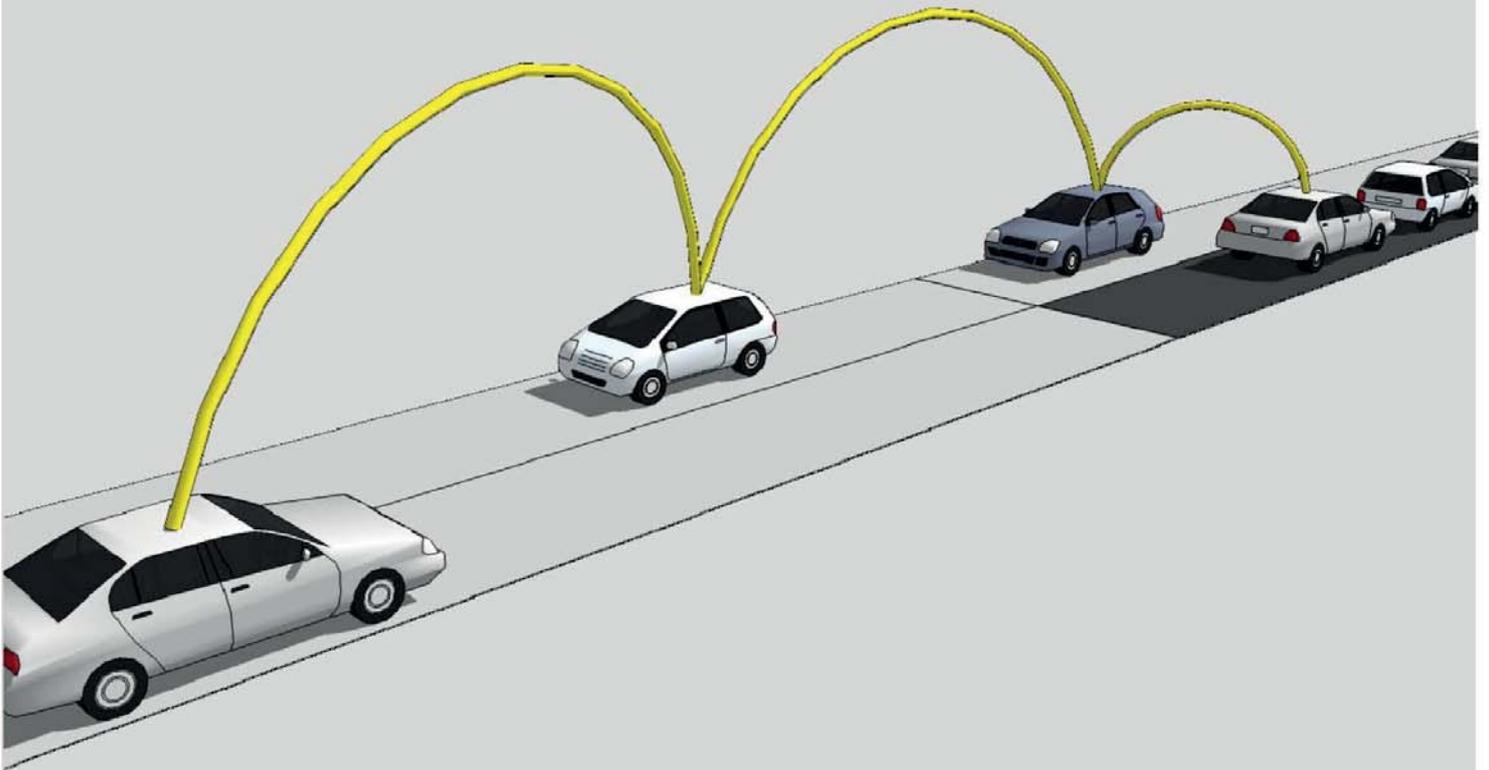


Selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

Holger Busche



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

Selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Holger Busche
aus
Hamburg

2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2012

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-170-1

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Rohling

2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Volker Turau

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juni 2012

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-170-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Hermann Rohling, der mich auf vielfältige Weise gefördert und mich bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt hat. Seine wertvollen Rückmeldungen und Hinweise, die er mir die ganze Zeit über zu meinen wissenschaftlichen Untersuchungen gegeben hat, waren unschätzbar. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. Volker Turau. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Ernst Brinkmeyer, der in seiner Funktion als Vorsitzender des Prüfungsausschusses den Prüfungsablauf strukturiert geleitet hat.

Ich möchte mehreren anderen Personen aus gemeinsamer Forschungsarbeit danken, dass sie mir geholfen haben, meine Ideen im Laufe der Zeit zu formen. Die gemachten Erfahrungen auf Konferenzen, in der Lehre und bei der Betreuung von studentischen Arbeiten möchte ich aus dieser Zeit auch nicht missen. Dank geht auch an Dr. Rainer Grünheid, Dr. Florian Schulz und meinem Vater Karl-Heinz Busche für ihr Korrekturlesen und ihre Vorschläge, nachdem sie eine endgültigere Version gelesen hatten. Für die fachlichen Anregungen und angenehme Zusammenarbeit bin ich allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen sehr dankbar, die die Zeit am Institut für mich besonders wertvoll gemacht haben. Insbesondere danke ich Chonlatee Khorakhun und Thomas Meyerhoff für die interessanten und hilfreichen Diskussionen, die wir im Rahmen der Untersuchungen von selbstorganisierenden Netzwerken geführt haben. Diese haben maßgeblich zur verbesserten Darstellung der Ergebnisse beigetragen.

Besonderer Dank geht an meine Eltern, meinen Bruder und seiner Familie, meinem familiären Umfeld sowie Freunden, die mich stets begleitet und in jeder Situation unterstützt und aufgebaut haben. Ohne ihre Geduld und Unterstützung hätte ich mit Sicherheit dieses Ziel nicht erreicht.

Bremen, Juli 2012

Holger Busche

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verkehrsinformationssysteme	7
2.1	Zentral organisierte Verkehrsinformationssysteme	9
2.1.1	Unidirektionales Kommunikationssystem	9
2.1.2	Bidirektionales Kommunikationssystem	11
2.1.3	Nachteile der zentralen Verkehrsinformationsverwaltung	13
2.2	Dezentral organisierte Verkehrsinformationssysteme	14
2.2.1	Ad-Hoc Kommunikation	16
2.2.2	Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation	19
3	Selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem	21
3.1	Selbstorganisation	22
3.2	Systemkomponenten	25
3.2.1	Segmentorientierte Geschwindigkeitsmessungen	27
3.2.2	Datenaggregation	29
3.2.3	Datenpaketstruktur	32
3.3	Datenrate und Systembandbreite	36
3.4	SOTIS Informationsverbreitung	40
3.4.1	Informationsreichweite	43
3.4.2	Entfernungsabhängige Nachrichtenverzögerung	44
3.4.3	Verkehrsdichteabhängige Nachrichtenverzögerung	48
3.5	Simulationsergebnisse	49
3.5.1	Geringe Kanalbelegung	49

4	Signalausbreitung und Kanalzugriffsverfahren	55
4.1	Signalausbreitung	55
4.1.1	Boden-Reflexionsmodell	56
4.1.2	Pfaddämpfungsmodelle	57
4.1.3	Sendereichweite	60
4.1.4	Signal-zu-Interferenzverhältnis	62
4.2	Kanalzugriffsverfahren	64
4.3	Zentral geregelt	65
4.3.1	TDMA	66
4.3.2	FDMA	67
4.3.3	CDMA	67
4.3.4	SDMA	68
4.4	Dezentral geregelt	69
4.4.1	ALOHA	69
4.4.2	CSMA/CA	71
4.4.3	Paketkollisionen bei CSMA/CA	73
4.5	Vergleich der Kanalzugriffsverfahren	75
5	Verkehrsmodellierung	79
5.1	Modellierung der Fahrzeugabstände	79
5.1.1	Exponentialverteilung	80
5.1.2	Verschobene Exponentialverteilung	81
5.1.3	<i>Bunched</i> Exponentialverteilung	82
5.2	Verkehrsstatistik	83

6	Untersuchungen zur Kanalauslastung	87
6.1	Auslastung des Radiokanals	88
6.1.1	Berechnung der Kanalbelegung	89
6.1.2	Berechnung der Kanalauslastung	92
6.1.3	Kanalauslastung des CSMA/CA Zugriffsverfahren	93
6.1.4	Einfluss von <i>Hidden Nodes</i> auf die Kanalauslastung	97
6.2	Datendurchsatz bei unterschiedlicher Kanalbelegung	104
6.2.1	Datendurchsatz für ALOHA	104
6.2.2	Datendurchsatz für CSMA/CA	105
6.3	Simulationsergebnisse	113
6.3.1	Datendurchsatz für CSMA/CA	115
6.3.2	CSMA/CA Zugriffsverzögerungen	116
6.3.3	SOTIS bei hoher Kanalbelegung	118
7	Regelung der Kanalauslastung	121
7.1	Messung der Kanalauslastung	122
7.2	Einstellung der Sendeleistung	123
7.3	Erstes Regelungsverfahren	125
7.3.1	Optimierung des Grenzwertes	127
7.3.2	Kanalauslastung	130
7.3.3	SOTIS Nachrichtenverzögerung	131
7.3.4	Datendurchsatz	133
7.3.5	Verteilung der Sendeleistungen	133
7.4	Zweites Regelungsverfahren	136
7.4.1	Optimierung des Grenzwertpaares	138
7.4.2	Kanalauslastung	142

7.4.3	SOTIS Nachrichtenverzögerung	143
7.4.4	Datendurchsatz	144
7.4.5	Verteilung der Sendeleistungen	145
7.5	Verfahrensvergleich	147
8	Zusammenfassung	151
	Abkürzungsverzeichnis	155
	Symbolverzeichnis	157
	Literaturverzeichnis	161
	Index	170



Einleitung

Seit Erfindung des Automobils (Motorwagen) im Jahre 1886, in dem Carl Benz das erste Patent für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor anmeldete [Mus04], wurde die Technologie eines Fahrzeuges ständig weiterentwickelt. Mit wachsender Technologie, welche sich durch kürzere Beschleunigungszeiten und immer höheren Geschwindigkeiten ausdrückte, stieg aber auch die Zahl der Unfälle mit Schwerverletzten und Toten immens [Bun11]. Erst 83 Jahre später, also 1969, wurde das Antiblockiersystem (ABS) auf der Internationalen Automobilausstellung vorgestellt. Sieben Jahre darauf, im Jahre 1976, folgte die bundesweite Gurtpflicht [Mös02]. Dies war der Beginn eines neuen Sicherheitsdenkens im Automobil und sollte die Zahl der Verkehrstoten deutlich reduzieren. Die treibende Kraft bei der Entwicklung des Automobils war der Wunsch, große Entfernungen möglichst schnell zu überwinden. Hierfür wurde viel Entwicklungsarbeit zur Steigerung der Beschleunigungskraft und Geschwindigkeit eines Fahrzeuges investiert. Dieser Trend sorgte dafür, dass schon bald der Sicherheitsgurt nicht mehr ausreichenden Personenschutz bei einem Unfall gewährleistete. Mit ABS verbesserte sich die Spurtreue und Lenkbarkeit des Automobils, besonders bei bestimmten Witterungsbedingungen. Ende 1980 wurde der Airbag zur Serienreife entwickelt [Rie10] und sollte Kopfverletzungen bei einem Auffahrunfall reduzieren oder gar vermeiden. Der Höhepunkt der Entwicklung passiver Sicherheitssysteme wurde 1995 mit der Einführung des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) erreicht. Diese Technologie basiert auf der ABS Technik und verhindert ein Ausbrechen des Fahrzeughecks nach schneller Lenkbewegung. Die nach der Historie vorgestellten Sicherheitsprinzipien werden als passive Systeme, bzw. ABS und ESP als semi-passives System, bezeichnet, welche in den

seltensten Fällen Unfälle vermeiden können. So zeigt das Statistische Bundesamt, dass in den letzten 17 Jahren die Anzahl von Straßenverkehrsunfällen nahezu konstant geblieben ist, während gleichzeitig die Anzahl von Getöteten bei einem Verkehrsunfall seit 1991 um 40 % gesunken ist [Bun11]. Ziel ist es, die Fahrzeugtechnologie und Infrastruktur so weiterzuentwickeln, dass eine weitere Reduzierung von Verkehrsunfällen erreicht wird. Dieses kann nur durch aktive Systeme, die direkt in das Fahrverhalten eingreifen und gegebenenfalls manipulieren, erreicht werden. Die Fahrzeugtechnik allein kann das sichere Fahren auf den Straßen nicht gewährleisten. Insgesamt tragen vier Parameter wesentlich zur Verkehrssicherheit bei: Das Verhalten des Verkehrsteilnehmers, die Infrastruktur, das Rettungswesen und die Fahrzeugtechnik. Gesucht werden also aktive Assistenzsysteme, die diese Parameter mitbeeinflussen. Seit 1998 kommt das *Adaptive Cruise Control* (ACC) System im Fahrzeug zum Einsatz. In Verbindung mit *Light Detection and Ranging* (LIDAR) oder *Radio Detection and Ranging* (RADAR) Sensoren kann der Abstand zu einem voraus fahrenden Fahrzeug ständig kontrolliert werden. Das ACC System kann deswegen als ein aktives System bezeichnet werden, weil beispielsweise die Fahrzeuggeschwindigkeit adaptiv zum Verkehrsfluss gesteuert werden kann. Dadurch lässt sich aktiv ein Auffahrunfall vermeiden.

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation beschreibt ein weiteres aktives Fahrerassistenzsystem, welches durch drahtlose Datenkommunikation zwischen den Fahrzeugen das Fahrverhalten und dadurch den Verkehrsfluss beeinflussen kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte Selbstorganisierende Verkehrsinformationssystem kann drei Parameter zur Verkehrssicherheit beeinflussen. Dieses System basiert auf der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation mit der Bezeichnung *Self-Organizing Traffic Information System* (SOTIS). Über einen direkten Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen werden nahezu verzögerungsfrei relevante Verkehrsdaten übertragen. Dadurch, dass beim SOTIS System die Fahrzeuge über Fahrspuren und -richtungen hinweg Verkehrsnachrichten übertragen, werden auch Kommunikationslücken zwischen den Fahrzeugen überbrückt. Das heißt,

einzelne Fahrzeuge transportieren die Verkehrsnachrichten in Richtung des Gegenverkehrs weiter, bis ein Kommunikationspartner gefunden wird.

Der wesentliche Vorteil von SOTIS gegenüber herkömmlichen Verkehrsinformationssystemen ist, dass keinerlei Kommunikations-Infrastruktur notwendig ist, um relevante Verkehrsnachrichten zu verbreiten. Jedes Fahrzeug agiert als mobiler Sensor und sammelt selbständig Verkehrsdaten, welche z.B. über externe Schnittstellen zur Fahrzeugelektronik bereitgestellt werden. Die Übertragung von Verkehrsnachrichten wird über die SOTIS Komfortapplikation realisiert und die Übertragung von sicherheitsrelevanten Daten wird über die SOTIS Sicherheitsapplikation realisiert. Über standardisierte Datenpakete können so gleichzeitig Verkehrsnachrichten und Notfallberichte (*Emergency reports*) übertragen werden. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass schon bei niedriger SOTIS Fahrzeugausstattungsrate von 5 % ein gewinnbringender Nutzen erzielt wird [RB09a]. Unter diesen Bedingungen kann eine Verkehrsnachricht mit einer höheren zeitlichen Aktualität empfangen werden als heutige Radionachrichten bzw. *Traffic Message Channel* (TMC) Systeme dies leisten können. Dieses Ergebnis zeigt den großen Nutzen schon während einer Einführungsphase des SOTIS Systems, in der nur wenige Fahrzeuge mit einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ausgestattet sein werden.

In einem Fahrzeug, welches mit der SOTIS Technologie ausgestattet ist, werden die empfangenen Verkehrsnachrichten über die Komfortapplikation dem Fahrer präsentiert. Der Fahrer kann, mit der ihm übermittelten Verkehrsnachricht entsprechend, sein Fahrverhalten anpassen. Indem eine neue Start-Ziel-Straßenroute abgefahren wird, können so längere Wartezeiten in Staus vermieden werden. Das führt zu einer schnelleren Auflösung von Verkehrsverstopfungen, wenn mehrere Verkehrsteilnehmer diese Entscheidung treffen. Mit höheren Fahrzeugausstattungsraten ist es denkbar, dass über die Informationen in einem SOTIS Datenpaket das Beschleunigen und Abbremsen eines Fahrzeuges adaptiv gesteuert wird. Das Ziel ist eine optimale Anpassung des Verkehrsflusses. Die SOTIS Sicherheitsapplikation wird ausgelöst, wenn ein Fahrzeug in einen Verkehrsunfall gerät. Nahezu verzögerungsfrei wird dann ein *Emergency Report*

übertragen. Nachfolgende Fahrzeuge werden so über den Unfall vor ihnen gewarnt und können dann rechtzeitig darauf reagieren. Ein automatisiertes Einleiten einer Bremsung wäre auch möglich, um weitere Auffahrunfälle zu vermeiden. Über die *Emergency Reports* können auch Rettungskräfte in kürzester Zeit informiert werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden unterschiedliche drahtlose Verkehrsinformationssysteme vorgestellt. Unterschieden wird dabei zwischen der drahtlosen Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Fahrzeug-zu-Fahrzeug) oder zwischen Fahrzeugen und einer zentralen Kommunikationsstation (Fahrzeug-zu-Infrastruktur). Es werden deren Vor- und Nachteile im Bezug auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationssystemen diskutiert. Des Weiteren werden die Vorteile einer selbstorganisierenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation herausgestellt.

Im nächsten Abschnitt wird das selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Verkehrsinformationssystem (SOTIS) näher untersucht. Zur Bestimmung der benötigten SOTIS Systembandbreite wird zunächst, auf Basis der Verwendung einer digitalen Kommunikationstechnik, die Datenpaketgröße ermittelt. Die Datenpaketgröße bestimmt sich aus den zu übertragenden Inhalten und einem Paket-Header. Die Leistungsfähigkeit des SOTIS Systems wird durch die Verzögerungszeit zwischen räumlich entfernt liegender Verkehrsnachricht und Empfänger bewertet.

Der Nutzen eines Verkehrsinformationssystems steigt mit wachsender zeitlicher Aktualität der Nachrichten. Ziel des SOTIS Verkehrsinformationssystems ist die Verbreitung von Verkehrsnachrichten aus großer räumlicher Entfernung, zwischen Fahrzeug und Ort der Verkehrsbehinderung, mit hoher zeitlicher Aktualität. Hierzu werden die entfernungsabhängigen Verzögerungen, die ein SOTIS Datenpaket zur Übertragung benötigt, untersucht. Dabei gilt, je geringer die Verzögerung, desto aktueller die Verkehrsnachricht. Die Verzögerungszeit berechnet sich aus der Anzahl von kommunikationsfähigen Fahrzeugen auf der Straße. Zunächst werden hierfür die Verzögerungszeiten bei einer geringen Ausstattungsrate von 1-5 % berechnet. In diesem Fall wird der Funkkanal nur sehr gering

ausgelastet sein, weil nur wenige Fahrzeuge Datenpakete übertragen. Die Berechnungen zeigen, dass auch bei einer geringen Ausstattungsrate Verkehrsnachrichten aus 50 km Entfernung mit einer mittleren Verzögerungszeit von weniger als 10 Minuten empfangen werden können. Die erzielten analytischen Ergebnisse werden in Computersimulationen überprüft. Die Simulation berücksichtigt die Fahrzeugbewegungen anhand eines *Cellular Automaton* Bewegungsmodells mit exponentialverteilten Fahrzeugabständen. Auch der Funkkanal wird durch geeignete Modelle nachgebildet.

Mit wachsender Anzahl von Fahrzeugen, welche ein SOTIS Kommunikationssystem besitzen, wird auch der Kommunikationskanal stärker ausgelastet oder gar überlastet sein. Unter diesen Bedingungen wird ein selbstorganisierendes Kanalzugriffsverfahren notwendig, um SOTIS Datenpakete koordiniert versenden zu können. Mit diesem Mechanismus werden Paketkollisionen vermieden. Grundlage der Untersuchung ist einerseits das ALOHA und andererseits das *Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance* (CSMA/CA) Kanalzugriffsverfahren. Bei ALOHA überträgt ein Funkknoten ein Datenpaket direkt, ohne den Übertragungskanal zu beobachten. Beim CSMA/CA stellt ein Fahrzeug seine Datenübertragung zurück, falls der Kommunikationskanal von einem anderen Teilnehmer belegt wird. Zur Bewertung wie stark der Übertragungskanal unter CSMA/CA ausgelastet wird, wird auf analytischem Wege die Kanalauslastung und der Datendurchsatz berechnet. Die Herleitungen erfolgen über den Ansatz einer reinen *broadcast*-Kommunikation und präsentieren dadurch eine neuartige Lösung. Die analytischen Ergebnisse werden in Computersimulationen verifiziert. Die Differenzierung der Begriffe Kanalbelegung und Kanalauslastung wird in dieser Arbeit erstmalig beschrieben. Die Kanalauslastung dient zur Beschreibung der effektiven Ausnutzung des Kommunikationskanals und die Kanalbelegung beschreibt die Anzahl von vorhandenen Funkknoten.

Unter Berücksichtigung einer flächendeckenden SOTIS Ausstattung steigt die Kanalauslastung mit einem Anwachsen der Kanalbelegung. Die physikalische Funkschnittstelle gibt die Limitierung der Datenrate vor, die bei einer hohen Kanalauslastung erreicht oder überschritten wird. Die Auswirkung zeigt sich durch

einen Anstieg der CSMA/CA Kanalzugriffsverzögerungen und Paketkollisionen. Dann können SOTIS Datenpakete aus größeren Entfernungen nur verspätet empfangen werden. Hierzu werden zwei neuartige Verfahren zur Steuerung der Kanalauslastung untersucht. Ziel ist es, eine erhöhte Kanalauslastung durch Steuerung der Sendeleistung zu kontrollieren.

Gesucht wird ein möglichst robustes und selbstorganisierendes Verfahren zur Steuerung der Sendeleistung. Für zwei unterschiedliche Verfahren zeigt sich, dass in beiden Fällen die Kanalauslastung gesenkt werden kann. Dies bewirkt eine Reduzierung der SOTIS entfernungsabhängigen Nachrichtenverzögerung auch bei hoher Kanalbelegung.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Computersimulationen überprüft und die Ergebnisse in einer Zusammenfassung erläutert.

II

Verkehrsinformationssysteme

Verkehrsnachrichten sollen einerseits aktuelle Stausituationen aber auch den momentanen Verkehrsfluss auf Autobahnen und Bundesstraßen anzeigen. Die lokal vorliegende Verkehrssituation innerhalb eines Straßensegments wird durch die gefahrene mittlere Geschwindigkeit charakterisiert.

In konventionellen Verkehrsinformationssystemen kommen Straßensensoren wie z.B. Überkopf-, Seitenstreifen- und Unterflurdetektoren bzw. Induktionsschleifen zum Einsatz, mit denen einerseits die jeweils lokal gültige Fahrzeugmenge und andererseits die mittlere Geschwindigkeit gemessen werden [Bas10]. In einem zentral organisierten Verkehrsinformationssystem werden die so gemessenen und jeweils lokal gültigen mittleren Geschwindigkeiten in einer Situationsanalyse ausgewertet. Die gemessenen Geschwindigkeiten werden zu einer Verkehrsnachricht aufbereitet und über Rundfunksysteme an die Verkehrsteilnehmer versendet. Allerdings kann die Verkehrssituation einfacher und zuverlässiger ermittelt werden, wenn Fahrzeuge die messtechnische Aufgabe selbst übernehmen. Durch Sensoren im Fahrzeug lässt sich die eigene Geschwindigkeit messen und in Verkehrsnachrichten verpacken. Über eine drahtlose Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation können die individuell gemessenen Geschwindigkeiten und die aktuellen Verkehrsnachrichten so direkt in jedes Auto übertragen und dort ausgewertet werden.

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Verkehrsinformationssysteme und deren Funktionsweise beschrieben. Ziel ist es, die Einfachheit und die hohe Zuverlässigkeit eines Systems bestehend aus fahrzeugbasierten Sensoren, zur Messung des Verkehrsflusses, herauszustellen. Indem jedes Fahrzeug die Ver-

kehrsnachrichten über eine drahtlose Kommunikation an andere Fahrzeuge überträgt, entsteht ein fahrzeugbasiertes Kommunikationsnetz. Im Bereich der Forschung und Entwicklung beschäftigt man sich mit zwei Untergruppen von Kommunikationsnetzen. Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, in der Fahrzeuge über ein Kommunikationsmodul direkt miteinander kommunizieren und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, die für die Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und einer Infrastruktur, z.B. Ampeln, Verkehrsschilder oder anderen Modulen steht. Oft werden diese beiden Untergruppen in dem Begriff Fahrzeug-zu-X Kommunikation zusammengefasst. Ziel ist es, über diese Kommunikationswege detaillierte Informationen über die Verkehrslage aus der lokalen Umgebung zu erhalten und zu verbreiten.

Dabei werden in der Telekommunikations- und Automobilindustrie unterschiedliche Ansätze zur Datenerfassung verfolgt. Einerseits kann eine Datenerfassung von aktueller Verkehrsinformation fahrzeugseitig stattfinden oder andererseits infrastrukturseitig. Im Projekt AKTIV-CoCar [Bu09] wurde eine Studie durchgeführt, in der zellulare Mobilfunktechnologien für zukünftige kooperative Fahrzeuganwendungen eingesetzt werden. Die Datenerfassung findet im Fahrzeug statt und die gewonnenen Informationen werden dann über das zellulare Netzwerk an einen zentralen Informationsdienst übermittelt. Dies ist eine reine Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, und sie ist zentral organisiert. In einem weiterführenden Projekt AKTIV-CoCarX [Bu09] werden Mobilfunktechnologien der 4. Generation und eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, basierend auf dem WLAN Standard IEEE 802.11p, zur Optimierung des Systemverhaltens untersucht. Weitere Projekte wie NoW-Network on Wheels [FNS⁺08] und PRE-DRIVE C2X [Sch10] befassen sich mit der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und der Fahrzeug-zu-X Kommunikation mit einem hybriden Kommunikationsprotokoll. Hier werden Verkehrsdaten nicht unter Verwendung von zellulärer Mobilkommunikation verbreitet, sondern jedes Fahrzeug besitzt ein WLAN Kommunikationsmodul, mit dem es lokal mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur Daten austauscht. Das Projekt SIM^{TD} [Wei11] befasst sich weiterführend mit den erzielten Ergebnissen aus den vorausgegan-

genen Forschungsprojekten und bringt diese zur Anwendung. Die Europäische Kommission hat mittlerweile ein EU-weit einheitliches Frequenzband für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation mit einer Bandbreite von 30 MHz im 5,9 GHz-Band reserviert. Damit soll eine einheitliche Grundlage für die Fahrzeug-zu-X Kommunikation geschaffen werden. Der amerikanische Verband IEEE hat sich auch mit der Standardisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation befasst und die Kommunikationsschnittstelle in einem vorläufigen WLAN Standard mit der Bezeichnung IEEE 802.11p festgehalten. Der Vorteil besteht darin, dass auch dieser Standard im 5,9 GHz Frequenzbereich spezifiziert ist, und somit eine Kompatibilität zu dem europäischen Verfahren gewährleistet ist.

2.1 Zentral organisierte Verkehrsinformationssysteme

Die Koordinierung des Straßenverkehrs ist eine klassische Aufgabe der Verkehrstelematik. Bei zentral organisierten Systemen wird hier zwischen unidirektionalem und bidirektionalem Verhalten unterschieden. Dabei ist entscheidend, dass Verkehrsdaten z.B. Fahrzeuggeschwindigkeiten bei konventionellen Systemen an zentralen Straßenpunkten aufgezeichnet werden. Bei bidirektionalen Systemen übernimmt das Fahrzeug die Rolle eines mobilen Sensors, der während seiner Fahrt die Geschwindigkeiten misst. In beiden Systemen werden die Verkehrsdaten an einen zentralen Funkmast übertragen und von dort an eine Verkehrsinformationszentrale weitergeleitet. Das heißt, die aufgezeichneten Daten werden sowohl zentral verwaltet als auch an einen zentralen Knotenpunkt übertragen.

2.1.1 Unidirektionales Kommunikationssystem

Bei dem unidirektionalen System wird der Verkehrsfluss über Verkehrsdatenerfassungssysteme, wie z.B. Straßensensoren oder Kameraüberwachung, aus dem fließenden Verkehr gewonnen [Bas10]. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft das betrachtete Verkehrsinformationssystem. Über die gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten lässt sich die zeitliche Dauer, mit der ein Fahrzeug einen Strecken-

abschnitt durchfahren kann, abschätzen. Die gewonnenen Daten werden in einem zentralen Verkehrsinformationszentrum gesammelt. Zur Erstellung einer Verkehrsmeldung werden die gemessenen Werte und Daten aus anderen Quellen, z.B. Polizeifunk und ADAC, zusammengefasst. Die aufgezeichneten Daten werden von der Verkehrsleitzentrale zur Steuerung des Verkehrsflusses über Beeinflussungs- und Zuflussregelungsanlagen genutzt.

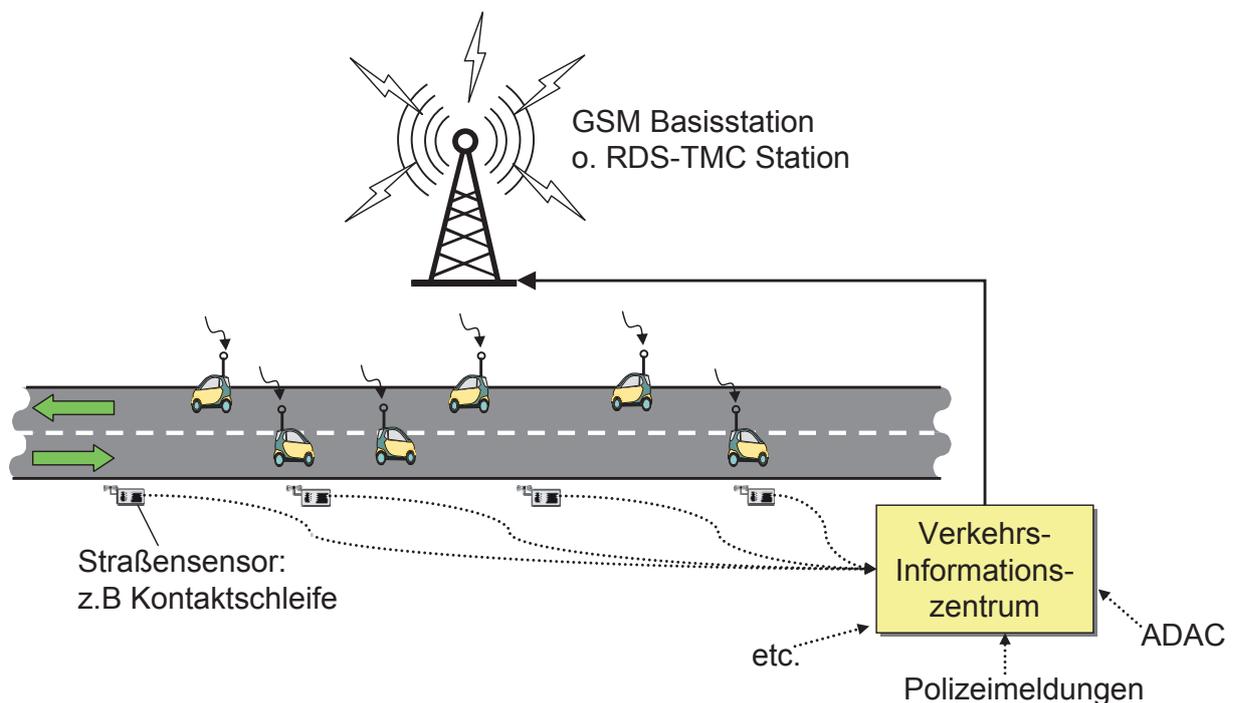


Abbildung 2.1: Unidirektionales Kommunikationssystem

Über ansteuerbare Verkehrsschilder kann der Verkehrsfluss homogenisiert werden und Staus lösen sich schneller auf. Radiostationen übertragen die Verkehrsmeldungen, um den Fahrzeughalter noch vor Erreichen des Staus zu warnen. Der Fahrzeughalter erfährt so von einem Verkehrsstau, indem er kontinuierlich die Radionachrichten verfolgt.

Erweiterte Technologien wurden durch das *Radio Data System* (RDS) mit dem *Traffic Message Channel* (TMC) eingeführt [KM99]. Bei TMC werden die gesammelten Verkehrsnachrichten parallel zum Rundfunk über den Radiokanal übertragen und lassen sich so über eine TMC-Funkschnittstelle empfangen.

Es werden immer nur Datenpakete mit einzelnen Verkehrsnachrichten gesendet. Flächendeckende Verkehrsinformationen über eine ganze Straße stehen dem Fahrer somit nicht zur Verfügung.

Dieses System ist veraltet und deckt längst nicht den gesamten Straßenverkehr ab. Das Automobil ist nur ein passiver Konsument der Verkehrsmeldungen, denn es trägt weder zur Datensammlung noch zur Verbreitung von Verkehrsinformationen bei. Schon Anfang der 2000er Jahre kamen neue Verbreitungsmedien über GSM, DAB oder UMTS hinzu. Verbessert wurde immer die Zugänglichkeit zu den Verkehrsnachrichten, nicht aber die Quellen dieser Nachrichten. Denn bisher konnten nur Verkehrsnachrichten dort gesammelt werden, wo auch Sensoren vorhanden sind. Das beschränkt sich wesentlich nur auf Autobahnen. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Verkehrsnachrichten auch nur dort empfangen werden können, wo eine Infrastruktur zur Funkkommunikation vorhanden ist.

2.1.2 Bidirektionales Kommunikationssystem

In Abbildung 2.2 wird ein zentrales Verkehrsinformationssystem mit bidirektionaler Kommunikation zwischen mehreren Mobilfunk-Basisstationen und Fahrzeugen gezeigt. In diesem System werden Mobiltelefone genutzt, um Ortsveränderungen bzw. Geschwindigkeiten zu messen. Befindet sich ein Nutzer mit einem Mobiltelefon in einem fahrenden Fahrzeug, so überschreitet das Fahrzeug dabei die Grenzen zwischen verschiedenen Funkzellen, in deren Mitte je eine Basisstation steht. Weil sich Mobiltelefone bei jedem Wechsel der Funkzelle bei der alten Zelle ab- und bei der neuen anmelden, dokumentieren sie ihre Ortsveränderung [Sch07]. Der Durchmesser der Funkzellen beträgt, je nach Region, einige Hundert Meter bis zu rund zehn Kilometer. Der Abstand zwischen Mobiltelefon und Funkmast lässt sich dann durch die Laufzeit des Funksignals bestimmen. Ein weiterer Indikator zur Lokalisierung des Fahrzeugs, ist die verwendete Sendeleistung des Mobiltelefons. Jedes Mobiltelefon misst ständig die Stärke des Funksignals, das von jedem der angepeilten Masten empfangen wird, und sendet den Messwert an die Antennen zurück. Durch Vergleichen der Messwerte

mit Karten, in denen die Signalstärken verzeichnet sind, lässt sich ein Mobiltelefon so genauer lokalisieren. Mit den zeitlich variierenden Fahrzeugpositionen lässt sich dann ermitteln, wie lange der Fahrer für die Strecke benötigt hat. Diese Daten werden als *Floating Phone Data* (FPD) bezeichnet und beschreiben das Fahrverhalten eines Fahrzeugs, wenn der Nutzer ein Mobiltelefon mitführt. Die gesammelten FPD werden in einem zentralen Verkehrsinformationszentrum verarbeitet und als Verkehrsnachricht aufbereitet. Von dort lassen sich die Verkehrsnachrichten, über zentrale Dienste z.B. TMCpro, abrufen [Dir08].

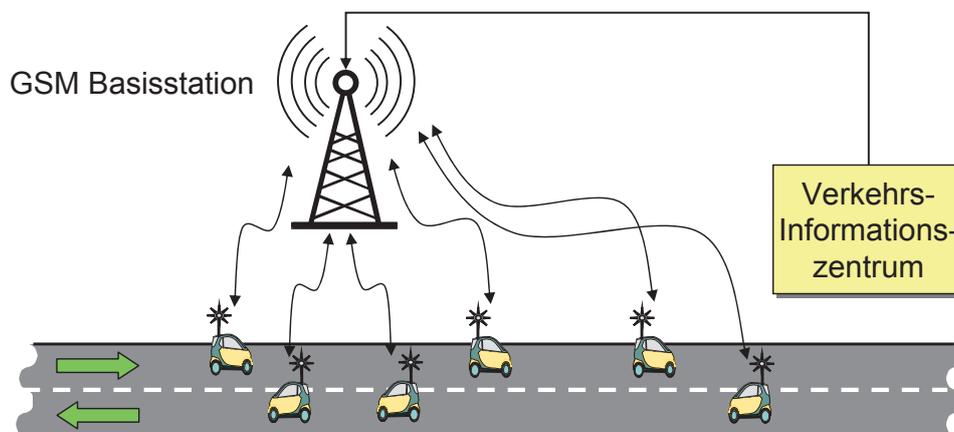


Abbildung 2.2: Bidirektionales Kommunikationssystem

Das Fahrzeug übernimmt keine aktive Funktion als mobiler Straßensensor. In einer zentralen Basisstation werden die Signallaufzeitdifferenzen und die Leistung des empfangenen Signals gemessen. Aus diesen Daten lässt sich eine Positionsveränderung des Fahrzeugs, bzw. ein Geschwindigkeitswert, berechnen. Durch Veränderung der Positionen der Fahrzeuge kann somit der Verkehrsfluss bestimmt werden. Die gemessenen Werte werden zu einem zentralen Verkehrsinformationszentrum übertragen und dort ausgewertet. Der Nutzer empfängt die zusammengefassten Verkehrsmeldungen über Rundfunk oder *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) Internetverbindung mit *download On-demand*.

Nachteile sind die zentrale Informationsverwaltung und die zellulare Kommunikation. Bei einer Funktionsstörung einzelner Basisstationen können Fahrzeugpositionen und Geschwindigkeiten auf einer Straße nicht mehr gemessen werden.

Bei einer Störung des Verkehrsinformationszentrums stehen für alle Straßen keine Verkehrsmeldungen mehr zur Verfügung.

2.1.3 Nachteile der zentralen Verkehrsinformationsverwaltung

- Um Fahrzeuggeschwindigkeiten flächendeckend zu erfassen, ist eine Vielzahl von Straßensensoren nötig. Weiterhin lassen sich nur die Straßen beobachten, welche mit Sensoren ausgestattet sind. Zur Zeit lässt sich deshalb der Stadtverkehr nicht flächendeckend beobachten, und es steht keine Verkehrsinformation zur Verfügung.
- Die von den Straßensensoren gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten müssen zur Zeit noch an ein zentrales Verkehrsinformationszentrum signalisiert werden. Erst dort werden die Daten verarbeitet und stehen dann unterschiedlichen Diensten zur Verfügung. Das verursacht eine hohe zeitliche Verzögerung von typischen 20-30 Minuten und resultiert in einer veralteten Verkehrsmeldung. Somit können auch keine zeitkritischen Meldungen, z.B. Notfallmeldungen, zur Verfügung gestellt werden.
- Im Verkehrsinformationszentrum werden nur Verkehrsdaten von größeren Verkehrsaufkommen (Staus) verarbeitet und in die Meldungen aufgenommen. Kleinere Staus, die für den einzelnen Fahrer durchaus von Interesse sind, werden bei der Verarbeitung der Fahrzeuggeschwindigkeiten nicht berücksichtigt.
- Die Ausstattung der Straßen mit entsprechenden Sensoren ist sehr kostenintensiv und benötigt eine Infrastruktur zur Weiterleitung der gemessenen Daten. Werden Verkehrsdaten über das mobile Datennetzwerk versendet, so ist dies in der Regel mit der Entrichtung von entsprechenden Servicegebühren verbunden. Darüber hinaus können, bei Nutzung des Dienstes im Ausland, *Roaming*-Gebühren anfallen.
- Bei einem Ausfall des Mobilfunksystems oder des Verkehrsinformationszentrums können weder Fahrzeugdaten gesammelt noch Verkehrsnachrichten versendet werden.

2.2 Dezentral organisierte Verkehrsinformationssysteme

Aufgrund der Nachteile in der zentralen Verbreitung und Speicherung von Verkehrsdaten, siehe Abschnitt 2.1.3, fokussiert sich der industrielle und universitäre Forschungs- und Entwicklungsbereich der Verkehrstelematik auf dezentrale Lösungen zur flächendeckenden Verbreitung von Verkehrsnachrichten.

Bei einem dezentral organisierten Verkehrsinformationssystem gibt es kein zentrales Verkehrsinformationszentrum in dem Verkehrsdaten aus unterschiedlichen Quellen zusammenfließen. Verkehrsdaten, z.B. Geschwindigkeiten und Positionen, werden an verteilten Orten (Straßenabschnitten) gemessen, gespeichert und weiterverarbeitet. Es ist ein verteiltes System bestehend aus einer Vielzahl von Sensoren bzw. Detektoren, die die Fähigkeit besitzen Daten miteinander auszutauschen. Der Austausch von Daten kann kabelgebunden oder drahtlos erfolgen, indem jeder Sensor ein Sende- und Empfangsmodul besitzt. Der Kanalzugriff erfolgt dezentral und wird für jeden Sensor individuell gesteuert. Unterschiedliche Sensorarten lassen sich in dieses System einbeziehen, z.B. Straßen-, Fahrzeug- oder Brückensensoren. Jede Sensorart misst die Fahrzeuggeschwindigkeiten und führt anhand dieser Messwerte eine eigenständige Situationsanalyse durch. Durch Übertragung der Ergebnisse der Situationsanalysen in das verteilte Netzwerk lassen sich Verkehrsinformationen über weite Strecken transportieren. Zur Datensammlung und -Verbreitung können zusätzlich stationäre *Roadside Units* (RSU) an vorhandener Infrastruktur, wie Ampeln, Brücken und Straßenabschnitten aufgestellt werden. Diese RSU nehmen keine eigenen Messungen vor sondern sammeln empfangene Verkehrsinformationen, um sie an andere Sensoren weiterzuleiten. Abbildung 2.3 zeigt ein dezentrales Kommunikationssystem mit mobilen Fahrzeugsensoren.

Der Vorteil eines dezentralen Verkehrsinformationssystems liegt in der sensorübergreifenden Verteilung der Verkehrsinformationen. Ist ein Sensor funktionsgestört bleibt das System davon unbeeinflusst, weil die Ergebnisse der Situationsanalysen über mehrere Sensoren hinweg verteilt werden. Ist ein stationärer Sensor, z.B. eine Induktionsschleife in der Straße, funktionsgestört, lässt sich für

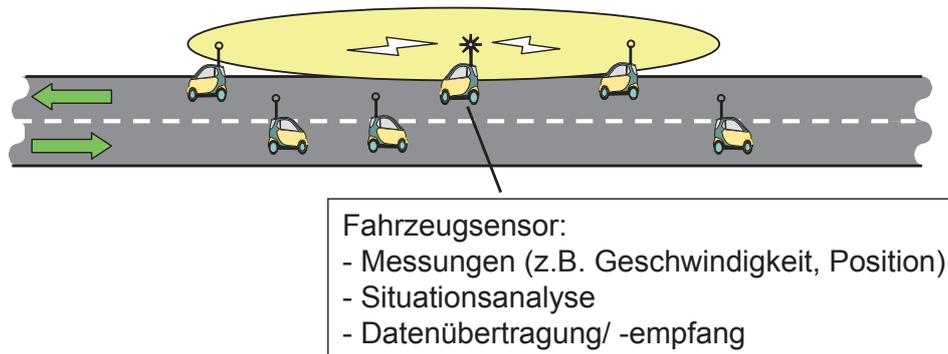


Abbildung 2.3: Dezentrales Kommunikationssystem

diesen Straßenabschnitt keine Geschwindigkeit mehr messen. Für diesen Straßenabschnitt lässt sich dann keine Situationsanalyse mehr erstellen. Aus diesem Grund werden mobile Straßensensoren (Fahrzeugsensoren) bevorzugt. Kommt es zu einer Funktionsstörung eines Fahrzeugsensors kann ein anderes Fahrzeug, welches den selben Streckenabschnitt durchfährt, die Messaufgaben übernehmen.

Es gibt zwei unterschiedliche Arten von dezentralen Verkehrsinformationssystemen. Diese Systeme können einerseits auf einer *Ad-Hoc*, oder andererseits auf einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation basieren.

Im 21. Jahrhundert haben sich unter anderen die Forschungsprojekte *FleetNet - Internet on the Road* [EWER03], [HBL⁺01] und *NoW - Network on Wheels* [FNS⁺08] mit dem Themengebiet der *Ad-Hoc* Kommunikation zwischen Fahrzeugen auseinandergesetzt. Ziel dieser Projekte ist die Verbesserung der Verkehrsinformationsverbreitung mit Aspekten auf Robustheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit. Durch die Förderung der Projekte durch die Automobilindustrie findet man in mehreren Projekten Realisierungen der Netzwerkschicht aus einem hybriden Kommunikationsverfahren mit den Schnittstellen IEEE 802.11p ([EBK10] S.178-181) und IEEE 802.11 a/b/g (WLAN) oder IEEE 802.11p (WAVE) und Mobilfunk (3G). Das zellulare Mobilfunknetz wird als Überbrückungstechnologie verwendet, solange die Ausstattungsrate der Fahrzeuge sehr gering

ist. Mit dem Ziel zentrale Verkehrsinformationssysteme mit dezentralen zu verknüpfen, um Kunden einen Zugang zu Verkehrsinformationen zu gewährleisten.

Das amerikanische IEEE 802.11p Kommunikationsprotokoll wurde speziell für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen entwickelt. Es nennt sich auch *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE) und definiert die Physikalische (PHY) und Kanalzugriffsschicht (MAC). Die PHY Schicht arbeitet in einem Frequenzbereich zwischen 5,85-5,925 GHz und verwendet das *Orthogonal Frequency Devision Multiplexing* (OFDM) Modulationsverfahren. Die 75 MHz Bandbreite wird in 7 Frequenzkanäle unterteilt, wobei 6 Kanäle für die Kommunikation von nicht sicherheitsrelevanten Daten vorgesehen sind, und ein Kanal für sicherheitsrelevante Daten [ZSW⁺07]. Für die MAC Schicht ist ein CSMA/CA Verfahren vorgesehen, wobei sicherheitsrelevante Daten über ein *broadcast*-Verfahren übertragen werden, und alle anderen Daten durch ein *unicast*-Verfahren zu einem entfernt liegenden Server gesendet werden. Eine Synchronisation zwischen den Fahrzeugen ist vorgesehen und kann z.B. über GPS Daten realisiert werden.

2.2.1 Ad-Hoc Kommunikation

Im klassischen Sinne sind *Ad-Hoc* Netzwerke Funknetze, die ohne eine feste Kommunikations-Infrastruktur betrieben werden können [Ras01]. Erstmals wurde der Begriff einer *Ad-Hoc* Kommunikation 1972 mit der Entwicklung des *Packet Radio Networks* (PRNET) verwendet und wurde in den frühen 1980er mit dem *Survivable Adaptive Radio Network* (SURAN) weiterentwickelt [RR02]. Beide Programme entstammen dem militärischen Anwendungsbereich und sollten eine mobile Kommunikation zwischen Soldaten, Panzern oder Flugzeugen auf einem Schlachtfeld, ohne feste Infrastruktur, ermöglichen. Erst in den 1990ern, mit der Entwicklung von kommerziellen Notebook Computern, fand die Technologie der *Ad-Hoc* Netzwerke, für nicht-militärische Anwendungen, Einzug. Weitere Anwendungsfelder wie Katastropheneinsätze der Feuerwehr/Polizei, Konferenzen/ Tagungen oder der Hochschulcampus zeigen Bereiche in

denen keine feste Infrastruktur besteht aber eine flächendeckende Kommunikation notwendig ist.

In einem *Ad-Hoc* Netzwerk sind mehrere Funkknoten generell räumlich getrennt voneinander auf einer größeren Fläche verteilt. Die Datenübertragung findet immer nur zwischen zwei Funkknoten, die als Datenquelle bzw. -senke bezeichnet werden, statt. Die Kommunikation zwischen einem oder mehreren Funkknoten wird über eine bidirektionale Punkt-zu-Punkt Verbindung aufgebaut. Wenn Sender- und Empfängerknoten räumlich weit auseinander liegen übernehmen benachbarte Funkknoten das Weiterleiten der Datenpakete. Diese indirekte Kommunikation über mehrere Kommunikationspfade wird als *Routing* bezeichnet.

Mobile *Ad-Hoc* Netzwerke werden kurz *Mobile Ad-Hoc Network* (MANET) genannt [BT06]. Das Systemdesign eines MANET wird durch einen zeitvarianten Übertragungskanal, welcher sich durch die hohe Dynamik der Funkknoten ständig ändert, durch die begrenzte Übertragungsreichweite, limitierte Energieversorgung und durch eine fehlende Infrastruktur bestimmt. Die Netzwerkschicht bei einem MANET übernimmt das Weiterleiten (*Routing*) der Daten über mehrere Funkknoten, falls Sende- und Empfangsknoten nicht in direkter Übertragungsreichweite stehen. Um solche Kommunikationspfade aufzubauen, muss die Topologie, also die räumliche Verteilung der Funkknoten, bekannt sein. Hier werden unterschiedliche Verfahren angewandt, um einen stabilen Übertragungspfad zwischen Sender und Empfänger aufzubauen. Die Mobilität der Funkknoten kann dazu führen, dass verwendete Kommunikationspfade unterbrochen werden. Deshalb muss eine Route ständig auf ihre Stabilität hin geprüft und gegebenenfalls eine neue Route aufgebaut werden.

In Abbildung 2.4 sind drei unterschiedliche *Routing* Mechanismen, so wie sie in einem MANET Anwendung finden, dargestellt. In Abbildung 2.4(a) ist ein *unicast Routing* gezeigt, in dem genau ein Quellknoten (Q) Datenpakete zu einem Funkknoten, hier als Senke (S) bezeichnet, überträgt. Drei weitere Funkknoten, welche sich zwischen Q und S befinden, übernehmen die Aufgabe der Datenweiterleitung (*Routing*). Alle weiteren eingezeichneten Funkknoten übernehmen

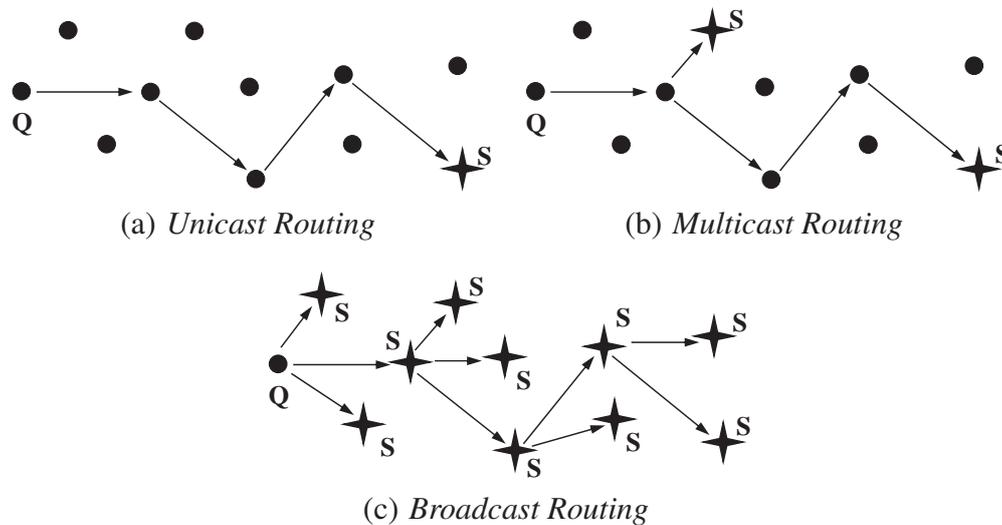


Abbildung 2.4: MANET *Routing* Mechanismen

keine Aufgabe. In Abbildung 2.4(b) wird ein *multicast Routing* gezeigt, in dem ein Funkknoten Q an mehrere Senken S, hier sind zwei Senken gezeigt, Daten überträgt. Räumlich benachbarte Knoten übernehmen die Funktion des *Routing*. In dem letzten Fall Abbildung 2.4(c) wird ein *broadcast Routing* Verfahren gezeigt. Hier überträgt ein Quellknoten Q seine Daten an alle anderen Funkknoten. Sollte ein Funkknoten nicht direkt in Übertragungsbereich zu Q stehen, übernimmt ein anderer Funkknoten die Aufgabe des *Routing* und leitet die Daten zu seinen benachbarten Funkknoten weiter.

Die charakteristischen Eigenschaften eines MANET zeigen, dass der wesentliche Bestandteil des Systemdesigns durch das *Routing*-Verfahren festgelegt wird. In einem MANET überträgt immer ein fester Quellknoten Q Daten zu einem entfernt liegenden Zielfunktknoten S. Benachbarte Funkknoten nehmen somit eine passive Rolle in diesem Netzwerk ein, weil die Knoten die Aufgabe haben, die Daten zum Zielknoten weiterzuleiten, selber aber nicht aktiv eine eigene Datenübertragung vornehmen.

Indem eine *Ad-Hoc* Kommunikation für dezentrale Verkehrsinformationssysteme eingesetzt wurde, werden die Eigenschaften eines MANET auf ein neuartiges automobiles *Ad-Hoc* Netzwerk übertragen. Diese Untergruppe wird als

Vehicular Ad-Hoc Network (VANET) bezeichnet. In einem VANET nehmen PKWs, LKWs oder Busse die Rolle eines mobilen Straßensensors ein. Im Gegensatz zum MANET haben die mobilen Straßensensoren in einem VANET eingeschränkte Bewegungsfreiheit. Diese wird durch Straßen, Verkehrsregeln und den Bewegungen der anderen PKWs vorgegeben und beeinflusst [Plö09].

Unterschiede zwischen MANET und VANET finden sich hauptsächlich in den Punkten der Energieversorgung und der hohen mobilen Dynamik wieder. Die Systemarchitektur eines VANET baut nicht auf eine limitierte Energieversorgung auf, weil der Sensor in der Regel an den Stromkreislauf des Fahrzeugs gekoppelt ist. Durch die hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten (bis zu 250 km/h) ist die Dynamik bei einem VANET viel größer als bei einem MANET. Die hohen Relativgeschwindigkeiten bei Fahrzeugen (z.B. PKWs) führen zu kurzen Kommunikationszeiten und einer sich schnell ändernden Netzwerktopologie. Diese Randbedingungen müssen bei dem Design eines VANET beachtet werden.

2.2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist keine *Ad-Hoc* Kommunikation. Sie unterscheidet sich damit von dem Kommunikationsverhalten in einem VANET oder MANET. Erstens, es findet keine adressierte Kommunikation zwischen einem Quellknoten und einem Zielknoten statt. Zweitens, *Routing* Verfahren, so wie sie in einem MANET vorkommen, finden keine Anwendung. Und Drittens, alle verteilten Fahrzeugsensoren besitzen eine gleichberechtigte Aufgabe eines Quell- und Zielknotens. Die übertragenen Datenpakete sind immer für alle Teilnehmer in einem Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk bestimmt. Verkehrsinformationen aus dem Inhalt eines empfangenen Datenpakets werden weiterverarbeitet und in aufbereiteter Form in ein neues Datenpaket übertragen. Fahrzeuge leiten also empfangene Datenpakete nicht direkt weiter wie es bei einem *Routing*-Verfahren der Fall ist, sondern verarbeiten die Inhalte und fügen neue Inhalte aus eigenen Messungen hinzu. In Abbildung 2.5 wird die Funktionsweise eines Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerks gezeigt.

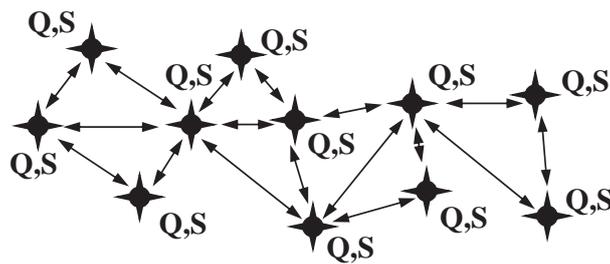


Abbildung 2.5: Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

Jeder mobile Fahrzeugsensor übernimmt gleichzeitig zwei Aufgaben, die Funktion als Quelle (Q) und als Speicher bzw. Senke (S) von Verkehrsdaten. Diesbezüglich wird der Begriff der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation in der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert.

Definition:

Ein Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk besteht aus einer Vielzahl von automobilen Funkknoten (z.B. PKW, LKW oder Bus), welche untereinander über eine drahtlose Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation Datenpakete austauschen. Jeder Funkknoten hat gleichberechtigte Aufgaben bei der Messung, Verarbeitung und Übertragung von Verkehrsdaten. Jeder Funkknoten kann selbständig eine Datenübertragung durchführen und Datenpakete empfangen. Empfangene Verkehrsdaten werden mit eigenen Messungen fusioniert und in neuen Datenpaketen übertragen. Die Bewegung der Fahrzeuge folgt gewissen Rahmenbedingungen (Straßen, Verkehr und Verkehrsregeln) mit veränderlichen Kanalübertragungseigenschaften, die zu Kommunikationsstörungen führen können. Als Ziel einer Datenübertragung gilt jede erfolgreiche, bzw. störungsfreie, Übertragung von Daten an mindestens einen Funkknoten. Ein Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk kann sowohl autonom existieren als auch stationäre Transmitter (bezeichnet als: Fahrzeug-zu-X) zur Datenverbreitung nutzen.

III

Selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem

Das *Self-Organising Traffic Information System* (SOTIS) [Ebn05], [Wis07] ist ein selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem, bei dem Fahrzeuge als mobile Sensoren agieren [RB09c], [RB09a], [RB09b] und [WER05]. In jedem Fahrzeug befindet sich ein Satellitennavigationsempfänger, eine digitale Karte und eine Kommunikationseinheit. Indem jedes Fahrzeug die momentan gefahrene eigene Geschwindigkeit misst und diese Nachricht an alle Verkehrsteilnehmer in der lokalen Umgebung per Funksystem überträgt, kann daraus bereits durch Berechnung der mittleren Geschwindigkeit eine aktuelle Verkehrssituation in jedem individuellen Straßensegment quantitativ ermittelt werden. Bei SOTIS kommt kein zentrales Verkehrsinformationszentrum zur Auswertung der gemessenen Geschwindigkeiten zum Einsatz. Jedes Fahrzeug verarbeitet und fusioniert einzelne gemessene Geschwindigkeiten zu einer das Straßensegment charakterisierenden mittleren Geschwindigkeit und erstellt damit ein Bild der aktuellen Verkehrssituation. Die Daten, die ein Fahrzeug während der Fahrt misst, bezeichnet man als *Floating Car Data* (FCD). Dazu gehören die Messungen der eigenen Geschwindigkeit und der Position. Die ausschließliche Berechnung der mittleren Geschwindigkeit ist ausreichend, um die Verkehrssituation perfekt kennzeichnen zu können.

Die Geschwindigkeitsmessung wird für jeden Straßenabschnitt individuell durchgeführt, damit kann die Verkehrssituation sektorweise bestimmt werden. Eine sektorweise Situationsanalyse der mittleren Geschwindigkeit findet in jedem Fahrzeug statt. Diese Einfachheit zeichnet den Systementwurf aus.

SOTIS basiert auf der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und ist in Abbildung 3.1 exemplarisch dargestellt. Ein Fahrzeug überträgt, durch eine drahtlose *broadcast* Kommunikation, Datenpakete mit Geschwindigkeits- und Positionswerten für mehrere Straßensektoren. Die Datenpakete werden periodisch mit einer Sendeperiode T_s übertragen. Bei einer *broadcast* Kommunikation werden die Datenpakete ohne Adressierung immer an alle Funkknoten übertragen. Somit ist ein empfängerseitiges Übertragen eines *Acknowledge*-Datenpakets, zur Quittierung des Datenempfangs, nicht vorgesehen. Ein SOTIS Fahrzeug übernimmt in der Praxis die Rolle einer Radiostation bzw. eines -Empfängers zum Senden und Empfang von Datenpaketen. Treten zwei oder mehr Fahrzeuge in physikalische Sendereichweite, so können Datenpakete untereinander empfangen werden.

Die Geschwindigkeitsmessung im individuellen Fahrzeug wird unterstützt durch die Geschwindigkeitsangaben, die in den Datenpaketen enthalten sind. Die Fusion der Geschwindigkeitswerte in den Datenpaketen mit den Messwerten eines Fahrzeuges werden der Situationsanalyse bereitgestellt.

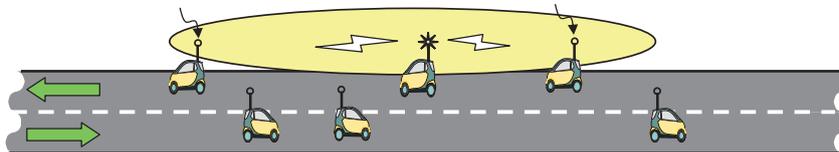


Abbildung 3.1: Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation bei SOTIS

SOTIS gibt dem Fahrer viele Vorteile und ein klares Bild der derzeitigen lokalen Verkehrssituation, sogar in den Fällen, in denen zunächst nur eine geringe Anzahl von Fahrzeugen mit dieser Technologie ausgestattet ist.

3.1 Selbstorganisation

Die Idee der Selbstorganisation entstammt aus Prozessbeobachtungen in der Natur und wurde von dort auf technische Systeme übertragen. Die ersten wissenschaftlichen Artikel über Selbstorganisation entstanden in den frühen 1960er

Jahren [Dre07]. Hier wurden selbstorganisierende Mechanismen von den Autoren Ashby und von Foerster aufgegriffen [Ash62]. Eine der wichtigsten Eigenschaften eines selbstorganisierenden Systems ist die Abwesenheit einer globalen und zentralen Kontrollinstanz. Besteht das System aus mehreren Subsystemen, so arbeitet jedes Subsystem komplett autonom. In vielen Bereichen werden selbstorganisierende Verfahren eingesetzt, um Netzwerke robust gegen Ausfälle zu machen, und um einen minimalen Wartungsaufwand zu erreichen. Neue Forschungszweige zeigen, dass selbstorganisierende Systeme auch in technisch sensiblen Bereichen eingesetzt werden können [MBR10].

Für die Steuerung von stark verteilten Systemen werden diese Eigenschaften benötigt. Im Gegensatz zu anderen Steuerungsverfahren verwendet die Selbstorganisation lokale Entscheidungsprozesse in autonomen Systemen. Durch Interaktionen zwischen den einzelnen Systemen (z.B. Fahrzeugsensoren) und deren lokalen Steuerungsprozessen entsteht ein gesamtes Systemverhalten, abgesetzt von den Entscheidungen der lokalen und einzelnen Fahrzeugsensoren.

Die Selbstorganisation bietet Methoden und Techniken, die zur Funktionsfähigkeit und Kontrolle von autonomen Systemen benötigt werden. Als Beispiel soll die Kommunikation zwischen mehreren Funkknoten in einem System betrachtet werden. Dabei kann jeder einzelne Funkknoten seine Umgebung beobachten und Veränderungen registrieren. Zur Aktualisierung des Wissensstandes des lokalen einzelnen Funkknotens, bei Änderung der Umgebung, werden rekursive Methoden verwendet. Das heißt, durch Verhaltensbeobachtung der anderen Funkknoten und der Umgebung findet eine Anpassung im einzelnen Funkknoten statt. Eine Vielzahl von Interaktionen zwischen den einzelnen lokalen Funkknoten ermöglicht ein koordiniertes Verhalten im System. Diese Interaktionen können entweder direkt zwischen den einzelnen Funkknoten stattfinden oder indirekt durch Änderungen der Umgebung. Des Weiteren werden stochastische Prozesse in selbstorganisierenden Systemen genutzt, um einen *Overhead* in der Datenkommunikation, z.B. zur Koordination der einzelnen Systeme untereinander, möglichst klein zu halten.

Drei wesentliche Vorteile bietet ein selbstorganisierendes System. Das System ist skalierbar, wenn Subsysteme (Funkknoten) wegfallen oder hinzukommen. Das System ist robust, weil das Gesamtsystem zuverlässig arbeitet, auch wenn einzelne Funkknoten ausfallen oder die Kommunikation unterbrochen wird. Und das System ist bei Veränderung von Umgebungsparametern anpassungsfähig, indem ein Funkknoten seine Verfahrensweisen ändert, ohne dass ein Eingriff einer zentralen Koordinationsinstanz notwendig wird.

Selbstorganisierende Methoden

SOTIS nutzt selbstorganisierende Methoden zur Sammlung und Verbreitung von Verkehrsdaten. Die wesentlichen Eigenschaften werden in den nachfolgenden Punkten herausgestellt.

- **Interaktion** - Durch das Austauschen von Verkehrsdaten zwischen den Fahrzeugen entsteht ein Wissensstand über das Verkehrsverhalten auch auf weiter entfernt liegenden Straßen. Die Fahrzeuge passen ihre Geschwindigkeit oder die Wahl ihrer Route der Information aus den Verkehrsdaten an. Dies führt zu einer lokalen Veränderung des Verkehrsflusses.
- **Robustheit** - Durch die Übertragung von Verkehrsdaten in das verteilte System erhalten die Sensoren, über der Zeit, einen ähnlichen Wissensstand. Fällt ein Sensor in einem Fahrzeug aus, so existieren immer weitere Fahrzeuge, die ähnliche Informationen besitzen und weiterleiten können.
- **Adaptivität** - Das Kanalzugriffsverfahren berücksichtigt die Auslastung des drahtlosen Übertragungskanals. Bei hoher Kanalauslastung wird die Datenübertragung zurückgestellt, bis der Kanal wieder frei ist. Bei Überlastung des Übertragungskanals kommen Verfahren zur Steuerung der Kanalauslastung zum Einsatz. Dadurch wird die Überlastung aufgehoben.
- **Zuverlässigkeit** - Die Anzahl von empfangenen bzw. gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten wird in einem rekursiven Datenverarbeitungsalgorithmus

zur Bewertung der Verkehrssituation berücksichtigt. Dadurch steigt die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Bewertung des Verkehrs in jedem einzelnen Fahrzeug und im gesamten System.

3.2 Systemkomponenten

Im Folgenden werden die SOTIS Komponenten zur Geschwindigkeitsmessung, Datenkommunikation und Darstellung der Situationsanalysen beschrieben. In Abbildung 3.2 sind die Systemkomponenten gezeigt.

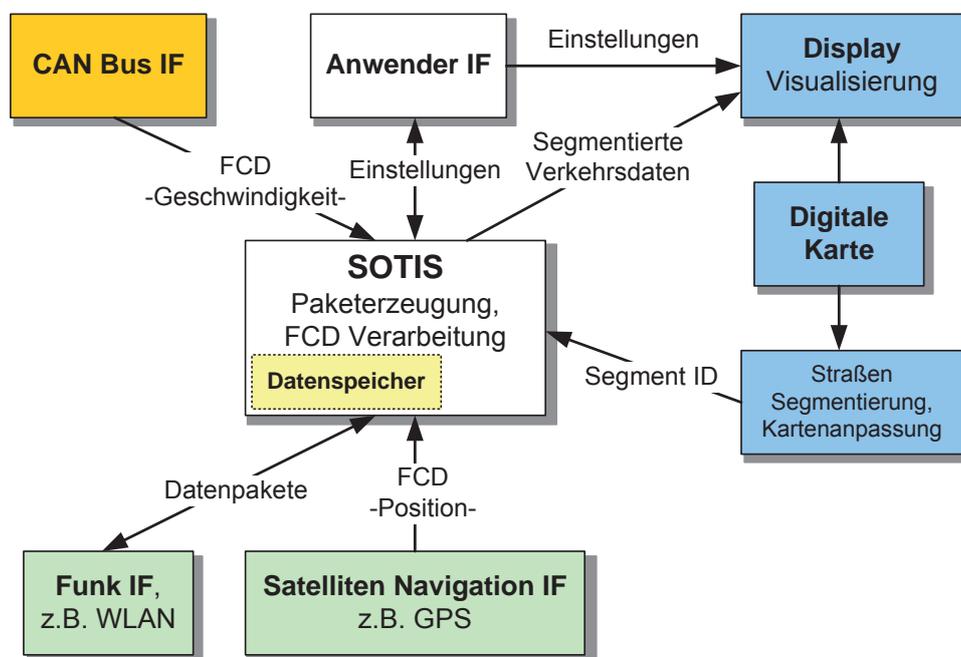


Abbildung 3.2: SOTIS Komponenten in jedem Fahrzeug

Der *Controller Area Network* (CAN) Bus trägt fahrzeugspezifische Daten, z.B. die momentane eigene Geschwindigkeit. Über das Satelliten Navigations-Interface werden, z.B. über GPS, die Navigationsdaten bestehend aus Latitude und Longitude Koordinaten ausgelesen. Die Navigationsdaten werden benötigt, um die eigene globale Fahrzeugposition und die Fahrtrichtung zu bestimmen. Die Parameterwerte aus Fahrzeugposition und die Geschwindigkeit werden als

Floating Car Data (FCD) bezeichnet und werden in der Situationsanalyse benötigt.

Die digitale Karte dient der Zuordnung von Navigationsdaten zu Straßenpositionen. Weil die Geschwindigkeitswerte bestimmten Straßenabschnitten zugeordnet werden sollen, gibt die digitale Karte auch vor, wo und wie lang ein Straßenabschnitt ist. Nach der Situationsanalyse wird das digitale Kartenmaterial ebenso verwendet, um dem Fahrer die Verkehrsverhältnisse über ein Display visuell darzulegen.

Das Funk IF, z.B. WLAN IEEE 802.11, wird zur drahtlosen *broadcast* Kommunikation verwendet. Über ihr werden standardisierte SOTIS Datenpakete übertragen und empfangen. Es basiert auf dem EU-weit eingeführten Frequenzband von 5,9 GHz und einer Bandbreite von 30 MHz. Die Kanalzugriffsschicht (MAC) basiert auf dem *Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance* (CSMA/CA) Verfahren.

Der SOTIS Kern in Abbildung 3.2 steuert die entsprechenden Schnittstellen, erzeugt neue Datenpakete und führt die Situationsanalysen anhand von gemessener und empfangener Geschwindigkeitswerte durch. Im Datenspeicher werden Geschwindigkeitswerte und Positionen aus den Messungen und Datenpaketen gespeichert und bei Bedarf abgerufen.

SOTIS unterstützt zwei Applikationen bei der Übertragung von Verkehrsdaten. Eine SOTIS Applikation übernimmt die Funktion eines Komfort- und Verkehrsleitsystems, in dem aktuelle Verkehrsdaten versendet werden. In einer weiteren Applikation wird SOTIS zu einem sicherheitsrelevanten Informationssystem und dient zur Verbreitung von Notfallberichten. Diese Applikation wird aktiv, wenn ein SOTIS Fahrzeug z.B. in einen Verkehrsunfall verwickelt ist.

Komfort- und Verkehrsleitsystem (*SOTIS Comfort*) – In einem Komfort- und Verkehrsleitsystem werden die Geschwindigkeitswerte in Straßenabschnitten und die Ergebnisse der Situationsanalysen verwendet, um z.B. Fahrzeuggeschwindigkeiten dem Verkehrsfluss besser anzupassen, oder zum Umfahren von Verkehrsbehinderungen über andere Straßen. Diese Applikation

verbessert den Fahrkomfort und optimiert den Verkehrsfluss. Weitere Komfortapplikationen sind z.B. der Empfang von Wetterinformationen oder Tankstelleninformationen. Allerdings konzentriert sich SOTIS näher am Verkehrsleitsystem und soll den Informationsfluss und die Genauigkeit der Verkehrsinformation verbessern.

Sicherheitsrelevantes System (*Emergency Report*) – Das Sicherheitsrelevante System dient zur frühzeitigen Warnung vor Unfällen auf der befahrenen Straße. Das SOTIS Datenpaket enthält in diesem Fall eine Art Notfallbericht mit genauen Orts- und Zeitangaben. Fahrzeuge können dann rechtzeitig darauf reagieren und z.B. einen Auffahrunfall verhindern. Einerseits kann die Information dem Fahrer über das Anwender IF präsentiert werden, worauf der Fahrer selbst entscheidet, wie er darauf reagiert. Andererseits ließe sich eine automatisch initiierte Notfallsbremsung oder eine Reduzierung der Geschwindigkeit einleiten, um die Reaktionszeit zu verkürzen. Ausgelöst werden kann die automatische Übertragung eines *Emergency Report* z.B. durch Aktivierung des *Airbags* oder durch Versagen des Antiblockiersystems.

3.2.1 Segmentorientierte Geschwindigkeitsmessungen

Um Verkehrsinformationen zu generieren, misst jedes Fahrzeug periodisch seine individuellen *Floating Car Data* (FCD). Dabei handelt es sich um die eigene Geschwindigkeit und die Position auf der Straße. Zur Bewertung des Verkehrsflusses ist es ausreichend, die Geschwindigkeit zu messen. Der Geschwindigkeitswert gibt Aufschluss darüber in welchem Zeitraum ein Streckenabschnitt durchfahren werden kann. Die Idee von FCD wird durch die Verwendung von Kraftfahrzeugen als fließende Sensoren im Straßenverkehr beschrieben. Die Daten, die ein Fahrzeug misst, charakterisieren die allgemeinen Merkmale einer Fahrstrecke [VDA07]. Hierfür integrieren schon jetzt viele Automobil- und Navigationsgerätehersteller sowohl in Navigationsgeräten als auch in Bordrechnern FCD-Software.

Die gemessenen Daten werden vorher definierten Straßenabschnitten zugeordnet. Die Länge der Straßenabschnitte wird über die digitale Karte im System festgelegt. Ein Straßenabschnitt wird als Segment bezeichnet und hat je nach Straßentyp eine unterschiedliche Länge. Tabelle 3.1 zeigt die unterschiedlichen Einteilungen der Straße in Segmente der Länge l_s .

Die Länge der Segmente berechnet sich aus der Dynamik der Fahrzeugbewegungen. Weil die gemessenen und empfangenen Geschwindigkeitswerte aggregiert werden, siehe Abschnitt 3.2.2, ist die Länge der Segmente entscheidend für die Auflösung der Verkehrsinformation auf einer Straße. Auf der Autobahn sind, durch den freien Verkehrsfluss, schnelle Veränderungen der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht gegeben und es gilt die Approximation der Normalverteilung von Geschwindigkeiten [McL89]. Dadurch ist über weite Strecken die Geschwindigkeit eines einzelnen Fahrzeugs nahezu konstant. Hierfür wählt man deswegen längere Straßenabschnitte, was die räumliche Geschwindigkeitsauflösung reduziert. Im Stadtverkehr ist die Dynamik und damit die Änderung der Geschwindigkeit höher, d.h. die Geschwindigkeit zeigt stärkere Variationen durch verkehrsbedingtes *stop-and-go* Verhalten. Deswegen wählt man hier kleinere Straßenabschnitte, um die Auflösung der Geschwindigkeit hoch zu halten.

Jedes Segment erhält eine eindeutige Zuordnung über eine ID Kennzeichnung. So lassen sich gemessene Navigationsdaten, bestehend aus Latitude und Longitude Koordinaten, einer Segment ID zuordnen. Abbildung 3.3 zeigt eine Straße,

Tabelle 3.1: Segmentlängen, festgelegt über die digitale Karte.

Straßentyp	Segmentlänge l_s (m)
Stadtstraße	20 – 100
Bundesstraße	200 – 300
Landstraße	300 – 500
Autobahn	500 – 1000

die in gleichgroße Segmente (Straßenabschnitte) der Länge $l_s = 200$ m unterteilt wurde.

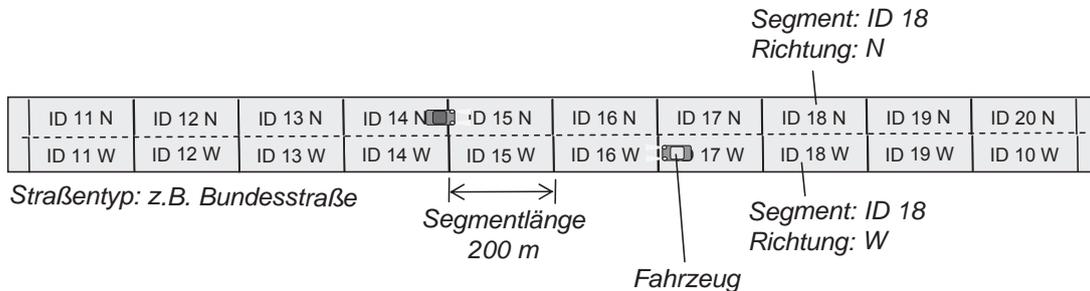


Abbildung 3.3: Aufteilung der Straße in Segmente (Beispiel)

Um eine konstante Anzahl von Messungen für jeden durchfahrenen Straßenabschnitt zu erhalten, kann die zeitliche Messperiode Δt_s wie folgt adaptiv in jedem Fahrzeug eingestellt werden.

$$\Delta t_s = \frac{l_s}{v_s \cdot n_s} \quad (3.1)$$

Die Anzahl von Messwerten pro Segment ist durch n_s gegeben. Die momentane Geschwindigkeit v_s wird hier zunächst als nahezu konstant vorausgesetzt. Mit der Messperiode Δt_s entsteht eine Reihe an Datensätzen $d_s(i)$ mit $i = [1, \dots, n_s]$ für ein Segment. Ein Datensatz beinhaltet die gemessene Position p_s , die Geschwindigkeit v_i und einen Zeitstempel t_i zum Zeitpunkt der Messung.

$$d_s(i) = [p_s, v_i, t_i] \quad (3.2)$$

Die Position p_s beinhaltet die Segment ID für Segment s . Somit besitzen n_s Messwerte für dieses Segment dieselbe ID.

Beispiel – Ist $\Delta t_s = 500$ ms, und ein Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit $v = 100$ km/h, dann sammelt es auf einer Strecke von 500 m insgesamt $n_s = 36$ Datensätze.

Im Datenspeicher des SOTIS Kern wird immer nur der aktuellste Datensatz $d_s(i)$ gespeichert. Dieser Datensatz wird in der Datenaggregation mit anderen Datensätzen fusioniert.

3.2.2 Datenaggregation

Allgemein besitzt die Geschwindigkeitsverteilung des frei-fließenden Verkehrs auf einer Straße nach [BMW56] eine normalverteilte Form. In Abhängigkeit der Verkehrsdichte verändert sich die Varianz und der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung. Betrachtet man die Differenzen zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten auf deutschen Autobahnen, so lässt sich die Verteilung der Geschwindigkeitsdifferenzen für frei-fließende Fahrzeuge annehmen. Berücksichtigt man einen Anteil an frei-fließendem Verkehr und Fahrzeugfolgeverkehr, so lässt sich die Verteilung der Geschwindigkeitsdifferenzen einer vermischten Normalverteilung annähern [Lut96].

Verkehrsinformationen müssen zuverlässig und möglichst präzise vorliegen, um dem Fahrer von Nutzen zu sein. Ein momentan gemessener Geschwindigkeitswert v_i aus einem Datensatz $d(i)$ ist aufgrund der vermischten Normalverteilung Schwankungen unterworfen und charakterisiert nur ein kurzzeitig gültiges Verkehrsverhalten auf einem Straßenabschnitt. Um ein robustes Verkehrsverhalten zu ermitteln, werden daher die Einzelmessungen der Geschwindigkeitswerte in einem Datensatz $d(i)$ geeignet zusammengefasst (aggregiert). Die vorgenommene Aggregation ist eine rekursive Mittelwertbildung der gemessenen Geschwindigkeiten. Dieses Verfahren erhöht die Zuverlässigkeit der Verkehrsinformation, weil einzelne Geschwindigkeitsabweichungen durch die Mittelwertbildung geringeren Einfluss nehmen.

Die mittlere Geschwindigkeit wird fortlaufend für jeden Straßenabschnitt mit einer Segment ID # berechnet. Die gesamte Anzahl von Messwerten in einem Datensatz gehen in die Mittelwertbildung ein. Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_s ist immer einem Segment zugeordnet. Die rekursive Berechnungsvorschrift ist im Folgenden gezeigt [RB09a].

$$\bar{v}_{s,\text{neu}} = \begin{cases} (1 - \alpha) \cdot \bar{v}_{s,\text{alt}} + \alpha \cdot v_i & \text{für } t_i > t_{s,\text{alt}} \\ \bar{v}_{s,\text{alt}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.3)$$

Die mittlere Geschwindigkeit für ein Segment lautet \bar{v}_s , wobei $\bar{v}_{s,\text{neu}}$ ein neu berechneter und $\bar{v}_{s,\text{alt}}$ der vorherige berechnete Geschwindigkeitswert für ein Segment ist. Die gemessenen Geschwindigkeitswerte v_i aus einem Datensatz gehen in die Berechnung des mittleren Wertes ein, wenn der Zeitstempel des Messwertes t_i aktueller ist als der Zeitstempel des Segmentwertes t_s .

Für $\alpha = 0,5$ ist $\bar{v}_{s,\text{neu}}$ der Mittelwert aus der aktuellen Geschwindigkeit v_i und der letzten berechneten Geschwindigkeit $\bar{v}_{s,\text{alt}}$. Je nachdem wie $\alpha \in [0,1]$ gewählt wird, kann das Gewicht stärker auf den gemessenen Geschwindigkeitswert, oder den letzten berechneten Wert gelegt werden. Für jeden neu berechneten mittleren Geschwindigkeitswert in einem Segment wird ein Zeitstempel erstellt. Dieser Zeitstempel gibt die Aktualität des berechneten Wertes an. Gleichung (3.4) zeigt, wie der Zeitstempel festgelegt wird.

$$t_{s,\text{neu}} = \max(t_{s,\text{alt}}, t_i) \quad , \text{ mit } i = [1, \dots, n_s] \quad (3.4)$$

Der Zeitstempel wird dem neu berechneten mittleren Geschwindigkeitswert $\bar{v}_{s,\text{neu}}$ zugeordnet.

Die auf segmentbasis berechneten mittleren Geschwindigkeitswerte \bar{v}_s werden in Datenpaketen zusammen mit dem Zeitstempel t_s und der Segment ID p_s übertragen. Jedem Segment ist also genau ein Segmentvektor d_s zugeordnet.

$$d_s = [p_s, \bar{v}_s, t_s] \quad (3.5)$$

Ein Datenpaket enthält mehrere solcher Segmentvektoren d_s , wie in Abschnitt 3.2.3 noch näher erläutert wird. Als letzten Schritt in der Datenaggregation werden die Geschwindigkeitsangaben aus den empfangenen Datenpaketen in die Berechnung der mittleren Geschwindigkeitswerte mit einbezogen. Die empfangenen Werte werden in Gleichung (3.3) dann wie folgt berücksichtigt. Die gemessene Geschwindigkeit wird für diesen Wert dann $v_i = \bar{v}_s$ und der Zeitstempel $t_i = t_s$ gesetzt. Die empfangenen und gemessenen Werte werden natürlich immer nur für eine eindeutige Segment ID berücksichtigt. Somit berechnet

Gleichung (3.3) fortlaufend die mittlere Geschwindigkeit aus gemessenen und empfangenen Datensätzen bzw. Segmentvektoren.

Wird über eine längere Zeitdauer, z.B. 1 Stunde, weder ein neuer Geschwindigkeitswert für ein Segment gemessen noch empfangen, so wird die mittlere berechnete Geschwindigkeit für dieses Segment aus dem Datenspeicher entfernt. Dadurch bleibt die Datenmenge im SOTIS Datenspeicher über der Zeit konstant.

Da nur mittlere Geschwindigkeitswerte für feste Straßenabschnitte versendet werden, bleibt auch das benötigte Datenvolumen gering. Dadurch, dass ein Datenpaket mittlere Geschwindigkeitswerte für mehrere Segmente enthält, lässt sich über die Situationsanalyse ein komplettes Lagebild der Geschwindigkeitsverteilungen auf einer oder mehreren Straßen erstellen. Mit Kenntnis der Art der befahrenen Straße, z.B. Stadtstraße, Landstraße oder Autobahn, liegt auch die Kenntnis der maximal zulässigen Geschwindigkeit auf dieser Straße vor. Wird die mittlere Geschwindigkeit mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit des Straßenabschnitts verglichen, dann lässt sich ein Verkehrsstau sehr präzise ermitteln. Mit diesem Lagebild kann SOTIS sehr präzise Verkehrsinformationen, z.B. Staulänge oder zu erwartende Verzögerungen bis zum Zielort, mit sehr geringer zeitlicher Verzögerung, berechnen.

3.2.3 Datenpaketstruktur

Die erzeugten Datensätze in Gleichung (3.5) werden in ein Datenpaket integriert und durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation an andere Fahrzeuge übertragen. Der ausschließliche Inhalt eines Datenpakets besteht aus mehreren Segmentwerten d_s mit Segment ID p_s , mittlerer Geschwindigkeit \bar{v}_s und Zeitstempel t_s .

Die Datenkommunikation findet über den Austausch von standardisierten SOTIS Datenpaketen statt. Indem jedes Fahrzeug seine Segmentwerte d_s nach Gleichung (3.5) an andere Fahrzeuge überträgt, erhalten diese ein Verkehrszustandsabbild ihrer Umgebung. Die empfangenen Datensätze werden aggregiert, in dem eigenen Datenspeicher hinterlegt und in ein neues Datenpaket integriert. Werden

mehrere Datenpakete von unterschiedlichen Fahrzeugen empfangen, so können Segmentwerte mit derselben Segment ID in den Datenpaketen auftreten. Diese werden in einem segmentspezifischen Datensatz d_s zusammengefasst und nach Gleichung (3.3) aggregiert.

Ein segmentspezifischer Datensatz d_s wird in Gleichung (3.6) dargestellt.

$$d_s = (d_s(1), d_s(2), d_s(3), \dots, d_s(n_d)) \quad (3.6)$$

Die Anzahl n_d von empfangenen Datenpaketen muss nicht immer mit der Anzahl von Segmentwerten für eine Segment ID übereinstimmen. In die Datenaggregation gehen die empfangenen mittleren Geschwindigkeitswerte von jedem Segmentwert $d(i)$ aus Gleichung (3.6) mit in die Berechnung des neuen mittleren Geschwindigkeitswertes $\bar{v}_{s,\text{neu}}$ ein.

Die Größe des standardisierten SOTIS Datenpaketes berechnet sich aus der Anzahl der Segmentwerte (Straßenabschnitte), die zur Information versendet werden sollen. Die Anzahl von Segmentwerten in einem SOTIS Datenpaket wird über ein 500 km langen Autobahnabschnitt abgeschätzt. Abbildung 3.4 zeigt den Straßenabschnitt mit Segmentlängen von $l_s = 1000$ m. Verkehrsinformationen auf Autobahnen müssen über weite Strecken vorliegen, damit der Fahrer rechtzeitig auf eine Verkehrsbehinderung reagieren kann. Setzt man eine Informationsvorausschau von 250 km an, so werden 250 Segmente vor und hinter einem Fahrzeug auf dieser Fahrspur benötigt. Werden zwei Fahrspuren für den Hin- und Rückverkehr berücksichtigt, dann werden insgesamt 1000 Segmente bzw. Datensätze in ein Datenpaket integriert.

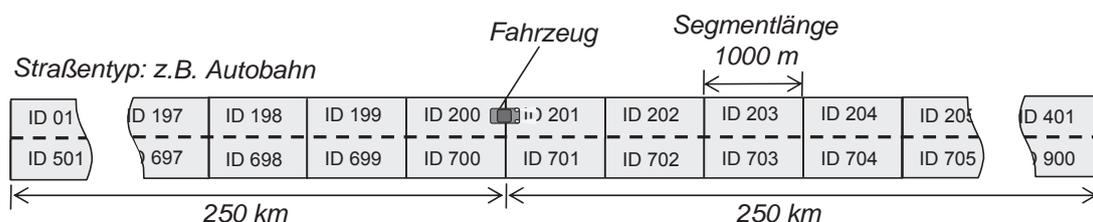


Abbildung 3.4: Aufteilung der Straßensegmente für ein Autobahnscenario

Tabelle 3.2: Größe eines Segmentvektors

Wert	Größe	Beschreibung
\bar{v}_s	9 Bit	Mittlere Geschwindigkeit bis 400km/h
p_s	21 Bit	Segment ID, ggf. 8 Bit Ländercodierung
t_s	17 Bit	Zeitstempel in [hh]:[mm]:[ss]

Das beschriebene Szenario beschränkt sich zunächst auf einen Straßentyp. In der Regel sind aber weitere Straßentypen in Ortsnähe und somit Fahrzeuge auf diesen Straßen in Übertragungreichweite. Um den Inhalt des Datenpakets nicht nur auf Straßensegmente der eigenen Straße zu beschränken, wird in der praktischen Anwendung die Hälfte der verfügbaren Datensätze im Datenpaket für andere Straßentypen verwendet. Von 1000 Datensätzen werden 500 Segmentwerte für Informationen der eigenen Straße und weitere 500 Segmentwerte für andere Straßentypen verwendet.

Das deutsche Straßennetz des überörtlichen Verkehrs beläuft sich auf insgesamt 231.181 km (Stand:2008) [Bas10], hier sind Autobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen und Kreisstraßen eingerechnet. Berücksichtigt man die minimale angegebene Straßensegmentgröße aus Tabelle 3.1 für die Bundesstraße, so lässt sich eine Anzahl von benötigten Segment IDs für das überörtliche Straßennetz abschätzen. Zunächst wird dazu die Größe eines segmentspezifischen Datensatzes in Tabelle 3.2 angegeben.

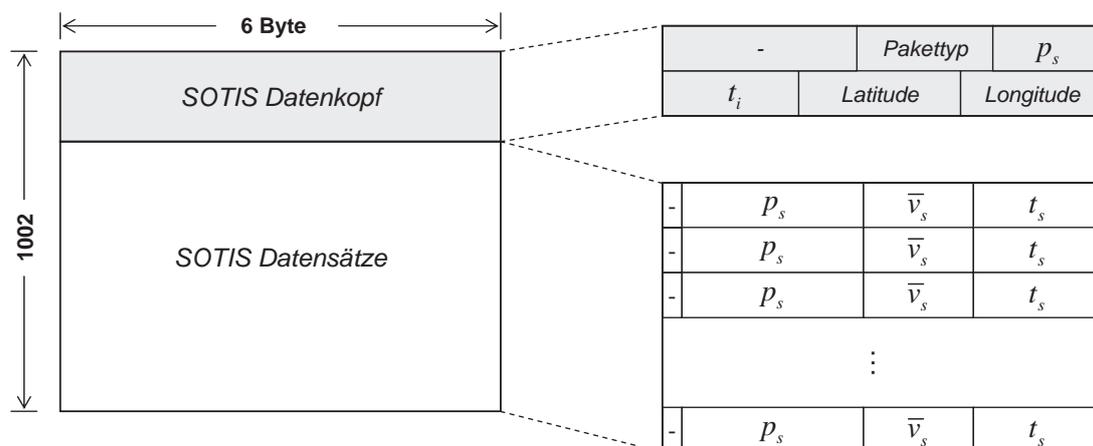
Insgesamt werden also 47 Bit zur Charakterisierung eines Straßensegments benötigt. In einem SOTIS Datenpaket werden 1000 Segmentvektoren übertragen. Dadurch ergibt sich eine Gesamtgröße des Dateninhalts von 5.875 Byte. Die eine Hälfte des Dateninhalts (500 Segmentwerte) wird zur Verbreitung von Geschwindigkeitswerten der Fahrtrichtung und die andere Hälfte (500 Segmentwerte) zur Verbreitung von Geschwindigkeitswerten der Gegenfahrtrichtung verwendet.

Tabelle 3.3: SOTIS Datenkopf

Wert	Größe	Beschreibung
Pakettyp	1 Bit	<i>SOTIS-Emergency</i> oder <i>SOTIS Comfort</i>
Latitude	15 Bit	Für <i>SOTIS-Emergency</i> in [°]
Longitude	16 Bit	Für <i>SOTIS-Emergency</i> in [°]
p_s	21 Bit	Segment ID
t_i	17 Bit	Zeitstempel in [hh]:[mm]:[ss]

Zu dem Inhalt des Datenpakets kommt noch ein Datenkopf (Datenpaket-Header) hinzu. In diesem Datenkopf wird auch die Information bereitgestellt, ob es sich um einen *Emergency Report* handelt. Der Datenkopf wird in Tabelle 3.3 beschrieben. Der Datenkopf hat eine Gesamtgröße von 70 Bit.

Ein Datenpaket als *Emergency Report* beinhaltet im Datenkopf die Information an welchen geographischen Koordinaten sich ein Unfall ereignet hat. Die Werte für Latitude und Longitude sind in einer Zweierkomplement Darstellung codiert. Die Segment ID wird zusätzlich mit im Datenkopf übertragen, weil durch sie eindeutig die Fahrspur definiert ist. Angepasst an eine 48-Bit Verarbeitung wird das SOTIS Datenpaket in Abbildung 3.5 angegeben.

**Abbildung 3.5:** Allgemeine 48-Bit Darstellung eines SOTIS Datenpakets.

Zusammen mit dem Datenkopf ist ein standard SOTIS Datenpaket 6012 Byte groß. Bei Annahme einer Datenrate von 1 MBit/s besitzt das SOTIS Datenpaket eine zeitliche Länge von 48,096 ms.

Der Datenkopf enthält nur im Falle der Aussendung eines *Emergency Report* sinnvolle Werte für Latitude, Longitude, Segment ID und Zeitstempel vom Unfallort. Handelt es sich bei dem Datenpaket um eine *SOTIS-comfort* Nachricht, so befindet sich im Paket-Header nur die Information des Pakettyps, alle anderen Felder beinhalten keine sinnvollen Daten.

3.3 Datenrate und Systembandbreite

In diesem Kapitel wird die SOTIS Datenrate bestimmt. Ganz unterschiedliche physikalische Effekte können die Datenübertragung maßgeblich beeinflussen. Dabei besteht zwischen Sender und Empfänger nicht immer eine direkte Sichtverbindung zur Funkübertragung. Stattdessen wird das Empfangssignal geprägt durch eine mehrfache Überlagerung des Sendesignals, hervorgerufen durch Mehrwegausbreitungen zwischen Sender und Empfänger. Dieses Phänomen wird durch Reflektionen, Beugungen, Abschattung und Streuung des elektromagnetischen Signals an umliegenden Gebäuden, Bäumen oder anderen Objekten hervorgerufen.

Physikalisch lässt sich das empfangene Signal aus einer großen Anzahl von überlagerten Ausbreitungspfaden beschreiben. Jeder dieser Ausbreitungspfade beschreibt die Kopie des gesendeten Signals beaufschlagt mit einer Dämpfung, Verzögerung und Phasenverschiebung am Empfänger. Diese Pfade können sich danach also destruktiv oder konstruktiv überlagern. Wird von einer digitalen Datenübertragung mit pulsformigen Signalen ausgegangen, dann spricht man am Empfänger von einer Pulsaufweitung, hervorgerufen durch die Mehrwegeausbreitung.

Ein weiterer Effekt tritt durch die Bewegung der Fahrzeuge absolut und relativ zueinander auf. Dieser Effekt nennt sich *Doppler-Effekt*, welche eine Trägerfrequenzverschiebung des übertragenen Signals hervorruft. Die Maximale Doppler-

frequenzverschiebung kann durch die maximale Geschwindigkeit der Fahrzeuge untereinander rechnerisch bestimmt werden [Pät02]. Die genannten Eigenschaften des Übertragungskanals werden über die zeitvariante Impulsantwort $h_T(\tau, t)$ eindeutig beschrieben. Im äquivalenten Tiefpassbereich lässt sich die Kanalimpulsantwort wie folgt darstellen [Pät02].

$$h_T(\tau, t) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i(t) \cdot \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (3.7)$$

Hierbei ist $h_i(t)$ die komplexe Amplitude des Signals, welches über einen diskreten Ausbreitungspfad i mit der Verzögerung $\tau_i(t)$ empfangen wurde. Die Standardabweichung σ_τ der Verzögerungspfade auf dem Übertragungskanal gibt Aufschluss darüber, welches frequenzselektive Verhalten der Übertragungskanal besitzt. Die Kohärenzbandbreite B_c ist ein Maß für die Frequenzselektivität des Radiokanals und kann nach [Rap02] wie folgt angegeben werden.

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (3.8)$$

Sie beschreibt, in welchem Frequenzbereich einzelne Frequenzen eine hohe Amplitudenähnlichkeit besitzen (Korrelation) und gibt gleichzeitig Aufschluss darüber, ob Intersymbolinterferenzen (ISI) während der Übertragung auftreten können. In [ZKVS02] wurde über mehrere Messungen, mit unterschiedlichen Antennenlängen, eine Standardabweichung zwischen $\sigma_\tau = 22-88$ ns ermittelt. In städtischen Regionen konnte sogar eine Standardabweichung von bis zu $\sigma_\tau = 420$ ns ermittelt werden. Mit diesen Werten lässt sich die Kohärenzbandbreite B_c berechnen.

$$\begin{aligned} B_c &= 2,3 - 9 \text{ MHz} \quad , \text{ für } \sigma_\tau = 22 - 88 \text{ ns} \\ B_c &= 476,2 \text{ kHz} \quad , \text{ für } \sigma_\tau = 420 \text{ ns} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Tabelle 3.4: Verkehrsdichten φ auf der Autobahn und Bundesstraße nach [Bas10]

Straßentyp	$\bar{\varphi}$	φ_{\max}
Bundesstraße	7,5 Fz/km/Richtung	50 Fz/km/Richtung
Autobahn	21,1 Fz/km/Richtung	80 Fz/km/Richtung

Innerhalb dieser Bandbreiten wird der Übertragungskanal als *flat-Channel* bezeichnet. Liegt die Systembandbreite B_s innerhalb von B_c , also $B_s < B_c$, dann ist kein frequenzselektives Verhalten zu beobachten. Zur Bewertung des Übertragungskanals wird im nächsten Schritt die Systembandbreite von SOTIS ermittelt. Dazu wird die Sendeperiode T_s , die Anzahl von Fahrzeugen in Übertragungsbereichweite und die Datenpaketgröße s_p berücksichtigt. Bei Verwendung eines digitalen Modulationsverfahrens berechnet sich die Systembandbreite durch die benötigte Übertragungsrate. Gleichung (3.10) zeigt den Zusammenhang ohne Berücksichtigung von zusätzlichem Codierungsaufwand.

$$C = N_{\text{tx}} \cdot \frac{s_p}{T_s} \quad (3.10)$$

Die Übertragungsrate C wird in Bit/s angegeben. Über die Verkehrsdichte auf unterschiedlichen Straßentypen wird die Anzahl von Fahrzeugen in Übertragungsbereichweite N_{tx} berechnet. Durch Messungen an unterschiedlichen Straßenabschnitten wird die Anzahl von Fahrzeugen, die diesen Straßenabschnitt in einem gewissen Zeitbereich durchqueren, bestimmt [Bas10]. Bei Annahme einer mittleren Geschwindigkeit, die auf der befahrenen Straße zulässig ist, lässt sich die Verkehrsdichte über alle Fahrspuren berechnen.

Bei Annahme einer mittleren Geschwindigkeit von $\bar{v} = 100$ km/h auf der Autobahn, mit drei Fahrspuren pro Richtung und $\bar{v} = 60$ km/h auf der Bundesstraße, mit zwei Fahrspuren pro Richtung, berechnen sich die Verkehrsdichten wie in Tabelle 3.4 gezeigt.

Mit $\bar{\varphi}$ der mittleren und φ_{\max} der maximalen Verkehrsdichte für einen mittleren bzw. maximalen Verkehrsfluss aus [Bas10].

Das Funk IF besitzt eine Standardeinstellung für eine Sendeleistung mit der Datenpakete in $R = 500$ m Sendereichweite mit ausreichend hohem Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) fehlerfrei empfangen werden können. In einem Radius von 500 m können sich also je nach Verkehrsdichte mehr oder weniger Fahrzeuge aufhalten, die eine Datenübertragung vornehmen. Zur Berechnung der benötigten Datenrate wird die Anzahl von Fahrzeugen N_{tx} in Sendereichweite aus Tabelle 3.4 mit der Sendereichweite von 500 m berechnet. Ein Fahrzeug überträgt die 6012 Byte großen SOTIS Datenpakete periodisch mit einer Sendeperiode von $T_s = 1$ s.

Tabelle 3.5 zeigt die Datenraten für eine mittlere und maximale Verkehrsdichte auf einer Bundesstraße oder Autobahn. Die Systembandbreite B_s wurde anhand einer digitalen 2-fach *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) Modulation, in der 1 Bit pro Modulationssymbol übertragen wird, berechnet. Die Anzahl von Fahrzeugen innerhalb der Sendereichweite berechnet sich mit Tabelle 3.4, wobei für jede Straße eine zusätzliche Gegenfahrbahn berücksichtigt wird. Demzufolge werden durchschnittlich 721.400 Symbole/s für das Szenario auf der Bundesstraße und 2.000.000 Symbole/s für das Szenario auf der Autobahn übertragen. Die Symboldauer berechnet sich für das erste Szenario zu $T = 1,4\mu\text{s}$ und für das zweite Szenario zu $T = 0,5\mu\text{s}$.

Tabelle 3.5: Straßentyp- und verkehrsdichteabhängige Datenrate und Systembandbreite

Straßentyp	\bar{C}	C_{\max}	B_s
Bundesstraße	721,4 kBit/s	4,8 MBit/s	721,4-4800 kHz
Autobahn	2 MBit/s	7,6 MBit/s	2000-7600 kHz

Die berechnete Systembandbreite beruht auf einer Bandbreiteneffizienz von 1 bit/s/Hz.

Die vermessenen Kohärenzbandbreiten $B_c = 2,3 - 9$ MHz und $B_c = 476,2$ kHz aus Gleichung (3.9) werden mit der berechneten Systembandbreite verglichen, um die Charaktereigenschaft des Übertragungskanals zu bewerten. Der Vergleich zwischen Kohärenzbandbreite und Systembandbreite zeigt für die Autobahn $B_s > B_c$ ($B_c = 2,3$ MHz) und für die Bundesstraße $B_s > B_c$ ($B_c = 476,2$ kHz). In beiden Fällen wird der Übertragungskanal ein frequenzselektives Verhalten besitzen. Eine Datenentzerrung am Empfänger wird somit notwendig.

Im Weiteren wird für SOTIS von einer maximalen Datenrate, wie in Tabelle 3.5 angegeben, zur Berechnung der erforderlichen SOTIS Datenrate und Systembandbreite in Tabelle 3.6 ausgegangen.

Tabelle 3.6: SOTIS Datenrate und Systembandbreite für eine 2-fach GFSK Modulation

C_{SOTIS}	B_{SOTIS}
7,6 MBit/s	7600 kHz

Die Werte wurden anhand einer Sendereichweite von $R = 500$ m und einer Verkehrsdichte auf einer Autobahn mit $\varphi_{\text{max}} = 80$ Fz/km/Richtung berechnet.

3.4 SOTIS Informationsverbreitung

Jedes Fahrzeug überträgt Datenpakete mit einer Sendeperiode T_s . Empfängt ein Fahrzeug ein Datenpaket von einem anderen Fahrzeug, werden die Datensätze $d_s(i)$ aus dem empfangenen Datenpaket segmentspezifisch aggregiert und im SOTIS Datenspeicher hinterlegt. Jedes individuelle Fahrzeug führt dieses Verfahren, nach Empfang eines neuen Datenpakets, durch. Da die segmentspezifischen Datensätze im Datenspeicher anhand neuer gemessener oder empfangener Werte kontinuierlich aktualisiert werden, ändert sich auch der Inhalt des nächsten übertragenen Datenpakets mit der Aktualisierung der Werte.

Der Inhalt des Datenpakets wird zur einen Hälfte zur Verbreitung der Verkehrsdaten der befahrenen Straße genutzt, während die andere Hälfte für Datensätze von anderen Straßen genutzt wird. Also werden von 1000 Segmenten im Datenpaket 500 Segmente für die eigene und die Gegenfahrtrichtung genutzt. In Abbildung 3.6 werden die Segmente markiert, welche sich in dem Datenpaket befinden. Während das Fahrzeug sich auf der Straße fortbewegt, bleibt die Anzahl der Straßenabschnitte im Datenpaket konstant. Allerdings ändern sich die Segment IDs der zu verbreitenden Datensätze $d_s(i)$ anhand des Standortes des Fahrzeugs auf der Straße.

Jedes Fahrzeug bestimmt anhand seiner Navigationsdaten auf welchem Segment es sich gerade befindet und errechnet daraus die 125 zu verwendenden Segmente die hinter und vor dem Fahrzeug liegen. Die Datensätze dieser Segmente werden für beide Fahrtrichtungen in das Datenpaket integriert.

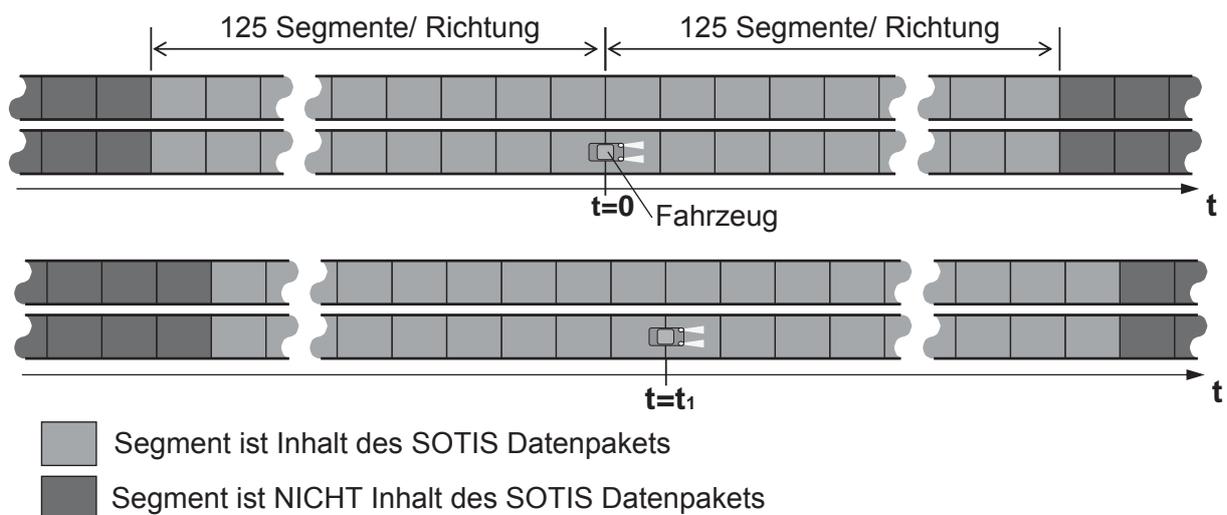


Abbildung 3.6: Inhalt des SOTIS Datenpakets über Standortbestimmung

Gleichung (3.11) zeigt die zeitliche Veränderung des Inhalts eines SOTIS Datenpakets. Hier beschreibt jede Zeile den momentanen Inhalt, zu diskreten Zeitpunkten $t = t_n$, des Datenpakets mit 250 Datensätzen für eine Fahrtrichtung. Für dieses Beispiel sei angenommen, dass pro Zeiteinheit t_n das Fahrzeug einen gesamten Straßenabschnitt durchfährt. Hier charakterisiert die Segment ID p_s jeweils ein Datensatz, bestehend aus Segment ID, mittlerer Geschwindigkeit

\bar{v}_s und Zeitstempel t_s . Negative Segment ID Nummern sind Segmente, die in Fahrtrichtung hinter dem Fahrzeug liegen.

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{t} = \mathbf{0} \\
 \mathbf{t} = \mathbf{t}_1 \\
 \mathbf{t} = \mathbf{t}_2 \\
 \vdots \\
 \mathbf{t} = \mathbf{t}_{250}
 \end{array}
 \left[\begin{array}{cccccccc}
 p_{125} & p_{124} & p_{123} & \cdots & p_1 & p_{-1} & p_{-2} & \cdots & p_{-125} \\
 p_{126} & p_{125} & p_{124} & \cdots & p_2 & p_1 & p_{-1} & \cdots & p_{-124} \\
 p_{127} & p_{126} & p_{125} & \cdots & p_3 & p_2 & p_1 & \cdots & p_{-123} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 p_{375} & p_{374} & p_{372} & \cdots & p_{250} & p_{249} & p_{248} & \cdots & p_{125}
 \end{array} \right] \quad (3.11)$$

Der Inhalt des SOTIS Datenpakets verschiebt sich anhand der Fortbewegung des Fahrzeugs über die Segmente. Nach 250 Zeitschritten befindet sich der Segmentdatensatz p_{125} als letztes Element im Datenpaket. Wenn die Segmentlänge z.B. $l_s = 1000$ m beträgt, kann ein Fahrzeug Verkehrsdaten, aufgenommen in 100 km Entfernung, über die doppelte Fahrstrecke (also 250 km) transportieren und an andere Fahrzeuge übertragen. Dieses vorteilhafte Prinzip der Datenverbreitung soll anhand von Abbildung 3.7 verdeutlicht werden.

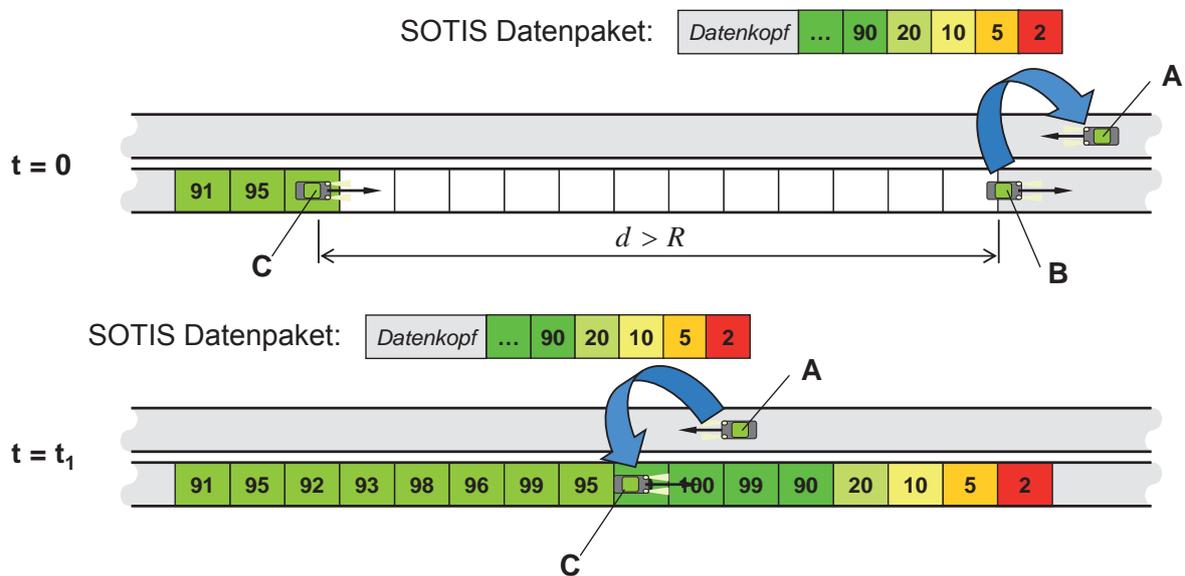


Abbildung 3.7: Prinzipielle Darstellung der SOTIS Datenpaketverbreitung.

Abbildung 3.7 wird aus Sicht von Fahrzeug C aus beschrieben. Das SOTIS Datenpaket besteht aus einem Datenkopf (*Header*) und dem Inhalt. In Abbildung 3.7 wird für jeden Straßenabschnitt nur die mittlere Geschwindigkeit ge-

zeigt, der Datensatz besteht allerdings immer aus Segment ID, mittlerer Geschwindigkeit und Zeitstempel.

Fahrzeug B und Fahrzeug C befinden sich in einem Abstand $d > R$, mit der Sendereichweite R , zueinander. Somit kann Fahrzeug C kein SOTIS Datenpaket von Fahrzeug B empfangen. Deswegen sind dem Fahrzeug C bisher keine Verkehrsinformationen zu den Straßenabschnitten, die vor dem Fahrzeug liegen, bekannt. Fahrzeug B hat auf seiner Fahrt durch die Strecke $|d|$ Verkehrsinformationen gesammelt und verschickt ein SOTIS Datenpaket, welches Fahrzeug A auf der gegenüberliegenden Fahrbahn empfängt. Segmentweise aggregiert Fahrzeug A die empfangenen Datensätze und integriert die aktualisierten Geschwindigkeitswerte in ein SOTIS Datenpaket. Zum Zeitpunkt $t = t_1$ treten Fahrzeug A und C in Kommunikationsreichweite, und Fahrzeug C empfängt ein Datenpaket von Fahrzeug A. In diesem Moment erhält Fahrzeug C die von Fahrzeug B aufgenommenen Verkehrsdaten über die vorliegenden Straßensegmente. Diese Informationen geben Fahrzeug C Auskunft darüber, welche aktuelle Verkehrslage vor dem Fahrzeug besteht.

Dadurch, dass SOTIS Datenpakete auch über mehrere Fahrspuren hinweg empfangen werden, können Datensätze entgegen der Fahrtrichtung der anderen Fahrzeuge transportiert werden. Dieser Verbreitungsmechanismus ist ein großer Vorteil der SOTIS Kommunikation, weil Informationen nicht nur lokal in einem Sendebereich von anderen Fahrzeugen empfangen werden, sondern dass die Information über den Sendebereich hinaus transportiert und verbreitet wird.

3.4.1 Informationsreichweite

Jedes übertragene SOTIS Datenpaket kann von mehreren Funkknoten empfangen werden. Die Datensätze im Datenpaket werden individuell in jedem Fahrzeug aggregiert und anschließend gespeichert, siehe Abschnitt 3.2.2. Dadurch besitzen immer mehrere Funkknoten gleiche oder ähnliche Informationen zu einem Straßenabschnitt. Die Information wird also nicht wie bei *Multi-hop Ad Hoc* Netzwerken nur von einem Funkknoten unverändert verbreitet, sondern mehrere

SOTIS Funkknoten versenden Teile der im Datenspeicher liegenden Informationen.

Wenn die Verkehrsinformationen in Richtung des nachfolgenden Verkehrs verbreitet werden, können Kommunikationslücken durch SOTIS Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn überbrückt werden. Betrachtet man hierfür eine Straße mit Fahrbahn und Gegenfahrbahn, auf der ein Fahrzeug N_s Straßensegmente in seinem Datenpaket versendet, dann kann die Informationsreichweite R_{info} eines Datensatzes $d_s(i)$ nach Gleichung (3.12) bestimmt werden.

$$R \ll R_{\text{info}} \leq l_s \cdot \frac{N_s}{2} \quad (3.12)$$

Die Informationsreichweite ist also immer wesentlich größer als die lokale Sendereichweite R , [Ebn05]. Der Faktor $(N_s/2)$ wird hier berücksichtigt, weil eine Straße immer aus zwei Fahrtrichtungen besteht, und somit nur die Hälfte der Anzahl von Straßenabschnitten zur Berechnung der Informationsreichweite beiträgt. Es werden also von den 1000 Segmenten in einem Datenpaket, siehe Abschnitt 3.2.3, die Hälfte der Segmente für die eigene Straße verwendet. Die Informationsreichweite wird also nur durch die Datenpaketgröße bzw. Bandbreite der physikalischen Funkschnittstelle limitiert. Bei den *Emergency Reports* wird im Datenkopf die Position eines Unfallorts integriert. Diese Nachrichten können beliebig weit transportiert werden, weil sie nicht an einen Datensatz im Inhalt des Datenpakets gebunden sind. Dadurch können diese Notfallberichte auch zu Notfallstationen bzw. Notdiensten, über die in Gleichung (3.12) definierte Informationsreichweite hinweg, weitergeleitet werden.

3.4.2 Entfernungabhängige Nachrichtenverzögerung

Zur Bewertung des Fahrzeug-zu-Fahrzeug basierten Verkehrsinformationssystems werden die zeitlichen Verzögerungen τ_{sotis} , mit der ein Segmentwert empfangen wird, betrachtet. Wenn d die Entfernung zwischen Fahrzeug und Ort des generierten Datensatzes ist, dann beschreibt τ_{sotis} die Verzögerung bis zum Erhalt

des Segmentwertes am Ort des Fahrzeugs. Somit beschreibt τ_{sotis} auch das zeitliche Alter eines aufgezeichneten Segmentdatensatzes $d_s(i)$. In [Wis07] wurde gezeigt, dass die mittlere zeitliche Verzögerung $\bar{\tau}_{\text{sotis}}$ bei der SOTIS Datenkommunikation linear mit der Entfernung zwischen den Funkknoten ansteigt. Nach Gleichung (3.13) wird die mittlere entfernungsabhängige Verzögerung bestimmt [Wis07].

$$\bar{\tau}_{\text{sotis}} \approx d \cdot \frac{\bar{T}_{\text{mhop}} + \bar{T}_{\text{gap}}}{\bar{T}_{\text{mhop}} \cdot \bar{v}_{\text{mhop}} + \bar{T}_{\text{gap}} \cdot \bar{v}} \quad (3.13)$$

Die mittlere Zeit \bar{T}_{mhop} , die benötigt wird, um ein SOTIS Datenpaket über eine *Multi-hop*¹ Fahrzeugkette weiterzuleiten. Sie setzt sich zusammen aus der mittleren Anzahl von Fahrzeugen (*hops*) \bar{n}_{mhop} in der Fahrzeugkette und der mittleren Latenzzeit $\bar{\tau}_{\text{hop}}$ zwischen zwei Fahrzeugen [Wis07]. In Gleichung (3.14) ist die mittlere *Multi-hop* Verzögerung angegeben.

$$\bar{T}_{\text{mhop}} = \bar{n}_{\text{mhop}} \cdot \bar{\tau}_{\text{hop}} \quad (3.14)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit \bar{v}_{mhop} einer SOTIS Nachricht innerhalb einer *Multi-hop* Fahrzeugkette ist abhängig von der Position der Fahrzeuge und der Anzahl von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn. Wenn der Abstand der Fahrzeuge zueinander auf beiden Fahrtrichtungen größer als die Sendereichweite R wird, dann entsteht eine Kommunikationslücke. Die mittlere Zeit die benötigt wird, um diese Lücke zu schließen, wird mit \bar{T}_{gap} bezeichnet. Sie kann über die mittlere Relativgeschwindigkeit $2\bar{v}$ der Fahrzeuge auf den gegenüberliegenden Fahrtrichtungen approximiert werden [Wis07]. Die mittlere Zeitlücke ist in Gleichung (3.15) angegeben.

$$\bar{T}_{\text{gap}} \approx \frac{1}{\bar{v} \cdot N_{\text{Richtung}} \beta \varphi} \quad (3.15)$$

¹Der Begriff *Multi-hop* findet eigentlich nur Anwendung unter *Ad-Hoc* Netzwerken, wurde hier aber zur Herleitung der SOTIS Verzögerungen herangezogen.

Hier bezeichnet β die SOTIS Ausstattungsrate, N_{Richtung} die Anzahl der Fahrrichtungen und φ die Verkehrsdichte pro Fahrrichtung. Abbildung 3.8 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Zeitbereiche. Vom Zeitpunkt t_0 aus gesehen geht \bar{T}_{mhop} über den zeitlichen Abstand der Fahrzeugkette hinaus, da zum Empfang eines Datenpakets die Sendereichweite R des letzten Fahrzeugs, welches in Richtung der Informationsausbreitung fährt, berücksichtigt werden muss.

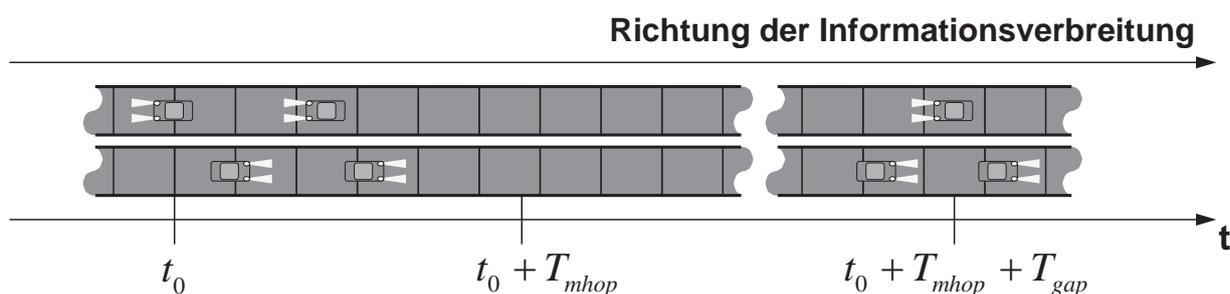


Abbildung 3.8: Verzögerungen in der Weiterleitung einer SOTIS Nachricht

Die SOTIS Ausstattungsrate β und die Verkehrsdichte φ bestimmen wesentlich die Dauer der Zeitverzögerung über der Entfernung. Zur Herleitung der zeitlichen Verzögerung in Gleichung (3.13) werden zwei Ansätze berücksichtigt. In [Ebn05] wurde die entfernungsabhängige Verzögerung bei *Multihop-Ad-Hoc* Netzen berechnet. Dazu wurde eine Fahrspur mit räumlich verteilten Fahrzeugen betrachtet. Die Verzögerungen bei der Verbreitung der Informationen bestimmt sich hauptsächlich durch die Latenzzeit bei der Weiterleitung der Datenpakete. Die Anzahl von *Hops* zwischen den einzelnen Funkknoten bestimmt dann die Gesamtverzögerung über der Entfernung.

In [Wis07] wurde das Modell zur Berechnung der Verzögerungen auf zwei Fahrrichtungen erweitert. Einerseits wird die Latenzzeit bei der Weiterleitung über mehrere *Hops* berücksichtigt, und andererseits geht in die Berechnung auch der Informationstransport über die andere Fahrrichtung ein. Die Verzögerung aus Gleichung (3.15) berücksichtigt somit, wann Fahrzeuge nicht in Kommunikationsreichweite stehen und wie lange es dauert, die Kommunikationslücke zu schließen. Die Fahrzeuge auf der gegenüberliegenden Straßenseite übernehmen den Transport der Informationen entgegen der Fahrtrichtung der Fahrzeuge der

anderen Fahrspur. Abbildung 3.9 zeigt die mittleren Zeitverzögerungen $\bar{\tau}_{\text{SOTIS}}$ aus Gleichung (3.13) für unterschiedliche Ausstattungsraten über der Entfernung d . Verwendet wurden eine mittlere Geschwindigkeit von $\bar{v} = 120$ km/h, eine Verkehrsdichte $\varphi = 7,5$ Fz/km/Richtung und eine Sendereichweite von $R = 1000$ m.

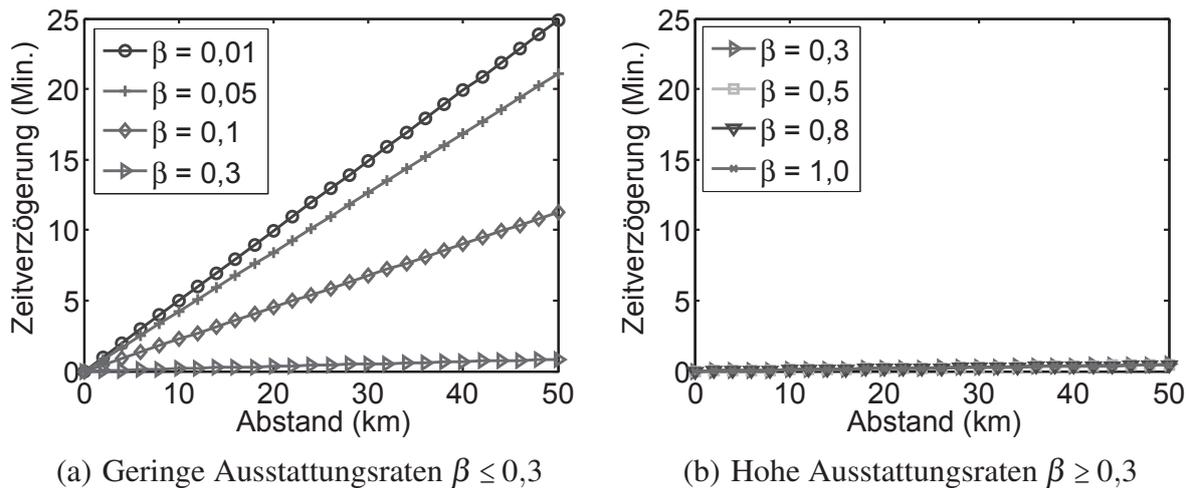


Abbildung 3.9: Entfernungsabhängige Nachrichtenverzögerung

In Abbildung 3.9(a) wird die Verzögerung für Ausstattungsraten von $\beta \leq 0,3$ gezeigt. Wenn 1 % der Fahrzeuge ausgestattet sind, ergibt sich eine Verzögerung von 25 Minuten für eine Verkehrsnachricht, die in 50 km Entfernung aufgenommen wurde. Für Ausstattungsraten von 30 % liegt die Verzögerung nur noch bei 50 Sekunden, wie auch Abbildung 3.9(b) zeigt. Für eine Ausstattungsrate von 100 % werden Informationen, die in 50 km generiert wurden, mit einer Verzögerung von nur noch 28 Sekunden empfangen. Bei diesen hohen Ausstattungsraten wird die Verzögerung der Information hauptsächlich von der Verkehrsdichte bestimmt und nicht mehr von der Verteilung der SOTIS Fahrzeuge.

In dieser Herleitung wurde eine ideale Kommunikation vorausgesetzt, d.h. jedes Fahrzeug hat eine unbegrenzte Übertragungsbandbreite zur Verfügung, die Übertragung ist immer fehlerfrei und es treten keine Paketkollisionen auf. Eine Bewertung der entfernungsabhängigen Nachrichtenverzögerungen unter realistischeren Bedingungen wird in Kapitel 6 näher untersucht.

3.4.3 Verkehrsdichteabhängige Nachrichtenverzögerung

In Abschnitt 3.4.2 wurde gezeigt, dass eine räumlich entfernte Verkehrsnachricht mit einer zeitlichen Verzögerung, welche sich linear über der Entfernung verhält, empfangen wird. Dabei wurde eine konstante Verkehrsdichte φ und Sendereichweite R zugrunde gelegt.

Abbildung 3.10 zeigt die verkehrsdichteabhängigen Nachrichtenverzögerungen für eine konstante Entfernung von $d = 50$ km, einer mittleren Geschwindigkeit $\bar{v} = 120$ km/h und $\tau_{\text{hop}} = 500$ ms. In Abbildung 3.10(a) werden unterschiedliche Sendereichweiten R bei konstanter Ausstattungsrate betrachtet. In Abbildung 3.10(b) werden unterschiedliche Ausstattungsraten β bei konstanter Sendereichweite betrachtet. Die Verkehrsdichte in Abbildung 3.10 ist setzt sich zusammen aus der Summe von Fahrzeugen über zwei Fahrtrichtungen mit jeweils einer Fahrspur.

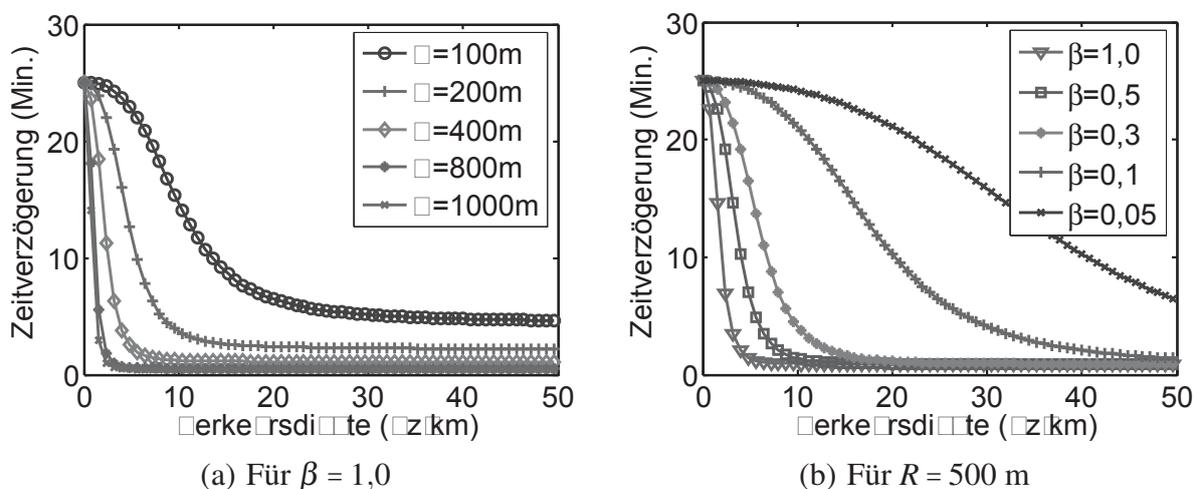


Abbildung 3.10: Verkehrsdichteabhängige Nachrichtenverzögerungen

Für sehr geringe Verkehrsdichten $\varphi \rightarrow 0$ wird die Verzögerung durch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt [Wis07], denn $\bar{T}_{\text{mhop}} \approx 0$ und somit folgt $\bar{\tau}_{\text{sotis}} \approx \frac{d}{\bar{v}}$. Abbildung 3.10(a) zeigt die zeitlichen Verzögerungen bei einer SOTIS Fahrzeugausstattungsrate von 100% ($\beta = 1,0$). Hier werden die Verzögerungen für unterschiedliche Sendereichweiten R verglichen.

Für hohe Verkehrsdichten $\varphi > 30$ Fz/km (für eine Autobahn mit 3 Fahrspuren in jede Richtung entspricht dies: $\varphi > 5$ Fz/km/Spur) zeigt sich eine konstante Verzögerung für alle Sendereichweiten $R \geq 100$ m, unabhängig von der Verkehrsdichte. Für die unterschiedlichen Sendereichweiten ergibt sich aber ein Verzögerungsoffset, der hauptsächlich durch die Latenzzeit $\bar{\tau}_{\text{hop}}$ zwischen zwei Fahrzeugen entsteht. Für diesen Fall ist die mittlere Verzögerung $\bar{\tau}_{\text{SOTIS}} = d \cdot \bar{\tau}_{\text{hop}}/R$, [Wis07].

3.5 Simulationsergebnisse

Für den *Network Simulator*² ns-2 wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, um das SOTIS-Verfahren in einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation zu simulieren. Die Simulation berücksichtigt ein Verkehrsmodell mit Bewegungen von Fahrzeugen nach dem *Cellular Automaton* Modell [SS93]. Die Verkehrsdichte und Anordnung der Fahrzeuge nach einer Exponentialverteilung wurde gemäß Kapitel 5 realistisch nachgebildet. Einige wichtige Simulationsparameter sind in Gleichung (3.7) aufgeführt.

Tabelle 3.7: Parameter zur SOTIS Simulation

Parameter	Wert
Reichweite R	300 m
Reichweite R_{CS}	600 m
mittlere Geschw. \bar{v}	55 km/h
Sendeperiode T_s	1 s

3.5.1 Geringe Kanalbelegung

Bei geringer Verkehrsdichte und SOTIS Ausstattungsrate wird der Radiokanal nur sehr gering belastet. Nur wenige Fahrzeuge übertragen SOTIS Datenpakete

²Simulationsumgebung zur Simulation von Kommunikationsnetzwerken, <http://isi.edu/nsnam/ns/>

und tragen so zum Verkehrsinformationssystem bei. Unter Abschnitt 3.4.2 wurde die zeitliche Verzögerung, mit der SOTIS Datensätze aus größerer Entfernung empfangen werden, analytisch hergeleitet. Für geringe Ausstattungsraten $\beta < 0,1$ liegt die mittlere zeitliche Verzögerung, mit der ein Datensatz aus 50 km Entfernung empfangen wird, im Minutenbereich.

Simuliert wird eine Straße bestehend aus vier Fahrspuren mit zwei Fahrtrichtungen. Die SOTIS Datenpakete beinhalten für die Simulation nur Datensätze von Straßenabschnitten, der Segmentlänge $l_s = 500$ m, dieser Straße. Zur Bewertung, wie viel Fahrzeuge sich in Übertragungsreichweite zueinander aufhalten, wird die Kanalbelegung in Tabelle 3.8 für jedes Szenario berechnet. Die Herleitung der Kanalbelegung G wird in Abschnitt 6.1.1 gezeigt. Die Kanalbelegung steht nicht immer in einem linearen Verhältnis zur Kanalauslastung.

Tabelle 3.8: Simulationsszenarien

Ausstattungsrate β	Verkehrsfluss q	Kanalbelegung G
0,02	3140 Fz/h/Richtung	0,02
0,05	3140 Fz/h/Richtung	0,05
0,1	3140 Fz/h/Richtung	0,1
0,02	2200 Fz/h/Richtung	0,01
0,05	2200 Fz/h/Richtung	0,03
0,1	2200 Fz/h/Richtung	0,07
0,02	1750 Fz/h/Richtung	0,01
0,05	1750 Fz/h/Richtung	0,03
0,1	1750 Fz/h/Richtung	0,05

Für alle drei Szenarien in Tabelle 3.8 ergibt sich aufgrund der niedrigen Ausstattungsrate β eine niedrige Kanalbelegung G . Über den Verkehrsfluss kann die Anzahl der simulierten Fahrzeuge berechnet werden, so ist z.B. ein Verkehrsfluss von $q = 3140$ Fz/h/Richtung zurückzuführen auf eine Verkehrsdichte von $\varphi = 30$ Fz/km/Richtung, wenn die mittlere Geschwindigkeit 105 km/h beträgt.

Da es sich bei dem Szenario um 2 Fahrspuren handelt, befinden sich somit in dem genannten Beispiel ≈ 15 Fz/km/Richtung/Spur auf der Straße.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 3.11, Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 gezeigt. Ausgewertet wurden die Zeitstempel t_s aus den Datensätzen d_s und die entfernungsabhängige Verzögerung daraus berechnet. Die Ergebnisse aus den Simulationen bestätigen die analytischen Herleitungen der in Gleichung (3.13) beschriebenen SOTIS Verzögerungen.

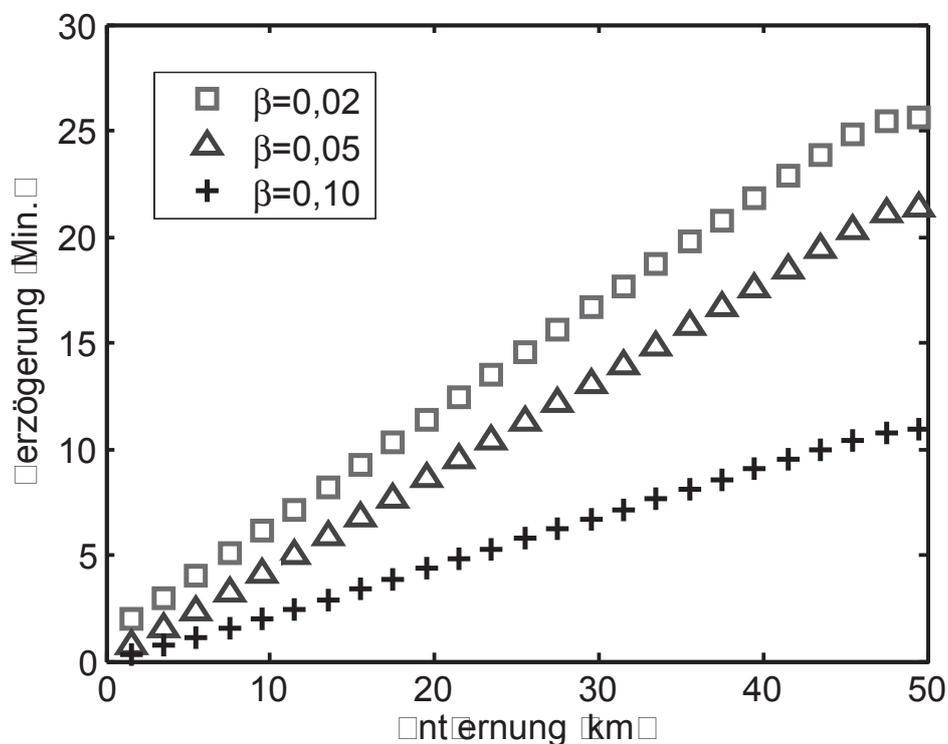


Abbildung 3.11: SOTIS Verzögerungen bei einem Verkehrsfluss $q = 1750$ Fz/h/Richtung

Abbildung 3.11 zeigt, dass Datensätze von Straßenabschnitten aus 50 km Entfernung und einer Ausstattungsrate von 2 % mit einer Verzögerung von 26 Minuten empfangen werden. Bei geringen Ausstattungsraten werden die entfernungsabhängigen Verzögerungen hauptsächlich durch die Zeitlücken \bar{T}_{gap} zwischen Fahrzeugen auf den entgegengesetzten Fahrtrichtungen beeinflusst. Hier trägt die relative Fahrzeuggeschwindigkeit und die Anzahl der Fahrzeuge auf der Straße

dazu bei, ob die im SOTIS-Verfahren auftretenden Verzögerungen hoch oder niedrig ausfallen.

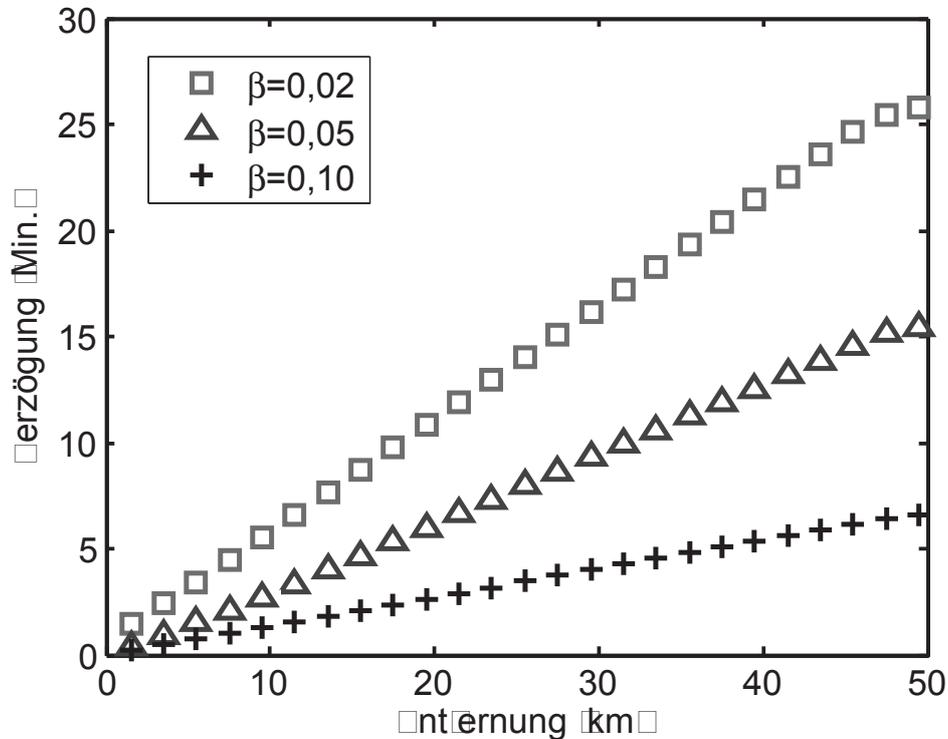


Abbildung 3.12: SOTIS Verzögerungen bei einem Verkehrsfluss $q = 2200$ Fz/h/Richtung

In Abbildung 3.11 wird für eine Ausstattungsrate von 10 % eine mittlere entfernungsabhängige Verzögerung von 11 Minuten, für Datensätze aus 50 km Entfernung, erzielt. Bei einer Verdopplung des Verkehrsflusses auf 3140 Fz/h/Richtung in Abbildung 3.13 ergibt sich eine doppelt so hohe Kanalbelegung. Datensätze aus 50 km Entfernung werden hier nur noch mit einer Verzögerung von 2 Minuten empfangen.

In allen drei Fällen zeigt sich, dass die Kanalbelegung einen wesentlichen Einfluss auf die Verzögerungszeiten nimmt. Steigt die Kanalbelegung, so können die SOTIS Datenpakete von mehreren Fahrzeugen empfangen und transportiert werden. Für größere Ausstattungsraten und hohe Verkehrsdichten sinkt die Verzögerungszeit über der Entfernung.

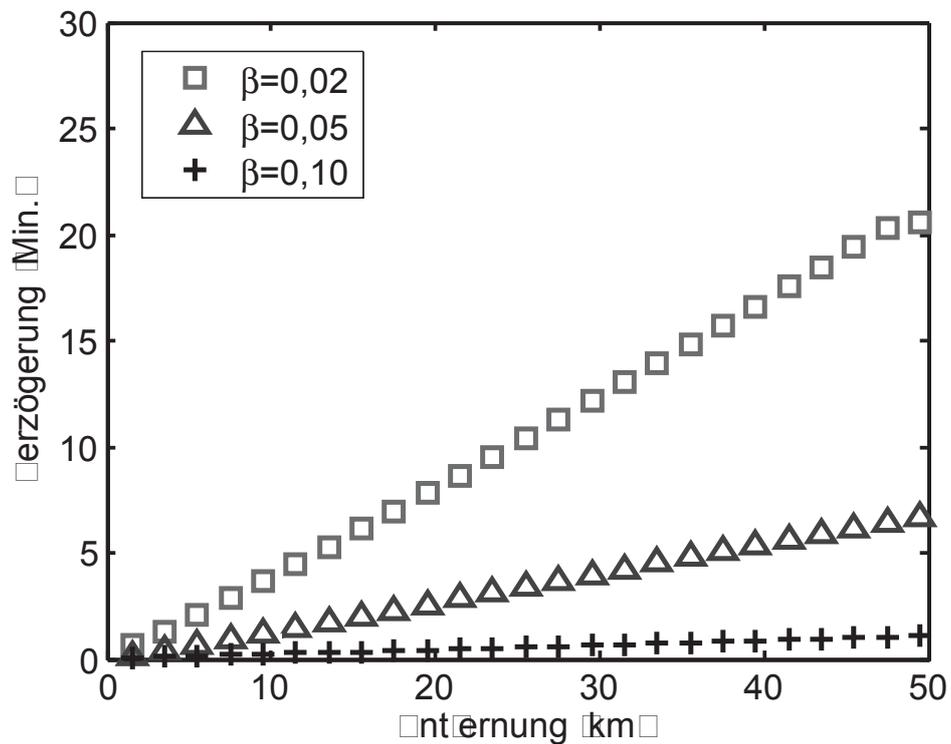


Abbildung 3.13: SOTIS Verzögerungen bei einem Verkehrsfluss $q = 3140$ Fz/h/Richtung

Für geringe Kanalbelegungen $G \ll 1$ wird der Radiokanal nur sehr gering ausgelastet und Paketskollisionen treten nur sehr selten auf. Bei höheren Kanalbelegungen müssen entsprechende Kanalzugriffsverfahren entwickelt werden, siehe Abschnitt 4.4.2.

IV

Signalausbreitung und Kanalzugriffsverfahren

Der Radiokanal limitiert die Leistungsfähigkeit eines drahtlosen Kommunikationssystems. Der Übertragungspfad zwischen Sender und Empfänger kann sehr unterschiedlich sein und variiert von einer Sichtverbindung bis hin zu Abschattungen durch Gebäude, Berge oder Bäume. In Städten z.B. sorgt eine hohe Gebäudedichte und die Höhe der Gebäude für Beugungsverluste des elektromagnetischen Signals. Ebenso wird sich dieser Übertragungskanal durch mobiles Verhalten der Fahrzeuge ständig ändern und somit einen zufälligen Charakter annehmen. Basierend auf Messungen und Einführungen von Statistiken lässt sich der Übertragungskanal dennoch näherungsweise modellieren.

Die Kanalzugriffsschicht (MAC) in einem Kommunikationsprotokoll hat die Aufgabe, die Funkübertragung zwischen Fahrzeugen zu koordinieren. Bei optimaler Koordination treten keine Datenkollisionen auf. Gesucht wird ein Kanalzugriffsverfahren, welches die selbstorganisierenden Eigenschaften des SOTIS Systems optimal unterstützt. Dazu werden zunächst unterschiedliche Kanalzugriffsverfahren, die den Zugriff zentral oder dezentral regeln, gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften miteinander verglichen.

4.1 Signalausbreitung

Im Wesentlichen treten zwei Effekte bei der Ausbreitung eines elektromagnetischen Signals auf dem drahtlosen Radiokanal auf. Diese Effekte werden als *large-scale* und *small-scale* bzw. *fading* bezeichnet [Rap02]. Zunächst wird

der Fokus zur Modellierung des Radiokanals auf langsam veränderliche (*large-scale*) Effekte gelegt. In diesem Modell lässt sich die mittlere Empfangsleistung zwischen einem Sender und Empfänger modellieren. Diese gibt Aufschluss über den möglichen Abdeckungsbereich, in dem ein Funkknoten ein Datenpaket mit ausreichend hoher Leistung empfangen kann. Für diese Modellierung wird eine größere Entfernung zwischen Sender und Empfänger, von mehreren hundert oder tausend Metern, vorausgesetzt. Schnell veränderliche (*small-scale fading*) Effekte auf die Empfangsleistung treten über sehr kurze Bewegungsabstände ein, werden aber für die weitere Untersuchung nicht betrachtet.

Zunächst werden zwei Ausbreitungsmodelle unter der Randbedingung, dass Sender und Empfänger in direktem Sichtkontakt zueinander stehen, dargestellt. Dabei handelt es sich einerseits um das Modell zur Freiraumausbreitung und andererseits um das Boden-Reflexionsmodell [Rap02]. Das Modell zur Freiraumausbreitung eignet sich zur Modellierung des Übertragungskanals für Boden-zu-Satelliten Kommunikation oder Amateurfunk. Für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation reicht diese einfache Modellierung oft nicht aus, weil es selbst bei einer freien Sichtverbindung zwischen den Fahrzeugen zu Signalreflexionen an Hauswänden oder Straßen kommen kann. Diese Ausbreitungseigenschaften lassen sich in einem Pfaddämpfungsmodell mit variablem Dämpfungskoeffizienten modellhaft beschreiben.

4.1.1 Boden-Reflexionsmodell

Das Boden-Reflexionsmodell berücksichtigt für die Ausbreitung eines drahtlosen Radiosignals einen Ansatz über die geometrische Optik. Der Abstand zwischen Sender und Empfängerstation ist durch d definiert. Es wird sowohl ein direkter- als auch ein am Boden reflektierter Pfad zwischen Sender und Empfänger in diesem Modell berücksichtigt. Während für das Modell der Freiraumausbreitung die Sendeleistung mit der quadratischen Entfernung zwischen Sender und Empfänger abnimmt, berechnet sich die Pfaddämpfung P_L für das Boden-Reflexionsmodell nach [Rap02] mit der Abnahme über der vierten Potenz. Die

Überlagerungen der elektromagnetischen Wellen aus dem reflektierten und direkten Ausbreitungspfad liefert die Empfangsleistung.

$$P_L = 10 \cdot \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4}\right) \quad (4.1)$$

Die Empfangsleistung nimmt demnach mit einer Rate von 40 [dB/dec.] ab. Die Gleichung (4.1) ist solange gültig, wie der Abstand $d > (20\pi h_t h_r)/3\lambda$ ist, sonst gilt die Freiraumausbreitung [Rap02]. Die Sendeantennenhöhe h_t und die Empfängerantennenhöhe h_r werden genauso berücksichtigt wie der Antennengewinn $G_{t,r}$ am Sender und Empfänger. Um eine allgemeine Aussage über die Qualität der Kommunikationsverbindung zu treffen, ist es sinnvoll, ein Pfaddämpfungsmodell mit einem variablen Dämpfungskoeffizienten n_d einzuführen. Durch Messungen lassen sich dann für die Pfaddämpfungsmodelle die Dämpfungskoeffizienten n_d für unterschiedliche physikalische Ausbreitungsbedingungen bestimmen.

4.1.2 Pfaddämpfungsmodelle

Ausgehend von der Freiraumausbreitung lässt sich die Pfaddämpfung für einen direkten Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger angeben:

$$P_L[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}\right) \quad (4.2)$$

Mit der Wellenlänge λ und dem Systemverlustfaktor L , der zur weiteren Betrachtung $L = 1$ gesetzt wird. Für den Fall $d = 0$ würde die Empfangsleistung P_r in Gleichung (4.2) und Gleichung (4.1) unendlich groß werden, welches physikalisch nicht möglich ist. Hierfür wird ein minimaler Abstand d_0 definiert, der größer als der Beginn des Fernfeldes d_f sein soll und somit nicht Null werden kann [Rap02]. Der Fernfeldabstand (auch Fraunhofer Region genannt) lautet $d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$ und ist definiert mit den Randbedingungen $d_f \gg D$, $d_f \gg \lambda$ und der

größten physikalischen Antennenausdehnung D . Gleichung (4.2) wird nun mit d_0 erweitert.

$$P_L = \underbrace{\frac{(4\pi)^2 d_0^2 L}{G_t G_r \lambda^2}}_{P_{L0}} \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \quad \text{mit } d \geq d_0 \geq d_f \quad (4.3)$$

Der Faktor P_{L0} lässt sich anhand von Feldmessungen bestimmen. Mit Gleichung (4.3) lässt sich nun die allgemeine Pfaddämpfung bestimmen. Dies führt auf das *Log-distance* Pfaddämpfungsmodell [Rap02] mit dem Koeffizienten n_d . Für die Freiraumausbreitung ist $n_d = 2$ und die allgemeine Schreibweise ist in Gleichung (4.4) dargestellt.

$$P_L = P_{L0} \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_d} \quad (4.4)$$

oder: $P_L[\text{dB}] = P_{L0}[\text{dB}] + 10 \cdot n_d \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$

Der Koeffizient n_d variiert mit der Umgebung. In [ZKVS02] wurden Dämpfungskoeffizienten für unterschiedliche Sendeantennenkonfigurationen bestimmt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Tabelle 4.1 gezeigt.

Tabelle 4.1: Pfaddämpfungskoeffizienten n_d in unterschiedlichen Umgebungen

Umgebung	<i>LOS</i>	<i>NLOS</i>
städtisch	1,4 - 3,5	2,8 - 5,8
vorstädtisch	2,5	3,4
ländlich	3,3	5,9

Für eine direkte Sichtverbindung *Line-of-Sight* (LOS) zwischen zwei Funkknoten oder für nicht direkten Sichtkontakt *no-Line-of-Sight* (NLOS).

Das Modell in Gleichung (4.4) berücksichtigt aber noch nicht mögliche Störun-

gen, hervorgerufen z.B. durch Gebäude oder andere Fahrzeuge zwischen Sender und Empfänger mit derselben Entfernung, aber unterschiedlicher Position. Dies kann zu unterschiedlichen Empfangsleistungen führen und sollte bei einer Modellierung des Radiokanals berücksichtigt werden.

Eine Zufallsvariable ξ modelliert die veränderliche Pfaddämpfung für gleichgroße Abstände d zwischen Sender und Empfänger. Diese Modellerweiterung wird als *log-normal shadowing* Modell bezeichnet [Rap02] und die Pfaddämpfung P_L berechnet nach Gleichung (4.5).

$$P_L = P_{L0} \cdot \xi \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_d} \quad (4.5)$$

$$\text{oder: } P_L[\text{dB}] = P_{L0}[\text{dB}] + 10 \cdot n_d \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma[\text{dB}]$$

Die mittelwertfreie Zufallsvariable $\chi_\sigma[\text{dB}] = 10 \log(\xi)$ ist normalverteilt, [Rap02], mit der Standardabweichung $\sigma[\text{dB}]$. Über eine Vielzahl von Fahrzeugpositionen mit festen Abständen d_s treten auf diesen Ausbreitungspfaden unterschiedliche Dämpfungs- oder Verstärkungsfaktoren ein. Dieses wird als *Shadowing* Effekt bezeichnet. Die gewählte Standardabweichung σ der Normalverteilung beschreibt diesen Effekt. In [WR05a] wurde für den städtischen Bereich eine Kanalmessung im 3,5 GHz Bereich durchgeführt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung für die Standardabweichung σ der Zufallsvariable χ_σ und der Pfaddämpfungskoeffizient n_d sind in Gleichung (4.6) dargestellt.

$$\sigma = 7,5 \text{ dB} \quad \text{und} \quad n_d = 4,3 \quad (4.6)$$

In [PKC⁺09] wurde eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kanalmessung im 5,2 GHz Bereich auf einer Autobahn durchgeführt. Für den Systemaufbau wurde ein Mehrantennensystem bestehend aus jeweils vier Antennen für das Sende- und Emp-

fängerfahrzeug verwendet. Der ermittelte Pfaddämpfungskoeffizient und die Standardabweichung werden in Gleichung (4.7) gezeigt.

$$\sigma = 3,3 \text{ dB} \quad \text{und} \quad n_d = 1,8 \quad (4.7)$$

4.1.3 Sendereichweite

Die Sendereichweite R eines Funkknotens hängt von der verwendeten Sendeleistung P_t , dem Einfluss des Übertragungskanals und der Empfängerempfindlichkeit ab. Zur Vorhersage der mittleren Empfangsleistung bei einem gegebenen Sender-Empfängerabstand werden die *Large-Scale* Effekte ausgewertet. Hierfür wurden in Abschnitt 4.1.1 das Boden-Reflexion und in Abschnitt 4.1.2 das *log-normal shadowing* Pfaddämpfungsmodell beschrieben.

In Computersimulationen wird die Sendereichweite R , mit der ein Datenpaket über eine bestimmte Distanz d fehlerfrei empfangen werden kann, verwendet. Für das *log-normal shadowing* und Boden-Reflexions Modell wird mit Gleichung (4.5) bzw. Gleichung (4.1) für eine Sendeleistung P_t ein Leistungsgrenzwert P_r zu einer bestimmten Entfernung d berechnet. Dieser Grenzwert beschreibt die Leistung, die erforderlich ist, um ein Datenpaket über eine maximale Entfernung d zu empfangen. Für beide Modelle zeigt Abbildung 4.1 die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Datenpaket über eine Entfernung d fehlerfrei empfangen wird. Vorausgesetzt wurde eine Sendereichweite von $R = d = 1000$ m.

Abbildung 4.1 zeigt die Empfangswahrscheinlichkeit für die Parameter $\sigma = 7,5$ dB und $n = 4,3$. Unter der Voraussetzung eines ausreichend hohen Signal-zu-Interferenz Verhältnisses $(\frac{S}{I})_{\min}$ wird für das Boden-Reflexionsmodell ein Datenpaket innerhalb der Entfernung $d = 1000$ m mit 100%-Wahrscheinlichkeit empfangen. Für das *log-normal shadowing* Modell mit den Parametern nach Gleichung (4.6) wird ein Datenpaket mit einer Wahrscheinlichkeit von $P > 0,5$ innerhalb von $R = 1000$ m fehlerfrei empfangen. Das Modell berücksichtigt,

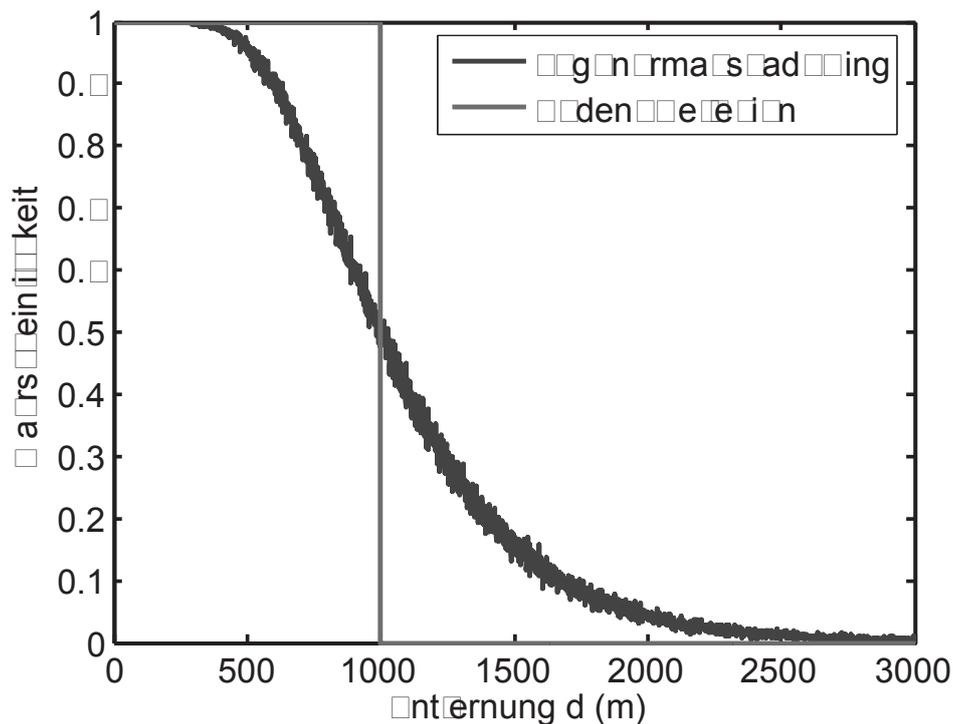


Abbildung 4.1: Wahrscheinlichkeit für den fehlerfreien Empfang eines Datenpakets

dass mit einer Wahrscheinlichkeit von $P < 0,5$ ein Datenpaket für Entfernungen $R > 1000$ m ebenfalls fehlerfrei empfangen werden kann.

Unter der Verwendung des CSMA/CA Kanalzugriffsprotokolls wird eine Sendereichweite R und eine *carrier-sense* Reichweite R_{cs} definiert. Korrespondiert die Empfangsleistung P_r beim Boden-Reflexionsmodell zu einer Entfernung $R < d < R_{cs}$, dann kann ein Fahrzeug die Übertragung eines Datenpakets anhand der Empfangsleistung messen, aber nicht fehlerfrei empfangen. Typischerweise wird für die *carrier-sense* Reichweite die doppelte Sendereichweite verwendet [YV05], d.h. $R_{cs} = 2 \cdot R$.

Die Nutzung von WLAN (z.B. IEEE802.11b) im 2,4 GHz Bereich wurde lange Zeit als Option für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation gesehen. Untersuchungen in [GG05] haben gezeigt, dass für ein Standard-WLAN Funkmodul in ländlichen Gebieten Sendereichweiten von mehr als $R = 400$ m erreicht werden können.

4.1.4 Signal-zu-Interferenzverhältnis

Ein weiterer Effekt, welcher nicht direkt die Kommunikationsreichweite beeinflusst, aber die Zuverlässigkeit der Datenübertragung, ist das gleichzeitige Aussenden von Datenpaketen mehrerer Fahrzeuge in Kommunikations- bzw. *carrier-sense* Reichweite. In diesem Fall kann es zu Paketkollisionen kommen und einen damit verbundenen Informationsverlust eines oder beider Datenpakete. Ein Fahrzeug kann also ein Datenpaket fehlerfrei empfangen, wenn es sich in der Kommunikationsreichweite des sendenden Fahrzeugs aufhält und das Signal-zu-Interferenzverhältnis (SIR) ausreichend hoch ist.

Ein SIR Grenzwert ist nicht einheitlich festzulegen, weil zur erfolgreichen Decodierung eines Datenpakets auch die Codierung und die Empfängerempfindlichkeit mit in die Berechnung eingeht. Für die weitere Untersuchung sei mindestens ein Signal-zu-Interferenzverhältnis $(S_I/I_I)_{min}$ zur fehlerfreien Decodierung gefordert.

Die Berechnung des SIR in [Ann99] wurde für die Freiraumausbreitung vorgenommen. Die Verallgemeinerung des SIR, unter Berücksichtigung von Abschnitt 4.1.2, lässt sich dann über den Pfaddämpfungskoeffizienten n_d angeben. In Abbildung 4.2 sind zwei Fahrzeuge gezeigt, welche im Abstand d_{sender} und $d_{stör}$ zu einem dritten Fahrzeug stehen. Die Fahrzeuge auf der unteren Fahrspur befinden sich nicht in der *carrier-sense* Reichweite zueinander und es sei angenommen, dass beide Fahrzeuge zeitgleich eine Datenübertragung vornehmen. Das Fahrzeug, welches diese Nachricht empfängt, befindet sich auf der oberen Fahrspur, zwischen den beiden sendenden Fahrzeugen.

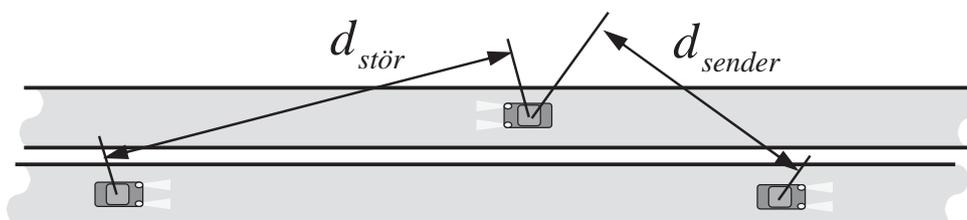


Abbildung 4.2: Konstellation zwischen Störsender- und Nutzsendersignal.

Am Ort des Fahrzeugs, welches die Datenpakete empfängt, werden die Leistungspegel des Sender- und Störsignals ins Verhältnis gesetzt, um den SIR Wert zu bestimmen. Mit dem *log-normal shadowing* Modell aus Abschnitt 4.1.2 bestimmt sich dann der SIR Wert nach Gleichung (4.8).

$$\left(\frac{S_l}{I_l}\right)_{min} [\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{t,sender}}{P_{t,stör}}\right) + 10 \cdot n_d \cdot \log\left(\frac{d_{stör}}{d_{sender}}\right) + \beta_\sigma \quad (4.8)$$

Die Sendeleistung $P_{t,sender}$ des Fahrzeugs mit dem Abstand d_{sender} und der Sendeleistung $P_{t,stör}$ des Fahrzeugs mit dem Abstand $d_{stör}$ zum Empfänger. Die neue Zufallsvariable β_σ setzt sich aus zwei Zufallsvariablen zusammen, so dass $\beta_\sigma = \chi_{\sigma,stör} - \chi_{\sigma,sender}$. Beide Zufallsvariablen $\chi_{\sigma,stör}$ und $\chi_{\sigma,sender}$ folgen einer mittelwertfreien Normalverteilung und sind stochastisch unabhängig. Mit $\sigma_{stör} = \sigma_{sender} = \sigma$ berechnet sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Zufallsvariablen β_σ mit dem Ansatz aus [Pap91].

$$f_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(z+y) \cdot f_y(y) dy \quad (4.9)$$

Mit $z = \beta_\sigma$, $x = \chi_{\sigma,stör}$ und $y = \chi_{\sigma,sender}$. Durch Einsetzen der Wahrscheinlichkeitsdichten von $\chi_{\sigma,stör}$ und $\chi_{\sigma,sender}$ in Gleichung (4.9) berechnet sich die Wahrscheinlichkeitsdichte $f_z(z)$ der Zufallsvariablen β_σ nach Gleichung (4.10).

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \quad (4.10)$$

Gleichung (4.10) zeigt, dass die neue Zufallsvariable β_σ wieder eine normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichte besitzt. Die Standardabweichung ist um den Faktor $\sqrt{2}$ gestreckt, so dass $\sigma_\beta = \sqrt{2}\sigma$. In Abbildung 4.3 wird das benötigte Signal-zu-Interferenzverhältnis $(S_l/I_l)_{min}$ [dB] für unterschiedliche Abstandsverhältnisse $d_{stör}/d_{sender}$ gezeigt.

In Abbildung 4.3 wurde bei gleicher Sendeleistung der Fahrzeuge eine Standardabweichung von $\sigma = 7,5$ dB und ein Pfaddämpfungskoeffizient von $n_d =$

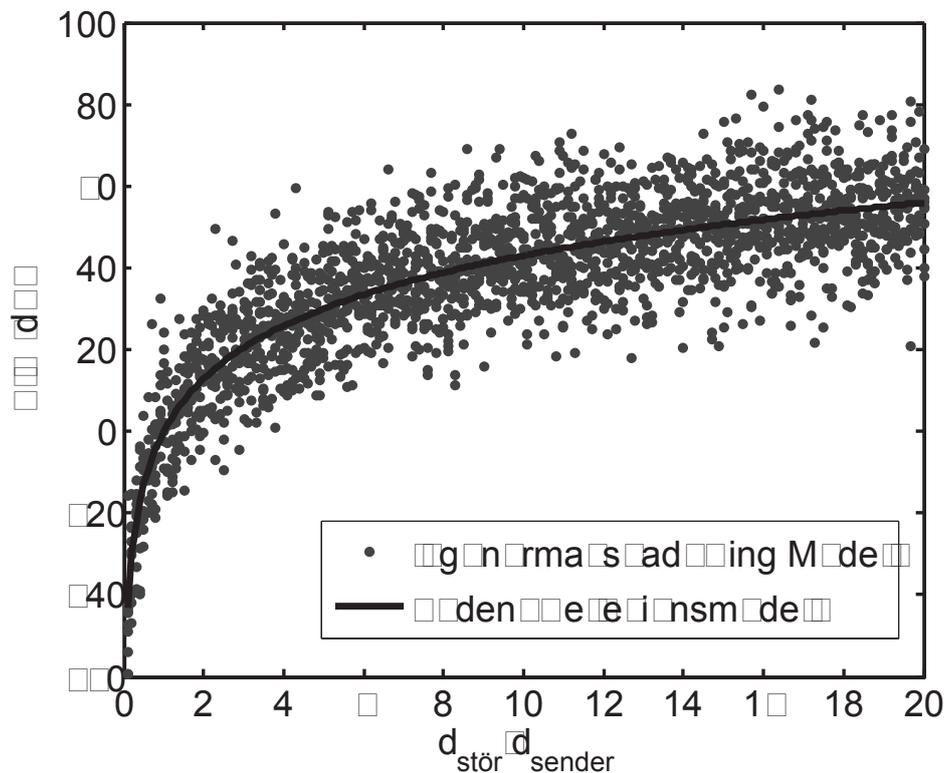


Abbildung 4.3: Signal-zu-Interferenzverhältnis

4,3 für den städtischen Bereich verwendet. Unter Annahme eines Boden-Reflexionsmodells sei z.B. ein Signal-zu-Interferenzverhältnis von 20 dB zur fehlerfreien Decodierung eines Datenpakets erforderlich. So ergibt sich mit den oben genannten Parametern ein Entfernungsverhältnis von $d_{\text{stör}}/d_{\text{sender}} \approx 3$. Also muss zur fehlerfreien Decodierung ein Störsender mindestens 3 mal so weit entfernt sein wie ein parallel aussendendes Fahrzeug. Hingegen können beim *log-normal shadowing* Modell auch Situationen auftreten, in denen ein Entfernungsverhältnis von z.B. $d_{\text{stör}}/d_{\text{sender}} \approx 14$ noch nicht ausreicht, um ein Signal-zu-Interferenzverhältnis von 20dB zu erreichen.

4.2 Kanalzugriffsverfahren

Bei einer drahtlosen Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation müssen die vorhandenen Ressourcen des Übertragungskanal zwischen vielen Teilnehmern auf-

geteilt werden. Damit ein Fahrzeug ein Datenpaket fehlerfrei übertragen kann, muss der Zugriff auf den Radiokanal zwischen den Fahrzeugen koordiniert werden. Bei einem dezentralen Kanalzugriffsverfahren koordiniert jedes einzelne Fahrzeug individuell sein Übertragungsverhalten. Bei einem zentralen Kanalzugriffsverfahren koordiniert eine zentrale Basisstation den Zugriff der Teilnehmer untereinander.

Durch die hohe Mobilität der Fahrzeuge wird eine Überwachung des Radiokanals erschwert. Dadurch, dass Fahrzeuge ständig den Übertragungsbereich zwischeneinander verlassen und eintreten, bewirkt dies eine zeitlich variable Kanalbelegung.

Man unterscheidet zwischen zwei Kanalzugriffsarten, den kanalvermittelnden und den paketvermittelnden Zugriff.

4.3 Zentral geregelt

Bei einem kanalvermittelnden Zugriff unterscheidet man zwischen dem *Time Division Multiple Access* (TDMA), *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), *Code Division Multiple Access* (CDMA) und dem *Space Division Multiple Access* (SDMA) Verfahren.

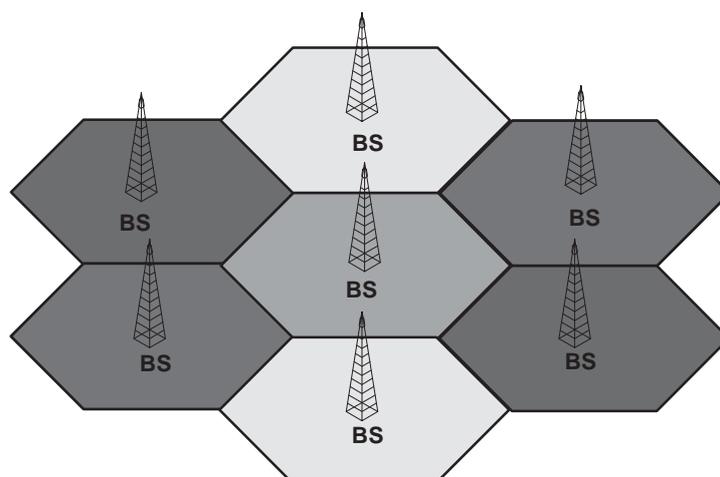


Abbildung 4.4: Zellulares Kanalzugriffssystem

Diese Verfahren kommen in klassischen zellularen Kommunikationsstrukturen zum Einsatz und koordinieren den Kanalzugriff über eine zentrale Überwachungseinheit [Cou07]. In Abbildung 4.4 wird ein zellulares Mobilfunksystem gezeigt. Dabei werden räumlich benachbarte Funkzellen von ca. 2 km Größe oder kleiner definiert. Jede Funkzelle besitzt eine Basisstation (BS), die den Kanalzugriff steuert.

Prinzipiell ist der Einsatz eines kanalvermittelnden Zugriffsverfahrens auch für ein dezentrales Kommunikationssystem einsetzbar. Die Nachteile und Schwierigkeiten, die bei einer dezentralen Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation auftreten, werden in den folgenden Abschnitten herausgestellt. Es wird gezeigt, dass kanalvermittelnde Zugriffsverfahren die dezentralen und selbstorganisierenden Eigenschaften von SOTIS nicht erfüllen können.

4.3.1 TDMA

Beim *Time Division Multiple Access* (TDMA) Verfahren werden Datenpakete der einzelnen Fahrzeuge zeitlich nacheinander über den Radiokanal übertragen. Dazu werden gleich lange Zeitschlitze definiert, die ein einzelner Teilnehmer exklusiv belegen darf. Während der zeitlichen Dauer der Übertragung steht dem Teilnehmer die gesamte Frequenzbandbreite zur Verfügung. Zur Koordination/ Reservierung der Zeitschlitzbelegung ist eine Synchronisation zwischen den Teilnehmern erforderlich, damit nicht mehr als ein Fahrzeug zu einem gewissen Zeitpunkt ein Datenpaket überträgt. Für eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist ein Reservierungsverfahren nur in dezentraler Form möglich. Aufgrund der hohen Mobilität und den ständig wechselnden Kommunikationspartnern ist eine robuste dezentrale Reservierung von Zeitschlitzen aufwendig zu realisieren. Dies verletzt die geforderte Adaptivität und Robustheit im SOTIS-Verfahren und ist deswegen auszuschließen.

In [EWR04] und [ERLH02] werden Ergebnisse einer dezentralen Synchronisation für Ad-Hoc Netzwerke diskutiert. In [Ebn05] wird ein auf TDMA Basis erweitertes Reservierungsprotokoll untersucht.

4.3.2 FDMA

Beim *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) Verfahren wird die zur Verfügung stehende Bandbreite in schmale Frequenzbänder aufgeteilt. Jeder Teilnehmer kann seine Daten über ein schmales Frequenzband übertragen. Hierfür moduliert jeder Teilnehmer seine Nutzsignale auf verschiedene Trägerfrequenzen f_1, \dots, f_N , entsprechend der Anzahl der zur Verfügung stehenden Schmalbandkanäle. Der Empfänger trennt die empfangenen Daten durch ein entsprechendes Filter für ein Frequenzband ΔB . Die Empfänger sind also Einträgersysteme und benötigen die Information, welches Frequenzband ein Teilnehmer zur Übertragung genutzt hat. Aufgrund der hohen Mobilität sind Frequenzbandsynchronisationen aufwendig zu realisieren und bedeuten auch einen zusätzlichen *Overhead* zu den Nutzdaten. Durch die hohe Anzahl von Teilnehmern wäre auch eine Vielzahl von Schmalbandkanälen nötig, um einen Kanalzugriff zu gewährleisten. Um einen zuverlässigen Kanalzugriff mit FDMA zu gewährleisten, müsste eine zentrale Koordinatorstation die Vergabe und Synchronisation der Frequenzbänder verwalten. Dieser Ansatz steht aber im Gegensatz zur dezentralen Koordination und Robustheit gegenüber Ausfällen. Anders verhalten sich Zugriffsverfahren in Multiträgersystemen wie z.B. (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) OFDM-FDMA, denn hier werden die Frequenzbänder parallel verarbeitet. Das Thema Zugriffsverfahren für OFDM Multiträgersysteme wird in [Grü00] diskutiert.

4.3.3 CDMA

Beim *Code Division Multiple Access* (CDMA) Verfahren können die Teilnehmer das gesamte Frequenzspektrum und einen beliebigen Zeitraum für die Datenübertragung nutzen. Parallele Übertragungen werden durch Hinzufügen einer Codesequenz zum Sendesignal möglich. Durch Multiplikation des Sendesignals mit einer paarweise orthogonalen Codesequenz, z.B. Walsh-Codes, können die parallel empfangenen Signale über Korrelationsverfahren teilnehmerspezifisch wieder voneinander getrennt werden. Bei ungestörter Übertragung lassen sich

beliebig viele Nutzschnale übertragen, während es unter dem Einfluss eines frequenzselektiven Kanals zum Verlust der orthogonalen Eigenschaften des Sendesignals kommen kann. Die Korrelation am Empfänger benötigt eine genaue Zeitsynchronisation zwischen den Teilnehmern, welches zu einem Daten-*Overhead* führt. Aufgrund der hohen Mobilität eines Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerkes lässt sich eine Synchronität der Fahrzeuge untereinander in Sendereichweite nicht realisieren. Hinzu kommt, dass in einem CDMA System eine schnelle und genaue Regelung der Sendeleistung der Teilnehmer benötigt wird, um eine möglichst gleich große Leistung der Signale am Empfänger zu erreichen. Da in einem selbstorganisierenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk die Teilnehmer sich untereinander “nicht kennen”, muss also jeder Teilnehmer zum Empfang einer Nachricht den Decodieralgorithmus für jeden einzelnen Nutzer parallel laufen lassen. Hierfür wird eine hohe Rechenkapazität von jedem Teilnehmer benötigt.

4.3.4 SDMA

Das *Space Division Multiple Access* (SDMA) Verfahren ist ein räumliches Zugriffsverfahren, in dem über ein Antennenarray fokussierende *Beams* ausgebildet werden. Das SDMA Verfahren ist mit jedem anderen Vielfachzugriffsverfahren wie TDMA, FDMA oder CDMA kombinierbar. Es basiert auf der Ortsinformation eines Teilnehmers und weist den Kanalzugriff anhand des Aufenthaltsortes eines Teilnehmers zu. Durch Energiebündelung (*Beam*) lässt sich eine Funkübertragung in eine bestimmte räumliche Richtung vornehmen. Durch die Antennenrichtcharakteristik können Teilnehmer parallel auf dem selben Frequenzkanal senden, während auf der Empfängerseite die Signale aus unterschiedlichen Richtungen empfangen werden. Dieses Verfahren lässt sich für die selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation nicht realisieren. Aufgrund der hohen Mobilität der Fahrzeuge lässt sich eine adaptive *Beam*-Einstellung nur schwer erreichen. Zwei wesentliche Punkte der Selbstorganisation werden durch ein SDMA Verfahren verletzt. Einerseits ist die Adaptivität nicht gegeben und andererseits verletzt es die Zuverlässigkeit des Systems. Dadurch, dass das SDMA Verfahren eine gerichtete Funkkommunikation realisiert, können die übertragenen

Daten nicht von allen Funkknoten in der Kommunikationsreichweite empfangen und verarbeitet werden. In [BV01] wird SDMA in einem Ad-Hoc Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk untersucht. Da SDMA auf die Ortsinformation des Senders und Empfängers angewiesen ist, verliert das System seine Robustheit sobald diese Information fehlerhaft ist oder fehlt.

4.4 Dezentral geregelt

Bei einem paketvermittelnden Zugriff wird hier zwischen dem *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) Verfahren und dem *ALOHA* Verfahren unterschieden. Diese Verfahren wurden für dezentrale Systeme, in denen jeder Teilnehmer sein Übertragungsverhalten individuell steuert, entwickelt. Es stehen keine festen räumlich benachbarte Funkzellen zur Verfügung. Bei dezentralen Kanalzugriffverfahren steuert das Fahrzeug den Zugriff innerhalb seiner Kommunikationsreichweite, welche durch die Empfängerempfindlichkeit des Funk IF festgelegt ist.

4.4.1 ALOHA

Zur ersten Realisierung einer drahtlosen Datenkommunikation wurde das ALOHA Zugriffsprotokoll in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt. Es war das erste System, welches für eine *broadcast* Kommunikation eingesetzt wurde [KT75]. Beim grundlegenden ALOHA Protokoll [Abr70] kann jedes Fahrzeug jederzeit ein Datenpaket senden. Es findet keinerlei Synchronisation zu dem Sendeverhalten der anderen Fahrzeuge statt. Das beschriebene ALOHA Protokoll verwendet Empfangsbestätigungen, um den Sender über den Erfolg der Datenübertragung zu informieren. Dazu wird vom Empfängerfunknoten bei erfolgreichem Empfang des Datenpakets eine Bestätigungsinformation (*Acknowledge*) an den Sendefunknoten zurück übertragen. Empfängt der Sendeknoten keine Empfangsbestätigung, so vermutet der Sendeknoten eine Datenkollision und überträgt erneut dasselbe Datenpaket. Dieses ALOHA Protokoll

ist gut geeignet für Systeme mit sehr geringer Kanalauslastung, weil unter diesen Umständen sehr selten Datenkollisionen auftreten.

In Abbildung 4.5 werden drei Fahrzeuge betrachtet, die über ein ALOHA Zugriffsverfahren ein Datenpaket übertragen. Jedes Datenpaket besitzt eine zeitliche Länge T mit der Ausbreitungsverzögerung τ zwischen Sender- und Empfängerfahrzeug.

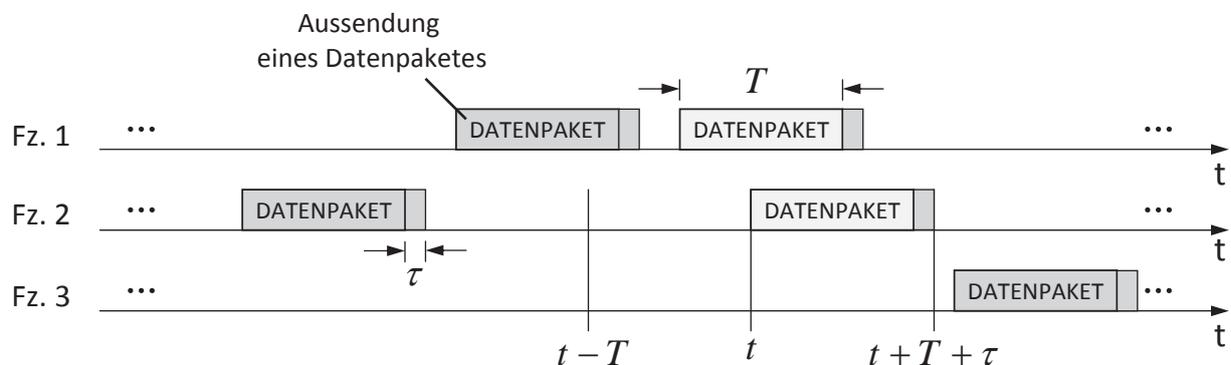


Abbildung 4.5: Kanalzugriff nach dem ALOHA Verfahren

Findet während der zeitlichen Dauer $2 \cdot T + \tau$ keine weitere Datenübertragung statt, so kann das Datenpaket kollisionsfrei übertragen werden. Deswegen wird die Dauer $2 \cdot T + \tau$ auch als kritische Periode bezeichnet. Abbildung 4.5 zeigt zwei Datenpakete, die während der kritischen Periode übertragen wurden, die miteinander kollidieren und somit nicht mehr fehlerfrei empfangen werden können.

In der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation werden keine Empfangsbestätigungen übertragen, weil jedes gesendete Datenpaket an mehrere Teilnehmer gerichtet ist. Die Kanalauslastung ist im allgemeinen sehr hoch, weil sehr viele Fahrzeuge Datenpakete periodisch übertragen. Das ALOHA Verfahren ist für die selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation nicht geeignet, weil zu viele Datenkollisionen auftreten würden.

4.4.2 CSMA/CA

Das häufigste verwendete Kanalzugriffsverfahren basiert auf dem IEEE 802.11 Standard für drahtlose und lokale Netze [IEE99]. Dieser Standard verwendet ein *Carrier Sense Multiple Access (CSMA) Zugriffsverfahren mit collision avoidance (CA)*. Im Gegensatz zu ALOHA werden Datenpakete nicht völlig unkoordiniert übertragen. Bei CSMA/CA Verfahren werden Datenkollisionen stark reduziert indem jedes Fahrzeug die Kanalbelegung, über die Sendeleistungen anderer Fahrzeuge, misst und solange die eigene Datenübertragung zurückstellt, bis der Radiokanal wieder unbelegt ist. Ein Fahrzeug kann den Radiokanal bis zu einer gewissen Empfangsreichweite vermessen. Dieser Bereich wird *carrier-sense* Reichweite genannt.

Im Gegensatz zu einem TDMA Verfahren werden keine festen Zeitschlitze zum Versenden von Datenpaketen vorgegeben, sondern über ein Zufallsverfahren einzelne Zeitbereiche für die Datenübertragung belegt. Der IEEE 802.11 Standard stellt zwei verschiedene Zugriffsmodi zur Verfügung, die *Distributed Coordination Function (DCF)* und die *Point Coordination Function (PCF)*. Der DCF Modus wird für einen dezentralen Kanalzugriff verwendet. Abbildung 4.6 zeigt ein Szenario bestehend aus drei Fahrzeugen, die eine Datenübertragung vornehmen.

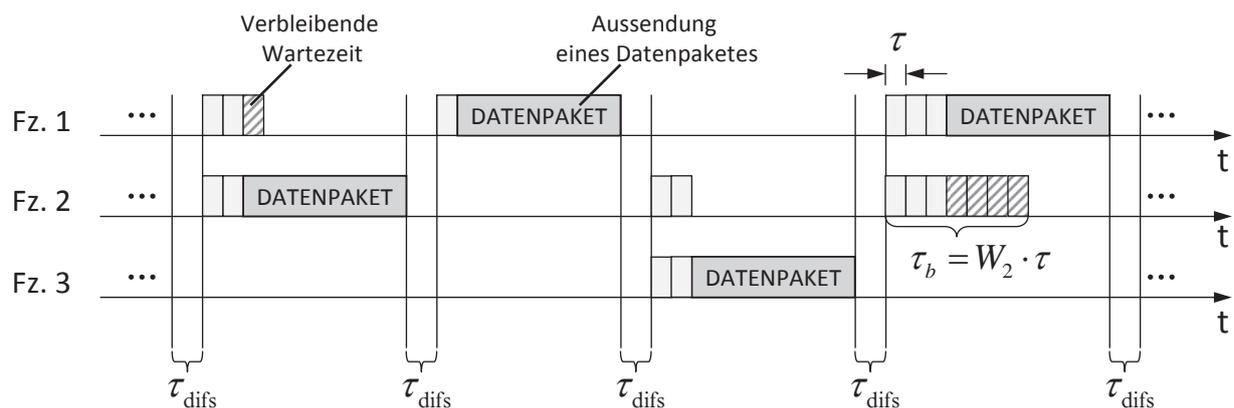


Abbildung 4.6: Kanalzugriff nach dem CSMA/CA Verfahren

Bevor ein Datenpaket übertragen wird, muss das sendende Fahrzeug die Länge eines *Distributed Inter Frame Space (DIFS)* abwarten. Das Zeitintervall τ_{difs} dient

als Schutzintervall zur Vermeidung von Paketüberlappungen. Da die *carrier-sense* Reichweite R_{cs} eines Funkknoten in der Regel doppelt so groß ist wie die Sendereichweite R , wird $\tau_{\text{difs}} = 2 \cdot \tau$ gewählt. Hier ist τ die maximal auftretende Verzögerung zwischen Sender und Empfänger.

Ist das Medium für eine zeitliche Dauer von mindestens τ_{difs} frei, kann ein Teilnehmer ohne Wettbewerb auf den Kanal zugreifen und ein Datenpaket übertragen. Findet ein Teilnehmer nach Ablauf der Dauer τ_{difs} einen belegten Radiokanal vor, wird ein zufälliges Zeitintervall τ_b berechnet. Die Berechnungsvorschrift erfolgt nach Gleichung (4.11) und wird als *Random-Backoff* bezeichnet.

$$\tau_b = W_i \cdot \tau_s \quad (4.11)$$

Die gleichverteilte Zufallszahl W_i wird aus einem Intervall $[1, \dots, 2^{i-1} \cdot c_w]$ berechnet. Das aktuelle Wettbewerbsfenster c_w (*Contention Window*) hat einen festen Wert $c_w = 31$. Der laufende Parameter i gibt die i -te Verlängerung des Wettbewerbsfenster an. Das Wettbewerbsfenster wird immer dann verlängert, wenn nach Ablauf der zufälligen Wartezeit der Radiokanal als belegt erkannt wurde. Ein *Backoff*-Zeitschlitz wird durch die Länge $\tau_s = \tau$ definiert.

Verbleibt der Radiokanal während des Herunterzählens der Wartezeit τ_b unbelegt, dann kann der Teilnehmer nach Ablauf von τ_b auf den Kanal zugreifen und ein Datenpaket übertragen. Wird der Kanal während der Wartezeit von einem anderen Teilnehmer belegt, wird die Wartezeit pausiert. Nach Empfang des Datenpakets startet das Zeitintervall τ_{difs} erneut, worauf die verbliebene *Backoff*-Wartezeit folgt.

Wählt man die Dauer eines Zeitschlitzes zu $\tau_s = 1 \mu s$, dann erreicht das Zeitintervall mit $c_w = 31$ einen maximalen Wert von $\tau_b = 31 \mu s$. Bei einer Datenrate von $C = 1 \text{ MBit/s}$ und einer SOTIS Datenpaketlänge von $48,096 \text{ ms}$ entspricht dies einem sehr geringen *Overhead* von $0,06 \%$.

Zur Vermeidung von Paketkollisionen wird nach Ablauf der *Backoff*-Wartezeit der Funkkanal erneut abgehört. Wird ein anderes Signal innerhalb eines *Backoff*-Zeitschlitzes τ_s detektiert, wird die Paketübertragung zurückgestellt und ge-

wartet bis der Radiokanal wieder frei ist. Zugleich wird das Wettbewerbsfenster W_i verlängert ($i \rightarrow i + 1$), welches die Wahrscheinlichkeit eines erneuten parallelen Kanalzugriffs verringern soll. Ist nach Ablauf der neu bestimmten *Backoff*-Wartezeit, z.B. $i = 2$, die Übertragung erfolgreich gewesen, wird für die nächste Übertragung wieder das Wettbewerbsfenster W_1 verwendet.

4.4.3 Paketkollisionen bei CSMA/CA

Bei dem CSMA/CA Zugriffsverfahren können durch das *Random Backoff* Verfahren Paketkollisionen weitestgehend vermieden werden. Dennoch gibt es Situationen, in denen Fahrzeuge zueinander eine Position einnehmen, wodurch Datenübertragungen auf dem Radiokanal durch das *carrier-sense* Verfahren nicht erkannt werden. Diese Situation nennt sich *Hidden-Node* Konstellation [Tan03].

Abbildung 4.7 zeigt ein typisches *Hidden-Node* Szenario mit drei Fahrzeugen A, B und C. Bei einer Übertragung von Fahrzeug A ist R die Sendereichweite in der Fahrzeug B ein Datenpaket fehlerfrei empfangen kann. Für diese Bedingung muss also $d_{AB} \leq R$ sein. Fahrzeug C befindet sich weiter entfernt ($R < d_{CB} \leq R_{CS}$), somit liegt Fahrzeug B in der *carrier-sense* Reichweite von Fahrzeug C. Die Entfernung zwischen Fahrzeug A und C ist viel größer als die *carrier-sense* Reichweite von beiden Fahrzeugen.

Überträgt Fahrzeug A ein Datenpaket, dann kann Fahrzeug B die Belegung des Radiokanals messen, seine Datenübertragung nach dem *Backoff* Verfahren zurückstellen und das Datenpaket empfangen. Die *Backoff* Wartezeit wird pausiert und auf das Ende der Datenübertragung von Fahrzeug A gewartet.

Fahrzeug C nimmt zu Fahrzeug A die *Hidden-Node* Position ein und kann somit keine Belegung des Radiokanals messen. Startet Fahrzeug C parallel zu Fahrzeug A eine Datenübertragung, dann kollidieren die Datenpakete bei Fahrzeug B. Wird ein Signal-zu-Interferenz Verhältnis $(S_I/I_I)_{\min}$ dabei unterschritten, kann Fahrzeug B keines der beiden Datenpakete fehlerfrei empfangen. Abhängig von der Fahrzeugposition kann das Datenpaket von Fahrzeug A mit einem ausreichend hohem SIR fehlerfrei empfangen werden.

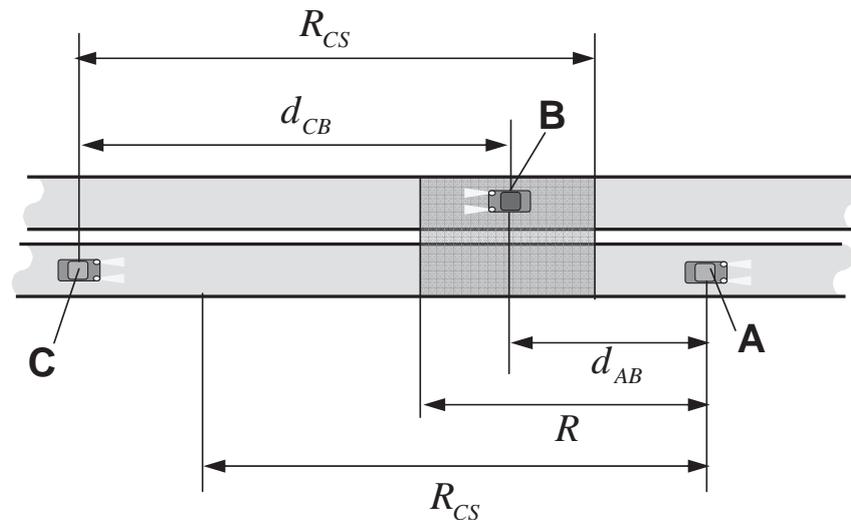


Abbildung 4.7: Paketkollisionen durch *Hidden Nodes*

Je nachdem zu welcher Zeit Fahrzeug A und C die Datenübertragung vornehmen, wird Fahrzeug B eine maximale Kanalbelegungszeit von $2T$ feststellen. Also wird Fahrzeug B mindestens eine doppelt so lange Zeit auf seinen Kanalzugriff warten müssen, wie Fahrzeug A oder C nachdem das Datenpaket übertragen wurde.

Dieses Phänomen ist der Hauptverursacher von Paketkollisionen bei CSMA/CA und ist stetig präsent sofern keine *multi-hop* Signalisierungen von Kanalauslastungen, z.B. von Fahrzeug A nach C, vorgenommen werden [BKR10].

Paketkollisionen durch zeitsynchronen Kanalzugriff

Eine andere Art von Paketkollision entsteht, wenn zwei oder mehr Fahrzeuge zeitsynchron auf den Radiokanal zugreifen. Durch das *Random-Backoff* Verfahren tritt diese Situation allerdings mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auf.

Betrachte man erneut Abbildung 4.7 unter dem Aspekt, dass nur Fahrzeug A und B ein Datenpaket übertragen wollen. Vorausgegangen war eine fehlerfreie Datenübertragung von Fahrzeug A nach Fahrzeug B, wobei Fahrzeug B das Datenpaket um $\tau = d_{AB}/c$ zeitverzögert empfangen hat. Nach Ablauf des Zeitintervalls τ_{difs} berechnen beide Fahrzeuge eine *Backoff*-Wartezeit. Für Fahrzeug

A wird eine Wartezeit von z.B. $\tau_b = 5 \cdot \tau$ und für Fahrzeug B eine Wartezeit von z.B. $\tau_b = 4 \cdot \tau$ berechnet. Dadurch, dass Fahrzeug A einen *Backoff* Zeitschlitz länger auf den Kanalzugriff warten muss, treffen beide Fahrzeuge zeitsynchron auf denselben Zeitschlitz.

Da keine Übertragung vorausgeht, messen beide Fahrzeuge, dass der Radiokanal unbelegt ist und starten ihre Übertragung. Das Datenpaket von Fahrzeug A wird zeitverzögert um τ von Fahrzeug B empfangen und somit kollidieren die Datenpakete und weder Fahrzeug A noch Fahrzeug B empfangen ein fehlerfreies Datenpaket.

4.5 Vergleich der Kanalzugriffsverfahren

Für die dezentrale Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation wird ein Kanalzugriffsverfahren benötigt, welches die selbstorganisierten Eigenschaften von SOTIS erfüllt. Es muss fähig sein, Datenpakete periodisch als *broadcast* an alle Fahrzeuge zu übertragen. Empfangsbestätigungen zur Datenübertragung können nicht gesendet werden, weil die hohe Mobilität der Fahrzeuge keinen zeitlich stabilen Übertragungsweg zwischen zwei Fahrzeugen gewährleistet. Da SOTIS ein verteiltes System ist, wird es durch fehlerbehaftete Datenübertragungen nicht beeinflusst.

In Tabelle 4.2 werden die positiven (+) und negativen (–) Eigenschaften der vorgestellten Kanalzugriffsverfahren zusammengefasst. Die TDMA, FDMA, CDMA und SDMA Verfahren benötigen alle eine Zeit- oder Frequenzsynchronisation zwischen dem Sender und den Empfängerfunkknoten, deswegen ist hier die Spalte *Overhead* negativ gekennzeichnet. Eine synchronisierte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen bedeutet einen erhöhten Signalisierungsaufwand, wenn die Teilnehmer ein Synchronisationssignal versenden müssen und macht das System anfällig.

Findet die Synchronisation über eine zentrale Koordinationseinheit statt, z.B. GPS oder ortsfeste Basisstationen, so geht die dezentrale Selbstorganisation

der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation verloren. Ein Synchronisationsverlust bedeutet ein erhöhtes Datenkollisionsaufkommen bis zu Datenverlust, damit verliert das System an Robustheit. Deswegen ist die Spalte Robustheit in Tabelle 4.2 für TDMA, FDMA, CDMA und SDMA negativ gekennzeichnet. Die Komplexität des CDMA Zugriffsverfahren ist sehr hoch, weil jeder Teilnehmer zum Empfang einer Nachricht den Decodieralgorithmus für jeden einzelnen Teilnehmer parallel laufen lassen muss [Tan03].

Nur das TDMA Verfahren besitzt gute adaptive Eigenschaften in der Gruppe der kanalvermittelnden Zugriffsverfahren. Beim TDMA Verfahren kann ein Fahrzeug sein zeitliches Kanalzugriffsverhalten über der Zeit ändern, ohne dass der Empfänger sich an dieses Verhalten adaptieren muss. In einer *broadcast* Kommunikation, wie sie bei SOTIS eingesetzt wird, tastet der Empfänger den Kanal zeitlich ab. Dadurch können neue Datenpakete auf dem Radiokanal erkannt und empfangen werden.

Tabelle 4.2: Bewertung von Kanalzugriffsverfahren

	<i>Overhead</i>	Robustheit	Komplexität	Adaptivität	
TDMA	–	–	+	+	zentral
FDMA	–	–	+	–	~
CDMA	–	–	–	–	~
SDMA	–	–	+	–	~
CSMA/CA	+	+	+	+	dezentral
ALOHA	+	–	+	+	~

Die letzten beiden Zeilen in Tabelle 4.2 zeigen die positiven und negativen Eigenschaften der paketvermittelnden Zugriffsverfahren CSMA/CA und ALOHA. Das ALOHA Zugriffsverfahren benötigt keine Synchronisation zwischen den Fahrzeugen und berücksichtigt auch nicht die lokale Kanalbelegung. Dadurch ist es robust gegenüber äußere Einflüsse und lässt sich als ein selbstorganisierendes Kanalzugriffsverfahren einsetzen. Der Nachteil ist die hohe Anzahl von Paketkollisionen, die systematisch auftreten können, wenn zwei oder mehr Fahrzeuge mit derselben Sendeperiode ein Datenpaket übertragen.

Das CSMA/CA Verfahren benötigt ebenso keine Zeitsynchronisation zwischen den Fahrzeugen. Durch Berücksichtigung der Kanalauslastung über zeitliche Abtastung des Radiokanals können Paketkollisionen weitestgehend vermieden werden. Es ist sehr robust gegenüber Ausfällen, weil es völlig dezentral den Kanalzugriff für jedes individuelle Fahrzeug steuert. Bis zu einer gewissen Kanalbelegung kann das CSMA/CA Verfahren den Kanalzugriff adaptiv steuern. In Kapitel 7 wird gezeigt, dass CSMA/CA mit einer Anpassung der Sendeleistung auch für höhere Kanalbelegungen den Kanalzugriff zuverlässig steuern kann. Das selbstorganisierende Verhalten geht zu keiner Zeit verloren.

Aufgrund der genannten Vorteile des CSMA/CA Verfahren, wird dieses Zugriffsverfahren in der vorliegenden Arbeit favorisiert.

V

Verkehrsmodellierung

Zur Verifizierung der erzielten analytischen Ergebnisse werden in dieser Arbeit Computersimulationen herangezogen. Dieses Kapitel zeigt Modelle mit denen realistische Anordnungen von Fahrzeugen auf den Straßen nachgebildet werden können. Zur Modellierung des Verkehrs auf Autobahnen, Bundesstraßen oder in der Stadt werden die Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen beschrieben. Dabei müssen die Verkehrsphasen beachtet werden. Während auf Autobahnen meistens ein freier Verkehrsfluss besteht und sich die Fahrzeuge unabhängig voneinander bewegen können, kommt es im städtischen Verkehr zu *Stop-and-Go* Verhalten.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wird eine Verkehrsstatistik über den Verkehrsfluss auf unterschiedlichen Straßentypen ausgewertet. Die Statistik beruht auf tatsächlichen Messungen im Straßenverkehr nach [Bas10]. Die Ergebnisse der Verkehrsstatistik werden zur realistischeren Simulation von SOTIS in einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation herangezogen.

5.1 Modellierung der Fahrzeugabstände

Einige bekannte Verkehrsmodelle zur Beschreibung der Zeitlücken zwischen Fahrzeugen sind die Exponentialverteilung, die verschobene Exponentialverteilung und die *Bunched* Exponentialverteilung [Cow75]. Der Zeitraum zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen kann dabei als eine statistisch unabhängige verteilte Zufallsgröße verstanden werden. Mit der Annahme eines über der Zeit konstanten Verkehrsflusses q kann die Wahrscheinlichkeit mit der n Fahrzeuge in einem gewissen Zeitraum Δt ankommen durch die *Poisson*-Verteilung

beschrieben werden [GD10]. Die diskrete *Poisson*-Verteilung $F(n)$ ist in Gleichung (5.1) gezeigt.

$$F(n) = \frac{(q\Delta t)^n}{n!} e^{-q\Delta t} \quad \text{für } \Delta t \geq 0 \text{ und } n \in \mathbb{N}_0 \quad (5.1)$$

In der statistischen Signalverarbeitung werden Ankunftsprozesse durch einen *Poisson*-Prozess modelliert [GD10]. Im Folgenden werden unterschiedliche Modelle zur Verteilung der Abstände der Fahrzeuge zueinander vorgestellt.

5.1.1 Exponentialverteilung

Die Herleitung der Exponentialverteilung erfolgt zunächst über den Ansatz, dass kein Fahrzeug in einem zeitlichen Intervall Δt ankommt ($n=0$). Somit ist eine zufällige Zeitlücke \tilde{t} größer als die Dauer Δt des Intervalls. Dies tritt mit der Wahrscheinlichkeit $P\{\tilde{t} > \Delta t\}$ ein. Die Verteilungsfunktion der Zeitlücken lässt sich dann mit $F(\Delta t) = 1 - P\{\tilde{t} > \Delta t\}$ bestimmen [Ebn05]. Durch Ableitung der Verteilungsfunktion folgt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) $f(\Delta t)$ der Zeitlücken.

$$f(\Delta t) = qe^{-q\Delta t} \quad \text{mit } \Delta t \geq 0 \quad (5.2)$$

Um zu einer Verteilung $F(d)$ der Fahrzeugabstände d zu kommen, wird eine Variablentransformation benötigt. Ausgehend von den Zeitlücken Δt des Ankunftsprozesses der Fahrzeuge zeigt Gleichung (5.3) die Variablentransformation zu den Abständen der Fahrzeuge.

$$d = \bar{v} \cdot \Delta t \quad (5.3)$$

Die Verteilungsfunktion der Fahrzeugabstände ergibt sich durch Einsetzen der Variablentransformierten in die Verteilungsfunktion der Zeitlücken zu $F(d) = F'(\frac{d}{\bar{v}})$. Die Verteilungsfunktion der Distanzen d zwischen den Fahrzeugen ist eine um den Betrag der Geschwindigkeit \bar{v} gestreckte Version der Zeitlückenverteilung [Ebn05]. Dieser Zusammenhang gilt, solange sich alle Fahrzeuge mit

einer konstanten mittleren Geschwindigkeit \bar{v} fortbewegen. Durch Einsetzen von Gleichung (5.3) in Gleichung (5.1) lässt sich die *Poisson*-Verteilung in Gleichung (5.1) in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte angeben. Die Fahrzeugdichte φ beschreibt die Anzahl von Fahrzeugen pro Streckenabschnitt und wird in Gleichung (5.4) definiert.

$$\varphi = \frac{q}{\bar{v}} \text{ [Fz/km]} \quad (5.4)$$

Zur Modellierung der Abstände d der Fahrzeuge zueinander wird ein Zufallszahlengenerator, der stets gleichverteilte Zufallszahlen $u \in [0,1[$ generiert, betrachtet. Nach [Pap91] folgt, dass $u = F(d)$ gleichverteilt ist in dem Intervall $[0,1[$, unabhängig davon, welche Form $F(d)$ hat. Ist $F^{-1}(u)$ die inverse Verteilungsfunktion von d , so folgt daraus die Zufallsvariable der Fahrzeugabstände

$$d = F^{-1}(u) , \quad (5.5)$$

mit der Verteilung $F(d)$. Durch Einsetzen von Gleichung (5.3) in Gleichung (5.2) und anschließender Integration berechnet sich die Zufallsvariable d der Abstände der Fahrzeuge nach Gleichung (5.5) wie folgt angegeben.

$$d = -\frac{\bar{v}}{q} \cdot \ln(1 - u) \quad (5.6)$$

5.1.2 Verschobene Exponentialverteilung

Die verschobene Exponentialverteilung [Cow75] zur Modellierung der Fahrzeugabstände zueinander berücksichtigt zusätzlich einen Mindestabstand d_{\min} zwischen den Fahrzeugen. Dieser konstante Abstand darf nicht unterschritten werden und wird als Sicherheitsabstand eingeführt. Zur Herleitung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abstände der Fahrzeuge zueinander wird zunächst erneut

die Verteilung der Zeitlücken betrachtet. Mit Gleichung (5.3) ergibt sich nach [Cow75] die WDF der Fahrzeugabstände.

$$f(d) = \gamma e^{-\frac{\gamma}{\bar{v}}(d-d_{\min})} \quad \text{für } d \geq d_{\min} \quad (5.7)$$

Der Parameter γ in Gleichung (5.7) wird wie folgt definiert

$$\gamma = \frac{q\bar{v}}{\bar{v} - qd_{\min}} . \quad (5.8)$$

Die Zufallsvariable zur Modellierung der Fahrzeugabstände d wird in Gleichung (5.5) durch die gleichverteilte Zufallsvariable u bestimmt. Für die verschobene Exponentialverteilung wird der Abstand wie folgt angegeben

$$d = d_{\min} - \frac{\bar{v}}{\gamma} \ln(1 - u) . \quad (5.9)$$

5.1.3 *Bunched* Exponentialverteilung

Bei höheren Verkehrsdichten, so wie sie auf Autobahnen in Stauszenarien vorkommen, nimmt ein Teil der Fahrzeuge ein Kolonnen-Verhalten (*Bunched*) ein, und ein anderer Teil von Fahrzeugen bewegt sich frei ohne Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeuges. Die Fahrzeuge, die sich in einem Verbund fortbewegen, besitzen einen konstanten Abstand d_{\min} zueinander. Die freien Fahrzeuge folgen einer verschobenen Exponentialverteilung [Cow75] und treten mit der Wahrscheinlichkeit χ auf. Mit Gleichung (5.3) ergibt sich die WDF der Fahrzeugabstände nach [Cow75] für die *Bunched* Exponentialverteilung.

$$f(d) = \chi \cdot A \cdot e^{-\frac{A}{\bar{v}}(d-d_{\min})} + (1 - \chi) \cdot \bar{v} \cdot \delta(d - d_{\min}) \quad \text{mit } d \geq d_{\min} \quad (5.10)$$

Der konstante Faktor A berechnet sich wie folgt

$$A = \frac{\chi \cdot q \cdot \bar{v}}{\bar{v} - q \cdot d_{\min}} . \quad (5.11)$$

Nach Integration der WDF $f(d)$ berechnet sich die Verteilungsfunktion und mit Gleichung (5.5) lässt sich die Zufallsvariable zur Bestimmung der Fahrzeugabstände angeben.

$$d = d_{\min} - \frac{\bar{v} \cdot [\ln(1-u) - \ln(\chi)]}{A} \quad (5.12)$$

Für niedrige mittlere Verkehrsflüsse, z.B. $\bar{q} = 400$ Fz/h/Spur, zeigen die Modellierungen der Fahrzeugabstände zwischen den unterschiedlichen Modellen aus Gleichung (5.2), Gleichung (5.9) und Gleichung (5.12) kaum einen Unterschied. Erst für höhere Verkehrsflüsse von z.B. $\bar{q} = 1800$ Fz/h/Spur wird ein Unterschied in den Verteilungen der Distanzen zwischen den Fahrzeugen sichtbar [Ebn05]. Auf Grundlage dieser Untersuchung wird in dieser Arbeit zur Modellierung der Abstände der Fahrzeuge die Exponentialverteilung verwendet.

5.2 Verkehrsstatistik

Für Computersimulationen in ns-2 werden Fahrzeuge und deren Bewegung auf Straßen simuliert. Die Anzahl der zu simulierenden Fahrzeuge soll tatsächliche Straßenverhältnisse abbilden. Daher werden Verkehrsstatistiken über den Verkehrsfluss ausgewertet, um das Ergebnis dann in der Simulation zu berücksichtigen. Klassische Verkehrsmessungen werden von BAST [Bas10], einem technisch-wissenschaftlichen Institut des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) kontinuierlich durchgeführt. Dazu zählen Messungen auf Fahrbahnen von Autobahnen, Landstraßen und Bundesstraßen. Über in Fahrbahnen integrierte Induktionsschleifen wird der zeitliche Verkehrsfluss durch Zählen von Fahrzeugen pro Zeiteinheit gemessen.

Die Verkehrsdichte lässt sich über den Verkehrsfluss und die gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit berechnen. Die Verkehrsdichte hat einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, weil die Anzahl der SOTIS Fahrzeuge ausschlaggebend für die Funkkanalbelegung und Weiterleitung von Verkehrsnachrichten ist.

Die Häufigkeiten gemessener Verkehrsflüsse sind in Abbildung 5.1 gezeigt. Die Messungen der Verkehrsflüsse wurden immer auf ein Vielfaches von 100 Fahrzeugen gerundet.

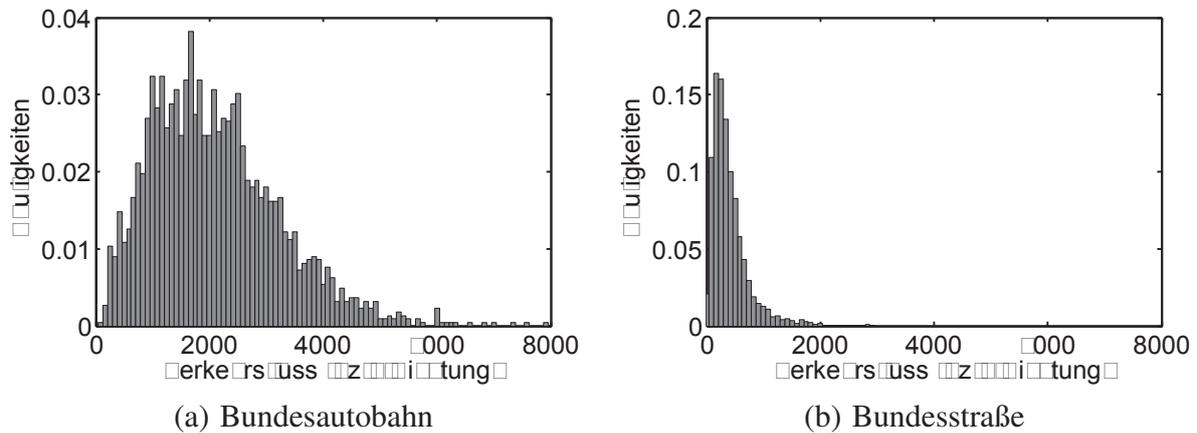


Abbildung 5.1: Häufigkeiten auftretender Verkehrsflüsse auf deutschen Straßen, Stand 2005.

Die folgende Tabelle 5.1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse von Messungen auf deutschen Bundesstraßen und Autobahnen [Bas10]. Der Erwartungswert des Verkehrsflusses \bar{q} aus Abbildung 5.1 und die Standardabweichung σ charakterisieren die Häufigkeiten auftretender Verkehrsflüsse.

Tabelle 5.1: Verkehrsstatistik nach [Bas10]

Straßentyp	\bar{q} [Fz/h/Richtung]	σ [Fz/h/Richtung]
Bundesstraße (B)	447,6	348,7
Bundesautobahn (BAB)	2107,9	1132,2

Die Ergebnisse in Tabelle 5.1 zeigen einen mittleren Verkehrsfluss von $\bar{q} = 2107,9$ Fz/h/Richtung für die Autobahn und $\bar{q} = 447,6$ Fz/h/Richtung für die Bundesstraße. Für die Autobahn ist eine hohe Streuung des Verkehrsflusses zu beobachten. Dies wird besonders durch die hohe Verkehrsdichte in Ballungszentren, z.B. in der Nähe von Großstädten, hervorgerufen. Hier kommt es durch

den Berufspendelverkehr häufiger zu Staus, dies zeigt auch Abbildung 5.2 sehr anschaulich.

Der mittlere gemessene Verkehrsfluss \bar{q} wird in späteren Computersimulationen durch die Anzahl der Fahrzeuge auf einer Fahrspur berücksichtigt. Da die Verteilung der Verkehrslücken auf den Straßen aus Abschnitt 5.1 sich auf eine Fahrtrichtung bezieht, muss der mittlere gemessene Verkehrsfluss \bar{q} in Tabelle 5.1 auf eine Straßenspur umgerechnet werden. Wird hierfür eine Autobahn mit 3 Straßenspuren und eine Bundesstraße mit 2 Straßenspuren betrachtet, so ergibt sich ein mittlerer Verkehrsfluss pro Fahrspur für die Autobahn von $\bar{q} = 702,63$ Fz/h/Spur und für die Bundesstraße $\bar{q} = 223,8$ Fz/h/Spur.

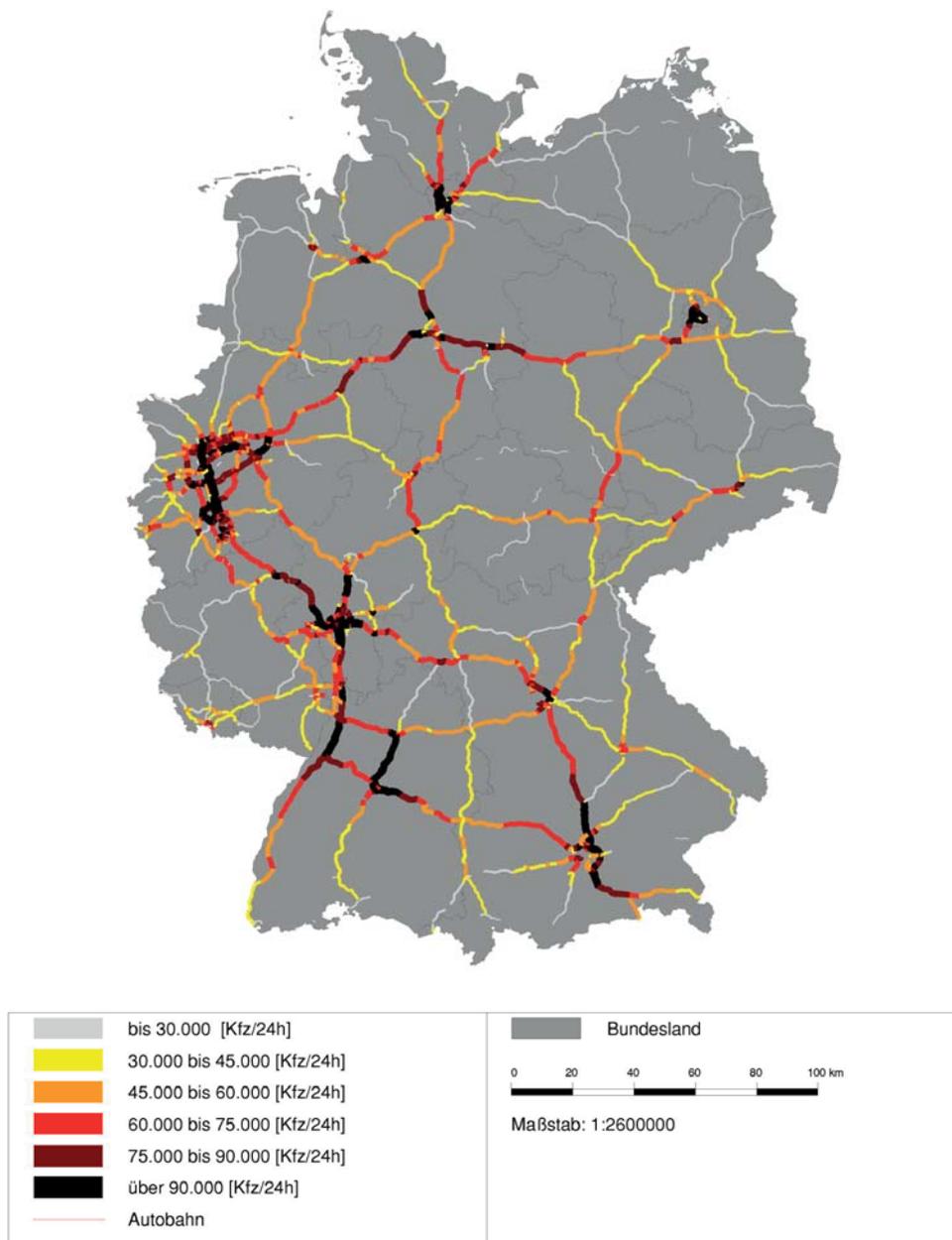


Abbildung 5.2: Verkehrsfluss-Graphik auf deutschen Autobahnen [Bas10], Stand 2005.

VI

Untersuchungen zur Kanalauslastung

Jedes Fahrzeug möchte seine 6012 Byte großen Datenpakete sicher, verzögerungsfrei und kollisionsfrei übertragen. Dafür sorgt das MAC-Verfahren CSMA/CA. Bei geringer Anzahl von SOTIS Fahrzeugen kann das CSMA/CA-Verfahren die Anforderungen nahezu immer erfüllen, nur durch das Auftreten von *hidden node* Situationen wird es in seiner Leistungsfähigkeit beschränkt.

In diesem Kapitel wird die Auslastung des Radiokanals bei wachsender Anzahl von SOTIS Fahrzeugen und die Auswirkung auf die Verbreitung der Datenpakete untersucht. Hierfür werden die Begrifflichkeiten zwischen Kanalauslastung und Kanalbelegung neuartig definiert und unterschieden. Wie die Kanalauslastung gemessen und zur Regelung der Kanalauslastung genutzt werden kann, wurde bisher so wie in der vorliegenden Form noch nicht untersucht und stellt somit eine neuartige Bewertung des Radiokanals dar. Die Untersuchung beinhaltet die analytische Herleitung der Kanalauslastung für CSMA/CA in einer *broadcast* Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation. Die Kanalauslastung kann sehr einfach messtechnisch bestimmt werden und gibt den genauen Zustand des Radiokanals wieder.

Durch Auswertung der gemessenen Kanalauslastung können entsprechende Verfahren eine Überlastung des Radiokanals auflösen. Die analytisch gewonnenen Ergebnisse werden mit Simulationsergebnissen verglichen.

6.1 Auslastung des Radiokanals

Die Kanalbelegung G und die Kanalauslastung R_b werden anhand der MAC-Schicht des Funk IF definiert. Wie stark der Radiokanal ausgelastet ist, wird über die Systemdatenrate der MAC-Schicht definiert. Die Anzahl von SOTIS Datenpaketen, die in einer zeitlichen Abfolge empfangen werden können, ist begrenzt durch die vorgegebene Systemdatenrate. Das Kanalzugriffsverfahren koordiniert die zeitliche Abfolge der Datenübertragungen auf dem Radiokanal. Bei einer optimalen Koordination der Datenübertragung, ohne zeitliche Verzögerungen zwischen den Übertragungen, ist theoretisch ein maximaler Datendurchsatz zu erreichen. Das CSMA/CA Verfahren koordiniert die Übertragungen aber über das *Random-Backoff* Verfahren, dadurch entstehen Verzögerungen wodurch die Kanalauslastung beeinflusst wird.

Folgende Faktoren nehmen Einfluss auf die Kanalauslastung und -belegung:

1. Verkehrsdichte auf der befahrenen und den umliegenden Straßen (Verkehrsfuss).
2. Ausstattungsrate der Fahrzeuge (Marktausstattung).
3. Übertragungreichweite der Fahrzeuge (Sendeleistung).
4. Häufigkeit der Übertragung (Sendeperiode).

Die Kanalbelegung $G \in [0, \infty]$ ist ein einheitenloses Verhältnis, welches proportional von der Anzahl der Fahrzeuge und der Sendeperiode abhängt. Die Kanalbelegung ist unabhängig vom verwendeten Kanalzugriffsprotokoll und beschreibt eine theoretische Auslastung des Radiokanals für einen idealen Kanalzugriff. Für den Fall $G > 1$ wird der Radiokanal als überlastet bezeichnet, weil theoretisch mehr Datenpakete übertragen werden, als die vorgegebene Systemdatenrate verarbeiten kann.

Die Kanalauslastung $R_b \in [0, 1]$ ist ein einheitenloses Verhältnis, welches die effektive Auslastung des Radiokanals beschreibt. Es berücksichtigt das verwendete Kanalzugriffsverfahren, welches angibt, wie oft ein Fahrzeug ein Datenpaket

tatsächlich überträgt. Die Kanalauslastung wird direkt von der Kanalbelegung G beeinflusst. Bezogen auf CSMA/CA wird durch das *Random-Backoff* Verfahren bei einer hohen Kanalbelegung der Kanalzugriff häufiger verzögert. Dadurch werden weniger Datenpakete in zeitlicher Abfolge übertragen und die Kanalauslastung fällt geringer als die Kanalbelegung aus.

Beim CSMA/CA Verfahren besitzt die Kanalauslastung R_b für den Bereich $G < 1$ ein nahezu lineares Verhalten über G . Für den Bereich $G > 1$ ändert sich diese Abhängigkeit und R_b nähert sich für große Werte von G der maximalen Aussteuerung asymptotisch an. In Abschnitt 6.1.3 wird die Kanalauslastung für das CSMA/CA Verfahren analytisch berechnet.

6.1.1 Berechnung der Kanalbelegung

Das CSMA/CA Verfahren kann innerhalb der *carrier-sense* Reichweite R_{cs} den Radiokanal beobachten. Andere Fahrzeuge, die sich in diesem Bereich aufhalten nehmen Einfluss auf die Kanalauslastung und -belegung. Die Anzahl von Fahrzeugen innerhalb der *carrier-sense* Reichweite anderer Fahrzeuge, Ausstattungsrate und Sendeperiode nehmen Einfluss auf die Kanalbelegung. Die Anzahl von Fahrzeugen innerhalb von R_{cs} lässt sich über den *Poisson*-Ankunftsprozess beschreiben. Die *Poisson*-Verteilung der Fahrzeuge in einem Straßenabschnitt bestimmt sich durch Einsetzen von Gleichung (5.3) in Gleichung (5.1), wobei hier $d = \Delta r$ einen beliebigen Straßenabschnitt darstellt. Die *Poisson*-Verteilung ist hierfür im Folgenden angegeben,

$$F(n) = \frac{(\varphi \Delta r)^n}{n!} e^{-\varphi \Delta r} \quad \text{für } n \in \mathbb{N}_0 \quad (6.1)$$

mit der Wahrscheinlichkeit $F(n)$, dass sich n Fahrzeuge in einem vorgegebenen Straßenabschnitt Δr aufhalten. Jedes Fahrzeug besitzt eine Antenne mit omnidirektionaler Abstrahlcharakteristik, daher muss für den Straßenabschnitt Δr die *carrier-sense* Reichweite $[0, R_{cs}]$ Meter in Fahrtrichtung und $[-R_{cs}, 0]$ Meter hinter dem Fahrzeug berücksichtigt werden. Das Gesamtintervall berechnet sich somit zu $\Delta r = 2R_{cs}$. Die mittlere Anzahl \bar{N}_{cs} der Fahrzeuge in *carrier-sense*

Reichweite berechnet sich aus dem Erwartungswert der *Poisson*-Verteilung über n Fahrzeuge aus Gleichung (6.1).

$$\begin{aligned}\bar{N}_{cs} = E \{N_{cs}(\Delta r)\} &= \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot F(n) \\ &= e^{-\varphi \Delta r} \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \frac{(\varphi \Delta r)^n}{n!} \\ &= \varphi \cdot \Delta r = \varphi \cdot 2R_{cs}\end{aligned}\quad (6.2)$$

Berücksichtigt man zusätzlich, dass mit Markteinführung nur ein gewisser Prozentsatz $\beta \in [0,1]$ von Fahrzeugen mit SOTIS ausgestattet sein wird, so entspricht die Anzahl von Kommunikationspartnern \bar{N}_{cs} pro Streckenabschnitt folgender Beziehung

$$\bar{N}_{cs} = \beta \cdot \varphi \cdot 2R_{cs} . \quad (6.3)$$

Die Kanalbelegung G , welche proportional zu der Anzahl von Kommunikationspartnern wächst, berechnet sich durch die folgende Gleichung

$$G = \frac{\bar{N}_{cs} T}{T_s} = \beta \frac{\varphi 2R_{cs}}{T_s} T . \quad (6.4)$$

Dabei beschreibt T die zeitliche Dauer eines SOTIS Datenpakets und T_s die Sendeperiode, mit der ein Fahrzeug periodisch Datenpakete überträgt. Abbildung 6.1 zeigt die Veränderung der Kanalbelegung für unterschiedliche Verkehrsflüsse q aus Abschnitt 5.2. Für die Berechnung von G wurde angenommen, dass sich nur Fahrzeuge auf einer Fahrtrichtung fortbewegen.

Für Abbildung 6.1 wurde eine Ausrüstungsrate von $\beta = 1$ und ein Funk IF mit einer Systemdatenrate von $C_{\max} = 1$ MBit/s angenommen. Die mittleren Verkehrsflüsse sind charakteristische Werte aus der Auswertung von Verkehrsflussmessungen in Abschnitt 5.2.

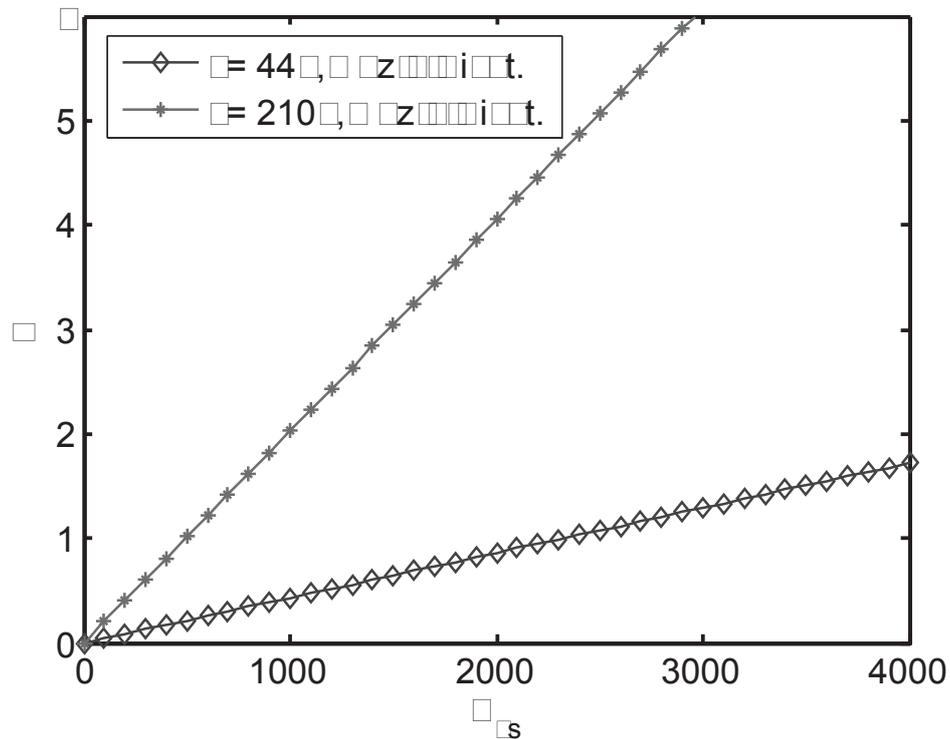


Abbildung 6.1: Kanalbelegungen für unterschiedliche Verkehrsflüsse

Mit einem Anstieg der *carrier-sense* Reichweite eines Fahrzeuges steigt auch die Kanalbelegung an. Für die Berechnung der SOTIS Systembandbreite in Abschnitt 3.3 wurde eine Sendereichweite $R = 500$ m und ein maximaler Verkehrsfluss bzw. Verkehrsdichte vorausgesetzt. Für die *carrier-sense* Reichweite wurde die zweifache Sendereichweite $R_{cs} = 2 \cdot R = 1000$ m gewählt. Nach Abbildung 6.1 wird für eine *carrier-sense* Reichweite von 1000 Meter und ein mittlerer Verkehrsfluss von $\bar{q} = 2107,9$ Fz/h/Richtung eine Kanalbelegung

$$G \approx 2 \quad (6.5)$$

abgelesen. In Großstädten und auf Autobahnen in der Nähe von Ballungszentren oder Staus muss also mindestens mit einer 1-fachen Überlastung ($G = 2$) des Radiokanals gerechnet werden. Da in Abbildung 6.1 nur ein mittlerer Verkehrsfluss verwendet wurde, können tatsächlich höhere Überlastungen auftreten.

Abbildung 6.2 zeigt ein Beispiel, welchen *carrier-sense* Bereich ein Fahrzeug abdecken kann.

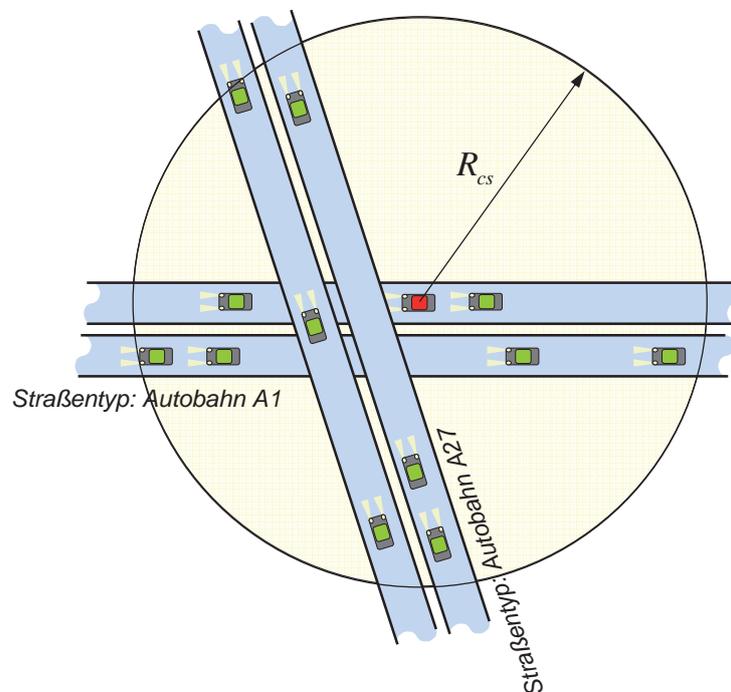


Abbildung 6.2: *carrier-sense* Reichweite eines Fahrzeugs

Wenn Fahrzeuge z.B. Brücken überqueren treten kurzzeitig Fahrzeuge auf anderen Straßen in die *carrier-sense* Reichweite des Fahrzeugs. Für diesen Fall kann sich die Anzahl von Fahrzeugen in Reichweite kurzzeitig verdoppeln und somit eine höhere Kanalbelegung auftreten.

6.1.2 Berechnung der Kanalauslastung

Während die Kanalbelegung nur ein theoretisches Maß für die Auslastung des Radiokanals ist und von einer festen Sendeperiode ausgeht, gibt die Kanalauslastung die tatsächliche Auslastung des Radiokanals auf MAC-Ebene an. Zur Berechnung der Kanalauslastung wird die tatsächliche Sendezeit eines Fahrzeuges berücksichtigt, denn beim CSMA/CA kann sich der Sendezeitpunkt bei einer hohen Kanalbelegung durch das *Random-Backoff* Verfahren verzögern.

Ein Fahrzeug kann zu einem Zeitpunkt nur ein Datenpaket empfangen oder senden, jedoch nicht beides gleichzeitig. Alle Datenpakete haben eine konstante Länge T und werden über einen rauschfreien drahtlosen Übertragungskanal übertragen. Da das CSMA/CA Verfahren auf einem *Random-backoff* Algorithmus beruht, wird der zufällige Wartebereich in Zeitschlitzze der normierten Dauer $a = \tau/T$ unterteilt. Hier wird a die maximale Ausbreitungsverzögerung, die das Datenpaket benötigt, um von einem Sendeknoten zu einem Empfängerknoten übertragen zu werden.

Die Verzögerungszeit a wird als konstant für alle räumlichen Abstände zwischen Sende- und Empfangsknoten betrachtet. Es wird angenommen, dass jede Paketübertragung immer mit dem Beginn eines Zeitschlitzes stattfindet und dass das *carrier-sensing* Verfahren verzögerungsfrei arbeitet. Die zeitliche Dauer eines Datenpaketes wird ebenfalls auf T normiert, so dass die gesamte Paketübertragungszeit durch $1 + a$ ausgedrückt werden kann.

Es wird weiter angenommen, dass sich der Kanalzustand aus Sequenzen von unbelegten (*IDLE*) und belegten (*BUSY*) Perioden zusammensetzt. Eine unbelegte Periode (I) ist der Zeitraum, in dem der Radiokanal frei ist und kein Fahrzeug eine Übertragung vornimmt. Eine belegte Periode (B) tritt ein, wenn ein oder mehrere Fahrzeuge ein Datenpaket übertragen und endet nach dem Empfang des Datenpakets. Die Kanalauslastung berechnet sich damit zu

$$R_b = \frac{\bar{B}}{\bar{B} + \bar{I}} \quad (6.6)$$

mit \bar{B} der mittleren zeitlichen Länge der *BUSY* Periode und \bar{I} der mittleren zeitlichen Länge der *IDLE* Periode. Die Summe aus $\bar{B} + \bar{I}$ ist gerade eine Sendeperiode.

6.1.3 Kanalauslastung des CSMA/CA Zugriffsverfahren

Im Folgenden wird die Kanalauslastung für das CSMA/CA Verfahren berechnet. Die analytische Herleitung folgt den Ansätzen aus [KT75] und [TK75], ist aber

durch die Betrachtung einer *broadcast* Kommunikation als grundlegend neuartig zu bezeichnen. Die *Random-Backoff* Perioden des CSMA/CA Verfahrens werden hier als IDLE Zeitbereiche gekennzeichnet, welches zur präzisen Herleitung der Kanalauslastung notwendig ist.

Zur Herleitung werden die Erwartungswerte für die Länge der *IDLE*- und *BUSY* Perioden analytisch bestimmt. Diese Zustände werden in Abbildung 6.3 gezeigt.

Die Herleitung des Datendurchsatzes für ein *non-persistent CSMA* aus [KT75] betrachtet immer eine Folge von übertragenen Datenpaketen als *BUSY* Periode. Für das CSMA/CA Verfahren wird die *BUSY* Periode nach jedem Datenpaket unterbrochen und es folgt eine *IDLE* Periode (*random-Backoff*). Die Herleitung der Kanalauslastung für dieses Verfahren ist als grundlegend neu zu bewerten.

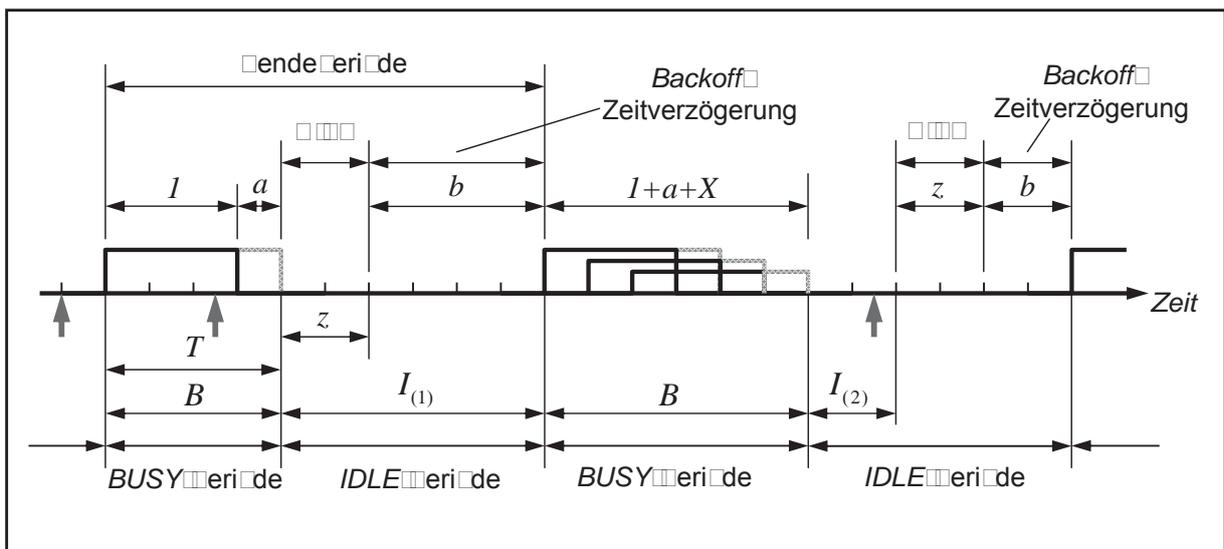


Abbildung 6.3: Zeitliche Darstellung der CSMA/CA Datenübertragung

Zunächst sollen einige Randbedingungen festgelegt werden. Das *DIFS* Intervall wurde in Abschnitt 4.4.2 eingeführt und wird für die folgenden Berechnungen normiert, so dass gilt $z = \tau_{difs}/T$. In Abbildung 6.3 setzt sich die *IDLE* Periode I aus j Perioden ($I_{(j)}$) zusammen. Die Länge der *BUSY* Periode B setzt sich aus der Summe von $1 + a + X$ zusammen. Hier ist X die zeitliche Dauer aus mehreren Paketübertragungen in *carrier-sense* Reichweite. Allgemein kann der zeitliche Abstand zwischen dem Empfang zwei aufeinanderfolgender Datenpakete inner-

halb von a als Zufallsvariable betrachtet werden. Hierbei wird angenommen, dass der Zeitraum zwischen den zwei Ankünften eine statistisch unabhängige und für alle Paketankünfte eine identisch verteilte Zufallsgröße ist. Unter dieser Bedingung lässt sich die Anzahl der Paketankünfte in einem Zeitintervall a über die *Poisson-Verteilung* ausdrücken. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, mit der in einem Zeitintervall $[0, a]$ eine Anzahl von n Paketen eintreffen, gegeben durch

$$P(n) = \frac{(a \cdot G)^n}{n!} e^{-aG} \quad \text{für } a \geq 0 \quad \text{und } n \in \mathbb{N}_0. \quad (6.7)$$

Hier ist G die Kanalbelegung aus Abschnitt 6.1.1.

Die Wahrscheinlichkeit p_0 , dass kein Datenpaket während der Dauer a empfangen wurde, wird in Gleichung (6.7) durch $n = 0$ beschrieben. Im Folgenden kann p_0 angegeben werden.

$$p_0 = P(n = 0) = e^{-aG} \quad (6.8)$$

Dann ist $p_1 = 1 - p_0$ die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Datenpaket während der Dauer a empfangen wird. Mit dieser Kenntnis lässt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer *BUSY* Periode B aus Abbildung 6.3 berechnen.

BUSY Periode

Wenn ein Fahrzeug ein Datenpaket übertragen will, aber der Radiokanal durch eine andere Datenübertragung belegt ist, dann wartet dieses Fahrzeug auf das Ende der Übertragung und startet seine *Backoff*-Wartezeit b . Nach Ablauf der *Backoff*-Wartezeit wird das Datenpaket übertragen. Die zeitliche Dauer, in der der Radiokanal belegt ist, variiert unter Berücksichtigung der Effekte aus Abschnitt 4.4.3. Zu diesen Effekten zählen *Hidden Node* Übertragungen, bei denen sich Datenpakete zeitlich überlagern können. Die Überlagerungen beeinflussen die Dauer der *BUSY* Periode und müssen somit berücksichtigt werden.

Vorausgesetzt wurde, dass ein Fahrzeug ein Datenpaket immer zu Beginn eines Zeitschlitzes a überträgt. Daher wird innerhalb der Sendereichweite R eines Fahrzeugs die Dauer der Kanalbelegung immer gleich $1 + a$ sein. Im *carrier-sensing* Bereich können allerdings *Hidden Node* Fahrzeuge auftreten, wodurch es zu zeitlich verzögerten Übertragungen kommt. Hier kann die Dauer, in der der Radiokanal belegt ist, deutlich länger sein mit $1 + a + \bar{X}$. Mit der Auftrittswahrscheinlichkeit p_{hn} eines *Hidden Node* Fahrzeugs lässt sich die momentane Länge der *BUSY* Periode B zwischen zwei aufeinanderfolgenden Übertragungen berechnen.

$$\begin{aligned} B &= (1 + a + \bar{X}) \cdot p_{\text{hn}} + (1 + a) \cdot (1 - p_{\text{hn}}) \\ &= 1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Hierbei ist \bar{X} die mittlere Dauer von X . Zur weiteren Berechnung der Kanalauslastung wird die Häufigkeit mit der eine *BUSY* Periode auftritt benötigt. Die Häufigkeit lässt sich aus der Auftrittswahrscheinlichkeit über k Sendeperioden berechnen. Angenommen sei, dass bei jeder Datenübertragung bereits ein weiteres Fahrzeug auf das Ende der Übertragung wartet, um ein eigenes Datenpaket zu senden. Dieser Fall wird durch die Wahrscheinlichkeit p_1 aus Gleichung (6.8) berücksichtigt. Steht in $k - 1$ aufeinanderfolgenden Sendeperioden mindestens ein Fahrzeug zur Übertragung bereit und in der k -ten Sendeperiode will kein weiteres Fahrzeug ein Datenpaket übertragen, so lässt sich daraus die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer *BUSY* Periode wie folgt berechnen.

$$P[k \cdot B] = (1 - e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}})})^{k-1} \cdot e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}})} \quad \text{mit } k = 1, 2, \dots \quad (6.10)$$

Nach Abbildung 6.3 folgt nach einer *BUSY* Periode immer eine *IDLE* Periode $I_{(1)}$. Will in der k -ten Sendeperiode kein weiteres Fahrzeug ein Datenpaket übertragen, folgt darauf auch eine *IDLE* Periode $I_{(2)}$. Aus der Reihenentwicklung von Gleichung (6.10) über k lässt sich die mittlere Anzahl von *BUSY* Perioden

berechnen. Wird der Erwartungswert der Anzahl von *BUSY* Perioden mit der zeitlichen Dauer aus Gleichung (6.9) gewichtet, berechnet sich daraus die mittlere zeitliche Dauer des gesamten *BUSY* Zeitraumes. Somit folgt

$$E[B] = \bar{B} = \frac{1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}}}{e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}})}} \quad (6.11)$$

Zur Berechnung der mittleren Dauer \bar{X} wird der Einfluss von zeitlich paralleler Datenübertragung innerhalb der *carrier-sense* Reichweite im Folgenden betrachtet.

6.1.4 Einfluss von *Hidden Nodes* auf die Kanalauslastung

Aufgrund von *Hidden Node* Konstellationen können parallele Datenübertragungen auftreten. Dies kann dazu führen, dass der Radiokanal länger belegt ist als für die zeitliche Dauer T eines Datenpakets. Hierfür wurde in Gleichung (6.11) die Variable X eingeführt, die eine Verlängerung der *BUSY* Periode ausdrückt. Zur Berechnung der mittleren Dauer \bar{X} wird in Abbildung 6.4 ein *Hidden Node* Szenario gezeigt.

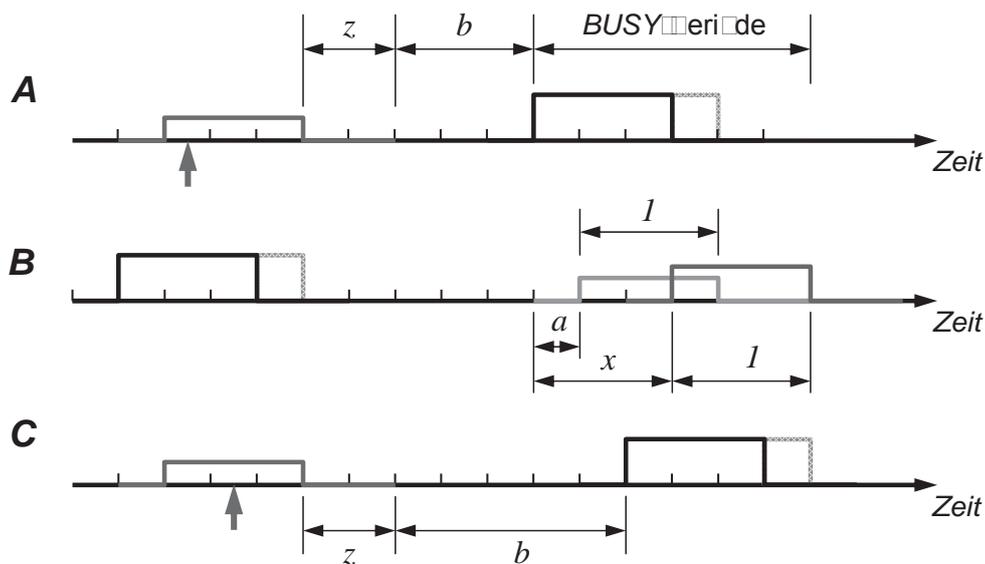


Abbildung 6.4: Paketüberlagerungen unter *Hidden Nodes*

Es werden drei Fahrzeuge A, B und C betrachtet. Fahrzeug B sei in Sendereichweite zu Fahrzeug A und C, während Fahrzeug A und C sich über das *carrier-sense* Verfahren nicht "hören" können. Also nimmt Fahrzeug C eine *Hidden-node* Position zu Fahrzeug A und umgekehrt ein. Nachdem Fahrzeug B ein Datenpaket gesendet hat, empfangen Fahrzeug A und C dieses Datenpaket um a zeitverzögert. Beide Fahrzeuge A und C wollen in der nächsten Sendeperiode ein Datenpaket übertragen und starten ihre *Backoff*-Wartezeit. Fahrzeug C ist außer Reichweite von A, und beide Fahrzeuge messen den Übertragungskanal, nach Ablauf der *Backoff*-Wartezeit, als unbelegt und starten eine Übertragung. An Fahrzeug B kommt es zur Datenüberlagerung und Fahrzeug B kann entweder eines oder keines der Datenpakete fehlerfrei empfangen. Dies hängt von dem Signal-zu-Interferenzverhältnis ab. Zur Bestimmung der Dauer, in der bei Fahrzeug B der Übertragungskanal belegt ist, wird die Herangehensweise aus [KT75] verfolgt. Die Auftrittswahrscheinlichkeit für X lässt sich folgendermaßen berechnen.

$$\begin{aligned} P[X \leq x] &= P[\text{keine geplante Übertragung in } (1+a) - x] \\ &= e^{-G(1+a-x)} \quad \text{mit } x \leq (1+a) \end{aligned} \quad (6.12)$$

Davon ausgehend, dass während der Dauer $(1+a)$ zu jeder Zeit ein weiteres Fahrzeug ein Datenpaket übertragen kann, lässt sich der Erwartungswert \bar{X} über die Integration der kontinuierlichen Zufallsvariablen x bestimmen.

$$E[X] = \bar{X} = \int_0^{1+a} xG \cdot e^{-G(1+a-x)} dx \quad (6.13)$$

$$= 1+a - \frac{1}{G} (1 - e^{-G(1+a)}) \quad (6.14)$$

IDLE Perioden

Zur Bestimmung der *IDLE* Perioden werden die unterteilten Bereiche $I_{(j)}$ ($j = 1, 2$) aus Abbildung 6.3 analysiert. $I_{(2)}$ lässt sich in ähnlicher Herangehensweise zu dem *slotted nonpersistent CSMA* Verfahren aus [RS90] bestimmen.

Die *IDLE* Periode $I_{(2)}$ beschreibt den zeitlichen Bereich, in dem kein Fahrzeug in *carrier-sense* Reichweite eine Datenübertragung anstrebt oder durchführt. Folgende Fallunterscheidungen können zur Bestimmung der Länge dieser *IDLE* Periode getroffen werden. Da jede Übertragung mit einem neuen Zeitschlitz der Länge a beginnt, besitzt die *IDLE* Periode eine Länge von einem Zeitschlitz a , wenn eine Datenübertragung im ersten Zeitschlitz der *IDLE* Periode $I_{(2)}$ angestrebt wird. Wenn sie eine Länge von $2a$ besitzt, dann wurde keine Übertragung im ersten Zeitschlitz a angestrebt und mindestens eine Datenübertragung im zweiten Zeitschlitz angestrebt. Mit der Wahrscheinlichkeit aus Gleichung (6.8) lässt sich dann die Auftretswahrscheinlichkeit für eine *IDLE* Periode $I_{(2)}$ berechnen. Bei Fortführung des erläuterten Prinzips ergibt sich folgende Beziehung.

$$P[I_{(2)} = k \cdot a] = (e^{-aG})^{k-1} \cdot (1 - e^{-aG}) \quad \text{mit } k = 1, 2, \dots \quad (6.15)$$

Aus der Reihenentwicklung von Gleichung (6.15) über k lässt sich die mittlere Anzahl von *IDLE* Perioden berechnen. Wird der Erwartungswert der Anzahl von *IDLE* Perioden mit der zeitlichen Dauer a eines Zeitschlitzes gewichtet, berechnet sich daraus die mittlere zeitliche Dauer von $I_{(2)}$.

$$E[I_{(2)}] = \bar{I}_{(2)} = \frac{a}{1 - e^{-aG}} \quad (6.16)$$

Die *IDLE* Periode $I_{(1)}$ setzt sich aus der zufälligen *Random-Backoff-Zeit* τ_b und dem konstanten Zeitbereich τ_{difs} zusammen. Beide Zeitbereiche werden zur weiteren Berechnung ebenfalls auf die Dauer T eines Datenpakets normiert. So entsteht für die *Random-Backoff-Zeit* $b = \tau_b/T$ und für den konstanten Zeitbereich $z = \tau_{\text{difs}}/T$.

Die Dauer eines *Random-Backoff*-Zeitbereiches b kann über die Verteilung des *Contention Window* variieren, wenn ein weiterer Funkknoten im Zeitschlitz nach Ablauf der *Random-Backoff*-Zeit eine Datenübertragung vornimmt. Die mittlere Dauer eines *Random-Backoffs* bestimmt sich durch die gleichverteilte Zufallsvariable W_i nach Gleichung (4.11) wie folgt.

$$E[b] = \bar{b} = \sum_{W_i=1}^{2^{i-1}c_w} \frac{W_i}{2^{i-1}c_w} \cdot a = \frac{1 + 2^{i-1} \cdot c_w}{2} \cdot a \quad (6.17)$$

Die *Backoff*-Wartezeit b muss von jedem Fahrzeug vor einer Datenübertragung abgewartet werden. Zur weiteren Herleitung wird idealerweise angenommen, dass während der mittleren Wartezeit \bar{b} eines Fahrzeugs kein weiteres Fahrzeug eine Datenübertragung plant. Ebenso wird idealerweise angenommen, dass sich das *Contention Window* nicht erhöht, also $i = 1$ gesetzt wird. Nach Empfang eines Datenpaketes wird die *Backoff*-Zeit gestartet, bevor ein Fahrzeug ein Datenpaket überträgt. Dieses Ereignis tritt nach jeder *BUSY* Periode auf, also mit der mittleren Anzahl $\bar{B}/(1 + a + \bar{X}p_{hn})$ nach Gleichung (6.11). Somit berechnet sich die mittlere *IDLE* Periode $\bar{I}_{(1)}$ aus der mittleren Länge von $z + \bar{b}$ für jede *BUSY* Periode.

$$E[I_{(1)}] = \bar{I}_{(1)} = \frac{z + \bar{b}}{e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X}p_{hn})}} \quad (6.18)$$

Im nächsten Schritt lässt sich nun die analytisch bestimmte Kanalauslastung R_b nach Gleichung (6.6) bestimmen.

Mit Gleichung (6.11), Gleichung (6.16) und Gleichung (6.18), eingesetzt in Gleichung (6.6), ergibt sich die Kanalauslastung zu

$$R_b = \frac{(1 + a + \bar{X} \cdot p_{hn}) \cdot (1 - e^{-aG})}{(1 + a + \bar{X} \cdot p_{hn}) \cdot (1 - e^{-aG}) + a \cdot e^{-G(1 + a + \bar{X} \cdot p_{hn})} + (z + \bar{b}) \cdot (1 - e^{-aG})} \cdot (6.19)$$

Abbildung 6.5 zeigt die analytisch bestimmte Kanalauslastung im Vergleich zum Simulationsergebnis für unterschiedliche Kanalbelegungen. Aufgrund der Ver-

kehrsdynamik unterliegt der Radiokanal gewissen Schwankungen, daher werden für das Simulationsergebnis die mittleren Messabweichungen gezeigt.

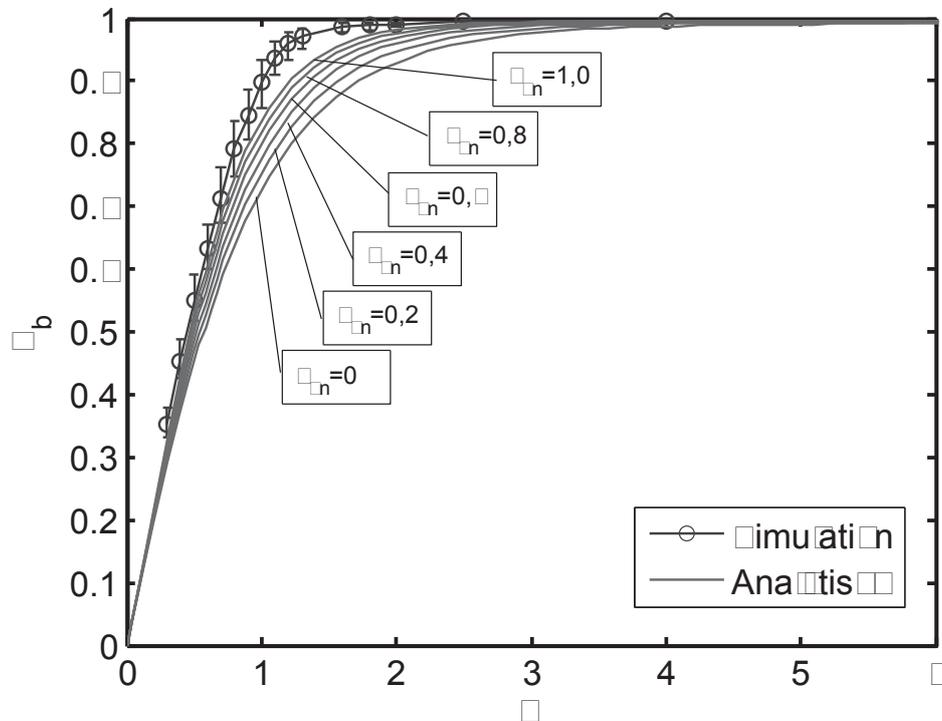


Abbildung 6.5: Analytische und simulierte Kanalauslastung

Mit der Herleitung der Kanalauslastung aus Gleichung (6.19) zeigt sich, dass der analytische Verlauf für den Fall $p_{hm} = 1$ den Verlauf der Simulation am besten approximieren kann.

Aufgrund der CSMA/CA Eigenschaften ergibt sich für den analytischen Ansatz eine Kanalauslastung von ca. 85% bei einer Kanalbelegung von $G = 1$. Wächst die Kanalbelegung G , d.h. es kommen mehr Fahrzeugen in *carrier-sensing* Reichweite hinzu, kommt es zu höheren Kanalauslastungen. Das CSMA/CA Zugriffsverfahren kann diese Überlastung bis zu einer oberen Grenze selbstorganisierend regulieren. Bei einer einfachen Überlastung des Radiokanals mit $G = 2$ liegt die Kanalauslastung bei ca. 95%. Ab einem Wert von $G = 3$ kann das CSMA/CA Verfahren keine Regulierung mehr vornehmen und die Kanalauslastung erreicht ihr Maximum mit $R_b = 1$.

In Abbildung 6.5 zeigt sich, dass die analytische Herleitung der Kanalauslastung sich am besten dem Ergebnis aus der Simulation nähert, wenn von einer hohen *hidden node* Wahrscheinlichkeit ausgegangen wird. In einer Computersimulation wird diese Aussage überprüft. Dazu werden in einer Monte-Carlo Simulation exponentialverteilte Fahrzeuganordnungen auf einer Straße ausgewürfelt. Nach jeder neuen Fahrzeugkonstellation wird nach einer *Hidden Node* Situation aus Sicht jedes einzelnen Fahrzeugs gesucht.

Zur Analyse wird das Szenario in Abbildung 6.6 betrachtet. Ausgehend von einem Sendefahrzeug (Tx) und einem Empfängerfahrzeug (Rx) werden zwei weitere Fahrzeuge Tx-1 und Tx-2, die eine *Hidden Node* Position einnehmen, betrachtet.

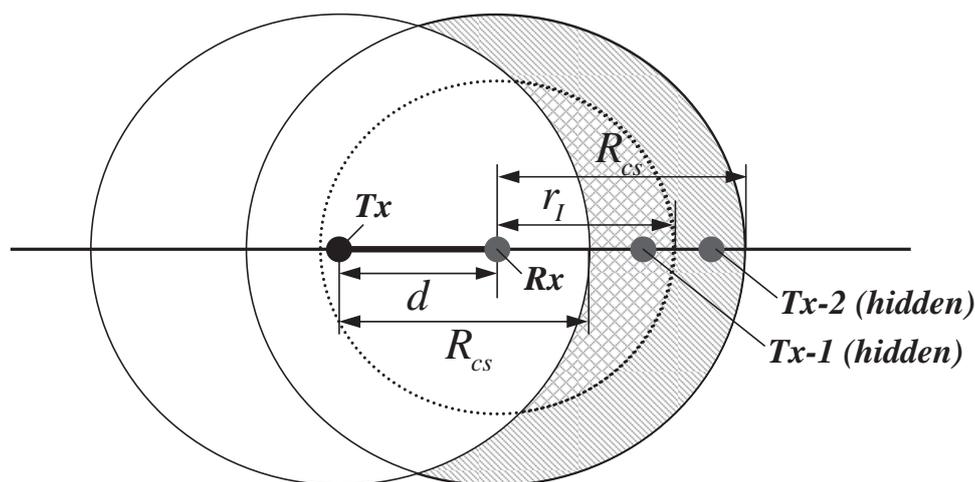


Abbildung 6.6: Model zur Analyse der *Hidden node* Positionen.

In der *carrier-sense* Reichweite R_{cs} kann ein Fahrzeug eine Sendeleistung messen und dadurch eine aktuelle Datenübertragung erkennen. Der Radius r_I gibt den Sendebereich an, in dem ein minimal gefordertes $(\frac{S_I}{I_I})_{min}$ -Verhältnis unterschritten werden kann, wenn ein weiteres Fahrzeug in diesem Bereich eine parallele Datenübertragung zu Funkknoten (Tx) vornimmt. Dies führt dann zu einer Zerstörung des Datenpakets von Sender (Tx) am Empfänger (Rx).

Mit Hilfe dieser geometrischen Anordnung wird auf eine *hidden node* Situation zurück geschlossen. Abbildung 6.7 zeigt das Ergebnis der Monte-Carlo Simu-

lation. Die Wahrscheinlichkeit p_{hn} zeigt, wann mindestens ein Fahrzeug sich in *hidden node* Position zum Sendefunktknoten (Tx) befindet. Insgesamt zeigt Abbildung 6.7 die Wahrscheinlichkeiten für unterschiedliche SOTIS Ausstattungs-raten von $\beta = 0,1$, $\beta = 0,5$ und $\beta = 1$.

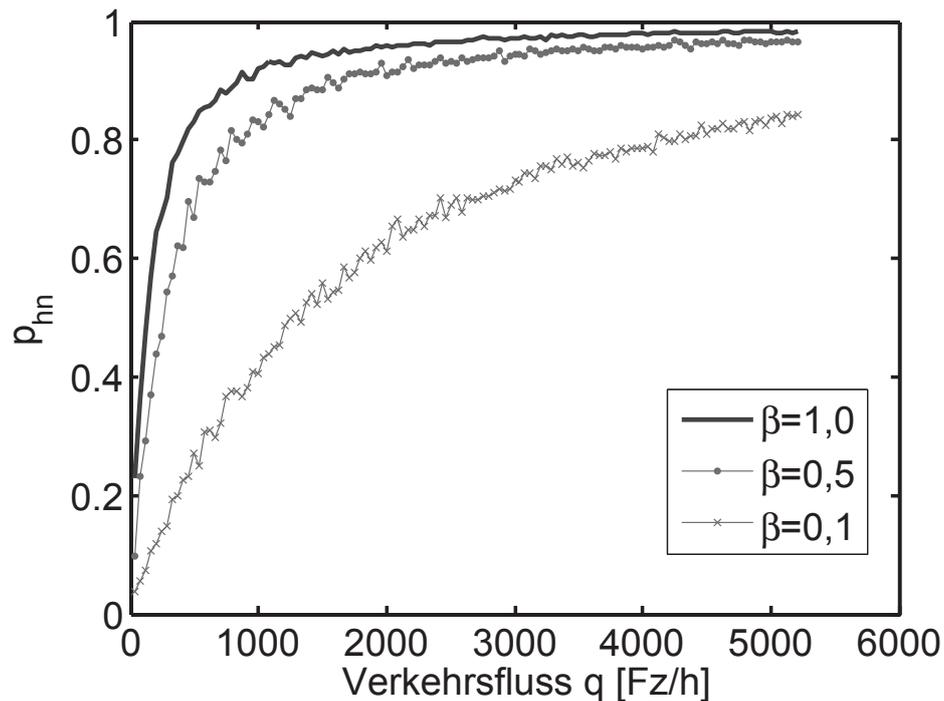


Abbildung 6.7: Wahrscheinlichkeit für *hidden nodes* bei Erhöhung der Fahrzeuganzahl

In Abbildung 6.7 wurde für den Verkehrsfluss eine mittlere Geschwindigkeit von $\bar{v} = 50$ km/h, eine Sendereichweite von $R = 600$ m und eine *carrier-sense* Reichweite von $R_{cs} = 1200$ m zugrunde gelegt. Der Verkehrsfluss auf den die *Hidden-Node* Wahrscheinlichkeit bezogen wird, berechnet sich aus der Summe der Fahrzeuge auf zwei Fahrtrichtungen.

Mit wachsendem Verkehrsfluss q nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug sich in *hidden node* Position befindet, zu. Ein hoher Verkehrsfluss und hohe Ausstattungs-raten sind gleichzusetzen mit einer hohen Kanalbelegung, siehe Abschnitt 6.1.1.

Vergleicht man das Ergebnis mit der Verkehrsstatistik aus Abschnitt 5.2, bei einem mittleren Verkehrsfluss auf der Bundesautobahn von $q = 2107,9$ Fz/h/Richtung mit einer Ausstattungsrate von $\beta = 1$, so liegt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer *hidden node* Position bei ca. 95%.

Somit ist die Annahme zur Berechnung der Kanalauslastung mit hoher *hidden node* Wahrscheinlichkeit gerechtfertigt. Dies zeigt die gute Approximation der berechneten Kanalauslastung R_b mit $p_{hn} = 1$ zu dem Simulationsergebnis in Abbildung 6.5. Folglich trägt die hohe Wahrscheinlichkeit einer *hidden node* Situation einen großen Anteil zur Kanalauslastung bei.

6.2 Datendurchsatz bei unterschiedlicher Kanalbelegung

Im letzten Abschnitt wurde die Kanalauslastung für das CSMA/CA Zugriffsverfahren in einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug *broadcast* Kommunikation berechnet. Auf Grundlage der vorherigen Berechnungen wird der Datendurchsatz unter diesen Bedingungen hergeleitet. Die neuartige Zuordnung des *Random-Backoff* Zeitbereiches zu den IDLE Perioden des Kanalzugriffsverfahrens bewirkt einen neuen Zusammenhang zwischen Kanalbelegung und Datendurchsatz. Ebenso werden die *hidden node* Fahrzeuge bei der Berechnung berücksichtigt, wodurch ein realistischerer Datendurchsatz angegeben werden kann.

Im Folgenden wird für das ALOHA und das CSMA/CA Kanalzugriffsverfahren eine analytische Herleitung des Datendurchsatzes angegeben. Diese gibt Aufschluss darüber, wie viele Datenpakete fehlerfrei bei einer bestimmten Kanalbelegung übertragen werden können.

6.2.1 Datendurchsatz für ALOHA

Zur Herleitungen des Datendurchsatzes für das ALOHA Verfahren werden die analogen Ansätze aus [RS90] und [KT75] verwendet. Nach jedem übertragenen Datenpaket gibt es eine kritische Periode der Länge $2 \cdot T + \tau$. In dieser Zeit darf

kein weiteres Fahrzeug ein Datenpaket übertragen, weil es sonst zu einer Datenkollision kommt. Im Weiteren werden wieder normierte Werte zur Herleitung des ALOHA Datendurchsatzes angenommen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass in der kritischen Periode kein weiteres Fahrzeug ($n = 0$) ein Datenpaket zur Übertragung plant, kann über den Poisson-Prozess beschrieben werden.

$$p_0 = P(0) = e^{-(2+a)G} \quad (6.20)$$

Damit wird p_0 auch als die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung bezeichnet. In Gleichung (6.20) ist G die Kanalbelegung und a die auf T normierte zeitliche Verzögerung eines Datenpakets. Beachtet man, dass nur ein gewisser Anteil der Datenpakete über die Wahrscheinlichkeit p_0 erfolgreich übertragen werden, so lässt sich der Datendurchsatz S wie folgt berechnen.

$$S = G \cdot P(0) = G \cdot e^{-(2+a)G} \quad (6.21)$$

Abbildung 6.8 zeigt den Datendurchsatz über der Kanalbelegung G . Der Einfluss von a wird erst für sehr große Entfernungen ($> 100\text{km}$) zwischen den Teilnehmern sichtbar. Hier wurde eine Entfernung von 1000 m zugrunde gelegt. Zum Vergleich wird der Datendurchsatz des *slotted* ALOHA nach [RS90] gezeigt.

Der Datendurchsatz erreicht einen Maximalwert für die Kanalbelegung bei $G = 0,5$ mit $S = 0,183$. Unterstützt die MAC-Ebene des Funk IF eine Datenrate von $C_{\max} = 1 \text{ MBit/s}$, dann werden bei der Hälfte der Ausnutzung (500kBit/s) 18,3% der gesendeten Datenpakete fehlerfrei empfangen.

6.2.2 Datendurchsatz für CSMA/CA

Untersuchungen zu dem Datendurchsatz von unterschiedlichen CSMA Verfahren wurden schon in den 1970er Jahren von [KT75] erstmalig analytisch durchgeführt und die zugehörigen Leistungskurven bestimmt. Auch in den 1990er Jahren wurde von [KL99] die Leistungsfähigkeit des CSMA/CA Verfahrens,

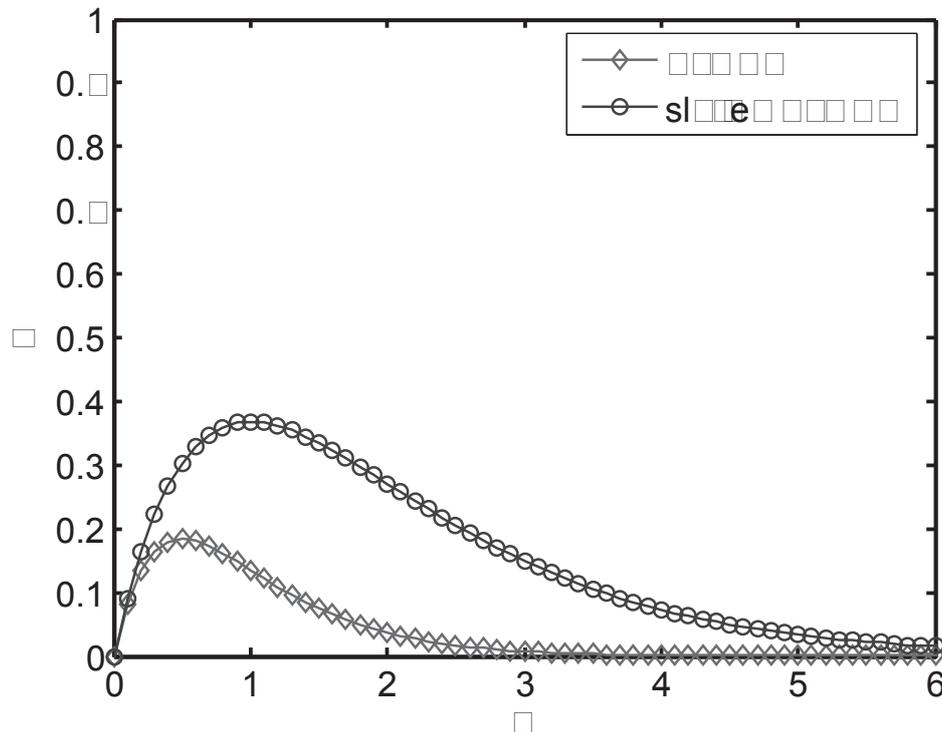


Abbildung 6.8: Datendurchsatz für ALOHA und slotted ALOHA

aus dem gerade veröffentlichten IEEE 802.11 Standard, analytisch berechnet. In beiden Arbeiten wurde zur Berechnung des Datendurchsatzes der Wartezeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Datenübertragungen der BUSY Periode zugeordnet. Dieser Zeitraum wird in dieser Arbeit zu dem Zeitraum, in dem der Übertragungskanal als unbelegt angesehen werden kann, gezählt. Denn im Zeitbereich des *Random-Backoff* Verfahrens bis zur tatsächlichen Datenübertragung wird der Radiokanal nicht genutzt.

Zur Bestimmung des Datendurchsatzes wird vorausgesetzt, dass ein Fahrzeug jeweils nur ein Datenpaket empfangen oder senden kann, jedoch nicht beides gleichzeitig. Das *Random-Backoff* Verfahren verwendet zur Berechnung der Wartezeit Zeitschlitze der Länge a . Alle Datenpakete haben eine konstante Länge T , wobei die zeitliche Dauer auf 1 normiert wird. Ein Datenpaket wird immer zu Beginn eines Zeitschlitzes übertragen, so dass Datenüberlagerungen innerhalb der Sendereichweite immer über die gesamte zeitliche Länge $1 + a$ eines

Datenpaketes stattfinden. Das *carrier-sense* Verfahren wird als verzögerungsfrei angenommen.

Abbildung 6.9 zeigt die zeitlichen Zustände der gesendeten und empfangenen Datenpakete. Die zeitlichen Bereiche werden analog zu Abschnitt 6.1.3 in *IDLE*- und *BUSY* Perioden unterteilt. Der Übertragungskanal ist unbelegt, also *IDLE*, wenn kein Fahrzeug eine Datenübertragung vornimmt. Eine *BUSY* Periode kann ein Zeitbereich sein, in dem ein Datenpaket erfolgreich übertragen wird oder sich mit einem anderen Datenpaket überlagert.

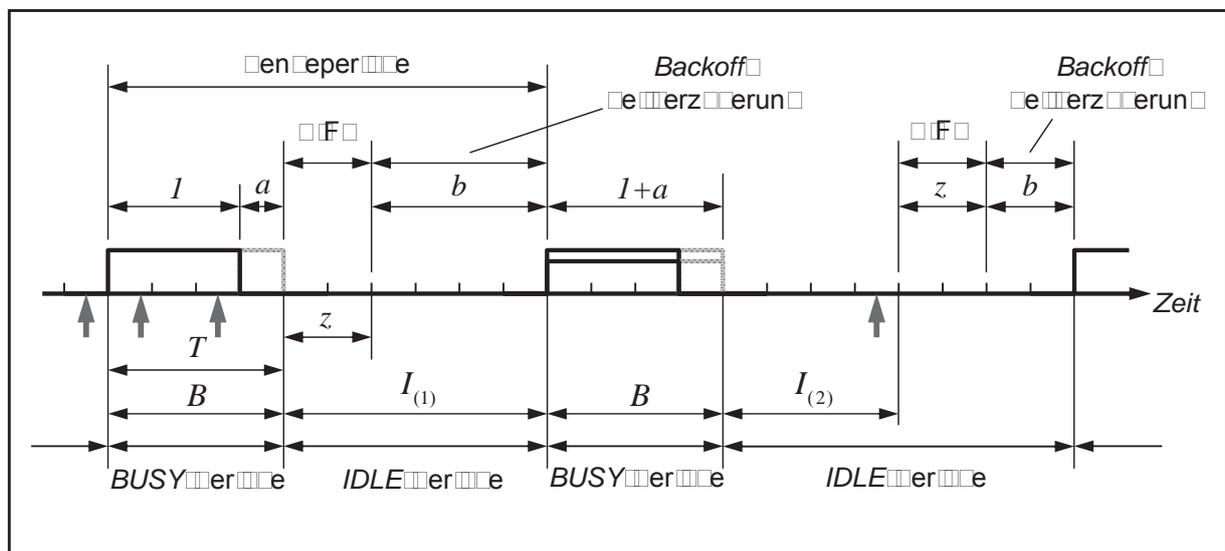


Abbildung 6.9: Zeitlicher Datenempfang unter CSMA/CA

Idealerweise werden zunächst *hidden node*-Vorkommen ausgeschlossen. Der Datendurchsatz wird wie folgt berechnet.

$$S = \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}} \quad (6.22)$$

In Gleichung (6.22) ist \bar{U} die mittlere Kanalausnutzung und \bar{B} und \bar{I} die mittlere Zeit, in der der Radiokanal belegt bzw. unbelegt ist.

Die *BUSY*-Perioden werden analog zur Herleitung der Kanalauslastung von CSMA/CA in Abschnitt 6.1.3 definiert. Überträgt ein Fahrzeug ein Datenpaket, dann müssen alle anderen Fahrzeuge abwarten bis der Radiokanal wieder

frei wird. Nach Beenden der Datenübertragung starten andere Fahrzeuge ihren *Random-Backoff* Algorithmus und das Fahrzeug mit der geringsten Wartezeit startet anschließend eine Datenübertragung.

Solange weitere Fahrzeuge eine Datenübertragung vornehmen wollen, wird es eine zeitliche Fortsetzung der *BUSY*-Perioden geben. Die Länge einer *BUSY* Periode ist gegeben durch $B = 1 + a$. Um die mittlere Anzahl von *BUSY* Perioden über mehrere Sendeperioden zu berechnen wird die Wahrscheinlichkeit, mit der eine *BUSY* Periode auftritt, benötigt. Für diesen Ansatz werden k Sendeperioden betrachtet, in denen in $k - 1$ Sendeperioden mindestens ein Datenpaket zur Übertragung bereit stand. Die Wahrscheinlichkeit für diese Folge von Datenpaketen ist gegeben durch

$$P[k \cdot B] = (1 - e^{-(1+a)G})^{k-1} \cdot e^{-(1+a)G} \quad \text{mit } k = 1, 2, \dots \quad (6.23)$$

Zur Berechnung, wie lange der Radiokanal im Mittel belegt ist, wird Gleichung (6.23) in eine mathematische Reihe entwickelt. Als Ergebnis liegt die mittlere Anzahl von *BUSY* Perioden vor, die mit der Länge $1 + a$ gewichtet werden. Daraus berechnet sich die mittlere Dauer, in der der Radiokanal belegt ist.

$$\bar{B} = E[B] = \frac{1 + a}{e^{-(1+a)G}} \quad (6.24)$$

Die mittlere Zeit \bar{I} , in der der Übertragungskanal unbelegt bleibt, stellt sich immer dann ein, wenn während einer Sendeperiode kein weiteres Fahrzeug eine Übertragung vornimmt. Dann folgt nach einer *BUSY*-Periode eine *IDLE*-Periode. Ist die kleinste Zeiteinheit a zur Übertragung eines Datenpakets, dann lässt sich die Auftrittswahrscheinlichkeit einer *IDLE* Periode $I_{(2)}$ nach dem folgenden Verfahren berechnen.

$$P[I_{(2)} = k \cdot a] = (e^{-aG})^{k-1} (1 - e^{-aG}) \quad \text{mit } k = 1, 2, \dots \quad (6.25)$$

Ist der Übertragungskanal eine zeitliche Dauer a frei, so wird ein Datenpaket zur Übertragung im ersten Zeitschlitz geplant. Ist der Übertragungskanal eine

zeitliche Dauer $2a$ frei, so wird kein Datenpaket im ersten Zeitschlitz und ein Datenpaket im zweiten Zeitschlitz zur Übertragung geplant. Diese Folge wird über den Poisson Prozess in Gleichung (6.25) beschrieben. Über die Entwicklung von Gleichung (6.25) in einer Reihe ergibt sich die mittlere Anzahl von Zeitschlitzen, die zu der Länge von $I_{(2)}$ beitragen. Der Erwartungswert von $I_{(2)}$ berechnet sich danach durch die Gewichtung der Anzahl von Zeitschlitzen mit der Länge a .

$$E[I_{(2)}] = \bar{I}_{(2)} = \frac{a}{1 - e^{-aG}} \quad (6.26)$$

Der Zeitbereich zwischen zwei Sendeperioden, in dem ein Funkknoten seine *Random-Backoff-Zeit* herunter zählt, muss auch zur *IDLE-Periode* berücksichtigt werden. Die *Random-Backoff-Zeit* b variiert über die Verteilung des Contention Window W_i mit Gleichung (4.11). Es wird angenommen, dass W_i nicht erhöht wird und $i = 1$ ist, dann ergibt sich ein mittlerer Wert \bar{b} .

$$\bar{b} = \frac{cw + 1}{2} \cdot a \quad (6.27)$$

Da nach jeder *BUSY-Periode*, vorausgesetzt ein Datenpaket soll übertragen werden, ein *Random Backoff* Prozess stattfindet, kann die mittlere *IDLE-Periode* $\bar{I}_{(1)}$ über die mittlere Anzahl von *BUSY-Perioden* bestimmt werden. Es folgt mit Gleichung (6.24) die mittlere Anzahl der *IDLE-Perioden* $\bar{I}_{(1)}$ zu $\bar{B}/(1+a)$. Wird zu der mittleren *Random Backoff* Zeit \bar{b} der DIFS Zeitbereich z berücksichtigt, dann berechnet sich die mittlere *IDLE* Periode $\bar{I}_{(1)}$ zu

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{d + \bar{b}}{e^{-(1+a)G}} \cdot \quad (6.28)$$

Die gesamte Zeit, in der der Radiokanal unbelegt ist, ergibt sich somit aus der Summe der einzelnen *IDLE* Perioden $\bar{I} = \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)}$. In Analogie zur Herleitung des Datendurchsatzes für das *slotted Non-persistent CSMA* Verfahren nach [RS90] wird hier ein Sendezyklus, bestehend aus *BUSY-Periode* und *IDLE-Periode*, definiert, wobei während eines Sendezyklus die Anzahl von nutz-

baren Daten auf dem Radiokanal durch U beschrieben wird, siehe auch Gleichung (6.22). Nutzbare Datenpakete werden während der Dauer T (hier: $T = 1$) nicht durch benachbarte Übertragungen gestört und mit einem ausreichend hohen (S_I/I_I) -Verhältnis empfangen.

Die mittlere Anzahl von Sendezyklen ist $\bar{B}/(1+a)$. Daraus bestimmt sich die Dauer von \bar{U} wie folgt:

$$E[U] = \bar{U} = \frac{\bar{B}}{1+a} \cdot P_{\text{suc}} \quad , \quad (6.29)$$

mit der Wahrscheinlichkeit P_{suc} für einen erfolgreichen Sendezyklus. Ein nachfolgender Sendezyklus ist immer dann erfolgreich, wenn während des letzten Zeitschlitzes nach dem Herunterzählen der *Random-Backoff*-Wartezeit nur ein Fahrzeug ein Datenpaket zur Übertragung plant. Bei der Betrachtung der Folgen von Sendezyklen muss immer mindestens ein Fahrzeug in dem Zeitschlitz vor dem Start der Sendeperiode eine Datenübertragung geplant haben. Mit dieser Überlegung folgt für die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung

$$P_{\text{suc}} = \frac{P\{N = 1\}}{P\{N > 1\}} = \frac{aGe^{-aG}}{1 - e^{-aG}} \quad , \quad (6.30)$$

wobei mit N die Anzahl von Fahrzeugen, die ein Datenpaket in einem Zeitschlitz vor dem Sendezyklus zur Übertragung planen, gemeint ist. Mit den Herleitungen der *BUSY*-Periode und der *IDLE*-Periode ergibt sich dann der Datendurchsatz für das CSMA/CA Verfahren.

$$S = \frac{aGe^{-aG}}{(1+a+z+\bar{b})(1 - e^{-aG}) + ae^{-(1+a)G}} \quad (6.31)$$

Datendurchsatz für CSMA/CA bei *hidden nodes*

Die Herleitung des Datendurchsatzes für das CSMA/CA Verfahren, unter Berücksichtigung der *hidden nodes* Einflüsse, lässt sich in Analogie zu Abschnitt 6.1.3 angeben. Die *hidden nodes* Kommunikation nimmt Einfluss auf die

Länge der *BUSY* Periode B und der *IDLE* Periode $I_{(1)}$. Die mittlere Dauer \bar{X} beschreibt die Verlängerung des Zeitraumes, in dem der Radiokanal als belegt zu kennzeichnen ist. Die zeitliche Streckung der *BUSY* Periode wird durch parallele Datenübertragungen hervorgerufen.

Mit der Auftrittswahrscheinlichkeit p_{hn} eines *hidden node* lässt sich die Länge der *BUSY* Periode B nach Gleichung (6.9) wie folgt angeben:

$$B = 1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}} \quad , \quad (6.32)$$

mit der mittleren Dauer \bar{X} von X , siehe Abschnitt 6.1.4. Zur Herleitung der mittleren Länge der *BUSY* Periode \bar{B} werden $k - 1$ Sendeperioden, in denen immer mindestens ein Datenpaket von einem Fahrzeug bereitsteht, betrachtet. In Gleichung (6.10) wurde bereits die Auftrittswahrscheinlichkeit der *BUSY* Perioden angegeben.

Daraus folgt mit Hilfe einer Reihenentwicklung über k die mittlere Dauer der *BUSY* Periode, auch wie in Gleichung (6.11) gezeigt.

$$E[B] = \bar{B} = \frac{1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}}}{e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}})}} \quad (6.33)$$

Da die *Backoff*-Wartezeit b und damit die *IDLE* Zeit $I_{(1)}$ in jeder Sendeperiode auftritt, lässt sich die mittlere Anzahl der *IDLE* Perioden über die Anzahl der *BUSY* Perioden bestimmen. Nach Gleichung (6.18) ist die mittlere Dauer der *IDLE* Periode $\bar{I}_{(1)}$ gegeben:

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{z + \bar{b}}{e^{-G \cdot (1 + a + \bar{X} \cdot p_{\text{hn}})}} \quad , \quad (6.34)$$

mit der Dauer z des DIFS Zeitbereiches. Die gesamte *IDLE* Periode ergibt sich aus der Summation der einzelnen *IDLE* Perioden durch $\bar{I} = \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)}$. Datenpakete, die während eines Sendezyklus $T = 1$ nicht durch benachbarte Datenübertragungen gestört wurden, werden als nutzbare Daten bezeichnet. Die Länge U

von nutzbaren Daten ist also immer konstant und entspricht der Dauer eines Datenpakets. Aus diesem Grund müssen hier *hidden node* Einflüsse ausgeschlossen werden und es muss $p_{\text{hn}} = 0$ gesetzt werden.

Für jede *BUSY* Periode wurde ein Datenpaket mit der Wahrscheinlichkeit P_{suc} erfolgreich übertragen. Die mittlere Anzahl von *BUSY* Perioden berechnet sich mit Gleichung (6.24) zu $\bar{B}/(1+a)$. Daraus folgt die mittlere Dauer \bar{U} der Kanalausnutzung.

$$\bar{U} = \frac{P_{\text{suc}}}{e^{-(1+a)G}} \quad (6.35)$$

Unter Berücksichtigung der *BUSY* und *IDLE* Perioden bei Anwesenheit von *hidden nodes* lässt sich der Datendurchsatz des CSMA/CA Verfahren wie folgt berechnen.

$$\begin{aligned} S &= \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}} \\ &= \frac{aGe^{-aG}(1+a+\bar{X}p_{\text{hn}})}{((1+z+a+\bar{b}+\bar{X}p_{\text{hn}})(1-e^{-aG}) + ae^{-(1+a+\bar{X}p_{\text{hn}})G})(1+a)} \end{aligned} \quad (6.36)$$

Wenn die Wahrscheinlichkeit, dass kein Fahrzeug in *hidden node* Position steht, also $p_{\text{hn}} = 0$ ist, dann lässt sich Gleichung (6.36) in Gleichung (6.31) überführen.

In Abbildung 6.10 werden die Datendurchsätze des ALOHA und CSMA/CA Verfahrens miteinander verglichen. Die analytischen Datendurchsätze für ALOHA berücksichtigen keine *hidden node* Fahrzeuge und sind daher als ein sehr optimistisches Ergebnis zu verstehen. Für CSMA/CA wird der Datendurchsatz einmal unter Berücksichtigung, dass sich immer mindestens ein Fahrzeug in *hidden node* Position befindet, und einmal unter der Annahme, dass keine *hidden node* auftreten, berechnet. Auch unter Einfluss von *hidden node* Fahrzeugen liefert CSMA/CA noch einen höheren Datendurchsatz, als ALOHA und *slotted* ALOHA ohne *hidden node* Fahrzeuge.

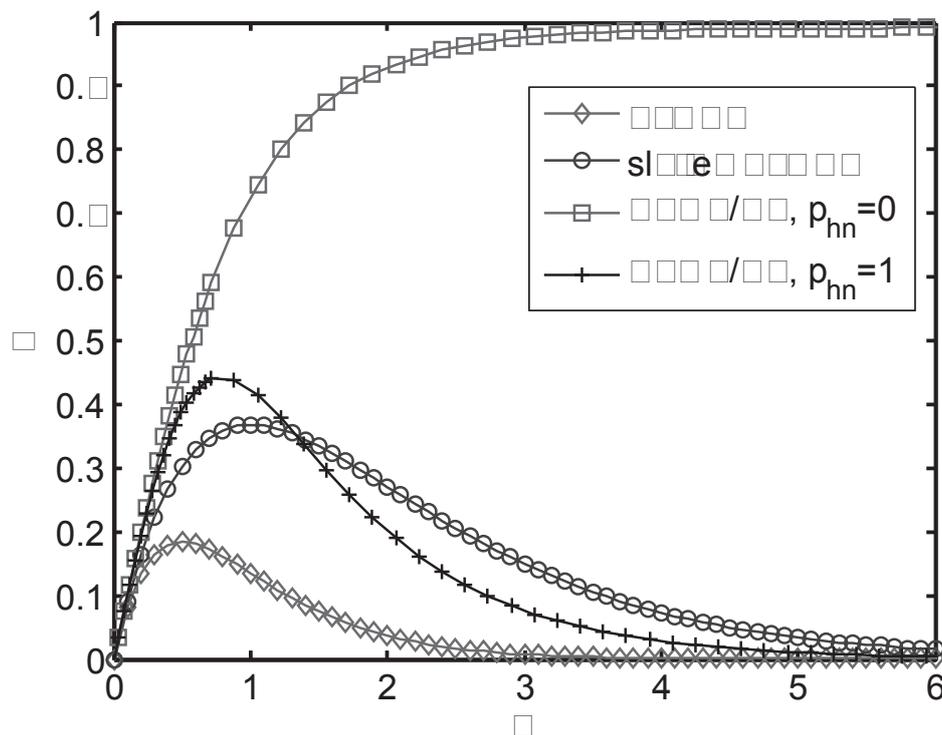


Abbildung 6.10: Datendurchsatz für CSMA/CA im Vergleich zu ALOHA

Es zeigt sich, dass unter Ausschluss von *hidden nodes* der Datendurchsatz über der Kanalauslastung G stetig ansteigt. Der CSMA/CA Algorithmus erreicht einen Datendurchsatz von 100% selbst noch für eine 6-fache Kanalüberbelegung. Für den Fall, dass $p_{hn} = 1$ ist, erreicht der Datendurchsatz ca. 43% bei $G = 1$. Aus Abschnitt 6.1.1 ist bekannt, dass sich eine realistische Kanalbelegung maximal bis $G = 4$ ergibt. Daher sind höhere Kanalbelegungen nicht zu betrachten.

6.3 Simulationsergebnisse

In Kapitel 6 wurde auf analytischem Wege anhand des bevorzugten CSMA/CA Kanalzugriffsprotokolls die Kanalauslastung und der Datendurchsatz bestimmt. Für eine hohe SOTIS Ausstattungsrate bei gleichzeitig hoher Verkehrsdichte auf den Straßen wächst die Kanalbelegung. Die Kanalauslastung steigt und der Datendurchsatz fällt mit einem Anstieg der Kanalbelegung. Zunächst impliziert die-

ses Ergebnis eine Reduzierung der Leistungsfähigkeit von SOTIS bei hoher Verkehrsdichte, in Städten oder auf Autobahnen.

Anhand von Simulationen kann aber gezeigt werden, dass sich das SOTIS-Verfahren robust gegenüber einer Veränderung der Datenrate und einem Anstieg der Kanalauslastung verhält. Das CSMA/CA Zugriffsverfahren sorgt durch seine selbstorganisierenden Eigenschaften dafür, dass auch bei hoher Kanalbelegung die Datenrate auf einen konstanten Wert gehalten werden kann. Bei sehr hohen Kanalbelegungen wird die SOTIS Kommunikation durch Kanalzugriffsverzögerungen beeinflusst und es resultiert eine höhere SOTIS Verzögerung.

Die Simulationsparameter in Tabelle 6.1 gelten für die nachfolgenden Untersuchungen. Simuliert werden SOTIS Fahrzeuge auf einer zweispurigen Straße mit zwei Fahrtrichtungen.

Tabelle 6.1: Simulationsparameter zur Verifikation des CSMA/CA Datendurchsatzes

Simulationsparameter	Wert
Verkehrsfluss q	2900 Fz/h/Richtung
Sendereichweite R	300 m
CS-Reichweite R_{CS}	600 m
mittlere Geschw. \bar{v}	55 km/h
Senderate T_s	1 s
Bewegungsmodell	<i>cellular Automaton</i>
Fahrzeugverteilung	Exponential

Die SOTIS Fahrzeuge folgen einem *Cellular Automaton* (CA) oder auch Nagel-Schreckenberg Bewegungsmodell, in dem Fahrzeuge beschleunigen oder auch abbremsen können [SS93]. Die sich auf einer Fahrspur befindenden Fahrzeuge wurden anhand einer Exponentialverteilung aus Abschnitt 5.1 angeordnet. Zum Vergleich wurden mehrere Simulationen für unterschiedliche Kanalbelegungen G durchgeführt. Um die Anzahl der zu simulierenden Fahrzeuge konstant zu

halten, wurde eine Veränderung der Kanalbelegung durch Anpassung der Systemdatenrate C_{max} erreicht.

6.3.1 Datendurchsatz für CSMA/CA

In Abbildung 6.11 ist das Ergebnis der Simulation im Vergleich zur analytischen Berechnung gezeigt. Betrachtet werden sollen Datendurchsätze für Kanalbelegungen $G < 4$, weil höhere Kanalbelegungen realistisch nicht auftreten.

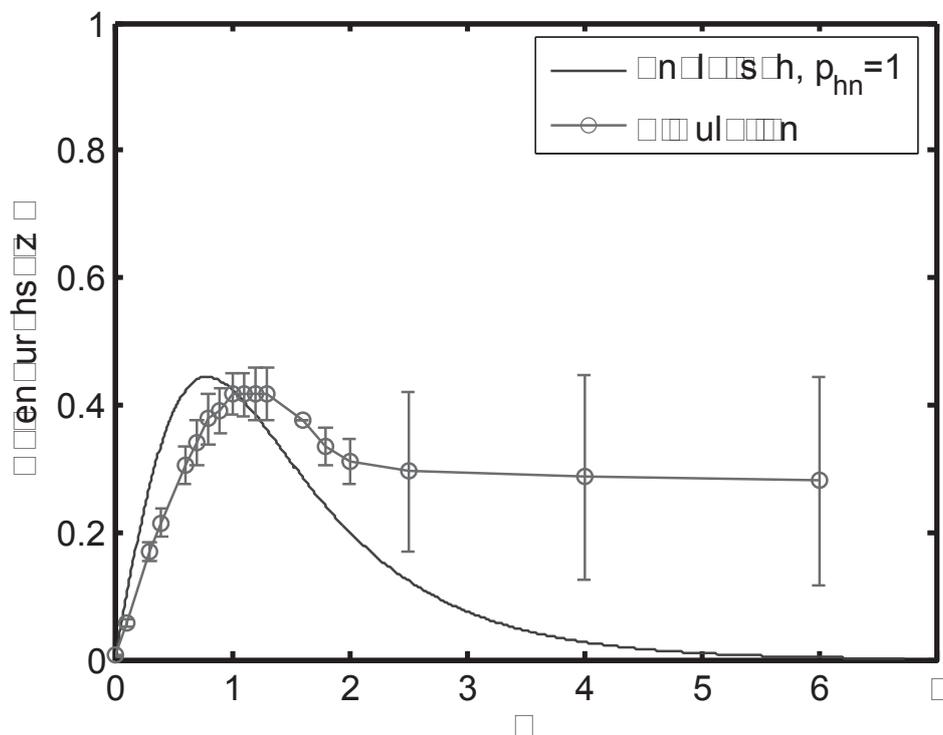


Abbildung 6.11: Datendurchsatz für CSMA/CA aus Simulation und analytischer Berechnung

Der Datendurchsatz des Simulationsergebnisses erreicht sein Maximalwert bei $G \approx 1$ von 43%. Danach sinkt S für höhere Kanalbelegungen und verbleibt für $G > 3$ im Mittel konstant bei $S \approx 28\%$. Das Ergebnis der analytischen Berechnung des Datendurchsatzes aus Gleichung (6.36) zeigt einen guten approximierten Verlauf der Kurve für kleine Werte von G , mit der Annahme der Auftretswahrscheinlichkeit von *hidden nodes* $p_{hn} = 1$.

Für höhere Werte von G fällt der Datendurchsatz aus der analytischen Berechnung schnell ab und zeigt, dass S gegen Null strebt. Der Unterschied zwischen Simulations- und analytischem Ergebnis wird durch das Verhalten von CSMA/CA getrieben. Bei der analytischen Berechnung von S wurde von einer konstanten mittleren Länge der *IDLE* Periode $I_{(1)}$ ausgegangen. Tatsächlich ist der Bereich des *Random-Backoff* Verfahrens sehr dynamisch, besonders wenn es zu hohen Kanalauslastungen kommt.

Der Datendurchsatz als Simulationsergebnis zeigt, dass für höhere Kanalbelegungen ein nahezu konstanter Datendurchsatz von $S \approx 28\%$ erreicht wird. Durch das selbstorganisierende Verhalten von CSMA/CA wird bei hoher Kanalauslastung die *Random-Backoff* Wartezeit in einigen Fahrzeugen stärker erhöht, weil der Radiokanal nach Ablauf der Wartezeit öfters als belegt erkannt wird. Dies erklärt auch die hohe Streuung des Datendurchsatzes für höhere Kanalauslastungen. Während einige Fahrzeuge öfters Datenpakete senden, müssen andere Fahrzeuge länger auf einen Kanalzugriff warten. So entstehen zwischen den Funkknoten ganz unterschiedliche Datendurchsätze, die zu der hohen Streuung führen.

Tatsächlich kann CSMA/CA durch das *carrier-sense* Verfahren und der *random-Backoff* Verzögerung die Kanalauslastung regulieren und einen mittleren Datendurchsatz bei hohen Kanalbelegungen erzielen. Indem einige Fahrzeuge ihre Datenübertragung länger zurückstellen, kommt es zwischen den Fahrzeugen aber zu ungleicher Kanalressourcenvergabe. Für die SOTIS *comfort* Nachrichten kann dieser Effekt dazu führen, dass Verkehrsnachrichten mit größeren Verzögerungen empfangen werden. Für die SOTIS *emergency* Nachrichten sind geringe Verzögerungen entscheidend, um bei Notsituationen schnell reagieren zu können.

6.3.2 CSMA/CA Zugriffsverzögerungen

Mit dem Anstieg der Verkehrsdichte und der SOTIS Ausstattungssrate wird der Radiokanal stärker ausgelastet. Eine Kanalbelegung von $G = 1$ ist der theoretische Wert für die maximale Auslastung der physikalischen Funkschnittstelle

eines Fahrzeugs, d.h. überträgt ein Fahrzeug periodisch jede Sekunde ein Datenpaket (6012 Byte/s) bei einer Systemdatenrate von $C = 1$ MBit/s, dann können maximal 21 Datenpakete pro Sekunde empfangen werden. Für den Bereich $G < 1$ sind die Zugriffsverzögerungen sehr gering und haben keinen messbaren Einfluss auf die Verzögerung der Datenpakete.

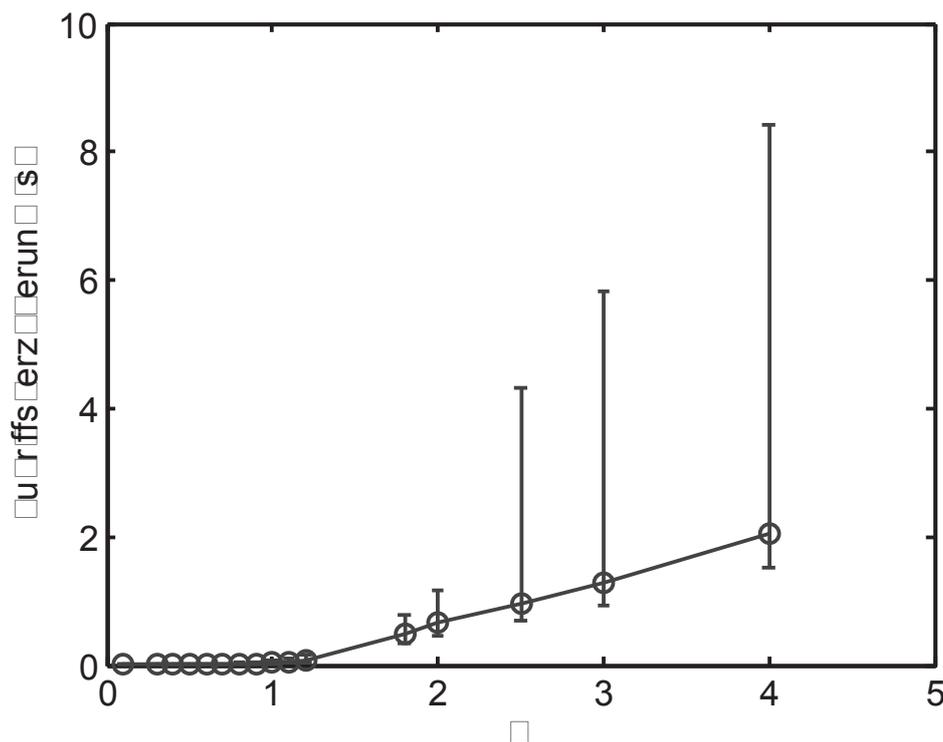


Abbildung 6.12: Kanalzugriffsverzögerungen für unterschiedliche Kanalbelegungen

Bei höheren Kanalbelegungen $G > 1$ wird das Kanalzugriffsverfahren stärker herausgefordert, um die Paketübertragungen fahrzeugübergreifend zu steuern. Um Paketkollisionen weitestgehend zu vermeiden, werden CSMA/CA Paketübertragungen für jedes Fahrzeug individuell hinausgezögert, weil der Radiokanal zeitlich häufiger belegt ist. Dadurch entstehen Verzögerungen in der Übertragung der SOTIS Datenpakete. Diese Verzögerungen regulieren den Datendurchsatz für CSMA/CA bei hoher Kanalauslastung. Durch Auswertungen von Simulatio-

nen in $ns-2$ wird die Kanalzugriffsverzögerung für unterschiedliche Kanalbelegungen untersucht.

Die analytische Berechnung der Kanalauslastung für das CSMA/CA Verfahren in Abschnitt 6.1.3 berücksichtigt zwei Zeitbereiche, in denen der Radiokanal als unbelegt gekennzeichnet wird: Die *Random-Backoff* Wartezeit $I_{(1)}$ und der freie Zeitbereich $I_{(2)}$. Bei einem Anstieg der Verkehrsdichte steigt die Anzahl von Fahrzeugen, die ein Datenpaket zur Übertragung bereithalten. Durch den häufigen Kanalzugriff der Fahrzeuge steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein *Random-Backoff* Zeitschlitz belegt ist. Dadurch verlängert sich die Wartezeit, weil der Algorithmus pausiert. Dadurch steigt die Wartezeit, mit der ein Fahrzeug auf den Radiokanal zugreifen kann. Diese Wartezeit wird als Kanalzugriffsverzögerung bezeichnet.

In Abbildung 6.12 ist die Kanalzugriffsverzögerung über verschiedene Werte von G aufgetragen. Die Verzögerungen wurden fahrzeugspezifisch gemessen und über alle Fahrzeuge gemittelt. Für jede Kanalbelegung wurde eine Simulation mit SOTIS Fahrzeugen durchgeführt. Die mittleren Verzögerungen und die Streuung steigen für höhere Kanalbelegungen und zeigen damit die ungleichmäßige Kanalressourcenverteilung zwischen den Fahrzeugen.

An der hohen Streuung lässt sich ablesen, dass einige Fahrzeuge eine *broadcast* Sendeperiode von $T_s = 1$ s verwenden, während andere Fahrzeuge längere Wartezeiten bis zum Kanalzugriff haben mit $T_s > 1$ s. Das CSMA/CA Verfahren reguliert über den *Random-Backoff* Algorithmus die Kanalauslastung. Dies zeigt sich auch in der Verringerung des Datendurchsatzes S in Abbildung 6.11 für hohe Kanalbelegungen.

6.3.3 SOTIS bei hoher Kanalbelegung

Ist die Kanalauslastung sehr hoch, steigen die Verzögerungen an und können eine höhere SOTIS Nachrichtenverzögerung hervorrufen. Dieses Verhalten wird in mehreren $ns-2$ Simulationen untersucht. Zur Simulation unterschiedlicher Kanalbelegungen wird eine höhere Verkehrsdichte verwendet, wodurch sich die

Laufzeit zur Ausführung der Simulation erhöht. Deswegen wurden in diesem Szenario nur Entfernungen bis 10 km simuliert, um die Rechenzeit gering zu halten.

In Abbildung 6.13 werden die entfernungsabhängigen SOTIS Verzögerungen für unterschiedliche Kanalbelegungen als Ergebnis der Simulation gezeigt. Für Kanalbelegungen bis $G = 1,3$ werden SOTIS Datensätze aus 10 km Entfernung mit nur 6 Sekunden Verzögerung empfangen. Für höhere Kanalbelegungen $G \geq 2,5$ steigen die Verzögerungszeiten an.

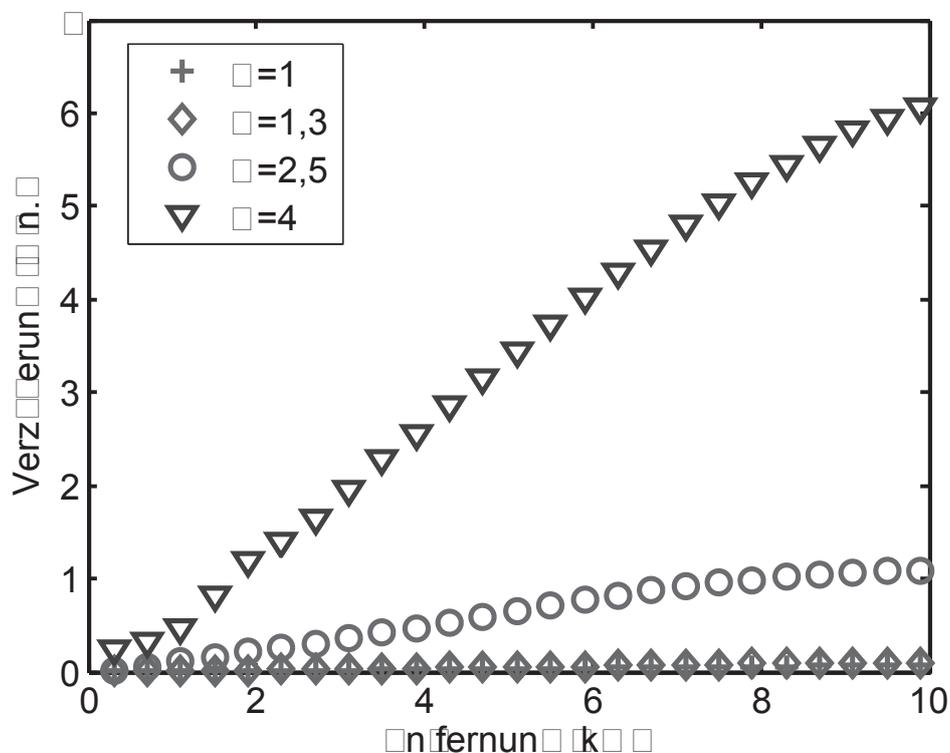


Abbildung 6.13: SOTIS Verzögerungen für hohe Kanalbelastung

Zum Vergleich der Ergebnisse mit niedriger Kanalbelastung werden die Verzögerungszeiten aus 10 km Entfernung in Abbildung 6.13 auf 50 km Entfernung extrapoliert. Über eine Ausgleichsgerade mit der Methode der kleinsten Quadrate lässt sich für jede Gerade die maximal erwartete Verzögerung in 50 km Entfernung schätzen.

Für die Verzögerungsgerade mit $G = 1$ wird mit dem extrapolierten Ergebnis ein Datensatz aus 50 km Entfernung mit einer Verzögerung von 30 Sekunden empfangen. Wird die Verzögerung für $G = 2,5$ bei 10 km Entfernung auf eine Entfernung von 50 km extrapoliert, dann ergibt sich eine Verzögerung von $\bar{\tau}_{\text{sotis}} = 6$ Minuten. D.h. bei einer Verdopplung der Kanalbelegung nimmt die Verzögerungszeit um das 12-fache zu. Für den Fall $G = 4$ wird, unter diesen Voraussetzungen, ein Datenpaket aus 50 km Entfernung mit einer Verzögerung von $\bar{\tau}_{\text{sotis}} = 32,6$ Minuten empfangen.

Mit steigender Verkehrsdichte und Kommunikationsbelastung auf dem Radiokanal, welches besonders in Großstädten eintritt, werden SOTIS Datenpakete mit größeren Verzögerungen empfangen. Die Verzögerungen steigen mit dem Anstieg der Belastung auf dem Radiokanal. In Kapitel 7 wird hierzu ein Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung vorgestellt. Mit diesem Verfahren können Verkehrsnachrichten über große räumliche Entfernungen, auch bei einer hohen Kanalbelastung, mit geringen Verzögerungszeiten empfangen werden.

VII

Regelung der Kanalauslastung

Bei einem Anstieg der Verkehrsdichte mit hoher SOTIS Ausstattungsrate kann es zu Überlastungen des Radiokanals kommen. Dies haben die Ergebnisse aus Kapitel 6 gezeigt. Da SOTIS dezentrale und selbstorganisierende Eigenschaften besitzt, ist das System zwar robust gegenüber Ausfällen bei hohen Kanalauslastungen, allerdings nimmt eine Überlastung des Radiokanals Einfluss auf das Kommunikationsverhalten der Fahrzeuge. Bei hoher Kanalbelegung wird die SOTIS Nachrichtenverzögerung durch die wachsende Zugriffsverzögerung des CSMA/CA-Verfahrens beeinflusst. Dieses Verhalten konnte man in den Simulationsergebnissen aus Abschnitt 6.3.2 und Abschnitt 6.3.3 beobachten.

Für den Fall $G > 1$ werden zu viele Datenpakete zur Übertragung geladen, daher muss die Kanalauslastung für diesen Fall geregelt werden. Die Kanalauslastung kann sehr einfach durch Ändern der Sendeperiode oder der Sendeleistung beeinflusst werden, das ist das Gute an diesem System. Somit wird das CSMA/CA Verfahren nicht für $G > 1$ eingesetzt. Durch Regelung der Kanalauslastung wird die *random backoff* Zugriffsverzögerung gesenkt und SOTIS Verkehrsnachrichten, aus größerer Entfernung, werden mit sehr geringen Verzögerungszeiten empfangen.

In diesem Abschnitt werden zwei Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung vergleichend untersucht. Beide Verfahren verwenden die aus Abschnitt 6.1.2 berechnete Kanalauslastung. Durch Beobachtung des Radiokanals kann die Kanalauslastung messtechnisch bestimmt werden. Die Verfahren regeln, jeweils durch passende Wahl der Sendeleistung, die gemessene Kanalauslastung des CSMA/CA Verfahrens. Indem Fahrzeuge ihre Sendeleistung reduzieren, wird

der Radiokanal lokal weniger stark belastet, wodurch sich die *random backoff* Zugriffsverzögerungen senken lassen. Dadurch wird eine robuste SOTIS Kommunikation mit geringen Nachrichtenverzögerungen erreicht.

Im ersten Verfahren wird die Sendeleistung anhand eines maximal zulässigen Grenzwertes der Kanalauslastung gewählt. Je nachdem, ob die gemessene Kanalauslastung größer oder kleiner als der Grenzwert ist, wird eine Sendeleistung bestimmt. Im zweiten Verfahren werden zwei Grenzwerte zur Regelung der Kanalauslastung verwendet. Ziel in diesem Verfahren ist eine möglichst homogene Verteilung von verwendeten Sendeleistungen zwischen den Fahrzeugen. Dadurch soll ein gleichmäßiger mittlerer Datendurchsatz zwischen den Fahrzeugen eingehalten werden. Durch die dezentrale und selbstorganisierende Eigenschaft des Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationssystems ist eine gleichmäßige fahrzeugübergreifende Regelung der Kanalauslastung äußerst schwierig.

Weitere Untersuchungen, zur Regelung der Kanalauslastung, finden sich in [WR05b] und [BKR10]. In [WR05b] wird die verfügbare Systembandbreite durch Zuweisung einer Sendepriorität unter den Fahrzeugen aufgeteilt. Hier erhalten Fahrzeuge, die Datenpakete mit einem hohem Aktualitätsgehalt besitzen eine höhere Sendepriorität, als Fahrzeuge die Datenpakete mit einem niedrigeren Aktualitätsgehalt besitzen. Nach diesem Verfahren wird die *broadcast* Sendeperiode eines Fahrzeugs angepasst. Im Falle von sehr hohen Kanalauslastungen werden Datenpakete mit niedrigem Aktualitätsgehalt aus der Sende-*Queue* eines Fahrzeuges entfernt.

In [BKR10] wird zur Steuerung der Kanalauslastung die Sendeperiode eines Fahrzeugs geregelt. Die Sendeperiode wird so gewählt, dass die Kanalressource über alle Fahrzeuge in *carrier-sense* Reichweite des CSMA/CA Verfahrens gleichmäßig verteilt wird.

7.1 Messung der Kanalauslastung

Die Regelung der Kanalauslastung für eine dezentral- und selbstorganisierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist eine herausfordernde Aufgabe. Dies

ist begründet durch die hohe Mobilität der Fahrzeuge und die sich damit ergebene zeitliche Veränderung des Radiokanals. Durch die in SOTIS verwendete *broadcast* Kommunikation lässt sich eine Überlastung des Radiokanals, wie bei einer Punkt-zu-Punkt Kommunikation, nicht sofort erkennen. Stattdessen muss jedes Fahrzeug selbstständig den Radiokanal beobachten.

Zur messtechnischen Bestimmung der Kanalauslastung in jedem Fahrzeug werden die Sende- und Empfangszeiten während einer Dauer T_m ermittelt. Der Radiokanal wird als belegt (*BUSY*) gekennzeichnet, wenn ein Fahrzeug ein Datenpaket überträgt oder empfängt. Über das *carrier-sense* Verfahren kann jedes Fahrzeug zusätzlich messen, ob eine Datenübertragung in dem *carrier-sense* Bereich stattfindet. Hierfür wird ebenso die zeitliche Dauer, mit der ein Leistungspegel gemessen wird, ausgewertet. Wird kein Datenpaket übertragen oder empfangen und ist der gemessene Leistungspegel niedriger als eine vorher definierte *carrier-sense* Schwelle, so wird der Radiokanal als unbelegt gekennzeichnet.

Die messtechnisch bestimmte Kanalauslastung wird somit über ein Zeitverhältnis bestimmt. Dafür werden die Zeitbereiche B_i , in denen die MAC-Schicht als *BUSY* gekennzeichnet wird, gemessen und ins Verhältnis zur Beobachtungszeit T_m gesetzt. Aus diesem Verhältnis berechnet sich die gemessene Kanalauslastung \tilde{R}_b .

$$\tilde{R}_b = \frac{\sum_{i=1}^K B_i}{T_m} \quad \text{mit } K \in \mathbb{N} \quad (7.1)$$

Die Kanalauslastung kann Werte im Bereich $[0,1]$ annehmen. Sie wird maximal, wenn während der gesamten Beobachtungszeit T_m der Radiokanal *BUSY* gekennzeichnet war.

7.2 Einstellung der Sendeleistung

Ein Ansatz zur Regelung der Kanalauslastung lässt sich über die Anpassung der Sendeleistung einzelner Fahrzeuge erreichen. Wird die Sendeleistung verringert, so nimmt auch die Anzahl von Fahrzeugen, welche in *carrier-sense* Reichweite

eines Fahrzeuges stehen, ab. Dies bewirkt eine lokale Reduzierung der Kanalbelegung G und der gemessenen Kanalauslastung \tilde{R}_b .

Aus Abschnitt 6.1.1 ist bekannt, dass sich die mittlere Anzahl von Fahrzeugen, welche in *carrier-sense* Reichweite zueinander stehen, durch die Verkehrsdichte und die SOTIS Ausstattungsrate berechnet. In Gleichung (7.2) wird dazu noch zusätzlich die gesamte Anzahl von Fahrspuren N_{spur} einer Straße mit zwei Fahrtrichtungen berücksichtigt.

$$\bar{N}_{\text{cs}} = \beta \cdot N_{\text{spur}} \varphi \cdot 2R \quad (7.2)$$

Wenn jedes Fahrzeug mit SOTIS ausgestattet ist, dann wird $\beta = 1$. Für diesen Fall nimmt nur noch die Verteilung der Fahrzeuge und die Anzahl von Fahrspuren auf der Straße Einfluss auf die Anzahl von Fahrzeugen in der *carrier-sense* Reichweite.

Durch geeignete Wahl einer Sendeleistung P_t verkleinert bzw. vergrößert sich die Sendereichweite R , in der Fahrzeuge Datenpakete empfangen können. Berücksichtigt man die Eigenschaften der Signalausbreitung aus Abschnitt 4.1.2 nach der Freiraumausbreitung, dann ergibt sich nach Gleichung (4.2) eine Sendereichweite von:

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_L \cdot G_t G_r}{L}}. \quad (7.3)$$

Die Sendereichweite R bestimmt sich also im Wesentlichen aus dem Koeffizienten der Pfaddämpfung $P_L = \frac{P_t}{P_r}$. Eine Veränderung der Sendeleistung P_t bewirkt somit eine Veränderung der Pfaddämpfung.

In den folgenden Abschnitten werden zwei Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung vorgestellt. Beide Verfahren basieren auf der Steuerung der Sendeleistung zur Reduzierung der Anzahl von Kommunikationspartnern in *carrier-sense* Reichweite. Auf *PHY*-Ebene des Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationsprotokolls wurde die Steuerung der Sendeleistung implementiert. Auf Basis der *MAC*-Ebene des Kommunikationsprotokolls wird die Kanalauslastung \tilde{R}_b gemessen und der *PHY*-Ebene zur Verfügung gestellt. Das CSMA/CA Verfahren

wird durch die Erweiterungen der *MAC*-Ebene nicht beeinflusst und verhält sich wie unter Abschnitt 4.4.2 beschrieben.

Die Kanalauslastung wird in beiden Verfahren über die Festlegung von Grenzwerten geregelt. Die Grenzwerte geben vor, wie weit der Radiokanal ausgelastet werden darf. Liegt die gemessene Kanalauslastung über den festgelegten Grenzwerten, startet die Regelung und es wird eine geeignete Sendeleistung im Fahrzeug eingestellt. Sobald die gemessene Kanalauslastung unterhalb des festgelegten Grenzwertes fällt, wird die Sendeleistung des Fahrzeuges erhöht. Ziel ist eine gemessene Kanalauslastung, die möglichst nah an dem vorgegebenen Grenzwert liegt.

Wie die Grenzwerte festzulegen sind, wird in mehreren Computersimulationen unter *ns-2* untersucht. Nach Optimierung der Grenzwerte wird gezeigt, dass beide Verfahren eine robuste Regelung der Kanalauslastung auch bei hoher Kanalbelegung erreichen.

7.3 Erstes Regelungsverfahren

Im ersten Verfahren wird durch Auswertung der gemessenen Kanalauslastung die Sendeleistung eingestellt. Die Kanalauslastung wird durch einen Vergleich zu einem Grenzwert B_{\max} bewertet. Ist \tilde{R}_b größer als der Grenzwert B_{\max} , so wird die Sendeleistung reduziert, bis die Kanalauslastung unter den Grenzwert fällt. Liegt der gemessene Wert \tilde{R}_b unterhalb von B_{\max} , so wird die Sendeleistung erhöht. Mit diesem Verfahren wird die Sendeleistung eines Fahrzeuges so eingestellt, dass $\tilde{R}_b < B_{\max}$ wird [BKR08].

Der Grenzwert B_{\max} ist zeitlich konstant und dient der Vorgabe einer maximalen Kanalauslastung. Anhand von Gleichung (7.4) wird die Sendeleistung eingestellt.

$$P_{t,\text{neu}} = \begin{cases} P_{t,\text{alt}} - P_{\alpha} & , \text{ für } \tilde{R}_b > B_{\max} \\ P_{t,\text{alt}} + P_{\alpha} & , \text{ für } \tilde{R}_b \leq B_{\max} \end{cases} \quad (7.4)$$

Die verwendete Sendeleistung von der letzten Übertragung hat den Wert $P_{t,\text{alt}}$, und die aktuelle Sendeleistung ist durch $P_{t,\text{neu}}$ gekennzeichnet. Die Veränderung der Sendeleistung wird durch P_α gesteuert. Die Leistung P_α wird dabei so gewählt, dass sich nach Gleichung (7.3) die Sendereichweite um $\Delta R = 5$ m bei jedem Schritt ändert. So wird die Sendereichweite über lineare Entfernungsschritte verändert. Reduziert ein Fahrzeug die Sendeleistung, nimmt die Kanalauslastung aus Sicht von anderen Fahrzeugen, die in *carrier-sense* Reichweite zu diesem Fahrzeug stehen, ab. D.h. bei individueller Veränderung der Sendeleistung messen andere Fahrzeuge eine veränderte Kanalauslastung. Die eigene Messung der Kanalauslastung wird von der Änderung der Sendeleistung nicht beeinflusst. Wenn eine geringere Kanalauslastung gemessen wird und einen Grenzwert unterschreitet, wird die Sendeleistung wieder erhöht. Durch dieses Verhalten ist es extrem schwierig, für Fahrzeuge in lokaler Umgebung eine vergleichbare Kanalauslastung zu erreichen.

Um eine Überlastung des Radiokanals einheitlich für alle Fahrzeuge zu senken, müsste daher jedes Fahrzeug seine Sendeleistung zeitsynchron zu der Änderung der Sendeleistung anderer Fahrzeuge anpassen. Dieses Verhalten ist in einem selbstorganisierenden Verfahren wie SOTIS nicht umzusetzen.

Um zu bewerten, in welcher Weise das erste Regelungsverfahren eine Überlastung des Radiokanals auflösen kann, wird zunächst ein optimaler Grenzwert B_{max} ermittelt. Für diese Untersuchung verwendet jedes Fahrzeug, zur Übertragung eines SOTIS Datenpakets, eine konstante Senderate. Die einheitliche Systemdatenrate beträgt $C_{\text{max}} = 1$ MBit/s.

Zur Ermittlung eines optimalen Grenzwertes B_{max} wird eine Überlastung des Radiokanals betrachtet. Bei der Bestimmung des Grenzwertes wird darauf geachtet, dass der mittlere Datendurchsatz möglichst hoch ist und die Kanalzugriffsverzögerungen möglichst klein ausfallen. Beide Werte werden als Optimierungskriterien zur Regelung der Kanalauslastung herangezogen. Ein hoher Datendurchsatz gewährleistet, dass Fahrzeuge über einen Zeitraum eine nahezu konstante Anzahl von SOTIS Datenpaketen empfangen. Ist die CSMA/CA Kanalzugriffsverzögerung gering, werden auch SOTIS Datenpakete aus größeren Entfernungen mit

geringeren Verzögerungszeiten empfangen. So wird die Leistungsfähigkeit von SOTIS auch bei hohen Kanalbelegungen konstant gehalten.

7.3.1 Optimierung des Grenzwertes

Zur Ermittlung eines an Datenrate und Kanalzugriffsverzögerungen optimierten Grenzwertes B_{\max} werden unter $ns-2$ unterschiedliche Simulationsszenarien betrachtet. In jedem Szenario wird eine konstante Kanalbelegung von $G = 2,5$ simuliert. Für den Grenzwert B_{\max} wird pro Szenario ein fester konstanter Wert zwischen $0,4 < B_{\max} < 1$ gewählt. Das Szenario besteht aus Fahrzeugen, die sich auf einer Straße mit zwei Fahrspuren in zwei Fahrtrichtungen fortbewegen. Die Straßen sind unterteilt in SOTIS Segmente der Länge $l_s = 100$ m. In Tabelle 7.1 sind die Simulations- und Systemparameter festgelegt.

Tabelle 7.1: Simulationsparameter zur Bestimmung eines optimierten Grenzwertes im ersten Verfahren

Parameter	Wert
MAC-Datenrate	1 MBit/s
$(\frac{S_l}{I_l})_{min}$	10 dB
max. Reichweite R	500 m
max. Reichweite R_{CS}	1000 m
Kanalmodell	Boden-Reflexion
Bewegungsmodell	<i>Cellular Automaton</i>
Fahrzeugverteilung	Exponential

Bei $B_{\max} = 1$ wird die Bedingung $\tilde{R}_b \leq B_{\max}$ aus Gleichung (7.4) für hohe Kanalauslastungen immer erfüllt und die Sendeleistung wird bis zu einem maximalen Wert erhöht. Somit kann mit diesem Grenzwert keine Regelung der Kanalauslastung erfolgen und eine Überlastung des Radiokanals auflösen. Für Werte $B_{\max} < 1$ wird die Kanalauslastung durch geeignete Wahl der Sendeleistung verändert. Als Ergebnis der Simulationen unter $ns-2$ ist die mittlere Kanalauslastung, welche über alle Fahrzeuge bestimmt wird, in Abbildung 7.1(b) gezeigt.

Jeder Wert charakterisiert das Ergebnis der Regelung der Kanalauslastung bei Verwendung eines festen Grenzwertes B_{\max} , welcher auf der x-Achse gezeigt ist. Liegt die mittlere gemessene Kanalauslastung auf dem Wert des Grenzwertes, also $\tilde{R}_b \approx B_{\max}$, hat die Regelung der Kanalauslastung das optimale Ziel erreicht. Das Ergebnis zeigt, dass die Kanalauslastung anhand des Grenzwertes optimal geregelt werden kann.

In Abbildung 7.1(a) wird in jedem Wert der zugehörige mittlere Datendurchsatz bei Verwendung eines festen Grenzwertes B_{\max} gezeigt. Je kleiner B_{\max} gewählt wird, desto geringer wird der Datendurchsatz S . Indem eine geeignete Sendeleistung anhand der gemessenen Kanalauslastung gewählt wird, so dass $\tilde{R}_b \rightarrow B_{\max}$ wird, stehen weniger Fahrzeuge in lokaler Empfangsreichweite von anderen Fahrzeugen. Dadurch sinkt die Anzahl von empfangenen Datenpaketen und damit der Datendurchsatz. Der Datendurchsatz fällt nahezu linear in einem Bereich $0,45 < B_{\max} < 0,95$. Indem Fahrzeuge unterschiedliche Sendeleistungen anhand ihrer gemessenen Kanalauslastung verwenden, variiert der Datendurchsatz stärker. Die Bewegung der Fahrzeuge tragen dazu bei, dass sich mal mehr oder mal weniger Fahrzeuge in Empfangsreichweite von anderen Fahrzeugen befinden. Dadurch variiert auch die Anzahl von empfangenen Datenpaketen.

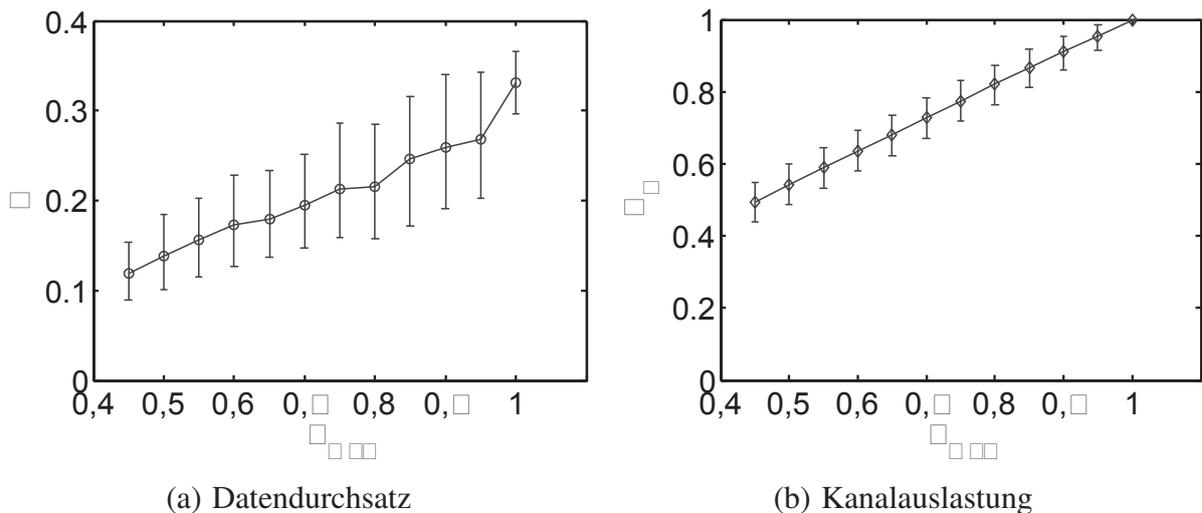


Abbildung 7.1: Datendurchsatz S und Kanalauslastung \tilde{R}_b im ersten Verfahren

Für das erste Regelungsverfahren ist eine Bewertung des Datendurchsatzes allein nicht ausreichend, um auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von SOTIS unter hoher Kanalauslastung zu schließen. Der Datendurchsatz gibt nicht den Inhalt der Datenpakete wieder, sondern bewertet nur die Anzahl von empfangenen Daten pro Zeiteinheit. Zur Bewertung der SOTIS Nachrichtenverzögerungen sind die Kanalzugriffsverzögerungen, bei Übertragung eines Datenpakets, ausschlaggebend.

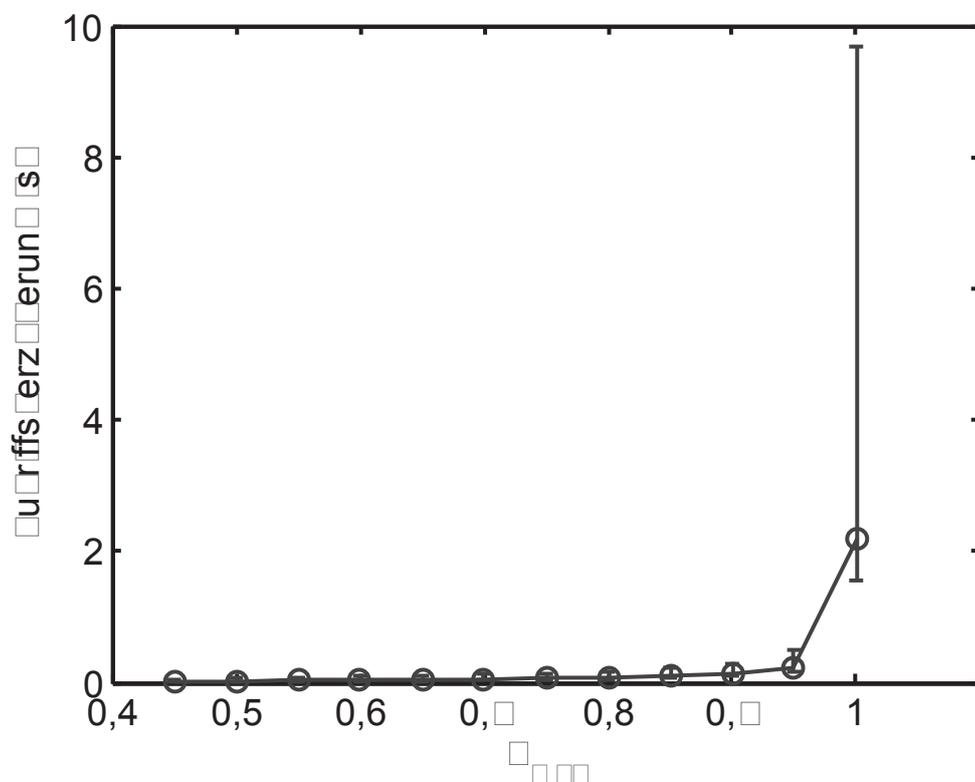


Abbildung 7.2: Kanalzugriffsverzögerung im ersten Verfahren

Abbildung 7.2 zeigt die mittleren CSMA/CA Zugriffsverzögerungen bei Verwendung eines festen Grenzwertes B_{\max} . Für den gewählten Grenzwert $B_{\max} = 1$ verwendet jedes Fahrzeug seine maximale Sendeleistung. Der Datendurchsatz erreicht für diesen Grenzwert einen maximalen Wert, weil jedes Fahrzeug eine größere Übertragungsreichweite hat. Bei hohen Kanalbelegungen wird durch das CSMA/CA *Random-Backoff* Verfahren die Kanalauslastung automatisch re-

duziert, indem Fahrzeuge die Datenübertragung zeitlich zurückstellen. Dadurch verändert sich die Senderate und Datenpakete werden verzögert übertragen.

Die Zugriffsverzögerungen werden am größten, wenn die Fahrzeuge mit maximaler Sendeleistung die Datenpakete übertragen. Für gewählte Grenzwerte in dem Bereich $B_{\max} \leq 0,95$ kann ein Datenpaket mit viel geringeren Verzögerungszeiten übertragen werden. Die Sendeleistung wird reduziert und die gemessene Kanalauslastung anderer Fahrzeuge fällt geringer aus. Fahrzeuge können häufiger auf den Radiokanal zugreifen und ein Datenpaket übertragen. Es ist somit ausreichend, den Grenzwert auf

$$B_{\max} = 0,95 \quad (7.5)$$

festzulegen, um eine geringere *Random-Backoff* Kanalzugriffszeit und einen hohen mittleren Datendurchsatz zu erreichen. In Fahrzeug-zu-Fahrzeug Simulationen unter *ns-2* wird nun die Regelung der Kanalauslastung für den ermittelten Grenzwert bei unterschiedlich hohen Kanalbelegungen untersucht. Der ermittelte Grenzwert $B_{\max} = 0,95$ wird zur Regelung der Kanalauslastung in Gleichung (7.4) eingesetzt.

7.3.2 Kanalauslastung

In Abbildung 7.3 wird die mittlere gemessene Kanalauslastung für das CSMA/CA Verfahren gezeigt. Ohne Regelung der Kanalauslastung erreicht die Kanalauslastung für hohe Kanalbelegungen den maximalen Wert. Wird das Regelungsverfahren nach Gleichung (7.4) angewendet, kann die Kanalauslastung auf den vorgegebenen Grenzwert eingestellt werden.

Für hohe Kanalbelegungen wird durch Steuerung der Sendeleistung eine mittlere Ziel-Kanalauslastung von $\bar{R}_b \approx B_{\max}$ erreicht. Aufgrund der Fahrzeugdynamik und unterschiedlicher Sendeleistungen ist die gemessene Kanalauslastung fahrzeugabhängigen Variationen unterworfen. Dieses Verhalten ist für alle Kanalbelegungen zu beobachten.

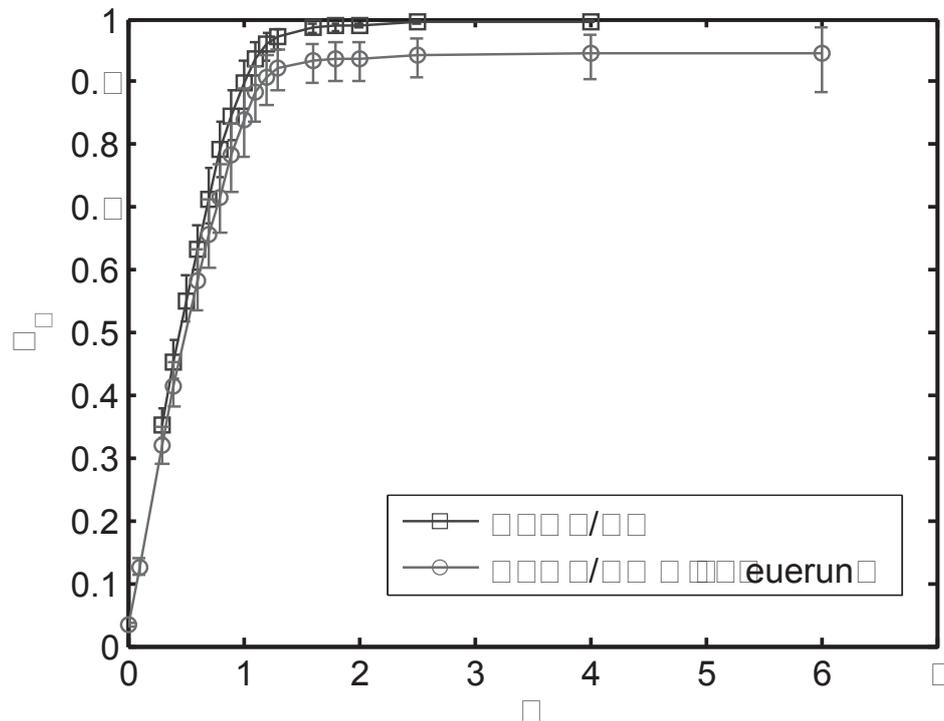


Abbildung 7.3: Kanalauslastung beim ersten Verfahren

7.3.3 SOTIS Nachrichtenverzögerung

Durch Regelung der Kanalauslastung kann die Last auf dem Radiokanal gesenkt werden. Bei geringerer Kanalauslastung werden auch die CSMA/CA Kanalzugriffsverzögerungen reduziert. Indem Fahrzeuge wieder mit geringen Verzögerungszeiten ein SOTIS Datenpaket übertragen können, wird auch die SOTIS Nachrichtenverzögerung gesenkt. Abbildung 7.4 zeigt das Simulationsergebnis der mittleren SOTIS Nachrichtenverzögerungen für unterschiedliche Kanalbelegungen.

Für eine Kanalbelegung von $G = 2,5$ wird eine SOTIS Nachricht aus 10 km Entfernung mit einer Verzögerung von ≈ 23 Sekunden empfangen. Kommt keine Regelung der Kanalauslastung bei $G = 2,5$ zur Anwendung, so wird eine SOTIS Nachricht aus 10 km Entfernung mit einer Verzögerung von 70 Sekunden empfangen. Dieses Ergebnis wurde in Abschnitt 6.3.3 gezeigt. Mit dem Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung konnte somit die Nachrichtenverzögerung um den

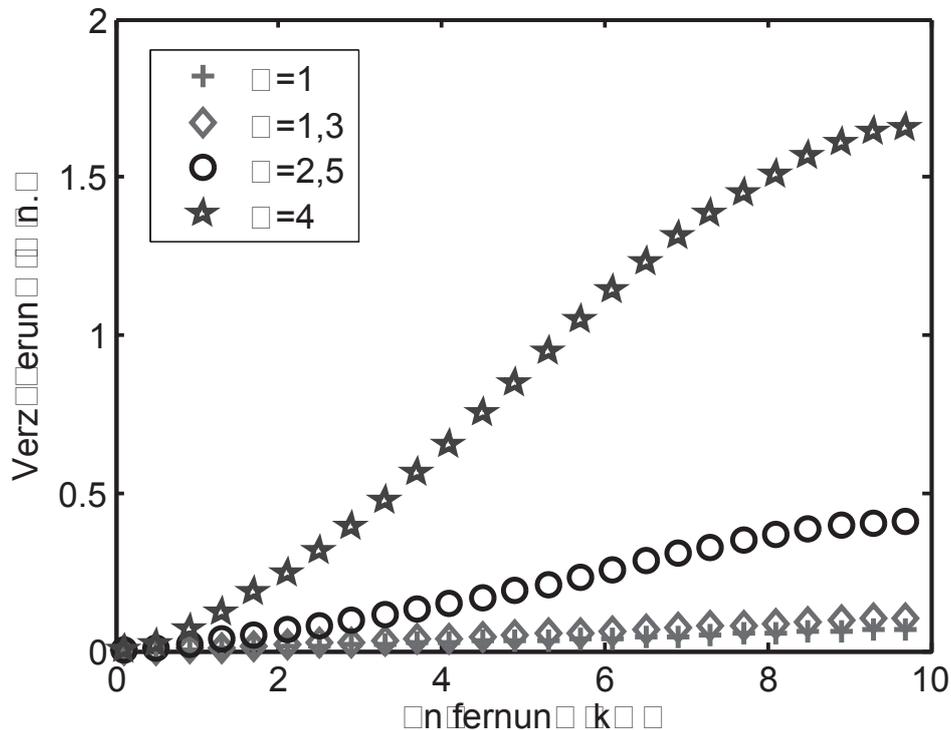


Abbildung 7.4: Entfernungsabhängige SOTIS Nachrichtenverzögerung beim ersten Verfahren

Faktor $1/3$ gesenkt werden. Für Kanalbelegungen $G = 1$ ist die Nachrichtenverzögerung über weite Strecken sehr gering. Für Kanalbelegung $G > 1$ wachsen die Verzögerungszeiten für Nachrichten aus größerer Entfernung, auch bei Regelung der Kanalauslastung. Mit dem Regelungsverfahren können die Verzögerungszeiten aber stark gesenkt werden.

Über eine Ausgleichsgerade lässt sich in Abbildung 7.4, z.B. für die Kanalbelegung $G = 2,5$, die zu erwartende Verzögerungszeit für Nachrichten aus 50 km Entfernung anhand der vorgegebenen Steigung der Verzögerungsgeraden extrapolieren. Die Nachrichten aus 50 km Entfernung werden dann mit einer Verzögerung von 130 Sekunden empfangen. Das entspricht in etwa der SOTIS Verzögerungszeit aus 50 km Entfernung bei einer Ausstattungsrate von $\beta = 0,1$ und einem Verkehrsfluss $q = 3140$ Fz/h/Richtung, siehe Abschnitt 3.5.1. In diesem Simulationszenario wird eine Kanalbelegung von $G = 0,1$ erreicht, welche also weit unterhalb einer möglichen Überlastung des Radiokanals liegt.

7.3.4 Datendurchsatz

Der mittlere Datendurchsatz S in Abbildung 7.5 gibt an, wie viele Datenpakete ein Fahrzeug innerhalb eines gewissen Zeitbereiches empfangen hat. Es werden die Datendurchsätze des CSMA/CA Kanalzugriffsverfahrens ohne und mit Steuerung der Sendeleistung gegenübergestellt. Für Kanalbelegungen $G \leq 1$ folgt der Datendurchsatz des CSMA/CA Verfahrens mit Steuerung der Sendeleistung dem Datendurchsatz des CSMA/CA Verfahrens ohne Steuerung. Für hohe Kanalbelegungen $1 < G < 4$ wird durch die Steuerung der Sendeleistungen der Fahrzeuge ein höherer mittlerer Datendurchsatz erreicht.

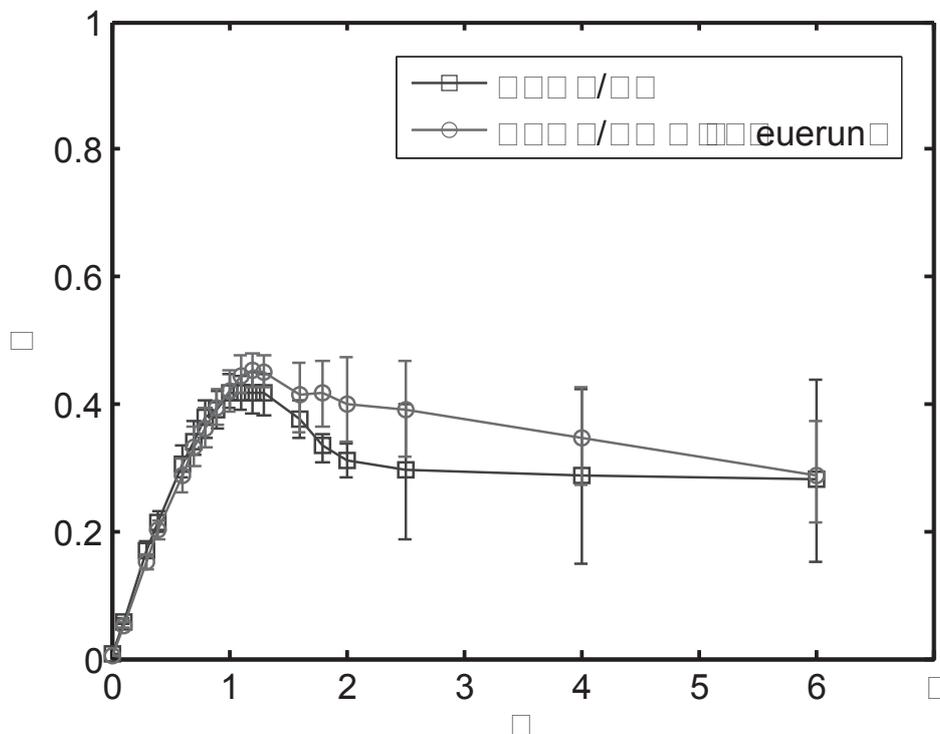


Abbildung 7.5: CSMA/CA Datendurchsatz beim ersten Verfahren

7.3.5 Verteilung der Sendeleistungen

Abbildung 7.6 zeigt die Häufigkeiten der verwendeten Sendereichweiten R für unterschiedliche Kanalbelegungen.

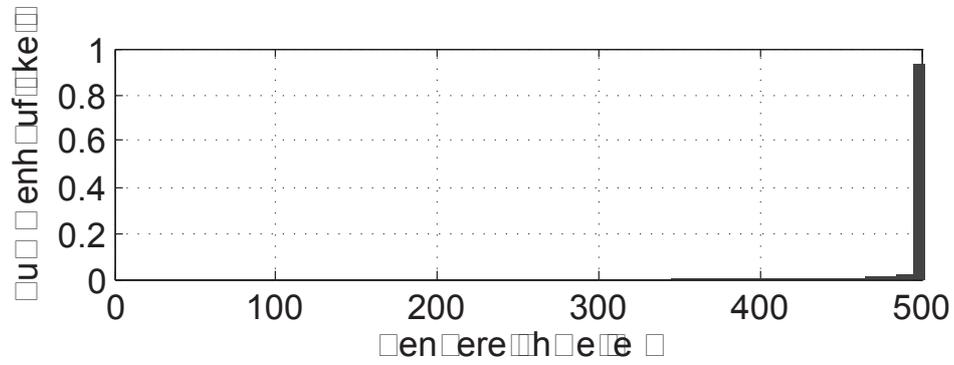
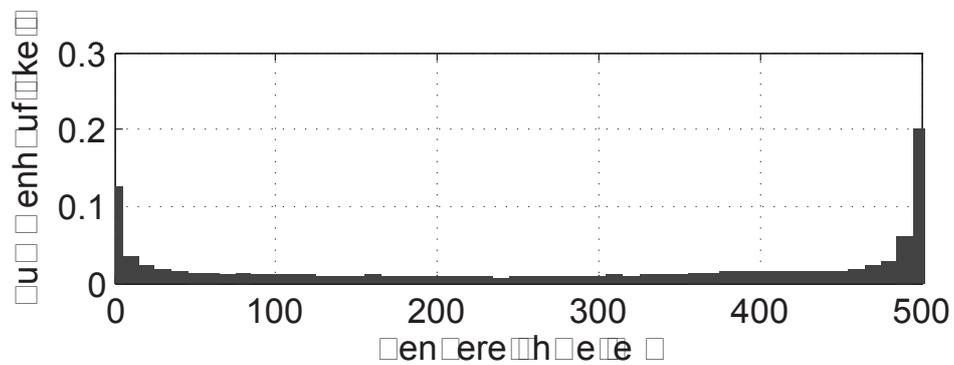
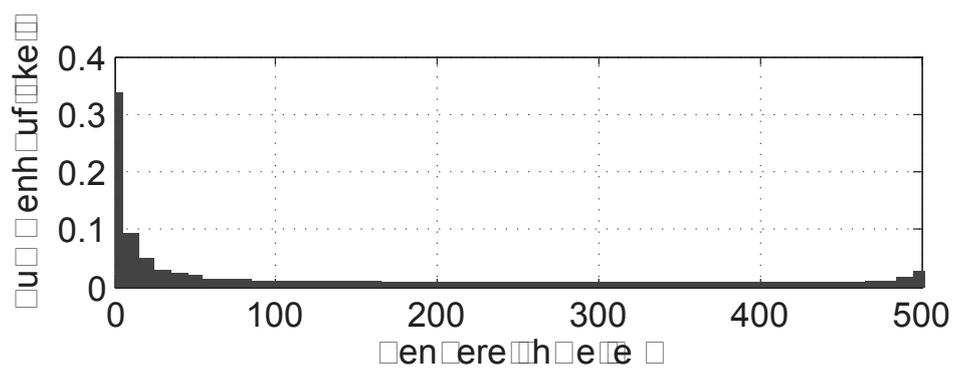
(a) $G = 1$ (b) $G = 2$ (c) $G = 4$

Abbildung 7.6: Häufigkeiten verwendeter Sendereichweiten beim ersten Verfahren

Für niedrige Kanalbelegungen $G \leq 1$ wird die gemessene Kanalauslastung immer geringer als der festgelegte Grenzwert von $B_{\max} = 0,95$ ausfallen und die Fahrzeuge verwenden eine maximale Sendeleistung mit einer Sendereichweite von $R = 500$ m.

Für höhere Kanalbelegungen $G > 1$ messen die Fahrzeuge eine höhere Kanalauslastung $\tilde{R}_b > B_{\max}$. Die Sendeleistungen, und damit die Sendereichweiten, werden nach dem ersten Regelungsverfahren reduziert.

Für sehr hohe Kanalbelegungen $G = 4$ reduzieren ca. 35% der Fahrzeuge ihre Sendeleistung so weit, dass die Sendereichweite $R = 0$ m wird. Durch dieses Verhalten übertragen 35% der Fahrzeuge keine Datenpakete mehr, können aber noch Datenpakete empfangen und somit den eigenen SOTIS Datenspeicher mit empfangenen Geschwindigkeitswerten aktualisieren. Der Rest der Fahrzeuge verwendet Sendeleistungen $P_f > 0$, dies zeigt auch Abbildung 7.6(c).

Die Sendeleistungen werden individuell anhand der gemessenen Kanalauslastung eingestellt. Indem Fahrzeuge ihre Sendeleistung verändern, bewirkt dies eine Veränderung der gemessenen Kanalauslastung anderer Fahrzeuge, somit kann \tilde{R}_b größer oder niedriger ausfallen. Dieser Einfluss zeigt sich in Abbildung 7.6(b) für $G = 2$ und in Abbildung 7.6(c) für $G = 4$. Dadurch, dass einige Fahrzeuge ständig eine sehr hohe Kanalauslastung messen, reduzieren diese Fahrzeuge ihre Sendeleistung sehr stark.

Obwohl ein Anteil von Fahrzeugen eine sehr niedrige Sendeleistung verwendet, kann die Kanalauslastung robust auf einen festen Grenzwert geregelt werden. Indem alle Fahrzeuge die Datenpakete empfangen können, transportiert jedes Fahrzeug die Verkehrsinformationen im SOTIS Datenspeicher, auch nach dem Verlassen des Straßenbereichs mit hoher Kanalauslastung. Obwohl einige Fahrzeuge keine Datenpakete mehr übertragen, wirkt sich dieses Verhalten nicht negativ auf die SOTIS Nachrichtenverzögerungen aus. Das ist das Gute an dem dezentralen und verteilten System, dass immer eine Vielzahl von Fahrzeugen ähnliche Straßensegmentinformationen besitzen.

7.4 Zweites Regelungsverfahren

In einigen Situationen im Straßenverkehr ist es sinnvoll, wenn viele Fahrzeuge ihre Datenpakete übertragen können. Dazu zählen plötzliche Veränderungen in Verkehrssituationen, wenn z.B. Fahrzeuge aus einem Staubereich herausfahren. Für diesen Fall wird im Folgenden ein zweites Verfahren zur Steuerung der Sendeleistung untersucht [BKR09]. Durch dieses Verfahren kann die Verteilung der verwendeten Sendeleistungen über alle Fahrzeuge stärker beeinflusst werden. Es verwenden mehr Fahrzeuge eine ähnliche Sendeleistung.

Im zweiten Verfahren wird ein Kanalauslastungsbereich zwischen zwei vorgegebenen Grenzwerten, zur Steuerung der Sendeleistung, verwendet. Bei diesem Verfahren wird eine obere und eine untere Kanalauslastungsgrenze verwendet, um die Sendeleistungen der Fahrzeuge untereinander möglichst gleichmäßig zu verteilen. In diesem Fall kann die Kanalauslastung gering gehalten werden, während gleichzeitig jedes Fahrzeug eine größtmögliche Sendereichweite besitzt. Jedes Fahrzeug kann die Kanalauslastung über die individuelle Messung von \tilde{R}_b nach Gleichung (7.1) bewerten.

Die Sendeleistung wird nach Gleichung (7.6) angepasst. Somit wird die Sendeleistung reduziert, wenn die gemessene Kanalauslastung größer als ein maximaler Grenzwert B_{\max} ist. Fällt die gemessene Kanalauslastung \tilde{R}_b unter einen minimalen Grenzwert B_{\min} , so wird die Sendeleistung wieder schrittweise erhöht. Liegt die gemessene Kanalauslastung zwischen den beiden Grenzwerten, wird ein mittlerer Sendeleistungswert verwendet. Die Sendeleistung $P_{t,\text{neu}}$ wird über den Leistungswert P_α erhöht bzw. reduziert.

$$P_{t,\text{neu}} = \begin{cases} P_{t,\text{alt}} - P_\alpha & , \text{ für } \tilde{R}_b > B_{\max} \\ (1 - \alpha) \cdot P_{t,\text{empf.}} + \alpha \cdot P_{t,\text{alt}} & , \text{ sonst} \\ P_{t,\text{alt}} + P_\alpha & , \text{ für } \tilde{R}_b \leq B_{\min} \end{cases} \quad (7.6)$$

Die Leistung P_α ist so dimensioniert, dass bei jeder Erhöhung der Sendeleistung sich die Sendereichweite nach Gleichung (7.3) um $\Delta R = 5$ m verändert.

Die mittlere Sendeleistung berechnet sich in einem rekursiven Verfahren mit den empfangenen Leistungswerten $P_{t,\text{empf.}}$ von anderen Fahrzeugen in Übertragungsbereichweite. Der Wert $\alpha \in [0,1]$ legt dabei die Gewichtung auf den empfangenen Leistungswert $P_{t,\text{empf.}}$, oder den letzten verwendeten Leistungswert $P_{t,\text{alt}}$ des eigenen Fahrzeugs.

Um den verwendeten Leistungswert $P_{t,\text{empf.}}$ von anderen Fahrzeugen zu empfangen, wird im SOTIS Datenpaket der Datenkopf um einen Eintrag erweitert. Bei Übertragung eines Datenpakets wird von nun an der verwendete Sendeleistungswert mit an andere Fahrzeuge übermittelt. Nach Tabelle 7.2 ergibt sich damit ein erweitertes SOTIS Datenpaket.

Tabelle 7.2: Erweiterter SOTIS Datenkopf

Wert	Größe	Beschreibung
Pakettyp	1 Bit	<i>SOTIS-Emergency</i> oder <i>SOTIS Comfort</i>
P_t	20 Bit	Sendeleistung in [mW]
Latitude	15 Bit	Für <i>SOTIS-Emergency</i> in [°]
Longitude	16 Bit	Für <i>SOTIS-Emergency</i> in [°]
p_s	21 Bit	Segment ID
t_i	17 Bit	Zeitstempel in [hh]:[mm]:[ss]

Um zu bewerten, in welcher Weise das zweite Regelungsverfahren eine Überlastung des Radiokanals auflösen kann, werden zunächst zwei optimale Grenzwerte B_{max} und B_{min} ermittelt. Für diese Untersuchung verwendet jedes Fahrzeug, zur Übertragung eines SOTIS Datenpakets, eine konstante Senderate. Die einheitliche Systemdatenrate beträgt $C_{\text{max}} = 1$ MBit/s.

Zur Ermittlung der optimalen Grenzwerte B_{max} und B_{min} wird eine Überlastung des Radiokanals mit $G = 2,5$ vorausgesetzt. Bei der Bestimmung der Grenzwerte wird darauf geachtet, dass der mittlere Datendurchsatz möglichst groß und die Kanalzugriffsverzögerung möglichst klein ausfällt. Beide Werte werden als Optimierungskriterien zur Regelung der Kanalauslastung herangezogen. Ein hoher

Datendurchsatz gewährleistet, dass Fahrzeuge über einen Zeitraum eine nahezu konstante Anzahl von SOTIS Datenpaketen empfangen. Ist die CSMA/CA Kanalzugriffsverzögerung gering, werden auch SOTIS Datenpakete aus größeren Entfernungen mit geringeren Verzögerungszeiten empfangen. So wird die Leistungsfähigkeit von SOTIS auch bei hohen Kanalbelegungen konstant gehalten.

Der Abstand zwischen den beiden Grenzwerten wird als konstant vorausgesetzt. Es wird ein Kanalauslastungsbereich von $\Delta B = B_{\max} - B_{\min} = 0,1$ gewählt. Der Auslastungsbereich darf nicht zu groß gewählt werden, da sonst bei hoher Kanalauslastung der untere Grenzwert B_{\min} messtechnisch nicht erreicht wird und so Fahrzeuge ihre Sendeleistung nicht mehr erhöhen. Wird der Bereich zu klein gewählt, liegt die gemessene Kanalauslastung nicht in dem Bereich sondern immer oberhalb von B_{\max} oder unterhalb von B_{\min} . Für diesen Fall würde das Verfahren auf das erste Regelungsverfahren reduziert werden, siehe Abschnitt 7.3.

7.4.1 Optimierung des Grenzwertpaares

Zur Ermittlung eines an Datenrate und Kanalzugriffsverzögerungen optimierten Grenzwertpaares B_{\max} und B_{\min} werden unter *ns-2* unterschiedliche Simulationsszenarien betrachtet. In jedem Szenario wird eine konstante Kanalbelegung von $G = 2,5$ simuliert. Das Szenario besteht aus Fahrzeugen, die sich auf einer Straße mit zwei Fahrspuren in zwei Fahrtrichtungen nach dem *Cellular Automaton* Bewegungsmodell fortbewegen. Die Straßen sind unterteilt in SOTIS Segmente der Länge $l_s = 100$ m. In Tabelle 7.3 sind die Simulations- und Systemparameter festgelegt.

Die Grenzwerte B_{\min} und B_{\max} werden pro Simulation paarweise festgelegt. Sie starten bei $B_{\min} = 0,35$, $B_{\max} = 0,45$ und werden für jede Simulation um 0,05-Schritte erhöht, so dass die maximalen Grenzwertpaare einen Wert von $B_{\min} = 0,9$, $B_{\max} = 1$ annehmen.

Bei $B_{\max} = 1$ und $B_{\min} = 0,9$ wird die Bedingung $\tilde{R}_b > B_{\max}$ aus Gleichung (7.6) für hohe Kanalauslastungen immer erfüllt und die Fahrzeuge verwenden eine maximale Sendeleistung. Somit kann mit diesem Grenzwert keine Regelung der

Tabelle 7.3: Simulationsparameter zur Bestimmung von optimierten Grenzwertpaaren im zweiten Verfahren

Parameter	Wert
MAC-Datenrate	1 MBit/s
$(\frac{S_l}{I_l})_{min}$	10 dB
max. Reichweite R	500 m
max. Reichweite R_{CS}	1000 m
Kanalmodell	Boden-Reflexion
Bewegungsmodell	<i>Cellular Automaton</i>
Fahrzeugverteilung	Exponential

Kanalauslastung erfolgen und eine Überlastung des Radiokanals auflösen.

Als Ergebnis der Simulationen unter *ns-2* ist die mittlere Kanalauslastung, welche über alle Fahrzeuge bestimmt wurde, in Abbildung 7.7(b) gezeigt. Jeder Wert charakterisiert das Ergebnis der Regelung der Kanalauslastung bei Verwendung eines festen Grenzwertes B_{max} und B_{min} , welches auf der x-Achse gezeigt ist. Liegt die mittlere gemessene Kanalauslastung zwischen den Grenzwerten, also $B_{min} < \tilde{R}_b < B_{max}$, hat die Regelung der Kanalauslastung das optimale Ziel erreicht. Das Ergebnis zeigt, dass die Kanalauslastung anhand der Grenzwertpaare optimal geregelt werden kann.

In Abbildung 7.7(a) wird für jeden Wert der zugehörige mittlere Datendurchsatz bei Verwendung von unterschiedlichen Grenzwertpaaren gezeigt. Je kleiner B_{max} bzw. B_{min} gewählt wird, desto geringer wird der Datendurchsatz S . Indem eine geeignete Sendeleistung anhand der gemessenen Kanalauslastung gewählt wird, so dass für $P_{t,neu}$ eine mittlere Sendeleistung verwendet wird, stehen weniger Fahrzeuge in lokaler Empfangsreichweite von anderen Fahrzeugen. Dadurch sinkt die Anzahl von empfangenen Datenpaketen und damit der Datendurchsatz. Die Bewegungen der Fahrzeuge trägt dazu bei, dass sich mal mehr oder mal weniger Fahrzeuge in Empfangsreichweite von anderen Fahrzeugen befinden. Dadurch variiert auch die Anzahl von empfangenen Datenpaketen. Dadurch, dass alle Fahrzeuge bei $B_{max} = 1$ und $B_{min} = 0,9$ eine maximale Sendeleistung ver-

wenden, befinden sich mehr Fahrzeuge in direkter Kommunikationsreichweite, wodurch ein höherer mittlerer Datendurchsatz erzielt wird.

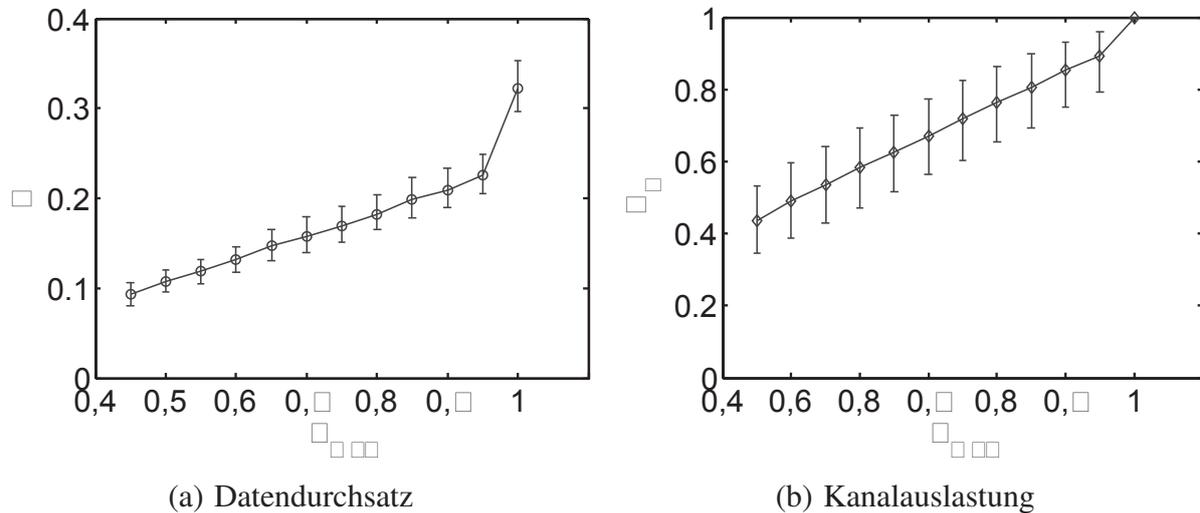


Abbildung 7.7: Datendurchsatz S und Kanalauslastung \tilde{R}_b im zweiten Verfahren

Auch für das zweite Regelungsverfahren ist eine Bewertung des Datendurchsatzes allein nicht ausreichend, um auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von SOTIS unter hoher Kanalauslastung zu schließen. Der Datendurchsatz gibt nicht den Inhalt der Datenpakete wieder, sondern bewertet nur die Anzahl von empfangenen Daten pro Zeiteinheit. Zur Bewertung der SOTIS Nachrichtenverzögerungen sind die Kanalzugriffsverzögerungen, bei Übertragung eines Datenpakets, ausschlaggebend.

Abbildung 7.8 zeigt die mittleren CSMA/CA Zugriffsverzögerungen bei Verwendung von unterschiedlichen Grenzwertpaaren B_{\min} und B_{\max} . Für die gewählten Grenzwerte $B_{\max} = 1$ und $B_{\min} = 0,9$ verwendet jedes Fahrzeug seine maximale Sendeleistung und die Zugriffsverzögerung steigt stark an, weil der Radiokanal immer noch überlastet ist. Bei hohen Kanalbelegungen wird durch das CSMA/CA *Random-Backoff* Verfahren die Kanalauslastung automatisch reduziert, indem Fahrzeuge die Datenübertragung zeitlich zurückstellen. Dadurch verändert sich das Kanalzugriffsverhalten und Datenpakete werden verzögert übertragen.

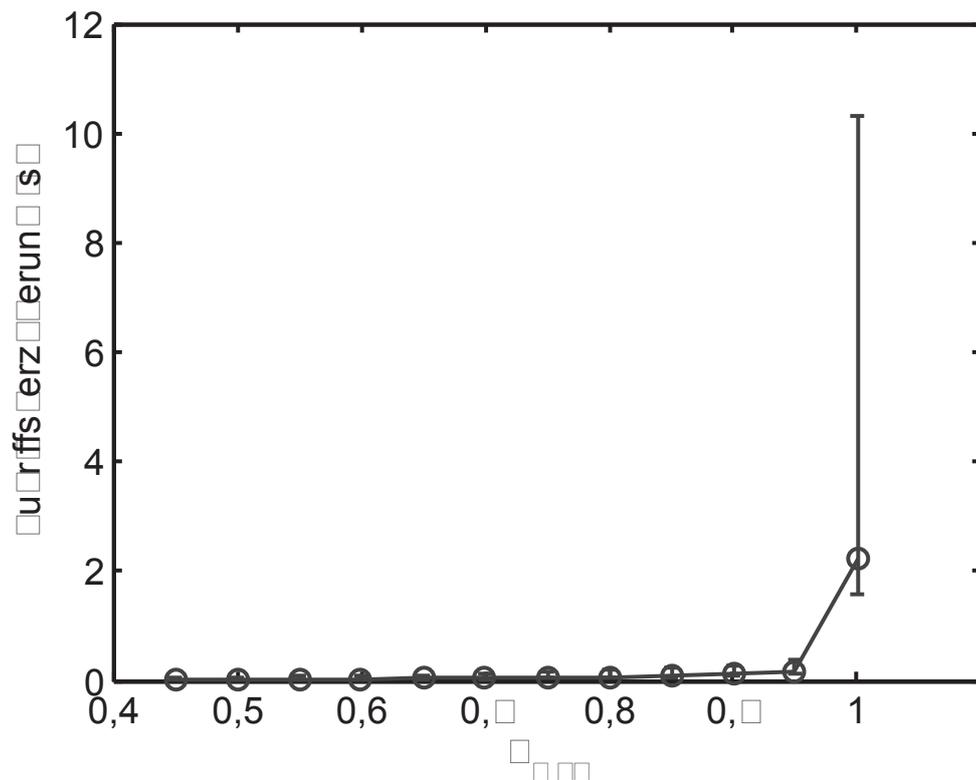


Abbildung 7.8: Kanalzugriffsverzögerung im zweiten Verfahren

Die Zugriffsverzögerungen werden am größten, wenn die Fahrzeuge mit maximaler Sendeleistung die Datenpakete übertragen. Für gewählte Grenzwertpaare in dem Bereich $B_{\max} \leq 0,95$ bzw. $B_{\min} \leq 0,85$ kann ein Datenpaket mit viel geringeren Verzögerungszeiten übertragen werden. Die Sendeleistung wird reduziert, und die gemessene Kanalauslastung anderer Fahrzeuge fällt geringer aus. Fahrzeuge können häufiger auf den Radiokanal zugreifen und ein Datenpaket übertragen. Es ist somit ausreichend, das Grenzwertpaar auf

$$B_{\max} = 0,95 \quad \text{und} \quad B_{\min} = 0,85 \quad (7.7)$$

festzulegen, um eine geringere *Random-Backoff* Kanalzugriffszeit und einen hohen mittleren Datendurchsatz zu erreichen. In Fahrzeug-zu-Fahrzeug Simulationen unter *ns-2* wird nun die Regelung der Kanalauslastung für die ermittelten Grenzwerte bei unterschiedlich hohen Kanalbelegungen untersucht. Die ermit-

telten Grenzwerte $B_{\max} = 0,95$ und $B_{\min} = 0,85$ werden zur Regelung der Kanalauslastung in Gleichung (7.6) eingesetzt.

7.4.2 Kanalauslastung

In Abbildung 7.9 werden die Kanalauslastungen \tilde{R}_b für das CSMA/CA Zugriffsverfahren mit und ohne Regelung der Kanalauslastung gezeigt. Für hohe Kanalbelegungen $G \gg 1$ treten Überlastungen des Radiokanals auf. In diesem Bereich kann durch Einstellung der Sendeleistung die mittlere Kanalauslastung zwischen den Grenzwerten $B_{\max} = 0,95$ und $B_{\min} = 0,85$ gehalten werden.

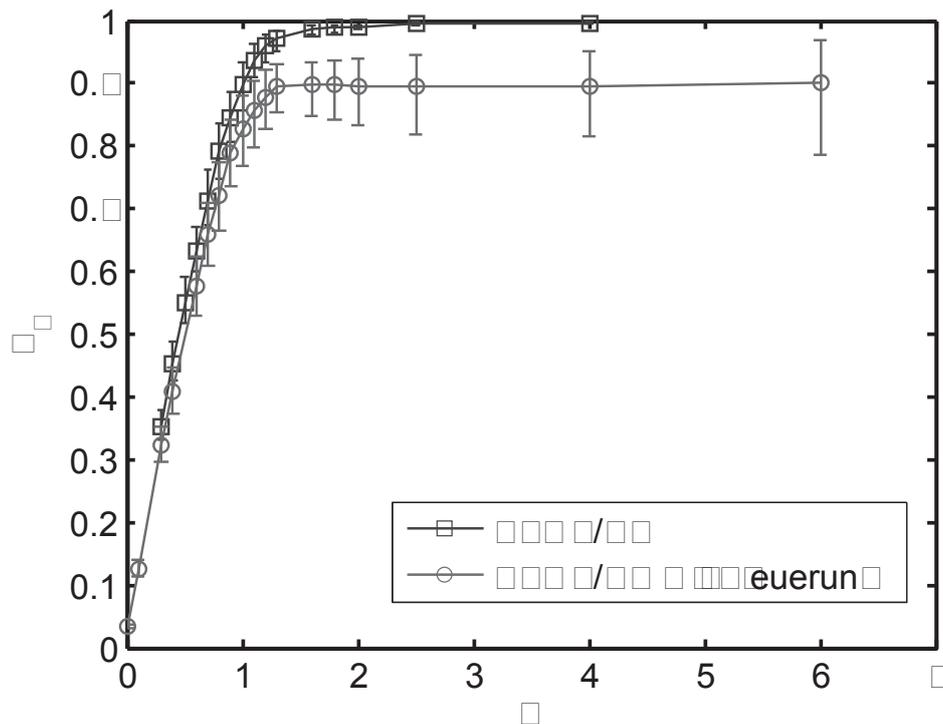


Abbildung 7.9: Kanalauslastung beim zweiten Verfahren

Aufgrund der Fahrzeugdynamik und unterschiedlicher Sendeleistungen ist die gemessene Kanalauslastung fahrzeugabhängigen Variationen unterworfen. Dieses Verhalten ist für alle Kanalbelegungen zu beobachten.

7.4.3 SOTIS Nachrichtenverzögerung

Bei Verwendung der optimierten Grenzwerte $B_{\max} = 0,95$ und $B_{\min} = 0,85$ aus Abschnitt 7.4.1 kann die CSMA/CA Kanalzugriffsverzögerung drastisch gesenkt werden. Indem Fahrzeuge mit geringen Verzögerungszeiten ein SOTIS Datenpaket übertragen wird auch die SOTIS Nachrichtenverzögerung gesenkt. Abbildung 7.10 zeigt die Auswertung der Nachrichtenverzögerungen aus den Simulationsdaten.

Für die Kanalbelegung $G \leq 1$ ist die Kanalauslastung $\tilde{R}_b < 1$ und es kommt noch zu keiner Überlastung des Radiokanals, daher sinken die SOTIS Nachrichtenverzögerungen. Für die Kanalbelegung $G > 1$ kehrt sich dieser Effekt um, und es kann zu größeren Verzögerungszeiten kommen.

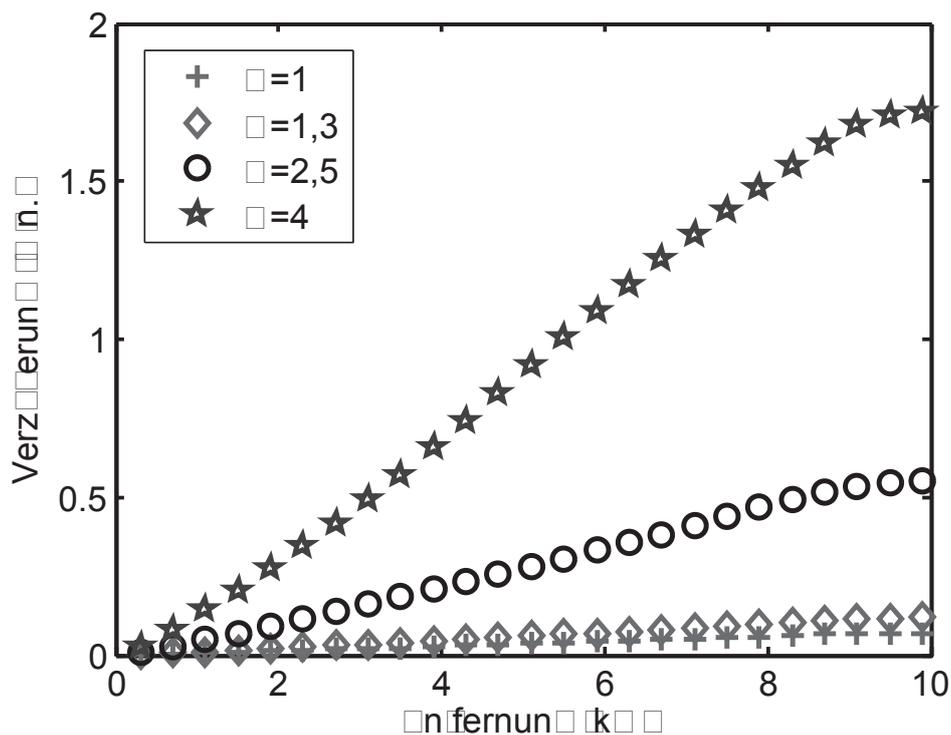


Abbildung 7.10: Entfernungsabhängige SOTIS Nachrichtenverzögerung beim zweiten Verfahren

Bei Regelung der Kanalauslastung während einer Kanalbelegung von $G = 2,5$ wird eine SOTIS Nachricht aus 10 km Entfernung mit einer Verzögerung von ca.

34 Sekunden empfangen. Ohne Regelung der Kanalauslastung hatte die SOTIS Nachrichtenverzögerung bei $G = 2,5$ und einer Entfernung von 10 km eine Verzögerung von ca. 70 Sekunden, siehe Abschnitt 6.3.3. Also konnte durch Regelung der Kanalauslastung in einem Bereich zwischen $B_{\max} = 0,95$ und $B_{\min} = 0,85$ die Nachrichtenverzögerung um ca. die Hälfte reduziert werden.

Über eine Ausgleichsgerade lässt sich in Abbildung 7.10 z.B. für die Kanalbelegung $G = 2,5$ die zu erwartende Verzögerungszeit für Nachrichten aus 50 km Entfernung anhand der vorgegebenen Steigung der Verzögerungsgeraden extrapolieren. Die Nachrichten aus 50 km Entfernung werden dann mit einer Verzögerung von 170 Sekunden empfangen. Das entspricht in etwa der SOTIS Verzögerungszeit aus 50 km Entfernung bei einer Ausstattungsrate von $\beta = 0,1$ und einem Verkehrsfluss $q = 3140$ Fz/h/Richtung, siehe Abschnitt 3.5.1. In diesem Simulationszenario wird eine Kanalbelegung von $G = 0,1$ erreicht, welche also weit unterhalb einer möglichen Überlastung des Radiokanals liegt.

7.4.4 Datendurchsatz

Der mittlere Datendurchsatz S in Abbildung 7.11 gibt an, wie viele Datenpakete ein Fahrzeug innerhalb eines gewissen Zeitbereiches empfangen hat. Es werden die Datendurchsätze des CSMA/CA Kanalzugriffsverfahrens ohne und mit Steuerung der Sendeleistung gegenübergestellt. Der Datendurchsatz bei Regelung der Kanalauslastung zeigt nur geringe Abweichungen gegenüber dem Datendurchsatz ohne Regelung. Anhand der geringen Abweichungen vom mittleren Datendurchsatz zeigt sich, dass alle Fahrzeuge einen sehr ähnlichen Datendurchsatz messen.

Indem beim zweiten Regelungsverfahren zwischen dem Kanalauslastungsbereich B_{\max} und B_{\min} eine mittlere Sendeleistung verwendet wird, kann ein nahezu konstanter Datendurchsatz für alle Fahrzeuge erreicht werden.

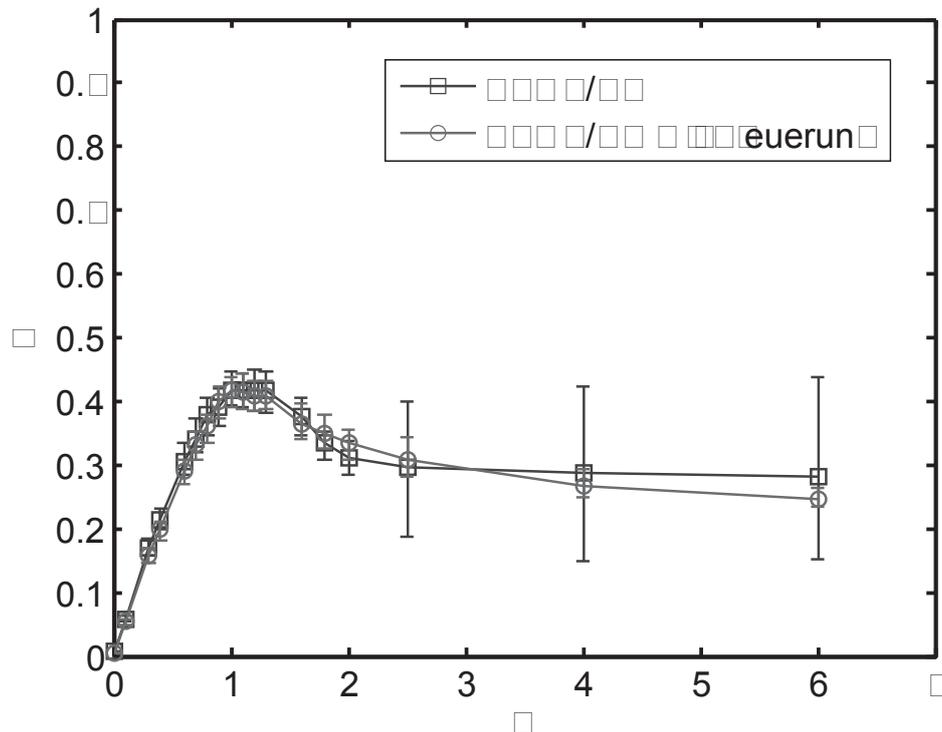


Abbildung 7.11: CSMA/CA Datendurchsatz beim zweiten Verfahren

7.4.5 Verteilung der Sendeleistungen

Abbildung 7.12 zeigt die Häufigkeiten der verwendeten Sendereichweiten R für unterschiedliche Kanalbelegungen.

Für sehr geringe Kanalbelegungen $G \ll 1$ liegt die gemessene Kanalauslastung unter dem minimalen Grenzwert $\tilde{R}_b < B_{\min}$, d.h. die Fahrzeuge erhöhen ihre Sendeleistung bis zu der maximal möglichen Sendereichweite $R = 500$ m. Die maximale Sendeleistung ist durch das Funk IF vorgegeben.

Für höhere Kanalbelegungen $G \gg 1$ steigt die Häufigkeit der Verwendung von geringeren Sendeleistungen zur Senkung der Überlast auf dem Radiokanal. Die Häufigkeit, dass Fahrzeuge Ihre Sendeleistung soweit reduzieren, dass $P_t = 0$ wird, steigt mit wachsender Kanalbelegung. Für sehr hohe Kanalbelegungen $G = 4$ reduzieren ca. 28 % der Fahrzeuge ihre Sendeleistung so weit, dass die Sendereichweite $R = 0$ m wird. Durch dieses Verhalten übertragen 28 % der Fahr-

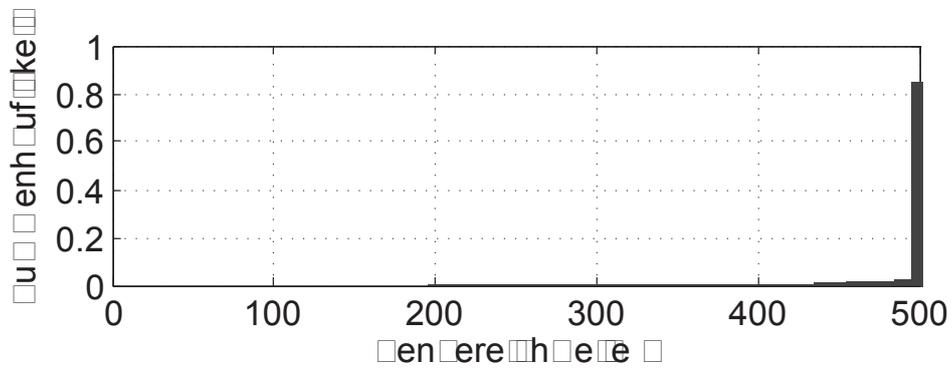
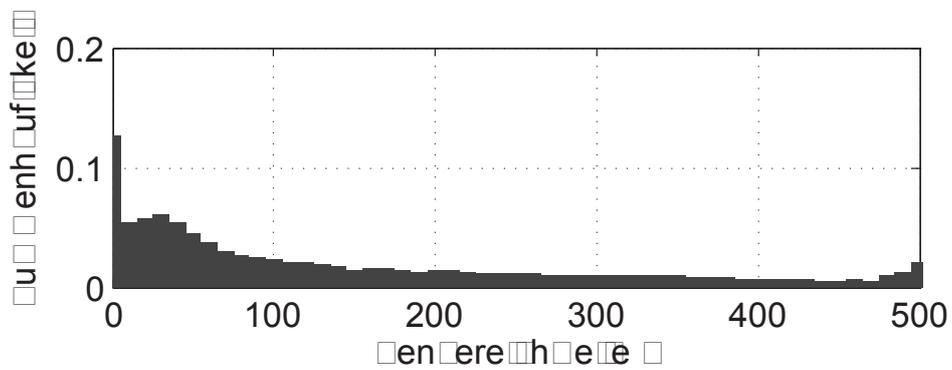
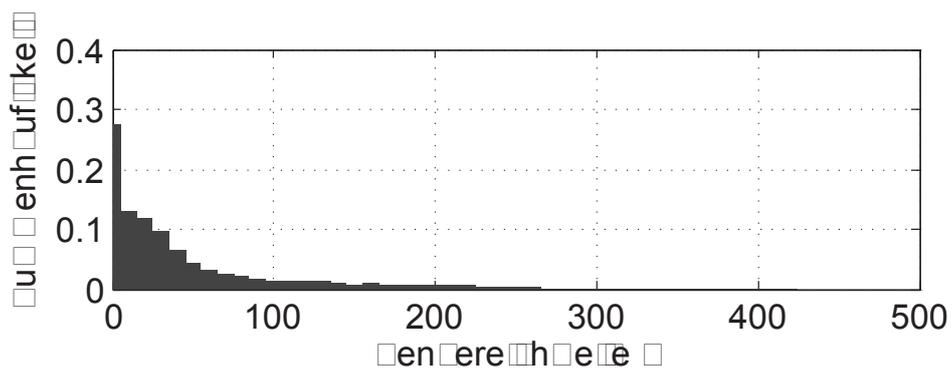
(a) $G=1$ (b) $G=2$ (c) $G=4$

Abbildung 7.12: Häufigkeiten verwendeter Sendereichweiten beim zweiten Verfahren

zeuge keine Datenpakete mehr, können aber noch Datenpakete empfangen und somit den eigenen SOTIS Datenspeicher mit empfangenen Geschwindigkeitswerten aktualisieren. Der Rest der Fahrzeuge verwendet Sendeleistungen $P_t > 0$, dies zeigt auch Abbildung 7.12(c).

Die Sendeleistungen werden individuell anhand der gemessenen Kanalauslastung eingestellt. Indem Fahrzeuge ihre Sendeleistung verändern, bewirkt dies eine Veränderung der gemessenen Kanalauslastung anderer Fahrzeuge, somit kann \tilde{R}_b größer oder niedriger ausfallen. Fällt die gemessene Kanalauslastung in dem Bereich zwischen B_{\max} und B_{\min} wird eine mittlere Sendeleistung, welche sich aus den verwendeten Sendeleistungen anderer Fahrzeuge in Übertragungreichweite berechnet, verwendet. Es zeigt sich in Abbildung 7.12(b) und Abbildung 7.12(c), dass dadurch ein größerer Anteil von Fahrzeugen eine niedrigere Sendeleistung verwendet, so dass die Übertragungreichweite $R > 0$ m wird. Die Nutzung von bestimmten Sendeleistungen kann somit gleichmäßiger über die Fahrzeuge in Sendereichweite zueinander verteilt werden.

Obwohl auch im zweiten Verfahren ein großer Anteil von Fahrzeugen eine sehr niedrige Sendeleistung verwendet, kann die Kanalauslastung robust zwischen zwei Grenzwerten geregelt werden. Indem alle Fahrzeuge die Datenpakete empfangen können, transportiert jedes Fahrzeug die Verkehrsinformationen im SOTIS Datenspeicher, auch nach dem Verlassen des Straßenbereichs mit hoher Kanalauslastung. Obwohl einige Fahrzeuge keine Datenpakete mehr übertragen können, wirkt sich dieses Verhalten nicht negativ auf die SOTIS Nachrichtenverzögerungen aus. Das ist das Gute an dem dezentralen und verteilten System, dass immer eine Vielzahl von Fahrzeugen ähnliche Straßensegmentinformationen besitzen.

7.5 Verfahrensvergleich

Beide Verfahren haben gezeigt, dass sie in der Lage sind, die Kanalauslastung kontrolliert zu regeln. Bei einer Überlastung des Radiokanals ($\tilde{R}_b \geq 1$) ist die Regelung der Kanalauslastung entscheidend, um SOTIS Verkehrsnachrichten aus

größerer Entfernung weiterhin mit geringen Verzögerungszeiten zu empfangen. Die Unterschiede bei den SOTIS Nachrichtenverzögerungen in beiden Verfahren sind marginal. Im ersten Verfahren reduziert ein hoher Prozentsatz an Fahrzeugen die Sendeleistung so weit, dass $P_t = 0$ wird, während der andere Teil eine hohe Sendeleistung verwendet. Im zweiten Verfahren kann dieser Anteil reduziert werden und die Streuung der verwendeten Sendeleistungen zwischen den Fahrzeugen sinkt auch bei hohen Kanalbelegungen.

Im ersten Verfahren bestand die Schwierigkeit darin, die Sendeleistung für alle Fahrzeuge gleichmäßig zu steuern. Es wurde ein Grenzwert B_{\max} zur Regelung der Kanalauslastung verwendet. Dies war nicht ausreichend, um eine gleichmäßige Verwendung der Sendeleistung zu gewährleisten. Stattdessen kommt es bei hohen Kanalbelegungen zu einem getrennten Verhalten der Fahrzeuge in ihrer Verwendung der Sendeleistung. Einige Fahrzeuge reduzieren ihre Sendeleistung so stark, dass $P_t = 0$ wird, während andere Fahrzeuge eine maximale Sendeleistung verwenden. Diese Beschaffenheit wird durch den selbstorganisierenden Charakter der Steuerung der Sendeleistung hervorgerufen. Jedes Fahrzeug ist ein mobiler Funkknoten, der seine Umgebung anhand der Messung der Kanalauslastung beobachtet. Bei hohen Kanalauslastungen steuern die Funkknoten ihre Sendeleistung, dies passiert nicht synchron zu anderen Fahrzeugen. Sobald ein Fahrzeug seine Sendeleistung reduziert, wird von benachbarten Funkknoten ein weniger stark ausgelasteter Radiokanal beobachtet. Dadurch, dass Fahrzeuge ihre Sendeleistung reduzieren, wird bei anderen Fahrzeugen eine Erhöhung der Sendeleistung bewirkt, weil z.B. die gemessene Kanalauslastung $\tilde{R}_b < B_{\max}$ ausfällt. So entsteht in einem eingeschwungenen Zustand eine ungleichmäßige Verteilung der verwendeten Sendeleistungen zwischen den Fahrzeugen.

Im zweiten Verfahren wurden zwei Grenzwerte B_{\max} und B_{\min} zur Regelung der Kanalauslastung verwendet. Zusätzlich überträgt jedes Fahrzeug seinen momentanen Leistungswert mit dem SOTIS Datenpaket. Die empfangenen Sendeleistungen werden verwendet, um einen mittleren Sendeleistungswert zu berechnen. Dieser Wert gibt Aufschluss darüber, welche mittlere Leistung die Fahrzeuge in Kommunikationsreichweite verwendet haben. Liegt die gemessene Kanalauslas-

tung zwischen den Grenzwerten B_{\max} und B_{\min} , wird die eigene Sendeleistung an die mittlere Sendeleistung angepasst. Mit diesem Verfahren wird eine stärkere einheitliche Sendeleistung in Übertragungreichweite der Fahrzeuge erreicht. Die Verteilung der Sendereichweiten zeigt weniger Streuung zwischen den Fahrzeugen. Dadurch wird auch ein stabilerer Datendurchsatz zwischen den Fahrzeugen erzielt.

VIII

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Verkehrsinformationssystemen hat mit der Entwicklung des Automobils begonnen. Mit dem Ausbau des Straßennetzes und dem Anstieg der Verkehrsdichte werden Verkehrsinformationssysteme immer wichtiger, weil sie Informationen über Staus oder Unfälle bereitstellen. Diese Informationen werden auch heutzutage noch über UKW Rundfunk empfangen. Hier verlassen sich die meisten Fahrer auf die kontinuierlich gesendeten Verkehrsnachrichten mit Staumeldungen. Diese Informationen lassen sich jedoch meistens nur alle 30 Minuten empfangen, welches dazu führen kann, dass der Fahrer eine wichtige Staumeldung zeitlich zu spät erfährt. Zusätzlich ist ortskundiges Wissen nötig, um zu bewerten, wie weit das eigene Fahrzeug von dem Staubereich entfernt liegt. Das frühzeitige Erkennen von Verkehrsbehinderungen stellt somit eine hohe Herausforderungen an den Fahrer.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verkehrsinformationssystem betrachtet, das auf einer selbstorganisierenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation basiert. Beim *Self-Organising Traffic Information System* (SOTIS) übernimmt jedes Fahrzeug die Aufgabe, Verkehrsdaten, wie z.B. Fahrzeuggeschwindigkeit und Position, zu sammeln und auszuwerten. Dafür besitzt jedes SOTIS Fahrzeug ein Kommunikationsmodul, eine digitale Karte des Straßennetzes und einen Satellitennavigationsempfänger (z.B. GPS). Gezeigt wurde, dass in der Einführungsphase eines SOTIS Systems trotz geringer Ausstattungsraten von 5 % Verkehrsnachrichten aus 50 km Entfernung mit einer Verzögerung von 10 Minuten, je nach Verkehrsdichte, empfangen werden können. Dieses Ergebnis zeigt, dass das Fahrzeug-zu-Fahrzeug basierte SOTIS System die Leistungsfähigkeit heutiger Verkehrsinformationssysteme, schon in einer Einführungsphase, verbessert.

Überall dort, wo Fahrzeuge eine Straße befahren, können Verkehrsdaten gesammelt werden. Dadurch können flächendeckend auch in Stadtgebieten Verkehrsinformationen bereitgestellt werden, was heutige Verkehrsinformationssysteme nicht leisten.

Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit ist der selbstorganisierende Kanalzugriff bei hoher Auslastung auf dem Radiokanal. Unter dem Gesichtspunkt der hohen SOTIS Ausstattungsraten in Stadtgebieten verhält sich der Radiokanal völlig anders als wie bei niedrigen Ausstattungsraten. Die Anzahl von Fahrzeugen ist eine Größe zur Bestimmung der Kommunikationslast, welche auf Autobahnen und in Großstädten viel höher ausfällt, als auf Landstraßen. Das *Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance* (CSMA/CA) wird in dieser Arbeit als geeignetes Zugriffsverfahren mit selbstorganisierenden Eigenschaften eingesetzt. Es zeigt sich, dass bei hoher Kommunikationslast es zu Überlastungen auf dem Radiokanal kommen kann. Dadurch kommt es für einzelne Fahrzeuge zu hohen Zugriffsverzögerungen oder Blockierungen auf dem Radiokanal. Geringe SOTIS Nachrichtenverzögerung sind notwendig, um aktuelle Verkehrsnachrichten zu empfangen. Durch eine hohe Kommunikationslast steigt die SOTIS Nachrichtenverzögerung und damit sinkt die Leistungsfähigkeit des Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationssystems. Während bei sehr geringer Kanalbelegung aber hohen Ausstattungsraten SOTIS Verkehrsnachrichten aus 50 km Entfernung in weniger als einer Minute vorliegen, werden Nachrichten bei zweifacher Überlastung des Radiokanals mit einer Verzögerung von ca. 6 Minuten empfangen.

Zwei Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung werden in dieser Arbeit untersucht. Die Kanalauslastung kann gesenkt werden, wenn alle Fahrzeuge bei Überlast auf dem Radiokanal ihre Sendeleistung reduzieren. Dadurch wird der Radiokanal lokal weniger stark belastet und die CSMA/CA Zugriffsverzögerungen sinken. Bei starker Kommunikationslast wird mit diesem Verfahren erreicht, dass SOTIS Verkehrsnachrichten wieder mit sehr geringen Verzögerungszeiten empfangen werden.

Zur Steuerung der Sendeleistung müssen die Fahrzeuge die Kanalauslastung selbstständig messen. Der Begriff der Kanalauslastung wird in dieser Arbeit

neuartig untersucht. Dafür wird für das CSMA/CA Verfahren im *broadcast* Modus die Kanalauslastung analytisch bestimmt. Auch der Datendurchsatz des CSMA/CA Verfahren wird auf neuartigem Weg analytisch bestimmt. Hierfür wird der *Random-Backoff* Zeitbereich als freier Zeitbereich des Radiokanals bewertet. Die analytischen Herleitungen werden mit Simulationsergebnissen aus einem Fahrzeug-zu-Fahrzeug Netzwerk verglichen. Es zeigt sich eine gute Approximation der analytisch bestimmten Werte.

Das erste Regelungsverfahren verwendet einen Grenzwert zur Bewertung der Kanalauslastung bei 95 %. Liegt die gemessene Kanalauslastung über diesem Grenzwert, reduziert das Fahrzeug seine Sendeleistung, bis die gemessene Kanalauslastung unterhalb der Schwelle liegt. Es zeigt sich, dass mit diesem Verfahren die Kanalauslastung kontrolliert geregelt werden kann. Da nur ein Grenzwert zur Regelung verwendet wird, streuen die verwendeten Sendeleistungen fahrzeugübergreifend sehr stark. Dadurch kommt es zu erhöhter Anzahl von Fahrzeugen, die ihre Sendeleistung zu Null setzen.

Das zweite Regelungsverfahren verbessert das erste Regelungsverfahren hinsichtlich der Verteilung der verwendeten Sendeleistungen. Dieses Verfahren verwendet zwei Grenzwerte zur Bewertung der Kanalauslastung zwischen 95 % und 85 % Auslastung. Zusätzlich überträgt jedes Fahrzeug seinen momentanen Leistungswert in dem SOTIS Datenpaket an andere Fahrzeuge. Liegt die gemessene Kanalauslastung zwischen den Grenzwerten, wird die mittlere Sendeleistung aus den empfangenen Leistungswerten verwendet. So verwenden alle Fahrzeuge in Kommunikationsreichweite einen mittleren Leistungswert. Bei diesem Verfahren ist die fahrzeugübergreifende Streuung der verwendeten Leistungswerte geringer und mindestens 10 % weniger Fahrzeuge setzen ihre Sendeleistung zu Null.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit des Fahrzeug-zu-Fahrzeug basierten SOTIS Kommunikationssystems unter niedriger und hoher Kommunikationslast konstant hoch gehalten werden kann. Das Verfahren zur Regelung der Kanalauslastung unterstützt die selbstorganisierenden Eigenschaften von SOTIS und sorgt dafür, dass in jeder Verkehrslage SOTIS Verkehrsnach-

richten mit geringen Verzögerungszeiten empfangen werden. Bei hohen Ausstattungsraten können so Verkehrsnachrichten aus 50 km Entfernung in Sekunden empfangen werden.

Abkürzungsverzeichnis

3G	Third Generation Mobile
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
CAN	Controller Area Network
CD	Collision Detection
CDMA	Code Division Multiple Access
DAB	Digital Audio Broadcasting
DIFS	Distributed Inter Frame Space
FCD	Floating Car Data
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPD	Floating Phone Data
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
ID	Identification
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Interface
LKW	Lastkraftwagen
LOS	Line of Sight

MAC	Medium Access Scheme
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
NLOS	No Line of Sight
NoW	Network on Wheels
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PHY	Physikalische Kommunikationsschicht
PKW	Personenkraftwagen
PRNET	Packet Radio Network
RDS	Radio Data System
RDU	Road Side Units
SDMA	Space Division Multiple Access
SOTIS	Self-Organising Traffic Information System
SURAN	Survivable Adaptive Radio Network
TDMA	Time Division Multiple Access
TMC	Traffic Message Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Symbolverzeichnis

A	Parameter der <i>Bunched</i> Exponentialverteilung
a	Normiertes <i>Random-Backoff</i> Zeitintervall
α	Gewichtungsfaktor
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
B	<i>BUSY</i> Zeitbereich
b	Normiertes <i>Random-Backoff</i> Zeitintervall
B_s	Systembandbreite
B_c	Kohärenzbandbreite
$\beta\sigma$	Normalverteilte Zufallsvariable
B_{\max}	Maximaler Grenzwert der Kanalauslastung
B_{\min}	Minimaler Grenzwert der Kanalauslastung
B_{SOTIS}	SOTIS Systembandbreite
χ	Wahrscheinlichkeit von freien Fahrzeugen
$\chi\sigma$	Normalverteilte Zufallsvariable
c_w	Wettbewerbsfenster
C	Datenrate
D	Physikalische Antennenausdehnung
d	Distanz

d_0	minimaler Abstand
δ	Dirac-Impuls
Δt	Zeitabschnitt
d_f	Distanz des Fernfeldes
d_{\min}	Mindestabstand
d_s	Datenvektor
C_{SOTIS}	SOTIS Systemdatenrate
F	Verteilungsfunktion
F^{-1}	Inverse Verteilungsfunktion
f	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
G	Kanalbelegung
γ	Parameter der verschobenen Exponentialverteilung
G_r	Antennengewinn des Empfängers
G_t	Antennengewinn des Senders
h_i	Komplexwertige Amplitude
h_r	Antennenhöhe des Empfängers
h_t	Antennenhöhe des Sender
h_T	Kanalimpulsantwort im Tiefpassbereich
I	<i>IDLE</i> Zeitbereich
i	Index
I_l	Interferenzleistung

L	Verlustfaktor
λ	Wellenlänge
l_s	Länge eines Straßensegments
n	Anzahl von Fahrzeugen
N_{cs}	Anzahl Fahrzeuge in <i>carrier-sense</i> Reichweite
n_d	Dämpfungskoeffizient
n_{fz}	Anzahl empfangener Segmentdatensätze
n_{mhop}	Anzahl von Fahrzeugen in <i>Multi-Hop</i> Reichweite
N_s	Anzahl Segmentdatensätze
n_s	Anzahl
N_{spur}	Anzahl von Fahrspuren
N_{tx}	Anzahl Fahrzeuge in Sendereichweite
P	Wahrscheinlichkeit
P_α	Leistungsfaktor
φ	Verkehrsdichte
φ_{max}	Maximale Verkehrsdichte
p_{hn}	Wahrscheinlichkeit eines <i>Hidden Node</i>
P_L	Pfaddämpfung
P_r	Empfangsleistung
P_{suc}	Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung
P_t	Sendeleistung

$P_{t,empf.}$	Empfangene Sendeleistung anderer Fahrzeuge
q	Verkehrsfluss
R_b	Kanalauslastung
R_{cs}	<i>Carrier-Sense</i> Reichweite
R	Sendereichweite
S	Datendurchsatz
S_l	Signalleistung
p_s	Straßensegment ID
σ	Standardabweichung
S_l/I_l	Signal-zu-Interferenz Verhältnis
S/N	Signal-zu-Rausch Verhältnis
s_p	Datenpaketgröße
t	Zeitliche Dauer
τ	Ausbreitungsverzögerung
τ_{sotis}	Mittlere entfernungsabhängige SOTIS Nachrichtenverzögerung
τ_b	<i>Random-Backoff</i> Zeitintervall
τ_{difs}	<i>Distributed Inter Frame Space</i> Zeitintervall
τ_{hop}	Mittlere Verzögerung
τ_{max}	Maximale Ausbreitungsverzögerung
T_{gap}	Zeitliche Dauer der Kommunikationslücke
\tilde{R}_b	Gemessene Kanalauslastung

T_m	Beobachtungszeit
T_{mhop}	<i>Multi-Hop</i> Verzögerung
T_s	Senderate
t_s	Zeitstempel für ein Segment
U	Kanalausnutzung
u	Gleichverteilte Zufallsvariable
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{mhop}	Ausbreitungsgeschwindigkeit bei <i>Multi-Hop</i> Kommunikation
v_s	Geschwindigkeit für ein Segment
W_i	Gleichverteilte Zufallszahl
X	Zeitbereich einer Paketkollision
ξ	Zufallsvariable der veränderlichen Pfaddämpfung
z	Normiertes DIFS Zeitintervall

Literaturverzeichnis

- [Abr70] ABRAMSON, Norman: The ALOHA System - Another Alternative for Computer Communications. In: *AFIPS Conference Proceedings* 37 (1970), S. 281–285
- [Ann99] ANN, Ulrich: *Selbstorganisierende Datenfunknetze für Verkehrsanwendungen*. Mensch & Buch Verlag, Berlin, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 1999
- [Ash62] ASHBY, W. R.: Principles of the Self-Organizing System. In: *Principles of Self-Organization*, H. Von Foerster and G. W. Zopf, Jr. (eds.), Pergamon Press (1962), S. 255–278
- [Bas10] BAST: *Bundesanstalt für Straßenwesen*. <http://www.bast.de>. Version: September 2010
- [BKR08] BUSCHE, Holger ; KHORAKHUN, Chonlatee ; ROHLING, Hermann: Congestion Control for VANETs based on Power or Rate Adaptation. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, Germany* 5 (2008)
- [BKR09] BUSCHE, Holger ; KHORAKHUN, Chonlatee ; ROHLING, Hermann: Congestion Control in a Self-Organized Car-to-Car Radio Network. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, Germany* 6 (2009)
- [BKR10] BUSCHE, Holger ; KHORAKHUN, Chonlatee ; ROHLING, Hermann: Self-organized Update Rate Control for Inter-Vehicle Networks. In: *Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, Germany* 7 (2010)

- [BMW56] BECKMANN, Martin ; MCGUIRE, C. B. ; WINSTEN, Christopher B.: *Studies in the Economics of Transportation / Cowles Commission for Research in Economics* by Yale University Press: New Haven. 1956. – Forschungsbericht
- [BT06] BULENT TAVLI, Wendi H.: *Mobile Ad Hoc Networks - Energy-Efficient Real-Time Data Communications*. Netherlands : Springer, 2006
- [Bu09] BIRLE, Christian ; U.A.: *AKTIV-CoCar Adaptive and Cooperative Technologies for Intelligent Traffic - Cooperative Cars Co-Car*. Feasibility Study Technology Business and Dissemination. <http://www.aktiv-online.org/>. Version: 2009
- [Bun11] BUNDESAMT, Statistisches: Verkehrsunfälle. In: *Verkehr Fachserie 8* (2011), März. <http://www.destatis.de>
- [BV01] BANA, S.V. ; VARAIYA, P.: Space division multiple access (SDMA) for robust ad hoc vehicle communication networks. In: *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*, 2001, S. 962 –967
- [Cou07] COUCH, Leon W.: *Digital and Analog Communication Systems*. Seventh Edition. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007
- [Cow75] COWAN, Richard J.: Useful Headway Models. In: *Transportation Research, Pergamon Press* 9 (1975), Nr. 6, S. 371–375
- [Dir08] DIRSCHERL, Hans-Christian: TMCpro- Stauwarnungen für Bundes- und Landstraßen. In: *PC Welt* (2008), 11. November
- [Dre07] DRESSLER, Falko: *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. New York : John Wiley and Sons, 2007 (Wiley Series in Communications Networking and Distributed Systems)

- [EBK10] EMMELMANN, Marc ; BOCHOW, Bernd ; KELLUM, Christopher: *Vehicular Networking Automotive Applications and Beyond*. West Sussex, UK : John Wiley and Sons, 2010
- [Ebn05] EBNER, André: *Selbstorganisierende Datenfunknetze für Anwendungen im Straßenverkehr*. Cuvillier Verlag, Göttingen, Technische Universität Hamburg-Harburg, Cuvillier Verlag, Göttingen, Dissertation, Mai 2005
- [ERLH02] EBNER, Andre ; ROHLING, Hermann ; LOTT, Matthias ; HALFMANN, Rüdiger: Decentralized Slot Synchronization in Highly Dynamic Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'02), Honolulu, Hawaii* (2002), Oktober
- [EWER03] ENKELMANN, Wilfried ; WISCHHOF, Lars ; EBNER, Andre ; ROHLING, Hermann: FleetNet-Anwendungen für mobile Ad-hoc-Netzwerke. In: *Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, PIK 26* (2003), Dezember, Nr. 4, S. 197–203
- [EWR04] EBNER, Andre ; WISCHHOF, Lars ; ROHLING, Hermann: Aspects of Decentralized Time Synchronization in Vehicular Ad hoc Networks. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004), Hamburg, Germany* (2004), April, S. 67–72
- [FNS⁺08] FESTAG, A. ; NOECKER, G. ; STRASSBERGER, M. ; LÜBKE, A. ; BOCHOW, B. ; TORRENT-MORENO, M. ; SCHNAUFER, S. ; EIGNER, R. ; CATRINESCU, C. ; KUNISCH, J.: NoW-Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg* (2008), S. 211–216
- [GD10] GRAY, R.M. ; DAVISSON, L.D.: *An Introduction to Statistical Signal Processing*. Cambridge University Press, 2010

- [GG05] GUNTER, Y. ; GROBMANN, H. P.: Usage of wireless LAN for inter-vehicle communication. In: *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2005, S. 408–413
- [Grü00] GRÜNHEID, Rainer: *Vielfachzugriffsverfahren für die Multiträger Übertragungstechnik*. VDI Verlag, Düsseldorf, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2000
- [HBL⁺01] HARTENSTEIN, Hannes ; BOCHOW, Bernd ; LOTT, Matthias ; EBNER, Andre ; RADIMIRSCH, Markus ; VOLLMER, Dieter: Position-Aware Ad Hoc Wireless Networks for Inter-Vehicle Communications: the Fleetnet Project. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, MobiHoc 2001, Long Beach, California, USA* (2001), Oktober
- [IEE99] IEEE: *802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, August 1999
- [KL99] KIM, Jae H. ; LEE, Jong K.: Performance of Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance Protocols in Wireless LANs. In: *Wireless Personal Communications* 11 (1999), S. 161–183
- [KM99] KOPITZ, Dietmar ; MARKS, Bev: Traffic and Travel Information broadcasting - protocols for the 21st century. In: *European Broadcasting Union - Technical Review* (1999)
- [KT75] KLEINROCK, Leonard ; TOBAGI, Fouad A.: Packet Switching in Radio Channels: Part 1-Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics. In: *IEEE Transactions on Communications* 23 (1975), Dezember, Nr. 12, S. 1400–1416
- [Lut96] LUTTINEN, R. T.: *Statistical Analysis of Vehicle Time Headways*. Gummerus Printing, Saarijärvi, Helsinki University of Technology Lahti Center, Dissertation, 1996

- [MBR10] MEYERHOFF, Thomas ; BUSCHE, Holger ; ROHLING, Hermann: A Self-organizing Wireless Sensor Data Network for on-board Applications. In: *In Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2010), Hamburg, Germany 7 (2010)*, March 23rd-24th
- [McL89] MCLEAN, J. R.: *Two-Lane Highway Traffic Operations: Theory and Practice*. New York: Gordon and Breach Science Publishers., 1989
- [Mus04] MUSEUM, Deutsches: *Meisterwerke aus dem Deutschen Museum I*. 2004 <http://www.deutsches-museum.de>. – ISBN 3-932306-17-1
- [Mös02] MÖSER, Kurt: *Die Geschichte des Automobils*. Bd. 1. Auflage. Campus Verlag, 2002
- [Pap91] PAPOULIS, Athanasios: *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. Fourth. McGraw-Hill, 1991
- [PKC⁺09] PAIER, Alexander ; KAREDAL, Johan ; CZINK, Nicolai ; DUMARD, Charlotte ; ZEMEN, Thomas ; TUFVESSON, Fredrik ; MOLISCH, Andreas ; MECKLENBRÄUKER, Christoph: Characterization of Vehicle-to-Vehicle Radio Channels from Measurements at 5.2 GHz. In: *Wireless Personal Communications* 50 (2009), S. 19–32
- [Plö09] PLÖSSL, Klaus: *Mehrseitig sichere Ad-hoc-Vernetzung von Fahrzeugen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, Universität Regensburg, Dissertation, 2009
- [Pät02] PÄTZOLD, Matthias: *Mobile Fading Channels*. New York : John Wiley and Sons, 2002
- [Rap02] RAPPAPORT, Theodore: *Wireless Communications*. Second Edition. Prentice Hall PTR, 2002

- [Ras01] RASCHER, Kai: *Untersuchungen zum Kanalzugriff in selbstorganisierenden Datenfunknetzen*. Shaker Verlag Aachen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, Juni 2001
- [RB09a] ROHLING, Hermann ; BUSCHE, Holger: Self-Organizing Traffic Information System based on Inter-Vehicle Communications. In: *European Journal of Navigation* 7 (2009), April, Nr. 1, S. 24–28
- [RB09b] ROHLING, Hermann ; BUSCHE, Holger: Self-Organizing Traffic Information System based on Inter-Vehicle Communications. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, Germany* 6 (2009), März
- [RB09c] ROHLING, Hermann ; BUSCHE, Holger: SOTIS: A Self-Organizing Traffic Information System based on Car-2-Car Communications. In: *Workshop on Self-Organising Wireless Sensor and Communication Networks, Hamburg, Germany* 1 (2009), Oktober
- [Rie10] RIEDL, Heinrich: *Das Lexikon der Kraftfahrzeugtechnik*. Bd. überarbeitete Auflage. Motorbuch Verlag, 2010
- [RR02] RAMANATHAN, Ram ; REDI, Jason: A Brief Overview of Ad Hoc Networks: Challenges and Directions. In: *IEEE Communications Magazine, 50th Anniversary Issue* (2002), S. 20–22
- [RS90] ROM, Raphael ; SIDI, Moshe: *Multiple Access Protocols: Performance and analysis*. New York : Springer Verlag, 1990
- [Sch07] SCHWIEGER, Volker: Positioning within the GSM Network, 6th FIG Regional Conference, San José, Costa Rica, 12-15 November 2007
- [Sch10] SCHULZE, M.: *The European project PRE-DRIVE C2X, Daimler AG*. <http://www.pre-drive-c2x.eu>. Version: 2010

- [SS93] SCHADSCHNEIDER, A. ; SCHRECKENBERG, M.: Cellular Automaton Models and Traffic Flow. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 26 (1993), S. 679–683
- [Tan03] TANENBAUM, Andrew S.: *Computer Networks 4th Edition*. New Jersey : Prentice Hall, 2003
- [TK75] TOBAGI, Fouad A. ; KLEINROCK, Leonard: Packet Switching in Radio Channels: Part 2-The hidden terminal problem in carrier sense multiple access and the busy tone solution. In: *IEEE Transactions on Communications* 23 (1975), Dezember, Nr. 12, S. 1417–1433
- [VDA07] VDA, Verband der Automobilindustrie e. V.: Verkehrsmanagement für eine effiziente Infrastrukturnutzung. In: *Auto Jahresbericht 2007 - Verkehr* (2007), S. 117 – 119
- [Wei11] WEISS, Christian: *Sim-TD, Sichere Intelligente Mobilität-Testfeld Deutschland*. Projektprofil 2011. <http://www.simtd.de>. Version: März 2011
- [WER05] WISCHHOF, L. ; EBNER, A. ; ROHLING, H.: Information dissemination in self-organizing intervehicle networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6 (2005), März, Nr. 1, S. 90 – 101
- [Wis07] WISCHHOF, Lars: *Self-Organizing Communication in Vehicular Ad Hoc Networks*. Shaker Verlag, Aachen, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, Dezember 2007
- [WR05a] WALDEN, M.C. ; ROWSELL, F.J.: Urban propagation measurements and statistical path loss model at 3.5 GHz. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE* 1A (2005), Juli, S. 363 – 366 Vol. 1A

- [WR05b] WISCHHOF, L. ; ROHLING, H.: Congestion control in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. IEEE Int Vehicular Electronics and Safety Conf*, 2005, S. 58–63
- [YV05] YANG, X. ; VAIDYA, N.: On physical carrier sensing in wireless ad hoc networks. In: *Proc. IEEE 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies INFOCOM 2005* Bd. 4, 2005, S. 2525–2535
- [ZKVS02] ZHAO, Xiongwen ; KIVINEN j. ; VAINIKAINEN, P. ; SKOG, K.: Propagation characteristics for wideband outdoor mobile communications at 5.3 GHz. In: *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 20 (2002), April, Nr. 3, S. 507 –514
- [ZSW⁺07] ZANG, Yunpeng ; STIBOR, L. ; WALKE, B. ; REUMERMAN, H.-J. ; BARROSO, A.: A Novel MAC Protocol for Throughput Sensitive Applications in Vehicular Environments. In: *Proc. VTC2007-Spring Vehicular Technology Conf. IEEE 65th*, 2007, S. 2580–2584

Index

A		Exponentialverteilung.....	80
Ad-Hoc	16	bunched	82
ALOHA	69	Verschobene	81
Ausbreitungsmodelle	56	F	
B		Fahrzeug-zu-Fahrzeug	19
Boden-Reflexion	56	Fahrzeug-zu-Infrastruktur	9
broadcast	22	Fahrzeug-zu-X	7
C		Fahrzeugabstände	79
CDMA	67	FDMA	67
CSMA/CA.....	70	Floating Car Data.....	21
Paketkollision.....	73	Freiraumausbreitung	57
D		H	
Datenaggregation	29	Hidden Node.....	97
Datendurchsatz	104, 133	I	
ALOHA.....	104	Informationsreichweite.....	43
CSMA/CA	105, 115	Informationsverbreitung.....	40
Simulation.....	144	K	
Datenpaket	32	Kanalauslastung	88, 92
Dezentral	69	Messtechnisch	122
Dezentral organisiert.....	14	Regelung.....	121
DIFS	71	Steuerung.....	130, 142
Distributed Coordination Function .	71	Kanalbelegung	89
E		Kohärenzbandbreite	37
Emergency Report.....	27	Komfortsystem	26

L		small-scale	56
Log-distance Pfaddämpfung	58	SOTIS	21, 25
log-normal shadowing	59	Hohe Kanalbelegung	118
M		Straßensegmente	27
MAC	55	Systembandbreite	36
MANET	17	T	
N		TDMA	66
Nachrichtenverzögerung . 44, 131, 143		U	
P		Uebertragungsrate	36
Pfaddämpfung	59	V	
Pfaddämpfungsmodell	57	VANET	18
R		Verkehrsfluss	83
Random-Backoff	72	Statistik	84
Reservierungsverfahren	66	Verkehrslaitsystem	26
Routing	17	Verkehrsmodell	79
broad-, multi-, unicast	17	Verkehrsstatistik	83
S		Z	
SDMA	68	Zentral organisiert	9
Selbstorganisation	22	Zugriffsverzögerungen	116
Sendeleistung			
Steuerung	123		
Sendereichweite	60		
Signal-zu-Interferenz	62		
Signalausbreitung	55		
fading	56		
large-scale	56		

Lebenslauf

Name	Busche
Vorname	Holger
Geburtsdatum	10.04.1980
Geburtsort, -land	Hamburg, Deutschland
08.1987 - 06.1991	Grundschule in Hamburg
08.1991 - 07.1997	<i>Charlotte-Paulsen Gymnasium</i> in Hamburg
08.1997 - 06.2000	<i>Technisches Gymnasium</i> in Hamburg
10.2000 - 03.2006	Studium der Elektrotechnik an der <i>Technischen Universität Hamburg-Harburg</i> Abschluss: Diplom
04.2005 - 08.2005	Fachpraktikum bei <i>AIRBUS Deutschland GmbH</i> in Hamburg
07.2006 - 07.2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der <i>Technischen Universität Hamburg-Harburg</i>
10.2010 - heute	Systems Engineering Manager bei <i>ATLAS ELEKTRONIK GmbH</i> in Bremen

