bestimmen, welche sich auch in Abhängigkeit eines bestimmten Wochentags und der Tageszeit ändern. Beispielhaft sind hier die bevorzugten Fahrtrouten zur Arbeit oder nach Hause zu nennen. Im Speziellen muss allerdings statistisches Wissen über längere Zeiträume aufgebaut werden. Würde man diese Menge an Daten an alle seine Nachbarn kommunizieren, würde dies eine hohe Last auf dem Kommunikationskanal verursachen.



(a) Paketformat mit festem Zeitintervall



(b) Paketformat mit fariablen Zeitintervallen

Abbildung 7.5: Paketformate für die Übertragung von Fahrtstreckenvorhersagen

7.3 Senderseitige Extrapolation

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, kann die Genauigkeit einer Positionsvorhersage durch die Anzahl der zugrundegelegten Kontextinformationen verbessert werden. Wendet man dieses Prinzip jedoch für den empfängerbasierten Ansatz zur Fahrtstreckenextrapolation an, so impliziert dies, dass jeder Knoten die beschriebenen Kontextinformationen innerhalb eines Beacons seinen Nachbarn zur Verfügung stellen müsste. Dies würde zwangsläufig zu einer erhöhten Nachrichtengröße führen und weitere Last auf dem Kommunikationskanal generieren.

Um die Last zu reduzieren und trotzdem die erhöhte Genauigkeit der Fahrtstreckenberechnung umsetzen zu können, kann ein senderseitiger Ansatz genutzt werden. Hierbei wird die wahrscheinliche Fahrtroute von jedem Fahrzeug selbst berechnet und die entsprechende Schätzung der Positionen zu bestimmten Zeitpunkten lediglich als Ergebnis der Berechnung den Nachbarknoten mitgeteilt. Des Weiteren kann ein generisches Paketformat definiert werden, welches es erlaubt, unabhängig von den zur Verfügung stehenden Kontextinformationen die Berechnungen zu dekodieren. In dem hier vorliegenden Fall wird dafür die Darstellung einer Extrapolation als Reihe von Wegpunkten gewählt, wo jeder Wegpunkt eine Position und einen zugehörigen Zeitstempel besitzt. Dieses Darstellungsformat erlaubt es, die Rohdaten der Kontextinformationen ausschließlich auf dem Sender auszuwerten und in bereits interpretierter und komprimierter Form zu übertragen.

7.4 Paketformat

Die Übertragung aller vorhergesagten Positionen innerhalb einer Beacon-Nachricht bedarf eines passenden Nachrichtenformats. Es ist darauf zu achten, dass das Format eine Vorhersage effizient abbilden kann, da die Reduktion der Nachrichtengröße einen entscheidenden Faktor in drahtlosen Netzen darstellt. Abhängig von den Zeitintervallen zwischen den jeweiligen vorhergesagten Positionen können zwei grundlegende Ansätze für das Paketformat gewählt werden, welche unterschiedliche Nachrichtengrößen ergeben. Im Folgenden sollen sowohl die Formate und die Größe der Nachrichten genauer betrachtet werden.

Abbildung 7.5(a) stellt ein erstes Paketformat dar, welches ein festes Zeitintervall

zwischen den aufeinander folgenden Positionselementen benutzt. Hierbei beschreiben die ersten beiden Felder des Datenformats die aktuelle Position pos_{ref} und den Zeitpunkt $timestamp_{ref}$ des Senders, an dem die Prädiktion generiert worden ist. Um den Empfänger über das gewählte Zeitintervall zu informieren, wird dieses als drittes Element *interval* im Paket definiert. Die nachfolgenden Segmente beschreiben die vorhergesagten Positionen pos_{fi} z.B. als Geo-Koordinaten. Bei dem gegebenen Paketformat kann der Empfänger nun berechnen, wann der Sender welche vorhergesagte Position erreicht, und kann aufgrund dessen potenzielle Kollisionen berechnen.

Die Paketgröße kann für dieses Paketformat wie folgt berechnet werden:

$$s_{packet1} = s_{pos} * (n + 1) + s_{ts} + s_i \tag{7.7}$$

Die Paketgröße s ist demnach abhängig von der Anzahl n der vorhergesagten Positionen, der Bit-Größe einer einzelnen Position s_{pos}, der Größe des Zeitstempels s_{ts} und der Größe des Intervall-Feldes s_i.

Um die Paketgröße weiterhin zu reduzieren, ist es möglich, die Positionen als relative Werte in Bezug auf die Position pos_{ref} zu definieren, anstatt absolute Werte für Geo-Koordinaten zu benutzen. Relative Positionsangaben (Δpos_{fi}) benötigen zur Kodierung weniger Bit als absolute Werte pos_{fi}, da sie typischerweise lediglich wenige Meter abbilden müssen. Nimmt man nämlich eine Relativgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge von bis zu 700 $\frac{km}{h}$ an, so bewegen sich die beiden Fahrzeuge in einer Sekunde weniger als 200 Meter. WGS64-Koordinaten hingegen müssen mehrere 1000 km abdecken und brauchen demnach auch eine höher Anzahl an Bits. Unter der Annahme der Nutzung von relativen Positionsangaben ist die folgende Berechnung der Paketgröße gegeben, wobei $s_{\Delta pos} < s_{pos}$ gilt.

$$s_{packet1\Delta} = s_{pos} + s_{ts} + s_i + s_{\Delta pos} * n \tag{7.8}$$

Nimmt man an, dass ein Fahrzeug über einen längeren Zeitraum mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Strecke fährt (z.B. unter Benutzung eines Tempomats auf geraden Autobahnabschnitten) und dann erst zu einem bestimmten Zeitpunkt seine Richtung ändert, so ist es sinnvoll, ein Nachrichtenformat zu definieren, welches es erlaubt, diese Gegebenheit abzubilden. Ein weiteres Szenario kann das Halten an einer roten Ampel sein, wo sich die Position des Fahrzeug über mehrere Sekunden nicht verändert. Mit dem vorgestellten Paketformat und den festen Zeitintervallen, wäre es aber notwendig, jede einzelne Position zwischen dem Startpunkt und dem Punkt der Richtungsänderung in der Nachricht zu definieren. Dieser Ansatz würde aber keinen Mehrwert an Informationen liefern, da man die Positionen des Fahrzeugs zwischen den genannten Punkten auch auf der Empfängerseite aus der Länge der Strecke und der benötigten Zeit korrekt berechnen könnte. Deshalb wird ein weiterer Ansatz eines möglichen Paketformats in Abbildung 7.5(b) dargestellt. Dieses Format nutzt im Gegensatz zum vorhergehenden Format keine festen Zeitintervalle. Hier werden vielmehr für jede Position innerhalb der Positionskette einzelne Zeitstempel verwendet. Dadurch wird erreicht, dass lediglich die relevanten Positionsinformationen übertragen werden, welche einen tatsächlichen Informationswert beinhalten. Hierbei ist lediglich der Anfangs- und Endpunkt der Strecke von Interesse. Die Paketgröße

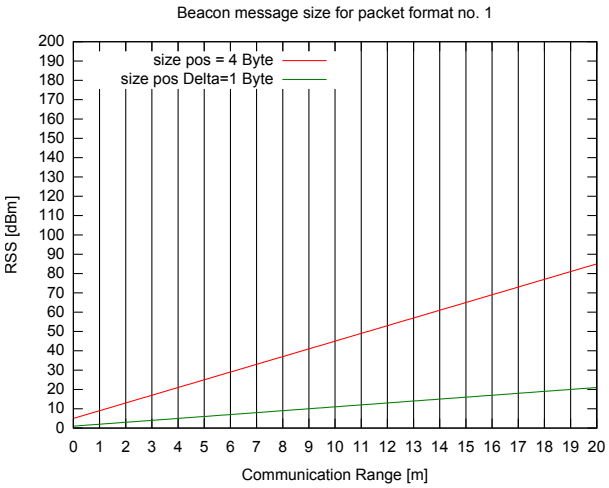


Abbildung 7.6: Größe des generierten Overheads durch das Paketformat 7.5(a)

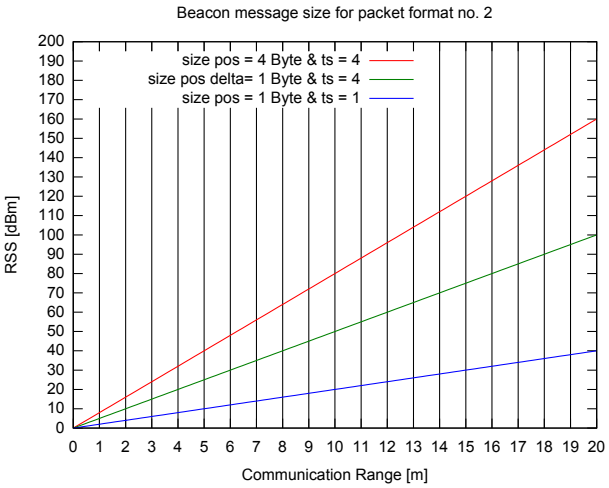


Abbildung 7.7: Größe des generierten Overheads durch das Paketfomat 7.5(b)

s kann demnach wie folgt berechnet werden:

$$s_{packet2} = (n+1) * (s_{pos} + s_{ts}) \tag{7.9}$$

Gemäß des vorgestellten Ansatzes zur Positionsdefinition mit Hilfe von Relativangaben können auch im zweiten Paketformat Bytes eingespart werden:

$$s_{packet2\Delta} = s_{pos} + s_{ts} + n * (s_{\Delta pos} + s_{ts}) \tag{7.10}$$

Um die Paketgröße weiter zu reduzieren, können zusätzlich relative Zeitangaben in Bezug auf den initialen Zeitstempel verwendet werden. Da es sich bei den Zeitintervallen wiederum um wenige Sekunden handelt, können durch die Nutzung der relativen Angaben weitere Bytes eingespart werden:

$$s_{packet2\Delta} = s_{pos} + s_{ts} + n * (s_{\Delta pos} + s_{\Delta ts}) \tag{7.11}$$

Die Abbildungen 7.6 und 7.7 zeigen die verursachte Paketgröße der jeweiligen definierten Paketformate unter Berücksichtigung der einzelnen Kodierungen von Positionen und Zeitstempeln. Diese sind in den Abbildungen durch die Parameter *sizepos* und *sizets* dargestellt. Bei der Berechnung werden grundsätzlich zwei Größen für die Parameter angenommen. Zum einen jeweils 4 Byte, was der typische Kodierung von WGS64-Koordinaten und Zeitstempeln entspricht. Zum anderen 1 Byte, was die komprimierten Parameter darstellt. Letzteres beruht auf der Basis des in [100] vorgestellten Komprimierungsverfahrens.

Es sei darauf hingewiesen, dass lediglich die Größe der Vorhersage abgebildet wird, die zu der eigentlichen Paketgröße eines Standard-Beacons addiert werden muss. Es wird davon ausgegangen, dass die Informationen über pos_{ref} und $timestamp_{ref}$ nicht nochmal in der Prädiktion übertragen werden. Wie die Abbildungen 7.6 und 7.7 zeigen, können durch die Optimierung der Relativangaben für Positionen und einen Zeitstempel mit nur

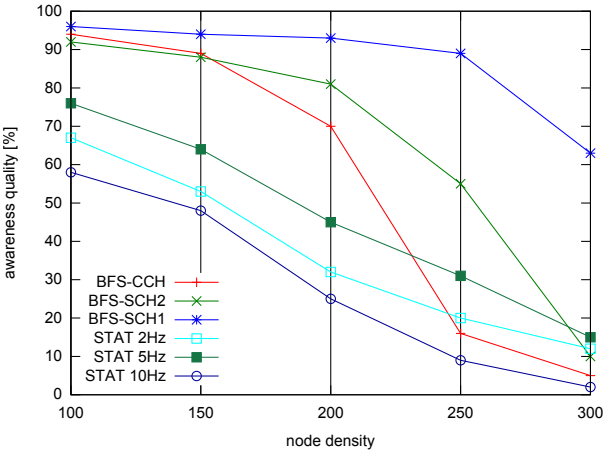


Abbildung 7.8: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; α=100%)

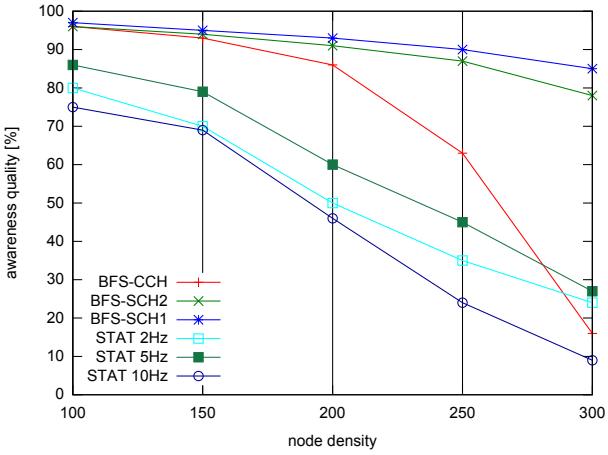


Abbildung 7.9: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; α=100%)

wenigen Bytes bis zu 20 Punkte vorhergesagt werden. In Abhängigkeit des Paketformates kann darüber hinaus ein beliebiger Vorhersagezeitraum kodiert werden. Im Falle das Paketformats 7.5(b) können somit mehrere Minuten oder Stunden abgebildet werden. Die Entscheidung für die Nutzung der jeweiligen Formate kann vom Sender individuell getroffen werden.

7.5 Evaluierung

Der diskutierte senderseitige Ansatz ermöglicht eine Verbesserung der Genauigkeit der Berechnung von geschätzten Positionen einer Fahrstrecke. Diese kann dadurch erreicht werden, dass alle auf einem Fahrzeug zur Verfügung stehenden Informationen für eine Positionsschätzung verwendet werden können. Durch die Tatsache, dass lediglich die interpretierten Rohdaten in Form eines generischen Formats von Positionsketten über die Luftschnittstelle an die Nachbarn kommuniziert werden, kann mit diesem Ansatz, im Gegensatz zur Übertragung von einzelnen Rohdaten, auch eine Reduzierung der Last auf dem Kommunikationskanal erreicht werden. Hierbei kann die Anzahl der verwendeten Kontextattribute beliebig steigen, ohne die Kanallast nennenswert zu beeinflussen. Unter der Annahme, dass ein Selektivitätsansatz existiert, der es ermöglicht, Fahrzeuge aufgrund ihrer prädizierten Fahrstrecken als Kollisionspartner auszuschließen, soll im folgenden Absatz die dadurch erreichbare Awareness-Qualität betrachtet werden.

Als Grundlage dienen die Messungen der Awareness-Qualität in den Betrachtungsradien von 200 m bis 300 m. Die benutzte Beacon-Paketgröße wurde von ursprünglich 300 Byte auf 330 Byte erhöht, um damit einen durchschnittlichen Overhead von $\approx$ 20 Wegpunkten abbilden zu können. Zur beispielhaften Untersuchung der Vorteile, wurde der Wert von $\alpha = 70\%$ und $\alpha = 50\%$ der Awareness-Qualität-Metrik angenommen (siehe Definition 4.1.1). Dies bedeutet, dass jedes Fahrzeug im Schnitt 30% oder entsprechend 50% seiner

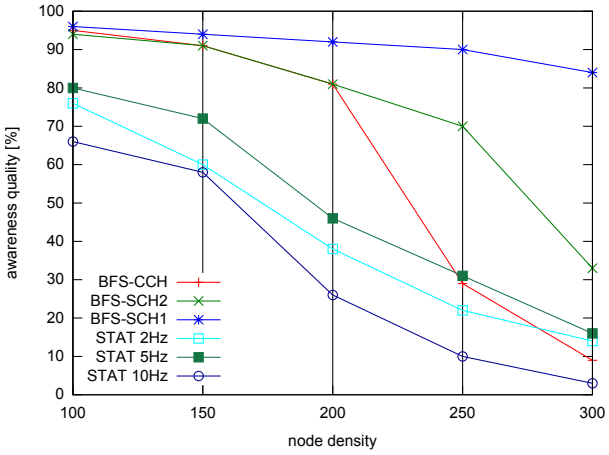


Abbildung 7.10: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 70\%$)

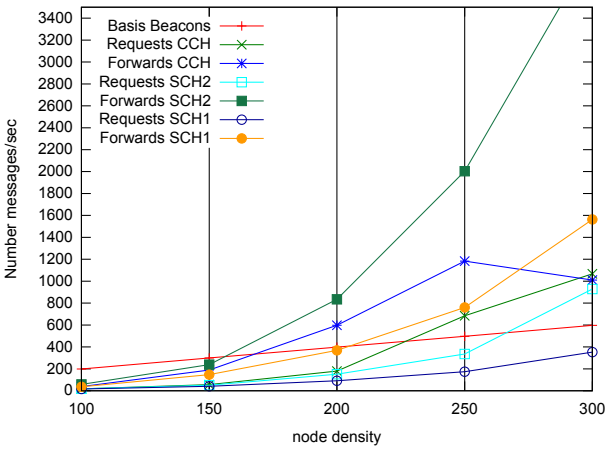


Abbildung 7.11: Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 70\%$)

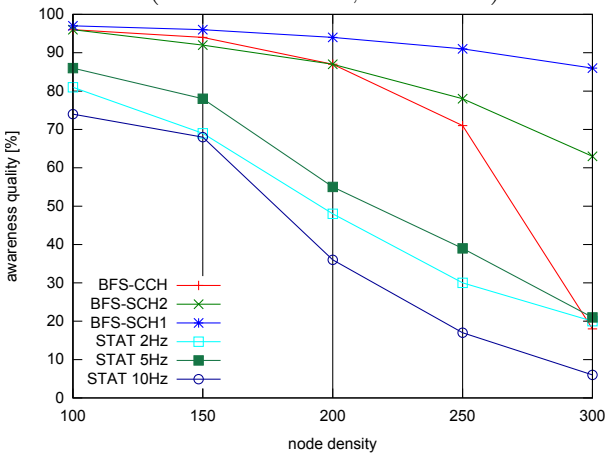


Abbildung 7.12: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 50\%$)

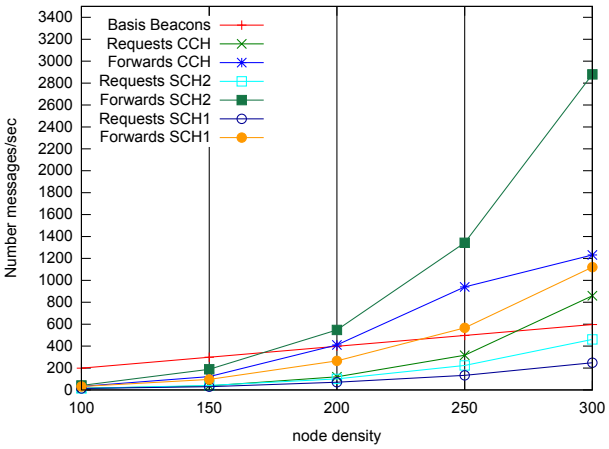


Abbildung 7.13: Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=300m; $\alpha = 50\%$)

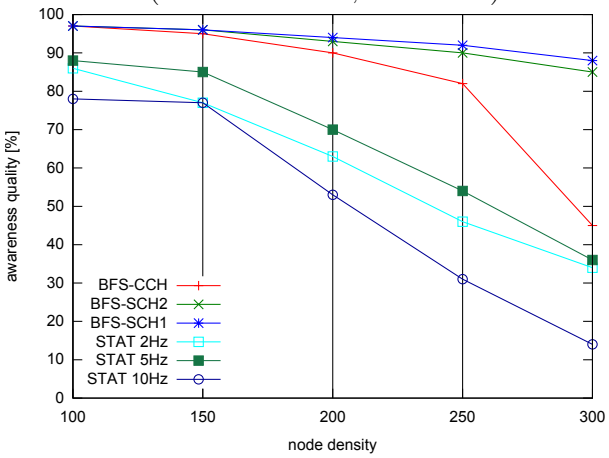


Abbildung 7.14: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 70\%$)

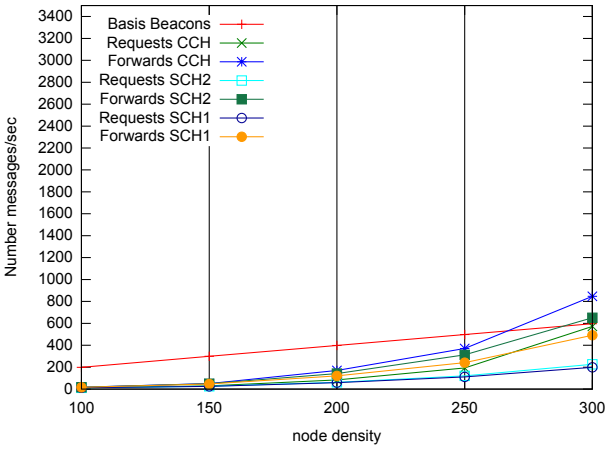


Abbildung 7.15: Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 70\%$)

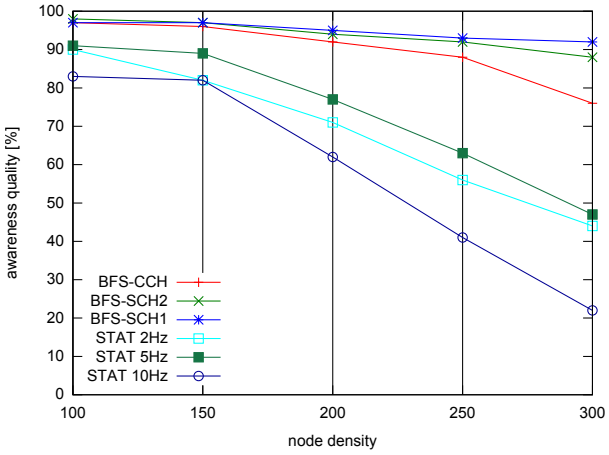


Abbildung 7.16: Awareness-Qualität: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 50\%$)

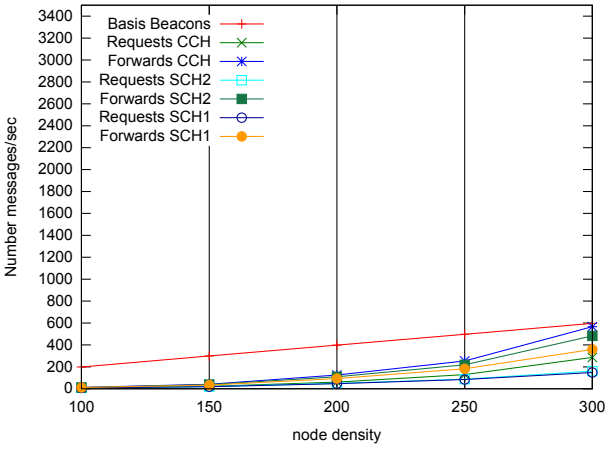


Abbildung 7.17: Nachrichtenanzahl: BFS-Varianten (Radius=200m; $\alpha = 50\%$)

Nachbarn nicht über den kompletten Betrachtungszeitraum kennen muss. Somit muss bei nicht erhaltenen Beacons dieser Knoten auch nicht aktiv um eine Beacon-Weiterleitung anfragt werden. Dies resultiert in einer Reduzierung der Kanallast. Es sei angemerkt, dass genaue Werte in der Praxis im Detail evaluiert werden müssen. Das hier verfolgte Ziel ist die Darstellung potenzieller Vorteile und das Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten.

Abbildung 7.8 und 7.9 veranschaulichen die erzielte Awareness-Qualität der einzelnen serviceorientierten und statischen Beaconing-Varianten bei einem Wert von $\alpha = 100$. Diese sollen als Referenzwerte für die weitere Betrachtung dienen. Betrachtet man zunächst die Ergebnisse für einen Betrachtungsradius von 300 m und $\alpha = 70$, so kann gezeigt werden, dass unter Nutzung der BFS-SCH1-Variante eine Verbesserung der Awareness-Qualität auf $\geq 85\%$ bei allen Fahrzeugdichten erzielt wird (siehe Abbildung 7.10). Auch beim Einsatz des BFS-SCH2 kann eine Steigerung von ursprünglich 10% (Abbildung 7.8) auf >30% (Abbildung 7.10) bei 300 Fahrzeugen erzielt werden. Erhöht man den Selektivitätswert auf $\alpha = 50$, so können deutliche Verbesserungen im Hinblick auf die BFS-SCH2-Variante erzielt werden (siehe Abbildung 7.12). Hier wird eine Awareness-Qualität von $> 60\%$ bei einer Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen erreicht. Des Weiteren kann aber auch die BFS-CCH-Variante bis zu einer Anzahl von 250 Fahrzeugen auf eine Awareness-Qualität von $\approx 70\%$ nennenswert gesteigert werden.

Bezüglich eines Betrachtungsradius von 200 m, können bei einer Selektivität von $\alpha = 50$ alle serviceorientierten Varianten durchgängig bei allen Fahrzeugdichten gute Ergebnisse liefern. Vor allem aber, kann eine deutliche Verbesserung der BFS-CCH-Variante festgestellt werden. Bei einer Selektivität von $\alpha = 50$ kann eine Awareness-Qualität von $\approx 80\%$ bei 300 Fahrzeugen erzielt werden (siehe Abbildung 7.16). Die qualitative Beurteilung der einzelnen serviceorientierten Beaconing-Varianten kann Tabelle 7.1 entnommen werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Werte der Awareness-Qualität mit steigender Selektivität auch für die statischen Beaconing-Ansätze verbessern. Vor allem die Ergebnisse für eine Fahrzeugdichte von 150 Fahrzeugen erzielen die Wiederholraten von

	Nutzen (lokal)	**Nutzen (global)**	**Informations-durchsatz**	**Skalierbar-keit**	**Kompatibi-lität**
BFS-SCH1-200 $\alpha = 100\%$	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-200 $\alpha = 100\%$	+	+	+	+	+
BFS-CCH-200 $\alpha = 100\%$	+	-	o	-	-
BFS-SCH1-200 $\alpha = 70\%$	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-200 $\alpha = 70\%$	+	+	+	+	+
BFS-CCH-200 $\alpha = 70\%$	+	-	o	o	-
BFS-SCH1-200 $\alpha = 50\%$	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-200 $\alpha = 50\%$	+	+	+	+	+
BFS-CCH-200 $\alpha = 50\%$	+	-	+	+	o
BFS-SCH1-300 $\alpha = 100\%$	+	+	+	o	o
BFS-SCH2-300 $\alpha = 100\%$	+	+	o	-	o
BFS-CCH-300 $\alpha = 100\%$	+	-	-	-	-
BFS-SCH1-300 $\alpha = 70\%$	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-300 $\alpha = 70\%$	+	+	o	-	+
BFS-CCH-300 $\alpha = 70\%$	+	-	o	-	-
BFS-SCH1-300 $\alpha = 50\%$	+	+	+	+	+
BFS-SCH2-300 $\alpha = 50\%$	+	+	+	o	+
BFS-CCH-300 $\alpha = 50\%$	+	-	o	-	-

Tabelle 7.1: Beurteilung der Mehrkanal-Beaconing-Ansätze auf Basis der definierten Anforderungen und variabler Selektivitätswerte

5 Hz und 10 Hz stabilerer Ergebnisse. Allerdings können diese in keinem Szenario an die Ergebnisse der serviceorientierten Varianten herankommen.

7.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Aspekt der Selektivität untersucht und als Grundlage für die weitere Betrachtung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes verwendet. Unter Selektivität wird verstanden, dass Fahrzeuge, die keine potenziellen Kollisionspartner darstellen, aus der Betrachtung eliminiert werden. Beispielsweise sind hier Situationen zu nennen, in denen sich zwei Fahrzeuge voneinander entfernen oder potenziell ihre Fahrstrecke ändern, so dass eine geringe bis keine Kollisionswahrscheinlichkeit vorliegt. Aus der Sicht des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes und der aufzubauenden Awareness-Qualität, ist diese Betrachtung ein wichtiger Aspekt, da hierbei davon ausgegangen wird, dass nicht alle Fahrzeuge, die sich in einem definierten Betrachtungsradius befinden, auch durchgängig beobachtet werden müssen. Ist dies der Fall, so ist es nicht notwendig, jedes verloren gegangene Beacon der Nachbarfahrzeuge anzufragen, was dazu führt, dass die Kanallast deutlich reduziert und der Informationsdurchsatz gesteigert werden kann.

Um einzelne Fahrzeuge aus der Betrachtung auszuschließen, ist es notwendig, dass hinreichend viele Informationen über die Bewegung und die Fahrtstrecken vorliegen. Geht man davon aus, dass alle Informationen immer ausgetauscht werden, würde das zu einer hohen Belastung des Kommunikationskanals führen. Aus diesem Grund wurde der senderseitige Ansatz zur Fahrstreckenvorhersage für die Berechnung von Kollisionswahrscheinlichkeiten betrachtet. Kernidee hierbei ist die Nutzung aller vorhandenen Kontextinformationen, die auf einem Fahrzeug zur Verfügung stehen. Darauf basierend kann die eigene Fahrstrecke von jedem Fahrzeug extrapoliert und ihren Nachbarn mitgeteilt werden. Dabei ist es nicht notwendig, jedes einzelne Kontextattribut innerhalb eines Beacons zu versenden, sondern nur eine abstrakte Beschreibung der Fahrtstrecke anhand von Wegpunkten zu verschicken. Nach der Betrachtung von zwei möglichen Formaten zur Darstellung von Wegstrecken, konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz nur eine geringfügige Erhöhung der Beacon-Größe verursacht.

Unter der Annahme, dass dieser Mechanismus die Selektivität in der Auswahl der relevanten Kollisionspartner ermöglicht, wurden die unterschiedlichen serviceorientierten Beaconing-Ansätze mit unterschiedlichen Selektivitätswerten betrachtet. Hierfür wurden beispielhaft Situationen mit der Anforderung von 70% und 50% der zu kennenden Nachbarn mit den Betrachtungsradien von 200 m und 300 m analysiert.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass durch den Ausschluss von nicht relevanten Fahrzeugen vor allem eine deutliche Verbesserung in den Szenarien mit hohen Fahrzeugdichten erzielt werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf dem Kanal weniger Service-Request-Nachrichten versendet werden und somit auch die Anzahl der Service-Beacons reduziert wird. Durch die somit gesenkte Last auf dem Kommunikationskanal bleibt mehr Bandbreite für die wirklich relevanten Service-Anfragen und Beacon-Weiterleitungen, was zu einer Erhöhung der Awareness-Qualität führt. Beispielsweise konnte gezeigt werden,

dass bei einem Ausschluss von nur 30% der Nachbarn auch bei einer Fahrzeugdichte von 300 Fahrzeugen und einem Betrachtungsradius von 300 m eine durchgängige Awareness-Qualität von $\geq 85\%$ erzielt werden kann.

Dieses Ergebnis zeigt, dass der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte serviceorientierte Beaconing-Ansatz und die damit verbundene Flexibilität der Kanalwahl einen robusten Mechanismus darstellt, der die Anforderungen der sicherheitsrelevanten Anwendungen speziell im Hinblick auf den Informationsdurchsatz und die Skalierbarkeit, nahezu vollständig erfüllt.

Kapitel 8

Simulationsumgebung

Fahrzeug-Ad-hoc-Netze sind durch eine hohe Anzahl an Knoten charakterisiert. Diese bewegen sich mit einer hohen Dynamik und ändern somit ständig ihre Position. Die Positionswechsel sind von einer Vielzahl an Attributen abhängig. Betrachtet man die sich ändernde Konstellation der Fahrzeuge, so ist neben der Auswirkung auf die Berechnungen in den sicherheitsrelevanten Anwendungen auch ein ständig wechselnder Zustand auf dem Kommunikationskanal zu beobachten. Dieser hängt sowohl von der Signalausbreitung in drahtlosen Netzwerken, abhängig von der Kommunikationsdistanz, als auch von der Signalinterferenz, abhängig von der wechselnden Anzahl an Kommunikationspartnern in einer bestimmten Kommunikationsreichweite, ab. Vor allem aus Netzwerksicht ist es notwendig, den Zustand des Netzwerkes pro Fahrzeug zu betrachten, um entscheiden zu können, ob eine Nachricht dekodiert werden kann oder nicht. Diese Dynamik stellt eine erhöhte Komplexität für die Entwicklung und den Test von Algorithmen dar [55]. Zur Evaluierung einzelner erarbeiteter Nachrichtenverbreitungsstrategien sind prinzipiell drei Möglichkeiten gegeben:

1. Berechnung auf Basis von aufgestellten analytischen Modellen
2. Überprüfung auf Basis von Implementierungen und Testaufbauten
3. Überprüfung auf Basis von Simulationsumgebungen

Die einzelnen aufgeführten Methoden bieten in Abhängigkeit von den jeweiligen Kriterien Vor- und Nachteile. Tabelle 8.1 stellt eine grobe Übersicht zur Beurteilung der einzelnen Evaluierungsmethoden dar.

Grundsätzlich bietet ein korrektes mathematisches Modell eine hohe Genauigkeit für die Aussage über einen Verbreitungsalgorithmus. Es ist allerdings zu beachten, dass die hochkomplexe Umgebung, die bei Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen auf unterschiedlichsten Ebenen gegeben ist, auch einen hohen Aufwand bedeutet, ein solches Modell aufzustellen. Auch die Abbildung unterschiedlicher Konstellationen von Fahrzeugen und die wechselnde Anzahl von Knoten erschwert die Aufstellung eines solchen Modells. Hierfür ist ein ganzheitliches Verständnis der bestehenden Abhängigkeiten notwendig. Wird eines der Kriterien nicht

	Realitätsnähe	Wiederholbarkeit	Skalierbarkeit	Aufwand
Math. Modell	(bedingt)hoch	sehr hoch	sehr niedrig	sehr hoch
Testaufbau	sehr hoch	niedrig	niedrig	sehr hoch
Simulation	hoch	sehr hoch	sehr hoch	niedrig

Tabelle 8.1: Beurteilung unterschiedlicher Evaluierungsmöglichkeiten für Algorithmen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen

berücksichtigt oder nicht korrekt formalisiert, kann dies zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen.

Die zweite Methode zur Evaluierung von Algorithmen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen ist die prototypische Implementierung der Algorithmen, wie sie z.B. in Forschungsprojekten wie simTD [9], Network-on-Wheels [10] und Drive2X [22] umgesetzt werden. Hierbei baut man die Systeme in Erprobungsfahrzeuge ein und überprüft diese anhand von definierten Szenarien auf ihre Umsetzbarkeit und ihren Mehrwert. Obwohl dieser Ansatz der Realität am nächsten kommt, ist die Umsetzung solcher Tests immer mit hohen Kosten und zeitlichem Aufwand verbunden. Insbesondere ist es aufgrund der Kosten sehr schwierig, die Evaluierung der Systeme in Szenarien mit hoher Fahrzeugdichte zu testen. Somit kann ein Algorithmus, welcher bei geringer Anzahl von Fahrzeugen gute Ergebnisse liefert, auch als geeignet beurteilt werden, obwohl dieser u.U. bei höheren Fahrzeugdichten nicht zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Die Evaluierung unter Zuhilfenahme von Simulationsumgebungen ist unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen als besonders geeignet einzustufen. Gerade mit Blick auf die Skalierbarkeit bzgl. der Fahrzeugdichte können komplexe Situationen modelliert werden, ohne dass hohe Kosten entstehen. Im Weiteren ist der Aspekt der Wiederholbarkeit von Szenarien im Hinblick auf den Vergleich von Algorithmen in der Evaluierung von großem Vorteil. Wird die Durchführung der Simulationen auf Basis von bestehenden und erprobten Umgebungen durchgeführt, so ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse auch in der Realität unter den gleichen Bedingungen zu erwarten sind.

Aufgrund der Vorteile von Simulationsumgebungen wurde diese Methode auch in der hier vorliegenden Arbeit zur Evaluierung der aufgestellten Algorithmen verwendet. Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen des eingesetzten JiST/SWANS-Frameworks und stellt die für die Umsetzung des Mehrkanal-Beaconing-Ansatzes vorgenommenen Anpassungen vor.

8.1 JiST Simulationsumgebung

Die JiST Simulationsumgebung (JAVA in Simulation Time) [102] ist eine diskrete, ereignisorientierte Umgebung, welche das Ziel hat, komplexe und aufwändige Simulationen sowohl hinsichtlich der Laufzeit als auch des Speicherverbrauchs zu optimieren. JiST gehört zu der neuartigen Gruppe von Virtual-Machine-basierten Simulatoren und setzt auf einer nicht-modifizierten JAVA Virtuellen Maschine auf. Die Spezialität von JiST liegt darin,

Java-basierte Programme automatisiert und für den Programmierer transparent in eine diskrete ereignisorientierte Simulationsumgebung zu überführen. Hierbei wird die Virtuelle Maschine als Simulationsumgebung genutzt.

Simulationszeit

In der Standard JAVA VM [101] ist die Zeit immer kontinuierlich fortschreitend und ist völlig unabhängig von dem Fortschritt der Applikation, was auch in der Realität der Fall ist. Für den Ablauf von Simulationen hat diese Tatsache allerdings zwei signifikante Nachteile:

1. Simulationslaufzeit: Aufgrund der in einer Applikation definierten Zyklen, z.B. einer Beacon-Wiederholrate von 500 ms, ist zwischen den einzelnen Ereignissen des Beacon-Versandes im Standardfall keine Aktion auszuführen. Trotzdem muss man in der Simulation das Fortschreiten der globalen Zeit abwarten, bis ein nächstes Beacon gesendet werden kann. Dies kann schnell zu unnötig langen Simulationszeiten führen. Hier wäre es sinnvoll, in diesen Leerlaufzeiten, in denen keine Berechnungen vorgenommen werden, die globale Zeit bis zum nächsten Ereignis zu überspringen.

2. Wiederholbarkeit: Die Ausführung einer Simulation ist immer abhängig von äußeren Einflüssen auf dem Simulationsrechner, wie z.B. Interrupts, Input/Output-Aktionen und dem Einsatz von dem JAVA Garbage Collectors. Diese Ereignisse sind zur Laufzeit immer unterschiedlich und führen somit in der Wiederholung von gleichen Simulationsaufbauten zu unterschiedlichen Ergebnissen. In diesem Fall ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht hinreichend gegeben.

Zur Lösung der beschriebenen Probleme stellt JiST eine ereignisorientierte Simulationsumgebung dar. Hierbei werden alle Ereignisse aufgrund ihrer Zeitstempel in eine logische Reihenfolge überführt. Auf dieser Grundlage kann immer bis zum nächsten Ereignis gesprungen und die Simulationszeit entsprechend vorgestellt werden. Dies optimiert zum einen die Simulationsdauer und garantiert zum anderen die Wiederholbarkeit der Simulationsläufe durch die immer gleiche logische Ordnung von Ereignissen.

JiST Archtiektur

Abbildung 8.1 gibt einen groben Überblick über die vier relevanten Komponenten und den Ablauf der JIST Umgebung.

- Compiler: Standard JAVA Compiler um Bytecode für die Virtuelle Maschine zu erstellen.

- Byte-code Rewriter: JAVA-basierte JiST-Komponente, die dafür zuständig ist, in den erstellten Bytecode automatisiert entsprechende Anweisungen für den Simulationskern einzufügen. Hier werden z.B. Referenzen auf Objekte und Kommandos zur eventbasierten Steuerung eingefügt.

- Virtuelle Maschine: Standard JAVA-VM

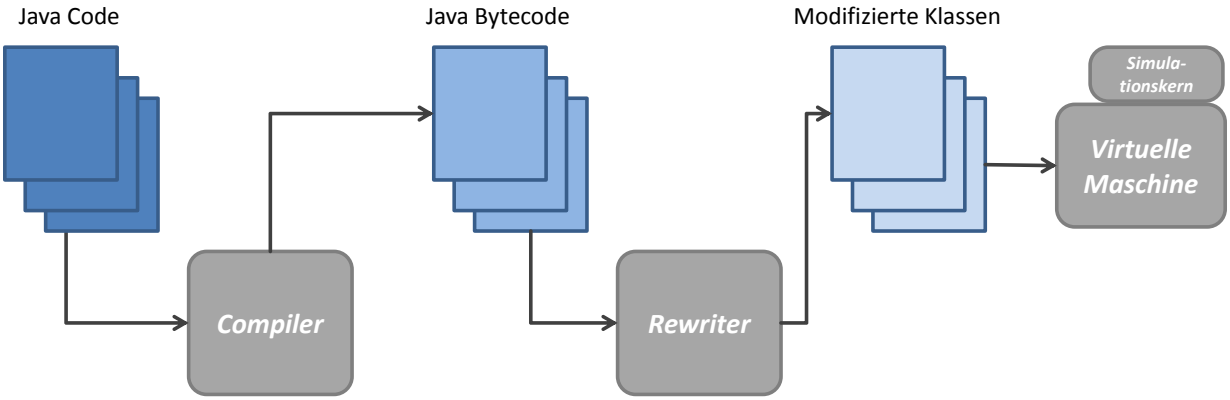


Abbildung 8.1: Übersicht JiST Architektur nach [104]

- Simulationskern: Interpretiert die vom Rewriter eingefügten Anweisungen und stellt die logische Aufrufreihenfolge der Methoden innerhalb der Simulation dar. Steuert den gesamten Simulationsablauf und verwaltet die Event-Warteschlangen, um eine korrekte Reihenfolge des Programmablaufs herzustellen.

Aufgrund der Tatsache, dass alle Komponenten in der Programmiersprache JAVA geschrieben sind, kann das Simulationsprogramm mit der Standard JAVA Semantik erstellt werden. Dies erspart vor allem eine Einarbeitung in simulatorspezifische Sprachkonstrukte. Es entfällt weiterhin die Notwendigkeit, Annotationen zu verwenden, die spezielle Simulationsanweisungen beinhalten. Dies wird automatisch von der Rewriter Komponente übernommen.

8.2 SWANS Netzwerksimulator

Der SWANS Netzwerksimulator (Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator) ist speziell entwickelt worden, um das Netzwerkverhalten von drahtlosen Ad-hoc-Netzen in komplexen Szenarien mit hoher Knotenanzahl und großen geographischen Simulationsgebieten zu optimieren. SWANS ist eine Anwendung, die auf dem JiST Framework aufsetzt und eine hohe Integrationstiefe aufweist. Die Softwarearchitektur besteht aus einzelnen unabhängigen Komponenten, die je nach Bedarf miteinander verknüpft werden können. Abbildung 8.2 zeigt die wichtigsten Komponenten, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen:

- Radio: Die Radio-Komponente simuliert in erster Linie die Funkhardware und übernimmt die Aufgaben zum Empfang und Versand von Paketen. Eine wichtige Aufgabe ist es, aufgrund des Noise-Modells das existierende Rauschen bzw. die Interferenzen auf dem Kommunikationskanal zu bestimmen. Auf dieser Basis kann berechnet werden, ob ein Paket mit einer gewissen Empfangsleistung unter Berücksichtigung der SNIR dekodiert werden kann oder verworfen werden muss. Kann dieses korrekt empfangen werden, so wird es an die MAC-Schicht übergeben.

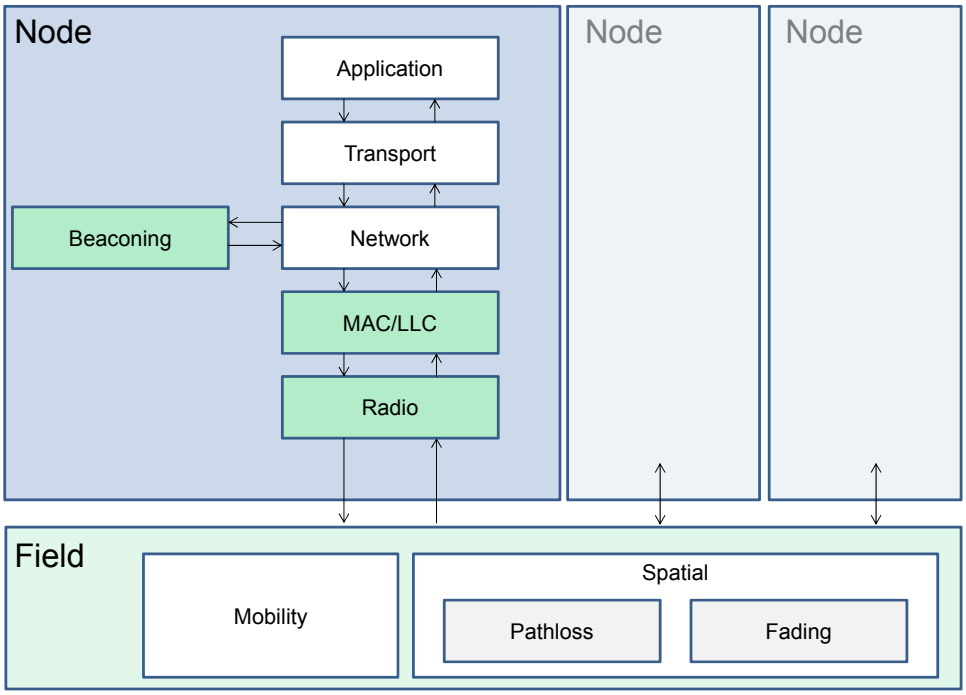


Abbildung 8.2: Übersicht der SWANS Systemkomponenten

- MAC/LLC: Die MAC-Komponente bildet die entsprechenden Medienzugriffverfahren ab, um sowohl für den Versand als auch für den Empfang von Nachrichten ein korrektes Verhalten zu simulieren. Es ist wichtig anzumerken, dass auch eine IEEE 802.11p Implementierung existiert [103], die in der vorliegenden Arbeit verwendet worden ist.

- Network & Routing: Die Network-Komponente bildet den Eintrittspunkt für alle eingehenden Nachrichten, die von der MAC-Komponente beim Empfang eines Pakets übergeben werden. Die Network-Komponente hat die Möglichkeit, mehrere Protokoll-Handler wie z.B. die Transport-Komponente zu initialisieren, um die eingehenden Nachrichten weiterzuleiten. Ein spezieller Handler ist hierbei die Routing-Komponente, welche die Möglichkeit besitzt, vor der Weiterleitung einer Nachricht zum nächsthöheren Layer das Paket auf die Relevanz zu überprüfen. Weiterhin können Pakete, die über mehrere Hops übertragen werden sollen, direkt wieder an die MAC-Komponente zurückgesendet werden, damit sie die Informationen über das Netzwerk weiterleiten können.

- Transport: Die Transport-Komponente bekommt eingegangene Nachrichten von der Network-Komponente übergeben und kann auch selber an diese Komponente Pakete zum Versand überreichen. Die Standardimplementierung enthält die Protokolle UDP und TCP und bietet Schnittstellen für die Protokoll-Handler an.

- Application: Die Application-Komponente bildet die höchste Ebene im Protokoll-Stack und ist ein typischer Protokoll-Handler der Transport-Komponente. Im Normalfall werden zur Kommunikation zwischen Transport und Applikation die SWANS-Sockets und -Streams benutzt, die den Standard JAVA-Konstrukten entsprechen.
- Node: Die Node-Komponente stellt in unserem Fall ein spezielles Fahrzeug dar und ist für die Konfiguration der einzelnen Komponenten zuständig. Somit muss das Node-Objekt ein Netzwerk-, ein MAC- und ein Radio-Objekt erstellen und diese miteinander verbinden. Weiterhin wird dem Netzwerk ein Beaconing-Objekt übergeben und das Radio-Objekt einem Field hinzugefügt.
- Field: Das Field-Objekt dient in erster Linie der Verwaltung aller sich in ihm befindenden Radios. Weiterhin enthält jedes Field ein Mobility-Objekt, welches im Simulationsablauf über die Position der Radios entscheidet. An dieser Stelle können die entsprechenden Radios einer Node hinzugefügt und über den Aufruf des Mobility-Objekts kontinuierlich bewegt werden. Im vereinfachten Sinne ist das Field auch für die Signalausbreitung und den Transport von Nachrichten zwischen den einzelnen Knoten zuständig. Dies wird allerdings in der gesonderten Spatial-Komponente umgesetzt. Hierbei werden zunächst von einem sendenden Knoten aus alle Nachbarn ermittelt und unter Berücksichtigung der Distanz, des Pathloss und des Fadings wird die Empfangssignalstärke für jeden Nachbarn berechnet. Die zu verbreitende Nachricht wird dann unter Angabe der Signalstärke an das entsprechende Radio-Objekt des Empfängers übergeben.
- Mobility: Die Mobility-Komponente ist für die Berechnung neuer Positionen einzelner Radio-Objekte verantwortlich. Diese können auf Basis unterschiedlicher Bewegungsmodelle z.B. nach zufällig gewählten Punkten oder Strecken berechnet werden. Weiterhin kann auch ein eigenes Mobilitätsmodell integriert werden, welches anhand von realen Straßentopologien die Bewegungen und Positionen der Fahrzeuge bestimmt.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde bei der Implementierung auf die Komponenten Application, Transport und Routing aus Gründen der Vereinfachung verzichtet. Stattdessen wurde eine Beaconing-Komponente erstellt, die für den logischen Ablauf der Anwendungsschicht zuständig ist und als Protokoll-Handler direkt an die Network-Komponente gekoppelt ist.

8.3 STRAW Mobilitätssimulator

Der STRAW Mobilitätssimulator (STreet RAndom Waypoint) ist ein speziell für das JiST-Framework entwickeltes und in dieses integrierte Bewegungsmodell [105]. Es erweitert die bestehenden Bewegungsmodelle, die bislang die Bewegung der Knoten auf einem freien und offenen Feld ermöglicht haben, durch eine reale Straßentopologie von Städten der USA wie z.B. Chicago oder Boston. Ein Beispiel der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Topologie ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Eine reale Straßentopologie ist ein essentieller Teil der

Abbildung 8.3: Verwendete STRAW-Straßentopology

Verifikation von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen und den damit verbundenen Algorithmen. Zum einen äußert sich dies in Form von unterschiedlichen Strecken, die Fahrzeuge aufgrund der Strassenführung zurücklegen müssen, um einen Punkt zu erreichen. Zum anderen ist auch die damit verbundene Fahrdynamik wie z.B. das Abbremsen vor Kreuzungen und hinter vorausfahrenden Fahrzeugen eine wichtige Annäherung an die Realität. Zur individuellen und realistischeren Bewegung der Fahrzeuge bietet STRAW diverse Möglichkeiten der Parametrisierung, die auszugsweise in Tabelle 8.2 aufgeführt sind.

Parameter	Beschreibung
probability	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug an einer Kreuzung seine Fahrtrichtung ändert
speeds deviation	Standardabweichung, die Fahrzeuge in Relation zu der definierten Durchschnittsgeschwindigkeit haben dürfen
step time	Häufigkeit der neuen Positionsberechnung
lane width	Breite der Fahrbahn
car length	Die durchschnittliche Länge eines Fahrzeugs
top right / bottom left	Koordinaten eines Kartenausschnitts, der in der Simulation verwendet werden soll

Tabelle 8.2: Auszug aus den Konfigurationsmöglichkeiten des STRAW-Bewegungsmodells

8.4 Alternative Simulationsumgebungen

Neben der JiST/SWANS-Simulationsumgebung existieren weitere Frameworks, die zur Evaluierung von Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen eingesetzt werden können. Die bekanntesten hierfür sind NS2/NS3 [96] und GloMoSim [97]. Vor allem das NS2/3 Framework ist eine etablierte Umgebung in der VANET-Community. Da aber zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit keines der genannten Frameworks (auch nicht JiST/SWANS) ein Mehrkanal- Signalmodell integriert hat, konnte die Entscheidung zur Auswahl des passenden Simulations-Frameworks frei getroffen werden. Nach der Evaluierung der Performance und des Speicherbedarfs der unterschiedlichen Simulationsumgebungen in [104], wurde das JiST/SWANS-Framework zur Bearbeitung des hier vorliegenden Problems als besonders geeignet eingestuft.

8.5 Mehrkanalmodell Anpassung

Die Standardimplementierung des SWANS-Netzwerksimulators erlaubt zwar die Nutzung des IEEE 802.11p Protokolls, ist allerdings auf die Nutzung eines einzelnen Kommunikationskanals beschränkt. Für die Evaluierung des Mehrkanal-Beaconing-Services ist aber die Existenz eines Mehrkanal-Signalausbreitungsmodells unabdingbar, um die Einschränkungen bei der gleichzeitigen Nutzung von benachbarten Kanälen abzubilden. Im folgenden Kapitel sollen die im Rahmen der Arbeit vorgenommenen Änderungen an dem Kanalmodell beschrieben werden. Zur korrekten Funktionsweise war es notwendig, die folgenden Anpassungen vorzunehmen:

- Umsetzung der Multi-Radio Fähigkeit
- Umsetzung des ACI-Effekts
- Anpassung der TX_{power}
- Ermöglichen der Per-Packet-Frequenzzuordnung

Es sei darauf hingewiesen, dass das im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte Mehrkanalmodell nicht den Anspruch erhebt, vollständig zu sein. Es soll dazu dienen, die Effekte des generierten Rauschens durch einen Nachbarkanal zu untersuchen, um eine Tendenz bezüglich der Rahmenbedingungen und Einschränkungen bei der Mehrkanalnutzung zu erhalten. Es ist bekannt, dass für eine korrekte Abbildung eines Kanalmodells die Betrachtung der einzelnen Carrier notwendig ist. Diese Betrachtung ist aber insbesondere nur in bestimmten Grenzsituationen sinnvoll, die aufgrund der Seltenheit des Auftretens keine signifikanten Auswirkungen auf das grundsätzliche Verhalten und die Empfangswahrscheinlichkeit von Nachrichten haben. Aus diesem Grund wird auf die Umsetzung eines entsprechenden Carrier-Modells verzichtet. Es sei darauf hingewiesen, dass dies ein typisches Vorgehen in Simulationsumgebungen ist.

Umsetzung der Multi-Radio Fähigkeit

Im Gegensatz zu der aktuellen Umsetzung in SWANS, wo jedem Node-Objekt genau ein Radio zugeordnet ist, muss bei der Nutzung von mehreren parallelen Kanälen jede Node zwei Radio-Objekte beinhalten. Diese Radios entsprechen den in Kapitel 2 beschriebenen Control- und Service-Radios. Daher ist es im ersten Schritt notwendig, dass eine Node zwischen zwei Radio-Instanzen unterscheiden kann, um diese den spezifizierten Frequenzen zuordnen zu können. Weiterhin muss, um die korrekte Funktionsweise zu simulieren, jedem „physikalischen“ Radio auch ein eigenes Medienzugriffsprotokoll zugeordnet werden. Das ist notwendig, um zu garantieren, dass ein Senden in einem dedizierten Kanal nicht den Medienzugriff auf dem benachbarten Kanal einschränkt. Dies wäre der Fall, wenn aufgrund des CSMA/CA-Verfahrens beim gleichzeitigen Kanalzugriff ein Backoff-Verfahren eingeleitet werden würde, obwohl die Übertragungen auf unterschiedlichen Funkfrequenzen stattfinden. Um die Unabhängigkeit der einzelnen Kanäle zu gewährleisten, wurde jedem Radio ein eigenes Interferenz-Modell (RadioNoiseAdditiv) und ein eigener MAC-Layer (MAC_802.11p) zugeordnet. Diese konnten dann einem gemeinsamen Netzwerk-Objekt hinzugefügt werden. Anhand dieser Anpassungen kann nun jedem Radio eine eindeutige Funkfrequenz zugeordnen werden, auf der Nachrichten unabhängig voneinander ausgetauscht werden können.

Umsetzung des ACI-Effekts

Aufgrund der aktuellen Implementierung von SWANS ist es nicht möglich, dass die Konfiguration unterschiedlicher Funkfrequenzen tatsächlich auch zur Nutzung unabhängiger Kanälen führt. Vielmehr würden alle Pakete auf immer dem gleichen Kanal verbreitet werden. Dies ist durch die Implementierung der Spatial/Field-Klassen bedingt, wo grundsätzlich von einem reinen Einkanal-Modell ausgegangen wird. Um den ACI-Effekt trotzdem abbilden zu können, war daher eine Anpassung notwendig. Hierbei soll differenziert werden, ob ein Sendevorgang auf dem gleichen Kanal oder im Nachbarkanal ausgeführt wird. Genauer ausgedrückt, soll dabei grundsätzlich beim Senden und Empfangen von Paketen zwischen zwei Zuständen unterschieden werden:

1. der Übertragung von Nutzdaten
2. der Übertragung von Rauschen.

Die Unterscheidung zwischen der Übertragung von Nutzdaten und dem Generieren von Rauschen wird aufgrund des Aspekts getroffen, auf welchen Funkfrequenzen zwei Radios, die miteinander kommunizieren, konfiguriert sind. Sind beide auf der gleichen Funkfrequenz, so handelt es sich um die Übertragung von Nutzdaten, ansonsten um Rauschen. Dieses Konstrukt wird nun innerhalb des Spatial-Objekts in Form des folgenden Ablaufs definiert:

- Ein bestimmtes Fahrzeug sendet ein Paket auf dem Control-Radio.
- Innerhalb der Spatial-Klasse werden in einer Schleife über alle Empfängerknoten die konfigurierten Frequenzen der beiden Empfängerradios überprüft.
- Im Falle, dass sowohl das Radio des Senders als auch das des Empfängers sich auf der gleichen Funkfrequenz befinden, wird unter Berücksichtigung der Entfernung und der Pathloss- und Fading-Faktoren die Signalempfangsstärke für jedes Fahrzeug berechnet. Das zu übertragende Paket wird dann an den Empfänger unter Angabe der Signalstärke übergeben.
- Im Falle, dass die Frequenz des Senderadios sich von der Frequenz des Empfangsradios unterscheidet, wird hier die Signalstärke des generierten Rauschens berechnet. Diese setzt sich, wie in Kapitel 2 beschrieben, zum einem aus der regulären Signalstärke und zum anderen aus der in der spezifizierten Spektralmaske zu berücksichtigenden Dämpfung eines Signals zusammen. Der berechnete Wert wird dann nicht als Empfangssignal, sondern ausschließlich als Rauschsignal an ein Radio übergeben und zum vorherrschenden Interferenzniveau addiert. Das Rauschsignal hält so lange an, wie die Übertragung auf dem Nachbarkanal durchgeführt wird. Danach wird das Rauschsignal wieder vom Interferenzniveau subtrahiert.

Aufgrund dieser Implementierung ist es möglich, unter Beibehaltung des grundsätzlichen Kanal- und MAC-Modells in SWANS den ACI-Effekt umzusetzen.

Umsetzung der Per-Paket-Frequenzzuordnung

Der flexible serviceorientierte Mehrkanal-Beaconing-Ansatz geht davon aus, dass angefragte Beacons situationsabhängig auf unterschiedlichen Kommunikationskanälen versendet werden können. Hierzu soll eine Applikation die Möglichkeit haben, die Entscheidung über den gewünschten Kanal selber zu treffen. Im vorliegenden Fall ist die Logik der Applikation in der Beaconing-Komponente umgesetzt. Da die Wahl und die Zuordnung von Nachrichten zu den Kanälen bisher nicht in den Schnittstellen von SWANS vorgesehen waren, mussten alle bisher existierenden Schnittstellen angepasst werden. Hierbei ist, wie in Abbildung 8.4 gezeigt, eine Spezialisierung der entsprechenden Klassen mit dem Präfix

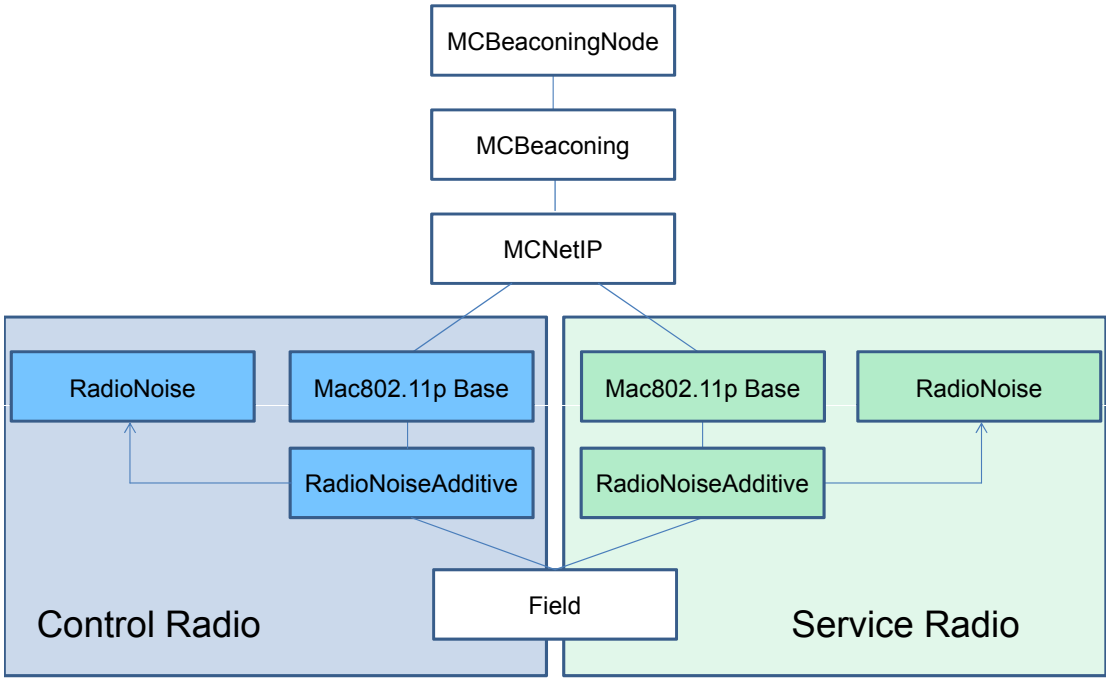


Abbildung 8.4: SWANS Dual-Radio Anpassung

„MC“ (Multi Channel) eingeführt worden. Damit kann jedes einzelne Paket über einen individuellen Kanal und ein entsprechendes Radio versendet werden. Ist das Radio nicht auf dem geforderten Kanal eingestellt, so kann es vor dem Sendevorgang auf diesen umgeschaltet werden. Diese Funktionalität ist aber auch global konfigurierbar, da auch grundsätzlich die Möglichkeit bestehen soll, anhand einer zentralen Komponente die Verwaltung von Kanälen und Radios unabhängig von den einzelnen Nachrichten vornehmen zu können.

Anpassung der TX_{power}

Wie die Evaluierungsergebnisse in Kapitel 5 zeigen, ist die pro Kanal verwendete Sendeleistung ein entscheidender Faktor bei der parallelen Nutzung von benachbarten Kommunikationskanälen. Aus diesem Grund ist es entscheidend, unterschiedliche Sendeleistungen für einzelnen Kanäle vorgeben zu können. Diese Sendeleistungseinstellung erfolgt zentral über die Konfigurationsdatei. Es ist demnach nicht möglich, die Sendeleistung pro Paket zu definieren. Dies ist aufgrund der erzielten Erkenntnisse in Kapitel 4 auch nicht erwünscht. Aufgrund des ACI-Effektes soll eine bestimmte Konfiguration der TX_{power} vorgegeben sein, um die Performance auf dem CCH nicht zu beeinflussen.

Parameter	Value
Simulation time [sec]	60
Seeds	5
Pathloss Model	Two-Ray Ground
Fading Model	Rayleigh
SNIR [dB]	8
Beacon Rate (default) [Hz]	2
Beacon delay jitter [ms]	-50 ... 50
Beacon size (default) [Byte]	300
Beacon validity [ms]	500
Spectrum Mask	Class C
ACI Attenuation > ±15MHz [dB]	-55
MAC-Layer Protocol	IEEE P802.11p
Data rate [MBit/s]	6
Mobility	street-random
Latitude (min)	42.2758
Latitude (max)	42.294
Longitude (min)	-71.0938
Longitude (max)	-71.075
Transmit Power CCH (dBm)	20
Transmit Power SCH2 (dBm)	5
Transmit Power SCH1 (dBm)	20
Node density	100, 150, 200, 250, 300
Awareness distance [m]	100, 200, 300

Tabelle 8.3: Überblick der Standard Simulationsparameter

8.6 Zusammenfassung

Die Untersuchung von Algorithmen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen ist eine komplexe Herausforderung. Dies ist dadurch bedingt, dass zahlreiche Aspekte des Gesamtsystems berücksichtigt werden müssen. Zwei Kernaspekte sind die Mobilität der Fahrzeuge und die Signalausbreitung in drahtlosen Netzen. Dabei spielt die Anzahl der zu betrachtenden Fahrzeuge eine entscheidende Rolle. Zum einen verändert sich die Fahrdynamik bei unterschiedlichen Fahrzeugdichten, und zum anderen beeinflusst die Anzahl der Kommunikationspartner die Zuverlässigkeit der Nachrichtenübertragung. Aus diesem Grund ist es notwendig, Algorithmen zur Nachrichtenverbreitung sowohl in Szenarien mit niedrigen als auch hohen Fahrzeugdichten zu betrachteten. In der hier vorliegenden Arbeit wurde für diese Betrachtung der Einsatz von Simulationsumgebungen gewählt, da die Aufstellung eines analytischen Modells aufgrund der Vielzahl von Parametern zu komplex und die Betrachtung innerhalb realer Testaufbauten für die benötigte Anzahl von Fahrzeugen zu kostenintensiv erschien.

Die Hauptaufgabe beim Aufbau der geeigneten Simulationsumgebung war die Umset-

zung eines geeigneten Kanalmodells zur Ermöglichung der Nutzung mehrerer Kommunikationskanäle. Dieses war zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Problemstellung in keinem der bekannten Simulationsumgebungen abgebildet. Somit stellt die Umsetzung des Mehrkanalmodells und die detaillierte Evaluierung der gleichzeitigen Nutzung paralleler Kommunikationskanäle einen der in dieser Arbeit geleisteten wissenschaftlichen Beiträge dar. Zur Umsetzung wurde das JiST/SWANS-Framework ausgewählt und anhand der in Kapitel 5 diskutierten Aspekte erweitert. Die Korrektheit der Implementierung wurde mit existierenden Testergebnissen und analytischen Betrachtungen verglichen, welches in Kapitel 5 genauer beschrieben wurde. Neben der Evaluierung der Mehrkanalnutzung, konnte auf dieser Basis darüber hinaus der Nutzen bzw. der Mehrwert des vorgestellten serviceorientierten Mehrkanal-Beaconing-Ansatzes nachgewiesen werden.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die Vernetzung von Fahrzeugen mit ihrer Umwelt ist ein wichtiger Schritt in Richtung Komfort, Sicherheit und Verkehrseffizienz im Automobilumfeld. Vernetzte Fahrzeuge tauschen dabei untereinander und mit Infrastrukturkomponenten Informationen aus, die sie aufgrund der verbauten Sensoren generiert haben und ihre Nachbarn z.B. zur Vermeidung von Unfällen benötigen könnten. Die Anwendungsbreite ist nahezu unbegrenzt, wobei jede Anwendung ihre eigenen Anforderungen an das Kommunikations- und Informationssystem stellt, welche durch den Einsatz von unterschiedlichen drahtlosen Technologien erfüllt werden können. Im Fokus der vorliegenden Arbeit liegen kooperative sicherheitsrelevante Anwendungen, die zur Vermeidung von Kollisionen eingesetzt werden. Ein Hauptkriterium ist dabei die Bereitstellung von hoch aktuellen Positions- und Zustandsinformationen eines jeden Fahrzeugs, welches sich innerhalb eines bestimmten Gebiets befindet. Des Weiteren sind aufgrund des sicherheitskritischen Charakters der betrachteten Situationen kurze Übertragungszeiten gefordert, um auf Basis der erhaltenen Informationen rechtzeitig Kollisionen erkennen und vermeiden zu können. Zur Sicherstellung des Informationsbedarfs tauschen Fahrzeuge zyklisch sog. Beacon-Nachrichten aus, die unter Nutzung des speziellen IEEE 802.11p WLAN-Derivats in der unmittelbaren Umgebung verbreitet werden. Auf Basis dieser Nachrichten kann jedes Fahrzeug durch die Schätzung seiner eigenen und der jeweiligen Fahrtstrecken seiner Nachbarn die Wahrscheinlichkeit einer Kollision berechnen. Da allerdings die Bandbreite der zur Verfügung stehenden drahtlosen Kommunikationsnetze begrenzt ist, kann es in Situationen mit hoher Fahrzeugdichte zu Überlastungssituationen auf dem Kommunikationskanal kommen. Dies kann dazu führen, dass aufgrund von Signalinterferenzen und des existierenden Rauschens auf dem Übertragungsmedium einzelne Nachrichten verloren gehen. Somit nimmt die Zuverlässigkeit der Beacon-Übertragung mit steigender Anzahl von Fahrzeugen ab, obwohl gerade in diesen Situationen die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zunimmt. Die Lösung dieses Grundproblems der zuverlässigen Übertragung von Positions- und Zustandsinformationen in unzuverlässigen drahtlosen IEEE 802.11p Netzen stellt die wissenschaftliche Fragestellung der hier vorliegenden Arbeit

dar.

Zum besseren Verständnis der Problematik wurden zunächst die Anforderungen der Anwendung in den jeweiligs aufeinander folgenden Phasen der Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung betrachtet. Die Unterscheidung der beiden Phasen wurde aufgrund der Entfernung zwischen zwei Fahrzeugen und der dabei berechneten Kollisionswahrscheinlichkeit getroffen. Es wurde definiert, dass Situationen, in denen Fahrzeuge eine Distanz zwischen 100 m und 300 m untereinander aufweisen, der Kollisionserkennungsphase zugeordnet werden können. Situationen, in denen Fahrzeuge diese Distanz unterschreiten und für die eine erhöhte Kollisionswahrscheinlichkeit besteht, werden der Kollisionsvermeidungsphase zugeordnet.

Da in der Kollisionserkennungsphase aufgrund der Distanz zwischen den Fahrzeugen grundsätzlich keine unmittelbare Kollisionsgefahr besteht, ist in erster Linie gefordert, die relevanten Nachbarn in dem definierten Betrachtungsradius zu beobachten. Um diese Beobachtung durchzuführen, soll jedes Fahrzeug durchgängig die Bewegung seiner Nachbarn kennen, um kritische Situationen frühzeitig identifizieren zu können. Um diese Anforderung umzusetzen, muss sichergestellt werden, dass ein Fahrzeug jedes zyklisch ausgesendete Beacon von allen seinen relevanten Nachbarn zugestellt bekommt. Zu diesem Zweck wurde die Metrik der Awareness-Qualität aufgestellt. Dabei wird in definierten Abständen das Verhältnis zwischen den bekannten Nachbarn und den tatsächlich existierenden Nachbarn für jedes Fahrzeug gemessen. Ersteres soll durch die empfangenen Beacon-Nachrichten ermöglicht werden, wobei Letzeres direkt der Simulationsumgebung zu entnehmen ist.

In der Kollisionsvermeidungsphase wird davon ausgegangen, dass eine unmittelbare Kollision mit einem oder mehreren Nachbarfahrzeugen sehr wahrscheinlich ist. Um den Fahrer rechtzeitig zu warnen bzw. autonom auf die Situation reagieren zu können, ist es notwendig, von den erkannten möglichen Kollisionspartnern besonders aktuelle Informationen über einen definierten Zeitraum zu erhalten. Dafür wurde die Metrik der SafetyRisk aufgestellt, wobei über einen Simulationslauf die durchschnittliche Aktualität der Informationen pro Fahrzeug in Bezug auf dessen Kollisionspartner gemessen wird.

Neben dem Aufbau des jeweils geforderten Informationsdurchsatzes im Hinblick auf die Awareness-Qualität und die SafetyRisk, wurden für den Beaconing-Ansatz zusätzlich die Anforderungen der Skalierbarkeit, der Nutzenorientierung und der Kompatibilität definiert. Die Skalierbarkeit soll gewährleisten, dass der Informationsdurchsatz sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Fahrzeugdichten erzielt wird. Die Nutzenorientierung fordert, dass Nachrichten nur gesendet werden, wenn die Information für mindestens ein Fahrzeug einen Mehrwert aufweist. Es wird zwischen dem lokalen Nutzen einer Nachrichtenübertragung für ein bestimmtes Fahrzeug und dem globalen Nutzen für alle Fahrzeuge, die eine Information erhalten, unterschieden. Die Kompatibilität gibt an, wie viel Netzwerkbandbreite ein Beaconing-Algorithmus in den jeweiligen Situationen einnimmt und ob noch Bandbreite für andere Nachrichtentypen vorhanden ist. Die Bewertung der Anforderungen wird qualitativ aufgrund der Evaluierungsergebnisse vorgenommen.

Unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen wurden zunächst unterschiedliche statische Beacon-Wiederholraten von 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz untersucht. Die Evaluierung zeigt, dass gerade in der Kollisionserkennungsphase alle Varianten mit steigen-

dem Betrachtungsradius und steigender Fahrzeugdichte keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Zum einen kann dieses Resultat bei niedrigen Beacon-Wiederholraten dadurch erklärt werden, dass Nachrichten auf dem Netzwerk verloren gehen und die Wiederholung der Informationen zu lange dauert, so dass die Bewegung eines Fahrzeugs nicht durchgängig beobachtet werden kann. Zum anderen wird durch die Erhöhung der Beacon-Wiederholrate die Last auf dem Kommunikationskanal zum Teil so hoch, dass fast keine Nachrichten mehr erfolgreich übermittelt werden können.

Zur Lösung des Problems wurde in dieser Arbeit ein nutzenorientierter Beaconing-Algorithmus entwickelt, welcher auf den folgenden zwei Paradigmenwechseln im Bereich des Beaconings beruht:

- Serviceorientierung
- Mehrkanalnutzung

Im Rahmen der Arbeit wurde neben der Lösung der definierten wissenschaftlichen Problemstellung auch ein wichtiger wissenschaftlicher Beitrag geleistet, der in der detaillierten Untersuchung der gleichzeitigen Kanalnutzung begründet ist. Nach aktuellem Wissensstand ist eine derartige Analyse auf Basis von Simualtionsumgebungen bislang nicht vorgenommen worden. Der große Vorteil dabei ist, dass dadurch vor allem die Auswirkungen der parallelen Kanalnutzung bei hohen Fahrzeugdichten untersucht werden können. Im Folgenden soll das Prinzip der Lösungsansätze und die dadurch erzielten Ergebnisse kurz zusammengefasst werden.

Serviceorientierung

Das serviceorientierte Beaconing-Prinzip beruht auf der Einführung eines Request/Response-Protokolls, welches es ermöglicht, erwartete Nachrichten, die nicht zugestellt werden konnten, im Broadcast-Verfahren bei all seinen Nachbarn anzufordern. Als Reaktion auf diese Anfrage kann jeder Nachbar, der das angeforderte Beacon empfangen konnte, dieses weiterleiten. Dieses Prinzip des Beacon Forwarding Services wird in der Kollisionsvermeidungsphase eingesetzt. Des Weiteren wurde der Beacon Rate Control Service spezifiziert, welcher es erlaubt, situationsadaptiv die Beacon-Wiederholrate von ausgewählten Fahrzeugen zu steuern. Somit kann eine Erhöhung der Beacon-Wiederholrate in kritischen Situationen der Kollisionsvermeidungsphase vorgenommen werden. Der serviceorientierte Beaconing-Ansatz setzt eine niedrige Basis-Beacon-Wiederholrate von 2 Hz voraus und erhöht diese nur, wenn Bedarf an weiteren Informationen besteht. Somit erfüllen die darauf basierten Ansätze automatisch die Anforderung der Nutzenorientierung. Es wurde gezeigt, dass im Hinblick auf den Informationsdurchsatz deutliche Verbesserungen bei niedrigen und mittleren Fahrzeugdichten erzielt werden können. Der Informationsdurchsatz bei hohen Fahrzeugdichten konnte allerdings nicht signifikant verbessert werden. Dies resultiert daraus, dass in diesen Situationen das Netzwerk durch das Anfragen und Weiterleiten von Beacons stark belastet wird und somit die Paketverluste zunehmen.

Mehrkanalnutzung

Um diese Last zu verteilen, wurde die gleichzeitige Nutzung von mehreren IEEE 802.11p Kommunikationskanälen untersucht. Hierbei sollen Anfragen von Beacons auf dem Control-Kanal versendet werden, wobei die Erbringung der Services auf einem der Service-Kanäle erfolgt. Dieses Prinzip erfüllt die Anforderung nach Kompatibilität, da die einzelnen Kommunikationskanäle entlastet werden. Der Ansatz steigert darüber hinaus den globalen Nutzen im Netzwerk, da Fahrzeuge, die an der Weiterleitung eines Beacons interessiert sind, auf einen gesonderten Kanal umschalten können und somit andere Fahrzeuge mit diesen Nachrichten nicht gestört werden. Eine detaillierte Untersuchung der parallelen Kanalnutzung hat allerdings gezeigt, dass aufgrund des Nebensprechens eines Sendevorgangs nicht alle Kanäle mit gleicher Sendeleistung betrieben werden können. Somit ergibt sich für den direkt zum Control-Kanal benachbarten Service-Kanal eine Reduzierung der Sendeleistung um 15 dB. Diese abgeschwächte Sendeleistung hat wiederum Einfluss auf den Informationsdurchsatz bei höheren Kommunikationsdistanzen. Nichtsdestotrotz konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung von parallelen Kanälen eine deutliche Verbesserung des Informationsdurchsatzes sowohl für die Kollisionserkennungs- als auch die Kollisionsvermeidungsphase erzielt werden kann. Gerade unter der Annahme, dass die Möglichkeit besteht, einzelne Fahrzeuge aus der Betrachtung ausschliessen zu können, da mit diesen keine kritische Kollisionssituation besteht, kann der serviceorientierte Mehrkanal Beaconing-Ansatz sogar in der Kollisionserkennungsphase und bei einem Betrachtungsradius von 300 m einen Informationsdurchsatz von $\approx 85\%$ bei allen Fahrzeugdichten erzielen. Dies bedeutet eine signifikante Erhöhung von bis zu 400% im Vergleich zu den Ergebnisse aller statischen Beaconing-Ansätze.

Die Kombination der beiden Ansätze ergibt ein ganzheitliches Konzept eines nutzenorientierten Beaconing-Ansatzes. Die Evaluierungen haben ergeben, dass dieser im Hinblick auf alle definierten Anforderungen zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Das Konzept ist so flexibel, dass in Abhängigkeit von der Situation unterschiedliche Beacon-Wiederholraten und unterschiedliche Kommunikationskanäle genutzt werden können, so dass stets ein hoher Informationsdurchsatz ermöglicht wird.

9.2 Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept des serviceorientieren Mehrkanal-Beaconings bietet - trotz ausführlicher Untersuchungen und Evaluierungen - Anknüpfungspunkte für weitere Analysen und Erweiterungen. Obwohl die Evaluierungen der einzelnen vorgeschlagenen Varianten signifikante Verbesserungen für den Informationsdurchsatz geboten haben, versprechen die folgenden zwei Punkte weiteres Optimierungspotenzial:

1. Einführung von Unterdrückung im Beacon Forwarding Service: Wie aus den Analysen hervorgeht, gehen vor allem bei einer hohen Anzahl von Fahrzeugen viele Nach-

richtenpakete auf dem Netzwerk verloren. Diese werden dann anhand von Service-Request-Nachrichten im Falle des Beacon Forwarding Services angefragt und durch eine Beacon-Weiterleitung der Service Provider beantwortet. In Situationen, in denen viele Service Provider existieren, kann auch die Anzahl der Beacon-Weiterleitungen stark ansteigen. Dies ist nicht unbedingt immer von Vorteil. Obwohl viele redundante Nachrichten zwecks der Erhöhung des Informationsdurchsatz versendet werden, kann es bei zu viel Redundanz dazu kommen, dass alle Nachrichten auf dem Kanal verloren gehen. Um dies zu verhindern, wäre es sinnvoll, bei einer hohen Anzahl von Service Providern eine Sendeunterdrückung einzuführen. Die Unterdrückung würde bewirken, dass Service Provider die Weiterleitung eins Beacons verwerfen, wenn dieses bereits von einem anderen Knoten als Service Response versendet wurde (siehe MHVB Kapitel 3). Dazu müssten Timer eingeführt werden, die in Abhängigkeit der Distanz zwischen Service Provider und Service User eine sofortige Weiterleitung des Beacons verhindern. Das Konzept müsste allerdings - im Gegensatz zu MHVB - diejenigen Service Provider mit der niedrigsten Verzögerungsdauer versehen, die am nächsten zu dem Service User sind. Durch die verkürzte Kommunikationsdistanz besteht auch eine höhere Wahrscheinlichkeit der Nachrichtenübertragung. Wichtig dabei ist, dass nicht die komplette Redundanz bei der Beacon-Weiterleitung durch das Prinzip der Sendeunterdrückung entfernt wird. Diese spielt nämilch vor allem bei dem SCH2 eine wichtige Rolle im Bezug auf den Informationsdurchsatz. Somit ist eine Reihe von Experimenten und Simulationen notwendig, um das richtige Verhältnis zwischen der Sendeunterdrückung und der Redundanz zu finden.

2. Adaptive Steuerung des Service-Request-Intervalls im Beacon Rate Control Service: Der Bidirektionale Beacon Rate Control Service ermöglicht es einem Fahrzeug, das eine sicherheitskritische Situation mit einem seiner Nachbarn erkannt hat, diesen direkt zu adressieren und von ihm eine höhere Beacon-Wiederholrate für eine definierte Zeitdauer anzufragen. Neben dieser angefragten Wiederholrate und der Dauer der Serviceerbringung ist dabei auch der Zeitpunkt der Service-Anfrage entscheidend. In den bisher betrachteten Szenarien wurden feste Anfrage-Intervalle von 500 ms und 1000 ms angenommen. Dies setzt wiederum voraus, dass im Mittel die Service-Anfrage von den jeweiligen Service Providern grundsätzlich empfangen werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass diese Parametrisierung eine deutliche Verbesserung des Informationsdurchsatzes im Vergleich zu den angenommenen statischen Beacon-Wiederholraten erzielen kann. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass einzelne Service-Anfragen bei erhöhter Kanallast verloren gehen und dass der Service nicht unmittelbar erbracht werden kann. Somit ist es notwendig, bis zum nächsten regulären Service-Request-Zeitpunkt zu warten, um einen potenziellen Verlust der Service-Anfrage zu kompensieren. Ein möglicher Verbesserungsansatz wäre eine Service-Anfrage zu wiederholen, wenn nach einem bestimmten Timeout keine Antwort von dem adressierten Service Provider erhalten wird. Dabei muss allerdings bedacht werden, dass diese Anfragen nicht beliebig oft in Szenarien wiederholt werden, in denen der potenzielle Kollisionspartner nicht mehr erreichbar ist, da er z.B.

von anderen Gegenständen abgeschattet wird. Hierbei sollte die erhöhte Frequenz der Service-Anfragen nicht unnötig den Kommunikationskanal belasten.

Ein weiterer interessanter Forschungsaspekt ist die Betrachtung des serviceorientierten Beaconing-Ansatzes in Szenarien mit hohen Abschattungseffekten. Obwohl diese sogenannten Non-Line-of-Sight Szenarien in der hier vorliegenden Arbeit nicht untersucht worden sind, ist zu erwarten, dass gerade der Beacon Forwarding Service ein hohes Maß an Verbesserungspotenzial im Hinblick auf die Awareness-Qualität bietet. Vor allem der Multi-Hop-Charakter kann einen Nachrichtenaustausch um Hindernisse herum ermöglichen, ohne die Sendeleistung der einzelnen Pakete zu erhöhen. Somit wäre es auch möglich, die Bewegung eines Fahrzeuges zu verfolgen, auch wenn dieses gerade kurzzeitig - z.B. von einem LWK - abgeschattet wird. Nimmt man darüber hinaus an, dass Fahrzeuge, die als Abschattungsobjekte fungieren, auch mit einem Kommunikationssystem ausgestattet sind, so können diese direkt als Service Provider dienen und die Beacons des abgestatteten Fahrzeugs weiterleiten.

Abschließend wäre es von Interesse den vorgeschlagenen serviceorientieren Beaconing-Ansatz nicht nur mit Hilfe von Simulationsumgebungen, sondern auch in realen Szenarien anhand von prototypischen Implementierungen zu evaluieren. Dies wäre sicherlich ein spannender Aspekt für Forschungsprojekte wie simTD [9] oder dessen Nachfolger Drive-C2X [22], um zu prüfen, ob der Ansatz in die Standardisierungsaktivität der ETSI [19] eingebracht werden kann.

Literaturverzeichnis

[1] C. Huang und Y. Chen, *Telematics communication technologies and vehicular networks: wireless architectures and applications Hershey* PA: Information Science Reference, ISBN13: 9781605668406, 2010.

[2] M. Gründl, *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*

[3] K.Naab, G.Reichart: *Gundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht*, In: Seminar „Fahrerassistenzsysteme“, Haus der Technik, Essen, 16./17.11.1998

[4] T. Kosch, M. Strassberger, Ch. Schroth, M. Bechler, *Automotive Inter-networking*, Wiley John + Sons, ISBN: 0470749792, 2012

[5] Strassberger, M., *Kontextbereitstellung in Automobilen Ad-hoc Netzen*, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universitäat München, 2007.

[6] Katrin Bilstrup, Elisabeth Uhlemann, Erik G.Strom 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(Article ID 902414), 2009.

[7] Zang, Y. and Sories, S. and Guido Gehlen, and Han, B. *A Hybrid Solution for Vehicular Communications*, In Proceeding of ITS World Congress 2009, p. 12, Stockholm, Sweden, 09/2009

[8] A. Festag, L. Le and M. Goleva, “Field Operational Tests for Cooperative Systems. *A Tussle Between Research, Standardization and Deployment*, in Proceedings of VANET, Las Vegas, NV, USA, September 2011

[9] *simTD - Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland*, [Online]: http://www.simTd.de/, Last accessed: March 2012.

[10] *NoW Network-on-Wheels*, [Online]: http://www.network-on-wheels.de/, Last accessed: March 2012.

[11] A. Festag, G. Noecker, M. Strassberger, A. Lübke, B. Bochow, M. Torrent-Moreno, S. Schnaufer, R. Eigner, C. Catrinescu, J. Kunisch, *NoW - Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements*, In proceedings of 6th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg, Germany, March 2008, to appear

[12] A. Lübke, *Car-to-Car-Kommunikation – Technologische Herausforderungen*, VDE, 2004

[13] *BMW ConnectedDrive*, [Online]: http://www.bmw.de/, Last accessed:March 2012.

[14] *AUDI Travolution*, [Online]: http://www.audi.de/, Last accessed: March 2012.

[15] *Nissan's Carwings*, [online]: http://www.nissan-global.com/, Last accessed: March 2012.

[16] *GM OnStar*, [online]: http://www.onstar.com/, Last accessed: March 2012.

[17] *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*,[Online]: http://www.ieee.org/, Last visited March 2012.

[18] *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*,[Online]: http://www.etsi.org/, Last visited March 2012.

[19] *ETSI Itelligent Transportation Systems*, [Online]: http://www.etsi.org/website/Technologies/IntelligentTransportSystems.aspx, Last accessed: March 2012.

[20] *COMeSafety/COMeSafety2*, [Online]: http://comesafety.org, Last accessed: March 2012.

[21] *C2CCC. Car 2 Car Communication Consortium* [Online]: http://www.car-to-car.org/, Last accessed: March 2012.

[22] *Projekt Drive-C2X*, [Online]: http://www.drive-c2x.eu//, Last accessed: March 2012.

[23] *Car2Car Communication Consortium - Manifesto*, [Online]: http://www.car-to-car.org/, Last accessed: March 2012.

[24] Vehicle Safety Communications Consortium, *Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report, Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC*, March 2005. $http://www.its.dot.gov/research_docs/pdf/59vehicle-safety.pdf$, Last accessed: March 2012

[25] T. Marc, F. Andreas, and H. Hannes, *System design for information dissemination in VANETs*, in Proc. 3rd Int. Workshop Intell. Transp. (WIT), 2006, pp. 27–33.

[26] H. Fueßler, M. Torrent-Moreno, M. Transier, A. Festag and H. Hartenstein, *Thoughts on a Protocol Architecture for Vehicular Ad-Hoc Networks*, in Proc. of WIT 2005, March 2005, pp. 41–45.

[27] Klanner, Felix, *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug. Technische Universität Darmstadt*, Fachgebiet Fahrzeugtechnik. Dissertation , (2008)

[28] J. Misener, R. Sengupta, and K. Krishnan, *Cooperative collision warning: Enabling crash avoidance with wireless technology*, 12th ITS World Congr., San Francisco, CA, 2005.

[29] H. Hartenstein, K. Laberteaux, *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0470740569, Dezember 2009

[30] S. Iwanowski, *Grundlagen der drahtlosen Übertragung*, Informatikseminar, Fachhochschule Wedel, 2004

[31] A. Kuntz, *Dienstbasierte Kommunikation über unzuverlässige drahtlose Verbindungen für selbstorganisierende Sensor-Aktor-Netze*, KIT Scientific Publishing, ISBN: 978-3-86644-698-4, 2011

[32] A. Luntovskyy, D. Gutter, I. Melnyk, *Planung und Optimierung von Rechnernetzen: Methoden, Modelle, Tools für Entwurf, Diagnose und Management im Lebenszyklus von drahtgebundenen und drahtlosen Rechnernetzen*, Gabler Wissenschaftsverlage, 2011

[33] D. C. Giancoli, *Physik: Lehr- und Übungsbuch*, Pearson Studium, Oktober 2009

[34] G. M. Whitman, K. S. Kim, and E. Niver, *A theoretical model for radio signal attenuation inside buildings*, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 44, no. 3, pp. 621–629, 1995

[35] E. Ben Hamida, G. Chelius, and J. M. Gorce, *Impact of the physical layer modeling on the accuracy and scalability of wireless network simulation*, SIMULATION, 2009.

[36] C. Wewetzer, M. Caliskan, K. Meier and A. Luebke *Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication*, In ITST '07: Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications, pages 287–292, June 2007.

[37] Daniel Jiang, Qi Chen, Luca Delgrossi, *Optimal Data Rate Selection for Vehicle Safety Communications*, ACM Workshop VANET 2008

[38] R. K. Schmidt, T. Koellmer, T. Leinmüller, B. Böddeker, and G. Schaefer, *Degradation of transmission range in vanets caused by interference*, Will appear in: Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation

[39] Q. Chen, F. Schmidt-Eisenlohr, D. Jiang, M. Torrent-Moreno, L. Delgrossi, and H. Hartenstein, *Overhaul of ieee 802.11 modeling and simulation in ns-2*, In MSWiM '07: Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems, pages 159–168, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[40] F. Schmidt-Eisenlohr, M. Torrent-Moreno, J. Mittag, and H. Hartenstein, *Simulation platform for inter-vehicle communications and analysis of periodic information exchange*, In Proceedings of the 4th Annual IEEE/IFIP Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS), Jan. 2007.

[41] Schroth, C., Eigner, R., Eichler, S., and Strassberger, M., *A framework for network utility maximization in VANETs*, In Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET) (New York, USA, 2006), ACM.

[42] Adler, C., Eichler, S., Kosch, T., Schroth, C., and Strassberger, M., *Self-organized and Context-Adaptive Information Diffusion in Vehicular Ad Hoc Networks*, In 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) (September 2006).

[43] S. Eichler, C. Schroth, T. Kosch and Markus Strassberger, *Strategies for context-adaptive message dissemination in vehicular ad hoc networks*, V2VCOM, 2006

[44] C. Khorakhun, H. Busche, and H. Rohling, *Congestion control for vanets based on power or rate adaptation*, in Workshop on Intelligent Transportation (WIT) 2008, Mar. 2008.

[45] G. Bianchi, *Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18(3):535–547, 2000.

[46] Yousefi, S.; Fathy, M.; Benslimane, A. 2007b. *Performance of beacon message dissemination protocols in vehicular ad hoc networks (VANETs)*, Journal of Zhejiang University – Science A 8(12): 1990–2004.

[47] Li, X., Nguyen, T., Martin, R., *Analytic Model Predicting the Optimal Range for Maximizing 1-Hop Broadcast Coverage in Dense Wireless Networks*. Proc. Int. Conf. of Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks, p.172-182.

[48] Li, X., Nguyen, T., Martin, R., *Using Adaptive Range Control to Maximize 1-Hop Broadcast Coverage in Dense Wireless Networks*, Proc. 1st IEEE Int. Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, p.397-405.

[49] Torrent-Moreno, M., Santi, P., Hartenstein, H., 2005, *Fair Sharing of Bandwidth in VANETs*, Proc. 2nd ACM Int. Workshop on Vehicular Ad hoc NETworks, p.49-58.

[50] T. Osafune, L. Lin, and M. Lenardi, *Multi-hop vehicular broadcast (MHVB)*, 6th International Conference on ITS Telecommunications, 2006.

[51] M.N. Mariyasagayam, T. Osafune, M. Lenardi, *Enhanced Multi-Hop Vehicular Broadcast (MHVB) for Active Safety Applications*, ITST '07. 7th International Conference on ITS, 2007.

[52] A. Rahman and P. Gburzynski, *Hidden problems with the hidden node problem*. In Proceedings of 23rd Biennial Symposium on Communications, pages 270–273, Kingston, Ontario, Canada, May 29-June 1 2006.

[53] F. Tobagi, L. Kleinrock, *Packet Switching in Radio Channels: Part II–The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution*, University of California, Los Angeles, Calif., Communications, IEEE Transactions on Communications, Vol. 23, Dec 1975

[54] M. Torrent-Moreno, D. Jiang, and H. Hartenstein, *Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-based Vehicular Ad-Hoc Networks*, 1st ACM Wksp. Vehic. Ad-hoc Networks, 2004.

[55] Y. Toor, P. Mühlethaler, A. Laouiti, and A. De La Fortelle, *Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 10(3):74–88, 2008.

[56] C. Maihöfer, W. Franz, and R. Eberhardt, *Stored Geocast*, Proc. 13, ITG/GI-Fachtagung Kommunikation in verteilten Systemen (KiVS), Feb. 2003.

[57] A. Festag, R. Baldessari, W. Zhang, L. Le, A. Sarma, and M. Fukukawa, *Car-2-x communication for safety and infotainment in europe*, NEC Technical Journal, vol. 3, no. 1, 2008.

[58] Le, L., Festag, A., Baldessari, R. and Zhang, W., *V2X communication and intersection safety*, in Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springer, 2009, pp. 97-107

[59] H. Moustafa , Y.Zhang, *Vehicular Networks: Techniques, Standards, and Applications*, Auerbach Pubn, ISBN: 978-1420085716, April 2009

[60] *Federal Communications Commission. News Release*, October 1999. FCC. [Online] *http* : $//www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/-1999/nret9006.html$, Last accessed: March 2012

[61] *European Telecommunications Standards Institute, News Release*, September 2008. ETSI. [Online] *http* : $//www.etsi.org/WebSite/NewsandEvents/-2008_09_Harmonizedstandards_ITS.aspx$, Last accessed: March 2012

[62] D. Jiang, L. Delgrossi, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, IEEE Vehicular Technology Conference - Spring 2008, May 2008

[63] R.K. Schmidt ; T. Leinmüller, B. Böddeker, *V2X Kommunikation*, 17. Aachener Kolloquium 2008, Aachen, Deutschland, 6.-8. Oktober 2008

[64] T. Mak, K.P. Laberteaux and G. R Sengupa, *A Multi-Channel VANET Providing Concurrent Safety and Commercial Services*, 2005.

[65] IEEE Std. 802.11, *Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Amendment 7*, 2007.

[66] A.S. Tannenbaum, *Computer Networks*, Prentice Hall, U.S., 2003

[67] *IEEE P802.11p/D3.0, Part 11: Wireless LAN Medium Access Contrl (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), Draft 3.0*, July 2007.

[68] *IEEE Std 802.11a/D7.0-1999, "Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the GHz Band.*

[69] *IEEE 802.11g-2003, Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, 2009

[70] *IEEE Std. 802.11e-2005, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*, 2005.

[71] IEEE Std P1609.3, *IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Networking Services*, 2007.

[72] IEEE P1609.4, *Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation*, 2006.

[73] *3GPP Specification series*, [Online]: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm Last accessed: March 2012

[74] *ETSI TR 102 638, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Application; Definitions*, 2009.

[75] *ETSI TS 102 637-3, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Application; Part 3: Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service*, ETSI, 2010.

[76] *ETSI TS 102 637-2, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Co-operative Awareness Basic Service*, ETSI, 2010.

[77] A. Colvin, *CSMA with collision avoidance* Computer Communications, Volume 6, Issue 5, October 1983, Pages 227-235

[78] Crash Avoidance Metrcs Partnership (CAMP), *Identify intelligen Vehicle Safety Application s Enabled by DSRC. Vehicle Safety Communications Project, Task 3 Report* Public Document, 2004

[79] J. W. Robinson and T. S. Randhawa, *Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function*, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 22, no. 5, pp. 917–928, Jun. 2004.

[80] Q. Ni, *Performance analysis and enhancements for IEEE 802.11e wireless networks*, IEEE Network 19 (4) (2005) 21– 27.

[81] E. Schoch, F. Kargl, T. Leinmüller, and M. Weber, *Communication patterns in vanets*, IEEE Communcations Magazine, November 2008.

[82] J. Mittag, F. Thomas, J. H¨arri, and H. Hartenstein, *A comparison of single- and multi-hop beaconing in vanets*, in VANET '09: Proceedings of the sixth ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 69–78.

[83] T. Kosch et al., *The Scalability Problem of Vehicular Ad Hoc Networks and How to Solve It*, IEEE Wireless Commun., vol. 13, no. 5, Oct. 2006, pp. 22–28.

[84] R. J. La and Venkat Anantharam, *Utility-Based Rate Control in the Internet for Elastic Traffic*, IEEE/ACM Trans. Net., vol. 10, no. 2, Apr. 2002, pp. 272–86.

[85] C. Schroth, R. Eigner, M. Strassberger, and S. Eichler, *A framework for network utility maximization in vanets*, in Proceedings of the third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006), 2006.

[86] T. Kosch, *Situationsadaptive Kommunikation in Automobilen Ad-hoc Netzen*, Dissertation, Munich University of Technology, May 2005

[87] R. Schmidt, T. Leinmüller, E. Schoch, F. Kargl, G. Schafer. *Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication*, IEEE Network 24(1): 14-19 (2010)

[88] G. Korkmaz, E. Ekici, F. O¨ zgu¨ner, and U. Özgüner, *Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems*, in VANET '04: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 76–85.

[89] J. L. Sobrinho and A. S. Krisnakumar, Distributed multiple access procedures to provide voice communications over IEEE 802.11 wireless networks, in Global Telecommunications Conference, vol. 3, pp. 1689-1694, 1996.

[90] J. L. Sobrinho and A. S. Krisnakumar, *Quality-of-service in ad-hoc carrier sense multiple access wireless networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, pp. 1353-1368, August 1999.

[91] S. Park and R. R. Palasdeokar, *Reliable one-hop broadcasting (rob) in mobile ad hoc networks*, in PE-WASUN '05: Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks. New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 234–237.

[92] W. C. Hung, K. L. Law, and A. Leon-Garcia. *A Dynamic Mulit-channel MAC for Ad Hoc LAN*, 21st Biennial Symposium on Crommunications, pages 31-35, June 2002

[93] S. L. Wu, Y. C. Tseng, C.Y. Lin and J. P. Sheu. A *Multi-channel MAC Protocol with power control for Multi-hop Mobile Ad Hoc Network*, ICDCSW '01, Mesa, Arizona, 2001.

[94] S. Rezaei, R. Sengupta, H. Krishnan, and X. Guan, *Adaptive communication scheme for cooperative active safety system*, in WoCo, 2008.

[95] L. Le, W. Zhang, A Festag, and R. Baldessari *Analysis of Approaches for Channel Allocation in Car-to-Car Communication* 1st International Workshop on Interoperable Vehicles (IOV 2008), Switzerland 2008

[96] *NS2 Network Simulator*, [Online] $http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/User_Information$, Last accessed: March 2012

[97] *Global Mobile Information System Simulator (GloMoSim)*, [0nline] http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/, Last accessed: March 2012

[98] V. Rai, F. Bai, J. Kenney, K. Laberteaux, *Cross-Channel Interference Test Results: A report from the VSC-A project.*, Jul. 2007

[99] *Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary: J2735. 2 Society Automotive Engineers International*. SAE, 2009.

[100] *simTD Projektergebnis: Spezifikation der Kommunikationsprotokolle*, 12.2009, [Online]: http://www.simtd.de/, Last accessed: March 2012

[101] *JAVA Hompage* http://java.com/de/, last accessed: March. 2012

[102] *JiST / SWANS Java in Simulation Time / Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator*, Cornell University, USA, March, 2004.

[103] *JiST/SWANS extensions*, Ulm University, Germany, http://vanet.info/ Last accessed: March. 2012

[104] R. Barr, *JiST Java in Simulation Time User Guide*, March. 2012.

[105] *STRAW - STreet RAndom Waypoint - vehiclar mobility model for network simulations*, [online]: http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/STRAW/index.php, Last accessed: March 2012

Eigene Publikationen

[106] R. Lasowski, F. Gschwandtner *A novel beaconing approach based on sender-centric movement predictions for collision avoidance in VANETS*, ACM VANET 2011, Workshop, USA, Las Vegas, September 2011

[107] R. Lasowski, M. Strassberger *A Multi-Channel Beaconing Service for Collision Avoidance in Vehicular Ad-Hoc Networks* IEEE 74rd Vehicular Technology Conference, USA, San Francisco, September, 2011

[108] R. Lasowski, R. K. Schmidt *A Multi-Channel Beacon Forwarding Approach in Dual Radio Vehicular Ad-Hoc Networks* 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Germany, Baden-Baden, June, 2011

[109] R. Lasowski, F. Gschwandtner and C. Scheuermann, *A Multi Channel Synchronization Approach in Dual Radio Vehicular Ad-Hoc Networks*, IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, Budapest, Hungary, 2011.

[110] M. Duchon, C. Schindhelm, R. Lasowski *Distributed Cooperative On-Demand Transportation* IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, Hungary, Budapest, May, 2011

[111] R. Lasowski, C. Scheuermann, F. Gschwandtner and C. Linnhoff-Popien, *Evaluation of Adjacent Channel Interference in Single Radio Vehicular Ad-Hoc Networks*, 3rd IEEE Intelligent Vehicular Communications System Workshop, Las Vegas, USA, January, 2011.

[112] R. K. Schmidt, R. Lasowski, T. Leinmüller, C. Linnhoff-Popien and G. Schäfer *An Approach for Selective Beacon Forwarding to Improve Cooperative Awareness*, IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), New York, USA, December, 2010.

[113] T. Kosch, I. Kulp, M. Bechler, M. Strassberger, B. Weyl, R. Lasowski Communication architecture for cooperative systems in Europe IEEE Communications Magazine , Volume 47 , Issue 5 ISSN:0163-6804, (May 2009)

[114] M. Strassberger, C. Schroth, R. Lasowski Vehicular Networks, Techniques Standards and Applications – Data Dissemination in Vehicular Networks, Taylor & Francis, Inc., ISBN-13: 9781420085716 , Chapter 7, Pages 181-220, 2009

[115] Robert Lasowski, Markus Strassberger Vehicular Networks, Techniques Standards and Applications – Market Introduction and Deployment Strategies, Taylor & Francis, Inc., ISBN-13: 9781420085716 , Chapter 15, Pages 409-429, 2009

[116] Robert Lasowski, Tim Leinmüller, Markus Strassberger,OpenWAVE Engine / WSU - A Platform For C2C-CC,15th World Congress on Intelligent Transport Systems, New York, USA, November 16-20, 2008.

[117] Robert Lasowski Car to Car Communication – Chancen und Herausforderungen Wireless Communication and Information, Berlin, Germany, October 2007

[118] Markus Strassberger, Robert Lasowski., A New Approach For Obstacle Detection Based On Dynamic Vehicle Behaviour 10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany 2006

Lebenslauf

Name	Robert Lasowski
Anschrift	Boschetsriederstr. 61a, 81379 München
Geburtsdatum	09. Februar 1980
Geburtsort	Beuthen
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

1991 - 2000	Winfriedschule Fulda Abitur
2001 - 2005	Fachhochschule Fulda Diplom in Informatik

2012 -	Capgemini Berater
2009 - 2012	Lehrstuhl für Mobile und Verteilte Systeme Institut für Informatik der Ludwig-Maximilians-Universität Doktorand
2005 - 2012	Cirquent GmbH IT-Berater
2004	Fachhochschule Fulda Tutor für C++ Programmierung
2004 - 2005	Data Consult Systemhaus GmbH Werkstudent für Webbasierte Softwareentwicklung
2003	Fachhochschule Fulda Tutor für JAVA Programmierung