Beiträge aus der Informationstechnik

Mobile Nachrichtenübertragung
Nr. 89

Sebastian Kühlmorgen

Szenariobasierte Untersuchung von dezentraler Überlaststeuerung und kooperativem Relaying in Fahrzeugkommunikationsnetzen

VOGT

Dresden 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet at http://dnb.dnb.de.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2019

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Szenariobasierte Untersuchung von dezentraler Überlaststeuerung und kooperativem Relaying in Fahrzeugkommunikationsnetzen“ von Sebastian Kühlmorgen überein.

© Jörg Vogt Verlag 2019
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-034-6

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

Szenariobasierte Untersuchung von dezentraler Überlaststeuerung und kooperativem Relaying in Fahrzeugkommunikationsnetzen

Sebastian Kühlmorgen

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Kambiz Jamshidi
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Fettweis Prof. Dr.-Ing. Andreas Timm-Giel
Tag der Einreichung:	03.12.2018
Tag der Verteidigung:	12.03.2019

Sebastian Kühlmorgen
Szenariobasierte Untersuchung von dezentraler Überlaststeuerung und kooperativem Relaying in Fahrzeugkommunikationsnetzen
Dissertation, 12.03.2019

Vodafone Stiftungslehrstuhl für Mobile Kommunikationssysteme
Institut für Nachrichtentechnik
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden, Germany

Abstract

The increasing use of information and communications technologies in transport systems enables close cooperation between road users. Such cooperative intelligent transport systems have the potential to sustainably improve the safety, efficiency and comfort of the transport of people and goods. Especially in road traffic, the use of vehicle-to-vehicle or vehicle-to-everything (V2X) communication leads to a multitude of new applications. These range from driver information and warnings, driving recommendations at intersections with the aid of traffic light systems to the support for vehicle automation.

After several years of research, development and standardization, a first V2X system based on a variant of Wi-Fi (IEEE 802.11) was developed, comprising an entire protocol stack. This variant is referred to as ITS-G5 in Europe and DSRC (Dedicated Short Range Communication) in the USA. ITS-G5 uses a simple ad hoc communication mode with a random channel access mechanism. Packets are forwarded through geographic routing, which is achieved through single- and multi-hop communication over ITS-G5 links. At higher layers of the protocol stack, communication services exist that support applications and provide various message types for periodic and event-driven information.

As a first step, this thesis evaluates existing cooperative intelligent transport systems (C-ITS) based on ITS-G5 as a baseline for further performance improvements. As an essential result of this initial study, one of the possible routing algorithms in the existing C-ITS – Contention-based Forwarding (CBF) – is selected as the default algorithm due to its performance. For high- and low-loads (channel load, vehicle density), all routing algorithms show a performance deterioration of packet reception in terms of reliability and latency. Therefore, the focus lies at high- and low-load scenarios. The existing algorithms and protocols are extended to improve their performance.

Decentralized congestion control (DCC) mechanisms, adapted to the decentralized structure of ITS-G5, are used to avoid channel congestion and the corresponding performance deterioration. DCC adjusts a vehicle's packet rate to keep the channel load below a predefined threshold, which is a portion of the total channel capacity. The packet rate is controlled by a Gatekeeper in the access layer, taking into account the measured channel load. The Gatekeeper introduces an additional delay in case of channel congestion that corresponds

to a reduction of the packet rate. The additional delay negatively affects the functionality of CBF and causes a malfunction.

This thesis examines multi-hop routing with CBF in connection with decentralized congestion control using the Gatekeeper and a rate control algorithm in a high channel load scenario. A *Congestion-enabled Forwarding* algorithm is introduced, in which routing and DCC are combined. With *Congestion-enabled Forwarding*, the functionality of CBF can be extended into high channel load scenarios. It also improves the performance for mixed data traffic with different priorities for single and multi-hop packets in terms of reliability and latency. The simulations are carried out in a freeway scenario. An analysis was used to numerically determine the packet rate and channel load for the malfunction of CBF. In addition, the analysis validated the simulation results.

For low-load scenarios – low vehicle densities – just few nodes in the network exist that can forward the packet. These nodes have a low link quality due to the large distance between them. One possibility to increase the reliability of communication is the use of cooperative relaying (CoRe) with joint decoding (JD) (CoRe & JD). A packet is sent via multiple paths from the source to the destination. All packet copies that result from the forwarding over various routes are jointly decoded at the destination. An extension of this scheme enables the forwarding of corrupted packets, which is referred to as "lossy forwarding". This extension has numerous implications for the design of the communication system. Therefore, in this thesis the *Enhanced-CBF* algorithm is developed to apply CoRe & JD including lossy forwarding to an ad hoc network. *Enhanced-CBF* is simulated for two scenarios. The first scenario illustrates that the algorithm works and the second scenario evaluates the usability for vehicular communication. The results show a performance improvement in terms of reliability. Additionally, the communication range is increased, which gives the driver additional time to react and perform driving manoeuvres in safety-critical situations.

Both scenarios – high- and low-load – are critical when using C-ITS. This thesis extends the existing C-ITS to provide mechanisms to improve the performance in both scenarios.

Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in Verkehrssystemen ermöglicht eine enge Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern. Solche Kooperativen Intelligenten Verkehrssysteme haben das Potenzial, die Sicherheit sowie die Effizienz und den Komfort des Transports von Menschen und Gütern nachhaltig zu verbessern. Insbesondere im Straßenverkehr führt der Einsatz von Fahrzeugkommunikation – Fahrzeug-zu-Fahrzeug oder Verkehrsvernetzung (engl. Vehicle-to-Everything, V2X) – zu einer Vielzahl von neuen Anwendungen. Diese reichen von Fahrerinformationen und -warnungen, über Fahrempfehlungen an Kreuzungen mit Hilfe von Lichtsignalanlagen bis hin zur Unterstützung der Fahrzeugautomatisierung.

Nach mehreren Jahren Forschung, Entwicklung und Standardisierung ist ein erstes V2X-System entstanden, das auf einer Variante des WLAN (IEEE 802.11) basiert und einen gesamten Protokollstapel umfasst. Diese Variante wird in Europa als ITS-G5 und in den USA als DSRC (Dedicated Short Range Communication) bezeichnet. ITS-G5 benutzt einen einfachen Ad-hoc-Kommunikationsmodus mit einem zufallsbasierten Kanalzugriffsmechanismus. Datenpakete werden durch geographisches Routing verteilt, das mit single- und multi-hop Kommunikation über ITS-G5-Kommunikationsverbindungen realisiert wird. Auf höheren Schichten des Protokollstapels gibt es Kommunikationsdienste, die Anwendungen unterstützen und verschiedene Nachrichtentypen für periodische und ereignisgesteuerte Informationen zur Verfügung stellen.

In dieser Arbeit wird der aktuelle Stand der Technik, d. h. die existierenden Kooperativen Intelligenten Verkehrssysteme (C-ITS) auf Basis von ITS-G5, als Referenz für weiterführende Performanceverbesserungen evaluiert. Als wesentliches Ergebnis dieser initialen Studie wird einer der möglichen Routing-Algorithmen im existierenden C-ITS – Contention-based Forwarding (CBF) – aufgrund seiner Performance als Basisalgorithmus ausgewählt. Für hohe und niedrige Last (Kanallast, Fahrzeugdichte) zeigen alle Routing-Algorithmen in Bezug auf die Zuverlässigkeit und Latenz des Paketempfangs einen Performance-Abfall. Daher wird im Weiteren der Fokus auf spezielle Szenarien für hohe und niedrige Last gelegt und die existierenden Algorithmen und Protokolle erweitert, um deren Performance zu verbessern.

Um eine Überlast auf dem drahtlosen Kanal und den damit verbundenen Performance-Abfall zu vermeiden, werden Mechanismen zur Überlaststeue-

rung (engl. Decentralized Congestion Control, DCC) verwendet, die an die verteilte Struktur von ITS-G5 angepasst sind. DCC passt die Paketrate eines Fahrzeugs an, damit das Netzwerk unter einer vorgegebenen Schwelle der Kanallast bleibt und nur ein Teil der gesamten Netzwerkkapazität genutzt wird. Die Paketrate wird in der Zugangsschicht mit einem „Gatekeeper“ unter Einbeziehung der gemessenen Kanallast gesteuert. Der Gatekeeper führt bei Überlast eine zusätzliche Verzögerung ein, die einer Senkung der Paketrate entspricht. Dies hat eine Fehlfunktion von CBF zur Folge, da die zusätzliche Verzögerung den Mechanismus von CBF negativ beeinflusst.

In dieser Arbeit wird das mit CBF durchgeführte multi-hop Routing im Zusammenhang mit DCC unter Verwendung des Gatekeepers und einem Ratensteuerungsalgorithmus in einem Szenario mit hoher Kanallast untersucht. Es wird der Algorithmus *Congestion-enabled Forwarding* eingeführt, bei dem das Routing und DCC gemeinsam betrachtet wird. Mit *Congestion-enabled Forwarding* kann die Funktionalität von CBF unter hoher Kanallast wiederhergestellt werden. Weiterhin wird die Performance in Bezug auf die Zuverlässigkeit und Latenz für gemischten Datenverkehr mit verschiedenen Prioritäten für single- und multi-hop Paketen stark erhöht. Die Untersuchungen werden simulativ in einem Autobahnszenario durchgeführt. Mit Hilfe einer Analyse wurde die Paketrate und der Wert der Kanallast für die Fehlfunktion von CBF numerisch bestimmt. Darüber hinaus validierte die Analyse die simulativen Ergebnisse.

Für Szenarien mit niedriger Last – niedrige Fahrzeugdichte – gibt es lediglich wenige Knoten im Netzwerk, die das Paket weiterleiten können. Die Knoten haben aufgrund des großen mittleren Abstands untereinander eine niedrige Qualität der Kommunikationsverbindung und damit eine niedrige Zuverlässigkeit des Paketempfangs. Eine Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Kommunikation zu erhöhen, ist das Verfahren Kooperatives Relaying (CoRe) mit Joint-Decoding (JD) (CoRe & JD). Hierbei wird ein Paket über mehrere Pfade von einem Ursprungsknoten zu einem Zielknoten geleitet und dort alle Paketkopien, die durch das Weiterleiten über die verschiedenen Routen entstehen, gemeinsam dekodiert. Eine Erweiterung dieses Verfahrens, das als „Lossy-Forwarding“ bezeichnet wird, erlaubt das Weiterleiten von fehlerbehafteten Paketen. Die Erweiterung hat zahlreiche Implikationen auf das Design des Kommunikationssystems. Daher wird in dieser Arbeit der Algorithmus *Enhanced-CBF* entwickelt, um CoRe & JD inklusive Lossy-Forwarding auf Ad-hoc-Netzwerke anwenden zu können. *Enhanced-CBF* wird simulativ für zwei Szenarien untersucht. Zum einen um die Funktionswei-

se des Algorithmus zu zeigen, zum anderen um die Anwendung in einem Szenario für Fahrzeugkommunikation zu evaluieren. Dabei konnte eine Verbesserung der Performance für die Zuverlässigkeit und eine Vergrößerung der Kommunikationsreichweite beobachtet werden. Dies stellt dem Fahrer in sicherheitskritischen Situationen zusätzliche Zeit zum Reagieren und zum Ausführen von Fahrmanövern zur Verfügung.

Beide Szenarien – hohe und niedrige Last – sind kritisch beim Einsatz von C-ITS. Die vorliegende Arbeit erweitert das existierenden C-ITS, um Mechanismen zur Performance-Verbesserung in beiden Szenarien bereitzustellen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand am Vodafone Stiftungslehrstuhl für Mobile Kommunikationssysteme der Technischen Universität Dresden in der Zeit zwischen 2014 und 2018. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt und begleitet haben.

Der größte Dank gebührt meinem Doktorvater Professor Gerhard Fettweis für die Aufnahme in seinen Lehrstuhl und die Möglichkeit, meine Dissertation anfertigen zu dürfen. Weiterhin möchte ich mich für die Motivierung, die vielen guten Hinweise und die fortwährende Unterstützung während meiner Zeit als Doktorand bedanken.

Professor Andreas Timm-Giel danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Zweitkorrektur. Außerdem möchte ich mich für die guten Hinweise zur Verbesserung meiner Dissertation bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Andreas Festag, der mich während seiner Zeit am Vodafone Lehrstuhl und auch danach betreut hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Den technischen Mitarbeitern Raffael Kozerski und Rüdiger Hartmann möchte ich dafür danken, dass sie sich immer für mich Zeit genommen haben, wenn ich ihre Hilfe benötigte.

Bei Kathrin Fromke, Steffen Watzek und Sylvia Steppat möchte ich mich für den fortwährenden Rückhalt bei den täglichen organisatorischen Dingen bedanken.

Ignacio Llatser und Arturo Gonzalez danke ich für die vielen wissenschaftlichen Gespräche. Sie standen mir jederzeit für Diskussionen zur Seite.

Außerdem bedanke ich mich bei den übrigen Vodafone Lehrstuhl-Mitarbeitern, mit denen ich eine wundervolle Zeit hatte.

Einen sehr großen Dank möchte ich meinem Opa, Heinz Kießling, widmen, der mich seit meiner frühesten Kindheit immer gefördert und unterstützt hat. Ohne ihn hätte ich niemals dieses große Interesse und die Neugier für unbekannte Dinge und die Wissenschaft entwickelt.

Meiner Familie möchte ich einen besonderen Dank für die Unterstützung während meiner Zeit als Doktorand aussprechen, wodurch ich meine volle Aufmerksamkeit auf meine Arbeit richten konnte.

Inhaltsverzeichnis

Abstract / Kurzfassung iii

Danksagung ix

Inhaltsverzeichnis xi

1 Einleitung 1
- 1.1 Motivation für Fahrzeugkommunikation . . . 1
- 1.2 Anwendungen und Dienste . . . 2
- 1.3 Komplexität des Gesamtsystems . . . 4
- 1.4 Beitrag der Arbeit . . . 5
- 1.5 Aufbau der Arbeit . . . 7
- 1.6 Bereits veröffentlichte Teile der Arbeit . . . 8

2 Technischer Hintergrund und Problemstellungen 9
- 2.1 C-ITS – Kooperative Intelligente Verkehrssysteme . . . 9
- 2.2 Dezentrale Überlaststeuerung . . . 21
- 2.3 Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding . . . 30

3 Bewertung bestehender Arbeiten 41
- 3.1 Fahrzeugkommunikation . . . 41
- 3.2 Dezentrale Überlaststeuerung . . . 44
- 3.3 Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding . . . 48

4 Bewertung von C-ITS als Referenzsystem 53
- 4.1 Ziel der Untersuchung . . . 53
- 4.2 Simulationsszenario und Metriken . . . 54
- 4.3 Simulative Bewertung . . . 60
- 4.4 Diskussion und Empfehlungen . . . 70

5 Protokolldesign und Bewertung für Szenarien mit hoher Last 75
- 5.1 Design von Congestion-enabled Forwarding . . . 75
- 5.2 Analyse von Congestion-enabled Forwarding . . . 82

5.3 Simulative Bewertung von Congestion-enabled Forwarding . . 89
5.4 Diskussion und Empfehlungen 107

6 Protokolldesign und Bewertung für Szenarien mit niedriger Last 111
6.1 Design von Enhanced-CBF 111
6.2 Simulationsszenario und Metriken 118
6.3 Simulative Bewertung von Enhanced-CBF 125
6.4 Diskussion und Empfehlungen 134

7 Zusammenfassung und Ausblick 139
7.1 Allgemein 139
7.2 C-ITS als Referenzsystem 139
7.3 Congestion-enabled Forwarding 140
7.4 Enhanced-CBF für Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding . 141
7.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse 143
7.6 Ausblick 146

A Anhang 149
A.1 Herleitung der effektiven Overhearing-Reichweite 149
A.2 Herleitung der maximalen Flussrate am Gatekeeper 151

Abkürzungsliste 155

Symbolliste 159

Abbildungsverzeichnis 163

Tabellenverzeichnis 165

Veröffentlichungen des Autors 167

Literaturverzeichnis 169

1 Einleitung

1.1 Motivation für Fahrzeugkommunikation

Intelligente Verkehrssysteme (engl. Intelligent Transportation Systems, ITS) bezeichnen die Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien auf den Transport von Menschen und Gütern. ITS umfasst den motorisierten Individualverkehr, Straßengüterverkehr und den öffentlichen Personennahverkehr sowie den Schienenverkehr, die Luftfahrt und die Schifffahrt. Beim motorisierten Individualverkehr handelt es sich um den Personentransport durch Fahrzeuge im Straßenverkehr.

Um die Fahrsicherheit im motorisierten Individualverkehr zu verbessern, wurden in den vergangen Jahren zunehmend Fahrerassistenzsysteme eingeführt, wie z. B. Abstandsregelsysteme, Spurwechselassistenten oder Notbremsassistenten. Auch wenn der Fahrer durch die Assistenzsysteme von Fahraufgaben entlastet und insbesondere in kritischen Fahrsituationen unterstützt wird, gibt es immer noch zahlreiche Unfälle. Allein im Jahr 2015 verursachten Verkehrsunfälle in Europa über 26'000 Todesopfer [Com17]. Dies entspricht einer Steigerung von 0.6 % im Vergleich zu 2014. Die Wirksamkeit der derzeitigen Fahrerassistenzsysteme ist durch die fahrzeugeigene Sensorik eingeschränkt, die lediglich die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs abdeckt. Selbst bei zunehmender Verbesserung der Sensorik ist die Reichweite auf benachbarte Objekte begrenzt. Die verbleibende Zeit nachdem ein Sensor ein sicherheitskritisches Ereignis detektiert hat ist zu kurz, um auf alle Situationen reagieren zu können. Damit ist die „Vision Zero", der Vision eines Verkehrs ohne Verkehrsunfälle, nicht erreichbar.

Die Vernetzung der Fahrzeuge miteinander, auch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation genannt, kann die Wahrnehmung des Fahrers und des Fahrzeugs über die eingeschränkte Wahrnehmungsreichweite heutiger Sensorik hinaus erweitern und eine neue Form der Kooperation zwischen Fahrzeugen ermöglichen. Daher sind solche Kooperativen Intelligenten Verkehrssysteme (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems, C-ITS) [Com16] ein weiterer notwendiger Baustein, die Vision Zero Realität werden zu lassen.

Abb. 1.1. Anwendungen und Dienste für Kooperative Intelligente Verkehrssysteme – C-ITS – basierend auf [Sim].

Bis zum jetzigen Stand der Entwicklung und Standardisierung ist C-ITS lediglich zur Unterstützung des Fahrers vorgesehen. Es wird als Wegbereiter für die Fahrzeugautomatisierung angesehen, bei dem es den Austausch von Sensordaten und die Koordination von Fahrmanövern unterstützt. Eine typische Anwendung in diesem Bereich ist das Platooning, bei dem Fahrzeuge dicht zusammen und automatisiert in einer Kolonne fahren.

1.2 Anwendungen und Dienste

Kooperative Intelligente Verkehrssysteme – C-ITS – ermöglichen zahlreiche Anwendungen, die in „Verkehr“, „Fahren und Sicherheit“ und „Ergänzende Dienste“ klassifiziert werden können [Sim] (siehe Abb. 1.1). Anwendungen für Verkehr sollen die Verkehrslage erfassen, Verkehrsinformationen sammeln

und den Verkehrsfluss steuern. Fahren und Sicherheit ist für lokale Gefahrenwarnung und Fahrerassistenz verantwortlich. Ergänzende Dienste bieten Internetzugang und Informationsdienste an.

Ein Teil der Anwendungen, die mit dem Stand der Technik einfach zu realisieren sind, werden als „Day 1 Services“ bezeichnet. Sie ermöglichen schnell einen hohen Nutzen und sollen deshalb bei einer Systemeinführung zuerst unterstützt werden [Com16]. Beispiele sind das elektronische Bremslicht, Hinderniswarnung und Stauendewarnung. Es gibt eine Reihe weiterer Dienste, die als „Day 1.5 Services“ bezeichnet werden und als sehr wünschenswert eingestuft sind. Ein Beispiel ist die „*Kooperative Kollisionswarnung*“, bei der über den Austausch von Nachrichten eine Fahrzeugkollision im Vorfeld erkannt werden kann. Ein Liste der „Day 1 Services“ und „Day 1.5 Services“ ist in [Com16] (Tabelle 5 und 6) zu finden.

Die Anwendungen werden von Kommunikationsdiensten – auch Facilities genannt – unterstützt. Kommunikationsdienste basieren auf Nachrichten-Protokollen und realisieren die Informationsverbreitung. Sie können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die erste Kategorie sind Nachrichten, die periodisch gesendet werden und dafür sorgen, dass die Fahrzeuge ein Umgebungsmodell aufbauen können. Dabei passt sich das Übertragungsintervall der Fahrzeugdynamik an, so dass die Nachbarfahrzeuge bei höherer Fahrzeugdynamik häufiger informiert werden. Ein Beispiel für eine Anwendung ist die Stauendewarnung. Diese sendet periodisch Nachrichten, um die anderen Fahrzeuge über das Hindernis zu informieren.

Die zweite Kategorie umfasst ereignisgesteuerte Nachrichten, die ausgelöst und versendet werden, wenn ein Fahrzeug eine sicherheitskritische Situation detektiert. Dabei werden diese Nachrichten durch multi-hop Routing in einem geographischen Gebiet verbreitet. Ein Beispiel ist das elektronische Bremslicht. Wenn ein Fahrzeug stark bremst, werden alle dahinter fahrenden Fahrzeuge informiert und können gegebenenfalls reagieren. Dabei übersteigt die Kommunikationsreichweite die Wahrnehmungsreichweite des Bremslichts insbesondere in Stausituationen wesentlich.

1.3 Komplexität des Gesamtsystems

Der Informationsaustausch im C-ITS basiert auf einem standardisierten Protokollstapel, der aus einer Vielzahl von Funktionen besteht, die in mehreren Schichten organisiert sind. Der Grund, die Funktionen zu trennen und in Schichten zu organisieren, liegt darin, die Komplexität des Gesamtsystems durch die Modularisierung zu verringern. Weiterhin können einzelne Komponenten weiterentwickelt oder ausgetauscht werden, ohne das Gesamtsystem anpassen zu müssen.

Eine dieser Schichten ist die Sicherungsschicht, die für eine fehlerfreie Datenübertragung und den Kanalzugriff eines Knotens verantwortlich ist. Die Begriffe Knoten und Fahrzeug werden in dieser Arbeit synonym verwendet. Der Kanalzugriff wird mit der Medienzugriffssteuerung (engl. Media Access Control, MAC) realisiert. Da es sich um ein verteiltes System ohne zentraler Steuerung handelt, basiert der MAC auf einem zufallsbasierten Ansatz. Dieser hat den Nachteil, dass Pakete kollidieren können. Die Kollisionswahrscheinlichkeit hängt von der Kanallast ab und eine Kollision bedeutet mit hoher Wahrscheinlichkeit den Verlust des gesendeten Pakets. Über dem MAC arbeitet der Mechanismus für die Überlaststeuerung. Die Überlast in einem Kanal kann gesenkt werden, indem ein Knoten z. B. eine zusätzliche Verzögerung zwischen dem Senden aufeinanderfolgender Nachrichten einführt. Die zusätzliche Verzögerung bewirkt eine Senkung der Paketrate. Darüber befindet sich die Vermittlungsschicht, die den Routing-Algorithmus beinhaltet. Dieser ist für die Verbreitung der Pakete verantwortlich und verwendet für seine Routing-Entscheidung Timer. Über diesen Schichten arbeiten die Kommunikationsdienste, die die Pakete generieren und die Anwendungen unterstützen.

Der Nachteil der Schichtstruktur für eine Untersuchung liegt in der gekapselten Arbeitsweise der einzelnen Funktionen. Wenn z. B. die Überlaststeuerung eine zusätzliche Verzögerung einführt, beeinflusst das den mit Timer arbeitenden Routing-Algorithmus. Wenn die Kanallast nicht mit einer Überlaststeuerung begrenzt wird, steigt die Kollisionswahrscheinlichkeit der Pakete. Weiterhin beruht die Generierung der Nachrichten auf äußeren Einflüssen, d. h. auf der Fahrzeugdynamik und externen Ereignissen, die in der Umgebung des Fahrzeugs auftreten. Die Anzahl der generierten Nachrichten haben eine direkte Auswirkung auf die Kanallast, das Routing und alle anderen Schichten.

All diese Algorithmen und Funktionen beeinflussen sich gegenseitig. Daher ist es sinnvoll, für die Evaluierung von C-ITS alle Schichten des Protokollstapels gemeinsam zu untersuchen, um auftretende Probleme erkennen zu können. Die hohe Komplexität des Gesamtsystems motiviert die Untersuchung durch Simulationen, da eine mathematische Modellierung aller Komponenten mit einer geschlossenen analytischen Darstellung der Lösung eine unlösbare Aufgabe darstellt. Eine getrennte und vereinfachte Untersuchung der Funktionen und Schichten wird immer unvollständig bleiben, da die Interaktion mit den anderen Algorithmen fehlt.

Wenn in einer Untersuchung lediglich ein Nachrichtentyp mit einer Priorität im single-hop und einem festen Übertragungsintervall betrachtet wird, wie es im Großteil aller bisherigen Arbeiten in der Fahrzeugkommunikation der Fall ist, werden viele Einflüsse vernachlässigt. Dies umfasst den Einfluss der Fahrzeugbewegung auf die Anzahl der generierten Pakete unter Berücksichtigung von steigender Fahrzeugdichte, die Auswirkung redundanter multi-hop Nachrichten und auch den Einfluss verschiedener Prioritäten auf die Performance. Jeder dieser Punkte hat Auswirkungen auf das Gesamtsystem und muss daher in einer Untersuchung mit beachtet werden, da dies entscheidend für eine umfassende Evaluierung der Algorithmen ist.

1.4 Beitrag der Arbeit

In dieser Arbeit wird in einem ersten Schritt C-ITS als Referenzsystem simulativ untersucht, um daraus die Probleme in Extremszenarien abzuleiten. Die Extremszenarien umfassen hohe und niedrige Last, wobei Last sich auf die Kanallast und Fahrzeugdichte bezieht. Das Ergebnis zeigt einen starken Performance-Abfall für alle Routing-Algorithmen. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Arbeit auf diesen Extremszenarien, für die zwei neue Routing-Algorithmen entwickelt werden: *Congestion-enabled Forwarding* und *Enhanced-CBF*.

In Szenarien mit hoher Kanallast wird *Congestion-enabled Forwarding* eingeführt, das aus den Komponenten Dezentrale Überlaststeuerung (engl. Decentralized Congestion Control, DCC) und dem Routing von Paketen besteht. Im Gegensatz zu existierenden Arbeiten werden beide Komponenten gemeinsam betrachtet. *Congestion-enabled Forwarding* beinhaltet weiterhin einen Gatekeeper für die Steuerung der Paketrate eines Knotens und Robust Overhearing Recovered Algorithm (RORA). RORA löst das Problem des Performance-Abfalls von Contention-based Forwarding für hohe Fahrzeugdichten. Dies wird

durch eine Analyse und einer simulativen Untersuchung bestätigt. Die Analyse untersucht die maximale Paketrate pro Knoten und die Auswirkungen auf die Kanallast. Dazu wird ein Ausdruck für die maximale Flussrate (Servicerate) des Gatekeepers im Gleichgewichtszustand hergeleitet. Dieser Ausdruck bildet die Grundlage für die weitere Analyse. Es werden zwei Bereiche der Auslastung des Gatekeepers identifiziert, für die *Congestion-enabled Forwarding* unterschiedlich arbeitet. Weiterhin folgt eine numerische Berechnung der Leistungsgrenze von Contention-based Forwarding, die auf den Ergebnissen der Analyse basiert und durch die Simulationsergebnisse bestätigt wird. Abschließend werden zwei Gatekeeper-Mechanismen von *Congestion-enabled Forwarding* variiert, um dessen Einfluss zu bestimmen und Empfehlungen zu deren Dimensionierung zu geben.

In Szenarien mit niedriger Fahrzeugdichte – großer Abstand zwischen dem Ursprungsknoten und dem Zielknoten – wird der Routing-Algorithmus *Enhanced-CBF* eingeführt. *Enhanced-CBF* verwendet Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding (CoRe & JD), um die Kommunikationsreichweite zu erhöhen. Dabei wird eine Erweiterung von CoRe & JD berücksichtigt, bei der fehlerbehaftete Pakete weitergeleitet werden. Das Weiterleiten von fehlerbehafteten Paketen wird als Lossy-Forwarding bezeichnet. Im ersten Schritt werden die Anforderungen für die Anwendung von CoRe & JD auf Ad-hoc-Netzwerke herausgearbeitet und darauf aufbauend *Enhanced-CBF* entwickelt. Um die Funktionsweise von *Enhanced-CBF* zu bewerten, werden zwei Szenarien – ein statisches (Unicast-Fall) und ein dynamisches Szenario (Broadcast-Fall) – simulativ untersucht. Die Arbeitsweise von *Enhanced-CBF* wird für den Unicast und Broadcast-Fall präsentiert und die Performance evaluiert.

Auflistung des Beitrags der Arbeit

1. Aufbau einer umfangreichen Simulationsumgebung, die auf einem Netzwerksimulator und einem Verkehrssimulator basiert, für C-ITS.
2. Simulative Bewertung des C-ITS-Referenzsystems für die Ableitung von Problemen in Extremszenarien wie hohe und niedrige Last.
3. Verwendung von gemischtem Datenverkehr, bestehend aus periodischen und ereignisgesteuerten Nachrichten, verschiedenen Prioritäten, single- und multi-hop Nachrichten, um eine umfassende Ausnutzung des Gesamtsystems zu erreichen.
4. Herausarbeitung von Metriken für die Performance-Evaluierung des C-ITS-Referenzsystems und den entwickelten Algorithmen.

5. Entwurf des Algorithmus *Congestion-enabled Forwarding*, der eine Dezentrale Überlaststeuerung und das multi-hop Routing von Paketen für hohe Kanallast ermöglicht.
6. Simulative und analytische Untersuchung von *Congestion-enabled Forwarding* in Bezug auf Zuverlässigkeit und Latenz für ein Autobahnszenario.
7. Evaluierung des Einflusses konfigurierbarer Gatekeeper-Mechanismen von *Congestion-enabled Forwarding* und Ermittlung optimaler Parameterwerte.
8. Entwurf von *Enhanced-CBF* für die Anwendung von CoRe & JD auf Ad-hoc-Netzwerke, um die Kommunikationsreichweite der Knoten für niedrige Fahrzeugdichten zu verbessern.
9. Simulative Bewertung von *Enhanced-CBF* für ein statisches (Unicast-Fall) und ein dynamisches Szenario (Broadcast-Fall).

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Struktur der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden beschrieben. Ein Überblick der einzelnen Kapitel ist in Abb. 1.2 illustriert.

Kapitel 2 beschreibt den technischen Hintergrund der in dieser Arbeit untersuchten Protokolle. Dabei werden die drei Systeme: (i) Kooperative Intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) als Referenzsystem, (ii) Dezentrale Überlaststeuerung (DCC) und (iii) Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding (CoRe & JD) im Detail erklärt. Weiterhin werden die Problemstellungen der Protokolle bestimmt.

Kapitel 3 bewertet die bestehenden Arbeiten für die drei Systeme – C-ITS, DCC, CoRe & JD – und ordnet die aus dieser Arbeit entwickelten Algorithmen *Congestion-enabled Forwarding* und *Enhanced-CBF* ein.

Kapitel 4 beschreibt und bewertet die Simulationsergebnisse für das C-ITS-Referenzsystem, um daraus abzuleiten, unter welchen Extremszenarien Probleme der existierenden Algorithmen auftreten, d. h. eine niedrige Performance zeigen.

Kapitel 5 führt *Congestion-enabled Forwarding* ein und zeigt dessen analytische und simulative Bewertung in Szenarien mit hoher Kanallast.

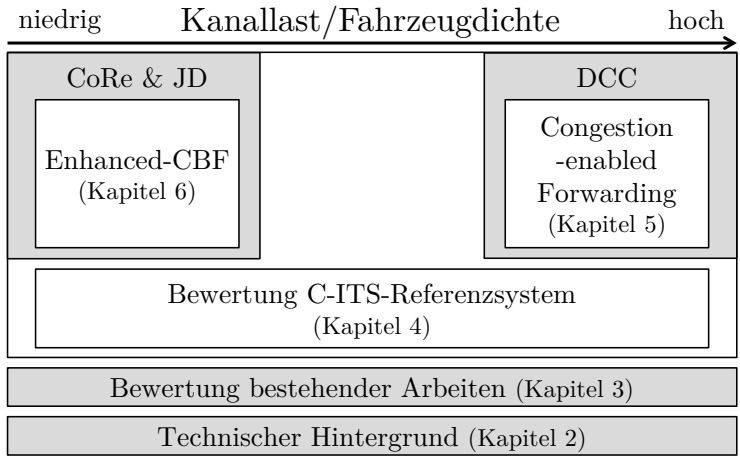

Abb. 1.2. Überblick des Aufbaus der vorliegenden Arbeit. CoRe & JD ist Kooperatives Relaying mit Joint-Decoding und DCC ist Dezentrale Überlaststeuerung.

Kapitel 6 stellt *Enhanced-CBF* unter Anwendung von CoRe & JD vor und präsentiert die simulative Bewertung in Szenarien mit niedriger Fahrzeugdichte.

Kapitel 7 fasst alle Ergebnisse und Erkenntnisse zusammen. Weiterhin wird ein Ausblick auf zukünftige Richtungen gegeben, die von der vorliegenden Arbeit abgeleitet werden.

1.6 Bereits veröffentlichte Teile der Arbeit

Ausgewählte Teile der Arbeit wurden bereits in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

- Teile der Ergebnisse in Kapitel 4 zur Bewertung von C-ITS als Referenzsystem wurden in [Kü+15] veröffentlicht.
- Das Protokolldesign und die Bewertung von *Congestion-enabled Forwarding* in Szenarien mit hoher Last in Kapitel 5 wurde in [KFF16b] [KFF17] [Kü+19] und [FKM16] veröffentlicht.
- Die Entwicklung und Evaluierung von *Enhanced-CBF* in Szenarien mit niedriger Last in Kapitel 6 wurde in [KFF16a] und [Kü+17a] veröffentlicht und das verwendete Fehlerratenmodell in [Ter+16].