

# **Relevanzbasierte Nachrichtenselektion für die serientaugliche Integration von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation**

**Dissertation**

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität Tübingen  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von  
Jakob Breu  
aus Bad Kötzing

Tübingen  
2016

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen  
Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation:	8. Mai 2017
Dekan:	Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel
1. Gutachter:	Prof. Dr. Michael Menth
2. Gutachter:	Prof. Dr. Ralf Guido Herrtwich

# Danksagung

Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen, jeder auf seine Weise. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die in den vergangenen fünf Jahren mich und mein Promotionsprojekt unterstützt haben.

Der erste Dank gebührt meinem Betreuer und Forschungspartner Prof. Dr. habil. Michael Menth vom Lehrstuhl für Kommunikationsnetze an der Eberhard Karls Universität Tübingen. Die Betreuung meiner Arbeit als Industriedoktorand war eine Zusatzbelastung in Kontrast zu den Tätigkeiten der anderen Forschungsbereiche des Lehrstuhls und der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Angesichts dessen bin ich für sein Engagement und seine Expertise besonders dankbar. Dies schließt auch die intensive gemeinsame Arbeit an wissenschaftlichen Publikationen ein, die durch seine kritischen Rückmeldungen und hilfreichen Beiträge sehr gelungen sind.

Großen Dank schulde ich außerdem Prof. Dr. Ralf Guido Herrtwich für seinen Rat und seine kritischen Reflexionen meiner Arbeiten. Ich bin stolz darauf, mit ihm als international bekanntem Experten für Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren zusammengearbeitet zu haben.

Eine wissenschaftliche Arbeit kann nur so gut sein wie das Arbeitsumfeld und die Unterstützung durch Kollegen sowie Vorgesetzte. Meine Team- und Abteilungsleiter Dr. Christian Weiß, Mathias Hartl, Matthias Schulze und Christoph von Hugo haben mir ermöglicht, meine Forschungen nachzugehen und meine Publikationen durch die Freigabe von Finanzmitteln unterstützt. Dadurch konnte ich in den wissenschaftlichen Austausch mit anderen Forschern treten. Viele Kollegen haben mich unterstützt, ob direkt durch ihre Rückmeldungen und Ideen oder indirekt durch die Bereitstellung von Software und Hardware. Dazu gehören Dr. Achim Brakemeier, Miro Bogdanovic, Manuel Schoch, Max Wittal, Ting Yuan, Qi Chen, Daniel Jiang, Erich Lankes, Dieter Seeberger und Dr. Wilfried Enkelmann. Einen besonderen Dank möchte ich Michael Höfling entrichten, der als Doktorand am Lehrstuhl kurz vor mir viele Hürden des

Promotionsverfahrens überwunden hat und mich dadurch vor so mancher bürokratischer Stolperfalle warnte.

Mein letzter Dank könnte auch an erster Stelle stehen. Er richtet sich an meine Freunde und Familie und besonders an meine Ehefrau Carina Breu. Sie hat mir unzählige Male den Rücken freigehalten und mich auch in den schwierigsten Phasen unterstützt. Sie und meine Töchter Franziska und Rosa Breu mussten oft auf mich verzichten. Eine in weiten Teilen nebenberufliche Promotion hat die Gelegenheiten für gemeinsame Zeit und Erlebnisse manchmal empfindlich verringert. Meinen Eltern und Großeltern haben meine Talente erkannt und stets gefördert. Meine Freunde, stellvertretend für viele andere seien Markus Eisenbarth, Philipp Lutz und Andreas Fischer genannt, haben mich angespornt, immer noch einen Schritt weiter zu gehen. In jeder Hinsicht.



## Kurzfassung

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ermöglicht neue Anwendungen durch den direkten Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen. In den vergangenen Jahrzehnten wurde dazu intensiv geforscht und eine standardisierte Technologie auf der Grundlage von WLAN geschaffen. Die Fahrzeuge erfassen damit andere Verkehrsteilnehmer in ihrem Umfeld, auch über Sichthindernisse hinweg. Bei der Umsetzung von Seriensystemen stehen die Fahrzeughersteller vor der Herausforderung, dass unter Umständen höhere Raten an Nachrichten empfangen werden als von den Fahrzeugsystemen verarbeitet werden können. Diese Arbeit betrachtet diese Problemstellung erstmals umfänglich und schlägt eine Lösung vor, um auch in Überlastsituationen die Funktionalität sicherheitsrelevanter Anwendungen zu gewährleisten. Zunächst werden die auftretenden Nachrichtenraten anhand einer gekoppelten Verkehrs-, Kommunikations- und Anwendungssimulation quantifiziert. Es bestätigt sich, dass auch unter alltäglichen Bedingungen Überlast auftreten kann. Daher wird vorgeschlagen, die Verarbeitung empfangener Nachrichten um zwei Module zu ergänzen, eine Relevanzschätzung und einen Selektionsmechanismus. Die Relevanzschätzung hat die Aufgabe, jede Nachricht nach ihrer Relevanz zu bewerten und mit einem Relevanzwert zu versehen. Je früher sich der Sender und Empfänger einer Nachricht begegnen, desto höher wird die Relevanz bewertet. Der Selektionsmechanismus wählt auf Basis dieser Relevanzwerte die jeweils relevanteste Nachricht zur Weiterverarbeitung aus und verwirft bei Überlast weniger relevante Nachrichten. Sowohl die Relevanzschätzung als auch der Selektionsmechanismus sollten möglichst effizient implementierbar sein. Die Evaluation beider Module zeigt auf, dass die vorgeschlagenen Konzepte für einen Serieneinsatz geeignet sind und die Entwicklung stabiler Gesamtfahrzeugsysteme ermöglichen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.3	Beitrag dieser Arbeit . . . . .	3
1.4	Struktur . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Fahrzeugtechnik . . . . .	5
2.1.1	Innovationsbereiche im Fahrzeug . . . . .	5
2.1.2	Vernetzung von Steuergeräten und Sensoren . . . . .	9
2.1.3	Anforderungen . . . . .	10
2.2	Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation . . . . .	12
2.2.1	Begriffsdefinitionen und Abgrenzung . . . . .	13
2.2.2	Chronologie . . . . .	15
2.2.3	Chancen und Risiken . . . . .	18
2.2.4	Einführungsszenarien . . . . .	21
2.2.5	Taxonomie und Ausprägungen . . . . .	23
2.2.6	Anwendungen . . . . .	32
2.2.7	Aktuelle Standards . . . . .	38
2.2.8	Ausblick auf zukünftige Erweiterungen . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Simulationsumgebung</b>	<b>65</b>
3.1	Verkehrssimulation . . . . .	65
3.1.1	Straßenkarten . . . . .	66
3.1.2	Umsetzung . . . . .	67
3.2	Kommunikationssimulation . . . . .	67
3.2.1	Umsetzungsvarianten . . . . .	68
3.2.2	Definition der Kanallast . . . . .	69
3.2.3	Signalabschwächung für ein Sender-Empfänger-Paar	70
3.2.4	Erweiterung für mehrere Sender . . . . .	71
3.2.5	Kombination der Funktionen . . . . .	72

## Inhaltsverzeichnis

3.2.6	Einschränkungen . . . . .	73
3.3	Anwendungssimulation . . . . .	74
3.4	Simulationskoppelung . . . . .	75
<b>4</b>	<b>Analyse der Nachrichtenraten</b>	<b>77</b>
4.1	Ähnliche Untersuchungen . . . . .	78
4.2	Simulierte Szenarien . . . . .	78
4.3	Generierung von Nachrichten . . . . .	79
4.4	Kanallast . . . . .	82
4.5	Empfangsraten . . . . .	85
4.6	Aktualisierungszeit . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Systemarchitektur</b>	<b>95</b>
5.1	Standardarchitektur . . . . .	95
5.1.1	Fahrzeugsensorik und Straßenkarte . . . . .	97
5.1.2	CAM-Generierung . . . . .	97
5.1.3	DENM-Generierung . . . . .	97
5.1.4	Untere Kommunikationsschichten . . . . .	97
5.1.5	Mobilfunk . . . . .	98
5.1.6	Sicherheit . . . . .	98
5.1.7	Anwendungen . . . . .	98
5.1.8	Anzeige und Aktorik . . . . .	99
5.2	Integrationsherausforderungen . . . . .	100
5.2.1	Hohe Nachrichtenraten . . . . .	100
5.2.2	Anwendungen . . . . .	101
5.2.3	Automobile Anforderungen, Qualität und Kosten . . . . .	105
5.2.4	Kryptografische Mechanismen . . . . .	106
5.2.5	Sensorgenauigkeit . . . . .	107
5.3	Erweiterungen im Empfangspfad . . . . .	108
5.3.1	Relevanzschätzung . . . . .	108
5.3.2	Selektion . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Relevanzschätzung</b>	<b>111</b>
6.1	Relevanzfunktion . . . . .	111
6.2	Distanzfunktionen . . . . .	113
6.2.1	Eingangsgrößen und Koordinatentransformation . . . . .	113
6.2.2	Konstante Bewegung . . . . .	114
6.2.3	Dynamische Bewegung . . . . .	117

6.3	Kritik . . . . .	126
6.4	Evaluation . . . . .	128
6.4.1	Grafische Analyse . . . . .	128
6.4.2	Qualität . . . . .	135
6.4.3	Implementierung und Performance . . . . .	144
6.5	Andere Ansätze . . . . .	147
6.5.1	Räumliche und zeitliche Relevanzschätzung . . . . .	147
6.5.2	Kartenbasierte Verfahren . . . . .	152
6.5.3	Maschinelles Lernen . . . . .	154
6.5.4	Bedarf und Bedarfserfüllung . . . . .	154
6.5.5	Validität und Reputation . . . . .	156
6.5.6	Diverse Konzepte . . . . .	156
6.5.7	Gesamtbewertung . . . . .	157
<b>7</b>	<b>Nachrichtenselektion</b>	<b>159</b>
7.1	Anforderungen . . . . .	159
7.1.1	Laufzeit und Speicherbedarf . . . . .	159
7.1.2	Einfügen von Nachrichten . . . . .	160
7.1.3	Extraktion der relevantesten Nachricht . . . . .	160
7.1.4	Entfernen von Nachrichten . . . . .	160
7.1.5	Aktualisieren von Nachrichten . . . . .	161
7.1.6	Altern von Nachrichten . . . . .	161
7.2	Umsetzung . . . . .	161
7.2.1	Prioritätswarteschlange . . . . .	162
7.2.2	Vermeidung von Redundanzen . . . . .	164
7.2.3	Alterung der Relevanzwerte . . . . .	167
7.3	Evaluation . . . . .	168
7.3.1	Evaluationsumgebung . . . . .	168
7.3.2	Relevanzwerte der Nachrichten . . . . .	170
7.3.3	Wartezeiten . . . . .	174
7.3.4	Erfassung der Umgebung . . . . .	175
<b>8</b>	<b>Schluss</b>	<b>183</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	183
8.2	Ausblick . . . . .	187
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>188</b>

*Inhaltsverzeichnis*

**Literaturverzeichnis**

**191**

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Seit der Erfindung des Automobils hat sich dessen stetige Weiterentwicklung vielfach als Treiber von Innovationen erwiesen. Die Innovationen haben sich dabei auf immer neue Disziplinen ausgeweitet. Lagen sie in den frühen Jahren im chemischen und mechanischen Umfeld, setzte mit der Halbleitertechnik und der darauf aufbauenden Informationstechnik eine neue Phase ein, die gänzlich neue Entwicklungen ermöglichte und immer noch ermöglicht. Insbesondere durch die Entwicklung passiver und aktiver Sicherheitssysteme konnten die Unfälle und die Todeszahlen im Straßenverkehr drastisch reduziert werden [12, 13, 14]. In Kombination klassischer mechanischer und zukünftiger informationstechnischer Innovationsbereiche werden von den Entwicklern der Automobilbranche auch die heutigen *Megatrends* verfolgt: Sicherheit im Straßenverkehr, Mobilität in sich verändernden gesellschaftlichen Verhältnissen, effizienter Umgang mit den natürlichen Ressourcen und Komfort für den Fahrer [15, 16].

Die Vernetzung von Geräten, Diensten und Personen zu einem weltumspannenden System aus Internet und unabhängigen Teilnetzwerken hat sich seit den Ursprüngen in den 1960er Jahren immer weiter beschleunigt [17]. In Form von mobilen Rechnern und neuerdings Smartphones hat sich die mobile Kommunikation als ein – wenn nicht der – Innovationstreiber der vergangenen Dekade erwiesen. Parallel dazu hat sich das Konzept der Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit straßenseitig fest installierten Kommunikationsknoten aus groben Skizzen zu einer allgemein anerkannten Innovation im Automobilbereich entwickelt. Sukzessive wurden im Rahmen der internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeit bei den Herstellern, Zulieferern, Straßenbetreibern und öffentlichen Einrichtungen die technischen und regulatorischen Hürden aus dem Weg geräumt [18, 19]. So kann man im Jahr 2016 feststellen, dass diese Technologie für die Kunden einiger Automobilhersteller bereits verfügbar ist und vor dem Sprung auf den Massenmarkt steht [11, 20].

## 1 Einleitung

Die Kombination von Automobiltechnik und Kommunikationsnetzen ermöglicht neuartige Systeme, welche die Sicherheit, die Effizienz und den Komfort im täglichen Straßenverkehr erheblich verbessern können [21, 22, 23, 24]. Nachdem die Forschungs- und Standardisierungsarbeiten für eine erste Version abgeschlossen sind, ist es nun die Aufgabe der Automobilhersteller und ihrer Lieferanten, zuverlässige und sinnvolle kommunikationsbasierte Anwendungen in die Serienfahrzeuge zu bringen. Diese Integrationsaufgabe birgt dabei neue Herausforderungen in der Entwicklung automobiler Systeme, die vorher in dieser Form nicht existierten bzw. in ihren Auswirkungen beschränkt waren.

### 1.2 Aufgabenstellung

Im Fokus dieser Arbeit steht das Verhalten eines Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystems bei hohem Kommunikationsaufkommen. Mit jedem verkauften Fahrzeug, welches mit der standardisierten Technologie ausgestattet sein wird, steigt die Anzahl der Nachrichten, die zwischen den Fahrzeugen versendet und empfangen werden. Die *Cooperative Awareness Message* (CAM) wird von jedem Fahrzeug ein- bis zehnmal pro Sekunde versendet[25]. Befinden sich viele sendende Fahrzeuge in der Nähe, kann ein Empfängerfahrzeug mehrere hundert Nachrichten pro Sekunde empfangen. Jede dieser Nachrichten kann wertvolle Informationen enthalten.

Gleichzeitig sind die Ressourcen – insbesondere die Rechenleistung in den Fahrzeugen – durch technische und kaufmännische Vorgaben begrenzt und nach der Auslieferung eines Fahrzeugs nicht mehr veränderbar. Dieser Umstand wurde im Rahmen der internationalen und herstellerübergreifenden Zusammenarbeit zur Erforschung und Standardisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation bisher kaum betrachtet [26, 27, 28]. In den dort verwendeten Versuchsfahrzeugen wurden in der Regel leistungsstarke Rechenressourcen verwendet, die nicht den strengen Anforderungen an Serienlösungen hinsichtlich Kosten, Größe, Gewicht und Robustheit genügen. Darüber hinaus war der Umfang der umgesetzten Anwendungen oft gering und entsprach nicht den vielen gleichzeitig möglichen Funktionen, welche heute für die erste Generation zur Markteinführung diskutiert werden. Zudem wurden solche Prototypen zumeist als monolithische Systeme konzipiert, in denen von der Nachrichtenübertragung bis zu den Anwendungen und deren Anzeige alles auf einer Plattform umgesetzt wurde. Dies entspricht jedoch nicht den üblichen verteilten Systemen in



Serienfahrzeugen, bei denen Informationen über zum Teil langsame und begrenzte Datenbusse ausgetauscht werden müssen. Nicht zuletzt wurden kryptografische Mechanismen zur Datensicherheit in Versuchsfahrzeugen oft nicht umgesetzt, obwohl sie in Serienfahrzeugen zu sehr hoher Rechenlast führen werden.

Dies führt zu der Aufgabenstellung, eine Architektur zu entwickeln, die auf zuverlässige und effiziente Weise die optimale Ausnutzung der Informationen aus den empfangenen Nachrichten ermöglicht. Mit der Qualität der Informationsauswertung im Empfängerfahrzeug steht und fällt der Nutzen des Gesamtsystems für die Kunden.

### 1.3 Beitrag dieser Arbeit

Diese Arbeit behandelt die Herausforderung, Nachrichten aus einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in den empfangenden Fahrzeugen mit begrenzten Ressourcen zu verarbeiten. Der Beitrag dieser Arbeit beginnt mit der Beschreibung einer Simulationsumgebung zur Durchführung quantitativer Analysen. Dabei wurde die Kommunikation durch ein neues Kanalmodell simuliert, welches viele tausend Nachrichtenübertragungen effizient abbildet. Zunächst wird die Simulation dafür verwendet, die Nachrichtenraten zu analysieren. Dazu wird für zwei realistische Straßenverkehrsszenarien untersucht, bei welchen Ausstattungsraten welche relativen Kanallasten und Nachrichtenraten auftreten. Es zeigt sich, dass bereits bei moderaten Ausstattungsraten hohe Nachrichtenraten auftreten können und damit Mechanismen zum Umgang mit diesen Nachrichten erforderlich sind.

Im Anschluss wird die Systemarchitektur einer standardkonformen Umsetzung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in einem Fahrzeug diskutiert. Durch die Integration in Serienfahrzeugen ergeben sich besondere Herausforderungen. Um mit hohen Raten empfangener Nachrichten umgehen zu können, werden dieser Systemarchitektur zwei neue Module hinzugefügt, womit sich ein optimierter Architektorentwurf ergibt. Diese zwei neuen Module – die Relevanzfunktion und ein Selektionsmechanismus – werden im Folgenden ausgearbeitet.

Die Relevanzfunktionen wird dazu eingesetzt, jede empfangene Nachricht mit einem Relevanzwert zu versehen. Dieser Relevanzwert beschreibt die Relevanz einer Nachricht für den Empfänger. Dafür werden die Bewegungen von sendendem und empfangendem Fahrzeug extrapoliert, um

## 1 Einleitung

zu bestimmen, wann sich beide wie nahe kommen. Die Bewegungsextrapolation kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Ein Ansatz behält dabei die Bewegungseigenschaften als konstant bei, während ein anderer Ansatz dynamische Bewegungen mit Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen zulässt. Die Ansätze werden mit drei Methoden evaluiert. Zunächst werden die Ausgaben der Algorithmen grafisch dargestellt. Anschließend werden ihre Qualität und ihre Laufzeit verglichen. Abschließend werden Ansätze für Relevanzschätzverfahren aus der Literatur dargestellt und auf ihre Eignung hin bewertet.

Der Selektionsmechanismus dient dazu, die empfangenen Nachrichten priorisiert nach ihren Relevanzwerten der weiteren Verarbeitung zuzuführen. Zunächst werden die erforderlichen Operationen einer entsprechenden Datenstruktur für einen solchen Selektionsmechanismus erläutert. Anschließend wird schrittweise ein Selektionsmechanismus entwickelt, welcher nicht nur Nachrichten effizient priorisiert, sondern auch verhindert, dass mehrere Nachrichten desselben Senders auf ihre Verarbeitung warten. Außerdem wird ein Alterungsmechanismus eingeführt, der die Relevanz langer wartender Nachrichten absenkt.

### 1.4 Struktur

Die folgenden Kapitel sind wie folgt strukturiert. Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Fahrzeugtechnik sowie der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation dargestellt, soweit sie für das Verständnis der folgenden Kapitel nötig sind. Kapitel 3 beschreibt die Simulationsumgebung, welche in dieser Arbeit zur Evaluation der erarbeiteten Konzepte und in Kapitel 4 zur Analyse der Nachrichtenraten verwendet wird. Kapitel 5 leitet einen verbesserten Architekturentwurf her. In dieser Architektur werden zwei neue funktionale Blöcke eingeführt. Ein Verfahren zur Relevanzschätzung wird in Kapitel 6 entwickelt und evaluiert. Kapitel 7 stellt einen darauf aufbauenden Selektionsmechanismus vor, welcher ebenfalls auf seine Eigenschaften hin untersucht wird. Kapitel 8 fasst diese Arbeit zusammen und gibt Ausblicke auf potenzielle weitere Untersuchungen.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für diese Arbeit erläutert. Zuerst wird die moderne Fahrzeugtechnik mit ihren Innovationsbereichen, internen Vernetzungstechnologien und Anforderungen beschrieben. Anschließend wird die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation im Detail erläutert, Chancen und Risiken dargestellt, Einführungsszenarien diskutiert, die Anwendungen vorgestellt und ein Überblick über die aktuell relevanten Standards sowie mögliche zukünftige Erweiterungen gegeben.

### 2.1 Fahrzeugtechnik

Heutige Automobile gehören zu den komplexesten technischen Objekten, die sich flächendeckend im Privatbesitz der Bevölkerung befinden. Sie vereinen verbrauchsoptimierte Motoren, komfortable Innenraumgestaltung, diverse Infotainment- und Telematiksysteme und komplexe Fahrerassistenzsysteme. In einer aktuellen Mercedes-S-Klasse befinden sich je nach Ausstattungsvariante mehr als 90 Steuergeräte, die über verschiedene Bussysteme verbunden werden [29, 30]. Die Anzahl der verwendeten Codezeilen geht in die 100 Millionen [31]. Im Folgenden werden die Systeme mit Schnittstellen zur vorliegenden Arbeit näher erläutert, die Grundlagen der Vernetzung im Fahrzeug beschrieben und eine Übersicht über die Anforderungen der Automobilindustrie an die Integration neuer Systeme gegeben.

#### 2.1.1 Innovationsbereiche im Fahrzeug

In diesem Abschnitt werden die zentralen Innovationsbereiche im Automobilssektor beschrieben. Zentral für diese Arbeit ist insbesondere das Feld der aktiven Fahrerassistenzsysteme, daneben wird auf Telematik und Infotainment sowie kurz auf Verbrauchsreduzierungen eingegangen.

### 2.1.1.1 Aktive Fahrerassistenzsysteme

Die Gruppe der aktiven Fahrerassistenzsysteme wurde mit der Einführung des Anti-Blockier-Systems (ABS) begründet. Damit wurde erstmals ein elektronisches System etabliert, das durch einen aktiven Eingriff in einen Aktor – hier die Bremse – den Fahrer unterstützt. Im Laufe der Jahre sind immer neue Systeme dieser Art entstanden, die in vielen Ländern teilweise bereits gesetzlich verpflichtend sind. Dazu zählen neben dem erwähnten ABS etwa das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) und die Antriebs-Schlupfregelung (ASR) [29, 32].

Neben solchen mittlerweile obligatorischen Systemen werden weitere Fahrerassistenzsysteme in unterschiedlichen Ausprägungen von den Automobilherstellern entwickelt und individuell vermarktet. Beispiele hierfür sind Systeme zur Geschwindigkeitsregelung. Der Tempomat, der eine vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit hält, ist bereits weit verbreitet. Die nächste Stufe sind adaptive Abstandshaltesysteme, die durch Radar-Sensorik einen sicheren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ermöglichen und ansonsten bei freier Fahrbahn eine eingestellte Geschwindigkeit halten. In der neuesten Generation sind diese Systeme auch in der Lage, nicht nur die Geschwindigkeit zu regulieren, sondern auch in beschränktem Umfang selbstständig zu lenken. Das Ziel ist, den Fahrer bei seiner Fahraufgabe zu entlasten, ihm jedoch stets ein Übersteuern zu ermöglichen. Die Situationen, in denen diese Systeme derzeit agieren, sind vielfältig, insgesamt aber dennoch beschränkt, beispielsweise auf Schnellstraßen und Stausituationen.

Zentral bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist die Bewertung der aktuellen Fahrersituation. Diese erfolgt durch verschiedene Sensoren [33]. Ein Beispiel für einen einfachen Sensor ist eine Vorrichtung zur Bestimmung der Raddrehzahl. Dagegen sind Radarsensoren, Ultraschallsensoren, Kameras mit Bildverarbeitung und Lasersysteme (Lidar) weitaus komplexere und mitunter teure Systeme, die noch genauere Umgebungserfassungen, Situationsanalysen und somit neue Anwendungen ermöglichen. Abbildung 2.1 zeigt ein typisches Sensor-Arrangement eines modernen Fahrzeugs. Viele Anwendungen verlassen sich nicht alleine auf einen dieser Sensoren, sondern kombinieren mehrere davon mittels einer Fusion. Damit werden sie zuverlässiger und können weitere Anwendungsbereiche erschließen [21, 34, 35, 36]. Auch die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation kann als ein Sensor zur Umgebungserfassung verstanden wer-

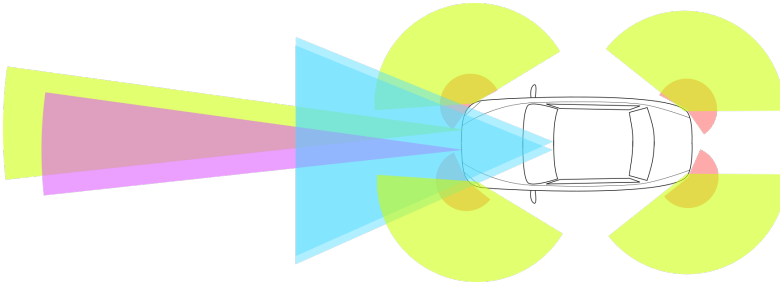


Abbildung 2.1: Nicht maßstabsgetreue Darstellung verschiedener bildgebender Sensoren an einem Fahrzeug (rot: Ultraschall; grün: Nah- und Fernbereichsradar; blau: (Stereo-) Kamera, violett: Lidar).

---

den.

In den vergangenen Jahren hat das autonome Fahren als Innovationsbereich und Kulminationspunkt der Entwicklung in den Fahrerassistenzsystemen eine zentrale Rolle eingenommen. Während die klassischen Fahrzeughersteller einen evolutionären Weg gehen und dem Fahrer mit stetig weiter verbesserten Fahrerassistenzsystemen in immer mehr Situationen in seiner Fahraufgabe entlasten, sind Technologiekonzerne wie Google dazu übergegangen, direkt vollautonome Fahrzeuge vor allem für städtische Szenarien mit beschränkter Geschwindigkeit zu entwickeln. Damit nähern sich beide Seiten aus unterschiedlichen Richtungen dem gleichen Ziel an. In [37] wurden verschiedene Stufen des automatisierten Fahrens definiert, bei denen das Fahrzeug zunehmend die Kontrolle übernimmt, bis zuletzt der Fahrer aufgrund fehlender Bedienelemente wie Lenkräder und Pedale beim vollautonomen Fahrzeug gar nicht mehr die Möglichkeit hat, einzugreifen. Auch beim automatisierten Fahren kann Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation unterstützen [38, 39].

Der Nutzen früher Fahrerassistenzsysteme trat vor allem in Gefahrensituationen zu Tage, moderne Systeme können zusätzlich den Fahrkomfort erhöhen. Der Rückgang der Unfälle mit Todesfolge ist unter anderem den Fahrerassistenzsystemen zu verdanken, insbesondere wenn sie in möglichst

vielen Fahrzeugen eingesetzt werden [40]. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass Fahrerassistenzsysteme von Warnungen [41, 42, 43, 44] bis hin zu automatisierten Eingriffen etwa in Form von Notbremsungen [45] Unfälle verhindern oder zumindest abmildern.

### 2.1.1.2 Telematik und Infotainment

Der Bereich Telematik und Infotainment hat sich in den letzten Jahren ebenfalls erheblich weiterentwickelt. Lange Jahre war das Radio die einzige Anwendung an dieser Stelle. Durch die Anbindung von Telefonie, Satellitenradio, Navigationsanwendungen und schließlich des Internets hat hier eine intensive Entwicklung stattgefunden [17].

Für die Kunden sind die Telematiksysteme immer häufiger ein kaufentscheidendes Kriterium [23]. Mobile Internetdienste werden vor allem für ein technologieaffines Publikum zunehmend in das Fahrzeug integriert. Wichtig ist dabei die Einhaltung strenger Anforderungen hinsichtlich Ergonomie, Datenschutz, Fahrzeugsicherheit und Ablenkung des Fahrers. Diese Herausforderungen führen in Verbindung mit den langjährigen Fahrzeugentwicklungszyklen zu vergleichsweise langsamen Fortschritten in dieser Sparte. Durch Modularisierung, agile Entwicklungsprozesse und neue Richtlinien werden diese Zyklen jedoch immer kürzer.

Die Einbindung mobiler Internetdienste durch die Nutzung von Mobilfunk hat bereits zur Umsetzung erster Anwendungen geführt, zu denen auch im Zusammenhang mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation geforscht wurde. Im Bereich etwa der Fahrerinformation und optimierter Routenführung sind die Übergänge zwischen modernen Telematik-Systemen und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystemen daher oft fließend.

### 2.1.1.3 Energieverbrauch

Bedingt durch gesetzliche Anforderungen und allgemeines Interesse an mehr Nachhaltigkeit und Umweltschutz steht die Verbrauchsreduktion der Fahrzeuge heute im Fokus. Mit der sukzessiven Absenkung der Obergrenzen für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid in vielen Märkten weltweit wurde die Entwicklung umweltfreundlicherer Motoren mit diversen Energiequellen intensiviert. Neben der Verbrauchsreduzierung der Motoren wurden weitere Potenziale für Energieeffizienzsteigerungen identifiziert.

Beispielsweise lassen sich durch intelligente Routenführung im Berufsverkehr Staus und damit Stand- sowie Leerlaufzeiten reduzieren.

### 2.1.2 Vernetzung von Steuergeräten und Sensoren

Moderne Fahrzeuge nutzen zur Vernetzung ihrer vielen Anwendungen und Steuergeräte Kommunikationssysteme verschiedenster Art [30, 46]. Je nach Ausstattung werden dazu mehr als 90 Steuergeräte verbunden [29, 33]. Die verwendeten Kommunikationstechniken sind auch für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation von Relevanz, da die versendeten Informationen über dieses Netzwerk gesammelt werden bzw. die empfangenen Nachrichten an verschiedenste Steuergeräte weitergereicht werden müssen. Folgende Bussysteme sind aktuell relevant.

- Für besonders kostengünstige Vernetzung einfacher Anwendungen ohne Sicherheitsrelevanz – beispielsweise der Fensterheber oder der Sitzheizung – wird **LIN** (Local Interconnect Network) eingesetzt. Physikalisch wird es als Eindrahtlösung umgesetzt.
- Im Bereich der Sicherheitssysteme und Chassis-Funktionen spielt seit Jahren das **CAN**-Protokoll (Controller Area Network) eine zentrale Rolle. Es gibt mittlerweile mehrere Generationen und Derivate des Protokolls, das sich auch im Eisenbahn- und Luftfahrtbereich etabliert hat.
- Als echtzeitfähiger Nachfolger von CAN mit höheren Datenraten ist das **FlexRay**-Protokoll angetreten und wird heute vor allem bei sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen eingesetzt.
- Für Multimediaanwendungen ohne stringente Sicherheits- und Echtzeitanforderungen, allerdings mit hohen Datenraten hat sich das **MOST**-Protokoll (Media Oriented Systems Transport) etabliert. Es eignet sich besonders für die Übertragung von Videomaterial. Auf physikalischer Ebene kommen sowohl Lichtwellenleiter als auch elektrische Leiter in Frage.
- Ebenfalls für Multimediaanwendungen und auch für die Anbindung von externen Geräten wie Smartphones und Headsets werden typische Endverbraucher-Netzwerktechnik wie **Bluetooth** und **WLAN** eingesetzt.

- Daneben gibt es derzeit intensive Bestrebungen, **Ethernet** mit entsprechenden Erweiterungen für sicherheitsrelevante automobiler Systeme zu adaptieren [47, 48].

### 2.1.3 Anforderungen

Mehrere Faktoren tragen dazu bei, dass in Fahrzeugen besonders hohe Anforderungen an die verbaute Elektronik und die Software gestellt werden. Auf der Hand liegt, dass alle sicherheitsrelevanten Systeme besonders sorgfältig entwickelt werden müssen. Hier spielen auch gesetzliche Anforderungen, haftungstechnische Gründe sowie spezifische Markenschwerpunkte eine Rolle. Eng damit verwoben ist auch die Anforderung nach allgemeiner Qualität, Zuverlässigkeit und Verarbeitung, um Reparaturen auf ein Minimum zu reduzieren und die Wertanmutung und -erhaltung zu erhöhen. Daneben spielen natürlich auch kaufmännische Argumente eine Rolle.

- **Größe und Gewicht:** Das Volumen der einzelnen Steuergeräte ist durch den beschränkten Raum im Fahrzeug eine wichtige Größe. Für jedes Steuergerät steht damit nur ein streng limitiertes Volumen zur Verfügung, was die Auswahl und Dimensionierung der Elektronik streng limitiert. Daneben rückt auch das Gewicht zunehmend in den Fokus, da Gewichtsveränderungen einen großen Einfluss auf den Verbrauch haben. Hier ist nicht nur das Steuergerät selbst von Belang, sondern auch dessen Verkabelung [29].
- **Mechanische und elektrische Robustheit:** Die mechanische Robustheit betrifft elektronische Systeme insofern, als dass die besonderen Anforderungen an Temperaturbeständigkeit, elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV), Festigkeit und Lebensdauer über das übliche Maß in der Endverbraucherelektronikbranche teilweise weit hinausgehen [49, 50].
- **Stabilität und Sicherheit:** Je zentraler die Rolle eines elektronischen Systems im Sicherheitsumfeld ist, desto mehr liegt der Fokus bei der Hard- und Software auf der Zuverlässigkeit. In kritischen Bereichen wird dies unter anderem durch Redundanzen erzielt: Mehrere Rechereinheiten führen parallel Operationen durch, welche gegenseitig geprüft oder von einem autarken Watchdog-System über-



wacht werden. Bei der Programmierung der Software muss ebenfalls größte Sorgfalt angewendet werden [51].

- **Kosten:** Alle vorgenannten Anforderungen müssen insgesamt zu möglichst geringen Kosten realisiert werden. Angesichts der Vielzahl der verbauten Teile in einem Fahrzeug gibt es daher strenge Kostenvorgaben. Eine Kostensenkung ist durch Skaleneffekte erzielbar, indem nach Möglichkeit Gleichteile und Massenprodukte eingesetzt werden. Neue Systeme erfordern jedoch oft spezielle Hardware, welche besonders bei der Markteinführung hohe Kosten verursacht.

Diese Randbedingungen sind bei der Entwicklung und Umsetzung von neuen Fahrzeuganwendungen stets zu berücksichtigen. Sie führen dazu, dass die Leistungsfähigkeit von automobilen Systemen hinsichtlich Speicher und Performance denjenigen von Endverbrauchergeräten wie etwa PCs bei gleichen Kosten hinterherhinken.

Um die oben genannten sicherheitsrelevanten Anforderungen und entsprechende Maßnahmen auf eine standardisierte Basis zu stellen, wurde die ISO-Norm 26262 verabschiedet [50]. Sie definiert unter anderem sogenannte *Automotive Safety Integrity Level* (ASIL), die Systeme anhand ihrer Sicherheitsrelevanz klassifizieren. Je nach Einstufung treten dann besondere Richtlinien in Kraft. Von den Vorgaben dieser und weiterer Normen sind nicht nur die Automobilhersteller, sondern auch die gesamte Lieferantenkette betroffen [52]. Um sich rechtlich abzusichern, führen Fahrzeughersteller daher umfangreiche Zertifizierungs- und Dokumentationsprozesse durch.

Mit der zunehmenden Anzahl an Infotainment- und Assistenzanwendungen, die mit dem Fahrer optisch, akustisch oder gar haptisch interagieren, steigen außerdem die Anforderungen an die Verständlichkeit und Ablenkungsvermeidung solcher Systeme [53]. Solange kein hochautomatisiertes Fahren möglich ist, bei dem sich der Fahrer vollkommen ausklinken kann, bleibt die sichere Kontrolle über das Fahrzeug und seinen Zustand in der Verantwortung des Fahrers. Ein gutes *User Interface* unterstützt ihn bei der Fahraufgabe und bietet zusätzliche Anwendungen in einer nicht ablenkenden Art und Weise [13, 54].

Mit neuen Technologien ergeben sich sowohl Chancen als auch Risiken. Als Beispiel seien Headup-Displays genannt. Sie zeigen dem Fahrer die Fahrgeschwindigkeit und weitere Informationen an, ohne dass dieser den Blick senken und seine Augen auf die Instrumententafel umfokussieren

muss. Gleichzeitig kann auch diese Anzeige auf der Windschutzscheibe ablenkend wirken, wenn zu viele und zu aufdringliche Objekte erscheinen [55]. Noch kritischer sind Systeme, die eine bewusste Aktion des Fahrers erfordern, wie etwa das Setzen der Zielgeschwindigkeit im Tempomat.

Moderne Fahrzeugsysteme können die Aufmerksamkeit des Fahrers zunehmend auf bestimmte Ereignisse lenken. Dies gilt etwa für warnende Fahrerassistenzsysteme, die vor einem scharf bremsenden, direkt vorausfahrenden Fahrzeug warnen. Solche Systeme haben in der Regel mehrere Warnstufen, die die Kritikalität der Situationen abbilden [56].

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssysteme ermöglichen neuartige Anwendungen, die den Fahrer vor Gefahren warnen, die kein bisheriger Sensor erfassen kann [57]. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn der Fahrer die Gefahr noch gar nicht sehen kann, da sie von einem Objekt verdeckt wird. In der Entwicklung dieser Systeme ist also verstärkt darauf zu achten, dass die Fahrer intuitiv die Ausgaben des Systems verstehen und angemessen reagieren [58, 59]. Eine ganzheitliche Integration der entsprechenden Anwendungen in etablierte Bedien- und Anzeigesysteme ist an dieser Stelle hilfreich [9, 10].

## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation hat sich über viele Jahre unter der Beteiligung vieler wissenschaftlicher Institutionen, Industrieunternehmen und öffentlichen Einrichtungen entwickelt.

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die wichtigsten Entwicklungen von den ersten Forschungsprojekten bis zur Standardisierung gegeben werden. In Büchern wie [60, 61] und in wissenschaftlichen Übersichtsarbeiten wie [62, 63, 64, 65, 66, 67] finden sich Übersichten zu älteren Entwicklungsständen. Zunächst wird eine Begriffsdefinition und -abgrenzung vorgenommen. Anschließend wird eine chronologische Zusammenfassung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben. Außerdem werden die Chancen und Risiken sowie mögliche Einführungsszenarien besprochen. Es folgen eine Darstellung der Ausprägungen und ein Einblick in die Vielzahl der möglichen Anwendungen. Dann werden die aktuellen Standards vorgestellt und zuletzt ein Ausblick auf zukünftige Erweiterungen gegeben.

### 2.2.1 Begriffsdefinitionen und Abgrenzung

Als dynamisch gewachsener Technologiebereich wurden für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und verwandte Themen im Laufe der Jahre verschiedenste Begriffe geprägt. Teilweise haben sich diese Begriffe regional unterschiedlich entwickelt. Zur Schaffung begrifflicher Klarheit werden im Folgenden die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe definiert und abgegrenzt.

**Definition 1. Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation:** *Überbegriff für die direkte oder indirekte Kommunikation zwischen Fahrzeugen unabhängig vom Übertragungsweg über Mobilfunk, WLAN, Bluetooth oder andere Technologien.*

In Europa ist in englischer Übersetzung meistens von *Car-to-Car-Kommunikation* (abgekürzt Car2Car, C2C) die Rede, während sich im nordamerikanischen Bereich der Begriff *Vehicle-to-Vehicle Communication* (abgekürzt V2V) etabliert hat.

**Definition 2. Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation:** *Stellt die Infrastruktur etwa in Form von straßenseitigen Funkvorrichtungen oder Server-Backends wesentliche Knoten des Kommunikationssystems, die auch als Datenquellen und Datensinken dienen, spricht man von Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation.*

Analog zu den oben genannten Übersetzungen wird in Europa von *Car-to-Infrastructure* (C2I) bzw. in Nordamerika von *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) gesprochen.

Als Oberbegriff von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation spricht man in der Regel von *Car-to-X-Kommunikation* bzw. *V2X-Kommunikation* – das *X* steht als Platzhalter für beliebige Kommunikationspartner.

**Definition 3. Dedicated Short Range Communication (DSRC):** *Die direkte Übertragung von Nachrichten von und zu Fahrzeugen über einen für diesen Zweck entwickelten Kommunikationskanal wird als Dedicated Short Range Communication (DSRC) bezeichnet.*

Der Begriff DSRC wird im Kontext der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation hauptsächlich in den USA verwendet und ist andernorts auch für automatisierte Mautabrechnungssysteme in Gebrauch. In Europa hat sich

der Begriff *ITS G5* – nach dem reservierten Frequenzbereich bei 5.9 GHz und dem Terminus *Intelligent Transport Systems* – etabliert.

**Definition 4. Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerk:** *Das Netzwerk aus kommunizierenden Fahrzeugen – und eventuell einbezogener Infrastruktur – wird als Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerk bezeichnet.*

Im wissenschaftlichen Bereich wird für das Netzwerk, welches durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation entsteht, in der Regel der Terminus *Vehicular Ad-Hoc Network* (VANET) in Anlehnung an *Mobile Ad-Hoc Network* (MANET) verwendet. VANETs werden oft als Untermenge der MANETs bezeichnet, es gibt aber einige Unterschiede zu den üblichen Randbedingungen, die für MANETs diskutiert werden. [68] listet einige Unterscheidungsmerkmale:

- In VANETs ist der Energieverbrauch nicht kritisch. Sowohl Fahrzeuge als auch Infrastruktur bieten im Normalbetrieb genügend Energie für den Betrieb typischer Kommunikationstechnologien. MANETs beziehen sich dagegen oft auf kleine, mobile Endgeräte wie Smartphones, deren Energieverbrauch engen Grenzen unterliegt.
- Die möglichen Bewegungen der Fahrzeuge sind durch Straßen, Geschwindigkeitsvorgaben und andere Randbedingungen stärker eingeschränkt, als dies für mobile Endgeräte gilt. Diese bewegen sich mehr oder weniger beliebig mit ihren Trägern durch den Raum und sind einer ungleich höheren Dynamik unterworfen.
- Allerdings bewegen sich Fahrzeuge in der Regel mit viel höheren Geschwindigkeiten, wodurch sich die resultierende Netzwerktopologie innerhalb kürzester Zeit stark ändert. Dies betrifft auch die lokale Dichte der Kommunikationspartner, die sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann.

Sensornetzwerke – engl. *Wireless Sensor Networks* – dienen dazu, Daten mit vielen kleinen Sensoren zu erfassen und ihre Informationen von Sensor zu Sensor zu einem Verarbeitungsknoten weiterzuleiten. Für die Kommunikation der Sensordaten werden ebenfalls Ad-Hoc-Netzwerke verwendet, welche aus Sensoren gebildet werden. Im Gegensatz zu einem Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzwerk werden die empfangenen Daten von den einzelnen Sensoren nicht verarbeitet, sondern lediglich weitergeleitet [69].

### 2.2.2 Chronologie

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation steht im Jahr 2016 kurz vor der Einführung in den Massenmarkt. Diesem Meilenstein ging eine jahrzehntelange Entwicklung voraus. Diese lässt sich anhand verschiedener Forschungsprojekte der vergangenen Jahrzehnte nachzeichnen [70, 71]. Die folgende Darstellung konzentriert sich weitgehend auf die Aktivitäten in Europa.

In den 1980er Jahren wurde die Kommunikation zwischen Fahrzeugen in dem Projekt *Prometheus* erstmals eingehender untersucht, der Fokus dieses Projekts lag allerdings auf ersten Prototypen für autonome Fahrzeuge [22].

Das deutsch-französische Projekt *Inter-vehicle Hazard Warning* fand in den Jahren 2001 bis 2002 statt. Während die gesendeten Nachrichten per Broadcast in einem Frequenzband bei 869 MHz an alle Fahrzeuge in der Umgebung versendet wurden, wurde die Verarbeitungsintelligenz erstmals weitgehend beim Empfängerfahrzeug angesiedelt. Dieses Konzept, welches sich in der Folge etabliert hat, stellt sicher, dass dem Fahrer nur wichtige Informationen oder Warnungen präsentiert werden [72].

Im europäischen Projekt *CarTALK 2000* standen kooperative Fahrerassistenzsysteme im Mittelpunkt, beispielsweise Konvois und automatische Spurwechsel auf Autobahnen. Daneben wurden auch reine Informationssysteme untersucht und für die Anwendungen jeweils die nötige Marktdurchdringung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssysteme ermittelt. Im Vergleich mehrerer Funkssysteme hat sich IEEE 802.11 als am besten geeignet erwiesen [73].

Das parallel stattfindende, deutsche Forschungsprojekt *FleetNet* erprobte erstmals die Weiterleitung von Nachrichten über mehrere Fahrzeuge – sogenanntes Multihopping – in Verbindung mit einem positionsbasierten Forwarding und Routing. Es wurde ebenfalls der WLAN-Standard IEEE 802.11 als Basis für die Kommunikation ausgewählt. Bei dem Projekt wurden neben Sicherheitsanwendungen auch andere Anwendungen auf Basis des Internet Protokolls umgesetzt [74]. Das Nachfolgeprojekt *Network on Wheels* (NoW, 2004 bis 2008) hat die FleetNet-Untersuchungen weitergeführt mit dem Ziel, eine ganzheitliche Plattform für die Kommunikation zu entwickeln. Viele der NoW-Ergebnisse sind in die Standardisierungsaktivitäten des europäischen CAR 2 CAR Communication Consortiums (C2C CC) und des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnor-

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

men (ETSI) eingeflossen [75].

Die Reduzierung der Zahl von Unfalltoten war das erklärte Ziel des europäischen Projekts PreVENT WILLWARN (2004 bis 2006, Wireless Local Danger Warning). Um dieses Ziel schnell zu erreichen, wurde ein System entworfen, das schon bei geringer Komplexität und kleiner Marktdurchdringung eine große Wirkung entfalten kann. So wurden Sensordaten von den sendenden Fahrzeugen ausgewertet und Gefahren explizit kommuniziert. Für den Fall, dass keine Empfängerfahrzeuge in der Nähe sind und eine Übertragung somit sinnlos wäre, wurde die Umgebung überwacht und Nachrichten gespeichert, bis Empfänger erreichbar waren. Mit Fahr-Simulatorstudien wurde der Einfluss von Warnungen auf das Verhalten der Fahrer erstmals untersucht [76].

Im europäischen Projekt *SAFESPOT* in den Jahren 2006 bis 2010 wurden auf Basis bisheriger Ergebnisse diverse Aspekte weiter- und neuentwickelt. Die Projektmitarbeiter schlugen eine *Local Dynamic Map* (LDM) für die Zusammenführung von statischen Karteninformationen, dynamischen, kommunizierenden Objekten und besonderen Ereignissen vor und setzten sie prototypisch um. Auch das Thema der ungenauen Positionierung wurde vertieft untersucht und Verbesserungen erzielt [77].

Hatte sich die Forschung bisher auf direkte WLAN-Kommunikation zur Erreichung bestimmter Latenzzeiten konzentriert, zeigte das deutsche Projekt *Aktiv Cooperative Cars* (CoCar, 2007 bis 2009), dass mit den neueren Entwicklungen in der Mobilfunkbranche auch UMTS als Übertragungstechnologie für bestimmte Anwendungen geeignet ist [78].

Die aufeinanderfolgenden europäischen Projekte *PRE-DRIVE C2X* (2008 bis 2010) und *DRIVE C2X* (2010 bis 2014) hatten zum Ziel, eine Plattform auf Basis der bisher vorhandenen Standards und Forschungsprojekte zu entwickeln und diese in einem Feldtest mit diversen Automobilherstellern und Lieferanten abzusichern. Aus einer umfassenden Liste aller bisherigen Anwendungen, die im Zusammenhang mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation angedacht waren, wurde eine Menge von Anwendungen für eine erste Umsetzung ausgewählt. Außerdem wurden in Probandenversuchen die Reaktionen und Akzeptanz von Fahrern bestimmt, die insgesamt sehr positiv ausfielen [79].

Das deutsche Projekt *sim<sup>TD</sup>* (Sichere intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland, 2008 bis 2013) setzte die bisher verfügbaren Standards sowie weitere Plattformscheidungen erstmals in einem Feldtest mit 120 Fahrzeugen und mehr als 100 stationären Kommunikationseinheiten um.

## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

Sechs Automobilhersteller und mehrere Telekommunikationsfirmen, Lieferanten und Behörden setzten im Großraum Frankfurt am Main erstmals in einem großen Feldversuch mit Probanden viele der Anwendungen im echten Verkehr um. Dazu wurde auch die Straßeninfrastruktur erweitert und ein hybrides System aus WLAN- und Mobilfunkkommunikation implementiert. Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass die bisherige Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsarbeit in ein funktionierendes Gesamtsystem resultierte [80, 81].

In den USA und Japan haben entsprechende Forschungsprojekte parallel stattgefunden, wobei die Zwischenergebnisse immer wieder international abgeglichen und harmonisiert wurden [82, 83]. Eine Zusammenfassung der US-Aktivitäten bis heute findet sich etwa in [21]. Erwähnenswert ist das *Safety Pilot Program* in Ann Arbor, Michigan. Dort wurde die Kommunikationsperformance der erarbeiteten Standards mit etwa 2700 Fahrzeugen erprobt [21].

Mit dem erfolgreichen Abschluss von *sim<sup>TD</sup>* hat die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation einen Reifegrad erreicht, der eine baldige Einführung in den Markt ermöglicht. Um diese Markteinführung zu koordinieren, unterzeichneten die europäischen Automobilhersteller des CAR 2 CAR Communication Consortiums ein Memorandum of Understanding, in dem sie ihren Willen erklärten, die IEEE 802.11p-basierte Technologie im Jahr 2015 auf den Markt zu bringen [20]. Während dieses Ziel zunächst verfehlt wurde, gibt es derzeit verstärkt Aktivitäten im Bereich der Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation [84]. Im sogenannten ITS-Korridor von Amsterdam nach Wien sollen Wanderbaustellenfahrzeuge auf Autobahnen mit Kommunikationstechnologien ausgestattet und der Effekt dieser Maßnahme untersucht werden. Mittlerweile haben auch andere EU-Staaten diesen Ansatz übernommen und teilweise zusätzliche Dienste erarbeitet. Großflächig installierte Infrastrukturlösungen haben den Vorteil, dass auf ihnen basierende Funktionen – unabhängig von der Ausstattung anderer Fahrzeuge – einen direkten Nutzen für die Nutzer von Fahrzeugen mit Kommunikationstechnik bieten. Allerdings sind dafür Investitionen nötig, die in der Regel von der öffentlichen Hand getragen werden müssen.

Für den US-Markt hat General Motors eine Einführung im Januar 2017 angekündigt [85, 86]. Toyota führte bereits Ende 2015 eine Inselösung mit Fokus auf Infrastrukturanbindung für den japanischen Markt ein [87, 88]. Die USA könnten sich in den kommenden Jahren als Treiber für eine schnelle Marktdurchdringung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kom-

munikation erweisen, da das dortige Verkehrsministerium (Department of Transportation) in Zusammenarbeit mit der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) eine gesetzliche Einführung für ca. 2020 anstrebt [89]. Diese Mandatierung beträfe eine Sendeeinheit in allen neu verkauften Fahrzeugen – die Verarbeitung empfangener Daten bleibt den Fahrzeugherstellern überlassen. Allerdings gibt es bereits Überlegungen von Bewertungsinstituten, in Zukunft empfangsseitig kundenerleb- bare Anwendungen für eine gute Fahrzeugbewertung zu verlangen. Diesem Druck der US-Behörden liegt die Hoffnung zugrunde, mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Zukunft bis zu 80% aller Verkehrsunfälle verhindern zu können [21, 90, 91]. Außerdem haben die US-Behörden ein umfangreiches Investitionsprogramm für Kommunikationstechnik in der Infrastruktur ins Leben gerufen [19]. Daneben sind weitere Anreize in Diskussion, wie etwa die Gewährung von Steuervorteilen ähnlich wie bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen [92].

### 2.2.3 Chancen und Risiken

Die Intensität der Forschung und Investitionen in die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in den vergangenen Jahrzehnten zeigt auf, dass sich die Beteiligten durch diese Technologie neue Impulse erwarten. Die Automobilhersteller, Lieferanten, Behörden und – im weitesten Sinne – die Gesellschaft haben unterschiedliche Interessen.

Aktuell können Fahrzeuge ihren eigenen Zustand über einfache Sensorik bestimmen. Die Fahrdynamik-Regelung etwa stellt ein Ausbrechen des Fahrzeugs über Lenkwinkel-, Raddrehzahl-, Querbeschleunigungs- und Gierratensensoren fest [30]. Die direkte Umgebung des Fahrzeugs kann durch Radar, Kameras, Ultraschallsensoren oder auch mit Laserscannern erfasst werden. So kann das Fahrzeug auf umliegende Objekte reagieren, was sich zum Beispiel adaptive Abstandshaltesysteme zu Nutze machen. Alle diese bildgebenden Systeme haben ihre Grenzen jedoch beim ersten Objekt, durch das sie nicht hindurchsehen können. Außerdem haben diese Systeme gemeinsam, dass ihre Auflösung mit zunehmender Entfernung schlechter wird.

Ein zentraler Vorteil von drahtlosen Kommunikationsnetzen ist der Austausch von Informationen über weite Strecken unter der Überwindung von Sichthindernissen. Indem Fahrzeuge sich in einem solchen Kommunikationsnetz Informationen gegenseitig zusenden, erweitern sie ihren Horizont



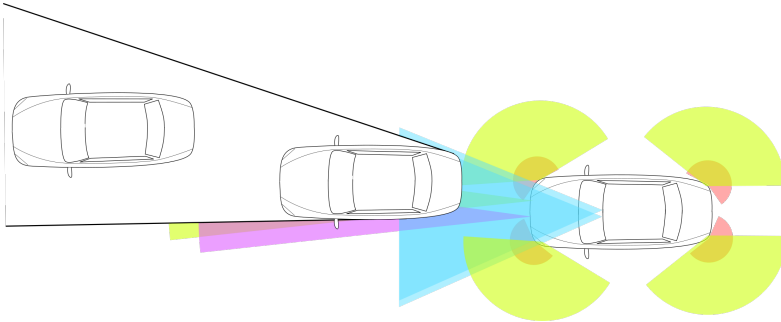


Abbildung 2.2: Verdeckte Objekte wie das linke Fahrzeug können Gefahrenquellen darstellen und werden von herkömmlichen Sensoren nicht erfasst.

über die reine Sichtweite hinaus [71]. Auf diese Weise können die Fahrzeuge und mittelbar die Fahrer auf Situationen vorbereitet werden, die kurzfristig eintreten, aber optisch noch nicht wahrgenommen werden (siehe auch Abbildung 2.2). Während einfache Sensoren und bildgebende Systeme einem aufmerksamen Fahrer in der Regel gleichwertig sind, ist mit der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation erstmals eine Technologie verfügbar, die besser als der Fahrer voraus liegende Situationen erkennen kann – vorausgesetzt, der Marktanteil ausgestatteter Fahrzeuge ist ausreichend hoch [93].

Eine weitere Stärke eines Kommunikationssystems ist die Zwischenspeicherung von Informationen in den Knoten des Netzwerks. Herkömmliche Sensoren speichern ihre Informationen nicht, sondern verarbeiten sie kontinuierlich. Dagegen können etwa erkannte Gefahren über drahtlose Kommunikation an ein Server-Backend versendet werden, das diese Informationen vorhält, bis sich ein anderes Fahrzeug der Gefahrenstelle nähert. Diese Umsetzung ist insbesondere auch bei geringen Marktdurchdringungen sinnvoll.

Die Kommunikation ermöglicht es Fahrzeugen, die Informationen von Sensoren anderer Fahrzeuge in der Umgebung zu nutzen. Viele Informationen, die von Sensoren erhoben werden, werden an andere Fahrzeuge

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

weitergeleitet, so dass den Empfängerfahrzeugen grundsätzlich mehr Daten zur Situationsanalyse zur Verfügung stehen. Die Sammlung und Aggregation von Informationen bietet weitere Vorteile bei der Situationsanalyse. Jedes Fahrzeug für sich hat nur einen eingeschränkten Horizont. In der Zusammenführung von Informationen vieler Fahrzeuge kann so ein aufschlussreiches Bild der voraus liegenden Verkehrssituation generiert werden. Als Beispiel seien stehende Fahrzeuge auf einer Autobahn genannt. Wenn es sich nur um ein einzelnes Fahrzeug handelt, hat man es wahrscheinlich mit einem Pannenfahrzeug auf dem Seitenstreifen zu tun. Stehen dagegen mehrere Fahrzeuge in einem kleinen Bereich, handelt es sich vermutlich um ein Stauende. Es liegt auf der Hand, dass beide Situationen unterschiedliche Maßnahmen erfordern. Im Falle des Pannenfahrzeugs ist in der Regel eine Information für den Fahrer ausreichend, damit er sich der Gefahrenstelle aufmerksam nähern kann. Das Stauende erfordert dagegen unter Umständen eine heftige Bremsung. In diesem Fall muss der Fahrer intensiver gewarnt werden, parallel können Sicherheitssysteme schon auf eine bevorstehende Bremsung vorbereitet werden. Unter Umständen ist sogar eine automatische Bremsung durchzuführen.

Aufgrund von Probandenstudien und Kundenumfragen wird davon ausgegangen, dass Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation für die Kunden eine attraktive Erweiterung bisheriger Fahrzeuganwendungen darstellt [22, 94, 95]. Für Automobilhersteller, die eine technologische Spitzenreiterrolle einnehmen wollen, bietet sich die Gelegenheit, Markenwerte wie Sicherheit und Komfort durch entsprechende kommunikationsbasierte Anwendungen zu ergänzen. Für Massenhersteller bietet sich die Gelegenheit, mit relativ geringen Kosten im Vergleich zu bildgebenden Sensoren effektive Sicherheitsfunktionen umzusetzen – eine Argumentation, die vor allem in den USA im Fokus steht [21, 96].

Durch den drahtlosen Kanal, über den Fahrzeuge Daten von anderen Knoten empfangen sollen, entstehen allerdings auch ein neue Angriffsmöglichkeiten [97]. Trotz mehrstufiger Sicherheitsmechanismen ist niemals auszuschließen, dass manipulierte Nachrichten innerhalb der Fahrzeuge Schaden anrichten können. Ähnliches gilt für den Datenschutz. Die standardisierten Methoden zur Pseudonymisierung ermöglichen zwar die Erhaltung der Privatsphäre, können jedoch mit hohem technischen Aufwand durchaus umgangen werden [93].

### 2.2.4 Einführungszenarien

Problematisch ist die Abhängigkeit der kommunikationsbasierten Funktionalität von der Ausstattung möglichst vieler Fahrzeuge. Gerade in den ersten Jahren nach der Einführung solcher Systeme muss davon ausgegangen werden, dass die wenigsten Fahrzeuge mit der Technologie ausgestattet sind und viele Gefahren damit weiterhin unerkannt bleiben bzw. mit herkömmlichen Sensoren erfasst werden müssen. Auch langfristig erscheint es unrealistisch, dass alle Verkehrsteilnehmer mit entsprechender Kommunikationstechnologie ausgestattet werden. Dies betrifft insbesondere nicht-motorisierte Fortbewegungsmittel oder schlicht Fußgänger. Dieser Umstand muss insbesondere bei der Gestaltung der Anwendungen berücksichtigt werden. Beim Fehlen von kommunizierten Gefahrenmeldungen darf dem Fahrer nie suggeriert werden, dass damit keine Gefahr vorliegt.

Von öffentlicher Seite stehen vor allem die Anwendungen zur Steigerung von Sicherheit und Verkehrseffizienz im Vordergrund [98]. Das Weißbuch der EU-Kommission nennt Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation als essentielles Mittel zur Verringerung von Unfällen und der Zahl der Unfallopfer [40, 99]. Im Bereich der Verkehrsoptimierung sollen durch bessere Routenführung und intelligentere Mobilitätssysteme Ressourcen wie Straßen und Energieträger eingespart werden. Bisher haben staatliche Stellen die Forschungs- und Standardisierungsarbeit durch die Initiierung und Förderung von Projekten maßgeblich vorangetrieben. Mit der erreichten Technologiereife deutet sich nun eine gesetzliche Regelung in nicht zu ferner Zukunft an. Das US-amerikanische Department of Transportation hat nach einer Prüfung der aktuellen Technologiereife den Prozess einer Mandatierung eingeleitet. Es wurde in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass sogar eine Einführung von Nachrüstlösungen für bereits verkaufte Fahrzeuge gesetzlich mandatiert werden könnte, um die Marktdurchdringung schnell zu steigern [21].

Kommunikationssysteme mit den darauf aufbauenden Netzwerken erhalten ihren Nutzen durch möglichst viele Teilnehmer. Dies gilt auch für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Erst wenn ein gewisser Anteil aller Fahrzeuge im Straßenverkehr oder der Infrastruktur Daten bereitstellt, hat der Einzelne einen erlebbaren Mehrwert. Dies führt zu einem Dilemma. Das System bietet erst durch die Teilnahme vieler Knoten einen Nutzen. Wenn aber das System zu Beginn keinen oder kaum Nutzen stiftet,

ist der Anreiz für die Kunden gering, es anzuschaffen. Damit unterscheidet sich die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation von den meisten herkömmlichen Systemen und Anwendungen eines Fahrzeugs, bei denen der Käufer einen unmittelbaren Nutzen durch den Kauf einer Sonderausstattung erhält.

Die Auflösung dieses Dilemmas ist eine industriepolitische Herausforderung und kann durch eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen erfolgen.

- **Investition der Automobilhersteller:** Die Automobilhersteller können die nötige Kommunikationshardware als Investition betrachten und in den ersten Jahren die Kosten für eine Grundausstattung übernehmen bzw. die Technologie subventionieren, um sie für den Käufer interessant zu machen [100]. Je mehr Automobilhersteller an so einem Programm teilnehmen, desto schneller werden signifikante Ausstattungsraten erreicht und die Anwendungen können ab diesem Zeitpunkt gewinnbringend vermarktet werden [100]. Die Aktivitäten des CAR 2 CAR Communication Consortiums, eine entsprechende Absichtserklärung der europäischen Automobilhersteller zu vereinbaren, zielen in diese Richtung [20].
- **Ausstattungsunabhängiger Nutzen:** Manche kommunikationsbasierte Anwendungen sind bereits ohne flächendeckende Ausstattung voll einsatzbereit. Dazu zählen etwa Platooning-Konzepte für LKW. Hier können Fuhrparkbetreiber entsprechende Systeme für mehrere Lastwägen ordern, die dann durch Kolonnenfahrt u.a. ihren Verbrauch und damit die Betriebskosten signifikant senken können [101, 102].
- **Infrastruktur:** Eine weitere Möglichkeit ist der verstärkte Einsatz von infrastrukturbasierten Systemen, die als Datenlieferanten genutzt werden. Indem etwa Ampeln, ganze Kreuzungen oder Parkleitsysteme mit entsprechender Kommunikationshardware ausgestattet werden, können diese einen direkten Nutzen für diejenigen Kunden stiften, die ihr Fahrzeug mit Kommunikationshardware ausstatten. Dies erfordert allerdings Investitionen der öffentlichen Hand, was je nach finanzieller Verfassung und föderaler Struktur nicht in jedem Land mittelfristig machbar erscheint. Allerdings nimmt die Zahl von Pilotprojekten zu. In Japan entschied sich das Verkehrsministerium

## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

dazu, im Großraum Tokio 50 Kreuzungen auszustatten, in Europa werden Wanderbaustellen auf einem Korridor von Amsterdam nach Wien ausgestattet und in den USA wurden im Jahr 2015 für entsprechende Maßnahmen 4 Milliarden Dollar freigegeben [19, 88].

- **Mandatierung:** Eine gesetzliche Vorschrift, die den Verbau von Kommunikationshardware in allen neu verkauften Fahrzeugen vorgibt, erzwingt die oben genannte Investition der Automobilhersteller. Letztere haben die Möglichkeit, die Kosten an die Kunden weiterzugeben. Eine solche Regulierung ist industriepolitisch umstritten, da sie den freien Markt und den Wettbewerb der Technologien verzerrt. Allerdings sorgt sie auch für Planungs- bzw. Investitionssicherheit, da die zukünftigen Ausstattungsraten gesichert sind und damit der Nutzen für die Kunden früher eintritt.

In [21] werden zwei Szenarien für den Hochlauf der Ausstattungsraten nach einer gesetzlichen Vorgabe abgeschätzt. Das *Szenario 1* nimmt an, dass in den ersten drei Jahren 35%, 70% und 100% aller neu verkauften Fahrzeuge ausgestattet werden. Außerdem werden nicht ausgestattete Fahrzeuge zu einem gewissen Anteil mit Nachrüstlösungen versehen. *Szenario 2* verzichtet auf Nachrüstlösungen. Wie die auf diesen Zahlen beruhenden Kurven in Abbildung 2.3 zeigen, werden erst nach gut 30 Jahren alle Fahrzeuge ausgestattet sein. Allerdings bieten die einzelnen Anwendungen schon in den vorherliegenden Jahren viel Potenzial. Nach ca. 7 (Szenario 1) bzw. 10 (Szenario 2) Jahren sind bereits ca. 50% aller Fahrzeuge ausgestattet. Unter der Annahme, dass die Ausstattung von Fahrzeugen mit Kommunikationstechnik und die Neigung zu Unfällen unabhängig sind, können entsprechende Sicherheitsanwendungen in 25% aller kritischen Situationen tätig werden.

### 2.2.5 Taxonomie und Ausprägungen

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation kann nach verschiedenen Merkmalen und Ausprägungen gegliedert werden, was das Verständnis für Teilgebiete und die Abgrenzung zu anderen Technologien erleichtert. In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Unterschied von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und Infotainment-Systemen mit ihren Anwendungsbereichen dargestellt. Anschließend werden innerhalb der Fahrzeug-

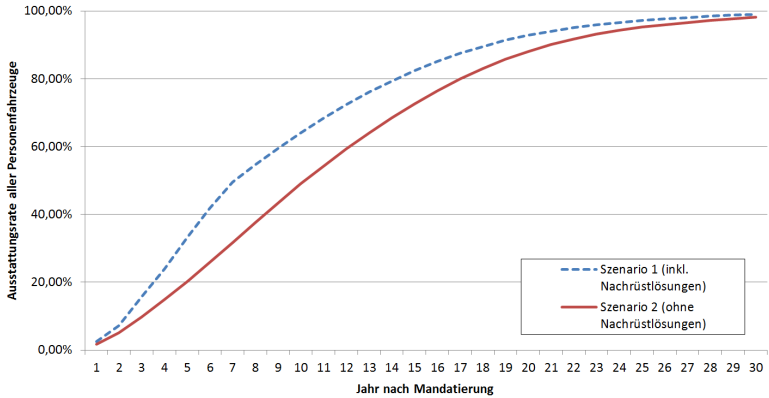


Abbildung 2.3: Schätzungen für den Anteil ausgestatteter Fahrzeuge über die Zeit in den USA [21].

zu-Fahrzeug-Kommunikation die Ausprägungen anhand des Ortes der Situationsauswertung, der Infrastruktureinbindung und der möglichen Übertragungstechnologien differenziert.

### 2.2.5.1 Anwendungsbereiche

Seit den ersten Konzepten zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation haben sich die Randbedingungen und Technologien weiterentwickelt. In den frühen Jahren der Forschung galt die Nutzung eines Kommunikationsnetzwerks für Infotainment-Zwecke als einer der wichtigsten Anwendungsbereiche. Dies lag auch darin begründet, dass zu diesem Zeitpunkt schnelle mobile Internetnetze per Mobilfunk nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maße zur Verfügung standen. So sollten etwa Musikdownloads oder Videostreaming über das Ad-Hoc-Netzwerk aus Fahrzeugen und Infrastrukturstationen übertragen werden.

Diese Einschätzung hat sich mit der Verbreitung schneller 3G-Mobilfunknetze verändert – entsprechende Infotainment-Anwendungen lassen sich gut mit heute bestehender Technologie abdecken. Die Domäne der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation hat sich deswegen weitgehend auf

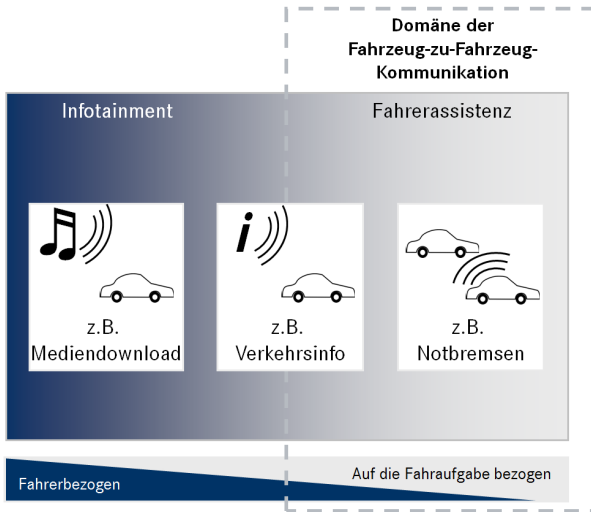


Abbildung 2.4: Der Einsatzbereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ist mittlerweile auf Fahrerassistenzsysteme fokussiert (Grafik: Christian Weiß, Daimler AG).

die Fahrerassistenzsysteme konzentriert, wie Abbildung 2.4 illustriert.

Ein Übergangsbereich findet sich zum Beispiel in den Anwendungen zur Steigerung der Verkehrseffizienz. Während sich manche Anwendungen zur Verbesserung der Routenführung über vorhandene Radio- und Mobilfunk-Technologien bereits sehr gut umsetzen lassen, sind Ad-Hoc-Informationen über den lokalen Straßenzustand eine sinnvolle Domäne der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Diese Betrachtung lässt sich anhand der Merkmale *fahrerbezogen* und *fahraufgabenbezogen* verdeutlichen. Musik- oder Videostreaming dienen rein zur Unterhaltung des Fahrers. Dagegen haben Fahrerassistenzsysteme den Zweck, die Fahraufgabe – also die sichere und effiziente Erreichung eines Ziels – zu unterstützen. Die Unterhaltung des Fahrers selbst ist dabei nachrangig.

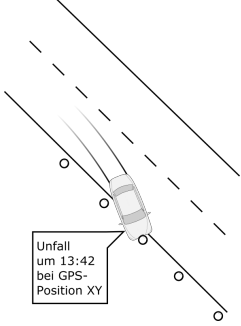
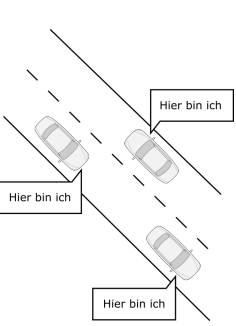
Ereignisbasierte Informationen	Cooperative Awareness
	
Nachrichten beschreiben ein Ereignis	Nachrichten beschreiben den Fahrzeugzustand
Situationserkennung durch den Sender	Situationserkennung durch den Empfänger
Nachrichten treten eher selten und auf einen Anlass hin auf	Nachrichten werden ohne speziellen Anlass permanent versendet

Tabelle 2.1: Vergleich der Ausprägungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation.

### 2.2.5.2 Ort der Situationsauswertung

Eine zentrale Unterscheidung betrifft den Ort der Situationsauswertung. Diese kann beim Sender oder beim Empfänger von Nachrichten stattfinden. Diese Differenzierung hat große Auswirkungen auf den Systementwurf. Tabelle 2.1 stellt die folgenden Unterscheidungsmerkmale gegenüber.

Eine Situationsauswertung beim Sender nutzt die Informationen von unzähligen Sensoren über den aktuellen Zustand des Fahrzeugs aus. Eine solche Zustandserkennung findet bei vielen vorhandenen Fahrzeugfunktionen bereits statt – die Traktionskontrolle erkennt durchdrehende Reifen, Aufprallsensoren detektieren einen Crash. Es liegt auf der Hand, dass mit Hilfe solcher Informationen diskrete Ereignisse erkannt werden können. Wird ein Ereignis erkannt und etwa als Gefahr eingestuft, kann sie in



Form einer Gefahrennachricht an andere Fahrzeuge versendet werden. Die empfangenden Fahrzeuge erhalten damit eine valide Information über ein Ereignis. Ob und in welcher Form diese Information angezeigt wird, bleibt dem empfangenden Fahrzeug überlassen. Bei dieser Variante spricht man vom Austausch *ereignisbasierter Informationen*.

Mit einer Situationsauswertung beim Empfänger kann dieser dagegen auf Basis der von ihm empfangenen Nachrichten eigene Analysen durchführen und Situationen identifizieren, die nur durch den Kontext des Empfängers relevant werden. Als Beispiel sei eine Situation mit einem langsamen Traktor auf einer Serpentinstraße genannt. Ein Auto, welches dem Traktor folgt, ist gezwungen, mit niedriger Geschwindigkeit zu fahren. Die Situation an sich ist noch keine spezifische Gefahrensituation, die dem Auto durch seine Sensordaten bewusst ist. Ein weiteres Auto, das sich mit hoher Geschwindigkeit an die Kolonne aus Traktor und langsamen Fahrzeug annähert, könnte jedoch bei entsprechenden Umständen einen Auffahrunfall verursachen. Es könnte dann aufgrund der Position und der Bewegungsinformationen des langsamen Autos eine solche Gefahr identifizieren und Gegenmaßnahmen einleiten. Für alle Anwendungen mit einer Situationsauswertung beim Empfänger gilt, dass der Empfänger deswegen regelmäßige Informationen über den Zustand des sendenden Fahrzeugs benötigt. Dieses muss daher regelmäßig Nachrichten versenden, um dem Empfänger die Analyse seiner Umgebung mit eigenen Mitteln zu ermöglichen. Diese Variante kann somit als eine Art *Umgebungssensor* (engl. *Cooperative Awareness*) – ähnlich einem Radar – bezeichnet werden.

Beide Systeme lassen sich mit unterschiedlichen Mitteln realisieren. Ereignisbasierte Informationen sind sowohl mit derzeitigen Mobilfunk-Systemen als auch in Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerken austauschbar. Der Umgebungssensor dagegen erfordert das Austauschen vieler Nachrichten zwischen benachbarten Fahrzeugen mit sehr geringen Latenzen. Für seine Umsetzung ist die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen prädestiniert.

### 2.2.5.3 Infrastruktureinbindung

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Einbindung von fest installierter Infrastruktur. Der Begriff Infrastruktur umfasst dabei drei Gruppen von Ausrüstung.

- **Vorhandene Systeme:** Dazu zählen etwa die vorhandene Mobil-

funkausrüstung mit den Mobilfunkmasten. Darüber hinaus fällt unter diesen Begriff im weiteren Sinne auch die bestehende Internet-Infrastruktur mit Server-Backends.

- **Aufgerüstete Systeme:** Daneben können vorhandene straßenseitige Systeme wie Ampeln, Verkehrsleitsysteme bis zu Straßenschildern oder Leitposten mit Kommunikationstechnologie ausgestattet werden. Dies ist auch bei mobilen Geräten wie Baustellenbeschilderung und Einsatzfahrzeugen möglich.
- **Neuartige Systeme:** Hierzu werden eigenständige Stationen gerechnet, deren Zweck die Kommunikation von Informationen in der direkten Umgebung ist. Solche Stationen können eigene Nachrichten generieren, weiterleiten und/oder verarbeiten. Wie auch aufgerüstete Systeme können sie mit drahtgebundenen oder mobilfunkbasierten Systemen an ein zentrales Backend angebunden werden.

Aufgerüstete und neuartige Systeme, die sich am Straßenrand befinden, werden in der Literatur meist als *Road Side Units* (RSUs) bezeichnet [103].

In die Kommunikation können die genannten Infrastruktur-Systeme in unterschiedlicher Weise eingebunden sein [104]. Ein rein mobilfunkbasiertes Kommunikationsnetzwerk hat als notwendige Bedingung die lokale Existenz von Mobilfunkmasten, die für eine entsprechende Abdeckung sorgen. Ein Netzwerk mit direkter Kommunikation zwischen den Fahrzeugen hingegen ist nicht auf Infrastruktur-Systeme angewiesen. Je nach lokalem Bedarf stellen sie aber eine sinnvolle Ergänzung dar.

### 2.2.5.4 Übertragungstechnologien

Für ein Kommunikationssystem sind die verwendeten Übertragungstechnologien essentiell. Im Laufe der Forschungs- und Entwicklungsarbeit sind verschiedene Technologien auf ihre Eignung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation geprüft worden. Die im Folgenden genannten Möglichkeiten sind dabei besonders intensiv untersucht worden und werden in Tabelle 2.2 gegenübergestellt.

## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

	IEEE 802.11p	Basisstation koordiniert dedizierten Funkkanal	Basisstation als Relay/Mobile Edge	Backend-basierte Lösung
Latenzen	< 10 ms	vergleichbar zu 802.11p	vergleichbar zu 802.11p	Hohe Latenzen, abhängig von Netzqualität
Datenraten	3 bis 27 $\frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$	vergleichbar zu 802.11p	< 300 $\frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$	lastabhängig
Reichweite	bis 1 km bei LOS <sup>a</sup> Pseudonymität, hoher Aufwand für Fahrzeugtracking	bis 1 km bei LOS	Zellengröße: 1 – 30 km	Netzweit
Datenschutz/ Privatsphäre Ausprägungen	Unabhängig von Fahrzeughersteller und Netzbetreiber	Zentrales Fahrzeugtracking möglich		
Interoperabilität	Dediziert für ITS	Ungeklärt	Ungeklärt	Möglich durch Vernetzung der Backends
Frequenzen	Nicht notwendig	Koordinations Kanalzugriff	Kontrolliert durch Mobilfunkoperatoren	Notwendig
Infrastruktur Zusätzlicher				
Hardwarebedarf <sup>b</sup> Betriebskosten	Gering <sup>c</sup>	Transceiver, Antennen vergleichbar zu 802.11p	Tendenziell hoch	Keine Tendenziell hoch

Tabelle 2.2: Vergleich von Kommunikationstechnologien für den Fahrzeug-Fahrzeug-Einsatz (vgl. [68, 105, 106, 107, 108, 109]).

- **Dedizierte Kurzstreckenkommunikation (DSRC):** Das Endverbraucher-WLAN nach dem IEEE-802.11-Standard wurde intensiv auf seine Eignung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation untersucht [22]. Mit dieser Technologie war bereits früh eine Basis vorhanden, die intensiv erprobt war und sich im Endverbraucher-Massenmarkt bewährt hatte [110]. Mit Hilfe von modifizierten Baseband-Chips konnten in frühen Feldtests Erweiterungen zu herkömmlichen WLAN-Kanalzugriffsverfahren erprobt werden.

Um die spezifischen Anforderungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu erfüllen, wurde die Erweiterung IEEE 802.11p speziell für diesen Einsatzzweck erstellt und verabschiedet [111, 112, 113, 114]. Die Änderungen betreffen dabei die hochdynamischen Einsatzszenarien, niedrige Latenzzeiten, ein neues Frequenzband und die Ad-Hoc-Kommunikation. Auf Hardware-Ebene wird IEEE 802.11p sowohl auf einem separaten Chip wie auch integriert in einem Chip mit anderen Kommunikationstechnologien (Mobilfunk, WLAN, Bluetooth) angeboten [115]. Eine solche Lösung ermöglicht die Ausnutzung von Skaleneffekten in der Produktion.

Mit der nächsten Generation der Mobilfunkstandardisierung – LTE 5G – soll über die sogenannte Device-to-Device-Kommunikation eine lokale Direktverbindung zwischen mehreren Endgeräten im Kommunikationsbereich einer Basisstation ermöglicht werden [116, 117]. Damit wäre auch die Realisierung des Cooperative-Awareness-Ansatzes denkbar [118]. Untersuchungen der Eignung dieser Technologie für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation befinden sich noch in einem frühen Stadium [119, 120].

- **Backendbasierte Mobilfunklösungen:** Die Etablierung mobiler Internetzugänge über die Mobilfunknetze hat im vergangenen Jahrzehnt eine Welle von Anwendungen und Diensten ermöglicht. Durch die Verbreitung von Smartphones bei den Endverbrauchern und der dadurch immens gestiegene Bedarf nach entsprechender Netzabdeckung hat zu einer Verfügbarkeit von nahezu 100% in Ballungsräumen geführt. Auch größere Straßen sind inzwischen weitgehend mit entsprechenden Netzen versorgt. Aufgrund dieses vorhandenen Kommunikationsnetzes, kostengünstiger Hardware und umfangreichen APIs etwa für iOS und Android liegt die Nutzung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationszwecke auf der Hand. Im Übergangsbe-

reich zwischen Telematik und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, z.B. bei der Erhebung von Fahrzeugbewegungsdaten zur Bestimmung der Straßenauslastung – sogenannte Floating Car Data, wird dieses Netz schon erfolgreich eingesetzt. Mit der Markteinführung von *Car-to-X-Kommunikation* für die App-gestützte DriveStyle App bietet Mercedes-Benz seit 2013 das erste System an, das ereignisbasierte Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ermöglicht. Mittlerweile ist diese Anwendung auch vollständig die Bordelektronik integriert verfügbar [11].

Allerdings eignet sich herkömmlicher Mobilfunk aufgrund seiner hohen und erratischen Latenzen nur für ereignisbasierte Anwendungen, die keine hohe Zeitkritikalität aufweisen [68, 121, 122]. So sind Unfälle in der Regel über mehrere Minuten oder gar Stunden präsent, Notbremsungen sind dagegen oft nach wenigen Sekunden irrelevant für nachkommende Fahrzeuge [123].

Mit der Einführung von Mobilfunktechnik der vierten Generation unter der Bezeichnung *Long Term Evolution* (LTE) wurden einige Eigenschaften, die der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu Gute kommen, verbessert. Dazu zählt eine erhöhte Reichweite von bis zu 30 km und Unterstützung von Bewegungen mit bis zu  $350 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  [106, 124]. Ein Teil der für LTE verwendeten Frequenzen bietet vergleichsweise gute Übertragungseigenschaften auch bei Sichtverdeckung [125].

- **Zwischenlösungen:** Im Rahmen der LTE-5G-Standardisierung wurde eine Studie gestartet, um die Einhaltung der Anforderungen an Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation durch Mobilfunktechnologie zu untersuchen [126]. Derzeit werden verschiedene Ansätze untersucht, wie die Vorteile von Mobilfunklösungen und DSRC verknüpft werden können. Dazu sind diverse Topologien in Diskussion.
  - *Basisstation als Koordinator:* In dieser Variante findet die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen wie bei IEEE 802.11p über dedizierte Frequenzen statt. Allerdings wird der Zugriff auf den Kanal durch Basisstationen koordiniert, wofür eine Mobilfunk-Verbindung erforderlich ist. Auf diese Weise lässt sich der Kanal besser auslasten und bei hoher Auslastung kann die Basisstation den Zugriff auf den Kanal priorisieren.

- *Basisstation als Relay oder für Edge Computing*: Ein anderer Ansatz ist der Verzicht auf direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen. Stattdessen werden Nachrichten für andere Fahrzeuge über die Mobilfunkverbindung an die Basisstation gesendet und von dieser weitergeleitet (Relay). Optional ist hier denkbar, dass die Nachrichten durch ein lokales Backend verarbeitet werden (Edge Computing) [127].

Diese neuen Ansätze erfordern allerdings auch neue Metriken zur Performance-Bestimmung [128].

- **Weitere:** Daneben wurden weitere drahtlose Technologien bzw. Frequenzen auf ihre Eignung für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation untersucht, darunter Bluetooth [129, 130], ZigBee [131], UTRA-TDD [70] und sogar TV-Frequenzen [132]. Über einzelne Machbarkeitsstudien und Spezialanwendungen hinaus konnten sich diese Ansätze jedoch nicht etablieren.

Eine Hybrid-Lösung durch die Kombination von DSRC und einer Mobilfunklösung vermeidet einige Nachteile der einzelnen Technologien. Sie kann entweder rein auf Anwendungsebene durch die Kombination verschiedener Nachrichtenquellen realisiert werden oder aber durch eine Verknüpfung beider Übertragungswege in einer für die Anwendungsebene transparenten Weise [133, 134].

### 2.2.6 Anwendungen

Die Anwendungen sind für die Kunden und Fahrer der sichtbarste Teil des Gesamtsystems. Ihre konkrete Umsetzung – gerade auch in Bezug auf das Bedien- und Anzeige-konzept – wird maßgeblich über die Effektivität und die Kundenzufriedenheit entscheiden.

Im Laufe der Jahre wurden viele Anwendungen erarbeitet, untersucht und auch verworfen. Im Folgenden soll ein Überblick über typische Anwendungen aus dem Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation gegeben werden. Umfangreiche Sammlungen von Anwendungsideen finden sich etwa in [135, 136, 137, 138]. In Europa muss das sogenannte *Basic Set of Applications* auf Senderseite von allen Automobilherstellern unterstützt werden [139].

Die Begriffe *Anwendung* und *Funktion* werden in der Literatur teilweise synonym und teilweise differenziert verwendet. In dieser Arbeit wird

der Begriff Funktion im Sinne kundenerlebbarer Funktionalitäten weitgehend vermieden, um Missverständnisse mit algorithmischen Funktionen zu verhindern. Der Begriff der Anwendung bezeichnet sowohl eine für den Fahrer erlebbare Funktionalität als auch die zugrundeliegende Software.

### 2.2.6.1 Sicherheit

Eine zentrale Domäne für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsanwendungen sind jene zur Steigerung der Sicherheit. Diese kann erfolgen, indem der Fahrer frühzeitig auf Gefahren hingewiesen wird, das Fahrzeug auf Notfallreaktionen vorbereitet wird, eine entsprechende Notfallreaktion automatisch ausgelöst wird oder bei einem bereits eingetretenen Unfall Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Folgende Anwendungen zählen zu dieser Klasse.

- **Gefahrenhinweise:** Unter diese Gruppe fallen optische, akustische oder haptische Hinweise an den Fahrer, dass eine Gefahrenstelle voraus liegt. Diese Hinweise können als Informationen oder als Warnungen gestaltet werden. Letztere ist in der Regel eindringlicher, präziser und die potentiellen Folgen sind schwerwiegender.
  - **Dauerhafte, stationäre Gefahren:** Hier handelt es sich um Stellen im Straßenverkehr, die aufgrund gewisser Gegebenheiten dauerhaft eine Gefahr für Fahrzeuge darstellen. Beispiele sind etwa enge Kurven, schlecht einsehbare Kreuzungen und langfristige Baustellen.
  - **Temporäre, stationäre Gefahren:** Bei diesem Typus handelt es sich um ortsfeste Ereignisse oder Objekte, die für eine beschränkte Dauer – üblicherweise im Minuten- bis Stundenbereich – für den nachfolgenden oder entgegenkommenden Verkehr eine Gefahr darstellen. Beispiele hierfür sind Pannenfahrzeuge, verunfallte Fahrzeuge oder eine rutschige Fahrbahn aufgrund von Eis, Öl oder Nässe.
  - **Bewegliche Gefahren:** Manche Gefahrenquellen bewegen sich – meist selbst als Verkehrsteilnehmer. Dazu zählen etwa Einsatzfahrzeuge (Polizei, Feuerwehr, Sanitäter), Sonderfahrzeuge (Schwerlastkraftwagen, Militär), Wanderbaustellen – aber auch jedes Auto, das durch die Umstände zu besonders langsamer Fahrt gezwungen wird (Traktoren und Fahrzeuge, die einem

solchen folgen) [140, 141]. Auch Fahrer selbst können aufgrund von Drogeneinfluss, Müdigkeit oder Ablenkungen ihr Fahrzeug zu einer Gefahr für die Umwelt machen [142, 143]. Daneben können als Kommunikationspartner auch nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer wie Fahrradfahrer und Fußgänger mit Hilfe tragbarer Geräte eingebunden werden [144].

- **Kollisionsvermeidung:** Eine weitere Gruppe von Anwendungen umfasst jene zur Vermeidung oder Abmilderung von Kollisionen zwischen Verkehrsteilnehmern. Die Gefahr ergibt sich aus dem Verhalten und den zukünftigen Bewegungen beider Fahrzeuge, weswegen keines für sich eine Gefahr darstellt. In der Regel müssen Anwendungen dieser Art hochdynamische Szenarien verarbeiten [145, 146].
  - **Auffahrunfälle:** Bei einer normalen Folgefahrt können durch Bremsungen des vorausfahrenden Fahrzeugs gefährliche Situationen entstehen, wenn die Bremsung entweder sehr plötzlich und heftig eintritt, die Sicht verhindert ist oder wenn der Fahrer des folgenden Fahrzeugs nicht aufmerksam ist. Das bremsende Fahrzeug kann nachfolgende Fahrzeuge über den Bremsvorgang, seine Intensität und weitere Parameter informieren, so dass Auffahrunfälle vermieden oder zumindest abgemildert werden. In einer weiteren Stufe kann auch eine automatische Abstandsregelung allein mithilfe von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation realisiert werden oder in Kombination mit bildgebenden Systemen verbessert werden [147, 148, 149, 150, 151].
  - **Kreuzungssituationen:** Kreuzungsunfälle machen nach aktuellen Statistiken einen großen Teil der Verkehrsunfälle aus [152, 153]. Befinden sich Fahrzeuge auf einem Kollisionskurs, kann dies erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden [105, 154, 155, 156]. Die Beschilderung und eventuell vorhandene Lichtsignalanlagen können in die Kommunikation miteinbezogen werden, um beispielsweise die Vorfahrtsregeln zu berücksichtigen [157, 158].
  - **Überholungen:** Überholvorgänge auf zweispurigen Straßen, bei denen das überholende Fahrzeug die Gegenfahrspur benutzt, stellen durch die verdeckte Sicht auf entgegenkommende Fahrzeuge oder aus reiner Unaufmerksamkeit eine große Gefahr dar. Durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation lässt



## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

sich entgegenkommender Verkehr frühzeitig identifizieren und riskante Fahrmanöver vermieden werden [159, 160, 161, 162].

- **Manöverunterstützung:** Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation kann auch dazu benutzt werden, den Fahrer bei üblichen Manövern zu unterstützen, um die Wahrscheinlichkeit für Fehlverhalten oder Stresssituationen zu verringern. Als Beispiele sei eine Unterstützung bei Spurwechseln genannt, die vor anderen Fahrzeugen im toten Winkel warnt oder auf sich schnell von hinten nähernde Fahrzeuge hinweist. Verwandt damit ist auch eine Unterstützung für Einschervorgänge, etwa bei Autobahnauffahrten. Die Fahrzeuge auf der Autobahn könnten etwa per Kommunikation darauf hingewiesen werden, schon frühzeitig die rechte Fahrspur für ein Fahrzeug auf der Beschleunigungsspur frei zu machen [163].
- **Weitere Anwendungen:** Daneben sind weitere Anwendungen für spezielle Zwecke denkbar, etwa ein automatisches Ausschalten des Fernlichtes kurz bevor sich andere Fahrzeuge in dessen Lichtkegel bewegen. Auch ein Weiterleiten von Videoaufnahmen durch vorausfahrende Fahrzeuge wurde bereits untersucht [164].

Während sich Gefahrenhinweise alleine durch Kommunikationsdaten realisieren lassen, werden automatisierte Eingriffe zur Kollisionsvermeidung oder Manöverunterstützung vorrangig in Verbindung mit bildgebenden Sensoren realisiert. Die Ungenauigkeit der GPS-Positionierung und die generelle Fehleranfälligkeit des drahtlosen Kommunikationskanals können so ausgeglichen werden. Zukünftig könnte allerdings durch verbesserte Positionierungs- sowie Kommunikationsverfahren eine rein kommunikationsbasierte Kollisionsvermeidungsanwendung umgesetzt werden [151, 165, 166].

### 2.2.6.2 Effizienz

Die zweite dominante Klasse von Anwendungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation stellen jene zur Verbesserung der Effizienz im Straßenverkehr dar [167]. Dabei gibt es verschiedene Interessen der beteiligten Parteien. Für die Automobilhersteller steht die Verringerung des individuellen Verbrauchs ihrer Fahrzeuge und eine schnellere Routenführung im Fokus, um den Fahrern Zeit zu ersparen. Von staatlicher Seite steht

dagegen die Optimierung des Gesamtverbrauchs der Verkehrsteilnehmer bei gleichzeitig optimaler Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur im Mittelpunkt. In der Regel widersprechen sich beide Interessen nicht, es gibt allerdings Szenarien, in denen Widersprüche zwischen individuellen und gesellschaftlichen Interessen auftreten.

Folgende Anwendungen zählen zu dieser Klasse.

- **Optimierte Routenführung:** Indem von allen kommunizierenden Fahrzeugen Informationen über deren derzeitigen Zustand gesammelt werden, ist eine detaillierte Analyse der Straßenverhältnisse möglich. Auf diese Weise lassen sich Staus und zähfließender Verkehr identifizieren. Dem Fahrer können dann alternative Routen angeboten werden. Dadurch wird die vorhandene Straßeninfrastruktur besser genutzt und es können Zeit und Energie eingespart werden [168, 169]. Es ist allerdings darauf zu achten, dass durch Stauumfahrungsempfehlungen keine neuen Staus an anderer Stelle entstehen [170].
- **Verkehrssteuerung:** Durch elektronische Beschilderung reagieren Straßenbetreiber schon heute flexibel auf dynamische Straßensituationen. Durch die Freigabe von zusätzlichen Spuren oder Anpassungen der erlaubten Höchstgeschwindigkeit wird so in den Verkehr eingegriffen, um Staus oder Gefahren zu vermeiden. Voraussetzung dafür sind jedoch hohe Investitionen und Wartungskosten für entsprechende Anzeigetafeln. Durch Kommunikationstechnik kann die Darstellung dieser dynamischen Beschilderung in die einzelnen Fahrzeuge verlagert werden [171, 172, 173].
- **Individuelle Verbrauchsoptimierung:** Abseits von optimierter Routenführung gibt es weitere Möglichkeiten für die Verbrauchsoptimierung jedes Fahrzeugs. Durch automatisierte Berechnungen lässt sich etwa im innerstädtischen Verkehr – falls möglich – die optimale Geschwindigkeit für eine grüne Welle anzeigen. Damit ist ein gleichmäßigeres und damit verbrauchsfreundlicheres Fahren möglich. Durch die Auswertung der Straßenauslastung, aber auch der Steigungen, Kurven und weiterer Straßeneigenschaften, die von vorausfahrenden Fahrzeugen gefahren werden bzw. wurden, kann der Antriebsstrang des eigenen Fahrzeugs bereits auf entsprechende Verhältnisse eingestellt werden [174, 175]. Dies spielt insbesondere bei

neuen Antrieben in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eine große Rolle, da durch verbesserte Betriebsstrategien große Energieeinsparungen möglich sind. Außerdem können Ampeln als Kommunikationsknoten einbezogen werden, die ihre verbleibende Rot-Zeit kommunizieren [157].

Eine Spezialanwendung, die aufgrund der hohen Verbrauchsmengen vor allem im Nutzfahrzeugbereich eine Rolle spielt, ist das *Platooning*. Dieser Begriff beschreibt das Bilden von Konvois aus mindestens zwei Fahrzeugen, die sich verbinden. Dem vorausfahrenden Führungsfahrzeug folgen alle weiteren Fahrzeuge dieses Konvois mehr oder weniger automatisiert. Indem der Abstand der Fahrzeuge so gering wie möglich gehalten wird, können der Windschatten ebenso wie die frühzeitige Adaption auf die vorausliegende Fahrstrecke signifikante Verbrauchseinsparungen erbringen [102, 176, 177, 178].

- **Parkleitsysteme:** Ein intensiv untersuchtes Spezialthema ist die Optimierung der Parkplatzsuche. In vielen Metropolen verbringen die Fahrer viel Zeit mit der Parkplatzsuche, womit unnötige Emissionen verursacht und Straßen zusätzlich belastet werden. Durch Kommunikationssysteme können freie oder frei werdende Parkplätze an suchende Fahrer vermittelt werden, welche dann direkt den freien Parkplatz ansteuern können. Hier ist zu beachten, dass Parkplätze durch ein solches System nicht mehrfach vergeben werden [179, 180].

### 2.2.6.3 Infotainment und Komfort

Als dritter Bereich werden meist neue oder erweiterte Infotainment-Anwendungen oder allgemein den Fahrkomfort verbessernde Anwendungen genannt. Gerade in diesem Bereich sind die Übergänge zu herkömmlichen mobilfunkbasierten Diensten fließend.

Folgende Anwendungen zählen zu dieser Klasse.

- **Persönliche Dienste:** Zu den persönlichen Diensten zählen jene mit Bezug auf die Interessen und Gewohnheiten des Fahrers. Vielfach wurde etwa vorgeschlagen, Mediendateien wie Musik und Filme über ein Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerk zu beziehen. Daneben könnten persönliche Daten mit den Fahrzeug-Systemen synchronisiert wer-

den oder Benachrichtigungen zu interessanten touristischen Orten präsentiert werden.

- **Wartungsdienste:** In den Bereich der Wartungsdienste fallen etwa Anwendungen für die Aktualisierung von Fahrzeugsoftware und Navigations-Kartenmaterial und die Tele-Diagnose bei Defekten.
- **Weitere Dienste:** Daneben wurde eine Vielzahl weiterer Anwendungen vorgeschlagen, die für sich selbst stehen und sich nicht gruppieren lassen. Dazu zählen zum Beispiel automatisierte Mautabrechnungssysteme, neuartige Diebstahlsicherungen, Flottenmanagement und sogar Spiele [68, 181].

### 2.2.7 Aktuelle Standards

Das CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C CC) hat für Europa in den vergangenen Jahren die Standardisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation vorangetrieben. Offiziell sind die Standards vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) veröffentlicht worden. Nachdem in mehreren Standards und Spezifikationen größere Bereiche genormt wurden, hat das C2C CC ein *Basic System Standards Profile* erarbeitet, das alle nötigen Normen und Spezifikationen für die Markteinführung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zusammenfasst und offene Fragen klärt [182].

In den USA fand die Standardisierung nach anderen Prozessen statt und hat in Details zu anderen Lösungen geführt. Im Wesentlichen sind die Kommunikationsverfahren jedoch gleichwertig bzw. kompatibel. Dazu wurden sogenannte *Harmonization Task Groups* gegründet, die mit Experten aus beiden Kontinenten besetzt wurden. Dem Basic System Standards Profile des C2C CC entspricht in den USA der SAE-Standard *Minimum Performance Requirements* [183].

In den folgenden Abschnitten soll der aktuelle Status der Standardisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation erläutert werden. Der Fokus liegt dabei auf den europäischen Standards, US-spezifische Abweichungen werden erwähnt, wo sie von Bedeutung für diese Arbeit sind. Mehr Details finden sich etwa in [184]. Der japanische Ansatz auf Basis von 760-MHz-Funktechnik wird aufgrund seines länderspezifischen Ansatzes nicht im Detail erläutert und es wird auf [185, 186, 187, 188] verwiesen.

### 2.2.7.1 Kommunikationsarchitektur

Im Rahmen der europäischen Standardisierungsaktivitäten wurde eine Referenzarchitektur für die Knoten der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation definiert. Darin enthalten sind alle Module, die in mehreren Normen und Spezifikationen beschrieben werden [189].

Die Referenzarchitektur – dargestellt in Abbildung 2.5 – folgt dem ISO/OSI-Schema für die Schichten eines Netzwerkssystems nicht durchgehend. Die unterste Schicht beim Kommunikationsmedium stellt die *Access*-Schicht dar, die für höhere Schichten verschiedene physikalische Systeme abstrahiert. In der Schicht *Networking & Transport* werden die Routing- und Forwarding-Protokolle umgesetzt. Darüber befindet sich die *Facilities*-Schicht, die diverse Software-Module bereitstellt, die von den Anwendungen in der *Applications*-Schicht verwendet werden können. Schichtenübergreifend werden die Blöcke *Management* und *Security* definiert.

Auf allen Schichten wurde der Schwerpunkt der Standardisierung jeweils auf die Sende- und die für das Senden notwendigen Empfangsteile sowie die Bestimmung der momentanen Kanalauslastung gelegt. Die Erfüllung der Standards ist in dieser Richtung besonders elementar für die Funktion eines kooperativen Systems [190]. Die konkrete Verarbeitung von empfangenen Daten dagegen obliegt im Wesentlichen den Fahrzeugherstellern, die teilweise unterschiedliche Ansprüche an die funktionale Sicherheit, Qualität und Anmutung eines Systems haben. Es ist somit in der Konsequenz auch denkbar, dass Fahrzeuge Daten nur senden und auf den Empfang verzichten. Dies muss nicht unbedingt auf Altruismus beruhen, sondern kann etwa durch eine gesetzliche Mandatierung erforderlich sein.

In den USA hat sich für den gesamten Kommunikationsstack der Begriff *Wireless Access in Vehicular Environments* – kurz *WAVE* – etabliert [192, 193]. In Abbildung 2.6 werden die Elemente von *WAVE* und die dazugehörigen Standards dargestellt. Das Gesamtsystem ist ähnlich zur europäischen Referenzarchitektur aufgebaut [194].

### 2.2.7.2 Access-Schicht

In der *Access*-Schicht werden die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) und die Sicherungsschicht (Data Link Layer) zusammengefasst. Die Sicherungsschicht wird in zwei Subschichten aufgeteilt, die *Medium-Access-Control*-Subschicht (MAC) und die *Logical-Link-Control*-Subschicht (LLC).

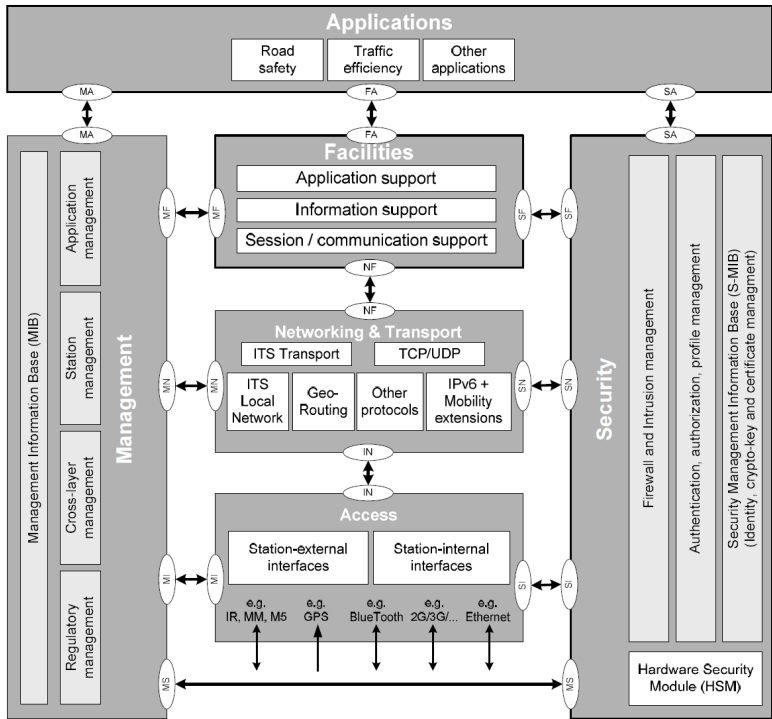


Abbildung 2.5: Die Referenzarchitektur für europäische Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (Grafik: [189]).

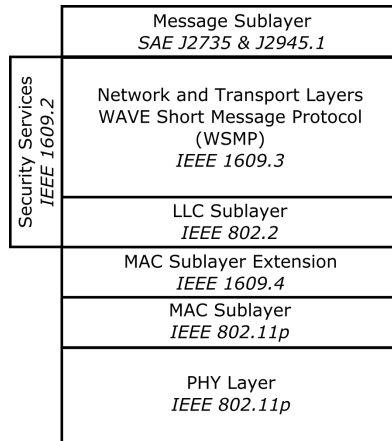


Abbildung 2.6: Die Kommunikationsarchitektur der USA mit den relevanten Standards (vgl. [191, 192]).

Die Normen IEEE 802.11p, IEEE 1609.4 sowie die ETSI-Spezifikation 102 687 umfassen die Bitübertragungsschicht und die MAC-Subschicht und werden im Folgenden erläutert. Die LLC-Subschicht wird nach IEEE 802.2 realisiert [195].

**2.2.7.2.1 IEEE 802.11p** Für die drahtlose Direktkommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur hat sich im Laufe der Zeit die Gruppe der IEEE 802.11-Standards als eine geeignete Basis erwiesen [196, 197, 198, 199]. Damit hat sich der Ansatz des *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) gegen Zeitschlitzverfahren (*Time Division Multiple Access* – TDMA) durchgesetzt [200]

Nach der Verabschiedung des IEEE-802.11a-Standards im Jahr 1997 wurden später Erweiterungen zur Einführung neuer Anwendungen, zur Ermöglichung höherer Datenraten und Ergänzung neuer Frequenzbänder für neue Einsatzszenarien hinzugefügt [114, 201]. Im Endverbraucherbereich für Heimnetze sind etwa die Normen IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g und IEEE 802.11n, oftmals zusammengefasst als IEEE

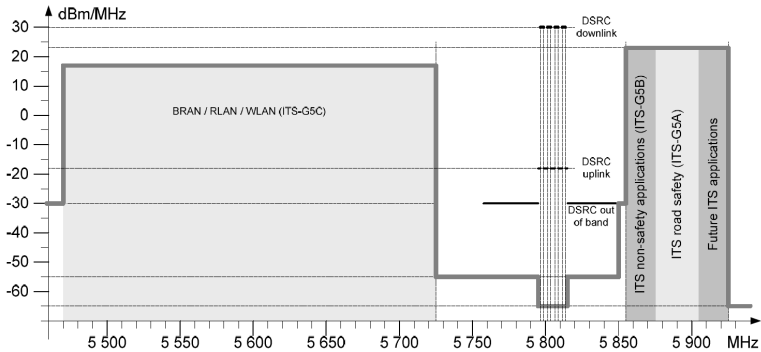


Abbildung 2.7: Das für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation reservierte Frequenzspektrum bei 5.9 GHz (Grafik: [205, 206]). Unterhalb dieses Spektrums befindet sich Frequenzbänder für Mautsysteme bei 5.8 GHz (hier als DSRC bezeichnet) und für WLAN von 5.46 bis 5.73 GHz.

802.11abgn, weit verbreitet [114, 194]. Beginnend im November 2004 begann die Arbeit am IEEE 802.11p-Standard, einer Erweiterung speziell für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Im Juli 2010 war die Arbeit an der Erweiterung mit ihrer Erstveröffentlichung abgeschlossen [202].

Die Änderungen gegenüber IEEE 802.11a, auf dem IEEE 802.11p aufsetzt, sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

- **Frequenzband:** IEEE 802.11a arbeitet in diversen Frequenzbereichen bei 2.4 GHz und 5.8 GHz. Für IEEE 802.11p wurde ein Frequenzband von 5.85 GHz bis 5.95 GHz speziell für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation reserviert. Ein Teil dieses Spektrums wurde von der EU-Kommission im August 2008 für eine ebensolche Nutzung freigegeben [203], in den USA durch die Federal Communication Commission (FCC) bereits im Jahr 1999 [204]. Abbildung 2.7 zeigt das reservierte Spektrum und angrenzende Frequenzbereiche.
- **Kanäle:** Im vorgenannten Frequenzband wurden für spezielle Zwe-



## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

Zentral- frequenz (MHz)	EU-Nutzung	US-Nutzung	Anmerkungen
5860	Service Channel 4	Critical Safety of Life	Reserviert
5870	Service Channel 3	Service Channel 174	
5880	Service Channel 1	Service Channel 176	
5890	Service Channel 2	<b>Control Channel</b>	
5900	<b>Control Channel</b>	Service Channel 180	
5910	Service Channel 5	Service Channel 182	
5920	Service Channel 6	High Power Public Safety	Reserviert

Tabelle 2.3: Die Zuteilung der Kanäle des Frequenzspektrums zu bestimmten Diensten in den USA und der EU [21, 205, 207].

cke mehrere Kanäle definiert. Für Europa gibt es einen *Control Channel* und mehrere *Service Channels* [207]. Für den nordamerikanischen Bereich gibt es daneben einen *Critical Safety of Life Channel* und einen *High Power Public Safety Channel* [208]. Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht über die Zuordnung der Kanäle.

In den europäischen Standards wird des Weiteren vorgegeben, dass alle Knoten, die Anwendungen zur Verkehrssicherheit anbieten, jederzeit auf dem Control Channel empfangen müssen, solange sie nicht selbst senden. Sollen andere Kanäle parallel genutzt werden, müssen mehrere Antennen angesteuert werden [206].

- **Hohe Relativgeschwindigkeiten:** In den herkömmlichen IEEE 802.11-Standards werden die hohen Relativgeschwindigkeiten von  $500 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , die entgegenkommende Fahrzeuge erreichen können, nicht berücksichtigt. Der physikalische Effekt der Dopplerverschiebung führt bei nicht optimierten Systemen zu hohen Paketverlustraten. Die Kanalbreite von 10 MHz wurde gewählt, um bei hohen Geschwindigkeiten durch ein höheres *Guard Interval* die Auswirkungen des Doppler-Effekts zu verringern. Auf diese Weise werden Interferenzen zwischen den einzelnen Symbolen der übertragenen Daten vermieden. Trotzdem kann es bei sehr hohen Geschwindigkeiten dazu kommen, dass die Kanalabschätzungen, die zu Beginn der Übertragung eines Frames vorgenommen wurden, zum Ende der Über-

tragung desselben Frames nicht mehr korrekt sind. Hier sind also besondere Mechanismen bei den empfangenden Geräten nötig [114, 206].

- **Broadcast-Netzwerk:** In einem herkömmlichen IEEE 802.11-Netzwerk bilden die Geräte sogenannte *Basic Service Sets*, etwa um einen Access Point im privaten Heimnetzwerk. Durch die Mobilität der kommunizierenden Knoten verändert sich ein Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerk dagegen ständig. Basic Service Sets wurden deswegen in IEEE 802.11p gestrichen, womit auch die damit verbundenen Authentifizierungs- und Verbindungsaufbaumechanismen auf den niedrigen Schichten überflüssig sind. Außerdem werden einige überflüssige Frame-Formate entfernt [114, 206, 209].
- **Quality of Service:** Um die Priorisierung von Nachrichten zu ermöglichen, wird das vorher nicht verwendete *Enhanced-Distributed-Channel-Access*-Schema (EDCA) verwendet. Damit werden von der MAC-Schicht für jeden unterstützten Kanal in Senderichtung vier Warteschlangen verwaltet, die jeweils Nachrichten gleicher Priorität sammeln. Die Warteschlangen werden mit unterschiedlichen Prioritäten für den Zugriff auf den Kanal zugelassen [114].
- **Datenrate:** Als Datenrate wird standardmäßig  $6 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$  verwendet. Darüber hinaus sind auch andere Datenraten von 3 bis  $27 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$  möglich [210].
- **Out-of-band Emissions:** Für die unbeabsichtigte Abstrahlung auf benachbarte Frequenzbänder gibt es engere Grenzen als bei hausüblichem WLAN nach IEEE 802.11a.
- **Automobile Anforderungen:** Um den besonderen Anforderungen der Automobilbranche gerecht zu werden, wurden bei IEEE 802.11p engere Grenzen für die verwendeten Frequenzgeneratoren und Zeitgeber definiert. Der Temperaturbereich wurde auf  $-40^\circ$  bis  $+80^\circ$  ausgeweitet [208].

Im Rahmen der europäischen Standardisierung wurden die wesentlichen Elemente von IEEE 802.11p in die Normen ETSI EN 302 571 (PHY) und ETSI EN 302 663 (MAC) aufgenommen bzw. referenziert [205, 207]. Die

schon erwähnten Abweichungen im der Zuteilung der Kanäle zu den Frequenzen können durch Software-Weichen auf baugleicher Hardware umgesetzt werden.

Bewertungen von IEEE 802.11p wurden durch Simulationen und Feldtests vorgenommen, Ergebnisse und Verbesserungsvorschläge finden sich etwa zu Kreuzungssituationen in [211, 212], zu hohen Geschwindigkeiten in [213] und allgemein in [112, 113, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220].

**2.2.7.2.2 IEEE 1609.4** Als optionale Erweiterung auf der MAC-Schicht wurde die Norm IEEE 1609.4 geschaffen [221, 222]. Dort wird eine Aufteilung von Anwendungen auf die verfügbaren Kanäle vorgeschlagen [223]. Wesentlicher ist jedoch ein dort beschriebener Mechanismus, um zwischen mehreren Kanälen zu springen. Dies betrifft insbesondere Systeme, die zu jedem Zeitpunkt nur auf einen Kanal zugreifen können. Dazu müssen alle teilnehmenden Geräte zeitlich synchronisiert werden, dies kann durch die GPS-Zeit oder ein spezielles *Timing-Advertisement-Frame* geschehen. In regelmäßigen Intervallen von 100 ms Länge gibt es dann jeweils einen knapp 50 ms langen Zeitschlitz für den Zugriff – lesend bzw. schreibend – auf den Control Channel und einen der Service Channels, zwischen den Zeitschlitz liegen noch kurze *Guard Intervals*, während derer eine Übertragung nicht erlaubt ist und laufende Übertragungen abgebrochen werden müssen [224].

Der Nutzen und die Performance von 1609.4 wurde in mehreren Arbeiten untersucht. Kritisiert wurde die mangelhafte Ausnutzung der Kanäle. Wenn alle Geräte zwischen den Kanälen wechseln, wird der Control Channel zu weniger als 50 % und die Service Channels je nach angebotenen Diensten noch weniger ausgelastet. Dies wirkt sich auch auf Geräte aus, die nur auf dem Control Channel kommunizieren. Diese müssten sich ebenfalls an die synchronisierten Zeitschlitz halten, um mit den wechselnden Geräten kommunizieren zu können [222, 224]. Ebenfalls nachteilig könnte sich der fehlende Übergangspfad zu zukünftigen Multi-Kanal-Systemen erweisen [222]. Wenn höhere Schichten neue Sicherheitsnachrichten unkoordiniert generieren, entstehen in größeren Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerken zu Beginn des Control-Channel-Zeitschlitzes massive Koordinierungsprobleme, die zu mehrfach scheiternden Übertragungen der aufgelaufenen Nachrichten führen könnten [222]. In mehreren Simulationen konnten diese Effekte nachgewiesen und weitere Performance-Probleme – insbesondere in mittelgroßen Netzwerken – identifiziert werden [222, 224, 225, 226, 227].

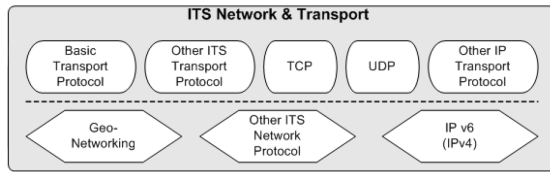


Abbildung 2.8: Aufgliederung der Networking- & Transport-Schicht (Grafik: [228]).

---

Arbeiten, die die Performance von 1609.4 durch neue Mechanismen zu verbessern versuchen, haben dies mehrheitlich auf Kosten des Control Channels erreicht. Dies ist für sicherheitsrelevante Anwendungen nicht akzeptabel [225]. Aufgrund dieser deutlichen Probleme erscheint es derzeit unwahrscheinlich, dass die Mechanismen von 1609.4 in der momentan standardisierten Weise im Markt umgesetzt werden. Daher werden diese Mechanismen in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

### 2.2.7.3 Networking- & Transport-Schicht

Die Schichten *Networking* und *Transport* werden im ETSI-Architekturschaubild als *Networking & Transport* zusammengefasst. Auf Protokollebene findet aber nichtsdestotrotz eine Trennung in beide Schichten statt, wie Abbildung 2.8 zeigt. Im Folgenden soll diese Unterscheidung beibehalten werden.

**2.2.7.3.1 Netzwerk-Schicht** In der Netzwerk-Schicht wurde zur dezentralen Koordination der Kommunikation das sogenannte *Geo-Networking* eingeführt. Es wird in mehreren Normen definiert [228, 229, 230, 231, 232]. Geo-Networking kommt ohne eine zentrale koordinierende Stelle aus. Stattdessen geben sich die einzelnen Stationen selbst Bezeichner, die unter anderem auf ihrer geografischen Position beruhen. Neben der Position enthält der Geo-Networking-Header außerdem Informationen über die aktuelle Fahrtrichtung und die Geschwindigkeit des Senders.

Die Pakete können über mehrere Knoten hinweg weitergeleitet werden. Als Zieladresse für die Pakete gibt es mehrere Optionen

[229, 230].

- **Geo-Unicast:** Ein Knoten an der Zielposition wird angegeben. Ist keine direkte Verbindung zwischen Start- und Zielknoten möglich, leiten jeweils dazwischen liegende Knoten das Paket in Richtung des Ziels weiter. Geo-Unicast wird auch als *Point-to-Point* bezeichnet.
- **Geo-Anycast:** Ein geografisches Zielgebiet in Form einer Ellipse oder eines Rechtecks wird vom Startknoten definiert. Empfänger ist der erste Knoten im Zielgebiet, der direkt oder indirekt das Paket weitergeleitet bekommt [233].
- **Geo-Broadcast:** Ähnlich wie GeoAnycast, nur dass das Paket vom ersten Empfänger im Zielgebiet an alle weiteren Knoten im Zielgebiet – eventuell über mehrere Zwischenknoten – weitergeleitet wird.
- **Topologically-Scoped Broadcast:** Der Startknoten gibt eine maximale Anzahl von Weiterleitungen an, mit der ein Paket in seiner Nachbarschaft verteilt wird. Dieses Verfahren wird auch als *Point-to-Multipoint* bezeichnet.

Die Pakete können nach mehreren Forwarding-Algorithmen in Richtung des Zielknotens- oder -bereichs weitergeleitet werden. Als Standard wird der *Greedy-Forwarding-Algorithmus* (GF) verwendet [231, 232, 234]. Dieser geht nach der *most-forward-within-radius*-Strategie vor, das heißt das Paket wird jeweils an den am weitesten entfernten Knoten weitergeleitet, der sich noch im Sendebereich des aktuellen Knotens befindet [235]. Daneben ist in Zukunft die Umsetzung weiterer Forwarding-Algorithmen möglich. Entsprechende Vorschläge sind beispielsweise in [171, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251] zu finden. Zusammenfassungen und Vergleiche finden sich in den Übersichtsarbeiten [252, 253, 254].

**2.2.7.3.2 Transport-Schicht** Basierend auf der Netzwerk-Schicht, vor allem auf dem Geo-Networking-Mechanismus, sind mehrere Protokolle auf der Transport-Schicht umsetzbar. Spezifiziert wurden bisher das *Basic Transport Protocol* (BTP, [255]) und ein *Geo-Networking IPv6 Adaptation Sub-Layer* [256]. Letztere ermöglicht die Umsetzung herkömmlicher Internet-Kommunikation über IPv6. Allerdings gibt es derzeit keine Anzeichen, dass dieses Verfahren zum Einsatz kommt.

Das Basic Transport Protocol ist ein sehr einfach gestaltetes, verbindungsloses Protokoll, das dazu dient, Nachrichten den korrekten Endpunkten – meistens Anwendungen – innerhalb eines Netzwerkknotens weiterzuleiten [255]. Die Zuordnung der Endpunkte fußt auf 16-Bit-Werten für Start- und Zielport.

Im amerikanischen Raum wurde für die Networking- & Transport-Schicht die Norm IEEE 1609.3 verabschiedet. In dieser wird ein *WAVE Short Message Protocol* definiert [192].

### 2.2.7.4 *Facilities*-Schicht

Die *Facilities*-Schicht stellt mehrere Dienste zur Verfügung, die von den Anwendungen genutzt werden können. Einzelne Anwendungen können individuell von jedem Hersteller definiert werden – zum Beispiel eine einheitliche Schnittstelle zu den Anzeigemechanismen eines Fahrzeugs. Andere Dienste sind dagegen in Normen spezifiziert und müssen umgesetzt werden. In diesem Abschnitt sollen relevante Normen erläutert werden.

**2.2.7.4.1 Ereignisbasierte Informationen** Zur Realisierung der ereignisbasierten Informationsübertragung, also der Kommunikation von spezifischen Ereignissen, die vom Sendefahrzeug mit dessen Sensorik erkannt wurden, wurde im europäischen Rahmen die *Decentralized Environmental Notification Message* (DENM) definiert. Dieses Nachrichtenformat und der zugehörige Dienst *Decentralized Environmental Notification Basic Service* werden in der *Facilities*-Schicht definiert [257].

Das Konzept der DENMs ist sehr einfach. Wenn eine Fahrzeug-Anwendung ein spezifisches Ereignis anhand bestimmter Sensor-Werte detektiert hat, wird eine DENM generiert und – üblicherweise in die direkte Nachbarschaft per Broadcast – gesendet. Optional können DENMs per Geo-Networking über mehrere Knoten weitergeleitet werden, als Ziel können einzelne Fahrzeuge oder geografische Bereiche angegeben werden. Falls das betreffende Ereignis länger besteht, können DENMs auch wiederholt werden. Es gibt vier Typen von DENMs.

- **Neue DENM:** Eine neue DENM, die ein vom Sender zuvor nicht kommuniziertes Ereignis betrifft.
- **Aktualisierte DENM:** Eine aktualisierte DENM, die entweder neue Informationen zu einem bereits kommunizierten Ereignis ent-

hält oder eine Wiederholung von vorherigen DENMs darstellt. Letztere dient zur Information neuer Fahrzeuge in Reichweite.

- **Abbruchs-DENM:** Wenn der ursprüngliche Sender einer DENM feststellt, dass das zuvor kommunizierte Ereignis nicht mehr vorhanden ist, wird eine Abbruchs-DENM versendet.
- **Negierungs-DENM:** Wenn andere Fahrzeuge feststellen, dass das gemeldete Ereignis nicht oder nicht mehr vorhanden ist, können sie mit einer Negierungs-DENM andere Fahrzeuge von diesem Umstand unterrichten.

Senden mehrere Stationen eine DENM zum selben Ereignis, können diese Nachrichten beim Empfänger zu einem Ereignis aggregiert werden. Dies wird in der vorliegenden Norm jedoch nicht weiter spezifiziert.

Das Format der DENM unterteilt sich in fünf Bereiche. Das Nachrichtenformat wird in Abbildung 2.9 grafisch dargestellt. Der *Situation Container* enthält Details zum detektierten Ereignis und der *Location Container* beinhaltet Informationen zur Position des Ereignisses. Der *Management Container* enthält eine Identifikationsnummer des Ereignisses, einen Zeitstempel und zeigt an, ob es sich um eine Abbruchs- oder Negierungs-DENM handelt. Der optionale *Alacarte Container* kann Zusatzinformationen zum Ereignis beinhalten.

Die konkreten Ereignisse und Inhalte der DENMs werden im Rahmen der Standardisierung des Sendepfads einzelner Anwendungen auf Applikationsebene festgelegt.

**2.2.7.4.2 Cooperative Awareness** Um die Cooperative Awareness, also eine „kooperative Wahrnehmung“, zu erzeugen wurde der *Cooperative Awareness Basic Service* auf der Facilities-Schicht spezifiziert [25]. Dazu wird das Nachrichtenformat *Cooperative Awareness Message* (CAM) definiert, das die entsprechenden Informationen enthält. Durch den regelmäßigen Austausch der CAMs unter den beteiligten Fahrzeugen können sich diese jeweils ein virtuelles Bild ihrer Umgebung erzeugen und daraus für sie relevante Informationen extrahieren. Während die Erzeugung und die Kommunikation der CAMs spezifiziert werden muss, ist die Nutzung der in ihnen enthaltenen Informationen dem Hersteller des empfangenden Fahrzeugs überlassen – je besser die Auswertungsalgorithmen, desto größer ist der Mehrwert für den Fahrer.

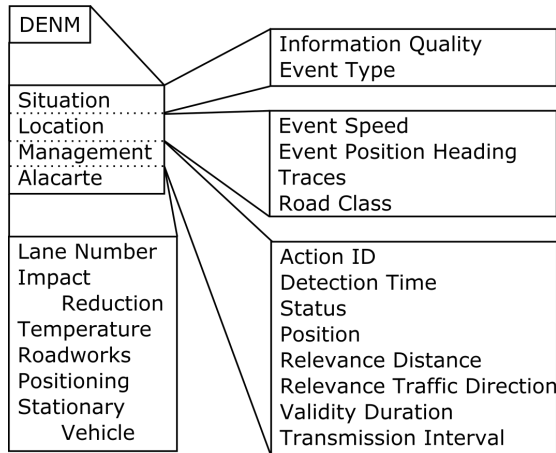


Abbildung 2.9: Vereinfachte Darstellung der Inhalte von DENMs. Die meisten Datenfelder sind abhängig vom Kontext.

Die CAMs werden mit einer Frequenz von 1 bis 10 Hz versendet, abhängig davon, wie stark sich Position, Geschwindigkeit oder Fahrtrichtung ändern. Eine neue CAM wird generiert und versendet, wenn

- mehr als eine Sekunde seit der letzten CAM vergangen ist oder
- sich die Position um mehr als 4 m verändert hat oder
- sich die Fahrtrichtung um mehr als  $4^\circ$  verändert hat oder
- sich die Geschwindigkeit um mehr als  $0.5 \frac{m}{s}$  verändert hat.

Diese Eigenschaften müssen über geeignete Sensorik mit maximal 10 Hz, bei hoher Kanallast auch seltener, geprüft werden. Nicht alle Informationen, die grundsätzlich in einer CAM enthalten sein können, müssen in jeder enthalten sein. Angaben wie etwa der Status der Leuchten, die sich nur sporadisch ändern, müssen in einem *Low Frequency Container* nur alle 500 ms versendet werden. Abbildung 2.10 zeigt in einer vereinfachten



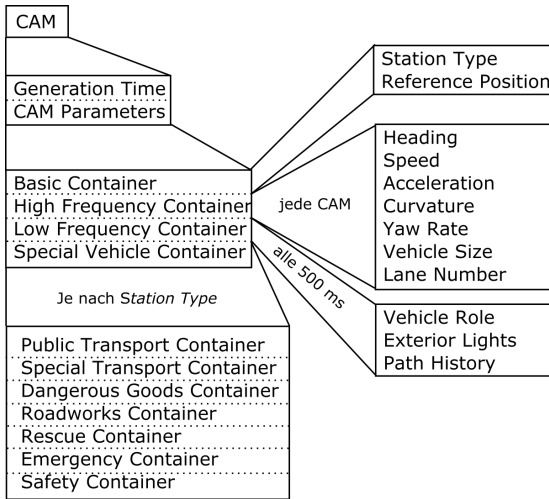


Abbildung 2.10: Vereinfachte Darstellung der Inhalte von CAMs. Manche Datenfelder sind nur in manchen CAMs enthalten, andere Inhalte sind abhängig vom Typ des Senders.

Darstellung die Inhalte der CAMs. Der *Basic Container* beinhaltet den Typ des Senders und dessen Position. Der *High Frequency Container* ist Teil jeder CAM und gibt die aktuellen Bewegungseigenschaften des Fahrzeugs an. Der *Low Frequency Container* wird dagegen nur mit maximal 2 Hz versendet. Die Fahrzeugrolle – z.B. ob es ein Polizeifahrzeug auf Einsatzfahrt ist – und die Lichter ändern sich nur selten, weswegen eine häufigere Übertragung nicht sinnvoll ist. Die Path History enthält bis zu 23 alte Positionen des Senders und führt daher zu hohen Datenmengen.

Da insgesamt sehr viele CAMs entstehen können, ist ein Weiterleiten der CAMs über mehrere Knoten nicht sinnvoll und wird von den Standards nicht erlaubt. Aus diesem Grund und je nach Verkehrssituation, Topologie und aktuellen Kommunikationsparametern kann die erreichte Cooperative Awareness starken Schwankungen unterworfen sein [258, 259, 260].

**2.2.7.4.3 Basic Safety Message** In den USA werden ereignisbasierte Daten und Cooperative Awareness in der *Basic Safety Message* zusammengefasst [261]. Die Inhalte bzw. Informationen sind im Vergleich zu DENM und CAM in anderer Weise angeordnet, aber gleichermaßen vorhanden. Ein Unterschied besteht in der Senderate, welche nicht wie bei der CAM von der aktuellen Bewegung eines Fahrzeugs abhängt, sondern fest auf 10 Hz eingestellt ist [21].

**2.2.7.4.4 Local Dynamic Map** Auf der Facilities-Schicht ist weiterhin eine Umgebungskarte, die sogenannte *Local Dynamic Map* (LDM), angesiedelt [262]. Diese Umgebungskarte sammelt die Informationen, die per Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation von anderen Knoten aus der Umgebung empfangen wurden, in Kombination mit anderen Datenquellen. Die LDM kann für die Anwendungen als einheitliche Quelle für die von ihnen benötigten Informationen fungieren. Die Anwendungen müssen die Umgebungsdaten daher nicht in eigenen Datenspeichern verwalten, sondern können diese bei Bedarf von der LDM anfordern, wo sie zentral verwaltet werden.

Grundsätzlich können Objekte und Ereignisse im Straßenverkehr nach ihrer Beständigkeit folgendermaßen klassifiziert werden.

1. **Dauerhaft statische Daten:** z.B. Straßenkartenmaterial, das üblicherweise fest im Fahrzeug installiert ist und nur selten oder gar nicht aktualisiert wird.
2. **Vorübergehend statische Daten:** Daten, die sich selten ändern, etwa geänderte Maximalgeschwindigkeiten auf Autobahnen.
3. **Vorübergehend dynamische Daten:** Daten, die sich immer wieder ändern, aber zeitweise stabile Zustände ausbilden. Dazu gehören etwa Informationen über (Gefahren-) Ereignisse und den Verkehrsfluss.
4. **Hochdynamische Daten:** Daten, die sich permanent verändern. Hier sind vor allem die Fahrzeuge in der Umgebung betroffen.

Die Hauptaufgabe einer LDM ist in ihrer Funktion als Informationsspeicher zu sehen. Sie sammelt Daten aus diversen Quellen, vor allem aus den eingegangenen Nachrichten, und baut damit eine Karte der Umgebung

des Fahrzeugs auf. Durch die ständig neuen Nachrichten von benachbarten Fahrzeugen ergibt sich ein immer neues Abbild der Umgebung.

Die Anforderungen einer LDM werden zum einen durch die nötigen Schnittstellen vorgegeben und zum Anderen durch die Bedürfnisse der Anwendungen. In [263] werden die Schnittstellen zu anderen Schichten und Modulen definiert. Dabei wird Bezug auf eine Auswahl von Anwendungen genommen. Die Norm ist jedoch nicht verbindlich, da eine LDM für herstellerübergreifende Interoperabilität nicht notwendig ist.

Der Begriff der LDM ist auslegbar. In einem weiten Sinne stellt auch jeder Speicher, in dem Informationen aus Nachrichten zwischengespeichert werden, bereits eine LDM dar. Die LDM kann jedoch mit mehr Komplexität und Funktionen ausgestattet werden [264]. Dies betrifft etwa die verwendeten Datenstrukturen, Zugriffsmechanismen und Mechanismen zur Datenaggregation. Es ist auch denkbar, auf eine LDM zu verzichten und jede Anwendung die von ihr benötigten Daten selbst verwalten zu lassen.

Hinsichtlich der Anbindung von Datennutzern gibt es verschiedene Realisierungsoptionen, die auch parallel verwendet werden können. Die Informationen können entweder aktiv bei der LDM abgefragt werden oder durch einen Registrierungsmechanismus – etwa einem Publish-Subscribe-Mechanismus – automatisch ausgeliefert werden.

Als Datenquellen dienen in erster Linie die empfangenen Nachrichten anderer Fahrzeuge. Insbesondere Ereignismeldungen können sowohl über ein DSRC-basiertes Netzwerk als auch über eine mobilfunkbasierte Lösung empfangen werden. Weitere mögliche Informationsquellen sind etwa Daten des eigenen Fahrzeugs wie dessen Position und Bewegungsdaten, Sensordaten, Informationen aus der installierten Straßenkarte, Infrastrukturdaten wie Ampeln und Verkehrsbeeinflussungsanlagen sowie lokale Anwendungen, die (Zwischen-) Ergebnisse in der LDM ablegen.

Für die Umsetzung von LDMs in Fahrzeugen wurden in der Vergangenheit – auch in anderen Kontexten – diverse Lösungen vorgeschlagen und teilweise umgesetzt. Im Rahmen der größeren Feldtests wurden konkrete Implementierungen realisiert. Eine Zusammenfassung grundlegender Techniken ohne konkreten Bezug zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation findet sich bei [265, 266, 267]. Darin werden sogenannte *spatio-temporal databases*, also Datenbanken mit räumlich-zeitlichen Dimensionen, beschrieben. Sie sind eine Erweiterung von Datenbanken mit rein räumlichen Dimensionen, wie sie in Geoinformationssystemen weit verbreitet sind [268, 269, 270].

Nach [262] soll die LDM vorrangig dynamische Daten enthalten, da für dauerhaft statische Daten wie Straßenkarten bereits vorhandene Industrielösungen existieren und nur schwierig in einem LDM-spezifischen Format umzusetzen seien.

Momentan liegt mit [262] nur eine Schnittstellenbeschreibung und eine grobe Skizze der Anwendungen vor. Eine Norm die LDM betreffend ist derzeit nicht absehbar, da es sich um ein rein internes Fahrzeug-System handelt, bei dem Interoperabilität nicht erforderlich ist. Ganz im Gegenteil sollte jeder Autohersteller mit der Auswahl und Gestaltung der Anwendungen auch maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung der LDM haben können. Damit ist jedoch offen, wie eine LDM zur Unterstützung einer vielfältigen Anwendungslandschaft in einer Art und Weise konstruiert werden kann, damit sie die an sie gerichteten Anforderungen effizient erfüllt.

### 2.2.7.5 *Application*-Schicht

Hinsichtlich der konkreten Anwendungen für die Markteinführung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation haben sich der europäische und der nordamerikanische Raum unterschiedlich positioniert. Während der Fokus in Europa auf den ereignisbasierten Anwendungen liegt, wird in den USA die Cooperative Awareness priorisiert. Die folgende Liste enthält die Anwendungen für die Markteinführung in Europa, das sogenannte *Basic Set of Applications*. Die Fahrzeuge müssen diese Anwendungen in Senderichtung unterstützen.

1. **Emergency Vehicle Warning:** Der Fahrer wird vor einem Notfallsanitätsfahrzeug gewarnt, welches sich nähert bzw. die eigene Fahrstrecke kreuzt.
2. **Emergency Electronic Brake Light:** Der Fahrer erhält eine Warnung, dass vor ihm ein Fahrzeug eine Notbremsung durchführt.
3. **Stationary Vehicle Warning/Rescue Signal:** Der Fahrer wird vor einem stehenden Fahrzeug – ob Panne oder Unfall – gewarnt. Bei einem Unfall können dadurch auch Helfer in der Nähe aufmerksam gemacht werden.
4. **Traffic Jam Ahead Warning:** Der Fahrer wird vor einem Stau, insbesondere dem Stauende, gewarnt.

5. **Adverse Weather Conditions:** Der Fahrer wird vor schlechten Wetterbedingungen gewarnt.
6. **Road Works Warning:** Der Fahrer wird vor mobilen und stationären Baustellen gewarnt.
7. **Hazardous Location Warning:** Der Fahrer wird vor allgemeinen Gefahrstellen gewarnt.
8. **Probe Traffic Data:** Sammeln von Fahrzeugbewegungsdaten zur Bestimmung des Verkehrszustands.
9. **Collision Risk:** Der Fahrer wird auf das Risiko einer Kollision, etwa an einer Kreuzung, hingewiesen.
10. **Pre-Crash:** Kurz vor einer unausweichlichen Kollision tauschen die Unfallgegner Informationen über ihre Eigenschaften aus. So kann z.B. das Gewicht oder die Lage der A- und B-Säule verwendet werden, um passive Sicherheitssysteme besser zu parametrisieren.
11. **Automatic Emergency Braking:** Automatischer Bremsengriff bei drohenden Kollisionen, insbesondere bei einer Folgefahrt.
12. **Green Light Optimal Speed Advisory:** Dem Fahrer wird eine Geschwindigkeit empfohlen, bei deren Einhaltung eine grüne Welle an den kommenden Ampelkreuzungen möglich ist.
13. **In-Vehicle Signage:** Verkehrszeichen werden über die Darstellungsinstrumente innerhalb des Fahrzeugs angezeigt.

Die Anwendungen 1 bis 7 können mit DENMs realisiert werden. Wann und mit welchen Sensordaten entsprechende DENMs erzeugt und befüllt werden, wird in sogenannten *Triggering Conditions* definiert, die alle beteiligten Hersteller einzuhalten haben. Die letzten beiden Anwendungen basieren auf Nachrichten, welche von Infrastruktur – Ampeln und Straßenschildern – versendet werden.

In den USA gilt der Fokus den Cooperative-Awareness-basierten Anwendungen. Dazu zählen die Punkte 8 bis 11 in der obigen Liste sowie zusätzlich folgende Anwendungen [21].

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

1. **Do Not Pass Warning:** Führt ein Fahrer auf einer zweispurigen Straße einen Überholvorgang durch, obwohl auf der Gegenfahrspur ein anderes Fahrzeug entgegen kommt, wird er entsprechend gewarnt.
2. **Left Turn Assist:** Linksabbiegevorgänge insbesondere an großen Kreuzungen ohne spezielle Abbiegespuren und Ampelphasen führen häufig zu Unfällen. Der Linksabbiegeassistent kann in unsicheren Situationen warnen.
3. **Blind Spot and Lane Change Warning:** Bei Spurwechsellvorgängen treten Kollisionen mit anderen Fahrzeugen, die sich im toten Winkel der Außenspiegel befinden, auf. Ähnlich zu bestehenden Lösungen, die den toten Winkel mit Radar ausleuchten, könnte die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in entsprechenden kritischen Situationen Warnungen auslösen.

### 2.2.7.6 Schichtenübergreifende Mechanismen

Zusätzlich zu den vorgenannten Schichten gibt es außerdem schichtenübergreifende Mechanismen für Sicherheit und Datenschutz sowie zur Vermeidung von Überlast auf dem Kommunikationskanal.

**2.2.7.6.1 Sicherheit und Datenschutz** Neben dem allgemeinen Wunsch nach Sicherheit in informationstechnischen Systemen erfordern automobiler Anwendungen und Technologien ein noch höheres Maß an Verlässlichkeit und Datenschutz. Entsprechende Mechanismen kommen dabei auf mehreren Schichten ins Spiel, weswegen sie Schichten-übergreifend konzipiert sein müssen [271].

- **Verschlüsselung:** Die Sinnhaftigkeit einer Verschlüsselung der übertragenen Daten ist unterschiedlich zu bewerten. Bei der direkten Kommunikation zwischen den Knoten, insbesondere wenn die Nachrichten verbindungslos per Broadcast versendet werden, ergibt eine Verschlüsselung keinen Sinn und erzeugt im Gegenzug nur Rechenlast bei Sender und Empfänger. Werden jedoch Daten über das Internet ausgetauscht, darunter auch Daten für Sicherheitsmechanismen wie Zertifikate und Schlüssel, dann ist eine Verschlüsselung angebracht [272].

- **Datenschutz:** Aus Datenschutzperspektive gilt es zu verhindern, dass jedes Fahrzeug durch seine gesendeten Daten verfolgt und ausgespäht werden kann. Insbesondere dürfen die Fahrzeuge keine mit einfachen Mitteln rückverfolgbare Identifikationsnummer versenden und die Erstellung von Bewegungsprofilen muss möglichst verhindert werden [273, 274].

Ein dezentrales System, wie es mit der aktuellen Standardisierung vorgesehen ist, kann prinzipiell mehr Datenschutz sicherstellen, da die Knoten ihre Positionen nicht an zentrale Stellen melden müssen. Sie stellen ihre Informationen lediglich lokal zur Verfügung. Dagegen sind Knoten in mobilfunkbasierten Netzen mit Internetzugang ohne großen Aufwand weltweit jederzeit lokalisierbar [68].

- **Autorisierung:** Indem die Identität und Integrität des Senders von Nachrichten beim Empfänger überprüft werden, kann sichergestellt werden, dass die empfangenen Daten zuverlässig sind. Ohne eine solche Autorisierung könnte ein böswilliger Dritter Nachrichten in das System einschleusen, die die tatsächliche Straßensituation verfälschen. Insbesondere muss verhindert werden, dass auf diese Weise weiträumig falsche Daten eingespielt werden [275, 275, 276, 277]. Wie eine Autorisierung trotz weitgehendem Datenschutz umgesetzt werden kann, wird im späteren Verlauf dieses Abschnitts erläutert.
- **Plausibilisierung:** Eine Plausibilisierung der eingehenden Daten beim Empfänger schützt diesen davor, Daten zu vertrauen, die absichtlich oder unabsichtlich falsch sind. Eine einfache Plausibilisierung prüft etwa, dass Werte ihren Wertebereich nicht überschreiten, während eine fortgeschrittene Plausibilisierung auch zeitliche Veränderungen prüft, etwa unrealistische Geschwindigkeitsveränderungen in kurzer Zeit [278, 279, 280, 281, 282].
- **Revokation:** Falls es trotz der vorgenannten Sicherheitsmechanismen zu Missbrauchsversuchen kommt, muss der Verursacher aus dem Kommunikationssystem ausgeschlossen werden können, so dass er die Funktionstüchtigkeit der anderen Knoten nicht stört.
- **Fahrzeug-interne Datensicherheit:** Der Austausch von Daten über einen drahtlosen Kanal eröffnet Angreifern einen neuen Ansatzpunkt, um Fahrzeuge zu manipulieren. Um auch den drahtlosen

Kanal ins Fahrzeug abzusichern, muss eine Firewall implementiert werden, die ungewollte Eingriffe in das Fahrzeugsystem verhindert [26, 27, 283].

- **Reputationsmanagement:** Ein optionaler Mechanismus, der jedoch breites Interesse in der Forschung genießt, kann unter dem Begriff Reputationsmanagement zusammengefasst werden. Dadurch werden einem herkömmlichen Sicherheitssystem, das nur „zulässig“ und „unzulässig“ unterscheidet, Zwischentöne hinzugefügt. Durch einen Indizienkatalog kann so die Zuverlässigkeit jedes Teilnehmers eingeschätzt werden [284, 285, 286, 287, 288, 289].
- **Kanalüberlastung:** Indem der drahtlose Kanal ausgelastet wird, kann ein Angreifer die Kommunikation legitimer Knoten verhindern. Ein solcher *Denial-of-Service*-Angriff kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden. Schlussendlich kann auf technische Weise ein Störsender nicht verhindert werden. Solange ein solcher Angriff nur lokal stattfindet, kann dieser jedoch durch Behörden lokalisiert und bekämpft werden [290].
- **Erfüllung der Standards:** Es muss sichergestellt werden, dass alle beteiligten Fahrzeuge in einer Region sich an die dort geltenden Standards halten. Das gilt nicht nur für die Grundzüge der Kommunikation, die ohne Interoperabilität nicht möglich ist, sondern auch für die Datenqualität. Es muss beispielsweise verhindert werden, dass die Fahrzeuge eines bestimmten Herstellers Geschwindigkeiten im falschen Format versenden und so in den Anwendungen der Empfänger Fehler verursachen. Auch Weiterleitungsregeln, die im Geo-Networking angelegt sind, müssen implementiert werden, damit sicherheitsrelevante Daten nicht auf dem Übertragungsweg verloren gehen [291].

Bei der Umsetzung dieser Sicherheitsmechanismen und -eigenschaften muss dabei stets die Effizienz hinsichtlich der Rechenzeiten durch zusätzliche Datenmengen berücksichtigt werden [292, 293].

Im europäischen Standard [294] wurde ein Referenzmodell einer Sicherheitsarchitektur definiert, welches den meisten oben genannten Forderungen entspricht. Rückgrat dieses Systems ist eine Public-Key-Infrastruktur (PKI) mit zentraler Zertifikatsvergabe unter Verwendung kurzzeitig gültiger Pseudonym-Zertifikate, die den Datenschutz sicherstellen [295, 296].



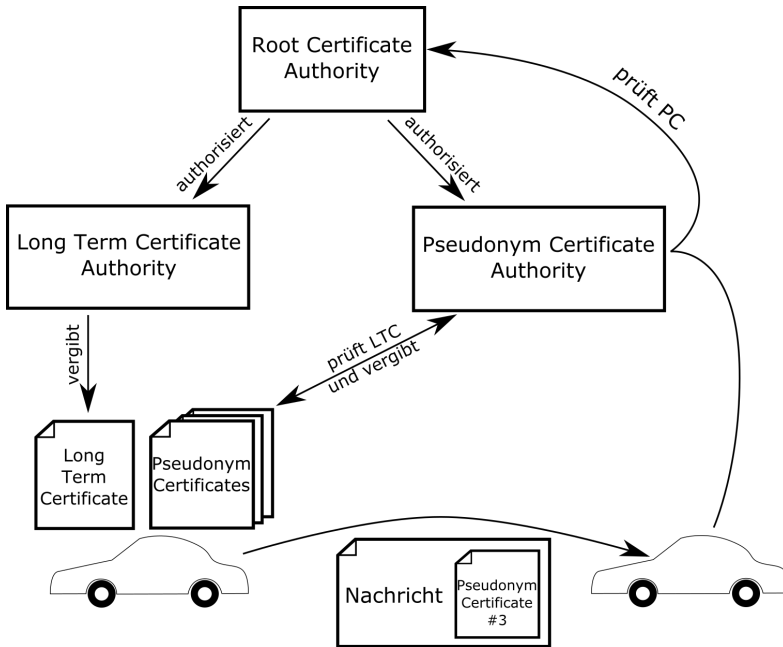


Abbildung 2.11: Die Public Key Infrastructure zur Sicherstellung legitimer Kommunikation [297].

Die PKI besteht dabei aus drei verschiedenen Typen von *Certificate Authorities* (CAs) (siehe auch Abbildung 2.11).

1. **Long Term Certificate Authority (LTCA):** Die LTCAs vergeben eindeutige Zertifikate an die einzelnen Kommunikationsknoten, die sich selten bis gar nicht über die Lebensdauer dieses Knotens ändern. Diese Zertifikate werden daher als *Long Term Certificates* (LTCs) bezeichnet. Die LTCAs können von Automobilherstellern oder Lieferanten betrieben werden.
2. **Pseudonym Certificate Authority (PCA):** Die PCAs verge-

ben mit den *Pseudonym Certificates* (PCs) Zertifikate ohne eindeutige Bezeichner, um die Privatsphäre nicht zu gefährden. Da die Pseudonym-Zertifikate häufig gewechselt werden sollen, sollen mehrere solcher Zertifikate gleichzeitig an jeden Knoten ausgegeben werden. Um die PCs zu erhalten, authentifizieren sich die Knoten mit ihrem aktuellen LTC gegenüber einer PCA.

- 3. Root Certificate Authority (RCA):** Die RCAs dienen zur Zertifizierung der untergeordneten Certificate Authorities – sowohl LT-CAs und PCAs. Die Anzahl der RCAs sollte so klein wie möglich sein und unter der Kontrolle einer unabhängigen Organisation oder einer Behörde stehen. Denkbar ist die Einrichtung einer einzigen RCA für den europäischen Kontinent unter Aufsicht einer EU-Behörde oder eines Industriekonsortiums.

Die einzelnen Fahrzeuge haben also zu jedem Zeitpunkt ein LTC und mehrere PCs. Die versendeten Nachrichten werden jeweils mit einem Pseudonym-Zertifikat und zusätzlichen Sicherheitsinformationen versehen. Ob ein Empfänger einer Nachricht jede eingehende Nachricht oder nur ausgewählte Nachrichten verifiziert, bleibt diesem überlassen. Eine Überprüfung ist vollständig, wenn die vollständige Zertifikatskette bis zu einer RCA geprüft wurde. Um nicht bei jeder Nachricht diese Kette vollständig verifizieren zu müssen, können die Ergebnisse für höhere Certificate Authorities temporär zwischengespeichert werden [297, 298].

Als mathematische Grundlage für die Verschlüsselung werden elliptische Kurven nach dem ECDSA-256-Standard (*Elliptic Curve Digital Signature Algorithm* mit 256 Bit Schlüssellänge) eingesetzt, das derzeit als sicher für die nächsten 20 Jahre gilt [21, 299, 300]. Darüber hinaus sind weitere kryptografische Verfahren und Kryptoagilität im Sinne späterer Updates in der Diskussion [301].

In den USA wird mit einem *Security Credential Management System* (SCMS) ein ähnliches Verfahren umgesetzt, das durch die mehr Zwischeninstanzen allerdings komplexer ist [21, 302, 303].

**2.2.7.6.2 Decentralized Congestion Control** Um auch in Szenarien mit vielen kommunizierenden Knoten eine effiziente Auslastung des Kanals zu ermöglichen sowie Paketverluste und Übertragungsdauern bei fairer Zugriffsverteilung zu verringern, sollen sogenannte *Decentralized-Congestion-Control*-Mechanismen (DCC) verwendet werden [304, 305]. Diese sollen

alle Schichten von der Access-Schicht bis zur Facilities-Schicht um Überlastvermeidungstechniken ergänzen [306, 307, 308]. Bisher verabschiedet wurde eine erste technische Spezifikation zur Access-Schicht [309, 310]. Nach dieser Spezifikation wird von der physikalischen Schicht permanent die Kanallast als Anteil der Zeit, in der die Signalstärke eine bestimmte Grenze überschreitet, gemessen [311]. Auf dieser Basis werden drei Zustände nach aufsteigender Kanallast unterschieden. *Relaxed*, *Active* und *Restrictive*. Als Stellwerte fungieren die Sendeleistung (*Transmit Power Control*), die Paketrate (*Transmit Rate Control*), die Datenrate (*Transmit Datarate Control*), die Signalstärke eines belegten Kanals (*DCC Sensitivity Control*) und eine Prioritätsregelung (*Transmit Access Control*). Bei geringer Kanallast (Zustand *Relaxed*) ist die Sendeleistung maximal, während die Paketrate, Datenrate und Signalstärke auf definierte Minimalwerte gesetzt werden. Bei sehr hoher Kanallast (Zustand *Restrictive*) ist es umgekehrt, die Sendeleistung ist minimal, während die Paketrate, Datenrate und Signalstärke auf ihre definierten Maximalwerte gesetzt werden. Im Zustand *Active* werden Werte zwischen den Grenzwerten gewählt [312].

In mehreren Studien wurden die Auswirkungen der DCC-Mechanismen untersucht. Ein Teil der Studien untersuchte dabei den Einfluss einzelner Stellwerte [312, 313], während andere das Gesamtsystem evaluierten [314, 315]. Zu beachten ist, dass unterschiedliche Versionen der zugrundeliegenden Spezifikation zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Im Ergebnis hat sich die ursprüngliche Norm jedoch insgesamt als noch nicht ausgereift erwiesen. Vor kurzem wurde mit [316] und [317] eine neue, ganzheitliche Lösung vorgeschlagen. Daneben gibt es weitere Arbeiten, die versuchen, die Systemperformance unter Berücksichtigung weiterer Größen zu optimieren [318].

### 2.2.8 Ausblick auf zukünftige Erweiterungen

Parallel zu den finalen Arbeiten an den aktuellen Standards finden bereits Vorbereitungen für den sogenannten *Day 2* statt, also die nächste Stufe der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Hier wird die Kooperation durch Kommunikation noch mehr betont, indem Fahrzeuge sich über ihre Vorhaben „absprechen“. Der Fokus geht damit von Gefahrenwarnungen zu aktiver Koordination von Manövern. Ein Beispiel ist etwa ein Einschervorgang an einem Beschleunigungsstreifen einer Autobahn.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

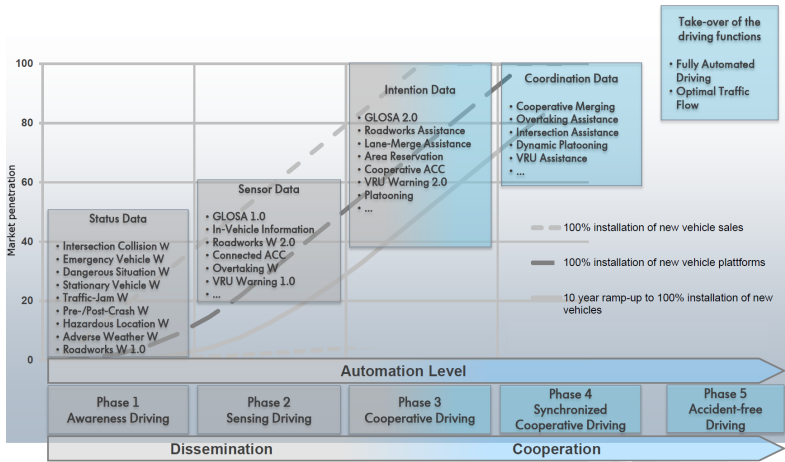


Abbildung 2.12: Darstellung der möglichen Evolutionsstufen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (Grafik: [38]).

Der Einscherende kommuniziert nicht nur sein gewünschtes Manöver, sondern erhält von schnelleren Fahrzeugen eine dedizierte Rückmeldung, ob sie genügend Platz für das Einscheren ermöglichen und dafür sogar bereit sind, abzubremsen oder selbst die Spur zu wechseln [38, 319]. Solche Anwendungen sind auch für autonome Fahrfunktionen nutzbringend, da dadurch sichere, effiziente und komfortable Manöver vereinbart werden können, die in dieser Form ohne gegenseitige Koordination nicht möglich sind [320]. Abbildung 2.12 stellt die möglichen Evolutionsstufen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation dar.

Aktive Koordination benötigt neuartige Protokolle, die nicht mehr rein Broadcast-basiert sind und eine sichere Zustellung der Daten erfordern [321, 322]. Unter Umständen muss die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in diesen Fällen auch verschlüsselt stattfinden. Um höhere Datenmengen auszutauschen, während bestehende Systeme nicht gestört werden, muss ein Mehrkanalbetrieb umgesetzt werden [21, 176, 323, 324].

Um einer vollständigen Erfassung der Umgebung mit Hilfe der Fahr-

## 2.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

zeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation nahezukommen, wurden in [325] *Environmental Perception Messages* vorgestellt. Da moderne Fahrzeuge über ihre bildgebende Sensorik die direkte Umgebung und damit umliegende Fahrzeuge bereits erfassen, liegt es nahe, auch diese Sensordaten zu kommunizieren. Damit nehmen an der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation nicht nur die mit entsprechender Kommunikationstechnologie ausgestatteten Fahrzeuge teil, sondern mittelbar auch andere Fahrzeuge und gar unmotorisierte Verkehrsteilnehmer. Erste Untersuchungen ergaben damit eine signifikant gesteigerte Erfassung der Umgebung. In einer Arbeitsgruppe des CAR 2 CAR Communication Consortiums werden derzeit erste Schritte einer Standardisierung unternommen. Im Kontext dieser Arbeit ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass durch einen solchen Mechanismus die Raten der empfangenen Nachrichten signifikant ansteigen würden.

## *2 Grundlagen und Stand der Technik*

## 3 Simulationsumgebung

Für die Datenerhebung als Grundlage von Analysen zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation gibt mehrere Simulations-Werkzeuge [326, 327, 328]. Bei der Simulation von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation sind üblicherweise drei Teile zu berücksichtigen, welche in diesem Kapitel vorgestellt und verknüpft werden [329, 330]. Eine Verkehrssimulation liefert Bewegungsmuster von Fahrzeugen in möglichst realitätsnahem Verkehr. Die Kommunikationssimulation entscheidet über den Erfolg einer Nachrichtenübertragung zwischen zwei Fahrzeugen [331]. Die Anwendungssimulation generiert im Senderichtung die Nachrichten entsprechend der standardisierten Triggerbedingungen und verarbeitet die empfangenen Nachrichten.

### 3.1 Verkehrssimulation

Mit einer Verkehrssimulation wird möglichst realistischer Straßenverkehr nachgebildet. Die Bewegung der Fahrzeuge und damit der Kommunikationsknoten führen zu dynamischen Kommunikationsverbindungen, deren Eigenschaften permanent variieren [332]. Die Simulation von Straßenverkehr ist ein komplexes Unterfangen und selbst ein intensives Feld der Forschung [333]. Es gibt drei Typen von Verkehrssimulation [327].

1. **Mikroskopische Simulation:** Bei einer mikroskopischen Simulation wird das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs in kurzen, diskreten Zeitschritten simuliert [334]. Dabei wird für jedes Fahrzeug die Umgebung mit betrachtet. Wenn das Vorderfahrzeug bremst, muss auch das direkt nachfolgende Fahrzeug bremsen. Durch Fahrermodelle und davon abgeleitete Fahrzeugfolgemodelle werden dieses und andere Verhaltensmuster beschrieben [335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342]. Dabei sind auch temporäre, lokale und langfristige Veränderungen durch neue Fahrerassistenzsysteme oder Verkehrsinfrastruktur zu berücksichtigen [343, 344]. Neben herkömmlichen

### 3 Simulationsumgebung

Fahrzeugen lassen sich durch weitere Verkehrsteilnehmer wie etwa Fußgänger simulieren [345].

Simulationen diesen Typs werden implementiert von der Open-Source-Lösung SUMO [346, 347] und dem kommerziellen VISSIM [348].

2. **Makroskopische Simulation:** In makroskopischen Simulationen wird hauptsächlich der Verkehrsfluss modelliert. Die einzelnen Fahrzeuge werden nicht für sich betrachtet, sondern beispielsweise durch die durchschnittliche Geschwindigkeit auf einem Straßenabschnitt abstrahiert [349, 350, 351, 352].
3. **Mesoskopische Simulation:** Die mesoskopische Simulation stellt eine Verbindung makroskopischer und mikroskopischer Simulation dar. Hier werden Straßenzustände oft als Warteschlangen modelliert, zwischen denen Fahrzeuge verschoben werden [327, 353, 354]. Im weiteren Sinne werden unter diesem Begriff auch Mischformen aus Simulationen verschiedener Ebenen subsumiert. Eine solche Mischform wird zum Beispiel in *VanetMobiSim* umgesetzt [355, 356, 357].

#### 3.1.1 Straßenkarten

Unabhängig von der gewählten Simulationssoftware spielt die Wahl der simulierten Verkehrsszenarien eine große Rolle für die Qualität der Ergebnisse. Es lassen sich zwei grundlegende Herangehensweisen unterscheiden.

- **Künstliche Straßensysteme:** Häufig werden künstliche Straßensysteme verwendet und mit statistischem Straßenverkehr kombiniert. Die einfachste Form ist eine mehrspurige, gerade Straße [358], oft wird auch ein matrixförmiges, zweidimensionales Straßensystem mit äquidistanten Straßen verwendet [287].

Diese Straßensysteme eignen sich dafür, mit Fahrzeugbewegungsmustern überschaubarer Komplexität Analysen von Algorithmen und Anwendungen durchzuführen. Dadurch, dass der Verkehr gewissen Mustern folgt, kann leichter ein tieferes Verständnis der Wirkweise neuer Ansätze entwickelt werden. Gleichzeitig liegt auf der Hand, dass diese Verkehrsmuster mitunter stark von realen Bedingungen abweichen.



- **Echte Straßenkarten:** Für realitätsnähere Untersuchungen eignen sich dagegen echte Straßenkarten. So bieten die gängigen Straßenverkehrr simulatoren Schnittstellen zu Straßenkarten. In der Literatur werden meist OpenStreetMap-Karten verwendet, da sie kostenfrei zugänglich und teilweise unerreicht detailliert sind sowie mit einer breiten Werkzeugpalette angepasst werden können. Die Wahl der konkreten Kartenausschnitte hat bei dieser Methode großen Einfluss auf die Ergebnisse und sollte die jeweiligen Untersuchungsabsichten unterstützen.

Simulationen auf Basis echter Straßenkarten ermöglichen sehr realitätsnahen Verkehr. Gleichzeitig sind die zugrundeliegenden Verkehrsmuster und ihr Einfluss auf die untersuchten Algorithmen wesentlich komplexer, weswegen unerwartete Phänomene in den Analysen mitunter auf komplexen Mechanismen beruhen. Dies gilt umso mehr, wenn der gewählte Kartenausschnitt ganze Metropolregionen umfasst [359]. Im Gegensatz dazu können natürlich auch beliebig kleine Kartenausschnitte zur Analyse spezifischer Verkehrssituationen herangezogen werden.

#### 3.1.2 Umsetzung

Die folgenden Untersuchungen basieren auf der mikroskopischen Simulation SUMO. Diese Wahl erfolgte aufgrund der Verfügbarkeit, Benutzerfreundlichkeit, Funktionen, Effizienz [359] und der breiten Verwendung im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Über eine Schnittstelle ist die Steuerung der Simulation und das Abgreifen von Fahrzeug-Daten möglich. Diese Funktion wurde zur persistenten Speicherung der Bewegungsdaten genutzt [360]. Daneben gibt es weitere Werkzeuge, die die Vorbereitung von Straßenkartenmaterial, Fahrzeugtypen und -routen ermöglichen [361]. Für die Simulation wurde Straßenkartenmaterial von OpenStreetMap verwendet.

### 3.2 Kommunikationssimulation

In diesem Abschnitt wird die Kommunikationssimulation vorgestellt. Zuerst werden verschiedene Umsetzungsvarianten diskutiert. Anschließend wird eine eigene Lösung auf Basis eines Kanalmodells vorgeschlagen, indem zunächst die relative Kanallast definiert wird, die ein zentraler Para-

meter für das Kanalmodell ist. Darauf aufbauend wird das Kanalmodell für ein einzelnes Sender-Empfänger-Paar beschrieben, welches dann unter Berücksichtigung des Hidden-Station-Effekts für mehrere Sender erweitert wird.

#### 3.2.1 **Umsetzungsvarianten**

Für die Simulation der Kommunikation zwischen Fahrzeugen hat sich die Verwendung von ereignisorientierten Simulatoren weitgehend etabliert [362]. Die am häufigsten verwendeten Simulations-Tools sind ns-2, ns-3, OMNeT++ und JiST/SWANS [327, 363]. Die Übertragung von Nachrichten wird dabei so detailliert wie möglich mit einer Modellierung aller relevanten Kommunikationsschichten simuliert. Dies führt dazu, dass viele Phänomene und Szenarien detailliert untersucht werden können, die echten Experimenten sehr nahe kommen [364, 365]. Dafür ist allerdings eine hochkomplexe Parametrisierung nötig, die die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erschweren [366, 367, 368]. Viele Modelle verzichten auf eine schichtenübergreifende Simulation und konzentrieren sich entweder auf den Kanalzugriff oder auf die Netzwerk-Schicht, während die jeweils andere Schicht nur rudimentär und mit teilweise fragwürdigen Vereinfachungen nachgebildet wird [369]. Des Weiteren sind diese Simulatoren durch die vielen berücksichtigten Effekte nicht effizient, was bei großen Szenarien zu sehr langen Laufzeiten führt [204].

Um die Komplexität der Parametrisierung und Benutzung der gängigen ereignisorientierten Simulatoren zu vermeiden und eine effiziente Durchführung der Simulationen zu erzielen, wurde bei den Untersuchungen in dieser Arbeit ein statistisches Modell erarbeitet, welches mit wenigen Parametern auskommt und mathematisch einfach zu berechnen ist. Dieses Modell soll im Folgenden beschrieben werden.

Für die Anforderungen an die Simulation muss man sich der Ziele der Untersuchung bewusst werden. Im Hinblick auf eine Abschätzung des Datenaufkommens bei einem Empfänger sind vor allem die Szenarien und Situationen von Interesse, die zu einem hohen – wenn nicht maximalen – Datenaufkommen führen. Im Hinblick auf dieses Ziel können einige Vereinfachungen am Kommunikationsmodell vorgenommen werden, ohne die Validität der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Zum einen wird in den nachfolgenden Untersuchungen auf die Berücksichtigung von Hindernissen in Form von massiven Objekten verzichtet.

Solche Hindernisse verschlechtern das Signal und die damit erzielte Kommunikationsreichweite, außerdem können sie durch Mehrwegeausbreitung zu weiteren störenden Phänomenen führen [141, 370, 371, 372]. Dabei sind nicht nur stationäre Objekte wie Gebäude oder das Gelände von Relevanz, sondern auch Fahrzeuge selbst, insbesondere Lastkraftwagen [370, 373, 374, 375]. Durch diese Effekte wird die Empfangsleistung in der Regel verschlechtert und das Datenaufkommen wird geringer. Aus diesem Grund wurde in den nachfolgenden Untersuchungen auf diesen Effekt verzichtet und stattdessen stets eine Sichtverbindung zwischen den Sendern und Empfängern angenommen. Dies ist in den gewählten Autobahnsszenarien realistisch.

Das statistische Kanalmodell, welches in den folgenden Abschnitten entwickelt wird, stellt eine Kombination von vorhandenen Untersuchungen und Arbeiten in einer neuen Form dar. Erste Ansätze finden sich dazu in [376, 377]. Basierend auf einer Studie in [378, 379] wurde ein statistisches Kanalmodell in [380, 381] vorgeschlagen. Dieses Kanalmodell skaliert nicht dynamisch mit der Anzahl der Fahrzeuge. Aus diesem Grund haben wir es mit dem Hidden-Station-Effekt verknüpft, welcher Signalkollisionen durch weit entfernte Sender beschreibt. Dieses Phänomen wurde in [382] als dominanter Effekt in Mehr-Sender-Szenarien in einem nicht-überlasteten Kanal identifiziert.

#### 3.2.2 Definition der Kanallast

Die Kanallast beschreibt die an einem bestimmten Punkt in Ort und Zeit vorherrschende Auslastung eines Kommunikationskanals durch aktuelle Übertragungen. Diese Auslastung wird im Wesentlichen bestimmt durch die Anzahl der sendenden Knoten und deren Sendebedürfnisse. Die Kanallast kann auf verschiedene Weise definiert werden, etwa auf physikalischer Ebene durch den Zeitanteil, an dem die Signalstärke auf einer bestimmten Frequenz ein vorgegebenes Minimum übersteigt [376]. In dieser Arbeit wird die Kanallast über die Anzahl der Nachrichten, die pro Sekunde versendet werden, definiert.

Über die Antenne eines Fahrzeugs werden Signale von allen Sendern innerhalb einer Kommunikationsreichweite (*Communication Range – cr*) empfangen. Die Rate der versendeten Nachrichten innerhalb dieses Bereichs wird als  $r_{\text{send}}^{\text{cf}}$  bezeichnet. Im Folgenden werden nur CAMs berücksichtigt, da sie im Gegensatz zu DENMs sehr oft gesendet werden. Aus

### 3 Simulationsumgebung

der Nachrichtenlänge  $B_{\text{CAM}}$  und dem Verhältnis zur maximal möglichen Datenrate  $C$  wird die Kanallast  $\rho$  berechnet mit

$$\rho = \frac{r_{\text{send}}^{\text{cr}} \cdot B_{\text{CAM}}}{C}. \quad (3.1)$$

Die Standard-Datenrate für IEEE 802.11p ist  $C = 6 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ . Die Nachrichtengröße  $B_{\text{CAM}}$  ist von mehreren Faktoren abhängig. Manche Inhalte der CAM sind optional. Andere Inhalte werden nicht mit jeder CAM gesendet, sondern nur in größeren Abständen (siehe Abschnitt 2.2.7.4). Im Folgenden verwenden wir  $B_{\text{CAM}} = 200$  Byte. Dieser Wert ergibt sich aus den Inhalten, welche mit jeder CAM versendet werden, sowie den zugehörigen Headern und Zertifikaten [25].

#### 3.2.3 Signalabschwächung für ein Sender-Empfänger-Paar

Mit der Nakagami- $m$ -Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt ein akkurates Modell für die Signalabschwächung in drahtlosen Kanälen vor [383]. In [378] wurde dies auch für Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerke nachgewiesen. Darauf aufbauend konnte in [380, 381] eine Funktion entwickelt werden, welche auf Basis der Nakagami- $m$ -Wahrscheinlichkeitsverteilung und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger die Empfangswahrscheinlichkeit einer Nachricht berechnet.

In diesem Modell wird die Kommunikationsreichweite  $d_{\text{com}}$  in zwei Bereiche aufgeteilt. Für kurze Distanzen wird eine Freiraumdämpfung nach Friis angenommen, während für größere Entfernungen das *Two-Ray-Ground-Reflection*-Modell verwendet wird [384]. Für größere Distanzen wird also neben der direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger auch die Reflexion des Signals auf dem Boden berücksichtigt [204, 385, 386]. Die Übergangsdistanz  $d_{\text{crossover}}$  berechnet sich als

$$d_{\text{crossover}} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{h_{\text{S}} \cdot h_{\text{E}}}{\lambda}, \quad (3.2)$$

mit den Antennen auf Senderhöhe  $h_{\text{S}}$  und Empfängerhöhe  $h_{\text{E}}$  und der Wellenlänge  $\lambda$  des Signals [242, 387].

Die folgende Formel beschreibt die Erfolgswahrscheinlichkeit für die Übertragung einer einzelnen Nachricht zwischen zwei Knoten und wurde in [380, 381] hergeleitet:

$$P_{\text{Nakagami}}^{\text{success}}(d) = \begin{cases} e^{-3\left(\frac{d}{d_{\text{com}}}\right)^2} \cdot \left(1 + 2\left(\frac{d}{d_{\text{com}}}\right)^2 + \frac{9}{2}\left(\frac{d}{d_{\text{com}}}\right)^4\right), & \text{if } d \leq d_{\text{crossover}} \\ e^{-3\gamma\left(\frac{d^2}{d_{\text{crossover}}^2}\right)^2} \cdot \left(1 + 2\gamma\left(\frac{d^2}{d_{\text{com}}}\right)^2 + \frac{9}{2}\gamma^2\left(\frac{d^2}{d_{\text{com}}}\right)^4\right), & \text{if } d > d_{\text{crossover}}. \end{cases}$$

Der Parameter  $\gamma$  berechnet sich aus Antennenhöhen und Wellenlänge nach

$$\gamma = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot h_S \cdot h_E}\right)^2 = (d_{\text{crossover}})^{-2}. \quad (3.3)$$

### 3.2.4 Erweiterung für mehrere Sender

Mehrere Effekte führen dazu, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit der Nachrichtenübertragung mit einer zunehmenden Anzahl von Sendern abnimmt. Solange der Kanal noch nicht überlastet ist, hat der *Hidden-Station*-Effekt den größten Einfluss. Dieser Effekt wird durch mehrere sendende Knoten im Empfangsbereich eines Knotens verursacht, wobei die Sender selbst voneinander so weit entfernt sind, dass sie außerhalb der Kommunikationsdistanz liegen, wie Abbildung 3.1 skizziert. Eine solche Situation führt dazu, dass die Sender keine Möglichkeit haben, den Kanalzugriff untereinander zu koordinieren. Jeder Sender würde für sich gesehen die Nachrichten ohne Kollisionen versenden, beim Empfänger kann es jedoch zu überlagerten Nachrichtenübertragungen kommen [382].

Der Hidden-Station-Effekt kann sich auf unterschiedliche Weise auf die Übertragung auswirken. Die dominanten Auswirkungen ergeben sich ab der Hidden-Station-Entfernung  $d_{\text{HS}}$ . Dabei werden der für die Signalerkennung benötigte Signal-Rausch-Abstand  $\Gamma_{\text{SNR}}$  und die Freiraumdämpfung mit dem Koeffizienten  $\mu$  in der Formel

$$d_{\text{HS}} = \frac{d_{\text{com}}}{1 + (\Gamma_{\text{SNR}})^{\frac{1}{\mu}}} \quad (3.4)$$

einbezogen. Für ein konstantes  $\mu$  sinkt die Erfolgswahrscheinlichkeit linear mit steigendem Abstand in Abhängigkeit von der Kanallast  $\rho$ :

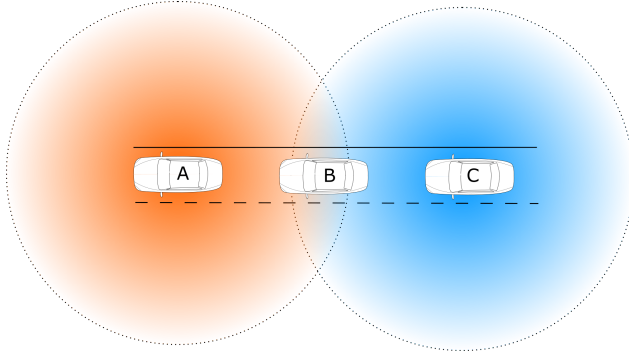


Abbildung 3.1: Der Hidden-Station-Effekt führt dazu, dass die Fahrzeuge A und C den Kanalzugriff nicht koordinieren können, da sie zu weit voneinander entfernt sind. Falls sie gleichzeitig senden, überlagern sich ihre Übertragungen bei B (nicht maßstabsgerechte Darstellung).

---

$$P_{\text{hidden}}^{\text{loss}}(d, \rho) \approx 1.5 \cdot \rho \cdot \frac{T_{\text{air}}}{T_{\text{air}} + T_{\text{CA}}} \cdot \frac{d - d_{\text{HS}}}{d_{\text{HS}} - 1 \text{ m}}, \quad (3.5)$$

mit der Übertragungsdauer  $T_{\text{air}}$  und der Kanalzugriffszeit  $T_{\text{CA}}$  [382].

### 3.2.5 Kombination der Funktionen

Die Funktionen zur Berechnung von  $P_{\text{combined}}^{\text{success}}$  und  $P_{\text{hidden}}^{\text{loss}}$  können als unabhängige Funktionen kombiniert werden, so dass sich die Nachrichtempfangswahrscheinlichkeit nach

$$P_{\text{combined}}^{\text{success}}(d, \rho) = (1 - P_{\text{hidden}}^{\text{loss}}(d, \rho)) \cdot P_{\text{Nakagami}}^{\text{success}}(d) \quad (3.6)$$

berechnet.

Für unsere Untersuchungen wurden die Kanalparameter in Tabelle 3.1 gewählt. Damit ergeben sich die in Abbildung 3.2 dargestellten Wahrscheinlichkeiten für eine erfolgreiche Übertragung einer Nachricht zwischen zwei Knoten mit Abstand  $d$  und der lokalen Kanallast  $\rho$ . Für geringe Distanzen bis 250 m hat die Kanallast keinen signifikanten Einfluss auf den Übertragungserfolg. Für größere Distanzen sinkt die Wahrscheinlichkeit dann mit steigender Kanallast.

Parameter	Wert
$B_{\text{CAM}}$	200 byte
$C$	$6 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$
$\Gamma_{\text{SNR}}$	10
$T_{\text{air}}$	0.267 ms
$T_{\text{CA}}$	0.114 ms
$\mu$	2
$h_{\text{S}}, h_{\text{E}}$	1.5 m
$d_{\text{com}}$	1000 m
$\lambda$	0.0508 m

Tabelle 3.1: Verwendete Parameterkonfiguration des Kanalmodells (entnommen aus [382]).

### 3.2.6 Einschränkungen

Die vorgenannten Erläuterungen gelten nur, wenn der Kanal nicht stark ausgelastet ist und entsprechende *Congestion-Control*-Mechanismen noch nicht greifen. Das Ziel dieser Mechanismen ist es, die Kanallast zu beschränken und den Informationsaustausch auf einem Mindestniveau zu gewährleisten. Die Komplexität dieser Mechanismen ist sehr hoch und ihre Auswirkungen gehen über den Betrachtungsumfang dieser Arbeit weit hinaus. Außerdem wurden die Standards zu Congestion Control erst vor Kurzem abgeschlossen. Aus diesen Gründen wurde auf die Umsetzung und Diskussion von Congestion Control verzichtet. Deswegen kann die abgeleitete Funktion nur für Szenarien mit einer Kanallast bis 25% als valide betrachtet werden. Bei höheren Kanallasten sind zwar höhere Nachrichtenraten möglich, gleichzeitig soll die Congestion Control jedoch die Kanallast und damit die Nachrichtenraten nahe einer Obergrenze halten.

### 3 Simulationsumgebung

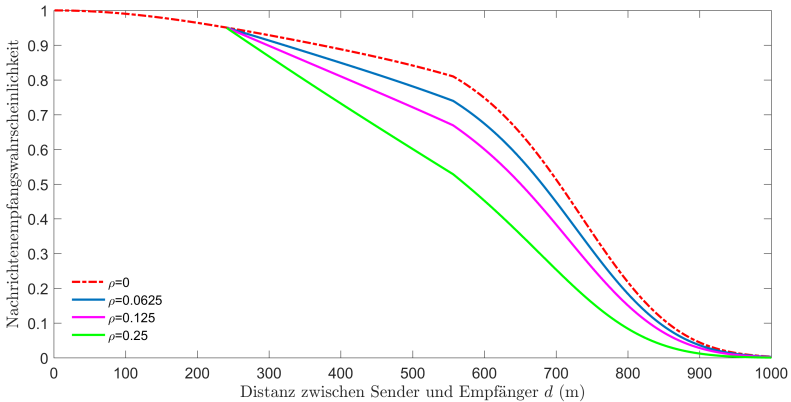


Abbildung 3.2: Darstellung der Ausgaben des Kanalmodells für definierte Kanallasten. Die Nachrichtenempfangswahrscheinlichkeit hängt von der Distanz zwischen Sender und Empfänger sowie der relativen Kanallast ab. Das Kanalmodell ist nur für relative Kanallasten von  $\rho \leq 25\%$  gültig, da Maßnahmen zur Überlastvermeidung nicht betrachtet werden.

### 3.3 Anwendungssimulation

Die Anwendungssimulation als dritter Simulationsteil hat in dieser Arbeit vor allem zwei Aufgaben. In Senderichtung müssen die Nachrichten entsprechend der Triggerbedingungen ausgelöst werden. Wie in Abschnitt 2.2.7.4 beschrieben, ist der Versand einer Cooperative Awareness Message zum Beispiel von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. In Empfangsrichtung können die für diese Arbeit zentralen Auswertungen hinsichtlich der Nachrichtenraten durchgeführt und die im späteren Verlauf dieser Arbeit beschriebenen Mechanismen integriert werden. Darüber hinaus können kundenerlebbare Funktionen ebenfalls in einer Anwendungssimulation implementiert und getestet werden, dies ist allerdings nicht Teil dieser Arbeit.

In der Regel werden die Anwendungen als eigenständige Software-Module



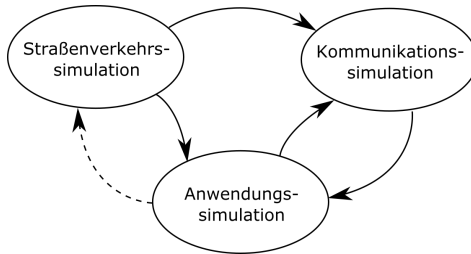


Abbildung 3.3: Datenfluss zwischen Simulationsmodulen. Die durchgezogenen Linien stellen in dieser Arbeit verwendete Schnittstellen dar. Eine Umsetzung des gestrichelten Pfades würde eine bidirektionale Kopplung ergeben.

---

implementiert. Dabei ist eine Anbindung sowohl zur Verkehrssimulation für den Bezug der Fahrzeugbewegungsdaten als auch zur Kommunikationssimulation für die Übertragung von Nachrichten nötig.

### 3.4 Simulationskoppelung

Für adäquate Analysen von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation müssen die Straßenverkehrs-, Kommunikations- und Anwendungssimulation gekoppelt werden (siehe Abbildung 3.3). Dabei gibt es üblicherweise zwei Varianten für die Kopplung.

- **Unidirektionale Kopplung:** Bei dieser Umsetzungsart wird die Verkehrssimulation dazu verwendet, die Bewegungen und Zustände von typischen Verkehrssituationen zu simulieren. Für die Dauer einer Simulation wird also für jeden Zeitschritt für jedes simulierte Fahrzeug eine neue Zustandsbeschreibung – Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, ... – generiert. Diese Informationen, insbesondere die Positionen, dienen dann als Eingabe für die Kommunikationssimulation. Ein Rückkanal, durch den die Anwendungssimulation Einfluss auf das Verkehrsgeschehen nimmt, existiert nicht.
- **Bidirektionale Kopplung:** In dieser Variante existiert ein Rück-

### 3 Simulationsumgebung

kanal von der Anwendungssimulation zur Verkehrssimulation. Dadurch ist es möglich, den Einfluss von Anwendungen auf den Straßenverkehr ebenfalls zu untersuchen. Dies spielt etwa eine Rolle, wenn diese Anwendungen direkt oder indirekt Einfluss auf die Bewegungen eines Fahrzeugs nehmen [388, 389].

Für Untersuchungen, die eine bidirektionale Kopplung erfordern, haben sich bei akademischen Forschergruppen die Toolketten *VEINS* und *VSimRTI* etabliert [388, 390, 391, 392, 393]. Diese stellen Schnittstellen zwischen bekannten Verkehrssimulationen wie SUMO oder VISSIM und Kommunikationssimulationen wie ns-2, ns-3 oder OMNet++ zur Verfügung.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde eine unidirektionale Kopplung realisiert und auf eine bidirektionale Kopplung verzichtet. Letztere ist besonders bei Anwendungen zur Verkehrssteuerung relevant, da diese einen direkten Einfluss auf die Bewegung der Fahrzeuge haben [394, 395]. Diese Anwendungen liegen in dieser Arbeit jedoch nicht im Fokus. Die Verknüpfung von Verkehrs-, Kommunikations- und Anwendungssimulation wurde selbst implementiert. Dadurch konnte eine schlanke Umsetzung erreicht werden, deren einzelne Teile leicht zu konfigurieren sind und in die das neu entwickelte statistische Kanalmodell einfach integriert werden konnte.

## 4 Analyse der Nachrichtenraten

Die in der Problemstellung formulierte Herausforderung basiert auf der Annahme, dass hohe Raten von empfangenen Nachrichten auftreten können. Die Nachrichtenraten und ähnliche Metriken stellen Eingangsgrößen dar, die von einer Systemarchitektur in Serienfahrzeugen berücksichtigt werden müssen. Die folgenden Metriken werden in diesem Kapitel untersucht.

1. **Generierungsraten:** Die CAMs werden entsprechend der aktuellen Bewegungseigenschaften jedes Fahrzeugs generiert und versendet. Zunächst werden die Auswirkungen dieser Bewegungseigenschaften, insbesondere der Geschwindigkeit, analysiert.
2. **Erzeugte Kanallast:** Jede versendete CAM trägt zur lokalen Auslastung des Funkkanals bei. Die lokale Auslastung des Funkkanals entscheidet maßgeblich über die erfolgreiche Übertragung einer Nachricht.
3. **Nachrichtenrate:** Eine zentrale Charakteristik stellt die Rate von empfangenen Nachrichten in den einzelnen Fahrzeugen dar. Die Verarbeitung der empfangenen Nachrichten verursacht Rechenlast beim Empfänger.
4. **Aktualisierungszeit:** Nicht jede per Broadcast versendete Nachricht erreicht alle Fahrzeuge in der Umgebung, manche Nachrichten gehen auf dem Kanal „verloren“. Daher ist auch eine Analyse der Zeiten, die zwischen dem Empfang von zwei Nachrichten des gleichen Senders bei einem bestimmten Empfänger vergehen, von Interesse. Wir bezeichnen diese Zeit als Aktualisierungszeit.

Diese Untersuchungen werden mit Hilfe der Simulationsumgebung aus dem vorhergehenden Kapitel 3 durchgeführt. Außerdem wurden Formeln zur Abschätzung der Ergebnisse entwickelt. Diese Formeln haben sich als gute Näherung der Simulationen erwiesen, so dass damit weitere Analysen in Form von Parameterstudien ermöglicht werden.

## 4.1 Ähnliche Untersuchungen

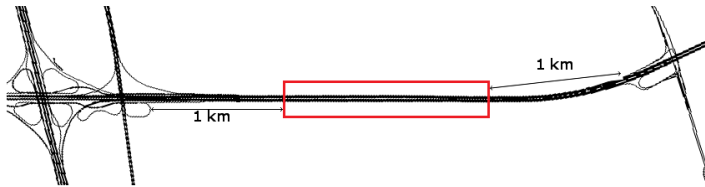
Analysen zur Nachrichtenübertragung durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation wurden in diversen Studien durchgeführt. Im Fokus stand jedoch nicht die Betrachtung des Nachrichtenaufkommens bei den Empfängern, sondern vor allem die Übertragungsleistung auf dem Funkkanal, etwa in [214, 236, 379, 396]. Die Ergebnisse sind stark beeinflusst durch den allgemeinen Versuchsaufbau oder die verwendeten Simulationsmodelle, die angewandten Werkzeuge und aktuelle Standards. So wurde in [379] eine eher unrealistische, kreisförmige achtspurige Schnellstraße für die Verkehrssimulation verwendet.

Die folgenden Untersuchungen und Ausführungen wurden in den Veröffentlichungen [1] und [3] erstmals beschrieben. Neuere Studien unter Verwendung der mittlerweile verfügbaren Congestion-Control-Standards kamen unter Berücksichtigung anderer Szenarien und veränderter Parameter auf vergleichbare Ergebnisse [316, 317].

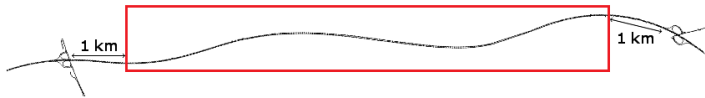
## 4.2 Simulierte Szenarien

Als Grundlage für die folgenden Untersuchungen werden zwei realistische Autobahnscenarien verwendet. Beide Autobahnabschnitte werden in Abbildung 4.1 dargestellt. Das erste Szenario entspricht einem Abschnitt der Autobahn A5 bei Frankfurt, an dem insgesamt 8 parallele Fahrspuren vorliegen. Durch die hohe Anzahl der Fahrspuren befinden sich auch bei normalen Verkehrsverhältnissen sehr viele Fahrzeuge innerhalb des Kommunikationsradius. Das zweite Szenario entstammt einem Abschnitt der Autobahn A6 bei Nürnberg, der aus den üblichen 4 parallelen Fahrspuren besteht. Dieses Szenario ermöglicht eine Analyse des normalen Autobahnverkehrs.

Um möglichst realistische Verkehrsmuster zu erzeugen, wurden Auffahrten und Abfahrten durch den simulierten Verkehr einbezogen. Dadurch werden homogene Effekte verhindert, die entstehen können, wenn alle Fahrzeuge nur an bestimmten Punkten in festen Intervallen generiert werden. Für die statistischen Analysen wurde der ausgewertete Bereich auf ein Gebiet mit genügend Abstand zu den Start- und Endpunkten beschränkt. Die Statistiken werden somit nicht durch plötzlich erscheinende oder verschwindende Fahrzeuge verfälscht.



(a) Autobahn A5 bei Frankfurt.



(b) Autobahn A6 bei Nürnberg.

Abbildung 4.1: Verwendete Straßenszenarien für die Simulation hoher Nachrichtenraten. Die rot markierten Bereiche werden ausgewertet.

---

## 4.3 Generierung von Nachrichten

Die Generierung von Nachrichten hängt von der momentanen Bewegung eines Fahrzeugs ab, die zugehörigen Triggerbedingungen wurden in Abschnitt 2.2.7.4 genannt. In diesem Abschnitt wird die Rate der generierten Nachrichten untersucht. Das Nachrichtenaufkommen wird von den Nachrichten zur Realisierung der Cooperative Awareness dominiert. Für den europäischen Bereich handelt es sich dabei um die Cooperative Awareness Messages (CAMs, siehe Abschnitt 2.2.7.4).

Hohe Raten von CAMs auf einem Straßenabschnitt entstehen dann, wenn die Fahrzeugdichte sehr hoch ist und gleichzeitig bei den einzelnen Fahrzeugen starke Änderungen in Geschwindigkeit, Fahrtrichtung oder Position auftreten. Da gleichzeitige Beschleunigungen und Fahrtrichtungsänderungen bei vielen Fahrzeugen selten bis gar nicht auftreten, führt vor

#### 4 Analyse der Nachrichtenraten

allem die Positionsveränderung und damit eine hohe Geschwindigkeit zu vielen generierten und versendeten CAMs durch jedes Fahrzeug.

Die Fahrzeugdichte hängt im Wesentlichen von der Größe der Straße, also der Anzahl der parallelen Fahrspuren und dem Abstand zwischen den Fahrzeugen ab. Vereinfachend kann man jede Spur als unabhängig von den anderen Spuren betrachten. Der Abstand auf einer Spur zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen bestimmt sich durch den Sicherheitsabstand zwischen beiden, der wiederum im Wesentlichen durch die aktuelle Geschwindigkeit bestimmt wird. Je höher die Geschwindigkeit des Verkehrs, desto größer sind meist auch die Abstände zwischen den Fahrzeugen [337].

Damit lassen sich sowohl die Fahrzeugdichte als auch die CAM-Erzeugungsrate pro Fahrzeug als Funktionen der Fahrgeschwindigkeit formulieren. In Abbildung 4.2 wird der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen,  $d_{\text{vehicle}}^{\text{inter}}$ , nach einer Formel aus [337] dargestellt. Außerdem wird die durchschnittliche Zeit zwischen zwei im selben Fahrzeug generierten CAMs,  $T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}$ , dargestellt. Während der Abstand der Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit steigt, verringert sich die Zeit zwischen zwei generierten CAMs.

Um die Geschwindigkeit zu bestimmen, die auf einer üblichen Schnellstraße zu der höchsten lokalen CAM-Rate führt, schätzen wir zunächst die Fahrzeugdichte  $\sigma_{\text{vehicle}}$  auf einer einzelnen Fahrspur mit

$$\sigma_{\text{vehicle}} = \frac{1}{d_{\text{vehicle}}^{\text{inter}} + l_{\text{vehicle}}} \quad (4.1)$$

unter Verwendung der durchschnittlichen Fahrzeuglänge  $l_{\text{vehicle}}$ . Die lokale CAM-Erzeugungsrate wird dann mit

$$\sigma_{\text{CAM}} = \frac{n_{\text{lanes}} \cdot \sigma_{\text{vehicle}}}{T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}} \quad (4.2)$$

abgeschätzt, wobei der Parameter  $n_{\text{lanes}}$  die Anzahl der parallelen Fahrspuren in beiden Fahrrichtungen angibt.  $\sigma_{\text{CAM}}$  gibt somit die Rate der durchschnittlich generierten CAMs pro Sekunde und Meter an. Abbildung 4.3 zeigt Beispielwerte für eine einzelne Fahrspur. Es ist zu beobachten, dass  $\sigma_{\text{CAM}}$  zuerst sägezahnartig ansteigt und das Maximum bei  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  erreicht. Diese Geschwindigkeit führt also unter den verwendeten Parametern zur höchsten CAM-Erzeugungsrate, weswegen sie in den folgenden Verkehrssimulationen als Durchschnittsgeschwindigkeit für den Verkehr

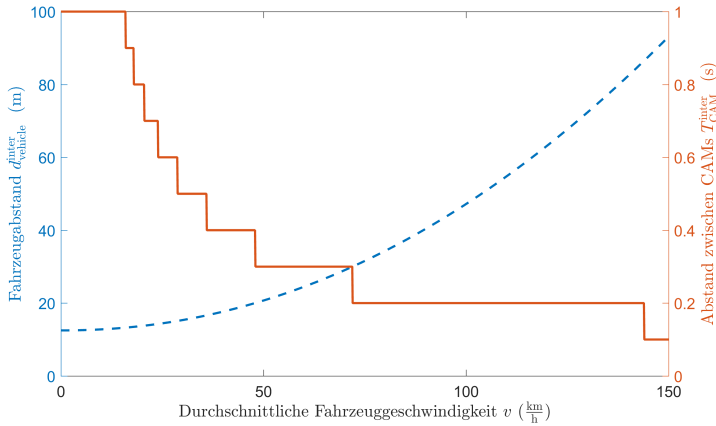


Abbildung 4.2: Die Zeit zwischen zwei erzeugten CAMs (durchgezogene Linie) und der Abstand einander folgender Fahrzeuge (gestrichelte Linie) werden durch die Geschwindigkeit des Senders vorgegeben.

angenommen wird. Bei  $144 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  steigt die CAM-Generierungsrate zwar auf das Maximum von 10 Hz, allerdings ist der Abstand der Fahrzeuge dann so groß, dass die CAM-Dichte  $\sigma_{\text{CAM}}$  geringer als bei  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  ist.

In Abbildung 4.4 werden mittels eines Histogramms die relativen Häufigkeiten der Zeiten zwischen zwei generierten CAMs dargestellt. Dabei überwiegt die Dauer von 200 ms entsprechend der Wahl von  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  als Standard-Geschwindigkeit für die Simulation. Abweichende Generierungszeiten entstehen durch die Ein- und Ausfahrten der simulierten Straßenabschnitte und Sondereffekte, etwa bei Spurwechsellvorgängen, die zu Bremsungen oder schnellen Fahrtrichtungsänderungen führen können.

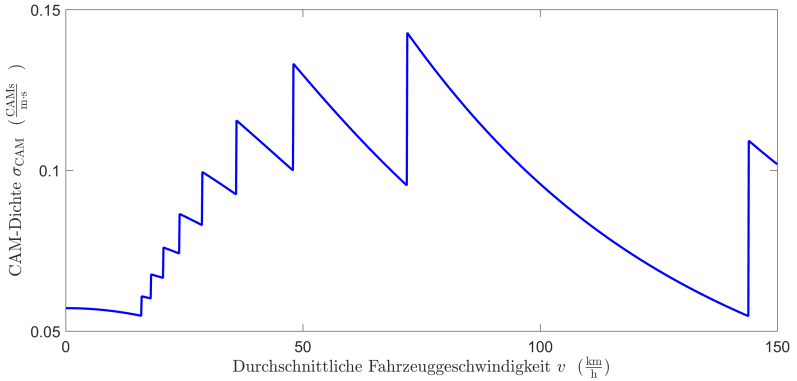


Abbildung 4.3: Rate der durchschnittlich generierten CAMs pro Sekunde und Meter  $\sigma_{CAM}$  für eine einzelne Fahrspur. Dieser Wert wird durch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge bestimmt.

#### 4.4 Kanallast

Jede versendete CAM erhöht lokal die Kanallast und beeinflusst damit die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung anderer Nachrichten. In diesem Abschnitt wird die Kanallast mit Hilfe der Simulation abgeschätzt und analytisch untersucht.

Die simulierte Kanallast wird in jedem Zeitschritt auf Basis der generierten CAMs für die Umgebung jedes Fahrzeugs separat bestimmt. Als Parameter ist dazu die Ausstattungsrate  $\varphi$  der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in den simulierten Fahrzeugen nötig. Die Rate der generierten und versendeten CAMs im Umkreis von  $d_{com}$  um jedes Fahrzeug wird als  $r_{sent}^{CF}$  bezeichnet.

Das Vorgehen ist dabei wie folgt. Zuerst wird bestimmt, welche Fahrzeuge in jedem Zeitschritt der Simulation eine CAM generieren und versenden. Die Anzahl der versendeten CAMs in Bereich von  $d_{com}$  um jeden Empfänger wird für jeden Zeitschritt aufsummiert, um die Rate der versendeten CAMs  $r_{sent}^{CF}$  zu bestimmen. Mit  $r_{sent}^{CF}$  und Formel (3.1) kann dann die mittlere Kanallast  $\bar{\rho}$  bestimmt werden.



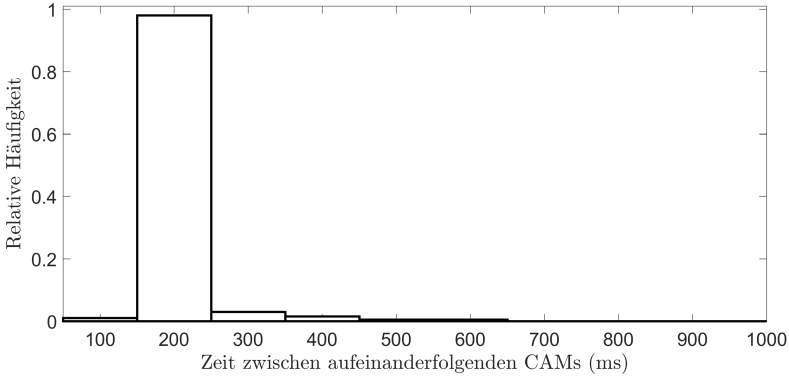


Abbildung 4.4: Das Histogramm zeigt relativen Häufigkeiten der Zeiten zwischen zwei generierten CAMs  $T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}$ .

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde eine Formel zur Schätzung der Kanallast hergeleitet. Diese Abschätzung basiert auf mehreren Vereinfachungen. Die Straßen sind gerade, die Fahrzeuge haben gleiche Abstände und die konstante Geschwindigkeit aller Fahrzeuge verursacht eine konstante Zeit  $T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}$  zwischen zwei generierten Nachrichten in jedem Fahrzeug. Zunächst wird die durchschnittliche Rate der generierten und versendeten Nachrichten in der Umgebung des Empfängers mit der Formel

$$\bar{r}_{\text{sent}}^{\text{cr}} = 2 \cdot d_{\text{com}} \cdot n_{\text{lanes}} \cdot \sigma_{\text{vehicle}} \cdot \varphi \cdot \frac{1}{T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}} \quad (4.3)$$

bestimmt. Mit  $\bar{r}_{\text{sent}}^{\text{cr}}$  und der Formel 3.1 kann die durchschnittliche Kanallast unter den vereinfachten Bedingungen abgeschätzt werden.

In Abbildung 4.5 wird die durchschnittliche Kanallast aus Simulation (Kreise) und analytischer Schätzung (Linie) auf beiden simulierten Szenarien dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Kanallast in etwa linear von der Ausstattungsrate  $\varphi$  abhängt.

Wie in Abschnitt 3.2.6 angeführt ist diese Untersuchung nur für Kanallasten bis  $\rho = 25\%$  valide. Dieser Wert wird auf der A5 für eine Aus-

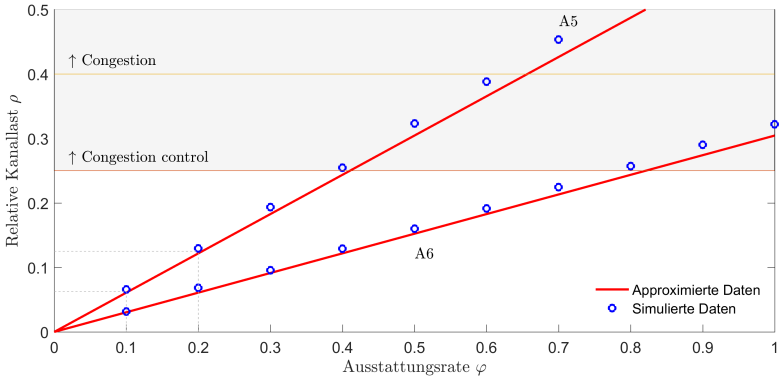


Abbildung 4.5: Die relativen Kanallasten für das A5-Szenario ( $n_{\text{lanes}} = 8$ ) und das A6-Szenario ( $n_{\text{lanes}} = 4$ ). Die Ergebnisse oberhalb der angegebenen Grenze für Überlastkontrolle sind zu hoch.

stattungsrate von  $\varphi = 40\%$  erreicht, während Kanallasten von 6,25% und 12,5% bei einer jeweiligen Ausstattungsrate von 10% bzw. 20% erreicht werden. Auf der A6 wird der Grenzwert von 25% bei  $\varphi = 80\%$  erreicht. Die Mechanismen zur Congestion Control (siehe Abschnitt 2.2.7.6.2) nutzen Stellschrauben wie die Sendeleistung, Nachrichtenrate, Datenrate und den Kanalzugriff, um die Kanallast unter 25% zu halten. Dies kann über eine Veränderung der Nachrichtenrate jedoch auch dazu führen, dass weniger CAMs generiert und versendet werden. Bereits generierte CAMs können durch veränderte Sendeparameter etwa bei den Kanalzugriffsverfahren verzögert versendet oder durch eine schlechtere Sendeleistung in einem kleineren Bereich empfangen werden. Dadurch wird bei diesen Empfängern die Wahrnehmung ihres Umfelds beeinträchtigt.

Aus den numerischen Ergebnissen schließen wir, dass abhängig vom Verkehr und der Straße bereits bei geringen Ausstattungsraten kritische Kanallasten entstehen können, die zu einer Degradierung des Nachrichtenaustauschs und damit zu einer Verschlechterung der darauf aufbauenden Anwendungen führen können.

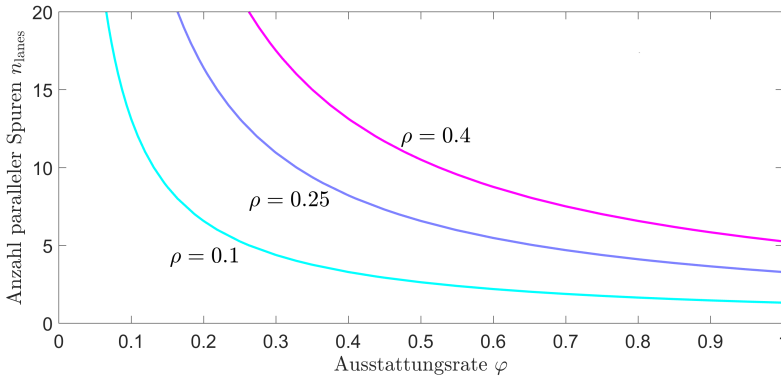


Abbildung 4.6: Die Ausstattungsrate  $\varphi$  und die Anzahl der parallelen Spuren  $n_{\text{lanes}}$  bestimmen die relative Kanallast  $\rho$  im gewählten, vereinfachten Szenario.

Die durchgezogene Linie in Abbildung 4.5 zeigt die Abschätzungen entsprechend der Formeln (4.3) und (3.1). Für  $T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}$  wurde der Wert 200 ms und eine Fahrzeugdichte  $\sigma_{\text{vehicle}} = \frac{1}{35 \text{ m}}$  entsprechend der Untersuchungen aus Abschnitt 4.3 verwendet. Die simulierten und berechneten Ergebnisse stimmen gut überein.

In einer Parameterstudie wird die Anzahl der parallelen Spuren und die Ausstattungsrate variiert. Abbildung 4.6 stellt die Kanallast in Abhängigkeit dieser Parameter dar. Die Spurenzahl variiert bis auf 20 parallele Spuren. Dieser Fall tritt zum Beispiel für dem Highway 401 in Toronto auf. Da unser Kanalmodell nur bis  $\rho = 25\%$  gültig ist, ist die Kurve für  $\rho = 40\%$  eine pessimistische Abschätzung der realen Werte. Durch Congestion-Control-Mechanismen ist die reale Kanallast bei  $\rho = 40\%$  niedriger als in unseren Ergebnissen.

## 4.5 Empfangsraten

Unter Verwendung der Kanallast werden in diesem Abschnitt die Raten von empfangenen CAMs in einzelnen Fahrzeugen untersucht. Außerdem

#### 4 Analyse der Nachrichtenraten

wird die Anzahl der Nachrichten von entgegenkommenden Fahrzeugen erhoben. Dazu werden wiederum die Simulation und eine analytische Abschätzung verwendet.

Basierend auf den generierten CAMs in Abschnitt 4.3 und der Bestimmung der lokalen Kanallast in Abschnitt 4.4 ist es nun möglich, die Erfolgswahrscheinlichkeit der Nachrichtenübertragung für jedes Sender-Empfänger-Paar zu bestimmen. Dadurch können Statistiken darüber erhoben werden, welche und wie viele CAMs bei jedem Empfänger ankommen.

Für die analytische Abschätzung der CAM-Empfangsraten wird angenommen, dass sich die Abstände aller Sender von CAMs innerhalb der Kommunikationsreichweite um den Empfänger gleich verteilen. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass die Spur- und die Straßenbreite im Vergleich zur Kommunikationsreichweite  $d_{\text{com}}$  vernachlässigbar sind. Damit bestimmt sich die durchschnittliche Empfangswahrscheinlichkeit unter Verwendung von Formel (3.6) durch

$$\bar{P}_{\text{combined}}^{\text{success}} = \frac{\int_0^{d_{\text{com}}} P_{\text{combined}}^{\text{success}} dd}{d_{\text{com}}}. \quad (4.4)$$

Durch Multiplikation von  $\bar{P}_{\text{combined}}^{\text{success}}$  mit der Rate der generierten CAMs  $\bar{r}_{\text{sent}}^{\text{cr}}$  innerhalb der Kommunikationsreichweite  $d_{\text{com}}$  des Empfängers ergibt dann die geschätzte CAM-Empfangsrate

$$r_{\text{rcvd}}^{\text{CAM}} = \bar{r}_{\text{sent}}^{\text{cr}} \cdot \bar{P}_{\text{combined}}^{\text{success}}. \quad (4.5)$$

In Abbildung 4.7 werden die CAM-Empfangsraten aus den simulierten Szenarien in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate  $\varphi$  dargestellt. Die simulierten Mittelwerte werden durch Kreuze dargestellt, die Standardabweichung der erhobenen Werte wird durch Balken angezeigt und die Maximalwerte werden durch Quadrate markiert. Die durchgezogenen Linien stellen die mit der Schätz-Funktion errechneten Werte dar. Die CAM-Empfangsrate steigt etwas weniger als linear mit der Ausstattungsrate an. Für CAM-Raten bis zu  $500 \frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$  ist das Kanalmodell ausreichend präzise, darüber beginnt durch die höhere Kanallast der Einfluss der Congestion Control. Diese Empfangsrate wird im A5- und im A6-Szenario bei den Ausstattungsraten  $\varphi = 40\%$  bzw.  $\varphi = 80\%$  erreicht. Kurzzeitig kann die CAM-Rate auch die Grenze von ca.  $500 \frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$  überschreiten, da die Mechanismen zur Congestion Control eine gewisse Zeit benötigen, bis sie

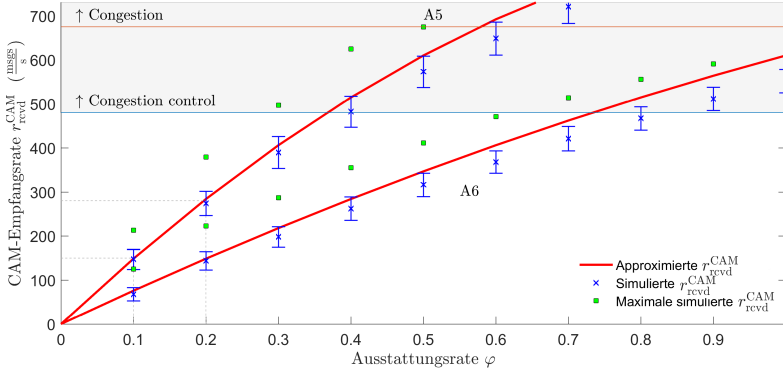


Abbildung 4.7: Die Raten empfangener CAMs für das A5-Szenario ( $n_{\text{lanes}} = 8$ ) und das A6-Szenario ( $n_{\text{lanes}} = 4$ ). Die Ergebnisse oberhalb der angegebenen Grenze für Überlastkontrolle sind zu hoch.

greifen. Auch geringere Ausstattungsraten führen bereits zu hohen CAM-Raten. Auf der A5 verursachen 10% und 20% Ausstattungsrate 150 bzw. 280  $\frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$ .

Ähnlich wie bei der Kanallast wird in einer Parameterstudie untersucht, welche CAM-Empfangsraten unter welchen Bedingungen zustande kommen. Die Ergebnisse dieser Studie werden in Abbildung 4.8 für die CAM-Empfangsraten  $r_{\text{rcvd}}^{\text{CAM}} \in \{125, 250, 500\} \frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$  dargestellt. Auf zweispurigen Straßen werden 125 und 250  $\frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$  für höhere Ausstattungs-raten von 33% bzw. 70% erreicht. Auf achtspurigen Straßen sind jedoch 125, 250, and 500  $\frac{\text{CAMs}}{\text{s}}$  schon für  $\varphi = 8\%$ , 18% und 40% möglich. Solche Ausstattungs-raten sind in wenigen Jahren möglich. Bei noch mehr Fahrspuren sinkt die Ausstattungsrate entsprechend, die für eine hohe CAM-Empfangsrate vonnöten ist. Bereits bei moderaten Ausstattungs-raten müssen Serienfahrzeuge folglich in bestimmten Szenarien mehrere hundert CAMs pro Sekunde bewältigen.

Betrachtet man die Anzahl von CAMs, die man von bestimmten Fahrzeugen empfängt, dann hängt sie im Wesentlichen von den Trajektorien

## 4 Analyse der Nachrichtenraten

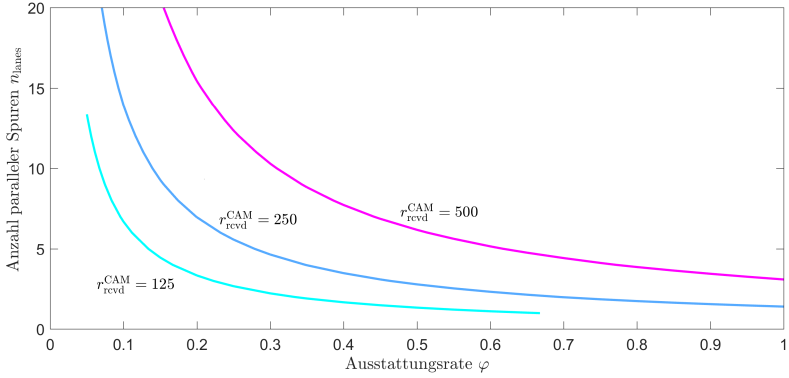


Abbildung 4.8: Die Ausstattungsrate  $\varphi$  und die Anzahl der parallelen Spuren  $n_{\text{lanes}}$  bestimmen die Rate der empfangenen CAMs  $r_{\text{rcvd}}^{\text{CAM}}$  im gewählten, vereinfachten Szenario.

der Sender und Empfänger ab. Für den Fall, dass beide Fahrzeuge auf der gleichen Fahrspur in dieselbe Fahrtrichtung mit ähnlicher Geschwindigkeit fahren, dann hängt die Menge der ausgetauschten Nachrichten davon ab, wie lange beide Fahrzeuge in Kommunikationsreichweite mit- oder hintereinander fahren. Wenn beide Fahrzeuge allerdings in entgegengesetzten Richtungen aneinander vorbei fahren, gibt es nur ein kurzes Zeitfenster, in dem ein Nachrichtenaustausch erfolgen kann. Im Folgenden soll die Anzahl an empfangenen Nachrichten von einem in entgegengesetzter Fahrtrichtung vorbeifahrenden Fahrzeug,  $n_{\text{rcvd}}^{\text{passing}}$ , abgeschätzt werden. Dieser Wert ist unter anderem durch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge bestimmt. Zur Vereinfachung nehmen wir für beide Fahrzeuge die gleiche konstante Geschwindigkeit an.

Dazu wird zuerst die Zeit  $t_{\text{pass}}$  bestimmt, während der sich ein Sender in der Kommunikationsreichweite  $d_{\text{com}}$  des Empfängers befindet:

$$t_{\text{pass}} = \frac{d_{\text{com}}}{2 \cdot v}. \quad (4.6)$$

Damit kann die Anzahl der empfangenen CAMs eines vorbeifahrenden

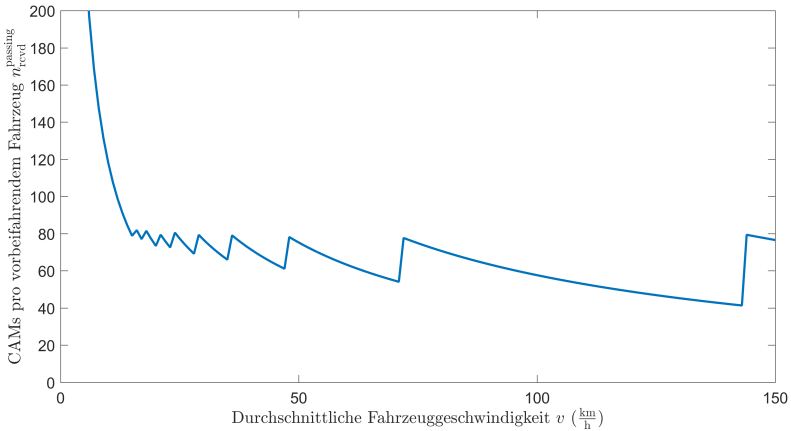


Abbildung 4.9: Die Anzahl der CAMs  $n_{\text{rcvd}}^{\text{passing}}$ , die von einem einzelnen in entgegengesetzter Richtung vorbeifahrenden Fahrzeug empfangen werden, wird durch die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  bestimmt. Der Grafik liegt eine Schnellstraße mit zwei Spuren pro Fahrtrichtung zugrunde.

Fahrzeugs  $n_{\text{rcvd}}^{\text{passing}}$  mit

$$n_{\text{rcvd}}^{\text{passing}} = \frac{t_{\text{pass}}}{T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}} \cdot \bar{P}_{\text{combined}}^{\text{success}}. \quad (4.7)$$

abgeschätzt werden. Abbildung 4.9 stellt die Ergebnisse für ein Beispielszenario grafisch dar. Die Grundlage ist eine vierspurige Straße, auf der die durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 0 und 150  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  variieren.

Für Geschwindigkeiten unter 10  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  werden sehr viele CAMs von jedem vorbeifahrenden Fahrzeug empfangen. Dies entspricht der längeren Zeitdauer einer Vorbeifahrt. Für typische Schnellstraßengeschwindigkeiten werden dagegen zwischen 40 und 80 CAMs empfangen. Dieser Wertebe-

reich ist relativ stabil, da die höheren CAM-Erzeugungsraten die niedrigere Kommunikationszeit  $t_{\text{pass}}$  kompensieren.

Dabei sind nicht alle CAMs von vorbeifahrenden Fahrzeugen von gleichem Nutzen für die Anwendungen. Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit benötigen in der Regel vor allem jene CAMs, die von Fahrzeugen aus der Nähe des Empfängers stammen. Nachdem ein Sender bereits den Empfänger passiert hat, sind seine Nachrichten in der Regel von geringem Nutzen.

## 4.6 Aktualisierungszeit

Die prinzipbedingte Unzuverlässigkeit des drahtlosen Kanals macht die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu einem Sensor, der keine regelmäßigen Aktualisierungen von Informationen garantieren kann. Deswegen ist es für die Gestaltung der Anwendungen von hohem Interesse, in welchen Abständen von bestimmten Fahrzeugen neue Nachrichten zu erwarten sind. Mit der Simulation und wiederum einer analytischen Schätzung wird in diesem Abschnitt die Zeit zwischen dem Empfang zweier aufeinanderfolgender Nachrichten eines bestimmten Senders untersucht.

Der zeitliche Abstand zwischen zwei empfangenen Nachrichten  $T_{[d_1, d_2]}^{\text{inter}}$  wird in der Simulation jeweils in 100-m-Bereichen von  $d_1$  bis  $d_2$  erhoben. Dabei werden nur Nachrichten berücksichtigt, die in diesem Distanzbereich relativ zum Empfänger versendet wurden.

Auf analytischem Weg wird der durchschnittliche zeitliche Abstand zwischen zwei empfangenden Nachrichten  $E[T_d^{\text{inter}}]$  mit Hilfe des Kanalmodells für beliebige Distanzen  $d$  bestimmt. Die Zeit zwischen dem Empfang von zwei Nachrichten des gleichen Senders ist eine Zufallsvariable, die mittels der Geometrischen Wahrscheinlichkeitsverteilung mit Verschiebung 1 dargestellt werden kann:

$$P(T_d^{\text{inter}} = i \cdot T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}) = (1 - P_{\text{combined}}^{\text{success}}(d, \rho))^{(i-1)} \cdot P_{\text{combined}}^{\text{success}}(d, \rho). \quad (4.8)$$

Der Mittelwert der Zufallsvariable  $T_d^{\text{inter}}$  wird mit

$$E[T_d^{\text{inter}}] = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot T_{\text{CAM}}^{\text{inter}} \cdot P(T_d^{\text{inter}} = i \cdot T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}) \quad (4.9)$$



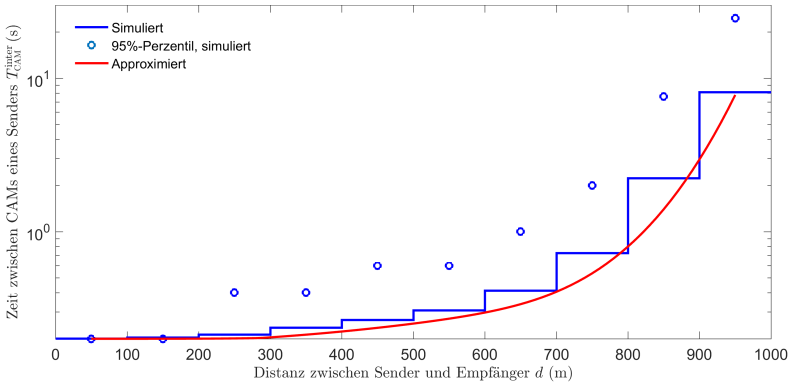


Abbildung 4.10: Zeiten zwischen dem Empfang zweier CAMs desselben Senders. Dargestellt werden simulierte Ergebnisse (Stufen entsprechen den Mittelwerten, Kreise dem 95%-Quantil) und approximierte Werte (kontinuierliche, rote Linie) für das A5-Szenario mit der Ausstattungsrate  $\varphi = 20\%$ .

bestimmt.

In Abbildung 4.10 werden die simulierten und geschätzten Ergebnisse für das A5-Szenario mit einer Ausstattungsrate von 20% dargestellt. Es ist festzustellen, dass für Distanzen kleiner 500 m der zeitliche Abstand zwischen empfangenen Nachrichten nahe der CAM-Erzeugungsrate  $T_{\text{CAM}}^{\text{inter}}$  bleibt. Das entspricht einer geringen Anzahl an Nachrichten, die auf dem Übertragungsweg verloren gehen. Für größere Distanzen steigt die Zeitdauer zwischen zwei Nachrichten vom gleichen Sender signifikant an und liegt im höchsten Distanzbereich bei ca. 8 s. Die Simulationswerte und die Schätzung stimmen überein. Die 95%-Perzentile liegen bis 200 m nah bei den Mittelwerten, darüber hinaus sind diese Perzentile signifikant höher.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Anwendungen, die auf Nachrichten aus ihrer unmittelbaren Umgebung bauen – wie etwa Anwendungen zur Kollisionsvermeidung – mit regelmäßigen neuen Nachrichten rechnen können. Dagegen sind CAMs aus größeren Entfernungen mit einer

## 4 Analyse der Nachrichtenraten

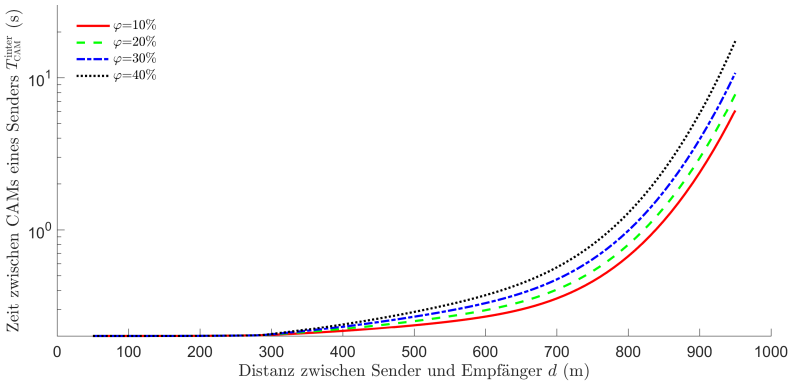


Abbildung 4.11: Die Zeiten zwischen dem Empfang zweier CAMs desselben Senders entsprechend der analytischen Formel (A5-Szenario).

höheren Unsicherheit verbunden, die bei der Gestaltung der entsprechenden Anwendungen berücksichtigt werden muss.

Abschließend wird die Abhängigkeit der Aktualisierungszeit von der Ausstattungsrate analytisch untersucht. Die Ergebnisse werden in Abbildung 4.11 dargestellt. Für kleine Distanzen ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Für größere Distanzen dagegen steigen die zeitlichen Abstände mit der Ausstattungsrate. Dies kann dazu führen, dass Anwendungen bei geringer Ausstattungsrate besser mit Nachrichten versorgt werden als bei hoher Ausstattungsrate.

Unsere Untersuchung nimmt vereinfachend kontinuierlichen Verkehr bei einer gleichmäßigen Fahrzeuggeschwindigkeit an. Dies führt zu einer relativ konstanten CAM-Erzeugungsrate. In realem Verkehr sind diese Vereinfachungen nicht immer zutreffend, was in anderen zeitlichen Abständen zwischen empfangenen Nachrichten resultieren kann. Außerdem sind der Verkehrsfluss und das Kanalmodell so gewählt, dass hohe Kanallasten und CAM-Empfangsraten verursacht werden. Dies führt zu geringen zeitlichen Abständen im Empfang. Pessimistischere Kanalmodelle und -verhältnisse, etwa durch die Einbeziehung von Objekten oder kurvigen Straßen, kön-

#### *4.6 Aktualisierungszeit*

nen zu höheren zeitlichen Abständen beim Empfang von Nachrichten des gleichen Senders führen.

#### *4 Analyse der Nachrichtenraten*

## 5 Systemarchitektur

In diesem Kapitel wird eine Systemarchitektur zur Integration von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in ein Serienfahrzeug entwickelt, die auf die in Abschnitt 1.2 genannten Herausforderungen eingeht und die mit den in Kapitel 4 bestimmten hohen Nachrichtenraten umgehen kann.

Zunächst wird die Standardarchitektur vorgestellt, welche in ähnlicher Form in vielen Forschungsprojekten verwendet wurde. Im folgenden Abschnitt wird argumentiert, dass diese Standardarchitektur unter Berücksichtigung automobiler Anforderungen nicht geeignet für die Integration in ein Serienfahrzeug ist. Daher werden im letzten Abschnitt entsprechende Erweiterungen dieser Architektur vorgestellt, um die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation serientauglich zu integrieren.

### 5.1 Standardarchitektur

Im Rahmen vieler Forschungsprojekte, Feldtests und Experimente wurde eine Vielzahl von Lösungen für die Integration der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Versuchsfahrzeuge entworfen und umgesetzt. Bei diesen Integrationen stand in der Regel die Umsetzung theoretischer Konzepte im Mittelpunkt, welche auf leistungsstarker Versuchshardware implementiert wurden [397, 398, 399, 400, 401]. Jedes dieser Projekte entwarf in der Regel ein neues Systemkonzept auf der Basis der zur jeweiligen Zeit verfügbaren technischen Mittel [244].

In diesem Abschnitt soll eine Standardarchitektur vorgestellt werden, welche die wesentlichen Eigenschaften und Module bisheriger prototypischer Systeme berücksichtigt. Diese funktionale Architektur berücksichtigt keine Effizienz-Optimierungen [402]. In Abbildung 5.1 wird diese Standardarchitektur dargestellt. Im Folgenden werden alle Bestandteile dieser Abbildung erläutert.

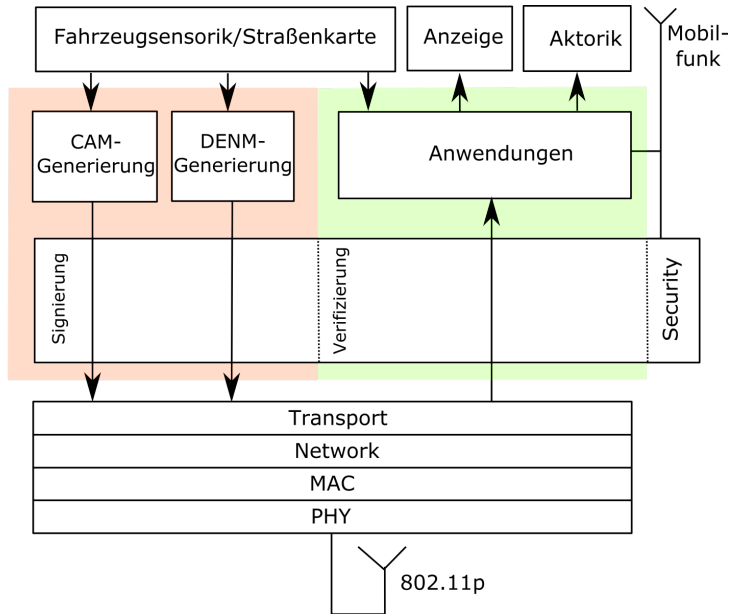


Abbildung 5.1: Die wesentlichen funktionalen Blöcke eines Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystems. Der rot hinterlegte Bereich links betrifft ausgehende Daten, der grün hinterlegte Teil betrifft eingehende Daten bzw. deren Verarbeitung.

### 5.1.1 Fahrzeugsensorik und Straßenkarte

Die Anbindung der Fahrzeugsensorik ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass ein Fahrzeug sinnvolle Informationen versenden kann (links oben in Abbildung 5.1). Dazu müssen die verfügbaren Signale vom Rad-drehzahlsensor für die Geschwindigkeitsmessung bis zum Crash-Sensor für die Unfallerkennung zu den entsprechenden Modulen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und deren Anwendungen weitergeleitet werden. Die Straßenkarte kann ebenfalls als Datenquelle genutzt werden.

### 5.1.2 CAM-Generierung

Wie in Abschnitt 2.2.7.4 beschrieben werden die Cooperative Awareness Messages (CAMs) dynamisch in Abhängigkeit von den aktuellen Bewegungseigenschaften eines Fahrzeugs versendet. Das Auslösen einer neuen CAM wird durch die permanente Überwachung der entsprechenden Sensoren realisiert (siehe Abbildung 5.1). Des Weiteren enthält die CAM Informationen über den aktuellen Fahrzeugzustand, wie etwa den Zustand der Leuchten. Diese Informationen werden ebenfalls über die Fahrzeugsensorik gesammelt.

### 5.1.3 DENM-Generierung

Ähnlich wie die CAMs werden auch die DENMs durch die Überwachung von speziellen Signalen der Fahrzeugsensorik generiert. Da die DENMs konkrete, in entsprechenden Spezifikationen definierte Ereignisse beschreiben, müssen für jedes dieser Ereignisse die entsprechenden Signale überwacht und ausgewertet werden.

### 5.1.4 Untere Kommunikationsschichten

Die unteren Kommunikationsschichten von der Bitübertragungs- über die MAC- und die Netzwerk- bis zur Transportschicht sind durch die Standardisierung vorgegeben (siehe Abschnitt 2.2.7.2). Diese Schichten werden in der Regel auf einem Chip, zumindest jedoch innerhalb eines Steuergeräts implementiert.

### 5.1.5 Mobilfunk

Zusätzlich zu den Anforderungen der Security ist eine Mobilfunkanbindung auch für die Nutzung von Backend-basierten Diensten sinnvoll. Da mit Mobilfunktechnik realisierte ereignisbasierte Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation bereits im Markt verfügbar ist und genutzt wird, sollte dieser Technologiezweig aufgrund seiner speziellen Vorteile etwa in Gebieten mit geringer Fahrzeugdichte auch in Zukunft genutzt werden.

### 5.1.6 Sicherheit

Das Sicherheitsmodul ist für die Signierung ausgehender und für die Verifikation eingehender Nachrichten zuständig (siehe Abschnitt 2.2.7.6.1). Hier liegen auf Software-Seite für die kryptografischen Algorithmen Standards vor, die einzuhalten sind. Dabei ist Folgendes zu beachten.

1. **Signierung:** Die Verwendung der Pseudonym- und Long-Term-Zertifikate erfordert einen privaten Schlüssel. Dieser Schlüssel muss in einem speziellen, gegen Manipulationen gesicherten Speicher abgelegt werden. Dafür kann ein *Hardware Security Module* verwendet werden.
2. **Verifizierung:** Die Verifizierung der Zertifikate der eingehenden Nachrichten erfordert prinzipiell keine spezielle Hardware, sondern kann von handelsüblichen Prozessoren durchgeführt werden. Die Verifizierung erfordert jedoch sehr viele komplexe mathematische Operationen, weswegen für schnelle Verifizierungen vieler Nachrichten dedizierte Hardware verwendet wird.

Für den Bezug neuer Zertifikate kann die Mobilfunkanbindung verwendet werden. Alternativ ist auch eine Aktualisierung der Zertifikate im Rahmen der Wartung denkbar.

### 5.1.7 Anwendungen

Die Anwendungen werden in 5.1 als ein Modul dargestellt. In der Realität gibt es verschiedene Typen von Anwendungen, die im Hinblick auf die Einbeziehung vorhandener Fahrzeuganwendungen unterschieden werden können (siehe auch Abschnitte 2.2.6 und 2.2.7.5).



- **Reine kommunikationsbasierte Anwendungen:** Mehrere Anwendungen sind alleine auf Basis der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation möglich. Dazu zählen insbesondere ereignisbasierte Anwendungen, die eine frühzeitige Warnung des Fahrers vor Gefahren oder speziellen Situationen ermöglichen. Ein Beispiel hierfür ist die Warnung vor Gefahrenstellen wie einer vereisten Fahrbahn. Solche Anwendungen sind unabhängig von Anwendungen umsetzbar.
- **Erweiterung vorhandener Anwendungen:** Vorhandene Anwendungen können durch die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation verbessert werden, indem durch die erweiterte Wahrnehmung der Umgebung spezielle Situationen besser erkannt werden können. Dies trifft etwa im Bereich der Fahrerassistenzsysteme zu. Heutige Realisierungen erkennen einsicherenden Verkehr über Radar und Bildverarbeitung erst spät, so dass mitunter heftige Bremsungen nötig sind. Mithilfe der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation könnte eine solche Situation durch die Übertragung des Blinkerstatus und damit des Einsicher-Wunsches eines Fahrers früher ermittelt werden.

Insgesamt sind die Anwendungen ein sehr heterogenes Feld, das viele Systeme im Fahrzeug einschließt. Die Anwendungen können daher auf mehrere separate Blöcke aufgeteilt und in verschiedenen Steuergeräten implementiert werden.

### 5.1.8 Anzeige und Aktorik

Dem Fahrer können aktuelle Informationen angezeigt werden. Dies muss immer in einer Weise umgesetzt werden, die den Fahrer so wenig wie möglich ablenkt und ihm trotzdem die wichtigsten Informationen vermittelt. Prinzipiell geeignete Anzeigemöglichkeiten sind die diversen Bildschirme heutiger Fahrzeuge, Projektionen auf die Windschutzscheibe und die Beleuchtung. Daneben sind Audioausgaben von einfachen Piep-Tönen bis hin zu Sprachausgaben möglich.

Über mehrere Aktoren können Anwendungen direkt oder indirekt auf das Fahrzeugverhalten Einfluss nehmen. Dazu zählen etwa das Bremsen oder Lenken in kritischen Gefahrensituationen. Daneben ist auch eine komfortablere und vorausschauendere Fahrweise bei teilautomatisierten Systemen möglich. Folgt man etwa einer Kolonne von Fahrzeugen, ist

bei einer Vollbremsung eines verdeckten vorausfahrenden Fahrzeugs eine sanfte Bremsung des eigenen Fahrzeugs möglich.

### 5.2 Integrationsherausforderungen

Soll die im vorhergehenden Abschnitt dargestellte Standardarchitektur in ein Serienfahrzeug integriert werden, ergeben sich an mehreren Stellen bisher wenig beachtete Herausforderungen. Diese treten vor allem bei der Verarbeitung empfangener Nachrichten auf. In diesem Abschnitt werden diese Herausforderungen erläutert.

#### 5.2.1 Hohe Nachrichtenraten

Wie in Kapitel 4 gezeigt, können sehr hohe Raten empfangener Nachrichten auftreten und zu Überlast bei den verarbeitenden Systemen führen. Die Nachrichtenraten hängen von unterschiedlichen Randbedingungen ab [349].

- *Ort*: Die Rate der empfangenen Daten hängt vom Standort des Fahrzeugs ab. Die mehrspurige Autobahn in einer Metropolregion unterscheidet sich stark von der einsamen Bergstraße. Außerdem wird sich die Technologie in den Weltregionen unterschiedlich schnell etablieren. In hochentwickelten Ländern wird das Datenaufkommen zunächst höher sein als in Entwicklungsländern.
- *Tageszeit*: Kurzfristige zeitliche Veränderungen an einem gegebenen Ort betreffen z.B. Aus- und Einfallstraßen in Metropolen, die zu Spitzenverkehrszeiten völlig andere Datenaufkommen verursachen als zu nächtlichen Stunden.
- *Ausstattungsrate*: Mit dem Marktstart und der Etablierung der neuen Technologie werden immer mehr neue Fahrzeuge mit der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ausgestattet. Im Laufe der Zeit wächst so die Ausstattungsrate an, so dass ein steigender Anteil der Fahrzeuge im Straßenverkehr an der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation teilnehmen wird.

Die Lebenszyklen der Fahrzeuge betragen durchschnittlich 10 bis 15 Jahre, können sich in vielen Fällen aber auch über mehrere Dekaden er-

strecken. Ein Seriensystem muss mit diesen räumlich-zeitlichen Veränderungen zurechtkommen und entsprechend ausgelegt werden. In einem weit gefassten Sinne ist zwar die Datenrate durch die Bandbreite der Kommunikationstechnologie begrenzt. Diese maximale Datenrate ist jedoch zur Dimensionierung der Hard- und Software entsprechender Steuergeräte nicht geeignet, weil ein entsprechender Ressourcenvorhalt zu hohen Kosten führen würde. Letztlich wird diese maximale Datenrate selten oder nie erreicht werden.

### 5.2.2 Anwendungen

Die Verarbeitung der empfangenen Nachrichten in den Anwendungen ist der zentrale Vorgang zur Erreichung eines Kundennutzens. Gerade hier stellen sich mehrere Herausforderungen.

#### 5.2.2.1 Anwendungsvielfalt

Die Anzahl der in Abschnitt 2.2.6 vorgestellten potentiellen Anwendungen ist sehr groß und variantenreich. Die Menge der kommunikationsbasierten Anwendungen wird in der Zukunft stetig weiter steigen. Um zu vermeiden, dass jede Änderung auf Anwendungsebene umfangreiche Anpassungen in der Systemarchitektur nach sich zieht, sollte das Gesamtsystem von Beginn an mit Flexibilität und Modularität versehen werden. Eine wiederholte Neuentwicklung würde sonst zu hohen Entwicklungsaufwänden und wiederholten Test-Verfahren führen, was wiederum zu signifikant erhöhten Kosten führt.

Eine weitere Herausforderung bei der Gestaltung der Anwendungen liegt in der fairen Verteilung der Ressourcen zwischen den Anwendungen. Das ist umso wichtiger, wenn die Anwendungen nicht alle aus einer Hand kommen, sondern von verschiedenen Entwicklern erstellt werden oder von verschiedenen Lieferanten zugekauft werden. Im Betrieb muss zu jeder Zeit eine Überlastung oder ein Ausfall des Gesamtsystems verhindert werden.

#### 5.2.2.2 Verteilte Systeme

Durch die Verortung der Anwendungen in verschiedenen Steuergeräten entsteht ein verteiltes System. Es ist ein Ausnahmefall, dass sich von der drahtlosen Kommunikation bis zu den Anwendungen und der Anzeige alle

## 5 Systemarchitektur

Systembestandteile in einem Steuergerät befinden. In der Regel sind die Sensoren, Aktoren, Anzeigen und Anwendungen über viele Steuergeräte verteilt.

Die fahrzeuginterne Vernetzung verursacht dabei besondere Herausforderungen. Durch die Weiterleitung von Informationen über die Busse entstehen zusätzliche Latenzen. Die Kapazitäten der Bussysteme sind bereits durch die vorhandenen Systeme ausgelastet. Gleichzeitig kann die Kapazität nicht beliebig erweitert werden, da dem Kosten, Gewicht und verfügbarer Bauraum entgegenstehen. Es ist also darauf zu achten, möglichst wenige und nach Möglichkeit nur relevante Daten über diese Busse zu versenden. Zu beachten ist außerdem, dass das momentan hauptsächlich eingesetzte Bus-System CAN keine Echtzeitfähigkeit unterstützt. Stattdessen wird durch Dokumentation und händische Planung sichergestellt, dass es zu keinen Flaschenhälsen bei der Übertragung sicherheitskritischer Daten kommt. Ein System wie die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, das räumlich und zeitlich höchst unterschiedliche Datenraten generiert, darf diese Dynamik nicht auf den Bus weitergeben, sondern muss klar definierte Obergrenzen garantieren.

### 5.2.2.3 Datenfusion

Eine wichtige Rolle für die Qualität der Anwendungen spielt die Fusion von Daten aus der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und anderweitig erfassten Informationen. Wie in Abschnitt 2.1.1.1 dargestellt, haben sich erst durch die Fusion mehrerer bildgebender Verfahren mit unterschiedlichen Eigenschaften die Grundlagen ergeben, die den Weg zum automatisierten Fahren ermöglichen. Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation erweitert den Horizont der bestehenden Sensoren über den Sichtbereich hinaus – kann diese allerdings nicht ersetzen. Das volle Potenzial aller Technologien kann also nur durch die Fusion ihrer Daten ausgeschöpft werden.

Das Zusammenführen der Daten verschiedener Sensoren und Kommunikationstechnologien erfordert komplexe Verfahren. Dies betrifft insbesondere die Bestimmung der Identität von Objekten aus verschiedenen Quellen. Ist das Radar-Objekt auf der Nebenspur identisch mit dem Fahrzeug, welches soeben eine Nachricht gesendet hat? Diese Frage wird durch sogenanntes *Matching* zu beantworten versucht. Aufgrund der Ungenauigkeit heutiger Lokalisierungs-Technologien kann eine eindeutige Aussage

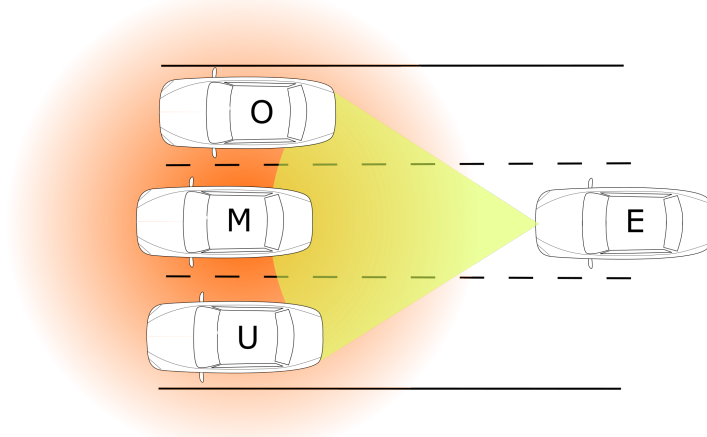


Abbildung 5.2: Das rechte Fahrzeug (E) kann aufgrund der Lokalisierungs-Ungenauigkeit – orange angedeutet für das mittlere Fahrzeug (M) links – keine einfache Zuordnung von Radar-Objekten und Sendern von Nachrichten vornehmen.

---

in vielen Situationen nicht alleine durch einen Abgleich der aktuellen Positionsdaten erzielt werden [7]. Abbildung 5.2 zeigt ein entsprechendes Beispiel. Das rechte Fahrzeug (E) hat per Radar vor sich drei Fahrzeuge (O, M und U) erkannt, die in etwa auf gleicher Höhe nebeneinander fahren. Gleichzeitig wird eine Nachricht empfangen, die eine Positionsinformation enthält. Aufgrund der Lokalisierungs-Ungenauigkeit – etwa durch verdeckte Satelliten – kann diese Position aber verfälscht sein. Das hintere Fahrzeug kann also nicht mit Sicherheit sagen, welches der drei Radar-Objekte zu der Nachricht passt.

In solchen Situationen müssen also weitere Informationen herangezogen werden. Insbesondere dienen historische Daten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungswerte als Indizien, um eine zuverlässige Zuordnung zu er-

möglichen. Um im obigen Beispiel zu bleiben, könnte das untere Fahrzeug gerade überholen, während das obere Fahrzeug gerade abbremst. Da diese Informationen sowohl per Radar als auch per Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation unabhängig voneinander erlangt werden, kann hierüber ein Abgleich erfolgen. Lediglich in sehr seltenen Situationen, in denen mehrere Fahrzeuge über längere Zeiträume stabile relative Positionen einnehmen, bleibt eine Zuordnung schwierig [8]. Eine zuverlässiges Matching von Objekten sowie die darauf folgende Fusion der Objektinformationen erfordern komplexe algorithmische Verfahren, die mitunter hohe Rechenressourcen verlangen [7, 22, 34, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409]. Diese aufwändigen Operationen sollten daher nur für relevante Nachrichten durchgeführt werden.

### 5.2.2.4 Situationsanalyse

Nach der Fusion verschiedener Datenquellen folgt die sogenannten *Situationsanalyse*. In diesem Schritt werden die Bewegungen sowohl des eigenen Fahrzeugs als auch der umliegenden Fahrzeuge analysiert, extrapoliert und daraus entstehende Kollisionsgefahren extrahiert [410, 411]. Um unterschiedliche mögliche zukünftige Aktionen der Fahrzeuge zu berücksichtigen, müssen verschiedene Prognosen parallel betrachtet und gewichtet werden. Aufgrund der Dynamik des Straßenverkehrs sind die daraus möglicherweise entstehenden alternativen Situationen sehr komplex [60, 412, 413, 414]. Je größer die räumliche Abdeckung der Sensorik ist, desto weiter in die Zukunft kann eine Situationsanalyse blicken.

Mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, die prinzipiell mehrere hundert Meter weit und über Sichthindernisse hinweg umliegende Fahrzeuge erfasst, wächst demzufolge der Raum der betrachteten Alternativen weiter an. Gleichzeitig kann die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auch einige Möglichkeiten eliminieren, da sie Intentionen eines Fahrers übermittelt. Beispielsweise ist das frühzeitige Wissen über eine abrupte Lenkbewegung hilfreich, da ein Fahrzeug aufgrund der Trägheit seiner Mechanik verzögert reagiert. In einer Kreuzungssituation mit Kollisionsgefahr etwa kann das Wissen über eine hastige Lenkbewegung, auf die ein Fahrzeug mit einigen Sekundenbruchteilen Verzögerung reagiert, signifikanten Einfluss auf die Verhinderung der Kollision haben [415, 416].

Von der bildgebenden Sensorik wird aktuell in der Regel eine einstellige Anzahl von Fahrzeugen detektiert und entsprechend analysiert. Die An-

zahl der erfassten Objekte kann durch die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation mittelfristig um mehrere Größenordnungen erhöht werden (siehe Kapitel 4). Dies verdeutlicht, dass die um Kommunikationsdaten erweiterte Situationsanalyse eine höhere Rechenlast verursachen kann. Eine Begrenzung der Datenraten, die in die Situationsanalyse einfließen, kann somit Rechenressourcen sparen.

### 5.2.3 Automobile Anforderungen, Qualität und Kosten

Die automobilen Anforderungen (siehe Abschnitt 2.1.3) fügen der Entwicklung eines serienreifen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationssystems weitere Komplexität hinzu. Kosten, Gewicht, Größe, Robustheit und Sicherheit werden bei allen Automobilherstellern mit strengen Vorgaben versehen. Daher sollte eine Systemarchitektur für Serienfahrzeuge die verfügbaren Ressourcen möglichst optimal ausnutzen.

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation lebt von einer breiten Marktdurchdringung. Ein geringer Preis hilft bei der schnelleren Verbreitung der Technologie, da das Verhältnis von Kundennutzen und Kosten schneller attraktiv wird. Wird das System als Sonderausstattung verkauft, entscheiden sich bei einem günstigeren Preis mehr Kunden für einen Kauf. Ist das System als Serienausstattung in jedem Fahrzeug eines Herstellers enthalten, erhöht ein geringerer Einkaufspreis die Rendite.

Das Gewicht spielt auch bei Steuergeräten zunehmend eine Rolle, da jede Gewichtseinsparung in Verbrauchsreduzierungen resultiert. Wird die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation nicht effizient genug umgesetzt, müssen größere Hardware-Ressourcen verbaut werden. Diese können selbst Gewicht hinzufügen oder indirekt etwa durch einen höheren Aufwand zur Kühlung mit Kühlrippen ein höheres Gewicht verursachen.

Ein zentraler Grund dafür, warum die Rechenleistung in Fahrzeugen in der Regel nicht an diejenige von Endkunden- oder Rechenzentrums-Hardware heranreicht, ist die erforderliche Robustheit. Sowohl die Steuergeräte als Ganzes als auch die einzelnen Chips müssen in einem größeren Temperaturbereich – üblich sind  $-40^{\circ}$  bis  $80^{\circ}$  Celsius – zuverlässig funktionieren. Außerdem sind sie während der Fahrten ständig Stößen und Vibrationen ausgesetzt. Darüber hinaus gelten diese Bedingungen für einen vergleichsweise langen Zeitraum. Daher müssen die Lieferanten solcher Steuergeräte und Chips ihre Produkte einer sogenannten *Automotive-Qualifizierung* unterziehen, die mit hohen Kosten verbunden und nicht für

jede Hardware möglich ist. Aktuelle Hardware aus dem Unterhaltungselektronikmarkt kann diese Bedingungen oft nicht erfüllen.

### 5.2.4 Kryptografische Mechanismen

Die im Abschnitt 2.2.7.6.1 beschriebenen Sicherheitsmaßnahmen erhöhen ebenfalls die Rechenlast. Die Verifikation der Authentizität des Senders einer Nachricht erfordert mathematische Operationen, die von heutigen Massenmarkt-CPU's nicht effizient berechnet werden können. Damit können nur wenige Nachrichten pro Sekunde von solchen CPU's verifiziert werden. Aus diesem Grund gibt es spezielle Hardware-Lösungen, welche diese Verfahren für höhere Nachrichtenraten durchführen können [417]. Während es Speziallösungen gibt, die das durch die Kanalkapazität gegebene theoretische Maximum an Nachrichten pro Sekunde verifizieren können, gibt es auch Hardware, die nur einige hundert Nachrichten pro Sekunde oder weniger prüfen kann. Bei hohen eingehenden Nachrichtenraten kann es also dazu kommen, dass nicht mehr jede Nachricht verifiziert werden kann. In diesem Fall sollte dies nur Nachrichten betreffen, die für die Anwendungen von geringer Relevanz sind.

Unter gewissen Umständen kann es trotz der kryptografischen Sicherheitsmaßnahmen dazu kommen, dass übertragene Nachrichten manipulierte Daten enthalten. So ist es vorstellbar, dass in einem Fahrzeug, welches gültige Zertifikate für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation verwendet, die Datenquellen modifiziert werden. In modernen Fahrzeugen sind die Daten auf den internen Bussen in der Regel nicht verschlüsselt und authentifiziert. Es wäre damit möglich, etwa eine falsche Geschwindigkeit entweder mechanisch über den Raddrehzahlsensor oder digital über den Bus an das Kommunikationsmodul zu übergeben. Darüber hinaus könnte es auch dazu kommen, dass das Sicherheitssystem der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation kompromittiert wird, womit legitime von illegitimen Sendern nicht mehr zu unterscheiden wären.

Um in solchen Situationen trotzdem eine Möglichkeit zu haben, im empfangenden Fahrzeug Manipulationen zu erkennen, kann die sogenannte *Misbehavior Detection* verwendet werden. Damit werden Verfahren zusammengefasst, welche die Inhalte der Nachrichten auf ihre Plausibilität prüfen. Um im obigen Beispiel zu bleiben, kann z.B. die Korrektheit der Geschwindigkeitsangaben mit der Änderung der GPS-Positionen abgeglichen werden. Es wurden vielerlei solcher heuristischer Ansätze erarbeitet,



die in der Kombination ein gewisses Sicherheitsniveau herstellen können [282]. Allerdings ist hier erneut eine Ursache für zusätzliche Rechenlast zu erkennen. Je diffiziler die möglichen Manipulationen sind, desto aufwendiger sind die Maßnahmen zu ihrer Erkennung [418].

### 5.2.5 Sensorgenauigkeit

Bei dem kooperativen System der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation wird das Vertrauen auf die Einhaltung der Standards bei den Empfängern vorausgesetzt. Trotz gewisser Qualitätsvorgaben für die kommunizierten Daten kann es trotzdem zu Ungenauigkeiten kommen. Dies betrifft insbesondere die Ungenauigkeit der satellitengestützten Positionierungssysteme GPS (betrieben durch die USA), Galileo (Europa), GLONASS (Russland) und Beidou (China) [419]. Alle diese Systeme können größere Positionsunschärfen nicht ausschließen, wenn beispielsweise nicht genügend Satelliten in Reichweite sind oder wenn durch die lokale Gegebenheiten etwa in Großstädten die Signallaufzeiten durch Reflexionen an hohen Gebäuden stark verändert werden. In jedem Fahrzeug kann eine gute Positionierung dadurch erreicht werden, dass die gefahrene Trajektorie mit einer installierten Karte abgeglichen wird – sogenanntes *Map-Matching* [420, 421, 422]. Eine solchermaßen verbesserte Positionierung kann aber nicht an andere Fahrzeuge kommuniziert werden, da dort andere Karten mit teilweise starken Abweichungen vorhanden sein können [423]. Die Positionen werden allerdings durch *Koppelnavigation* (engl. *Dead Reckoning*) verfeinert, also das Fortschreiben der Position auf Basis von Fahrzeugbewegungsdaten wie Geschwindigkeit und Kurvenradius [424, 425].

In mehreren Forschungsarbeiten wurde versucht, die Positionierungsgenauigkeit durch besondere Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsprotokolle zu verbessern [426, 427, 428]. Eine Vorgehensweise hat sich aber noch nicht durchgesetzt, so dass momentan davon auszugehen ist, dass eine gewisse Ungenauigkeit der Lokalisierung unvermeidbar ist und bei der Gestaltung der Anwendungen stets zu berücksichtigen ist. Um bei den per Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ausgetauschten Daten eine Mindestqualität zu erreichen, werden für definierte Szenarien GPS-Genauigkeiten vorgegeben, die erreicht werden müssen. Ein zentrales Szenario ist das *Open-Sky*-Szenario – also weitgehend offener Himmel mit guter Sicht zu mehreren Satelliten – bei dem in Europa die GPS-Position um 3 m, in den USA um 1.5 m von einer Referenzposition abweichen darf

[21, 429].

### 5.3 Erweiterungen im Empfangspfad

In diesem Abschnitt werden Erweiterungen des Eingangspfades vorgeschlagen, welche die im vorhergehenden Abschnitt identifizierten Quellen für hohe Rechenlast auf ein sinnvolles Maß reduzieren können.

Abbildung 5.3 zeigt zwei zusätzliche Module, die den Empfangspfad ergänzen. Nach diesem Schema wird zunächst die Relevanz jeder eingehenden Nachricht geschätzt. Anschließend werden die Nachrichten durch einen Selektionsmechanismus anhand ihrer Relevanzwerte priorisiert und an die Anwendungen weitergeleitet bzw. verworfen. Je höher die Relevanz, desto früher werden die Nachrichten verarbeitet. Diese Verarbeitungskette muss so gestaltet sein, dass bei hohen Nachrichtenraten eine nach oben begrenzte Anzahl an Nachrichten pro Sekunde verarbeitet wird.

Im Folgenden werden die ergänzenden Blöcke in ihrer Funktion kurz dargestellt. Ihre technische Umsetzung wird in den nächsten Kapiteln im Detail behandelt.

#### 5.3.1 Relevanzschätzung

Die Relevanzschätzung dient dazu, jeder eingehenden Nachricht einen Relevanzwert zuzuordnen. Die Relevanz einer Nachricht kann nach unterschiedlichen Kriterien bewertet werden und hat einen engen Bezug zu den Anwendungen. Je höher die Relevanz einer Nachricht in Relation zu allen anderen aktuellen Nachrichten, desto früher wird sie an die nachfolgenden Blöcke weitergereicht bzw. verarbeitet.

Die Relevanzschätzung muss besonders effizient umgesetzt werden, da sie alle eingehenden Nachrichten bewerten muss. Außerdem sind die Anwendungen auf möglichst aktuelle Informationen angewiesen.

#### 5.3.2 Selektion

Die Selektion nimmt alle empfangenen Nachrichten entgegen. Die Nachricht mit der jeweils höchsten Relevanz wird vom Selektionsmechanismus weitergegeben und von den nachfolgenden Blöcken verarbeitet.

Für den Fall, dass bei Überlast nicht alle eingehenden Nachrichten verarbeitet werden können, werden Nachrichten mit niedriger Relevanz ver-

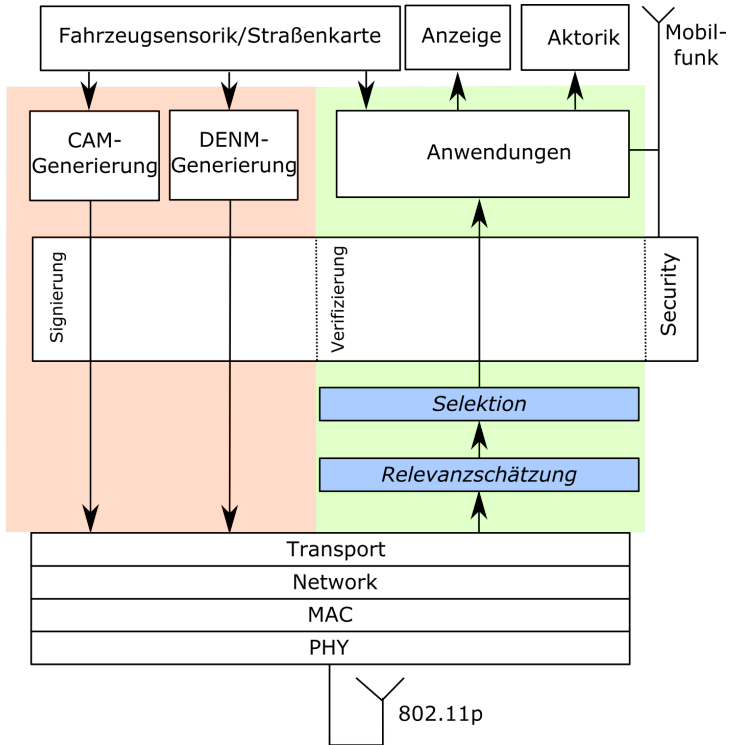


Abbildung 5.3: Die Relevanzschätzung und ein Selektionsmechanismus ergänzen die Architektur aus Abbildung 5.1. Das Gesamtsystem kann die Anwendungen somit auch bei Überlast mit den wichtigsten Informationen versorgen.

## *5 Systemarchitektur*

worfen. Der Selektionsmechanismus muss ebenfalls effizient gestaltet werden, da er alle empfangenen Nachrichten bearbeiten muss.

## 6 Relevanzschätzung

Die Relevanzschätzung hat die Aufgabe, alle empfangenen Nachrichten mit einem Relevanzwert zu versehen. Sie muss in einem Serienfahrzeug effizient ausführbar sein, um auch bei hohen Nachrichtenraten jede Nachricht mit einem Relevanzwert versehen zu können.

In diesem Kapitel wird eine neues Verfahren zur Relevanzschätzung hergeleitet. Zunächst wird dazu eine allgemeine Relevanzfunktion definiert, die auf Distanzfunktionen zurückgreift. Diese Distanzfunktionen werden im Folgenden in mehreren Ausprägungen ausgearbeitet. Diese Konzept werden anschließend kritisch bewertet und anhand mehrerer Metriken evaluiert. Abschließend werden aus der Literatur entnommene und für andere Zwecke entwickelte Ansätze zur Relevanzschätzung diskutiert.

### 6.1 Relevanzfunktion

In diesem Abschnitt wird eine allgemeine Relevanzfunktion entwickelt. Bei diesen Betrachtungen stehen Anwendungen zur Kollisionsvermeidung bzw. Kollisionsverminderung im Fokus. Diese sicherheitsrelevanten Anwendungen müssen auch bei Überlast funktionieren. Anwendungen von geringerer Kritikalität etwa zur Verkehrsoptimierung oder Komfortverbesserung werden somit außen vor gelassen.

In einem ersten Schritt folgen wir dem einfachen Ansatz, die Relevanz alleine auf Basis der Distanz von Sender und Empfänger zu bestimmen. Damit ergibt sich die Formel

$$R(S, E) = \frac{1 \text{ m}}{d(S, E)}. \quad (6.1)$$

für den Sender  $S$  und den Empfänger  $E$ . Die Distanz-Funktion  $d(S, E)$  kann somit zunächst sehr einfach etwa auf Basis der euklidischen Distanz der Positionen von  $S$  und  $E$  bestimmt werden. Im Zähler befindet sich die Einheit m (Meter), um einen dimensionslosen Relevanzwert zu erhalten.

## 6 Relevanzschätzung

Die Formel 6.1 ist jedoch für – unwahrscheinliche – Distanzen von 0 undefiniert. Schwerer wiegt, dass sie nicht in der Lage ist, der Ungenauigkeit der Positionierung sowie der Dynamik der Fahrzeuge in der unmittelbaren Nähe Rechnung zu tragen. So vergeht zwischen dem Messen der Position im sendenden Fahrzeug und der Berechnung der Relevanz eine gewisse Zeit, durch die sich die Positionen der Fahrzeuge zueinander entsprechend verändert haben könnten. Fahrzeuge in der unmittelbaren Nähe können somit in unberechenbarer Weise sehr schnell ihre Relevanz verändern. Aus diesem Grund führen wir die Mindestdistanz  $d_{\min}$  ein, unterhalb derer wir keine Unterscheidung von Distanzen treffen und einen maximalen Relevanzwert ausgeben:

$$R(S, E) = \frac{1 \text{ m}}{\max(d(S, E), d_{\min})}. \quad (6.2)$$

Damit ist die maximale Relevanz auf  $R_{\max} = \frac{1 \text{ m}}{d_{\min}}$  begrenzt.

Die Formel 6.2 bezieht sich auf die Relevanz einer CAM zum Zeitpunkt ihrer Generierung durch den Sender. Damit bleibt unberücksichtigt, dass CAMs von Sendern, die sich vom Empfänger entfernen, tendenziell weniger relevant werden. Sich nähernde Sender werden mit der Zeit relevanter. Dabei kann die Veränderung der relativen Position durch die Bewegung des Senders, des Empfängers oder beider Fahrzeuge verursacht werden. Es liegt auf der Hand, dass die Relevanz von zwei Fahrzeugen, die sich in einer bestimmten Distanz zueinander befinden, maßgeblich davon abhängt, ob sich diese Fahrzeuge aufeinander zu oder voneinander weg bewegen.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Distanzfunktion  $d(S, E)$  um eine zeitliche Dimension zu  $d(S, E, t)$  ergänzt. Der Zeitpunkt  $t$  gibt die vergangene Zeit seit der Relevanzbestimmung an. Je nach gewähltem  $t$  verändert sich also die Distanz der Fahrzeuge basierend auf den initialen Bewegungsdaten, die von  $S$  und  $E$  bekannt sind. Es wird also eine Prognose der zukünftigen Distanzen vorgenommen. Die Relevanzfunktion erweitert sich entsprechend zu

$$R(S, E, t) = \frac{1 \text{ m}}{\max(d(S, E, t), d_{\min})}. \quad (6.3)$$

Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass eine geringe Distanz zum Zeitpunkt der Relevanzschätzung  $t = 0$  relevanter ist als die gleiche Distanz, wenn sie sich erst in der Zukunft ergibt. Um die Zeit bei der Prognose zu berücksichtigen, wird ein entsprechender Term eingefügt

und durch den Parameter  $\theta$  gewichtet. Darum wird neben der Einheit m (Meter) die Einheit s (Sekunde) eingeführt, um weiterhin dimensionslose (Zwischen-) Ergebnisse zu erhalten.

$$R(S, E, t) = \left( \frac{1 \text{ m}}{\max(d(S, E, t), d_{\min})} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{t - t_{\text{now}}}{1 \text{ s}}} \right)^\theta. \quad (6.4)$$

Der Zeitpunkt der Relevanzschätzung wird mit  $t_{\text{now}}$  bezeichnet. Um nun die Relevanz zu berechnen, wird die Funktion 6.4 über  $t$  maximiert:

$$R(S, E) = \max_{t_{\text{now}} \leq t \leq t_{\text{now}} + T_{\max}} R(S, E, t). \quad (6.5)$$

Dabei wird die Extrapolation auf die maximale Prognosezeit  $T_{\max}$  begrenzt. Voraussagen in die fernere Zukunft sind durch die Dynamik des Verkehrs nicht sinnvoll.

## 6.2 Distanzfunktionen

Bisher fungierte die Distanzfunktion  $d(S, E, t)$  lediglich als Platzhalter in der Relevanzfunktion aus Formel 6.5 bzw. 6.4. Es gibt mehrere Gestaltungsmöglichkeiten für die Distanzfunktion  $d(S, E, t)$ , welche in diesem Abschnitt hergeleitet werden. Zuvor werden die dafür verwendeten Eingangsgrößen erläutert und eine nötige Koordinatentransformation beschrieben. Wesentliche Teile dieser Distanzfunktionen wurden zuerst in [2, 4] beschrieben.

### 6.2.1 Eingangsgrößen und Koordinatentransformation

Als Eingangsgrößen für die Distanzfunktionen werden die Basisangaben Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung verwendet. Dies sind die einzigen auf den Fahrzeugstatus bezogenen Größen des GeoNetworking-Protokolls [231] und sind daher bereits auf einer niedrigen Schicht des Kommunikationsstacks verwendbar. Die vielen weiteren Datenfelder im Nutzdatenbereich einer CAM (siehe Abschnitt 2.2.7.4) sind erst nach einer Dekodierung des Nachrichtenteils verfügbar und zumeist optional. Durch die Aufteilung der Kommunikationsschichten auf mehrere Hardware-Chips ermöglicht die Verwendung der Angaben aus dem GeoNetworking-Header die Ausführung der Relevanzschätzung bereits auf dem Transceiver-Chip.

## 6 Relevanzschätzung

Würde man die Nutzdaten verwenden, ist die Relevanzschätzung nur auf der Anwendungs- bzw. Facilities-Schicht möglich.

Im Folgenden werden die Variablen  $\mathbf{p}_S$  für die Position des Senders einer Nachricht,  $v_S$  für die Geschwindigkeit und  $\psi_S$  für die Fahrtrichtung verwendet. Für den Empfänger gelten entsprechend  $\mathbf{p}_E$ ,  $v_E$  bzw.  $\psi_E$ .

Aus der Geschwindigkeit und der Fahrtrichtung bestimmt sich dann der Bewegungsvektor  $\mathbf{v}_S$  des Senders durch

$$\mathbf{v}_S = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_S \cdot x \\ \mathbf{v}_S \cdot y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_S \cdot \cos(\psi_S) \\ v_S \cdot \sin(\psi_S) \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

entlang eines zweidimensionalen Koordinatensystems (Dimensionen  $x$  und  $y$ ). Analog wird der Bewegungsvektor  $\mathbf{v}_E$  des Empfängers berechnet.

Im Folgenden werden die Positionen, Geschwindigkeiten und Fahrtrichtungen in ein empfängerzentriertes Koordinatensystem umgerechnet. Dadurch wird die Darstellung der mathematischen Herleitung der Distanzfunktionen vereinfacht, ohne die Ansätze und Ergebnisse zu verfälschen. Außerdem wird eine verständliche grafische Darstellung für die Evaluation ermöglicht [430].

Die Koordinatentransformation erfolgt so, dass sich das Empfängerfahrzeug stets im Koordinatenursprung befindet und sich die sendenden Fahrzeuge von rechts nach links bewegen. Abbildung 6.1 stellt dies dar.

Dazu wird der relative Bewegungsvektor  $\mathbf{v}_{\text{rel}} = \mathbf{v}_S - \mathbf{v}_E$  berechnet. Die relative Fahrtrichtung  $\psi_{\text{rel}}$  wird dann durch  $\psi_{\text{rel}} = \text{acos}\left(\frac{v_{\text{rel}}}{|\mathbf{v}_{\text{rel}}|}\right)$  berechnet. Die relative Position des Senders zum Empfänger wird um  $\psi_{\text{rel}}$  mit Hilfe einer Rotationsmatrix gedreht, um die finale relative Position im neuen Koordinatensystem zu erhalten:

$$\mathbf{p}_S^{\text{rel}} = \begin{pmatrix} \cos(\psi_{\text{rel}}) & -\sin(\psi_{\text{rel}}) \\ \sin(\psi_{\text{rel}}) & \cos(\psi_{\text{rel}}) \end{pmatrix} \cdot (\mathbf{p}_S - \mathbf{p}_E) = \begin{pmatrix} x^{\text{rel}} \\ y^{\text{rel}} \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

### 6.2.2 Konstante Bewegung

Der erste Ansatz ist, die Bewegung von Sender und Empfänger als statisch anzunehmen. Das bedeutet, dass sich beide Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit und gleicher Fahrtrichtung weiterbewegen.

Damit ergibt sich für die konstante Bewegung die Distanzfunktion



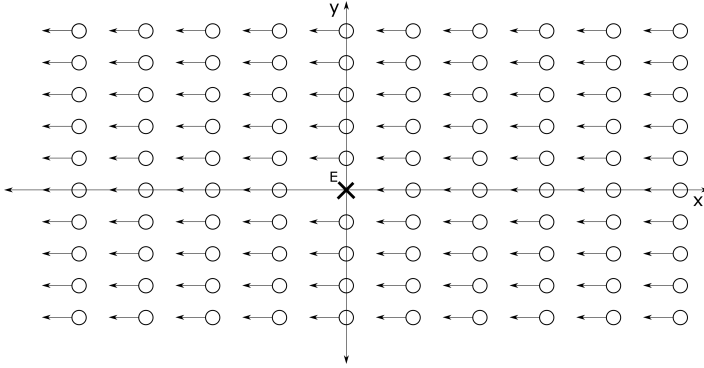


Abbildung 6.1: Die Koordinatentransformation erfolgt so, dass der Empfänger im Ursprung des Koordinatensystems fixiert ist, während sich die Sender von rechts nach links bewegen.

$$d(S, E, t) = \left| \mathbf{ps}^{\text{rel}} + (t - t_{\text{now}}) \cdot \begin{pmatrix} |\mathbf{v}^{\text{rel}}| \\ 0 \end{pmatrix} \right|. \quad (6.8)$$

Aufgrund der Form dieser Distanzfunktion lässt sich die gesamte Relevanzfunktion 6.5, also die Maximierung der Formel 6.4 effizient berechnen. Dabei ist wie folgt vorzugehen. Wenn die euklidische Distanz zwischen Sender und Empfänger schon zum Zeitpunkt der Relevanzschätzung  $t_{\text{now}}$  kleiner als  $d_{\text{min}}$  ist, dann ist die Relevanz der Nachricht offensichtlich maximal, also  $R_{\text{max}}$ . Andernfalls muss das Maximum von Formel 6.4 innerhalb des Zeitintervalls  $[t_{\text{now}}, t_{\text{now}} + T_{\text{max}}]$  bestimmt werden. Es gibt eine Menge  $\mathcal{T}$  von möglichen Zeitpunkten, bei denen das der Fall sein kann. Abbildung 6.2 skizziert beispielhaft die Lage dieser Zeitpunkte. Sie werden wie folgt bestimmt.

- Ein erster trivialer Zeitpunkt ist der Beginn des Intervalls  $t_{\text{now}}$ .
- Falls innerhalb des Intervalls  $[t_{\text{now}}, t_{\text{now}} + T_{\text{max}}]$  die Distanz  $d_{\text{min}}$  unterschritten wird, dann ist der entsprechende Zeitpunkt  $t_{d_{\text{min}}}$  Teil von  $\mathcal{T}$ .

## 6 Relevanzschätzung

Die beiden möglichen Ergebnisse für  $t_{d_{\min}}$  berechnen sich nach der Formel

$$t_{d_{\min}}^{1,2} = t_{\text{now}} \pm \frac{\sqrt{-4\delta(\beta + d_{\min}^2) + \chi^2} - \chi}{2\delta}, \quad (6.9)$$

wobei die Hilfsvariablen

$$\beta = (x^{\text{rel}})^2 + (y^{\text{rel}})^2 \quad (6.10)$$

$$\chi = 2 \cdot x^{\text{rel}} \cdot |\mathbf{v}_{\text{rel}}| \quad (6.11)$$

$$\delta = |\mathbf{v}_{\text{rel}}|^2 \quad (6.12)$$

verwendet werden. Für  $t_{d_{\min}}$  wird der kleinere Wert von  $t_{d_{\min}}^{1,2}$  verwendet, falls er innerhalb des Intervalls  $[t_{\text{now}}, t_{\text{now}} + T_{\text{max}}]$  liegt. Anderenfalls ist das Ende des Intervalls,  $t_{\text{now}} + T_{\text{max}}$ , in  $\mathcal{T}$  aufzunehmen.

- Außerdem können bis zu zwei lokale Relevanz-Maxima innerhalb des Intervalls auftreten, die Teil von  $\mathcal{T}$  sind. Sie werden im Folgenden als  $t_{\text{inside}}^{1,2}$  bezeichnet.

Da  $d(S, E, t_{\text{now}}) > d_{\min}$  gilt, kann die Distanz nicht vor  $t_{d_{\min}}$  kleiner als  $d_{\min}$  werden. Daher sind Extremwerte von  $R(S, E, t)$  innerhalb des Intervalls  $[t_{\text{now}}, t_{d_{\min}}]$  auch Extremwerte der inversen Funktion  $f(t) = \frac{\max(d(S, E, t), d_{\min})}{m} \cdot \left(1 + \frac{t - t_{\text{now}}}{s}\right)^\theta$ . Nullstellen der Ableitung von  $f(t)$  lassen sich nach

$$t_{\text{inside}}^{1,2} = t_{\text{now}} - \frac{\chi + 2\theta\chi + 2\delta}{4\delta(1 + \theta)} \pm \frac{\sqrt{(2\theta\chi + \chi + 2\delta)^2 - 8\delta(\theta + 1)(2\theta\beta + \chi)}}{4\delta(1 + \theta)}. \quad (6.13)$$

berechnen, wobei für ihre Existenz die Diskriminante der Formel 6.13 betrachtet werden muss.

Für alle Zeitpunkte in  $\mathcal{T}$  müssen die Ergebnisse der Relevanzfunktion aus 6.5 berechnet werden. Der Relevanzwert ist das Maximum dieser Ergebnisse.

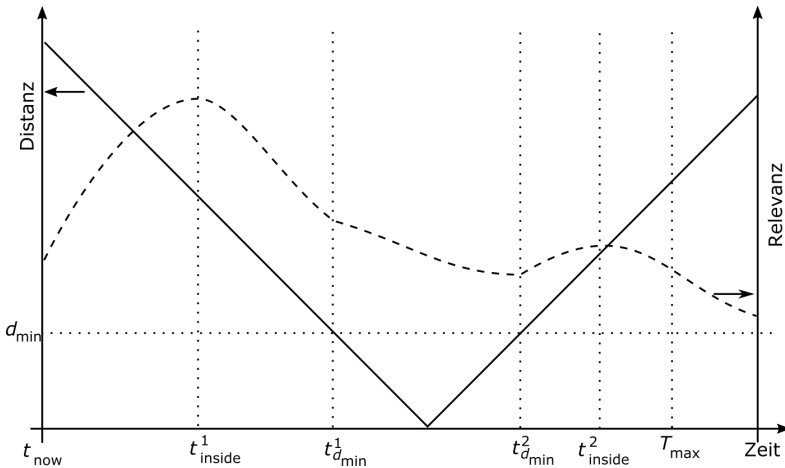


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Zeitpunkte, an denen der Relevanzwert (gestrichelte Linie) potenziell maximal sein kann. Der zeitliche Verlauf der extrapolierten Distanz von Sender und Empfänger (durchgezogene Linie) spielt dabei eine zentrale Rolle.

Der Relevanzwert kann mit den vorgenannten Formeln also sehr effizient berechnet werden. Die Qualität der Relevanzschätzung, die mit der Annahme konstanter Bewegung erreicht wird, hängt im Wesentlichen vom Straßennetz und dem Prädiktionszeitraum  $T_{\text{max}}$  ab. Je gerader die Fahrtstrecke und je kürzer  $T_{\text{max}}$ , desto eher entspricht Ergebnis der Bewegungsextrapolation der realen Bewegung des Senders einer Nachricht.

### 6.2.3 Dynamische Bewegung

Eine Distanzfunktion, welcher eine dynamische Bewegung zugrunde liegt, kann die Dynamik des Straßenverkehrs besser in die Relevanzschätzung einbeziehen. In diesem Abschnitt werden zunächst die Motivation zu dieser Erweiterung dargelegt und prinzipielle Gestaltungsmöglichkeiten dis-

kutiert. Anschließend werden dynamische Änderungen der Fahrtrichtung und der Geschwindigkeit in die Distanzfunktion integriert.

### 6.2.3.1 Motivation und Gestaltung

Bei der konstanten Extrapolation der Fahrzeugbewegungen stellt die Annahme, dass sich Fahrtrichtung und Geschwindigkeit nicht verändern, unter Umständen eine starke Vereinfachung dar. Es gibt viele denkbare Szenarien, in denen sich diese Werte dynamisch verändern. Daraus ergeben sich auch Auswirkungen auf die Relevanzschätzung von Fahrzeugen.

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht die Auswirkungen des konstanten Extrapolationsansatzes. Wenn zwei Fahrzeuge aus 300 m Abstand aufeinander zufahren, dann hängt die Ausgabe der Relevanzschätzung mit konstanter Bewegung maßgeblich davon ab, ob die Fahrtrichtungen genau in Richtung des jeweils anderen Fahrzeugs zeigen. Wenn das der Fall ist, ist die Relevanz hoch. Ist dies nicht der Fall, ist die Relevanz gering, obwohl sich die Fahrtrichtung ändern könnte. Auch das Gegenteil ist denkbar. Wenn beide Fahrzeuge ursprünglich direkt aufeinander zufahren, erhalten sie hohe Relevanzwerte. Die Straßenführung kann aber dazu führen, dass sich beide Fahrzeuge später gar nicht begegnen.

Daraus erwächst die Frage, welche Bewegungsänderungen in einem erweiterten dynamischen Modell zu berücksichtigen sind. Ohne Kenntnis der Straßenführung und der Absichten der Fahrer sind sowohl eine konstante Bewegung, eine Kollisionsbewegung als auch eine ausweichende Bewegung beider Fahrzeuge denkbar.

Ein möglicher Ansatz wäre die Nutzung von Algorithmen zur Situationsauswertung. Dieser Forschungszweig hat in den vergangenen Jahren mit der Zusammenführung von Radar und Bildverarbeitung zur Kollisionsvermeidung und -verminderung große Fortschritte erzielt [412, 413]. Hier wird auf der Basis möglichst vieler Sensordaten untersucht, welche Pfade das eigene Fahrzeug und ein Unfallgegner wahrscheinlich fahren werden und durch welche Reaktionen – Bremsen, Lenken, Beschleunigen – sich eine Kollision vermeiden oder abmildern lässt. Die Übertragbarkeit auf eine Relevanzschätzung ist jedoch nicht gegeben. Die heute üblichen Verfahren zur Situationsauswertung benötigen sehr viele Sensordaten, die teilweise nicht in den CAMs verfügbar sind, die Perspektive ist auf den Bereich weniger Meter direkt vor dem eigenen Fahrzeug beschränkt und die Rechenleistung, die für die verwendeten Algorithmen verwendet wird,

ist sehr hoch.

Um einer Lösung näher zu kommen, wird daher der Nutzen der Relevanzschätzung für die Applikationen betrachtet. Für die Einordnung der Relevanz einer Nachricht gibt es zwei Möglichkeiten – neben der korrekten Relevanzschätzung.

- **Relevanz unterschätzt:** Wird die Relevanz einer Nachricht fälschlicherweise zu gering bewertet, könnte es sein, dass sie bei hohem Nachrichtenaufkommen spät verarbeitet wird oder sogar komplett verworfen wird. Besonders in letzterem Fall ist die Nachricht dann in der vorgeschlagenen Architektur unwiederbringlich verloren, die Anwendungen haben keinen Zugriff mehr darauf.
- **Relevanz überschätzt:** Für den Fall, dass die Relevanz einer Nachricht höher bewertet wird, als sie wirklich ist, wird diese Nachricht fälschlicherweise eher verarbeitet. Die Anwendungen, die diese Nachricht dann verarbeiten, werden diese Nachricht in der Regel noch einmal eingehender auf ihren Inhalt prüfen. Wurde die Relevanz signifikant falsch eingeschätzt, dann verursacht diese Nachricht entsprechend mehr Rechenlast bei den Anwendungen, kann von letzteren aber schlussendlich verworfen werden. Eine zu hohe Relevanz kann also durch die Anwendungen korrigiert werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Nachricht mit überschätztem Relevanzwert andere, korrekt bewertete Nachrichten verdrängen könnte.

Betrachtet man beide Optionen, dann erscheint eine Relevanzschätzung, die die Relevanz von Nachrichten tendenziell zu hoch bewertet, besser geeignet als der gegenteilige Fall.

### 6.2.3.2 Fahrtrichtungsänderungen

Ein erster Ansatz für ein dynamisches Bewegungsmodell sind Veränderungen in der Fahrtrichtung. Dabei wird die Grundidee verfolgt, dass sich ein Sender immer möglichst auf den Empfänger zubewegt und sich dazu auf einer kreisförmigen Trajektorie bewegt. In diesem Bewegungsmodell ändert sich die Fahrtrichtung entsprechend kontinuierlich. Umgangssprachlich könnte man auch sagen, dass der Empfänger den Sender wie ein Magnet „anzieht“. In Abbildung 6.3 wird dieser Ansatz grafisch dargestellt. Der Sender  $S_{\text{right}}$  befindet sich rechts vom Empfänger, während sich ein anderer Sender  $S_{\text{left}}$  links vom Empfänger befindet. Anfangs bewegen sich

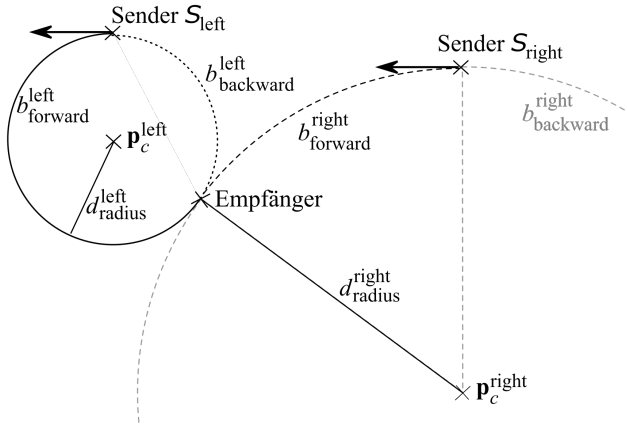


Abbildung 6.3: Kreisförmige Bewegung von sendenden Fahrzeugen in Richtung des Empfängers. Die dargestellten Bewegungen sind relativ zur Empfängerposition.

beide entsprechend der Koordinatentransformation horizontal von rechts nach links. Dennoch bewegen sich beide Sender auf kreisförmigen Bahnen auf den Sender zu.

Grundsätzlich sind zwei Richtungen auf der Kreisbahn möglich. Die Sender können sich mit ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit weiterbewegen, womit sie sich auf den Kreisbögen  $b_{\text{forward}}^{\text{left}}$  bzw.  $b_{\text{forward}}^{\text{right}}$  bewegen. Alternativ könnten sie auch ihre Geschwindigkeit verringern oder gar rückwärts fahren. Damit könnten sie den Empfänger auf den Kreisbögen  $b_{\text{backward}}^{\text{left}}$  bzw.  $b_{\text{backward}}^{\text{right}}$  erreichen. Im Folgenden werden Formeln für rechts vom Empfänger befindliche Sender hergeleitet ( $x^{\text{rel}} > 0$ ), die sich vorwärts auf den Empfänger zubewegen. Analog lassen sich Formeln für links befindliche Sender und rückwärts fahrende Sender bestimmen.

Die Positionen von Sender und Empfänger und die initiale Fahrtrichtung – im relativen Koordinatensystem horizontal von rechts nach links – definieren einen Kreis. Dessen Mittelpunkt hat die Koordinaten

$$\mathbf{p}_c = \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{x^{\text{rel}}}{y^{\text{rel}}} \cdot \frac{(x^{\text{rel}})^2 - (y^{\text{rel}})^2}{y^{\text{rel}}} \right). \quad (6.14)$$

Der Radius  $d_{\text{radius}}$  dieses Kreises wird durch

$$d_{\text{radius}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x^{\text{rel}})^2 - (y^{\text{rel}})^2}{y^{\text{rel}}} \quad (6.15)$$

berechnet. Die Länge des Kreisbogens  $b_{\text{forward}}^{\text{right}}$  wird mit der Formel

$$b_{\text{forward}}^{\text{right}} = 2 \cdot d_{\text{radius}} \cdot \arcsin \left( \frac{|\mathbf{p}_c^{\text{rel}}|}{2 \cdot d_{\text{radius}}} \right) \quad (6.16)$$

bestimmt. Entsprechend kann auch der Kreisbogen  $b_{\text{backward}}^{\text{right}}$  berechnet werden.

Das kreisförmige Bewegungsmodell berücksichtigt bisher noch nicht den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Kurvenradius [431]. Es ist offensichtlich, dass bei höheren Geschwindigkeiten die möglichen Kurvenradien durch physikalische Grenzen limitiert sind. Unter Berücksichtigung der Zentrifugalkraft darf der Kurvenradius bei einer spezifischen Geschwindigkeit  $v_S$  nicht niedriger sein als

$$d_{\text{radius}}^{\text{min}}(v_S) = \frac{v_S^2}{g \cdot \nu}, \quad (6.17)$$

wobei  $g$  die Gravitationskonstante und  $\nu$  den Reibwert angeben [432].

Wenn nun ein Sender aufgrund seiner zu hohen Geschwindigkeit einen Empfänger aufgrund dieser physikalischen Grenzen gar nicht erreichen kann, können die oben abgeleiteten Kreisbögen nicht verwendet werden. In diesem Fall wird angenommen, dass die Fahrzeuge einen Kreisbogen mit dem minimalen Kurvenradius  $d_{\text{radius}}^{\text{min}}$  nach Formel 6.17 zurücklegen. Damit kann der Empfänger nicht erreicht werden. In diesem Fall verwenden wir die Luftliniendistanz zwischen Sender und Empfänger als Distanzmaß:

$$d_{\text{straight}}^{\text{circular}}(S, E, d_{\text{radius}}, t, \mathbf{v}_{\text{rel}}) = \left| \left( \begin{array}{l} x^{\text{rel}} - \sin \left( \frac{|\mathbf{v}_{\text{rel}}|}{d_{\text{radius}}^{\text{lim}}} t \right) \cdot d_{\text{radius}}^{\text{lim}} \\ y^{\text{rel}} - \cos \left( \frac{|\mathbf{v}_{\text{rel}}|}{d_{\text{radius}}^{\text{lim}}} t \right) \cdot d_{\text{radius}}^{\text{lim}} \end{array} \right) \right| \quad (6.18)$$

## 6 Relevanzschätzung

mit dem limitierten Kurvenradius  $d_{\text{radius}}^{\text{lim}}$ , welcher sich nach

$$d_{\text{radius}}^{\text{lim}} = \max(d_{\text{radius}}, d_{\text{radius}}^{\text{min}}(|v_S|)) \quad (6.19)$$

berechnet.

### 6.2.3.3 Beschleunigungen

Die zweite Bewegungskomponente neben der Fahrtrichtung ist die Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die im konstanten Bewegungsansatz als konstant angenommen wurde. Dadurch werden Beschleunigungen oder Bremsungen des Senders nach dem Versand der Nachricht nicht berücksichtigt. Entsprechende Aktionen haben unter Umständen jedoch einen hohen Einfluss auf die Relevanz. Fährt der Sender auf den Empfänger zu, erreicht er sein Ziel durch eine Beschleunigung früher, wodurch die Relevanz signifikant steigen kann.

In diesem Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, der durch Beschleunigungen die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs modifiziert. Dazu werden positive und negative Beschleunigungen in der Distanzfunktion  $d(S, E, t)$  berücksichtigt. In einem ersten Ansatz wird eine konstante Beschleunigung eingeführt, anschließend werden auch geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungen ermöglicht.

Eine konstante Beschleunigung stellt eine einfache Erweiterung der ursprünglichen Distanzfunktion dar. Damit ist eine „worst-case“-Beschleunigung  $a_{\text{max}}$  darstellbar. Entsprechende Werte können empirischen Studien wie [433] entnommen werden. Dies kann in die Formel 6.18 durch die Ersetzung des Terms  $|v_{\text{rel}}|$  durch den Term  $|v_{\text{rel}}| + \frac{1}{2} \cdot a_{\text{max}} \cdot t$  umgesetzt werden. Da der minimale Kurvenradius nun von einer variablen Geschwindigkeit abhängt, wählen wir für die Bestimmung die maximale Geschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  im Zeitintervall  $[t_{\text{now}}, t_{\text{now}} + T_{\text{max}}]$ . Damit ergibt sich die Distanzfunktion

$$d_{\text{straight}}^{\text{const. acc.}}(S, E, t) = \left| \begin{pmatrix} x^{\text{rel}} - \sin\left(\frac{|v_{\text{rel}}| + \frac{1}{2} \cdot a_{\text{max}} \cdot t}{d_{\text{radius}}^{\text{lim}}} \cdot t\right) \cdot d_{\text{radius}}^{\text{lim}} \\ y^{\text{rel}} - \cos\left(\frac{|v_{\text{rel}}| + \frac{1}{2} \cdot a_{\text{max}} \cdot t}{d_{\text{radius}}^{\text{lim}}} \cdot t\right) \cdot d_{\text{radius}}^{\text{lim}} \end{pmatrix} \right|. \quad (6.20)$$

Die Vereinfachung, konstante Beschleunigungen anzunehmen, berücksichtigt jedoch nicht die aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten und führt



zu unrealistischen Geschwindigkeitsänderungen. In der Realität basiert die maximale Beschleunigung auf der jeweils aktuellen Geschwindigkeit.

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, der eine Relevanzschätzung basierend auf geschwindigkeitsabhängigen Beschleunigungen vornimmt. Er wird in Algorithmus 1 dargestellt und lässt sich in drei Schritte gliedern. Zuerst wird die maximale Geschwindigkeit des sendenden Fahrzeugs im Betrachtungszeitraum ermittelt. Im zweiten Schritt wird geprüft, ob der minimale Kurvenradius bei dieser Geschwindigkeit unterschritten wird. Im dritten und letzten Schritt wird iterativ die Bewegung extrapoliert und zu jedem Zeitschritt ein Relevanzwert bestimmt. Der maximale Relevanzwert im betrachteten Zeitintervall ist der gesuchte Relevanzwert.

**6.2.3.3.1 Schritt 1: Bestimmung der maximalen Sender-Geschwindigkeit (Zeilen 1–8).** Zuerst wird die maximale Geschwindigkeit des Senders  $v_{\max}$  im Intervall  $[t_{\text{now}}, t_{\text{now}} + T_{\max}]$  mit Zeitschritten der Länge  $\Delta t$  bestimmt.

Dazu wird die Geschwindigkeitsvariable  $v$  initial auf die Sendergeschwindigkeit  $v_S$  gesetzt. Für jeden Zeitschritt wird die aktuelle Beschleunigung  $a$  mit der Funktion  $a(v)$  aus einer Tabelle entsprechend der aktuellen Geschwindigkeit ausgelesen. Aufgrund der Realisierung der Funktion  $a(v)$  ergibt sich so im letzten Zeitschritt die gesuchte maximale Geschwindigkeit  $v_{\max}$ .

Die Tabellen 6.1 und 6.2 dienen zur Bestimmung der Beschleunigung für positive und negative Geschwindigkeiten. Die Werte entstammen empirischen Studien [433]. Je höher die Geschwindigkeiten, desto geringer sind die maximal möglichen Beschleunigungen. Bremsungen können in Form von Vollbremsungen sehr stark ausfallen, während Rückwärtsfahrten nur sehr langsam vonstatten gehen.

**6.2.3.3.2 Schritt 2: Prüfung des minimalen Kurvenradius' (Zeilen 9–11).** Die soeben bestimmte maximale Geschwindigkeit  $v_{\max}$  wird in Formel 6.17 eingesetzt, um festzustellen, ob ein Kurvenradius zu Erreichung des Empfängers für den Sender möglich ist. Ist das nicht der Fall, ersetzt  $d_{\text{radius}}^{\min}$  den Radius  $d_{\text{radius}}$  in den folgenden Berechnungen.

**6.2.3.3.3 Schritt 3: Maximierung des Relevanzwertes (Zeilen 12–18).** Der Relevanzwert wird iterativ bestimmt. Für jeden Zeitschritt wird zuerst die Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Damit wird

---

**Algorithmus 1** : Iterative Berechnung des Relevanzwertes  $R$ .
 

---

**Ausgabe** : Kurvenradius  $d_{\text{radius}}$ , Sendergeschwindigkeit  $v_S$ ,  
 Startzeitpunkt  $t_{\text{now}}$ , Extrapolationszeit  $T_{\text{max}}$ , Dauer  
 eines Zeitschritts  $\Delta t$ , Mindestdistanz  $d_{\text{min}}$ , Zeitexponent  
 $\theta$ , Sender  $S$  und Empfänger  $E$

// Schritt 1: Bestimme die maximale Geschwindigkeit  $v_{\text{max}}$

```

1  $v \leftarrow v_S$ ; // Initiale Geschwindigkeit
2  $t \leftarrow t_{\text{now}}$ ;
3 repeat
4    $a \leftarrow a(v)$ ; // Hole die Beschleunigung aus Tabelle 6.1
5    $v \leftarrow v + \Delta t \cdot a$ ; // Berechne die neue Geschwindigkeit
6    $t \leftarrow t + \Delta t$ ;
7 until  $t > t_{\text{now}} + T_{\text{max}}$ ;
8  $v_{\text{max}} \leftarrow v$ ;
   // Schritt 2: Ist  $r$  kleiner als  $d_{\text{radius}}^{\text{min}}$ ?
9 if  $r < d_{\text{radius}}^{\text{min}}(v_{\text{max}})$  then
10   $r \leftarrow d_{\text{radius}}^{\text{min}}(v_{\text{max}})$ ; // Verwende den minimalen Kurvenradius
11 end
   // Schritt 3: Berechne den Relevanzwert  $R$  iterativ
12  $R \leftarrow -\infty$ ;
13  $t \leftarrow t_{\text{now}}$ ;
14 repeat
15   $d \leftarrow d_{\text{straight}}^{\text{circular}}(S, E, d_{\text{radius}}, t, v)$ ; // Berechne die Entfernung
    von Sender und Empfänger
16   $R \leftarrow \max\left(R, \frac{m}{\max(d, d_{\text{min}})} \cdot \frac{1}{(1+\frac{t}{s})^\theta}\right)$ ; // Bestimme das bisherige
    Maximum
17   $t \leftarrow t + \Delta t$ ;
18 until  $t > t_{\text{now}} + T_{\text{max}}$ ;
Eingabe : Relevanzwert  $R$ 

```

---

Geschwindigkeit	Beschleunigung
$0 < v \leq 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$3.79 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}^*$
$60 \frac{\text{km}}{\text{h}} < v \leq 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$3.42 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}^*$
$80 \frac{\text{km}}{\text{h}} < v \leq 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$2.83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}^*$
$100 \frac{\text{km}}{\text{h}} < v \leq 120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$2.43 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}^*$
$120 \frac{\text{km}}{\text{h}} < v$	$1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Tabelle 6.1: Verwendete Beschleunigungswerte (\* entnommen aus [40]).

Geschwindigkeit	Beschleunigung
$0 < v$	$10.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}^*$
$-10 \frac{\text{km}}{\text{h}} < v \leq 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$v \leq -10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Tabelle 6.2: Verwendete Verzögerungswerte (Bremsungen und Rückwärtsfahren) (\* entnommen aus [40]).

## 6 Relevanzschätzung

der Relevanzwert für den jeweiligen Zeitschritt errechnet. Der resultierende Relevanzwert  $R$  ist eine Abschätzung der Formel 6.5 mit der Distanzfunktion  $d_{\text{straight}}^{\text{circular}}(S, E, t)$ .

### 6.2.3.4 Umsetzung per Kennfeld

Die iterative Bestimmung des Relevanzwertes mit dynamischer Bewegung ist mit signifikant höherer Rechenzeit im Vergleich zur konstanten Bewegung verbunden. Wie die Messung der Laufzeit in der Implementierung in Abschnitt 6.4.3 zeigt, ist die Laufzeit um etwa das 20-fache höher.

Falls die verfügbaren Ressourcen eine solche Laufzeit nicht ermöglichen, könnte die Verwendung eines Kennfeldes Abhilfe schaffen. Dazu werden die Eingangsgrößen Relativposition  $x^{\text{rel}}$  und  $y^{\text{rel}}$ , relative Geschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  und Geschwindigkeit des Senders  $v_S$  in festgelegten Wertebereichen und Schritten variiert und alle Ergebnisse abgespeichert. Je nach Wertebereich, Schrittgröße und Speicherplatz eines Ergebnisses ist dafür allerdings viel Speicher vorzusehen. Sieht man für alle vier Eingangsgrößen jeweils 100 mögliche Eingangswerte vor und verwendet man für die Ergebnisse `float`-Variablen (4 Byte), so ergeben sich in Summe  $100^4 \cdot 4 \text{ Byte} \approx 381 \text{ Mbyte}$  an Speicherbedarf. Durch die Ausnutzung der Symmetrie – positive und negative Relativpositionen in Y-Richtung führen zu den identischen Ergebnissen – und einer größeren Schrittweite kann der Speicherbedarf unter 100 MByte gesenkt werden.

Beim Einsatz mit echten Eingangsgrößen können durch Extraktion der entsprechenden Werte aus dem Kennfeld und Interpolationsverfahren in wenigen Schritten die Relevanzwerte näherungsweise bestimmt werden [434].

## 6.3 Kritik

Der vorgestellte Ansatz führt nicht zwangsläufig zum schnellsten Pfad vom Sender zum Empfänger. Dies kann daher in zu geringen Relevanzwerten resultieren. In Abbildung 6.4 wird ein solcher Fall dargestellt. Der in den vorherigen Abschnitten erläuterte Ansatz deckt Bewegungen auf der durchgezogenen bzw. gestrichelten Kreisbahn ab. Ein Sender könnte sich allerdings auch auf dem gepunkteten Pfad bewegen, in dem er zuerst mit geringer Geschwindigkeit auf den Empfänger einschwenkt und diesem dann mit hoher Geschwindigkeit entgegenfährt. Abhängig von den initia-

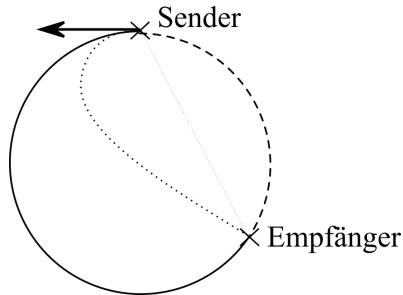


Abbildung 6.4: Der kreisförmige Pfad ist nicht unbedingt der schnellste Weg für den Sender, um den Empfänger zu erreichen. Der gepunktete Pfad könnte zum Beispiel schneller zurückgelegt werden.

---

len Positions- und Bewegungsparametern und unbekanntem Rahmenbedingungen wie dem Straßenverlauf könnte dieser Pfad zu höheren Relevanzwerten führen.

Auch die Annahme, dass die Fahrzeuge den Kurvenradius entsprechend der höchsten Geschwindigkeit in einem Beschleunigungsvorgang auslegen, wird nicht immer erfüllt. So könnte ein Fahrzeug den Kurvenradius seiner Geschwindigkeit jeweils direkt anpassen. Bei geringer Geschwindigkeit ist der Kurvenradius gering, während die gefahrene Kurve bei höheren Geschwindigkeiten weiter wird.

Es werden keine sich ändernden minimalen Kurvenradien angenommen, obwohl dies aufgrund der sich verändernden Geschwindigkeiten möglich wäre. Damit wären aber verschiedene Pfade zur Kollision von Sender und Empfänger möglich. Es ergibt sich daraus ein Optimierungsproblem, das für den Einsatzzweck der Relevanzschätzung zu ineffizient zu lösen ist.

Eine weitere Unzulänglichkeit des gewählten Ansatzes ist, dass Veränderungen der Bewegungen des Empfängers nicht berücksichtigt werden. Solche Veränderungen können allerdings ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Relevanz von Nachrichten haben. Als Beispiel stelle man sich vor, dass ein sendendes Fahrzeug dem Empfänger bei etwa  $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  folgt. Während der Sender bei dieser Geschwindigkeit einen Auffahrunfall bei

normaler Motorisierung nur mit geringer Beschleunigung und eher mit Vorsatz verursachen könnte, könnte der Empfänger durch eine unbedachte Bremsung schnell einen Auffahrunfall provozieren.

### 6.4 Evaluation

Die in dieser Arbeit entwickelten Relevanzfunktionen müssen in mehrfacher Hinsicht auf ihre Eignung für Seriensysteme in Fahrzeugen untersucht werden. Dazu werden in diesem Kapitel verschiedene Evaluationsmethoden angewandt, um die Vor- und Nachteile der jeweiligen Ansätze zu identifizieren.

Folgende Methoden werden hierfür angewandt. Zunächst werden die vorgeschlagenen Funktionen einer grafischen Analyse unterzogen. Hierfür werden für ausgewählte Parameterkonfigurationen die resultierenden Relevanzwerte dargestellt. Im nächsten Evaluationsschritt wird die Qualität der Funktionen untersucht. Zu diesem Zweck wird eine Ground Truth definiert, mit der die Ergebnisse der Funktionen verglichen werden. Zuletzt wird die Effizienz der Funktionen hinsichtlich ihrer Laufzeiten bestimmt, wofür alle Funktionen prototypisch in einer realistischen Hardwareumgebung implementiert werden.

#### 6.4.1 Grafische Analyse

In diesem Abschnitt werden die vorgeschlagene Relevanzfunktion und die Distanzfunktionen mit konstanter und dynamischer Bewegungsextrapolation grafisch analysiert. Dazu wird der Einfluss der Positionen von Sender und Empfänger sowie deren Geschwindigkeit auf den Relevanzwert dargestellt. Dabei werden die verwendeten Parameter variiert.

Grundlage der grafischen Darstellung ist eine empfängerzentrierte Analyse. Dazu wird der Empfänger entsprechend Abschnitt 6.2.1 im Ursprung des Koordinatensystems fixiert. Alle Punkte des durch die X- und Y-Achse aufgespannten Koordinatensystems entsprechen Positionen von Sendern. Diese Sender bewegen sich definitionsgemäß immer mit einer initialen Geschwindigkeit von rechts nach links. Damit können wir für alle Punkte des Koordinatensystems bestimmen, welche Relevanzwerte den dort befindlichen Sendern zugewiesen würden [430]. Jedes Sender-Empfänger-Paar kann in diese Position transformiert werden, ohne dass Position und Geschwindigkeit verfälscht werden.

Jede der resultierenden Grafiken ist zweigeteilt. In der oberen Grafik werden die Relevanzwerte für Sender an den X- und Y-Koordinaten in Graustufen dargestellt. Je dunkler ein Punkt, desto höher ist die Relevanz an diesem Punkt entsprechend der Angaben in den Farbskalen. Die relative Geschwindigkeit  $\Delta v$ , mit der sich die Sender von rechts nach links bewegen, ist als Parameter zu jeder Grafik angegeben. Ergänzend wird jeweils in der unteren Grafik das Höhenprofil der Relevanzwerte entsprechend eines Schnitts entlang der X-Achse bei  $Y = 0$  dargestellt. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

#### 6.4.1.1 Konstante Bewegung

In diesem Abschnitt werden die in den Abbildungen 6.5(a)–6.5(f) dargestellten Ergebnisse für die Relevanzfunktion mit konstanter Bewegung nach Formel (6.8) diskutiert.

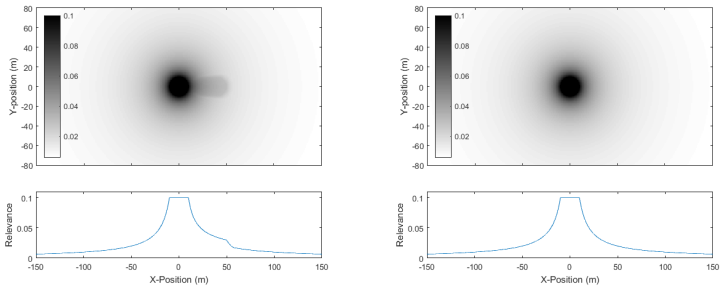
Solange nicht anders angegeben, werden die Parameter auf  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ , and  $T_{\max} = 8 \text{ s}$  gesetzt. Außerdem wird  $\theta$  so belegt, dass  $(1 + \frac{T_{\max}}{s})^{-\theta} = 0.3$  und somit  $\theta = -\frac{\ln(0.1)}{\ln(1 + \frac{T_{\max}}{s})} \approx 0.548$  gilt. Dadurch werden abrupte Übergänge für weiter entfernte Sender vermieden.

**6.4.1.1.1 Einfluss des Minimalabstands  $d_{\min}$**  Die Abbildung 6.5(b) zeigt die Ergebnisse der Relevanzfunktion für eine relative Geschwindigkeit von  $\Delta v = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Dies bedeutet, dass Sender und Empfänger entweder beide stehen oder sich mit konstantem Abstand in dieselbe Richtung bewegen. Entsprechend der Funktionsauslegung ist in diesem Fall die Relevanz innerhalb des Mindestabstands  $d_{\min}$  maximal. Außerhalb von  $d_{\min}$  verringert sich die Relevanz radial mit wachsendem Abstand.

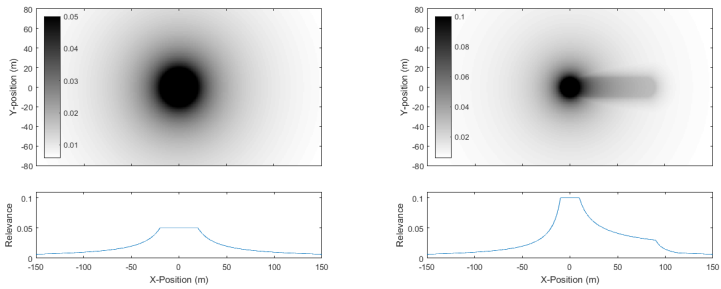
Nun vergrößern wir den Minimalabstand in Abbildung 6.5(c) von  $d_{\min} = 10 \text{ m}$  auf  $d_{\min} = 20 \text{ m}$ . Diese Änderung führt in erster Linie dazu, dass die gleichfarbige Fläche des Kreises um den Empfänger entsprechend anwächst. Gleichzeitig sinkt der maximale Relevanzwert auf 0.05 entsprechend der Relevanzfunktion ( $R_{\max} = \frac{m}{d_{\min}}$ ).

Die Wahl eines geeigneten Wertes für  $d_{\min}$  kann von mehreren Faktoren abhängig gemacht werden. So kann die Präzision der Lokalisierung geringere Abstände unter Umständen nicht auflösen. Außerdem können im Nahbereich des Empfängers bereits kleinere heftige Fahrerreaktionen fatale Auswirkungen haben. Unseren Standardwert von  $d_{\min} = 10 \text{ m}$  haben wir basierend auf Erfahrungswerten gewählt. Höhere Werte sind möglich,

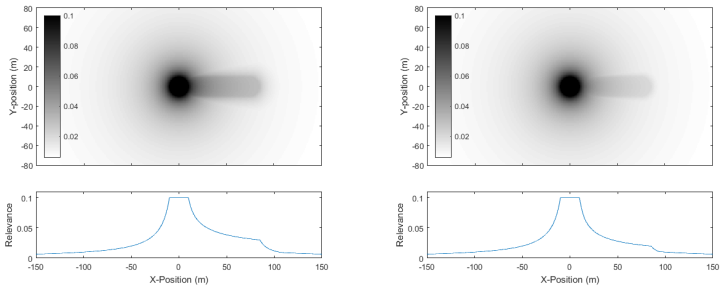
## 6 Relevanzschätzung



(a)  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 8 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.548$       (b)  $\Delta v = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 8 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.548$



(c)  $\Delta v = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 20 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 8 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.548$ , **andere Farbskala**      (d)  $\Delta v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 8 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.548$



(e)  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 15 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.548$       (f)  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $d_{\min} = 10 \text{ m}$ ,  $T_{\max} = 15 \text{ s}$ ,  $\theta = 0.5805$

Abbildung 6.5: Darstellung der Ausgabe der Relevanzfunktionen bei konstanter Bewegung für bestimmte Parameterkonfigurationen. Die oberen Grafiken enthalten die Relevanzwerte von Sendern, welche sich von rechts nach links bewegen. Der Empfänger befindet sich immer im Koordinatenursprung. Die unteren Grafiken sind Höhenprofile entlang der X-Achse.



führen aber dazu, dass sich potenziell mehr Fahrzeuge innerhalb dieses Abstands befinden, deren Nachrichten alle denselben Relevanzwert zugeordnet bekommen.

**6.4.1.1.2 Einfluss der relativen Geschwindigkeit  $\Delta v$**  In Abbildung 6.5(a) wird die relative Geschwindigkeit von  $\Delta v = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  auf den Standardwert  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  geändert. Wenn der Sender sich rechts vom Empfänger auf der X-Achse befindet, bedeutet dies eine Annäherung des Senders an den Empfänger. In der Abbildung ist ein grauer Streifen erhöhter Relevanzwerte nach rechts zu beobachten. Somit können Fahrzeuge im Bereich dieses Streifens innerhalb des Betrachtungszeitraums dem Empfänger nahe kommen, wodurch ihre Relevanzwerte erhöht sind.

Eine weitere Erhöhung der relativen Geschwindigkeit auf  $\Delta v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  wird in Abbildung 6.5(d) dargestellt. Der Streifen rechts des Ursprungs weist nun höhere Relevanzwerte auf. Je schneller sich ein Sender innerhalb dieses Streifens auf den Empfänger im Ursprung zubewegt, desto früher erreicht er die direkte Umgebung des Empfängers. Dadurch fällt der Zeitanteil in der Relevanzfunktion weniger ins Gewicht. Dies erklärt den Unterschied zwischen Abbildungen 6.5(d) und 6.5(a).

**6.4.1.1.3 Einfluss des Betrachtungszeitraums  $T_{\text{max}}$**  In Abbildung 6.5(e) wurde der Betrachtungszeitraum von  $T_{\text{max}} = 8 \text{ s}$  auf  $T_{\text{max}} = 15 \text{ s}$  verändert, alle anderen Parameter bleiben unverändert. Dadurch verlängert sich der Streifen rechts des Empfängers im Vergleich zu Abbildung 6.5(a) mit derselben Geschwindigkeit von  $\Delta v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Bei etwa 80 m auf der X-Achse befindet sich ein stärkerer Übergang zu geringeren Relevanzwerten. Unter den gewählten Parametern kann ein 80 m entfernter Sender innerhalb von 15 s den Mindestabstand des Empfängers gerade noch erreichen, wodurch die Relevanzwerte dieses Senders höher als diejenigen wenig weiter entfernter Sender sind. Die Wahl von  $T_{\text{max}}$  hängt vom Kontext der beabsichtigten Anwendungen ab. Geringe Werte für  $T_{\text{max}}$  sind für Anwendungen zur Kollisionsvermeidung sinnvoll, da dadurch nahe, sich nähernde Fahrzeuge höher gewichtet werden. Hohe  $T_{\text{max}}$ -Werte eignen sich besser für Anwendungen mit weiterem Horizont, etwa für Verkehrsstelematik und Routenoptimierung.

## 6 Relevanzschätzung

**6.4.1.1.4 Einfluss des Zeitexponenten  $\theta$**  Bisher verwendeten wir  $\theta = -\frac{\ln(0.1)}{\ln(1+\frac{T_{\max}}{s})} \approx 0.548$ . In Abbildung 6.5(f) behalten wir den veränderten Betrachtungszeitraum von  $T_{\max} = 15$  s bei und setzen  $\theta$  so, dass gilt  $(1 + \frac{T_{\max}}{s})^{-\theta} = 0.2$ . Im Vergleich zu Abbildung 6.5(e), insbesondere bei Betrachtung der Höhenprofile, ist zu erkennen, dass durch den veränderten  $\theta$ -Wert ein weniger abrupter Übergang bei ca. 80 m auf der X-Achse erzielt wird. Andererseits ist der Streifen insgesamt kaum noch vom sonstigen, radialen Verlauf zu unterscheiden. Im Ergebnis führt dies dazu, dass Fahrzeuge, welche sich auf den Empfänger zubewegen, kaum mehr mit höheren Relevanzwerten versehen werden als andere Sender.

### 6.4.1.2 Dynamische Bewegung

Für die grafische Auswertung der Relevanzfunktion mit dynamischer Bewegung nach Algorithmus 1 verwenden wir eine leicht veränderte Parameterkonfiguration. Dies rührt daher, dass durch die angenommenen Beschleunigungen innerhalb kürzerer Zeit höhere Distanzen zurückgelegt werden können. Mit der im vorhergehenden Abschnitt verwendeten Parameterkonfiguration wären einige der im Folgenden erläuterten Effekte kaum oder gar nicht erkennbar. Soweit nicht anders angegeben, verwenden wir für den Mindestabstand wiederum  $d_{\min} = 10$  m, während der Betrachtungszeitraum standardmäßig  $T_{\max} = 8$  s beträgt. Den Zeitexponenten  $\theta$  setzen wir so, dass  $(1 + \frac{T_{\max}}{s})^{-\theta} = 0.3$  gilt. Damit ergibt sich  $\theta = -\frac{\ln(0.3)}{\ln(1+\frac{T_{\max}}{s})} = 0.548$ .

Zusätzlich zu den Parametern  $d_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ,  $\theta$  und  $\Delta v$  wird nun die absolute Geschwindigkeit  $v_S$  des Senders variiert. Die Abbildungen 6.6(a)–6.6(f) zeigen die Ergebnisse, welche im Folgenden diskutiert werden.

**6.4.1.2.1 Einfluss der relativen Geschwindigkeit  $\Delta v$  und der Sendergeschwindigkeit  $v_S$**  Die Abbildung 6.6(a) stellt eine Situation dar, in der sowohl der Empfänger im Ursprung wie auch die potenziellen Sender stillstehen. Damit ist sowohl die relative Geschwindigkeit  $\Delta v = 0$  als auch für die absolute Geschwindigkeit  $v_S = 0$ . Es lassen sich mehrere Effekte identifizieren, insbesondere auch im Vergleich zu Abbildung 6.5(b) mit konstanter Bewegung. Obwohl beide Fahrzeuge zunächst stehen, führt die Beschleunigung der dynamischen Bewegung dazu, dass auch weiter entfernte Fahrzeuge in die Nähe des Empfängers gelangen können (grauer,

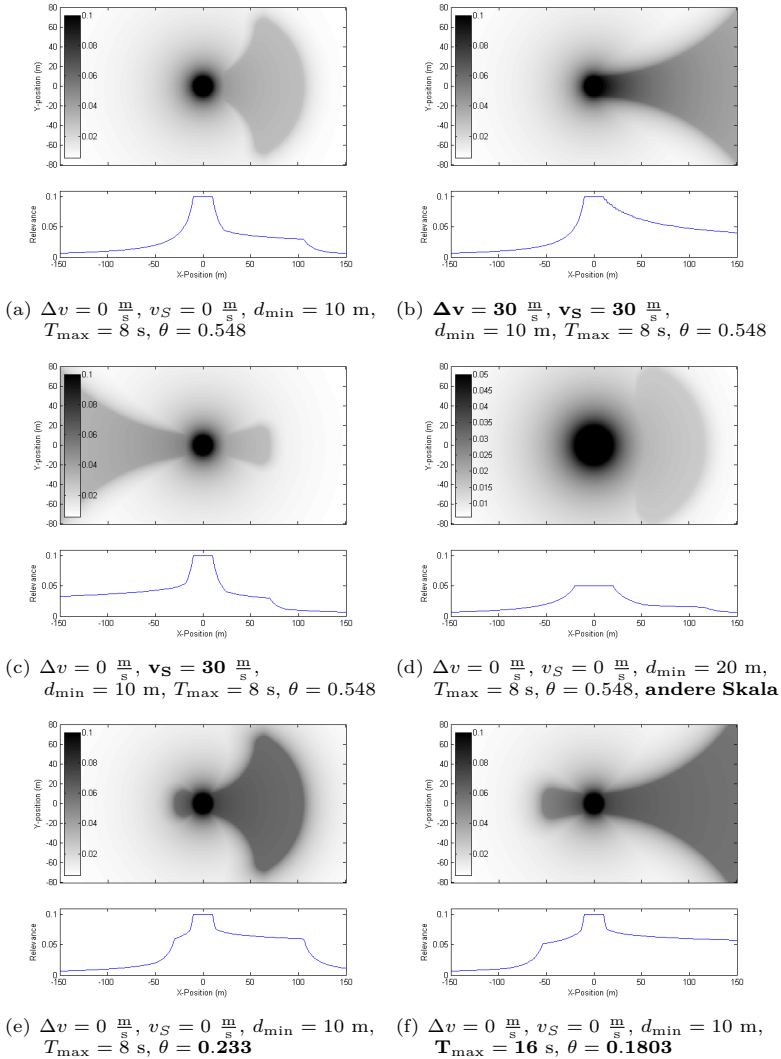


Abbildung 6.6: Darstellung der Ausgabe der Relevanzfunktionen mit dynamischer Bewegung für bestimmte Parameterkonfigurationen. Die oberen Grafiken enthalten die Relevanzwerte von Sendern, welche sich von rechts nach links bewegen. Der Empfänger befindet sich immer im Koordinatenursprung. Die unteren Grafiken sind Höhenprofile entlang der X-Achse.

## 6 Relevanzschätzung

fächerartiger Bereich). Darüber hinaus sind die Ränder des Bereichs mit mittleren Relevanzwerten gebogen. Dies resultiert aus der kreisförmigen Bewegung der Sender in Richtung des Empfängers. Gleichzeitig sind die Bereiche oberhalb und unterhalb des Empfängers durch geringe Relevanzwerte ausgezeichnet. Dies wird durch den minimalen Kurvenradius in diesem Ansatz verursacht. Sender in diesen Bereichen können unter den gegebenen physikalischen Bedingungen den Empfänger nicht erreichen, daher sind ihre Relevanzwerte gering.

In Abbildung 6.6(b) wird die Geschwindigkeit der Sender auf  $v_S = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  gesetzt, während der Empfänger weiterhin stillsteht. Damit ergibt sich ein  $\Delta v$  von ebenfalls  $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Die Grafik weist höhere Relevanzwerte rechts des Empfängers auf (grauer, trichterförmiger Bereich). Fahrzeuge in diesem Trichter erreichen durch ihre initiale Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung des Bewegungsmodells den Empfänger sehr schnell, wodurch ihre Relevanzwerte signifikant höher sind. Ebenso zeigt sich, dass sich der Trichter nach rechts verlängert. Weiter entfernte Sender können dem Empfänger nun innerhalb der vorgegebenen Zeit  $T_{\text{max}}$  nahe kommen. Zusätzlich sind die Bereiche geringer Relevanzwerte oberhalb und unterhalb des Empfängers nun breiter. Dies ist durch die höhere Geschwindigkeit der Sender bedingt, die einen höheren Mindestradius für eine Annäherung an den Empfänger benötigen.

Im Gegensatz zu Abbildung 6.6(b) bewegt sich der Empfänger in Abbildung 6.6(c) ebenfalls mit  $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , womit sich eine relative Geschwindigkeit von  $\Delta v$  von 0 ergibt. Beide Fahrzeuge fahren also zunächst mit gleicher Geschwindigkeit in die selbe Richtung. Sender rechts des Empfängers im Ursprung müssen demnach ihre Geschwindigkeit erhöhen, um in den Nahbereich des Empfängers zu gelangen. Unter den gegebenen Beschleunigungen gelingt dies nur für einen kleinen Bereich. Links des Empfängers befindet sich dagegen nun ein großer Trichter. Dies ergibt sich durch dortige, bremsende Sender. Da Bremsungen mit sehr hohen negativen Beschleunigungen realistisch sind – etwa bei Notbremsungen – können auch weiter entfernte Sender innerhalb der Betrachtungszeit durch den mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Empfänger erreicht werden.

**6.4.1.2.2 Einfluss des Mindestabstands  $d_{\text{min}}$**  Auch bei der Relevanzfunktion mit dynamischer Bewegung variieren wir den Mindestabstand zu  $d_{\text{min}} = 20 \text{ m}$ . Dies wird in Abbildung 6.6(d) dargestellt. In dieser Grafik wird die Farbskala ausnahmsweise anders belegt, um einen sonst nicht

sichtbaren Effekt zu veranschaulichen. Der maximale Relevanzwert ist 0.05, zusätzlich ergibt sich analog zu Abbildung 6.6(a) rechts des Empfängers ein hellgrauer, trichterförmiger Bereich. Dieser Bereich ist nun ebenfalls breiter.

**6.4.1.2.3 Einfluss des Zeitexponenten  $\theta$**  In Abbildung 6.6(e) wurde der Zeitexponent auf  $\theta = 0.233$  gesetzt, damit  $(1 + \frac{T_{\max}}{s})^{-\theta} = 0.6$  gilt. Dadurch ergeben sich abruptere Übergänge von hohen zu geringen Relevanzwerten im fächerförmigen Bereich. Gleichzeitig sind die Relevanzwerte dort erhöht. Im Vergleich zu Abbildung 6.6(a) ergibt sich links des Empfängers im Ursprung ein kleiner Bereich erhöhter Relevanzwerte. Dies resultiert durch Sender, die sich langsam rückwärts auf den Empfänger zubewegen. Durch den veränderten  $\theta$ -Wert tritt dieser Effekt deutlicher zutage.

**6.4.1.2.4 Einfluss des Betrachtungszeitraums  $T_{\max}$**  Zuletzt variieren wir den Betrachtungszeitraum  $T_{\max}$  zu 16 s für Abbildung 6.6(f). Damit wird der Betrachtungszeitraum im Vergleich zu den vorherigen Grafiken verdoppelt. Verglichen mit Abbildung 6.6(a) wächst der Trichter mittlerer Relevanzwerte nach rechts, während gleichzeitig die Bereiche geringer Relevanzwerte oberhalb und unterhalb des Empfängers anwachsen. Der letztere Effekt rührt daher, dass unser Ansatz zur dynamischen Bewegung als Grundlage für den Mindestkurvenradius die Geschwindigkeit nach der Beschleunigung über ganz  $T_{\max}$  verwendet. Je länger  $T_{\max}$  ist, desto länger können die Fahrzeuge beschleunigen, was im Ergebnis zu einer hohen Endgeschwindigkeit und einem entsprechend hohen Mindestkurvenradius führt.

## 6.4.2 Qualität

In diesem Abschnitt wird die Qualität der Relevanzfunktion und ihren Distanzfunktionen bewertet. Diese Bewertung führen wir anhand eines Vergleichs der Ergebnisse der Relevanzfunktion mit einer Ground Truth durch. Diese Ground Truth repräsentiert eine ideale Relevanzfunktion, die die Relevanz jeder Nachricht korrekt bestimmt und keine Vorhersagen oder vereinfachenden Annahmen trifft. Realisieren lässt sich diese Ground Truth dadurch, dass mit Hilfe von gespeicherten Fahrzeugbewegungsdaten

für jede Nachricht die zukünftige Bewegung der sendenden bzw. empfangenden Fahrzeuge bekannt ist.

### 6.4.2.1 Verwendete Szenarien

In diesem Abschnitt werden zwei Straßenverkehrsszenarien verwendet, um die Distanzfunktionen sowohl für einen anwendungsspezifischen Fall als auch in allgemeinem Verkehr analysieren zu können. Zunächst analysieren wir ein anwendungsspezifisches, künstliches Kurvenszenario. Wie zu Beginn dieses Kapitels erläutert, kann Relevanz auf die Bedürfnisse von speziellen Anwendungen bezogen werden. Dem gewählten Szenario liegt die Anwendung *Kollisionsvermeidung für entgegenkommenden Verkehr* zugrunde [435]. Dieses Szenario wird in Abbildung 6.7(a) dargestellt. Das zweite Szenario *TAPASCologne* definiert realistischen Verkehr für einen ganzen Tag in der Metropolregion Köln [359, 436]. Die diesem Szenario zugrundeliegenden Kartendaten, Verkehrsflüsse und Ampelanlagen wurden im Rahmen eines Open-Source-Projekts erarbeitet. Wir können das TAPASCologne-Szenario verwenden, um die Performance der Relevanzfunktionen in alltäglichem Verkehr zu bestimmen. Abbildung 6.7(b) zeigt einen Überblick über die verwendete Straßenkarten.

### 6.4.2.2 Beobachtete Relevanzwerte als Ground Truth

Wir definieren den *beobachteten Relevanzwert* als den maximalen Wert der Funktion aus Formel (6.5) unter Verwendung der realen Distanz zwischen sendendem und empfangendem Fahrzeug im Zeitbereich von  $t_{\text{now}}$  bis  $t_{\text{now}} + T_{\text{max}}$ . Dazu werden die aufgezeichneten Simulationsdaten ausgewertet. Dies ermöglicht den Vergleich von zum Zeitpunkt  $t_{\text{now}}$  geschätzten Relevanzwerten beim Empfang einer Nachricht mit den danach beobachteten Relevanzwerten im Zeitintervall von  $t_{\text{now}}$  bis  $t_{\text{now}} + T_{\text{max}}$ .

Dieses Vorgehen beruht darauf, dass die Relevanzfunktion die Relevanz einer Nachricht danach beurteilt, wie sich der Sender und Empfänger nach Empfang dieser Nachricht bewegen. Da im Serieneinsatz kein Blick in die Zukunft möglich ist, müssen die zugrundeliegenden Distanzfunktionen möglichst realistische Annahmen treffen, um zu validen Ergebnissen zu kommen. In der Evaluation auf Basis aufgezeichneter Fahrzeugtrajektorien hingegen kann auf diese Annahmen verzichtet werden.

Wir verwenden als Grundlage für den beobachteten Relevanzwert stets die Formel (6.5) und setzen die Distanzwerte entsprechend simulierten

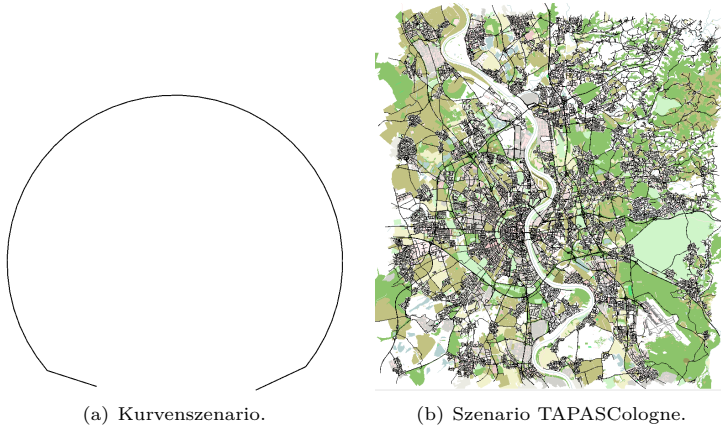


Abbildung 6.7: Verwendete Straßenszenarien für die Bewertung der Qualität der Relevanzfunktionen.

---

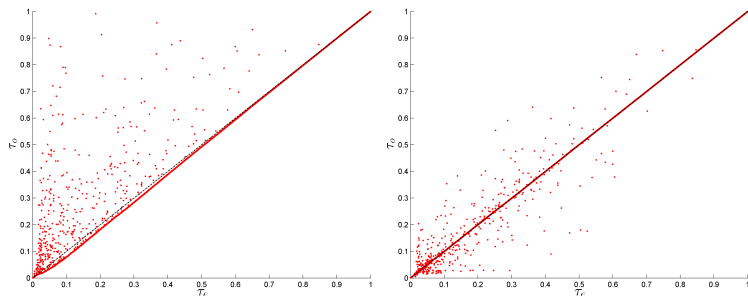
Bewegungsinformationen von Sender und Empfänger. Andere Funktionen als Ground Truth sind möglich und je nach Anwendungsbezug sinnvoll.

### 6.4.2.3 Nachrichtenreihenfolgen

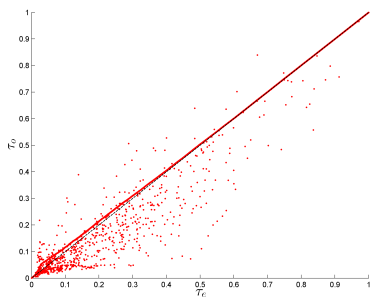
Um die Auswirkungen der verschiedenen Distanzfunktionen zu untersuchen, sortieren wir alle Nachrichten nach ihren geschätzten Relevanzwerten. Dies ergibt die Nachrichtenrangfolge  $\tau_e$ . Außerdem sortieren wir die Nachrichten nach ihren beobachteten Relevanzwerten, was die Nachrichtenrangfolge  $\tau_o$  ergibt.  $\tau_o(i)$  bzw.  $\tau_e(i)$  geben die Position der  $i$ -ten eingegangenen Nachricht in den jeweiligen Reihenfolgen an. Zur Herstellung der Vergleichbarkeit werden die Nachrichtenrangfolgen auf den Bereich  $[0, 1]$  normalisiert. Die Nachricht mit dem höchsten Relevanzwert erhält demnach die Position 1, diejenige mit dem niedrigsten Relevanzwert die Position 0.

## 6 Relevanzschätzung

---



(a) Distanzbasierte Relevanzschätzung. (b) Relevanzschätzung mit konstanter Bewegung.



(c) Relevanzschätzung mit dynamischer Bewegung.

Abbildung 6.8: Grafische Darstellung der Nachrichtenrangfolgen  $\tau_e$  und  $\tau_o$  auf Basis der geschätzten und beobachteten Relevanzwerte für das TAPASCologne-Szenario. Der Graph zeigt 1% aller Punkte.

---



In den Abbildungen 6.8(a)–6.8(c) werden die Nachrichtenrangfolgen für das TAPASCologne-Szenario dargestellt. Auf der 45°-Linie liegen diejenigen Nachrichten, an denen die geschätzten und beobachteten Relevanzwerte identisch sind ( $\tau_o(i) = \tau_e(i)$ ). Punkte unterhalb der Linie entsprechen Nachrichten, welche in der Nachrichtenrangfolge auf Basis der geschätzten Relevanzwerte an höherer Position stehen als in der Nachrichtenrangfolge auf Basis der beobachteten Werte ( $\tau_o(i) < \tau_e(i)$ ). Dies kann daran liegen, dass die geschätzten Relevanzwerte dieser Nachrichten zu hoch sind oder andere Nachrichten mit zu geringen Relevanzwerten versehen werden. Für Punkte oberhalb der Linie analog, dass die zugehörigen Nachrichten an zu geringer Position eingereiht werden ( $\tau_o(i) > \tau_e(i)$ ).

Abbildung 6.8(a) zeigt die Ergebnisse einer Relevanzschätzung basierend nur auf der Distanz von Sender und Empfänger zum Zeitpunkt der Nachrichtenübertragung nach der Formel

$$R = \frac{1 \text{ s}}{\max(d_{\min}, d(S, E))}. \quad (6.21)$$

Es ist zu beobachten, dass viele Nachrichten korrekt auf der 45°-Linie liegen. Allerdings führt dieses Verfahren auch zu einigen zu niedrig bewerteten Nachrichten. Beide Ergebnisse lassen sich direkt mit der zugehörigen Distanzfunktion erklären. Bewegen sich zwei Fahrzeuge voneinander weg, entspricht der beobachtete Relevanzwert nach Formel (6.5) dem geschätzten Relevanzwert zum Zeitpunkt  $t_{\text{now}}$ . Bewegen sich die Fahrzeuge dagegen aufeinander zu, steigt der beobachtete Relevanzwert nach  $t_{\text{now}}$  an, während der geschätzte Relevanzwert diese Bewegung ignoriert.

Im Vergleich dazu werden in Abbildung 6.8(b) die Relevanzwerte auch teilweise zu hoch eingeschätzt. Da hier die Bewegungen der Fahrzeuge auf Basis konstanter Bewegungseigenschaften extrapoliert werden, treten über- bzw. unterschätzte Relevanzwerte gleichermaßen auf. Entsprechende Ergebnisse entstehen etwa durch Fahrzeuge, die nach der Übertragung der Nachricht bremsen oder beschleunigen.

In Abbildung 6.8(c) werden die Ergebnisse für die Distanzfunktion mit dynamischer Bewegungsextrapolation dargestellt. Hier zeigt sich ein Übergewicht zu hoher Relevanzwerte. Dies entspricht der Absicht des Ansatzes, eine „bad-case“-Bewegung anzunehmen, um versehentlich zu niedrige Relevanzwerte zu verhindern. Dass letztere trotzdem auftreten – vgl. die Werte oberhalb der 45°-Linie – ist auf spezielle Bewegungsmuster zurückzuführen, die durch das implementierte Bewegungsmodell nicht abgebildet

## 6 Relevanzschätzung

werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Zuhilfenahme der beobachteten Relevanzwerte eine grafische Darstellung erzeugt werden kann, die eine Analyse der Effekte diverser Relevanzfunktionen auf die Nachrichtenrangfolge erlaubt. Auf diese Weise kann auch der Wertebereich verschiedener Relevanzfunktionen auf einen definierten Bereich limitiert und eine Vergleichbarkeit hergestellt werden.

### 6.4.2.4 Rangkorrelationskoeffizient

Um die im vorhergehenden Abschnitt bestimmten Nachrichtenrangfolgen zu quantifizieren, verwenden wir *Kendalls Tau*-Rangkorrelationskoeffizient als Metrik [437]. Dieser Wert – kurz Kendalls  $\tau$  – kann für die Tupel  $(\tau_e(i), \tau_o(i))$  jeder Nachricht  $i$  mit

$$\tau = 2 \cdot \frac{n_{\Leftrightarrow} - n_{\Leftarrow}}{n \cdot (n - 1)} \quad (6.22)$$

berechnet werden. Dabei ist  $n_{\Leftrightarrow}$  die Anzahl aller Nachrichten  $m_i$  und  $m_j$ , deren beobachtete und geschätzte Relevanz die gleiche Sortierung aufweisen:

$$n_{\Leftrightarrow} = |\{(m_i, m_j) : \forall_{m_i, m_j} [(\tau_e(m_i) > \tau_e(m_j) \wedge \tau_o(m_i) > \tau_o(m_j)) \vee (\tau_e(m_i) < \tau_e(m_j) \wedge \tau_o(m_i) < \tau_o(m_j))]\}|. \quad (6.23)$$

Entsprechend gibt  $n_{\Leftarrow}$  die Anzahl aller Nachrichten  $m_i$  und  $m_j$  an, deren beobachtete und geschätzte Relevanz eine unterschiedliche Sortierung aufweisen:

$$n_{\Leftarrow} = |\{(m_i, m_j) : \forall_{m_i, m_j} [(\tau_e(m_i) < \tau_e(m_j) \wedge \tau_o(m_i) > \tau_o(m_j)) \vee (\tau_e(m_i) > \tau_e(m_j) \wedge \tau_o(m_i) < \tau_o(m_j))]\}|. \quad (6.24)$$

Der Kendallsche Rangkorrelationskoeffizient erlaubt den quantitativen Vergleich verschiedener Distanzfunktionen mit einem skalaren Wert. Die Tabelle 6.3 listet die Ergebnisse für die simulierten Szenarien.

Relevanzfunktion	Kendalls $\tau$ Rangkorrelationskoeffizient	
	Kurve	TAPASCologne
Ohne Extrapolation	0.627	0.966
Konstante Bewegung	0.962	0.989
Dynamische Bewegung	0.982	0.975

Tabelle 6.3: Rangkorrelationskoeffizienten nach Distanzfunktion und Szenario.

Für das Kurvenszenario ergibt der Ansatz ohne Extrapolation einen vergleichsweise geringen Rangkorrelationskoeffizienten von 0.627. Würde dieser Ansatz zur Relevanzschätzung verwendet werden, würden viele Nachrichten einen falschen Relevanzwert erhalten. Wird als Distanzfunktion die konstante Bewegungsextrapolation verwendet, steigt der Rangkorrelationskoeffizient auf 0.962. Die geschätzten Relevanzwerte entsprechen somit in vielen Fällen den beobachteten Relevanzwerten. Unter Verwendung der Distanzfunktion mit dynamischer Bewegungsextrapolation ist eine weitere Steigerung auf 0.982 zu beobachten. Im Kurvenszenario ermöglicht diese Distanzfunktion offenbar nahezu vollständig korrekte Relevanzschätzungen.

Im TAPASCologne-Szenario ergibt der Ansatz ohne Extrapolation bereits einen hohen Rangkorrelationskoeffizienten von 0.966. Diese Funktion ergibt im Mischverkehr dieses großen Szenarios viele korrekte Relevanzschätzungen. Verwendet man den Ansatz der Extrapolation mit konstanter Bewegung, erhöht sich der Wert auf 0.989. Dies ist der höchste gemessene Wert in unseren Untersuchungen zum Rangkorrelationskoeffizienten, da die Extrapolation anhand dynamischer Bewegungen in diesem Szenario zu 0.975 führt. Wie im vorhergehenden Abschnitt in den grafischen Analysen beobachtet, führen die Annahmen dieses Ansatzes in manchen Fällen zu besseren Relevanzschätzungen, in anderen Fällen zu schlechteren Relevanzschätzungen.

#### 6.4.2.5 Fälschlicherweise verworfene Nachrichten

Bei hohen Nachrichtenraten werden die eingehenden Nachrichten nach ihren Relevanzwerten gefiltert, die Nachrichten von geringer Relevanz wer-

## 6 Relevanzschätzung

den unter Umständen verworfen. Es kann somit passieren, dass eine Nachricht fälschlicherweise verworfen wird, da ihre Relevanz zu gering bewertet wurde oder andere Nachrichten zu hoch eingestuft wurden. In diesem Abschnitt soll dieser Effekt quantitativ erfasst und für den Vergleich der Distanzfunktionen herangezogen werden.

Die verfügbaren Ressourcen zur Nachrichtenverarbeitung können in verschiedenen Serienlösungen unterschiedlich ausgeprägt sein. Daher bezieht sich die Analyse im Folgenden nicht auf eine absolute Nachrichtenverarbeitungsrate sondern auf den Nachrichtenverarbeitungsanteil  $p_{\text{processed messages}}$ . Dieser Variable stellen wir den Anteil fälschlicherweise verworfener Nachrichten  $p_{\text{erroneously discarded}}$  gegenüber.

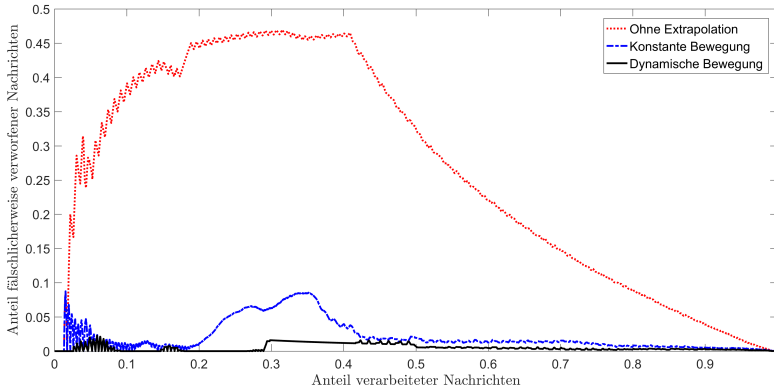
Die Rate der eingehenden Nachrichten hängt im Wesentlichen vom Systemdesign und der Umgebung ab [1, 3].

Um die Bedeutung der genannten Variablen zu verdeutlichen, wird ein Beispiel angeführt. In einem Fahrzeug sei die aktuelle Rate der eingehenden Nachrichten 500 Nachrichten pro Sekunde. Das Fahrzeug sei weiterhin darauf ausgelegt, lediglich 100 Nachrichten pro Sekunde zu verarbeiten. Damit ergibt sich  $p_{\text{processed messages}} = \frac{100}{500} = 20\%$ . Nimmt man nun an, dass der Anteil fälschlicherweise verworfener Nachrichten an den 100 verarbeiteten Nachrichten  $p_{\text{erroneously discarded}}$  30% sei, bedeutet dies, dass pro Sekunde 30 Nachrichten verworfen werden, deren Relevanz für eine Verarbeitung ausreichend hoch wäre, während 30 Nachrichten, die verworfen werden sollten, verarbeitet werden.

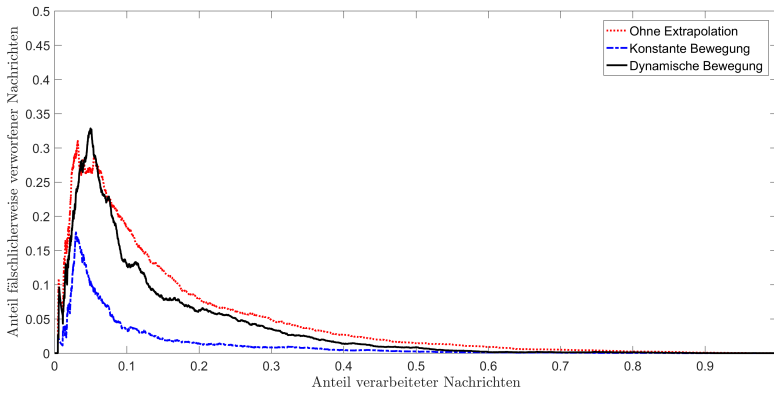
Abbildung 6.9(a) zeigt die Ergebnisse für das Kurvenszenario-Szenario. Der Ansatz ohne Extrapolation führt zu  $p_{\text{erroneously discarded}}$ -Werten von teilweise über 45%. Für Extrapolationen mit konstanter Bewegung werden 10% für einen Nachrichtenverarbeitungsanteil von 35% erreicht. Mit der dynamischen Bewegungsextrapolation wird das beste Ergebnis mit einem Maximum von ca. 2% erreicht.

Für das TAPASCologne-Szenario stellt sich das Ergebnis weitgehend anders dar (siehe Abbildung 6.9(b)). Für geringe Nachrichtenverarbeitungsraten steigt der Anteil fälschlicherweise verworfener Nachrichten zunächst stark an. Bei  $p_{\text{processed messages}} \approx 3\%$  erreicht die konstante Bewegungsextrapolation für  $p_{\text{erroneously discarded}}$  ein Maximum von ca. 18%. Die anderen Relevanzfunktionen führen zu wesentlich schlechteren Ergebnissen, in der Spitze von ca.  $p_{\text{erroneously discarded}} = 35\%$ .

Diese Ergebnisse bestätigen die Beobachtung der vorhergehenden Abschnitte. Je nach Auswahl der zugrundeliegenden Szenarien erweisen sich



(a) Kurvenszenario.



(b) TAPASCologne-Szenario.

Abbildung 6.9: Anteil der fälschlicherweise verworfenen Nachrichten.

unterschiedliche Distanzfunktionen als am besten geeignet. Im Vergleich der Ergebnisse beider analysierter Szenarien fällt unsere Wahl die weitere Verwendung in dieser Arbeit auf die Distanzfunktion mit konstanter Bewegungsextrapolation. Sie erweist sich im TAPASCologne-Szenario mit seinen vielen verschiedenen Verkehrssituationen als beste Distanzfunktion. Im anwendungsspezifischen Kurvenszenario führt die Distanzfunktion mit dynamischer Bewegungsextrapolation zu besseren Ergebnissen, für andere Anwendungen und Szenarien sind jedoch schlechtere Resultate zu erwarten.

### 6.4.3 Implementierung und Performance

Bei der Gestaltung der Relevanzschätzung stand aufgrund der Anforderungen im Fahrzeug stets die Effizienz der Algorithmen im Vordergrund. Schlussendlich kann die Effizienz eines Algorithmus' hinsichtlich seiner Laufzeit jeweils nur konkret auf seiner Zielumgebung – bestehend aus Hard- und Software – bewertet werden. Bei der Hardware entscheiden maßgeblich der CPU-Takt, der CPU-Befehlssatz und der verfügbare Arbeitsspeicher, bei der Software ist insbesondere das Betriebssystem und – soweit vorhanden – die verwendete Laufzeitumgebung maßgeblich.

In diesem Abschnitt wird zuerst die Hardwareumgebung zur Laufzeitmessung der beschriebenen Distanzfunktionen vorgestellt. Anschließend werden die gemessenen Laufzeiten und Instruktionen diskutiert.

#### 6.4.3.1 Kommunikationseinheit

Die Kommunikationseinheit enthält die Hardware eines üblichen automobilen Steuergeräts inklusive der IEEE 802.11p-Funkhardware. Außerdem befindet sich darauf als Software der Kommunikationsstack mit einigen zusätzlichen Auswertungs- und Testfunktionen. In diesen Stack wurden die Relevanzfunktion, Distanzfunktionen und der Selektionsmechanismus integriert, so dass jede empfangene CAM von diesen beiden Modulen verarbeitet wird.

Der Stack enthielt bereits unabhängig von unseren Untersuchungen eine Funktionalität zur Aufnahme und Wiedergabe von Daten verschiedener Ebenen. Diese Funktionalität kann verwendet werden, um Anwendungen auf höheren Ebenen auch im Desktop-Betrieb mit echten Daten aus Fahrzeugen zu versorgen. Wir verwenden die Wiedergabe-Funktionalität zur Einspeisung von simulierten empfangenen Nachrichten. Auf diese Weise

Distanzfunktion	∅ Laufzeit	∅ Rel. Laufzeit	∅ Instr.
Ohne Extrapolation	0.04688 ms	1	1621
Konstante Bewegung	0.0603 ms	1.29	2176
Dynamische Bewegung	1.0056 ms	21.45	126899
Dynamisch mit Kennfeld	0.0633 ms	1.35	2625

Tabelle 6.4: Laufzeiten und CPU-Instruktionen zur Ausführung der Distanzfunktionen. Durchschnittliche Werte über ca. 30000 verarbeitete Nachrichten.

eingespielte Daten werden von den höheren Schichten wie über den drahtlosen Kanal empfangene Daten verarbeitet.

Als Hardware verwendeten wir die *Communication Control Unit* (CCU) des deutschen Feldtest-Projekts  $\text{sim}^{\text{TD}}$  (siehe Abbildung 6.10). Obwohl für Vorentwicklungs- und Forschungszwecke konstruiert, wurde bei der CCU bereits darauf geachtet, möglichst realistische und seriennahe Hardware zu verwenden. Die CCU enthält einen Single Core Freescale PowerPC CPU mit 400 MHz, 256 MByte RAM sowie 512 MByte Flash-Speicher. In  $\text{sim}^{\text{TD}}$  war ihre Aufgabe die Anbindung der fahrzeuginternen Bussysteme sowie die Kommunikation über IEEE 802.11p. Die kundenerlebbaren Anwendungen wurden bei  $\text{sim}^{\text{TD}}$  auf einer separaten Einheit – der sogenannten *Application Unit* (AU) – umgesetzt und werden hier nicht weiter betrachtet [438].

### 6.4.3.2 Laufzeiten und Instruktionen

Die Implementierung der Distanzfunktionen auf der Kommunikationseinheit ermöglicht uns die durchschnittliche Laufzeit der Algorithmen in dieser konkreten Umgebung zu messen. Außerdem verwenden wir das Werkzeug *Callgrind* aus dem Profiling-Paket Valgrind, um die durchschnittliche Anzahl zur Ausführung der Distanzfunktionen nötigen CPU-Instruktionen zu zählen [439].

Die Tabelle 6.4 zeigt die durchschnittlichen Laufzeiten aller Distanzfunktionen in Millisekunden an. Außerdem wird die relative Laufzeit im Vergleich zur einfachsten Distanzfunktion ohne Extrapolation angegeben.

Es ist zu beobachten, dass fast alle Relevanzfunktionen für jede empfangene Nachricht eine Laufzeit unter 0.06 ms aufweisen. Davon ausge-



Abbildung 6.10: Die Communication Control Unit (CCU) des  $\text{sim}^{\text{TD}}$ -Projekts (rechts) mit Spannungsversorgung (links). Die beiden Anschlüsse  $.11pI$  und  $.11pII$  für 5,9-GHz-Antennen wurden terminiert.

---

nommen ist der Ansatz mit dynamischer Bewegung, der durch seinen iterativen Algorithmus mehr als das Zwanzigfache der Rechenzeit benötigt. Wird dieser Ansatz jedoch mit dem Kennfeld-Mechanismus mapped-RE entsprechend Abschnitt 6.2.3.4 umgesetzt, ergibt sich auch hier eine Laufzeit in der Größenordnung der anderen Ansätze.

Die Untersuchungen aus Kapitel 4 zu den Raten empfangener Nachrichten ergaben Situationen mit etwa 500 Nachrichten pro Sekunde. Somit kann man die gemessenen Laufzeiten von ca. 0.06 ms als effizient genug erachten, alle eingehenden Nachrichten mit einer Relevanz zu versehen. Allerdings muss in eine Gesamtbetrachtung auch der Rest des Systems einbezogen werden, der ebenfalls Rechenzeit benötigt und für die Rele-



vanzschätzung genügend Spielraum lassen muss. In der hier verwendeten Kommunikationseinheit stand genügend Rechenleistung zur Verfügung, in einem anderen Gesamtsystem muss dies jeweils neu bewertet werden.

Allerdings sind Laufzeitmessungen mitunter von begrenzter Aussagefähigkeit, da sie von der verwendeten Hardware und Software stark beeinflusst werden. In heutzutage üblichen Multiprocessing-Systemen laufen viele Prozesse (und Threads) nebeneinander. Jedem Prozess wird vom Betriebssystem immer wieder Rechenzeit zugeteilt, bis er unterbrochen wird, um anderen Prozessen den Zugriff auf die Hardware zu ermöglichen. Eine Laufzeitmessung kann also über die Rechenzeit eines bestimmten Prozesses hinaus auch diejenige dazwischen ausgeführter anderer Prozesse beinhalten.

Daher verwenden wir zur Analyse des Rechenaufwands außerdem das Profiling-Werkzeug Callgrind. Dieses Programm analysiert während der Ausführung eines Programms die Anzahl der von ihm verwendeten CPU-Instruktionen. Diese Angaben beziehen sich rein auf das analysierte Programm und enthalten keine Daten anderer Prozesse. Außerdem sind die CPU-Instruktionen für eine bestimmte Hardware- und Betriebssystemarchitektur in der Regel weitgehend konstant. Daher kann die Anzahl der CPU-Instruktionen eines implementierten Algorithmus' dafür verwendet werden, eine annäherungsweise Extrapolation des Rechenaufwands auf anderer Hardware der gleichen Architektur vorzunehmen. In Tabelle 6.4 wird die durchschnittliche Anzahl der CPU-Instruktionen der Relevanzfunktionen aufgelistet.

## 6.5 Andere Ansätze

In diesem Abschnitt werden aus der Literatur entnommene Verfahren zur Relevanzschätzung vorgestellt. Soweit es sinnvoll ist, wird für jeden Ansatz nach einer Beschreibung eine annähernd formale Darstellung ergänzt. Ist im Folgenden die Rede von Informationen des Senders, so bezieht sich dies auf die Inhalte der aktuell zu bewertenden Nachricht dieses Senders. Die Angaben des Empfängers sind lokal über die Sensoren verfügbar.

### 6.5.1 Räumliche und zeitliche Relevanzschätzung

In diesem Abschnitt werden Relevanzschätzungen vorgestellt, die auf räumlichen oder zeitlichen Merkmalen basieren.

### 6.5.1.1 Distanz und Zeit

Ein grundlegender Ansatz, der in vielen Varianten ausgearbeitet und ergänzt wurde, ist die Beurteilung der Relevanz nach der räumlichen Distanz zwischen Sender und Empfänger. In [440] wird alleine diese Distanz als Relevanzmaß verwendet. Die Distanz wird oft um das Alter der Nachricht ergänzt. Je aktueller die Nachricht und je näher ihr Sender, desto höher ist demnach ihre Relevanz. Beide Kriterien werden oft durch Gewichtung kombiniert, so etwa in [441], und modifiziert in [442, 443, 444, 445].

#### Relevanzschätzung 1 (*Distanz*)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{ps}: \text{Position des Senders} \\ \mathbf{pe}: \text{Position des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \frac{1}{|\mathbf{pe} - \mathbf{ps}|}$$

#### Relevanzschätzung 2 (*Distanz und Zeit*)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{ps}: \text{Position des Senders} \\ t_S: \text{Sendezeitpunkt der Nachricht} \\ \mathbf{pe}: \text{Position des Empfängers} \\ t_{\text{now}}: \text{Lokale Zeit des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \frac{1}{|\mathbf{pe} - \mathbf{ps}|} \cdot \frac{1}{|t_{\text{now}} - t_S|}$$

### 6.5.1.2 Fahrtrichtung

Ein weiterer Ansatz aus [446] verwendet die Fahrtrichtung als alleiniges Kriterium für die Relevanz einer Nachricht. Je ähnlicher sich die Fahrtrichtungen sind, desto höher ist dort die Relevanz. Bei entgegenkommendem oder kreuzendem Verkehr würde dieser Ansatz die Relevanz jedoch gering bewerten.

#### Relevanzschätzung 3 (*Fahrtrichtung*)

$$\left. \begin{array}{l} \psi_S: \text{Fahrtrichtung des Senders} \\ \psi_E: \text{Fahrtrichtung des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \frac{1}{|\psi_E - \psi_S|}$$

### 6.5.1.3 Distanz und Geschwindigkeit

Für die Bestimmung von Staus wird in [447] jeder Nachricht ein Relevanzwert zugewiesen. Dieser ist hoch, wenn die relative Geschwindigkeit und die Distanz gering sind. Auf diese Weise werden nahe Fahrzeuge, die sich mit dem Empfänger mitbewegen, identifiziert.

**Relevanzschätzung 4 (Distanz und Geschwindigkeit)**

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{p}_S: \text{Position des Senders} \\ v_S: \text{Geschwindigkeit des Senders} \\ \mathbf{p}_E: \text{Position des Empfängers} \\ v_E: \text{Geschwindigkeit des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \frac{1}{|\mathbf{p}_E - \mathbf{p}_S|} \cdot \frac{1}{|v_E - v_S|}$$

**6.5.1.4 Distanz, Geschwindigkeit und Beschleunigung**

In [448] wird die Relevanz durch einen Binärbaum und einer Einstufung nach Distanz, Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt.

**Relevanzschätzung 5 (Distanz, Geschwindigkeit und Beschl.)**

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{p}_S: \text{Position des Senders} \\ v_S: \text{Geschwindigkeit des Senders} \\ a_S: \text{Beschleunigung des Senders} \\ \mathbf{p}_E: \text{Position des Empfängers} \\ v_E: \text{Geschwindigkeit des Empfängers} \\ a_E: \text{Beschleunigung des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \frac{1}{|\mathbf{p}_E - \mathbf{p}_S| \cdot |v_E - v_S| \cdot |a_E - a_S|}$$

**6.5.1.5 Relevanz-Zonen**

In [449] wird ein Broadcasting-Schema vorgestellt, in dem Nachrichten an Fahrzeuge in der gleichen Spur in festgesetzten Distanzen versendet werden. Es wird eine *Relevanz-Zone* durch Spur und Entfernung definiert, in die Nachrichten bevorzugt weitergeleitet werden. Ähnlich wird in [450] eine *Zone of Relevance* (ZOR) definiert, in die Nachrichten versendet werden. Diese wird in Form einer Ellipse um einen gegebenen Mittelpunkt beschrieben. Ein weiteres ähnliches Konzept ist das der *Location of Interest*, die durch Empfänger in einem Publish/Subscribe-System definiert werden kann [451]. An den Anwendungen orientiert sich [243]. Deren Informationsbedürfnisse unterscheiden sich nach räumlichem Geltungsbereich, Lebensdauer und Zielfahrzeugen. Alle diese Ansätze erlauben in der Regel nur binäre Aussagen zur Relevanz – eine Nachricht ist entweder relevant oder nicht.

**Relevanzschätzung 6 (Relevanz-Zonen)**

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{p}_S: \text{Position des Senders} \\ Z_E: \text{Relevanz-Zone des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \begin{cases} 1, & \text{wenn } \mathbf{p}_S \in Z_E \\ 0, & \text{wenn } \mathbf{p}_S \notin Z_E \end{cases}$$

**6.5.1.6 Aufenthaltspolygone**

In [28] wird für den Empfänger und den Sender jeweils ein Aufenthaltsgebiet beschrieben, in dem sich beide Fahrzeuge unter Berücksichtigung ihrer aktuellen Bewegung und der Unsicherheit der Positionierung befinden. Dadurch ergeben sich für beide Fahrzeuge Aufenthaltspolygone. Indem geprüft wird, ob sich die Aufenthaltspolygone schneiden, kann auf Relevanz geschlossen werden. Unter höherem Rechenaufwand kann außerdem die Schnittfläche der Aufenthaltspolygone bestimmt werden. Je größer die Überdeckung, desto größer wird die Relevanz der Nachricht eingeschätzt. In diesem Ansatz lassen sich Fahrzeuge, deren Polygone sich nicht schneiden, nicht unterscheiden. Außerdem werden Positionen innerhalb der Aufenthaltspolygone nicht gewichtet, so dass Bereiche mit hoher bzw. geringer Aufenthaltswahrscheinlichkeit nicht unterschieden werden können.

**Relevanzschätzung 7 (Aufenthaltspolygone)**

$$\left. \begin{array}{l} A_S: \text{Aufenthaltspolygon des Senders} \\ A_E: \text{Aufenthaltspolygon des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim |A_S \cap A_E|$$

**6.5.1.7 Sicherheitsabstand**

Um die Relevanz von Nachrichten zu Notbremsereignissen zu bestimmen, verwendet [452] als Indikator den Abstand einander folgender Fahrzeuge. Ist dieser Abstand kleiner als ein gegebener Sicherheitsabstand, gilt die Nachricht als relevant. Der Sicherheitsabstand kann aus der aktuellen Geschwindigkeit sowie einer angenommenen Reaktionszeit des Fahrers bestimmt werden. Um auch nicht kommunizierende Fahrzeuge zu erfassen, die sich zwischen Sender und Empfänger befinden, wird eine Fahrzeugdichte angenommen. Diese Fahrzeugdichte ist somit wesentlich für die Funktionsfähigkeit dieses Ansatzes. Allerdings bleibt unklar, wie die lokale Fahrzeugdichte zuverlässig bestimmt werden kann. Abgesehen davon

stellt sich die grundlegende Frage, ob nicht schon vor dem Unterschreiten des Sicherheitsabstandes eine Nachricht als relevant bewertet werden müsste. Nur so könnte eine kritische Situation frühzeitig vermieden werden.

### Relevanzschätzung 8 (*Sicherheitsabstand*)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{p}_S: \text{Position des Senders} \\ \mathbf{p}_E: \text{Position des Empfängers} \\ t_E^{\text{react}}: \text{Reaktionszeit des Empf.} \\ v_E: \text{Geschwindigkeit des Empf.} \end{array} \right\} R \sim \begin{cases} 1, & \text{wenn } |\mathbf{p}_E - \mathbf{p}_S| < v_E \cdot t_E^{\text{react}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

#### 6.5.1.8 Begegnungswahrscheinlichkeit

Ein weiterer Ansatz, in dem neben den Positionen auch die Bewegungsdaten von Fahrzeugen berücksichtigt werden, wurde in [430, 453, 454] unter dem Begriff *Encounter Probability* (Begegnungswahrscheinlichkeit) für einen intelligenten Forwarding-Algorithmus präsentiert. Aus den Positionen, Geschwindigkeiten und Fahrtrichtungen werden durch Extrapolation der Bewegung folgende Variablen bestimmt. Der kürzeste Abstand zwischen Sender und Empfänger  $d_{EP}$ , die Zeit  $t_{EP}$ , bis  $d_{EP}$  erreicht wird, das Alter  $g_{EP}$  der Nachricht zum Zeitpunkt  $t_{EP}$  und der Winkel zwischen den Fahrtrichtungen beider Fahrzeuge  $\psi_{\text{rel}}$ . Die einzelnen Variablen werden mit den Faktoren  $\kappa$ ,  $\eta$ ,  $\iota$  und  $\zeta$  gewichtet. Dieser Ansatz hat jedoch Schwächen im folgenden Szenario. Zwei Fahrzeuge befinden sich nahe beieinander und bewegen sich annähernd parallel in eine ähnliche Fahrtrichtung. Der Abstand beider Fahrzeuge wird somit erst weit in der Zukunft minimal und die Relevanz wird gering bewertet. Dies ist auch dann der Fall, wenn der initiale Abstand bereits kritisch ist.

### Relevanzschätzung 9 (*Begegnungswahrscheinlichkeit*)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{p}_S: \text{Position des Senders} \\ v_S: \text{Geschwindigkeit des Senders} \\ \psi_S: \text{Fahrtrichtung des Senders} \\ t_S: \text{Sendezeitpunkt der Nachricht} \\ \mathbf{p}_E: \text{Position des Empf.} \\ v_E: \text{Geschwindigkeit des Empf.} \\ \psi_E: \text{Fahrtrichtung des Empf.} \\ t_{\text{now}}: \text{Lokale Zeit des Empf.} \end{array} \right\} R \sim \begin{aligned} & [\kappa \cdot d_{EP}(\mathbf{p}_S, \mathbf{p}_E, v_S, v_E, \psi_S, \psi_E) \\ & + \eta \cdot t_{EP}(\mathbf{p}_S, \mathbf{p}_E, v_S, v_E, \psi_S, \psi_E) \\ & + \iota \cdot g_{EP}(t_S, t_{EP}) \\ & + \zeta \cdot \psi_{\text{rel}}(\psi_S, \psi_E) + 1]^{-1} \end{aligned}$$

### 6.5.1.9 Positionsketten-Vergleich

[455] verwendet historische Positionsdaten von Sender und Empfänger zur Relevanzbestimmung. Der Sender überträgt in der Nachricht nicht nur seine letzte Position, sondern außerdem eine Menge älterer Positionen – bezeichnet als Positionskette (auch *Path History*, *Position Trace*). Der Empfänger einer solchen Nachricht kann diese Positionskette mit seiner eigenen Positionskette vergleichen. Sind beide Positionsketten annähernd identisch, gilt dies als Nachweis dafür, dass der Empfänger dem Sender folgt, womit der Sender bzw. dessen Nachrichten für den Empfänger relevant sind. Der Vorteil eines solchen Verfahrens ist es, dass ohne Kenntnis der Straßenkarte eine Begegnung zweier aufeinander folgender Fahrzeuge auch bei kurvigen Strecken zuverlässig erkannt werden kann. Gleichzeitig lassen sich aber seitliche oder frontale Begegnungen durch dieses Verfahren in keinsten Weise abdecken – die Positionskette ist nur für bereits zurückgelegte Strecken bekannt.

#### Relevanzschätzung 10 (*Positionsketten-Vergleich*)

$$\left. \begin{array}{l} P_S = \{ \mathbf{p}_S^{t_1}, \dots, \mathbf{p}_S^{t_n} \}: \text{Positionen Sender} \\ P_E = \{ \mathbf{p}_E^{t_1}, \dots, \mathbf{p}_E^{t_n} \}: \text{Positionen Empf.} \end{array} \right\} R \sim \begin{cases} 1, & \text{wenn } P_E \subseteq P_S \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

### 6.5.2 Kartenbasierte Verfahren

Verschiedentlich wurde zur Relevanzschätzung die Nutzung von Straßenkarten vorgeschlagen. Durch den Abgleich der Fahrzeugtrajektorien mit der Karte und einer Analyse, ob Sender und Empfänger sich auf dem Straßennetz überhaupt begegnen können, ist prinzipiell eine sehr akkurate Relevanzschätzung möglich [2, 456, 457]. Durch die Verwendung der Straßentopologie kann etwa erkannt werden, dass auch nahe beieinanderliegende Fahrzeuge keinen Kollisionspfad aufweisen, da sich die Fahrzeuge auf baulich getrennten Spuren befinden.

In [458] werden Kartendaten dazu verwendet, Nachrichten in einem Weiterleitungs-Verfahren entlang bestimmter Straßen zu verteilen. Die Autoren zeigen in Simulationen, dass dadurch die Redundanz – Nachrichten erreichen die gleichen Knoten auf verschiedenen Übertragungswegen mehrfach – signifikant verringert werden kann.

In [459] werden Fahrzeuge verschiedenen Klassen zugeteilt, um ein selektives Broadcasting zu ermöglichen. Der *Source*-Knoten ist der Ursprung

einer Information. *Alerted*-Knoten bewegen sich auf den Source-Knoten zu und werden daher direkt über diese Information benachrichtigt. Als *Relay*-Knoten werden alle übrigen benachbarten Knoten klassifiziert, für welche die Information nicht relevant ist. Die Relay-Knoten leiten die Information an andere *Alerted*-Knoten weiter. Für die Bestimmung, ob sich ein Fahrzeug auf den Source-Knoten zubewegt, kann eine Route über die Straßenkarte bestimmt werden. Hierauf folgt eine Analyse möglicher alternativer Bewegungspfade. Dadurch ist dieses Verfahren sehr aufwändig. Innerhalb der Klassen werden keine Abstufungen hinsichtlich Relevanz oder Vergleichbarem vorgenommen.

Im Folgenden wird die Verwendung von Straßenkarten zur Relevanzschätzung in formalisierter Weise dargestellt. Dabei wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine Straßenroute vom Empfänger zum Sender als Grundlage für die Relevanzschätzung angenommen. Daneben könnte auch der umgekehrte Weg bzw. die Bewegung beider Fahrzeuge aufeinander zu zur Relevanzschätzung dienen.

**Definition 5** (Straßennetz und Weg). *Das Straßennetz  $N = (G, K)$  ist ein gewichteter und gerichteter Graph, bestehend aus der Knotenmenge  $G$  und der Kantenmenge  $K$ .*

*Ein Weg  $W_{E \rightarrow S}$  ist ein Teilgraph von  $N$ , der den kürzesten Pfad vom Empfänger  $E$  zum Sender  $S$  entlang der Knoten bzw. Kanten des Straßennetzes repräsentiert [460].*

**Definition 6** (Räumlicher Abstand und zeitliche Dauer).  *$s(W_{E \rightarrow S})$  gibt die Länge des Weges vom Empfänger zum Sender an.  $t(W_{E \rightarrow S})$  gibt die Zeitdauer für das Zurücklegen des Weges vom Empfänger zum Sender an und ist abhängig von deren Geschwindigkeiten.*

### Relevanzschätzung 11 (Weg entlang des Straßennetzes)

$$R \sim \frac{1}{t(W_{E \rightarrow S})}$$

Allerdings hat die Verwendung von Straßenkarten zur Relevanzschätzung mehrere Nachteile. In erster Linie muss natürlich eine Straßenkarte der aktuellen Region vorliegen. Verlässt das Fahrzeug diese Region, wäre eine Relevanzschätzung nicht mehr möglich. Das Kartenmaterial belegt des Weiteren sehr viel Speicherplatz in der Größenordnung vieler Gigabytes. Außerdem sind Straßenkarten üblicherweise statisch, Aktualisierungen finden selten statt. Dagegen verändert sich das reale Straßennetz ständig – von stundenweisen Baustellen bis hin zu dauerhaften

Änderungen der Straßenführung. In solchen Fällen würde eine Relevanzschätzung falsche Ergebnisse liefern. Des Weiteren ist der Zugriff auf die Straßenkarte aufgrund ihrer Datenmenge mit vergleichsweise erheblicher Rechenleistung verbunden. Da die Relevanz jeder eingehenden Nachricht zu bestimmen ist, würde dies in massivem Ressourcenbedarf resultieren. Schlussendlich befindet sich die Straßenkarte nicht zwangsläufig auf dem gleichen Steuergerät wie die Relevanzschätzung. Abgleiche mit der Straßenkarte würden in diesem Fall eine zusätzliche Buskommunikation erfordern, die die Busse stark belasten und bei der Bearbeitung der Nachrichten zusätzliche Latenzen verursachen würde.

### 6.5.3 Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen wird in [461, 462, 463, 464] zur Relevanzschätzung von Verkehrs- und Parkinformationen vorgeschlagen. Die Anwendungen bewerten jeweils, welche Nachrichten wie nützlich für sie sind. Basierend auf dem Alter der Nachrichten und der Distanz ihres Senders vom Empfänger wird ein Mechanismus trainiert [465]. Nachteilig für die Übertragung dieses Ansatzes auf weitere Anwendungen ist die Auswahl der Eingangsgrößen, die etwa Geschwindigkeiten und Fahrtrichtungen nicht berücksichtigen.

Der Einsatz von maschinellem Lernen wirft Probleme auf, wenn die Anwendungen (noch) nicht bekannt sind oder sehr unterschiedliche Ziele verfolgen. Außerdem könnten durch eine suboptimale Auswahl der Trainingsszenarien Muster erlernt werden, die für realen Verkehr nicht repräsentativ sind und somit im Realeinsatz zu falschen Ergebnissen führen.

### 6.5.4 Bedarf und Bedarfserfüllung

In diesem Abschnitt werden Ansätze vorgestellt, welche die Relevanz von Nachrichten anhand der Erfüllung von Bedarfen bewerten.

#### 6.5.4.1 Message Benefit

In [466, 467] wird ein sogenannter *Message Benefit* definiert. Jede Nachricht wird dabei nach ihrem Nutzen für die Anwendungen  $A_i$  des Empfängers  $E$  und seiner bereits empfangenen Nachrichten  $m_E^*$  bewertet. Jede Anwendung kann verschieden gewichtet werden. Allerdings bleibt unklar,



nach welchem Verfahren die einzelnen Anwendungen die Nachrichten konkret nach ihrem Nutzern bewerten.

#### Relevanzschätzung 12 (*Message Benefit*)

$$\left. \begin{array}{l} S: \text{Nachricht des Senders} \\ A_E^i: \text{Anwendungen des Empfängers} \\ S^*: \text{Ältere empfangene Nachrichten} \end{array} \right\} R \sim \sum_i (A_E^i(S, E, S^*))$$

#### 6.5.4.2 Bedarfserfüllung

[468] zielt im Kontext der Kommunikation von Verkehrsinformationen auf die Formulierung eines Bedarfs ab. Nachrichten, die diesen Bedarf erfüllen, erhalten zunächst eine hohe Relevanz. Ist der Bedarf gedeckt, sinkt die Relevanz ab. Damit werden die Prinzipien von Angebot und Nachfrage aus der Ökonomie genutzt. In [249] findet sich ein ähnlicher Ansatz.

#### Relevanzschätzung 13 (*Bedarfserfüllung*)

$$\left. \begin{array}{l} S: \text{Nachricht des Senders} \\ I_E: \text{Interessen des Empfängers} \\ S^*: \text{Ältere empfangene Nachrichten} \end{array} \right\} R \sim (S \cap I_E) \cdot (1 - (S^* \cap I_E))$$

#### 6.5.4.3 Zeit, Priorität, Distanz und Match Subscription

Vier gewichtete Eingangswerte werden in [469] zu einem Relevanzwert verknüpft. Das Alter einer Nachricht unter Berücksichtigung einer Zeitgrenze, die Priorität der Nachricht, die Entfernung zwischen Sender und Empfänger und die Übereinstimmung von Nachrichteninhalt und Empfängerinteresse (*Match Subscription*). Ähnlich gehen auch [470] und [471] vor.

#### Relevanzschätzung 14 (*Zeit, Priorität, Distanz und Match*)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{ps}: \text{Position des Senders} \\ t_S: \text{Sendezeitpunkt der Nachricht} \\ u_S: \text{Priorität der Nachricht} \\ S: \text{Nachricht des Senders} \\ \mathbf{pE}: \text{Position des Empfängers} \\ t_{\text{now}}: \text{Lokale Zeit des Empfängers} \\ I_E: \text{Interessen des Empfängers} \end{array} \right\} R \sim \begin{array}{l} w_1 \cdot |t_{\text{now}} - t_S| \\ + w_2 \cdot u_S \\ + w_3 \cdot |\mathbf{pE} - \mathbf{ps}| \\ + w_4 \cdot (S \cap I_E) \end{array}$$

### 6.5.4.4 Popularität

In [472] wird als Maß für die Relevanz einer Nachricht ihre Popularität verwendet. Dies wird am Beispiel des Austausches von Musikdateien zwischen den Fahrzeugen ausgearbeitet. Sollte dem Liedwunsch eines Fahrers nicht zu 100% entsprochen werden können, werden möglichst ähnliche Musikdateien übertragen. Ein solcher Ansatz wird auch in [473] verfolgt.

### 6.5.5 Validität und Reputation

Das Vertrauen in die Validität einer Nachricht dient in [474] als Basis einer Relevanzschätzung. In ähnlicher Weise wird in [475] die Qualität für eine Relevanzbewertung herangezogen. Eine Nachricht wird dazu von mehreren Fahrzeugen „validiert“ und weitergeleitet. Dadurch steigt mit zunehmender Anzahl an Validierungen das Vertrauen in den Inhalt der Nachricht. Dieser Mechanismus setzt vor allem auf ein Multi-Hop-System und eine allgemein bewertbare Validität von Informationen. Dies ist jedoch auf CAMs, die in der Regel erst im konkreten Kontext des Empfängers Relevanz erhalten, nicht anwendbar.

Eine Verknüpfung von Reputation und Datenqualität wird in [476, 477] vorgestellt. Die Datenqualität bestimmt sich dabei durch den Kontext des Empfängers und wird durch die zeitliche Relevanz, die Vollständigkeit und die Priorität der Nachrichten bzw. deren Inhalte sowie der Distanz von Sender und Empfänger bestimmt [478]. In [479] werden Verbreitung einer Nachricht, Verlässlichkeit und Größe als Relevanzmaß herangezogen.

### 6.5.6 Diverse Konzepte

In [480] wurde für das Streaming von Filmen ein adaptiver Prefetching-Algorithmus vorgestellt. Dieser Algorithmus lädt die Bilder der Filme entsprechend ihrer Relevanz, d.h. solche Bilder, die wahrscheinlich bald benötigt werden. Dabei ist nicht zwangsläufig die chronologische Reihenfolge maßgeblich. In dem Ansatz wird eine globale Relevanzfunktion aus statischen und dynamischen Anteilen zusammengesetzt.

Eine grundlegende Modellierung von Relevanz wird in [481] vorgenommen. Demnach wird Relevanz durch zeitliche und räumliche Aktualität

(*Topicality*), Neuigkeit (*Novelty*), Verlässlichkeit (*Reliability*), Geltungsbereich (*Scope*) und Verständlichkeit (*Understandability*) bestimmt. In einer Probandenstudie wurden für diese Kriterien Gewichte abgeleitet. Weitere eher abstrakte Relevanzschätzungs-Schemata werden in [482, 483, 484, 485] vorgestellt.

### 6.5.7 Gesamtbewertung

In den vorherigen Abschnitten wurden Ansätze zur Relevanzschätzung aus der Literatur vorgestellt, welche für andere Zwecke erdacht wurden. Oftmals wurde die Relevanz von Nachrichten oder Fahrzeugen für intelligente Verfahren verwendet, um Nachrichten über mehrere Fahrzeuge hinweg weiterzuleiten (Forwarding). Aufgrund des unterschiedlichen Einsatzbereichs kann keiner dieser Ansätze unsere Anforderungen an eine Relevanzfunktion erfüllen.

Viele der vorgestellten Konzepte basieren zwar wie unser Verfahren auf räumlichen und zeitlichen Aspekten. In der Detailbewertung der jeweiligen Umsetzung zeigen sich jedoch bei allen diesen Konzepten Unzulänglichkeiten, so dass bestimmte Situationen nicht korrekt erfasst werden oder eine effiziente Implementierung nicht möglich ist.

Kartenbasierte Verfahren versprechen auf dem ersten Blick eine hohe Qualität der Relevanzschätzung. Allerdings kann die Existenz einer korrekten und aktuellen Straßenkarte nicht garantiert werden. Außerdem ist der Zugriff auf Straßenkarten für hohe Nachrichtenraten mit hohem Ressourcenbedarf verbunden. Auch maschinelles Lernen wurde bereits untersucht. Die damit erreichbare Qualität ist jedoch abhängig von der Verfügbarkeit realistischer Trainingsszenarien und den Anwendungs-Bedürfnissen. Auf dem Bedarf der Anwendungen und dessen Erfüllung basieren weitere Konzepte. Unser Architekturentwurf sieht allerdings sehr viele Anwendungen mit verschiedensten Bedarfen vor. Ansätze zur gemeinsamen Bewertung der Validität einer Nachricht oder der Reputation ihres Senders wurden ebenfalls vorgeschlagen. Dies ist jedoch auf eine Cooperative Awareness Message (CAM) nicht anwendbar, da die Relevanz erst durch den konkreten Kontext des einzelnen Empfängers entsteht.

## 6 Relevanzschätzung

## 7 Nachrichtenselektion

Auf Basis der im vorhergehenden Kapitel bestimmten Relevanzwerte ist der nächste Schritt die Auswahl von Nachrichten zur Weiterverarbeitung. Insbesondere wenn die Rate der empfangenen Nachrichten die Verarbeitungskapazitäten des Gesamtsystems übersteigt, müssen besonders relevante Nachrichten bevorzugt behandelt werden. Wir bezeichnen den Vorgang der Auswahl relevanter Nachrichten als Selektion.

Die Selektion kann durch verschiedene Ansätze und mit verschiedenen Eigenschaften realisiert werden. In diesem Kapitel werden zunächst die Operationen definiert, die ein Selektionsmechanismus möglichst effizient umsetzen sollte. Sodann erläutern wir die Konstruktion eines neuen Selektionsmechanismus, der bekannte Datenstrukturen in einer optimierten Gesamtlösung zur Erreichung der Anforderungen kombiniert. Abschließend wird der Selektionsmechanismus evaluiert. In [6] wurden die wesentlichen Erkenntnisse dieses Kapitels erstmals veröffentlicht.

### 7.1 Anforderungen

Die wichtigste Aufgabe des Selektionsmechanismus' ist es, auf effiziente Weise die Nachricht mit dem jeweils höchsten Relevanzwert auszugeben. Daneben hat sie noch weitere – teilweise optionale – Anforderungen zu erfüllen. Diese werden im Folgenden erläutert.

#### 7.1.1 Laufzeit und Speicherbedarf

Hinsichtlich der Effizienz gilt es sowohl den Rechenbedarf der Algorithmen als auch die Speichernutzung zu betrachten. Die Selektion und das Verwerfen der Nachrichten durch den Selektionsmechanismus sollten so wenig Rechenzeit wie möglich beanspruchen. Dadurch können entweder Kosten gespart oder die Hardware-Ressourcen für mehr oder verbesserte Anwendungen eingesetzt werden. Die Verarbeitungszeit jeder Nachricht auf ihrem Weg durch den Selektionsmechanismus darf nicht zu lange dauern.

## 7 Nachrichtenselektion

ern. Für die Anwendungen sind aktuelle Nachrichten wertvoller als alte Nachrichten, die lange auf ihre Verarbeitung warten mussten.

Bezüglich der Speichernutzung muss eine vorgegebene Speichergröße eingehalten werden. Aufgrund der Vorgaben im Automobilbereich sind die entsprechenden Speichermöglichkeiten stark begrenzt, so dass die Menge der zwischengespeicherten Informationen entweder von vornherein auf einen festen Wert limitiert werden oder ein Mechanismus vorhanden sein muss, der bei Bedarf verzichtbare Daten entfernt.

### 7.1.2 Einfügen von Nachrichten

Der Selektionsmechanismus braucht Nachrichten und ihre Relevanzwerte als Grundinformation, damit er unter ihnen auswählen kann. Da jede empfangene Nachricht den Selektionsmechanismus passiert, muss das Einfügen in die Datenstrukturen des Selektionsmechanismus' effizient gelöst sein.

Im Sinne einer effizienten Implementierung müssen die Nachrichten nicht physikalisch eingefügt werden, d.h. an einem neuen Speicherplatz abgespeichert werden. Soweit möglich, können die Nachrichten in einem Speicherbereich verbleiben, auf den der Selektionsmechanismus zugreifen kann. Der Selektionsmechanismus selbst würde damit nur die Relevanzwerte und einen Zeiger auf die Nachricht verwenden.

### 7.1.3 Extraktion der relevantesten Nachricht

Die Extraktion der Nachricht mit dem jeweils höchsten Relevanzwert ist die zentrale Aufgabe in der vorgeschlagenen Architektur. Damit verbunden ist auch die Entfernung dieser Nachricht aus den Datenstrukturen des Selektionsmechanismus'.

Sollten zum Zeitpunkt der Extraktion mehrere Nachrichten denselben höchsten Relevanzwert aufweisen, muss eine Vorgehensweise definiert werden. So kann zufällig eine dieser Nachricht ausgewählt oder die jüngste Nachricht bevorzugt behandelt werden.

### 7.1.4 Entfernen von Nachrichten

Wenn die Menge der Nachrichten, die auf die Verarbeitung warten, eine gewisse Grenze erreicht, ist eine Entfernung von Nachrichten mit niedriger

Relevanz sinnvoll. Dieser Fall tritt ein, wenn durch die Rate der empfangenen Nachrichten die Rechenleistung der Nachrichtenverarbeitung nicht mehr für eine Verarbeitung aller Nachrichten ausreicht.

Darüber hinaus sollten Nachrichten, deren Wartezeit eine gewisse Dauer überschritten hat, aus dem Selektionsmechanismus entfernt werden. Für CAMs kann als ein akzeptables Alter ein Wert im einstelligen Sekundenbereich angenommen werden – ältere Nachrichten sind aufgrund der Dynamik der Fahrzeuge kaum mehr von Nutzen für die meisten Anwendungen.

### 7.1.5 Aktualisieren von Nachrichten

Wenn von einem Sender neue Nachrichten empfangen werden und gleichzeitig noch ältere Nachrichten dieses Senders im Selektionsmechanismus auf ihre Verarbeitung warten, sollten die neuen Nachrichten die alten ersetzen. Dies gilt insbesondere, wenn die älteren Nachrichten eine höhere Relevanz aufweisen als die neuen. Fände keine Ersetzung oder Aktualisierung statt, würden in diesem Fall die Anwendungen mit veralteten Nachrichten arbeiten.

### 7.1.6 Altern von Nachrichten

Der Nutzen der Nachrichten für die Anwendungen sinkt tendenziell mit der Dauer ihres Verbleibs im Selektionsmechanismus. Neue Nachrichten mit gleicher Relevanz wie eine alte Nachricht sollten früher bearbeitet werden. So wird verhindert, dass mit der Verarbeitung alter Nachrichten eine Verarbeitung neuer Nachrichten aufgeschoben wird.

## 7.2 Umsetzung

In diesem Abschnitt wird ein Selektionsmechanismus entwickelt, der Nachrichten speichert und periodisch die Nachricht mit dem aktuell höchsten Relevanzwert selektiert. Die Beschreibung des Mechanismus' erfolgt schrittweise. Zunächst wird ein sehr einfacher Ansatz in Form einer Prioritätswarteschlange vorgestellt. Im nächsten Schritt wird eine weitere Datenstruktur ergänzt, welche sicherstellt, dass stets nur eine Nachricht eines bestimmten Senders in der Prioritätswarteschlange verbleibt. Im letzten

Schritt wird ein Alterungsmechanismus eingeführt, mit dem sich die Relevanzwerte wartender Nachrichten im Vergleich zu neuen Nachrichten mit der Zeit verringern.

### 7.2.1 Prioritätswarteschlange

Wir verwenden eine Prioritätswarteschlange, um den Selektionsmechanismus zu realisieren. Die Nachrichten in der Warteschlange des Selektionsmechanismus' werden nach ihrem Relevanzwert sortiert bzw. priorisiert. Damit befindet sich an einem Ende der Warteschlange die Nachricht mit dem höchsten Relevanzwert, am anderen Ende die Nachricht mit dem niedrigsten Relevanzwert.

Die Verarbeitungsrate  $r_{\text{process}}$  ist ein Parameter und gibt die maximale Rate an, mit der Nachrichten durch das Gesamtsystem verarbeitet werden können. Die Wahl dieses Parameter  $r_{\text{process}}$  ist mit allen beteiligten Komponenten und Systemen abzustimmen. Ein für uns wesentlicher limitierender Aspekt ist die verfügbare Bandbreite des Bussystems im Fahrzeug, über den die empfangenen Nachrichten zu den Anwendungen weitergeleitet werden. Der Prioritätswarteschlange  $Q$  wird alle  $\frac{1}{r_{\text{process}}}$  s die Nachricht mit dem höchsten Relevanzwert entnommen. Diese periodische Entnahme kann durch einen separaten Thread realisiert werden.

Die Größe der Prioritätswarteschlange  $Q$ , d.h. die maximale Anzahl der von ihr gespeicherten Nachrichten und zugehörigen Relevanzwerte, ist ebenfalls ein Parameter. Wir setzen  $Q = r_{\text{process}} \cdot 1$  s, da CAMs mindestens einmal pro Sekunde generiert werden [25].

Algorithmus 2 zeigt das Vorgehen beim Einfügen einer neuen Nachricht. Zunächst wird geprüft, ob die Warteschlange bereits voll ist. Falls dies nicht der Fall ist, kann sie in der Warteschlange an einer Stelle entsprechend ihrer Relevanz hinzugefügt werden. Ist die Warteschlange bereits voll, wird geprüft, ob der Relevanzwert der neuen Nachricht größer als der geringste Relevanzwert in der Warteschlange ist. Ist dies der Fall, wird die neue Nachricht in die Warteschlange einsortiert, während die Nachricht mit dem geringsten Relevanzwert verworfen wird. Andernfalls wird die neue Nachricht selbst verworfen.

Die eigentliche Selektion, also das Entnehmen der aktuell relevantesten Nachricht erfolgt in einem separaten Thread, wie Algorithmus 3 zeigt. Die Prioritätswarteschlange wird dazu zyklisch auf Nachrichten geprüft. Ist sie nicht leer, wird die Nachricht mit dem höchsten Relevanzwert aus



---

**Algorithmus 2 :** Das Einfügen einer Nachricht in die Prioritätswarteschlange.

---

```

Input : Empfangene Nachricht  $m_{i+1}$ 
if  $|Q| < r_{\text{process}} \cdot s$  then
  |  $Q.\text{insert}(m_{i+1});$ 
else
  | if  $R(m_{i+1}) \geq R(Q.\text{getMin}())$  then
  | |  $Q.\text{removeMin}();$ 
  | |  $Q.\text{insert}(m_{i+1});$ 
  | else
  | |  $\text{drop}(m_{i+1});$ 

```

---

der Warteschlange entfernt und zur Verarbeitung weitergeleitet. Danach schläft der Thread für  $\frac{1}{r_{\text{process}}}$  s, bis die nächste Nachricht verarbeitet werden kann.

---

**Algorithmus 3 :** Das Entnehmen der momentan relevantesten Nachricht.

---

```

while true do
  | if  $|Q| > 0$  then
  | |  $\text{process}(Q.\text{getMax}());$ 
  | |  $Q.\text{removeMax}();$ 
  |  $\text{sleep}(\frac{1}{r_{\text{process}}});$ 

```

---

Aufgrund der vorgenannten Operationen sollte die Prioritätswarteschlange das Einfügen, Extrahieren und Entfernen von Nachrichten ermöglichen. In der Regel wurden für ähnliche Problemstellungen als grundlegende Datenstrukturen sogenannte *Heaps* vorgeschlagen. Heaps sind Datenspeicher, in denen die Daten nach gewissen Kriterien sortiert abgelegt und ausgelesen werden können [486]. Für die konkrete Gestaltung der Heaps gibt es verschiedenste Ansätze, die auf bestimmte Operationen hin optimiert werden [487]. *Min-Max Heaps* oder *Interval-Heaps* ermöglichen einen effizienten Zugriff sowohl auf minimale als auch maximale Einträge

in einer Warteschlange [488]. Mit Hilfe der Warteschlangentheorie lässt sich die Performance dieser Algorithmen analysieren [489]. Da die Prioritätswarteschlange durch  $Q_{\max}$  bzw.  $r_{\text{process}}$  auf vergleichsweise geringe Größen begrenzt wird, können allerdings auch herkömmliche binäre Suchbäume wie *Red-Black-Trees* ausreichende Effizienz erreichen [490].

### 7.2.2 Vermeidung von Redundanzen

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Prioritätswarteschlange hat den Nachteil, dass sie jeweils nur einzelne Nachrichten ohne ihren Kontext behandelt. Daher kann und wird es dazu kommen, dass die Prioritätswarteschlange mehrere Nachrichten desselben Senders enthält. Darüber hinaus werden in einem solchen Fall unter Umständen neuere vor älteren Nachrichten verarbeitet. Diese nicht-chronologische Abarbeitung könnte zu Irritationen in den Anwendungen führen. Außerdem stellt das Verwalten alter Nachrichten in der Prioritätswarteschlange eine Verschwendung von Ressourcen dar. Andere Nachrichten könnten unter diesen Umständen verdrängt oder mit Verzögerungen verarbeitet werden. Daher verfolgen wir im Folgenden das Ziel, diese Redundanzen durch eine Erweiterung zu verhindern.

Daher erweitern wir das Vorgehen gemäß Algorithmus 4. Wenn eine neue Nachricht empfangen wurde, wird zunächst geprüft, ob in der Warteschlange bereits eine ältere Nachricht desselben Senders vorliegt. Die Funktion  $snd(m)$  gibt den Sender einer Nachricht  $m$  aus. Diese Prüfung kann durch eine iterative Durchsicht aller Nachrichten in der Warteschlange erfolgen, was ineffizient wäre. Daher verwenden wir parallel zu der Prioritätswarteschlange eine zweite Datenstruktur, die alle derzeit in der Prioritätswarteschlange durch Nachrichten vertretenen Sender verzeichnet. Diese zweite Datenstruktur, die einen möglichst effizienten Zugriff auf die Sender ermöglichen sollte, kann als Hashtabelle  $H$  implementiert werden. Als Identifikator kann die in den Nachrichten enthaltene Sender-ID verwendet werden. Der Eintrag des sendenden Fahrzeugs in der Hashtabelle und der Nachrichteneintrag in der Prioritätswarteschlange werden gegenseitig verlinkt. Beim Empfang einer neuen Nachricht kann damit in der Hashtabelle die Bekanntheit des Senders effizient geprüft werden. Ist der Sender dort vorhanden, kann über den abgelegten Verweis die Nachricht in der Prioritätswarteschlange gefunden und durch die neue Nachricht ersetzt werden. Ist der Sender dagegen noch unbekannt, wird die

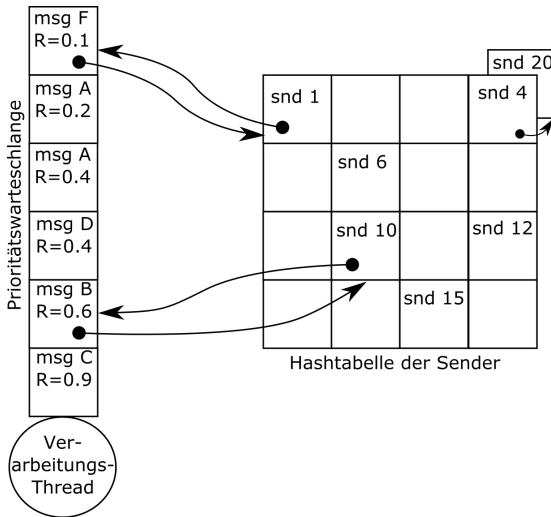


Abbildung 7.1: Nachrichten in der Prioritätswarteschlange und Sender in der Hashtabelle werden gegenseitig verlinkt. Dadurch können alte Nachrichten eines bestimmten Senders schnell gefunden werden.

Nachricht in der Prioritätswarteschlange einsortiert und ein neuer Eintrag in der Hashtabelle angelegt. Um Kollisionen in der Hashtabelle behandeln zu können, können die einzelnen Felder der Hashtabelle als Listen implementiert werden. Beim Entnehmen der momentan relevantesten Nachricht muss der Sender aus der Hashtabelle entfernt werden, wie Algorithmus 5 zeigt. Abbildung 7.1 zeigt die Verknüpfung von Prioritätswarteschlange und Hashtabelle.

Der Fall, dass eine Nachricht durch eine neuere ersetzt wird, erfordert eine weitere Betrachtung. Eine reine Ersetzung vernichtet die Information der alten Nachricht vollständig. Dies ist in jenen Fällen akzeptabel, in denen alle diese Informationen durch die neue Nachricht aktualisiert werden. Das ist aber nicht immer der Fall. Die CAM etwa enthält nicht immer den

---

**Algorithmus 4 :** Das Einfügen einer neuen Nachricht in eine Prioritätswarteschlange und Sendertabelle.

---

```

input : Empfangene Nachricht  $m_{i+1}$ 
if  $H.contains(snd(m_{i+1}))$  then
    sender  $\leftarrow H.getVehicle(snd(m_{i+1}))$  ;
     $Q.remove(sender.msgpointer)$ ;
    sender.msgpointer  $\leftarrow Q.insert(m_{i+1})$ ;
else
    if  $|Q| < r_{process} \cdot 1 s$  then
        sender  $\leftarrow H.addVehicle(snd(m_{i+1}))$  ;
        sender.msgpointer  $\leftarrow Q.insert(m_{i+1})$ ;
    else
        if  $R(m_{i+1}) \geq R(Q.getMin())$  then
             $m_{min} \leftarrow Q.getMin()$ ;
             $H.remove(snd(m_{min}))$ ;
             $Q.removeMin()$ ;
            sender  $\leftarrow H.addVehicle(snd(m_{i+1}))$  ;
            sender.msgpointer  $\leftarrow Q.insert(m_{i+1})$ ;
        else
            drop( $m_{i+1}$ );

```

---



---

**Algorithmus 5 :** Das Entnehmen der momentan relevantesten Nachricht wird nur geringfügig erweitert.

---

```

while true do
    if  $|Q| > 0$  then
        process( $Q.getMax()$ );
         $H.remove(snd(Q.getMax()))$ ;
         $Q.removeMax()$ ;
    sleep( $\frac{1}{r_{process}}$ );

```

---

gleichen Satz an Daten [25]. Ein Beispiel hierfür ist die Positionshistorie des Senders, welche nur maximal zweimal pro Sekunde versandt wird. Enthielte eine alte Nachricht diese Positionshistorie und eine neu empfangene Nachricht nicht, würde ein schlichtes Ersetzen die Positionshistorie ebenfalls entfernen. Daher ist es sinnvoll, den Prozess des Ersetzens durch ein Kombinieren der Informationen von alter und neuer Nachricht zu ergänzen. Ein solches Vorgehen kann den Informationsdurchsatz stark erhöhen. Im Weiteren wurde jedoch auf eine Implementierung und Untersuchung dieses Konzepts verzichtet.

### 7.2.3 Alterung der Relevanzwerte

Bisher verwendet der Selektionsmechanismus den einmal bestimmten Relevanzwert der Nachrichten. Die Informationen in den Nachrichten verlieren mit der Zeit allerdings an Aussagekraft. So verändern sich die Relativpositionen der Fahrzeuge ständig und nur zum Teil in einer vorher-sagbaren Weise. Daher soll in diesem Abschnitt ein Mechanismus ergänzt werden, der verhindert, dass alte Nachrichten in der Warteschlange neue Nachrichten mit geringfügig geringeren Relevanzwerten verdrängen. Das Prinzip ist naheliegend. Die Relevanzwerte alter Nachrichten in der Warteschlange werden mit der Zeit verringert. Allerdings wäre dieser Ansatz direkt umgesetzt nicht effizient, weil immer wieder alle Nachrichten in der Prioritätswarteschlange aktualisiert werden müssten.

Wir führen das Altern daher nicht *direkt* für die wartenden Nachrichten durch, sondern *indirekt*, indem die neu empfangenen Nachrichten tendenziell eine höhere Relevanz zugewiesen bekommen. Neue Nachrichten erhalten beim Empfang einen stetig steigenden Offset  $R_{\text{offset}}$  zugewiesen, welcher zum Relevanzwert addiert wird. Der Offset  $R_{\text{offset}} = \frac{(t - t_{\text{start}})}{\alpha}$  steigt kontinuierlich mit der Zeit  $t$ . Der Parameter  $\alpha$  wird in Sekunden angegeben und steuert die Intensität der Alterung.

Ist eine Nachricht bei Überlast älter als  $\alpha$ , ist sie veraltet. Dies ergibt sich dadurch, dass  $R_{\text{offset}}$  nach dieser Zeit um 1 ansteigt und somit sogar Nachrichten mit einem Relevanzwert von 0 jede alte Nachricht selbst mit der höchsten Relevanz verdrängen können.

Der Datentyp `double` ermöglicht  $R_{\text{offset}}$  ein stetiges Wachstum ohne arithmetischen Überlauf für eine sehr lange Zeit. Nach [491] berechnet sich ein positiver Dezimalwert aus den 11 Bits für den Exponenten  $e$  und den 52 Bits  $b_1$  bis  $b_{52}$  für die Nachkommastellen (Mantisse) einer `double`

## 7 Nachrichtenselektion

Variable nach folgender Formel:

$$\left(1 + \sum_{i=1}^{52} b_{(52-i)} 2^{-i}\right) \times 2^{e-1023} \quad (7.1)$$

Sollen die resultierenden Relevanzwerte stets mit einer Auflösung von mindestens 6 dezimalen Nachkommastellen vorliegen, können  $52 - ld(10^6) \approx 32$  Bits der Mantisse durch den Exponenten verbraucht werden. Damit ergibt sich ein maximale Vorkommazahl von  $2^{32}$ . Wird  $\alpha = 1$  s gesetzt, könnte ein Fahrzeug also ca. 136 Jahre lang ohne einen Überlauf betrieben werden. Bei höheren  $\alpha$ -Werten reduziert sich dieser Zeitraum entsprechend. Für sinnvolle  $\alpha$ -Werte im Sekunden- oder Minutenbereich reicht die Präzision jedoch aus.

### 7.3 Evaluation

Der im vorherigen Abschnitt hergeleitete Selektionsmechanismus soll im Folgenden evaluiert werden. Zunächst werden die in den verwendeten Simulationsszenarien auftretenden Nachrichtenraten diskutiert. Anschließend werden die Wartezeiten der Nachrichten in der Warteschlange, bis sie selektiert und damit weiterverarbeitet werden, analysiert sowie der Einfluss des Alterungsmechanismus' betrachtet. Außerdem wird untersucht, inwieweit die Relevanzschätzung und der Selektionsmechanismus die weit-räumige Erfassung der Umgebung einschränken.

#### 7.3.1 Evaluationsumgebung

Wir verwenden die Abschnitt 6.4.3.1 beschriebene Hardware, um die Analysen auf einer seriennahen Umgebung durchzuführen. Der Selektionsmechanismus kommt vor allem in Überlastsituationen zum Tragen, weswegen wir diese Hardware mit entsprechend hohen Nachrichtenraten versorgen müssen. In diesem Abschnitt werden daher zunächst Erweiterungen unserer Simulationsumgebung aus Kapitel 3 vorgestellt und dann eine Kombination dieser Simulation mit der Kommunikationseinheit beschrieben. Außerdem werden alternative Evaluationsumgebungen beschrieben.

---

```

90900 move 50.929612 6.951889 0 0 0 0 -13.18 13.84 3 0
90932 CAM "0143537155CC0183C0B0C033C81F0095E8CBD[...]"
90972 CAM "0143554155CC0183C35A9033C97F809598D3E[...]"
90980 CAM "0143558155CC0183C43B3033CA25E095A8CFD[...]"
91000 move 50.929623 6.951885 0 0 0 0 -12.12 13.78 3 0
91041 CAM "0143537155CC0183C0B0C033C81F0095E8CBD[...]"
91071 CAM "0143554155CC0183C35A9033C97F809598D3E[...]"
91091 CAM "0143558155CC0183C43B3033CA25E095A8CFD[...]"

```

Abbildung 7.2: Ausschnitt einer generierten Replay-Datei für ein untersuchtes Fahrzeug mit drei Nachbarfahrzeugen. Die erste Spalte enthält einen Zeitstempel. Zeilen mit `move` enthalten aktuelle Bewegungsinformationen des untersuchten Fahrzeugs, etwa Position, Geschwindigkeit und Fahrrichtung. Zeilen mit `CAM` entsprechen einer CAM von benachbarten Fahrzeugen, der Inhalt ist als ASN.1-Byte-String kodiert.

---

### 7.3.1.1 Simulationserweiterungen

Die Effekte zuvor beschriebener Eigenschaften, etwa das Verwerfen von Nachrichten, die Eliminierung alter Nachrichten und die Verringerung der Relevanzwerte mit zunehmendem Alter, können in Situationen mit hoher Last besser evaluiert werden. Wir verwenden daher unsere Simulation aus Kapitel 3 und Kapitel 4, um entsprechend hohe Nachrichtenraten zu erzeugen. Das zugrundeliegende Straßenszenario ist die Autobahn A5 bei Frankfurt aus Abschnitt 4.2. Dort gibt es streckenweise bis zu acht parallele Spuren, womit sich bei höheren Ausstattungsraten entsprechend hohe Nachrichtenraten ergeben [3].

In Kapitel 4 wurden bereits für jedes simulierte Fahrzeug die empfangenen Nachrichten statistisch ausgewertet. An dieser Stelle verwenden wir nun diese empfangenen Nachrichten und erzeugen aus ihnen Log-Dateien, welche wir als Eingabe für eine echte Kommunikationseinheit nutzen. Dazu werden einzelne Fahrzeuge ausgewählt und ihre empfangenen Nachrichten mit Zeitstempel aufgezeichnet (kodiert im ASN.1-Format); ebenfalls mit Zeitstempel werden die aktuellen Bewegungsinformationen der emp-

fangenden Fahrzeuge gespeichert. Der Inhalt einer solchen Log-Datei ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

Wir verwenden in diesem Abschnitt stets eine Relevanzfunktion mit der Distanzfunktion auf Basis konstanter Bewegungsextrapolation. Die Relevanzwerte liegen daher im Bereich  $[0, 0.1]$ . Die Verarbeitungsrate  $r_{\text{process}}$  wird entsprechend realer Anforderungen aus Serienfahrzeugen auf  $r_{\text{process}} = 100 \frac{1}{s}$  gesetzt.

### 7.3.1.2 Kombination von Simulation und Kommunikationseinheit

Die Evaluationsumgebung aus Kommunikationseinheit und Simulation wird in Abbildung 7.3 dargestellt. Die Kommunikationseinheit enthält einen Kommunikationsstack für IEEE 802.11p. Anstatt Daten über den drahtlosen Kanal zu beziehen, werden durch die Simulation erzeugte *Replay*-Daten verwendet. Die gestrichelten Teile des Systems werden nicht verwendet und nur zur Vollständigkeit dargestellt.

Die Kombination aus Simulation und Kommunikationseinheit ermöglicht uns insbesondere die Auswirkungen sehr hoher Nachrichtenraten zu analysieren.

### 7.3.2 Relevanzwerte der Nachrichten

Die Verteilung der Relevanzwerte empfangener Nachrichten wird durch das gewählte Verkehrsszenario maßgeblich beeinflusst. Das TAPASCologne-Szenario weist Straßenverkehr mit moderaten Nachrichtenraten auf. Das Frankfurter A5-Szenario dagegen führt entsprechend seiner Gestaltung nach Abschnitt 4.2 durch sehr hohe Nachrichtenraten zu Überlast.

Die Abbildung 7.4(a) zeigt die relativen Häufigkeiten der Relevanzwerte eingehender Nachrichten für das TAPASCologne-Szenario. Fast 82% der empfangenen Nachrichten weisen Relevanzwerte unter 0.01 auf. Außerdem ist ersichtlich, dass fast alle CAMs in diesem Szenario selektiert werden. Nur ein kleiner Anteil der Nachrichten wird verworfen (0.3%). Dies bedeutet, dass nur selten Überlastsituationen auftreten.

Im Gegensatz dazu gibt es im Frankfurter A5-Szenario viele Überlastsituationen. Die Abbildung 7.5(a) zeigt, dass nur 6.4% der CAMs Relevanzwerte größer 0.05 aufweisen, während 69.2% der Nachrichten sehr geringe Relevanzwerte zugewiesen werden. Die wenigen, aber hoch relevanten Nachrichten sollten daher bevorzugt und mit möglichst kurzer Wartezeit



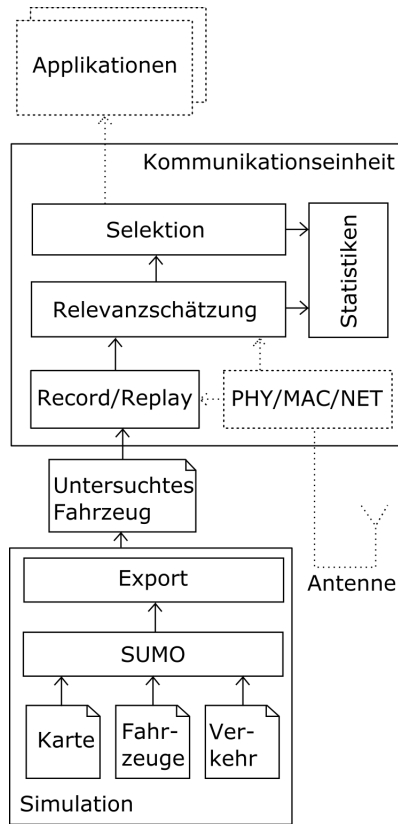
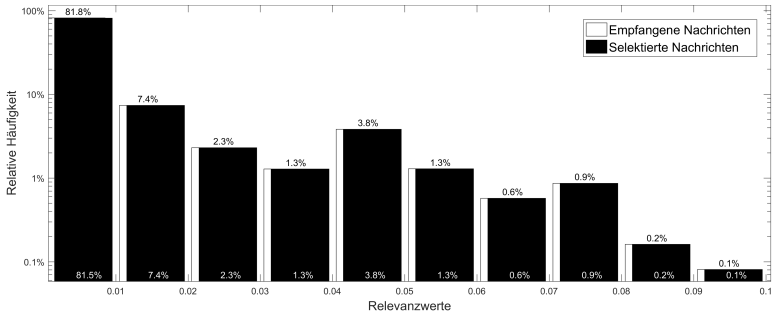
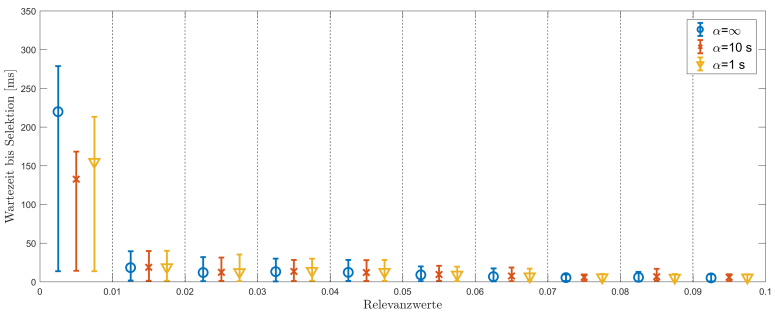


Abbildung 7.3: Simulationsdaten können per *Replay*-Funktion auf einer echten Kommunikationseinheit eingespielt werden. Auf dieser Kommunikationseinheit können dann Laufzeitmessungen und Wartezeiten erhoben werden.

## 7 Nachrichtenselektion

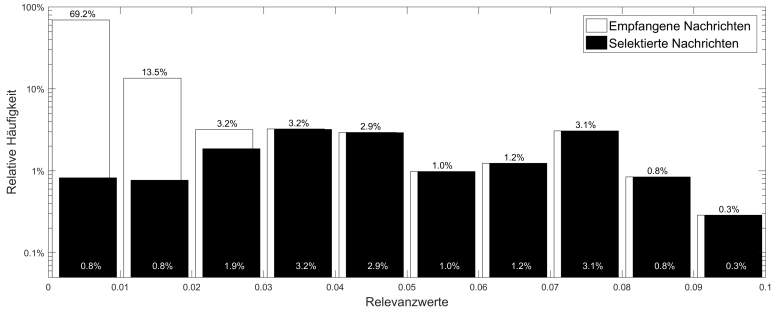


(a) Relative Häufigkeit der Relevanzwerte von empfangenen und selektierten CAMs (logarithmische Skala).

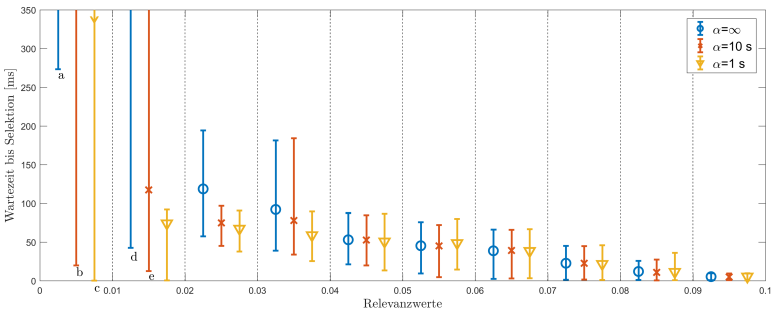


(b) Die Wartezeiten von selektierten CAMs in der Warteschlange für verschiedene Werte des Alterungsparameters  $\alpha$ . Es sind jeweils die 5%-Perzentile, Mittelwerte und 95%-Perzentile markiert.

Abbildung 7.4: Ergebnisse für das TAPASCologne-Szenario. Je geringer  $\alpha$  ist, desto schneller altern die Nachrichten in der Warteschlange.



(a) Relative Häufigkeit der Relevanzwerte von empfangenen und selektierten CAMs (logarithmische Skala).



(b) Die Wartezeiten von selektierten CAMs in der Warteschlange für verschiedene Werte des Alterungsparameters  $\alpha$ . Es sind jeweils die 5%-Perzentile, Mittelwerte und 95%-Perzentile markiert. Die abgeschnittenen Linien weisen die folgenden Werte auf (ms): a) 273/1689/7527; b) 20/585/1100; c) 0/341/1064; d) 43/425/3204; e) 13/117/492.

Abbildung 7.5: Ergebnisse für das Frankfurter A5-Szenario. Je geringer  $\alpha$  ist, desto schneller altern die Nachrichten in der Warteschlange.

selektiert werden. Wie die Abbildung zeigt, werden alle Nachrichten mit Relevanzwerten ab 0.03 und darüber selektiert, während weniger relevante Nachrichten oft verworfen werden.

### 7.3.3 Wartezeiten

Der Selektionsmechanismus hat die Aufgabe, Nachrichten mit hohen Relevanzwerten bevorzugt weiterzuverarbeiten. Bei hohen Raten eingehender Nachrichten sind Wartezeiten bei der Abarbeitung der Warteschlange allerdings nicht zu vermeiden. Da jedoch das Alter einer Nachricht ihren Nutzen für die Applikationen maßgeblich beeinflusst, ist die Wartezeit einer Nachricht in der Warteschlange bis zu ihrer Selektion eine wichtige Eigenschaft mit Einfluss auf das Gesamtsystem. Der Alterungsparameter wird zunächst auf  $\alpha = \infty$  gesetzt, so dass der Alterungsmechanismus deaktiviert ist. Die Wartezeiten werden auf der Hardwareplattform gemessen, welche in Abschnitt 7.3.1 beschrieben wird, vorgenommen.

Für das TAPASCologne-Szenario zeigt sich in Abbildung 7.4(b), dass – obwohl fast alle Nachrichten selektiert werden – die Wartezeiten durch die Relevanzwerte bestimmt werden. Die Wartezeiten für Nachrichten mit Relevanzwerten nahe bei 0.1 liegen unter 10 ms und steigen für Relevanzwerte von 0.01 auf knapp unter 50 ms. Nur Nachrichten mit sehr geringen Relevanzwerten unter 0.01 müssen vergleichsweise lange warten, im Durchschnitt ca. 220 ms.

Die Abbildung 7.5(b) zeigt für das Überlastszenario auf der Frankfurter A5, dass selektierte Nachrichten mit Relevanzwerten zwischen 0.05 und 0.1 durchschnittliche Wartezeiten von unter 50 ms und 95%-Perzentile unter 75 ms aufweisen. Hochrelevante Nachrichten mit Relevanzwerten um 0.1 werden in unter 10 ms verarbeitet. Im Gegensatz dazu steigen die Wartezeiten für Relevanzwerte unter 0.02 signifikant an. Nachrichten dieser Kategorie müssen durchschnittlich 425 ms oder gar 1689 ms warten. Die 95%-Perzentile liegen für Nachrichten der geringsten Relevanzklasse bei 7.5 s.

Der Selektionsmechanismus erfüllt somit sein Ziel, die Nachrichten entsprechend ihrer Relevanzwerte priorisiert zu selektieren. Allerdings sehen wir bei Überlast, dass manche Nachrichten sehr lange auf ihre Verarbeitung warten müssen. Dies soll durch den Alterungsmechanismus verbessert werden. Um den Einfluss der Alterung von Relevanzwerten zu analysieren, wird der Alterungsparameter  $\alpha$  im folgenden auf  $\alpha = 10$  s bzw.

$\alpha = 1$  s gesetzt.

Im TAPASCologne-Szenario ist der Einfluss von  $\alpha$  gering. Er hat nur für Nachrichten mit sehr geringen Relevanzwerten Auswirkungen. Bei  $\alpha = 10$  s sinkt deren Wartezeit auf 140 ms. Für das Frankfurter A5-Szenario mit Überlast dagegen fallen die durchschnittlichen Wartezeiten signifikant ab. Für Relevanzwerte unter 0.01 ergeben sich bei  $\alpha = 1$  s Wartezeiten von 341 ms, Relevanzwerte zwischen 0.01 und 0.02 führen zu Wartezeiten von durchschnittliche 75 ms. Die 95%-Perzentile der Wartezeiten sinken ebenfalls signifikant.

Die Nachrichten, die zur Verarbeitung gelangen, sind somit aufgrund des Alterungsmechanismus' insgesamt wesentlich jünger. Für die gewählten Simulationsszenarien und die verwendete Hardwareplattform empfiehlt sich als Alterungsparameter  $\alpha = 1$  s. Damit sind die Wartezeiten für Nachrichten fast aller Relevanzwerte geringer als 100 ms. Unter anderen Bedingungen, etwa veränderten Hardware-Ressourcen, anderen Straßenszenarien oder nicht zeitkritischen Anwendungen, könnten sich andere Parametersetzungen jedoch als geeigneter erweisen.

### 7.3.4 Erfassung der Umgebung

Die priorisierte Selektion kollisionsrelevanter Nachrichten kann dazu führen, dass weiter entfernte Fahrzeuge nicht mehr erfasst werden. Anwendungen mit einem weiten Horizont könnten somit nicht mehr mit Nachrichten versorgt werden. In diesem Abschnitt wird eine aus der Literatur bekannte Metrik für die Erfassung der weiträumigen Umgebung eines Empfängerfahrzeugs erweitert. Anschließend werden Ergebnisse basierend auf der Simulationsumgebung diskutiert.

#### 7.3.4.1 Filtered Neighborhood Awareness Ratio

Viele Anwendungen, welche nicht zur Vermeidung unmittelbar bevorstehender Kollisionen dienen, nutzen die Nachrichten zur weiträumigen Erfassung der Umgebung. Die Auswertung von Nachrichten weit vorausliegender Fahrzeuge ermöglicht etwa die Erkennung eines Staus und damit eine rechtzeitige Umleitung auf eine freie Straße. Auch Nachrichten, welche von Infrastruktur ausgesendet werden, sind über größere Distanzen wertvoll. Informationen über den Belegungsstand eines Parkhauses in einigen hundert Metern können dem Fahrer einen großen Mehrwert bieten.

## 7 Nachrichtenselektion

Die meisten dieser Anwendungen fallen in den Bereich des Infotainment bzw. der Telematik, weniger in den der Sicherheit.

Die Diversität solcher Anwendungen ist hinsichtlich der Informationsbedürfnisse schwer auf einen Nenner zu bringen. Um bei den oben genannten Beispielen zu bleiben, sind für eine Stauvermeidungsanwendung Nachrichten von Fahrzeugen auf den vorausliegenden Straßen von hoher Relevanz, während für eine Anwendung zur Parkplatzsuche entsprechende Nachrichten aus allen Himmelsrichtungen relevant sein können. In der Regel geht es bei den meisten dieser Anwendungen jedoch um eine möglichst gleichmäßige Abdeckung der Umgebung. Daher hat sich in der Forschung als eine Metrik die *Neighborhood Awareness Ratio* (*NAR*) etabliert. Die Neighborhood Awareness Ratio wird insbesondere zur Bewertung von Routing-Algorithmen verwendet [259, 260].

Die Neighborhood Awareness Ratio  $NAR_{E,d,\Delta t}$  gibt den Anteil der Sender mit der Entfernung  $d$  zu einem Empfänger  $E$  an, von denen Nachrichten innerhalb von  $\Delta t$  empfangen werden:

$$NAR_{E,d,\Delta t} = \frac{ND_{E,d,\Delta t}}{NT_{E,d,\Delta t}}. \quad (7.2)$$

Dazu wird die Anzahl von Fahrzeugen  $ND_{E,d,\Delta t}$ , von denen Nachrichten empfangen wurden, in Relation zur Anzahl aller kommunizierenden Fahrzeuge  $NT_{E,d,\Delta t}$  gesetzt. Abbildung 7.6 veranschaulicht die Bestimmung der Neighborhood Awareness Ratio.

Die Neighborhood Awareness Ratio unterscheidet nicht nach Anzahl und Rate der empfangenen Nachrichten eines bestimmten Fahrzeugs, sondern nur ob im Betrachtungszeitraum ein Fahrzeug mindestens einmal als Sender einer empfangenen Nachricht in Erscheinung trat. Für die genannten Telematik-Anwendungen ist es bei sinnvoll gewähltem  $\Delta t$  ausreichend, hin und wieder eine Nachricht zu erhalten. Für kritische Kollisionssituationen sollten dagegen keine Nachrichten verloren gehen, da jede Nachricht Informationen zur Sicherheit von Leib und Leben enthalten kann.

Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, können unter Umständen nicht alle empfangenen Nachrichten verarbeitet werden. Der von uns vorgeschlagene Mechanismus aus Relevanzschätzung und Selektion verwirft Nachrichten geringer Relevanz. Da die Relevanzfunktion sich nähernde Fahrzeuge höher bewertet, kann die Erfassung der weiträumigen Umgebung und damit die Funktionsfähigkeit bestimmter Anwendungen verringert werden. Daher muss die Neighborhood Awareness Ratio aus Anwendungssicht erwei-

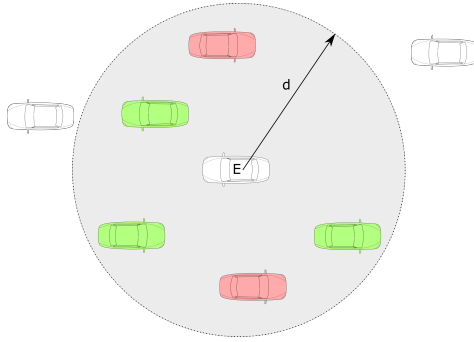


Abbildung 7.6: Veranschaulichung der Neighborhood Awareness Ratio. Nur der hellgraue Bereich mit Abstand  $d$  zum Empfängerfahrzeug  $E$  in der Mitte wird ausgewertet. Von drei Fahrzeugen (grün) werden im Betrachtungszeitraum  $\Delta t$  Nachrichten empfangen, von zwei Fahrzeugen (rot) nicht. Damit ergibt sich ein  $\text{NAR}_{E,d,\Delta t} = \frac{3}{5}$ .

tert werden, wofür wir den Begriff *Filtered Neighborhood Awareness Ratio* (FNAR) vorschlagen:

$$\text{FNAR}_{E,d,\Delta t} = \frac{\text{NS}_{E,d,\Delta t}}{\text{NT}_{E,d,\Delta t}}. \quad (7.3)$$

$\text{NS}_{E,d,\Delta t}$  gibt dabei die Anzahl der nach der Selektion verbleibenden Fahrzeuge im Betrachtungszeitraum und -umfeld an. Wir berechnen die Filtered Neighborhood Awareness Ratio unter Verwendung der *Selection Ratio* ( $SR$ ), also dem Verhältnis der Anzahl von Fahrzeugen  $\text{NS}_{E,d,\Delta t}$ , von welchen Nachrichten selektiert wurden, und der Anzahl von Fahrzeugen  $\text{ND}_{E,d,\Delta t}$ , von welchen Nachrichten empfangen wurden:

$$\text{SR}_{E,d,\Delta t} = \frac{\text{NS}_{E,d,\Delta t}}{\text{ND}_{E,d,\Delta t}}. \quad (7.4)$$

Damit kann die Filtered Neighborhood Awareness Ratio berechnet werden:

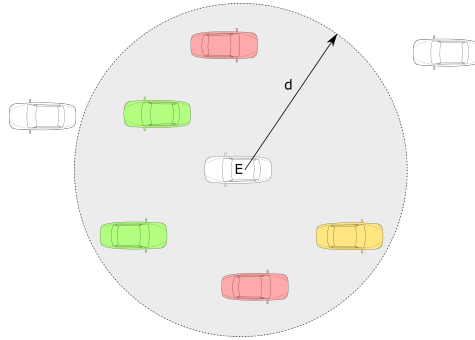


Abbildung 7.7: Veranschaulichung der Filtered Neighborhood Awareness Ratio. Nur der hellgraue Bereich mit Abstand  $d$  zum Empfängerfahrzeug  $E$  in der Mitte wird ausgewertet. Die drei Fahrzeuge aus Abbildung 7.6, von denen Nachrichten empfangen wurden, werden durch Relevanzschätzung und Selektion auf zwei Fahrzeuge (grün) reduziert. Die empfangenen Nachrichten des gelben Fahrzeugs werden aufgrund ihrer Relevanz verworfen. Damit ergibt sich ein  $\text{FNAR}_{E,d,\Delta t} = \frac{2}{5}$ .

$$\text{FNAR}_{E,d,\Delta t} = \text{NAR}_{E,d,\Delta t} \cdot \text{SR}_{E,d,\Delta t}. \quad (7.5)$$

Der Parameter  $d$ , welcher das betrachtete räumliche Umfeld des Empfängerfahrzeugs beschreibt, kann variiert werden, um die (Filtered) Neighborhood Awareness Ratio in verschiedenen Gebieten auszuwerten. Es liegt auf der Hand, dass die Neighborhood Awareness Ratio für größere Distanzen  $d$  gegen 0 geht, da weit entfernte Sender aufgrund der physikalischen Grenzen der Signalübertragung beim Empfänger nicht mehr wahrgenommen werden können (siehe Abschnitt 3.2). Um innerhalb der Kommunikationsreichweite von ca. 1 km eine Unterscheidung nach der Sender-Empfänger-Distanz  $d$  zu erreichen, erheben wir die (Filtered) Neighbor-



hood Awareness Ratio für Distanzbereiche von jeweils 100 m Größe:

$$\text{NAR}_{E,[d_1,d_2],\Delta t} \quad (7.6)$$

$$\text{FNAR}_{E,[d_1,d_2],\Delta t} \quad (7.7)$$

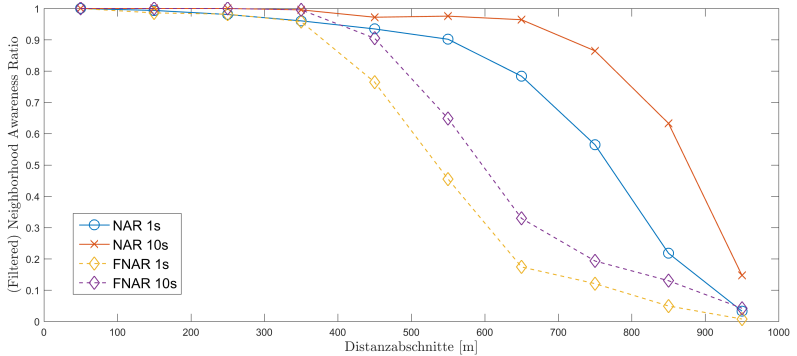
Der Betrachtungszeitraum  $\Delta t$  beeinflusst die Ergebnisse in umgekehrter Form. Je länger  $\Delta t$  gewählt wird, desto eher wird mindestens eine Nachricht eines Senders empfangen. Um diesen Effekt auswerten zu können, verwenden wir in unserer Auswertung  $\Delta t = \{1 \text{ s}, 10 \text{ s}\}$ .

Entsprechend der angegebenen Formeln bestimmen wir die Neighborhood Awareness Ratio, in dem für simulierte Fahrzeuge in den gewählten Distanzbereichen und Betrachtungszeiträumen sowohl die Anzahl der sendenden Fahrzeuge als auch die Anzahl die Fahrzeuge, von denen beim Empfänger Nachrichten ankommen, bestimmen. Für die Filtered Neighborhood Awareness Ratio wird außerdem noch die Anzahl der Fahrzeuge ermittelt, deren Nachrichten die Selektion erfolgreich passieren. Diese Auswertungen wurden jeweils für das TAPASCologne-Szenario und die A5 bei Frankfurt durchgeführt. Das Frankfurter Szenario stellt eine Situation mit sehr hohen Nachrichtenraten dar. Das TAPASCologne-Szenario entspricht dagegen Verkehr in einer urbanen Umgebung mit lokal und zeitlich sehr unterschiedlichen Nachrichtenraten, aber seltener Überlast.

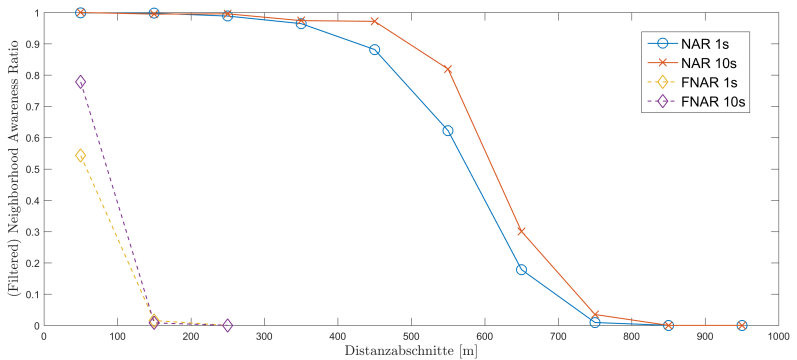
### 7.3.4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse unserer Auswertungen werden in Abbildung 7.8 dargestellt, wobei für die Filtered Neighborhood Awareness Ratio die Distanzfunktion mit konstanter Bewegungsextrapolation verwendet wird. In Abbildung 7.8(a) weist die Neighborhood Awareness Ratio bis in hohe Distanzen große Werte auf. Auch weiter entfernte Fahrzeuge werden somit weitgehend erfasst. Der längere Betrachtungszeitraum von 10 s führt zu einer signifikant besseren Erfassung auch in hohen Distanzen. Bis zu 400 m weit werden alle sendenden Fahrzeuge nahezu vollständig erfasst; ab ca. 700 m sinkt die NAR dann stark ab. Im kürzeren Betrachtungszeitraum von  $\Delta t = 1 \text{ s}$  beginnt die NAR bereits nach ca. 200 m zu sinken. Die für die Anwendungen maßgebliche Filtered Neighborhood Awareness Ratio folgt den NAR bis in den Distanzbereich [300 m, 400 m], wonach die FNAR für beide  $\Delta t$ -Werte stark abfällt. Auch die FNAR ist bei dem höheren Betrachtungszeitraum  $\Delta t = 10 \text{ s}$  etwas größer. Ein längerer Be-

## 7 Nachrichtenselektion



(a) TAPASCologne-Szenario (Metropolregion Köln).



(b) Frankfurter A5-Szenario (8 parallele Spuren).

Abbildung 7.8: Die Neighborhood Awareness Ratio und die Filtered Neighborhood Awareness Ratio für zwei ausgewählte Szenarien.

obachtungszeitraum wirkt sich also günstig auf die weiträumige Erfassung der Umgebung aus.

In Abbildung 7.8(b) zeigt sich ein anderes Bild. Die Neighborhood Awareness Ratio beginnt bereits bei geringen Distanzen stark zu sinken. Der in diesem Szenario stark ausgelastete Funkkanal und die dadurch verringerte Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Nachrichtenübertragung hemmt die Erfassung von Sendern in höheren Distanzen signifikant. In extremer Weise wirkt sich das hohe Kommunikations- und Nachrichtenaufkommen auf die Filtered Neighborhood Awareness Ratio aus. Die Relevanzschätzung und die Selektion geben nur noch die Nachrichten aus der unmittelbaren Umgebung aus dem Distanzbereich von 0 bis 100 m an die Anwendungen weiter.

Diese Auswertung zeigt, dass die Verwendung eines Filtermechanismus' aus Relevanzschätzung und Selektion die Erfassung der weiträumigen Umgebung eines Fahrzeugs verringern kann. Dies gilt insbesondere bei Relevanzfunktionen, die, wie von uns vorgeschlagen, Nachrichten von kollisionssträchtigen Fahrzeugen als besonders relevant einstufen. Der Schutz von Leib und Leben hat Priorität, und in Situationen nahe der Verarbeitungsgrenze der Fahrzeugsysteme scheint eine entsprechende Priorisierung sinnvoll.

## *7 Nachrichtenselektion*

## 8 Schluss

In diesem Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen gegeben.

### 8.1 Zusammenfassung

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ist eine Innovation, an der seit Jahrzehnten intensiv geforscht und standardisiert wurde. Bei der Entwicklung von Lösungen für zukünftige Serienfahrzeuge ergeben sich neue Herausforderungen. Mit einem steigendem Marktanteil von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation wird es zu immer höhere Raten empfangener Nachrichten kommen. Dies kann zu Überlastsituationen führen, in denen mehr Nachrichten empfangen werden als von den Steuergeräten verarbeitet werden können. Die Fahrzeugsysteme müssen jedoch so ausgelegt werden, dass strenge Anforderungen hinsichtlich Robustheit, Qualität, Kosten, Gewicht und Größe jederzeit eingehalten werden. Diese Arbeit hat zum Ziel, die Verarbeitung von hohen Raten empfangener Nachrichten aus einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation im Detail zu betrachten und Lösungsmöglichkeiten für Überlastsituationen aufzuzeigen.

Als Basis für die Durchführung mehrerer Analysen und Evaluationen wurde zunächst eine Simulationsumgebung entwickelt. Diese besteht aus drei Modulen. Eine Verkehrssimulation simuliert realitätsnahen Straßenverkehr in einem definierten Verkehrsszenario und bildet damit die dynamische Bewegung der Kommunikationsknoten zueinander ab. Die darauf aufbauende Kommunikationssimulation bestimmt, welche Nachrichten zwischen zwei Fahrzeugen erfolgreich übertragen werden. Dafür wurde ein Kanalmodell entwickelt, das für ein Sender-Empfänger-Paar die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Nachrichtenübertragung ermittelt. Die Anwendungssimulation dient einerseits dazu, das Senden der Nachrichten auszulösen, und andererseits zur Auswertung der empfangenen Nachrichten.

Die Simulationsumgebung wurde eingesetzt, um die Nachrichtenraten

quantitativ zu erfassen. Zunächst wurde bestimmt, bei welcher Geschwindigkeit die meisten Nachrichten versendet werden. Dies ist bei  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  der Fall. Diese Geschwindigkeit wurde daher im Folgenden als Standardgeschwindigkeit verwendet. Es wurde bestimmt, welche Raten von empfangenen Nachrichten bei den einzelnen Fahrzeugen auftreten. Im Ergebnis zeigt sich, dass bereits bei Ausstattungsraten von 40% mehr als 500 Nachrichten pro Sekunde empfangen werden. Neben den Simulationen wurden analytische Formeln entwickelt, welche durch Simulationsergebnisse validiert wurden. Somit waren auch Parameterstudien möglich. Dabei wurde festgestellt, dass in einem 20-spurigen Szenario, welches etwa in Kanada oder China existiert, bereits bei einer Ausstattungsrate von ca. 15% mehr als 500 Nachrichten pro Sekunde empfangen werden.

Anschließend wurde die Systemarchitektur einer Serienfahrzeug-Integration der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation betrachtet. Eine bisherigen Forschungsprojekten entlehnte Systemarchitektur genügt jedoch nicht den Anforderungen. Um diese Herausforderung zu lösen, wurde die Architektur im Eingangspfad um zwei zusätzliche Module ergänzt. Das Relevanzschätzungs-Modul hat die Aufgabe, jeder empfangenen Nachricht in effizienter Weise einen Relevanzwert zuzuweisen, während das Selektions-Modul die Nachrichten auf Basis dieser Relevanzwerte zur Verarbeitung auswählt oder verwirft.

Zur Bestimmung der Relevanz von empfangenen Nachrichten wurde ein neues Verfahren entwickelt. Eine sogenannte Relevanzfunktion weist jeder Nachricht einen umso höheren Relevanzwert zu, je früher der Sender der Nachricht dem Empfänger nahekommen kann. Dies folgt dem Grundgedanken, dass kollisionsvermeidende Anwendungen in jedem Fall mit relevanten Nachrichten versorgt werden müssen. Die Relevanzfunktion verwendet Distanzfunktionen, die den Abstand von Sender und Empfänger auf verschiedene Weise extrapolieren. Als Ausgangspunkt für diese Berechnung werden die Positionen, die Geschwindigkeiten und die Fahrtrichtungen sowohl des Senders als auch des Empfängers verwendet. In dieser Arbeit wurde zunächst eine Bewegungsextrapolation mit konstanten Bewegungseigenschaften angenommen. Das heißt, dass die Fahrtrichtung und Geschwindigkeit von Sender und Empfänger als konstant angenommen werden. In einem weiteren Ansatz wurden die dynamischen Veränderungen der Bewegungseigenschaften im täglichen Verkehr integriert. Dazu wurde angenommen, dass der Sender einer Nachricht seine Bewegung so verändert, dass er dem Empfänger möglichst nahe kommt, mithin also

eine Kollision provoziert. Auf diese Weise werden die Relevanzwerte tendenziell zu hoch eingeschätzt, was jedoch gegenüber einer tendenziellen Unterschätzung der Relevanzwerte weniger gravierende Folgen hat.

Die Distanzfunktionen wurden mit drei Methoden evaluiert. Zunächst wurden ihre Ausgabewerte für vorgegebene Eingabewerte und Parameter grafisch dargestellt. Dabei sind die Positionen von Sender und Empfänger in ein Empfänger-zentriertes Koordinatensystem transformiert. Auf diese Weise ließen sich die Effekte der Eingabegrößen (Positionen, Geschwindigkeiten und Fahrrichtungen) und Parameter studieren. Im Ergebnis haben beide Distanzfunktionen die Relevanzwerte in gewünschter Weise erzeugt. Die grafische Analyse kann jedoch nur für ausgewählte Szenarien erfolgen und erfasst daher nicht die Variabilität realer Straßensituationen. Aus diesem Grund wurde in der zweiten Evaluation die Qualität der Distanzfunktionen in einer Simulation bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Distanzfunktion mit dynamischer Bewegungsextrapolation in einem sehr spezifischen Szenario am besten abschneidet, während die Distanzfunktion mit konstanter Bewegung in einem urbanen Szenario die besten Ergebnisse liefert. Außerdem wurden die Funktionen implementiert und die Laufzeiten verglichen. Zu diesem Zweck wurden die Relevanzfunktion und die Distanzfunktionen auf einer seriennahen Hardware-Umgebung integriert und simulierte Kommunikationsdaten eingespielt. Dabei zeigte sich, dass alle Distanzfunktionen mit geringen Laufzeiten implementierbar sind.

Die Selektion der Nachrichten erfolgt auf der Basis ihrer Relevanzwerte und ist auch bei Überlast robust. In einem intuitiven ersten Ansatz wurde eine Prioritätswarteschlange verwendet, in der die Nachrichten sortiert nach ihren Relevanzwerten verarbeitet werden. Die Nachricht mit dem jeweils höchsten Relevanzwert wird dieser Warteschlange zyklisch entnommen. Falls mehr Nachrichten empfangen werden als verarbeitet werden können, werden die Nachrichten mit den geringsten Relevanzwerten verworfen. Da dieser einfache Ansatz jede Nachricht nur für sich betrachtet, kann es vorkommen, dass mehrere Nachrichten desselben Senders auf ihre Verarbeitung warten und unter Umständen chronologisch falsch verarbeitet werden. Aus diesem Grund werden in einem zweiten Schritt über ein Verzeichnis der derzeit bekannten Sender alte Nachrichten durch neue ersetzt. Um Situationen vorzubeugen, in denen Nachrichten sehr lange in der Warteschlange verbleiben und gegebenenfalls neuere Nachrichten verdrängen, wurde ein Alterungsmechanismus eingeführt. Dieser führt dazu,

## 8 Schluss

dass die Relevanzwerte von älteren Nachrichten in der Warteschlange in Relation zu den Relevanzwerten neuer Nachrichten verringert werden.

Die Evaluation der Selektion erfolgte mit drei Methoden, die alle auf einer Simulation mit zwei Straßenszenarien beruhen. Das erste Straßenszenario repräsentiert urbanen Verkehr mit kaum Überlast, das zweite Straßenszenario dagegen führt zu vielen Überlastsituationen. Während im ersten Straßenszenario mit kaum Überlast fast alle Nachrichten unabhängig von ihren Relevanzwerten verarbeitet werden, zeigt sich im zweiten Straßenszenario mit Überlast, dass die Selektion Nachrichten mit höheren Relevanzwerten klar bevorzugt. Alle der 82.4% verworfenen Nachrichten weisen geringe Relevanzwerte auf. In einer zweiten Evaluation wurden die Wartezeiten von Nachrichten in der Warteschlange gemessen. Diese Messungen wurden einer realistischen Hardwareumgebung vorgenommen. Hier zeigt sich in beiden Straßenszenarien, dass ein höherer Relevanzwert mit einer geringen Wartezeit korreliert. Im Überlastszenario ist außerdem ein starker Einfluss des Alterungsmechanismus' zu beobachten. Wenn Nachrichten nach einer Sekunde veraltet sind, führt dies unter den gegebenen Umständen zu durchschnittlichen Wartezeiten unter 350 ms. Bei deaktivierter Alterung betragen die Wartezeiten hingegen bis zu 1.7 s, manche Nachrichten warten sogar über 7.5 s auf ihre Verarbeitung. In einer letzten Evaluation wurde die weiträumige Erfassung der Umgebung nach der Selektion untersucht. Da in Überlastsituationen nur ein Teil der Nachrichten zu den Anwendungen gelangt, wird deren Erfassungshorizont verkleinert. Die Resultate zeigen, dass dieser Effekt bei der spezifischen Auslegung der Relevanzfunktionen auf kollisionsrelevante Nachrichten die Umgebungserfassung drastisch einschränken kann. Nur ein Umkreis von weniger als 100 m wird noch weitgehend erfasst.

Mit dieser Arbeit liegt erstmals eine umfängliche Betrachtung zu Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten bei hohen Raten empfangener Nachrichten in Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsnetzwerken vor. Mit Hilfe einer Erweiterung der typischen Systemarchitektur um eine Relevanzschätzung und Selektion relevanter Nachrichten können auch bei Überlast die wichtigsten Nachrichten verarbeitet werden. Dies ist ein zentraler Baustein für die Entwicklung eines stabilen Gesamtfahrzeugsystems.



## 8.2 Ausblick

Die effiziente Priorisierung von Nachrichten aus einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation bietet Möglichkeiten für weitere Studien. In dieser Arbeit bezieht sich die Relevanz vor allem auf das Kollisionsrisiko. Unter veränderten Bedingungen kann Relevanz in anderer Weise definiert werden, womit neue Relevanzfunktionen erforderlich sind. Welche Relevanz eine Nachricht hat, wird im Wesentlichen durch die Anwendungen vorgegeben, welche die Nachrichten verarbeiten. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, kann jedoch auch bei konkreten Anwendungen die Qualität der Relevanzschätzung stark von der Wahl der Einsatzszenarien abhängig sein. Daher gilt es zu beobachten, welche Anwendungen und Einsatzszenarien in Zukunft eine wichtige Rolle spielen und ob neue Anwendungen erdacht werden, die heute noch nicht bekannt sind. Falls sehr verschiedene Anwendungen auf die Nachrichten zurückgreifen, könnte der Einsatz mehrerer paralleler Relevanzfunktionen und Selektionsmechanismen Sinn ergeben. Die Nachrichten könnten auf diese Weise vorsortiert und verschiedenen Anwendungen zugeführt werden.

Ein möglicher Einsatzbereich von Relevanzschätzung und Selektion außerhalb eines Fahrzeugs ist das in Abschnitt 2.2.5.4 eingeführte *Mobile Edge Computing*. Hier kommunizieren Fahrzeuge über herkömmliche Mobilfunktechnologien, die Daten werden jedoch nicht in zentralisierten Servern verarbeitet, sondern lokal in der Nähe der Mobilfunk-Basisstationen. Würde sich diese Technologie etablieren, entstünden in diesen dezentralen Recheneinheiten große Lasten. Zwar sind die Anforderungen bezüglich Energieverbrauch, Platzbedarf und Gewicht hier weniger streng, die Kostenvorgaben sind jedoch oftmals ein limitierender Faktor. Die Verwendung von Relevanzschätzung und Selektion könnte dazu beitragen, die verfügbaren Rechenressourcen effizient auszunutzen und auch bei Überlast die wichtigsten Nachrichten zu verarbeiten.

## Abkürzungsverzeichnis

- ABS – Anti-Blockier-System, 6  
ASIL – Automotive Safety Integrity Level, 11  
ASR – Antriebs-Schlupfregelung, 6
- BSM – Basic Safety Message, 52  
BTP – Basic Transport Protocol, 47
- C2C – Car-to-Car-Kommunikation, 13  
C2C CC – CAR 2 CAR Communication Consortium, 38  
C2I – Car-to-Infrastructure-Kommunikation, 13  
CA – Certificate Authority, 59  
CAM – Cooperative Awareness Message, 49  
CAN – Controller Area Network, 9  
Car-to-X – Car-to-X-Kommunikation, 13  
Car2Car – Car-to-Car-Kommunikation, 13  
CSMA – Carrier Sense Multiple Access, 41
- DCC – Decentralized Congestion Control, 60  
DENM – Decentralized Environmental Notification Message, 48  
DSRC – Dedicated Short Range Communication, 13
- ECDSA – Elliptic Curve Digital Signature Algorithm, 60  
ESP – Elektronisches Stabilitätsprogramm, 6  
ETSI – Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen, 38
- FNAR – Filtered Neighborhood Awareness Ratio, 177
- GF – Greedy Forwarding, 47
- ITS G5 – 5,9 GHz-Kanal für Intelligent Transport Systems, 14

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

- LDM – Local Dynamic Map, 52
- LLC – Logical Link Control Sublayer, 39
- LTC – Long-Term Certificate, 59
- LTCA – Long-Term Certificate Authority, 59
- LTE – Long Term Evolution, 31
  
- MAC – Medium Access Control, 39
- MANET – Mobile Ad-Hoc Network, 14
- MOST – Media Oriented Systems Transport, 9
  
- NAR – Neighborhood Awareness Ratio, 176
  
- PC – Pseudonym Certificate, 60
- PCA – Pseudonym Certificate Authority, 59
- PKI – Public Key Infrastructure, 58
  
- RCA – Root Certificate Authority, 60
  
- SCMS – Security Credential Management System, 60
- SR – Selection Ratio, 177
- SUMO – Simulation of Urban Mobility, 66
  
- TDMA – Time Division Multiple Access, 41
  
- V2I – Vehicle-to-Infrastructure Communication, 13
- V2V – Vehicle-to-Vehicle Communication, 13
- V2X – Vehicle-to-X Communication, 13
- VANET – Vehicular Ad-Hoc Network, 14

## *ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS*

# Literaturverzeichnis

---

## Eigene Veröffentlichungen

---

- [1] BREU, Jakob; BRAKEMEIER, Achim; MENTH, Michael: Analysis of Cooperative Awareness Message rates in VANETs. In: *Proceedings of the 13th International Conference on ITS Telecommunications 2013*. IEEE, 2013, S. 8–13
- [2] BREU, Jakob; MENTH, Michael: Relevance Estimation of Cooperative Awareness Messages in VANETs. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications*. IEEE, 2013, S. 1–5
- [3] BREU, Jakob; BRAKEMEIER, Achim; MENTH, Michael: A Quantitative Study of Cooperative Awareness Messages in Production VANETs. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2014, S. 98
- [4] BREU, Jakob; MENTH, Michael: An Improved Relevance Estimation Function for Cooperative Awareness Messages in VANETs. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles* Bd. LNCS 8435. 2014, S. 43–56
- [5] BREU, Jakob; MENTH, Michael: Comparison of Relevance Estimation Mechanisms for Cooperative Awareness Messages in VANETs. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2015, S. 1–5
- [6] BREU, Jakob; MENTH, Michael: Efficient Selection of VANET Messages for Series Vehicles. In: *Proceedings of the 11th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars)*. IEEE, 2016, S. 309–315
- [7] CHEN, Qi; ROTH, Tobias; TING YUAN; BREU, Jakob; KUHN, Florian; ZOLLNER, Marius; BOGDANOVIC, Miro; WEISS, Christian; HILLENBRAND, Jorg; GERN, Axel: DSRC and radar object matching for cooperative driver assistance systems. In: *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2015, S. 1348–1354
- [8] YUAN, Ting; ROTH, Tobias; CHEN, Qi; BREU, Jakob; BOGDANOVIC, Miro; WEISS, Christian A.: Track-to-Track Association for Object Matching in an Inter-Vehicle Communication System. In: *SPIE Optical Engineering + Applications* Bd. 9596. 2015, S. 09

## LITERATURVERZEICHNIS

- [9] BOGDANOVIC, Miro; BREU, Jakob; WEISS, Christian: *Patent DE102012009431 A1: Integration netzbasierter Dienste zur Fahrdienstleistungsvermittlung in kraftfahrzeuggebundene Infotainmentsysteme.* 2012
- [10] BOGDANOVIC, Miro; BREU, Jakob; SCHOCH, Manuel; WEISS, Christian: *Patent DE102013009480 A1: Warnblinkvorrichtung für ein Fahrzeug.* 2013
- [11] BINDER, Thomas; WEDEL, Andreas; BÜHREN, Markus; HERGET, Constantin; STUDER, Stefan; MAIER, Holger; BREU, Jakob; HAFNER, Michael; HUG, Tobias; HÄMMERLING, Carsten; PRESSEL, Ulrich: Assistenzsysteme in neuer Dimension. In: *ATZ Sonderheft E-Klasse.* ATZ, 2016, S. 70–81

---

## Weitere Literatur

---

- [12] HUMMEL, Thomas; KÜHN, Matthias; BENDE, Jenö; LANG, Antje; GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E. V. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme: Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer.* Berlin, August 2011
- [13] LUND, Adrian: *Drivers and Driver Assistance Systems: How well do they match?* Lake George, NY, 18. Juni 2013 (Driving Assessment Conference 2013)
- [14] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION: *Traffic Safety Facts.* September 2015
- [15] FROST AND SULLIVAN LTD. (Hrsg.): *Internet of Cars: Connected Safety and Mobility Applications are the Real Innovations from IOT in Cars.* November 2015
- [16] BRATZEL, Stefan; TELLERMANN, Ralf; HAUKE, Niels; CENTER AUF AUTOMOTIVE MANAGEMENT (Hrsg.): *Die Innovationen der globalen Automobilkonzerne: Eine Analyse der Zukunftstrends und Innovationsleistungen der globalen Automobilhersteller und Zulieferer.* 2015
- [17] SCHALLA, Philipp; HOLZHAUSER, Klaus; NAUJOKS, Stefanie: *Connected Car in Europe: Strategies and technologies for connected driving.* 2015
- [18] MCCORMICK, Scott: *U.S. Department of Transportation Announces up to \$42 Million in Next Generation Connected Vehicle Technologies: New York City, Tampa, FL and Wyoming Selected for Competitive Pilot Programs.* <http://www.its.dot.gov/pilots/>. Version: 2015

## LITERATURVERZEICHNIS

- [19] *Secretary Foxx Unveils President Obama's FY17 Budget Proposal of Nearly \$4 Billion for Automated Vehicles and Announces DOT Initiatives to Accelerate Vehicle Safety Innovations.* <http://tinyurl.com/luok8ea>. Version: 14. Januar 2016
- [20] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM: *Memorandum of Understanding for OEMs within the CAR 2 CAR Communication Consortium on Deployment Strategy for Cooperative ITS in Europe.* 2011
- [21] HARDING, John; POWELL, Gregory; YOON, Rebecca; FIKENTSCHER, Joshua; DOYLE, Charlene; SADE, Dana; LUKUC, Mike; SIMONS, Jim; WANG, Jing; NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (Hrsg.): *Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application: DOT HS 812 014.* Washington, DC, 2014
- [22] WEISS, Christian: V2X Communication in Europe – From Research Projects Towards Standardization and Field Testing of Vehicle Communication Technology. In: *Computer Networks* Bd. 55. 2011, S. 3103–3119
- [23] STATISTA GMBH: *Connected Cars - Statista-Dossier.* Hamburg, 2015
- [24] ALICH, Stefan; BAUER, Christoph; ECKARD, Michael; GRÜNDINGER, Wolfgang; HIMMELREICH, Achim; KOHNEN, Jens; KREISS, Elmar B.; SCHNEIDER, Jan; ZAUCHE, Marcel; BUNDESVERBAND DIGITALE WIRTSCHAFT (Hrsg.): *Connected Cars: Chancen und Risiken für die künftigen Anbieter im Automobilmarkt.* Berlin, 2016
- [25] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.* V.1.3.0. 2013-08
- [26] GLAS, Benjamin: *Trusted computing für adaptive Automobilsteuergeräte im Umfeld der Inter-Fahrzeug-Kommunikation.* Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2011
- [27] GLAS, Benjamin; SANDER, Oliver; MÜLLER-GLASER, Klaus D.; BECKER, Jürgen: Echtzeitfähige Car-to-X-Kommunikationsabsicherung und E/E-Architekturintegration. In: *ATZ elektronik.* 2012, S. 68–76
- [28] SCHERPING, Richard; STAHLIN, Ulrich; BERTRAM, Torsten: Vehicle2X Data Preprocessing for Safety Functions. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications, IEEE,* 2013, S. 1–5
- [29] BORGEEST, Kai: *Elektronik in der Fahrzeugtechnik: Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement.* 3. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014

## LITERATURVERZEICHNIS

- [30] REIF, Konrad: *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 4., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 3834886580
- [31] CHARETTE, Robert N.: *This car runs on code*. <http://spectrum.ieee.org/transportation/systems/this-car-runs-on-code>. Version: 2009
- [32] ESKANDARIAN, Azim (Hrsg.): *Handbook of Intelligent Vehicles*. London : Springer, 2012
- [33] FLEMING, Bill: Sensors? A Forecast. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* Bd. 8. 2013, S. 4–12
- [34] GAVRIILIDIS, Alexandros; SCHWERDTFEGER, Tim; VELTEN, Jorg; SCHAU-LAND, Sam; HOHMANN, Lars; HASELHOFF, Anselm; BOSCHEN, Fritz; KUM-MERT, Anton: Multisensor Data Fusion for Advanced Driver Assistance Systems - the Active Safety Car Project. In: *Proceedings of the 7th International Workshop on Multidimensional Systems*, 2011, S. 1–5
- [35] KHALEGHI, Bahador; KHAMIS, Alaa; KARRAY, Fakhreddine O.; RAZAVI, Saiedeh N.: Multisensor Data Fusion: A Review of the State-of-the-art. In: *Information Fusion* Bd. 14. 2013, S. 28–44
- [36] MISSEL, Joachim; MEHREN, Dirk; REICHMANN, Matthias; LALLINGER, Mar-tin; BERNZEN, Werner; WEIKERT, Günther: Intelligent Drive: entspannter und sicherer fahren. In: *ATZ Extra* Bd. 18. 2013, S. 96–104
- [37] INTERNATIONAL, SAE: *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*. 2014
- [38] BUBURUZAN, Teodor: *Beyond Day-1 from the Perspective of the Auto-motive Industry*. 3. November 2015 (Präsentation beim Car-2-Car Forum 2015)
- [39] SAWADE, Oliver; RADUSCH, Ilja: Survey and Classification of Cooperati-ve Automated Driver Assistance Systems. In: *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference*, 2015, S. 1–5
- [40] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr: Verkehrsunfälle 2013*. Wies-baden, 2. Juli 2014
- [41] RUSCIO, Daniele; CICERI, Maria R.; BIASSONI, Federica: How Does a Colli-sion Warning System Shape Driver’s Brake Response Time? The Influence of Expectancy and Automation Complacency on Real-Life Emergency Bra-king. In: *Accident, Analysis and Prevention* Bd. 77. 2015, S. 72–81
- [42] LEE, John D.; HOFFMAN, Joshua D.; HAYES, Elizabeth: Collision Warning Design to Mitigate Driver Distraction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2004, S. 65–72



- [43] MOHEBBI, R.; GRAY, R.; TAN, H. Z.: Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 51. 2009, S. 102–110
- [44] AHTAMAD, Mujthaba; GRAY, Robert; HO, Cristy; REED, Nick; SPENCE, Charles: Informative Collision Warnings: Effect of Modality and Driver Age. In: *Proceedings of the 8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2015, S. 330–336
- [45] FITCH, Gregory M.; RAKHA, Hesham A.; ARAFEH, Mazen; BLANCO, Myra; GUPTA, Santosh K.; ZIMMERMANN, Richard P.; HANOWSKI, Richard J.; US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (Hrsg.): *Safety Benefit Evaluation of a Forward Collision Warning System*. Washington, DC, Februar 2008
- [46] ZIMMERMANN, Werner; SCHMIDGALL, Ralf: *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle und Standards*. Wiesbaden : Vieweg, 2006
- [47] STEINER, Wilfried: *Echtzeitanwendungen mit Automotive Ethernet*. <http://www.elektroniknet.de/automotive/bussysteme/artikel/113002/>. Version: 2014
- [48] LIM, Hyung-Taek; KREBS, Benjamin; VOLKER, Lars; ZÄHRER, Peter: Performance Evaluation of the Inter-Domain Communication in a Switched Ethernet Based In-Car Network. In: *Proceedings of the 36th Conference on Local Computer Networks*, IEEE, 2011, S. 101–108
- [49] AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL: *AEC-Q100 Failure Mechanism Based Stress Test Qualification For Integrated Circuits*. <http://www.aecouncil.com/AECDocuments.html>. Version: 11. September 2014
- [50] INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION: *Road vehicles – Functional safety*. 2011
- [51] ROUF, Ishtiaq; MILLER, Rob; MUSTAFA, Hossen; TAYLOR, Travis; OH, Sangho; XU, Wenyuan; GRUTESER, Marco; TRAPPE, Wade; SESKAR, Ivan: Security and Privacy Vulnerabilities of In-Car Wireless Networks: A Tire Pressure Monitoring System Case Study. In: *Proceedings of USENIX Security Symposium*, 2010, S. 1–16
- [52] COSSY, Melanie: *Entwicklungsprozess und Softwarearchitektur für sicherheitsbezogene verteilte Anwendungen im Fahrzeug*. 2005
- [53] HEINRICH, Christian: Fighting Driver Distraction — Recent Developments 2013-2015. In: *Proceedings of the 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, 2015, S. 1–8

## LITERATURVERZEICHNIS

- [54] SBD AUTOMOTIVE (Hrsg.): *Safe Car: Driver Monitoring and its Future Implications for Autonomous Vehicles*. September 2015
- [55] SUN, Yuechuan; WU, Sijing; SPENCE, Ian: The Commingled Division of Visual Attention. In: *PLoS one* Bd. 10. 2015, S. e0130611
- [56] CAO, Yujia; MAHR, Angela; CASTRONOVO, Sandro; THEUNE, Mariët; STAHL, Christoph; MÜLLER, Christian A.: Local Danger Warnings for Drivers: the Effect of Modality and Level of Assistance on Driver Reaction. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent User Interfaces*. ACM, 2010, S. 239–248
- [57] VAA, Truls; ASSUM, Terje; ELVIK, Rune; NORWEGIAN CENTRE FOR TRANSPORTATION RESEARCH (Hrsg.): *Driver Support Systems: Estimating Road Safety Effects at Varying Levels of Implementation*. 2014
- [58] EDWARDS, Christopher; HANKEY, Jon; KIEFER, Raymond; GRIMM, Donald; LEASK, Nina: Understanding Driver Perceptions of a Vehicle to Vehicle (V2V) Communication System Using a Test Track Demonstration. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* Bd. 4. 2011, S. 444–461
- [59] BALK, Stacy A.; YANG, C. Y. D.: Assessing Driver Reactions to Two Collision Warning Systems—Findings from a Simulation Experiment. In: *ITE Journal* Bd. 84. 2014, S. 33–38
- [60] KILLAT, Moritz; HARTENSTEIN, Hannes: An Empirical Model for Probability of Packet Reception in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications* Bd. 2009. Hindawi Publishing, 2009, S. 4:1–4:12
- [61] POPESCU-ZELETIN, Radu; RADUSCH, Ilja; RIGANI, Mihai A.: *Vehicular-2-X Communication: State-of-the-Art and Research in Mobile Vehicular Ad hoc Networks*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2010
- [62] HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, K. P.: A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 46. 2008, S. 164–171
- [63] SICHITIU, Mihail; KIHIL, Maria: Inter-vehicle Communication Systems: A Survey. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 10. 2008, S. 88–105
- [64] PAPADIMITRATOS, Panos; LA FORTELLE, Arnaud; EVENSEN, Knut; BRIGNOLO, Roberto; COSENZA, Stefano: Vehicular Communication Systems: Enabling Technologies, Applications, and Future Outlook on Intelligent Transportation. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 47. 2009, S. 84–95

- [65] KARAGIANNIS, Georgios; ALTINTAS, Onur; EKICI, Eylem; HEIJENK, Geert; JARUPAN, Boangoat; LIN, Kenneth; WEIL, Timothy: Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 13. 2011, S. 584–616
- [66] ZEADALLY, Sherali; HUNT, Ray; CHEN, Yuh-Shyan; IRWIN, Angela; HASSAN, Aamir: Vehicular Ad Hoc Networks (VANETS): Status, Results, and Challenges. In: *Telecommunication Systems* Bd. 50. 2012, S. 217–241
- [67] WU, Xinzhou; SUBRAMANIAN, Sundar; GUHA, Ratul; WHITE, Robert G.; LI, Junyi; LU, Kevin W.; BUCCERI, Anthony; ZHANG, Tao: Vehicular Communications Using DSRC: Challenges, Enhancements, and Evolution. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Bd. 31. 2013, S. 399–408
- [68] ILARRI, Sergio; DELOT, Thierry; TRILLO, Raquel: A Data Management Perspective on Vehicular Networks. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015, S. 1–43
- [69] AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E.: Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *Computer Networks* Bd. 38. 2002, S. 393–422
- [70] WEI, Ting-Ying; QIU, Zhi-Liang; YOUNG, Chung-Ping; LO, Yu-Tsung: Implementation of In-vehicle Multi-sensor Information Fusion Gateway for Cooperative Driving. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, IEEE, 2011, S. 19–24
- [71] HARTENSTEIN, Hannes; LABERTEAUX, Kenneth P.: *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. Wiley, 2009
- [72] SCHUESSLER, R.: *Intervehicle Hazard Warning: Schlußbericht*. 2003
- [73] REICHARDT, D.; MIGLIETTA, M.; MORETTI, L.; MORSINK, P.; SCHULZ, W.: CarTALK 2000: Safe and Comfortable Driving Based Upon Inter-Vehicle-Communication. In: *Proceedings fo the Intelligent Vehicle Symposium*, 2002, S. 545–550
- [74] FRANZ, Walter: *Inter-Vehicle Communications Based on Ad Hoc Networking Principles: The FleetNet Project*. Karlsruhe : Universitäts-Verlag, 2005
- [75] FESTAG, Andreas; NOECKER, Gerhard; 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 6th International Workshop on Intelligent Transportation*. 2008, S. 123–128

## LITERATURVERZEICHNIS

- [76] HILLER, Andreas; HINSBERGER, Arno; STRASSBERGER, Markus; VERBURG, Dirk: Results from the WILLWARN Project. In: *Proceedings of the 6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services*. Ertico, 2007, S. 1–8
- [77] BRIGNOLO, R.; SPENCE, A.; ZOTT, C.; BRAKEMEIER, Achim; MOKKADEM, A. B.: *Safespot project overview*. Presentation at the SAFESPOT/WATCH-OVER workshop, 2008
- [78] DIETZ, U.; BIRLE, C.; BORSETZKY, B.; CHEN, Y.; GEHLEN, G.; GLÄSER, S.; JODLAUK, G.; KAHLE, J.; NOECKER, Gerhard; SCHMIDT, A.; SOMMER, Christoph; SORIES, S.; COCAR CONSORTIUM (Hrsg.): *CoCar Feasibility Study: Technology, Business and Dissemination*. 2009
- [79] SCHULZE, Matthias: *PRE-DRIVE C2X: Development and Testing for C2X Communication Based Applications and Services: Presentation at Second Joint Easyway/PRE-DRIVE C2X Workshop*. Brüssel, 2010
- [80] TROTZKE, Ingo; MÜHLBACHER, Dominik; BULD, Susanne; KRÜGER, Hans-Peter: *simTD (Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland): Empirische Wirkungsermittlung von Car-2-X-Technologien im Feldversuch und in der Fahrsimulation*. 2010 (19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik)
- [81] SIMTD KONSORTIUM: *Deliverable D5.5: TP5-Abschlussbericht – Teil A*. 30. Juni 2013
- [82] ALEXANDER, Paul; HALEY, David; GRANT, Alex: Cooperative Intelligent Transport Systems: 5.9-GHz Field Trials. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. 2011, S. 1213–1235
- [83] TSUBOI, Tsutomu: Wireless Vehicular Network Standard Harmonization. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 7865. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013, S. 75–83
- [84] HESS, Sören: *European Vehicle Manufacturers Working Hand in Hand on Deployment of Cooperative Intelligent Transport Systems and Services (C-ITS)*. 10. Oktober 2012
- [85] GENERAL MOTORS: *Cadillac to Introduce Advanced ‘Intelligent and Connected’ Vehicle Technologies on Select 2017 Models: Super Cruise and V2V technologies slated for production in about two years*. <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2014/Sep/0907-its-overview.html>. Version: 7. September 2014
- [86] COHDA WIRELESS: *Cohda Applauds News of GM’s First ‘Connected Car’*. 23. September 2014

- [87] TSUBOI, Tsutomu; SEKIGUCHI, Tatsuya: Optimization for Wireless Vehicular Network System in Urban Area. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 8435. Cham : Springer International Publishing, 2014, S. 126–142
- [88] TOYOTA: *Toyota Bringing Advanced ITS Technology to Mass-market Models*. <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/9676551/>. Version: 2015
- [89] SMITH, Daniel C.: *Federal Motor Vehicle Safety Standards: Vehicle-to-Vehicle (V2V) Communications; Advance Notice of Proposed Rulemaking (ANPRM); Notice of Availability of Technical Report. 49 CFR Part 571*. 2014
- [90] UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE (Hrsg.): *Intelligent Transportation Systems: Vehicle-to-Infrastructure Technologies Expected to Offer Benefits, but Deployment Challenges Exist*. Washington, DC, 15. September 2015
- [91] BETTISWORTH, Caitlin; BURT, Matthew; CHACHICH, Alan; HARRINGTON, Ryan; HASSOL, Joshua; KIM, Anita; LAMOUREUX, Katie; LAFRANCE-LINDEN, Dawn; LAONEY, Cynthia; PERLMAN, David; RITTER, Gary; SLOAN, Suzanne M.; WALLISCHECK, Eric; INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITS) JOINT PROGRAM OFFICE (Hrsg.): *Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications: Report to Congress*. Washington, DC, 16. Juli 2015
- [92] *Committee Releases Draft Proposal to Keep Families Safe on the Road*. <http://tinyurl.com/oj7nqdp>. Version: 14. Oktober 2015
- [93] DRESSLER, Falko; KARGL, Frank; OTT, Jorg; TONGUZ, Ozan; WISCHHOF, Lars: Research Challenges in Intervehicular Communication: Lessons of the 2010 Dagstuhl Seminar. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 49. IEEE, 2011, S. 158–164
- [94] SIMTD KONSORTIUM: *Deliverable D5.5: TP5-Abschlussbericht – Teil B-1A: Simulation realer Verkehrsunfälle zur Bestimmung des Nutzens für ausgewählte simTD-Anwendungsfälle auf Basis der GIDAS Wirkfeldanalyse*. 17. Januar 2013
- [95] HIROSE, Toshiya; MAKINO, Tomohiro; TANIGUCHI, Masanobu; KUBOTA, Hidenobu: *Activation Timing in a Vehicle-to-Vehicle Communication System for Traffic Collision*. 2016 (SAE Technical Paper 2016-01-0147)
- [96] DOECKE, Sam; GRANT, Alex; ANDERSON, Robert W. G.: The Real-World Safety Potential of Connected Vehicle Technology. In: *Traffic Injury Prevention*. 2015, S. S31–5

## LITERATURVERZEICHNIS

- [97] AIJAZ, Amer; BOCHOW, Bernd; DÖTZER, Florian; FESTAG, Andreas; GERLACH, Matthias; KROH, Rainer; LEINMÜLLER, Tim: Attacks on Inter Vehicle Communication Systems - an Analysis. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation*, 2006, S. 189–194
- [98] HEINRICH, Thomas; ORTLEPP, Jörg; SCHMIELE, Jürgen; VOSS, Heiko; GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Verbesserung der Sicherheit durch Kommunikation zwischen Fahrzeug und Straße*. Berlin, Oktober 2011
- [99] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.): *Weißbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. Brüssel, 28. März 2011
- [100] VAN DER LINDEN, Geert: *Cost Benefit Analysis*. Brüssel, 20. Oktober 2015 (C-ITS Plenary Meeting – DG MOVE)
- [101] FROST AND SULLIVAN LTD. (Hrsg.): *Strategic Outlook for Autonomous Heavy-duty Trucks: Autonomous Truck Capabilities to First Appear in the Form of Truck Platooning by 2022*. März 2015
- [102] NIEDERLÄNDISCHES MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR UND UMWELT (Hrsg.): *European Truck Platooning Challenge 2016*. Oktober 2015
- [103] REIS, A. B.; SARGENTO, S.: Leveraging Parked Cars as Urban Self-Organizing Road-Side Units. In: *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference*, 2015, S. 1–5
- [104] LOCHERT, Christian; SCHEUERMANN, Bjorn; WEWETZER, Christian; LUEBKE, Andreas; MAUVE, Martin: Data aggregation and roadside unit placement for a vanet traffic information system. In: *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking*. ACM, 2008, S. 58–65
- [105] MANGEL, Thomas: *Inter-Vehicle Communication at Intersections: An Evaluation of Ad-hoc and Cellular Communication*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2012
- [106] ARANITI, Giuseppe; CAMPOLO, Claudia; CONDOLUCI, Massimo; IERA, Antonio; MOLINARO, Antonella: LTE for Vehicular Networking: A Survey. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 51. IEEE, 2013, S. 148–157
- [107] WARREN, Dan; DEWAR, Calum; GSMA INTELLIGENCE (Hrsg.): *Understanding 5G: Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile*. Dezember 2014
- [108] GONSA, Osvaldo; ERDEM, Bettina: *Hybrid Communications Challenges for the Future*. 29. September 2015 (Car-2-Car Forum 2015)

- [109] MIR, Zeeshan H.; FILALI, Fethi: LTE and IEEE 802.11p for Vehicular Networking: A Performance Evaluation. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications*. Springer, 2014, S. 1–15
- [110] PICONE, Marco; AMORETTI, Michele; ZANICHELLI, Francesco: Evaluating the Robustness of the DGT Approach for Smartphone-based Vehicular Networks. In: *Proceedings of the 36th Conference on Local Computer Networks*. IEEE, 2011, S. 820–826
- [111] JIANG, Daniel; CHEN, Qi; DELGROSSI, Luca: Optimal Data Rate Selection for Vehicle Safety Communications. In: *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on VehiculAr Inter-NETworking*. ACM, 2008, S. 30–38
- [112] EICHLER, Stephan: Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard. In: *Proceedings of the 66th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2007, S. 2199–2203
- [113] BILSTRUP, Katrin; UHLEMANN, Elisabeth; STROM, Erik G.; BILSTRUP, Urban: Evaluation of the IEEE 802.11p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication. In: *Proceedings of the 68th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2008, S. 1–5
- [114] MITTAG, Jens: *Characterization, Avoidance and Repair of Packet Collisions in Inter-Vehicle Communication Networks*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2012
- [115] QUALCOMM (Hrsg.): *Qualcomm Snapdragon Automotive Solutions. Driving In-Vehicle Innovation*. Version: 2015. <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon/automotive>
- [116] DOPPLER, K.; RINNE, M. P.; JANIS, P.; RIBEIRO, C.; HUGL, K.: Device-to-Device Communications; Functional Prospects for LTE-Advanced Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops*, IEEE, 2009, S. 1–6
- [117] QUALCOMM: *Creating a Digital 6th Sense with LTE Direct*. Juli 2014
- [118] MUMTAZ, Shahid; RODRIGUEZ, Jonathan: *Smart Device to Smart Device Communication*. Cham : Springer, 2014
- [119] VINEL, Alexey; STAEHLE, Dirk; TURLIKOV, Andrey: Study of Beaconing for Car-to-Car Communication in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops*, IEEE, 2009, S. 1–5
- [120] PHAN, Mai-Anh; REMBARZ, Rene; SORIES, Sabine: *A Capacity Analysis for the Transmission of Event and Cooperative Awareness Messages in LTE Networks*. 2011

## LITERATURVERZEICHNIS

- [121] SCHOCH, Elmar; KARGL, Frank; WEBER, Michael: Communication Patterns in VANETs. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 46. IEEE, 2008, S. 119–125
- [122] MAZZOLA, Markus; SCHAAF, Gunther; NIEWELS, Frank; KURNER, Thomas: Exploration of Centralized Car2X-Systems over LTE. In: *Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2015, S. 1–5
- [123] WEWETZER, Christian; CALISKAN, Murat; MEIER, Klaus; LUEBKE, Andreas: Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication. In: *Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications*, IEEE, 2007, S. 1–6
- [124] GOULIANOS, Angelos A.; ABDULLAH, Nor F.; KONG, Di; MELLIOS, Evangelos; BERKOVSKYY, Denys; DOUFEXI, Angela; NIX, Andrew: Evaluation of 802.11 and LTE for Automotive Applications. In: *Proceedings of the 80th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2014, S. 1–5
- [125] MÖLLER, Andreas; NUCKELT, Jorg; ROSE, Dennis M.; KÜRNER, Thomas: Physical Layer Performance Comparison of LTE and IEEE 802.11p for Vehicular Communication in an Urban NLOS Scenario. In: *Proceedings of the 80th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2014, S. 1–5
- [126] 3G PARTNERSHIP PROJECT: *Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on LTE Support for V2X Services (Release 14)*. V0.1.0. Februar 2015
- [127] BECK, Michael T.; FELD, Sebastian; LINNHOF-POPIEN, Claudia; PÜTZSCHLER, Uwe: Mobile Edge Computing. In: *Informatik-Spektrum* Bd. 39. 2016, S. 108–114
- [128] KLUGEL, Markus; KELLERER, Wolfgang: Introduction of an Efficiency Metric for Device-to-Device Communication in Cellular Networks. In: *Proceedings of the 80th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2014, S. 1–6
- [129] MURPHY, P.; WELSH, E.; FRANTZ, J. P.: Using Bluetooth for short-term ad hoc connections between moving vehicles: a feasibility study. In: *Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2002, S. 414–418
- [130] FRANK, Raphael; BRONZI, Walter; CASTIGNANI, German; ENGEL, Thomas: Bluetooth Low Energy: An Alternative Technology for VANET Applications. In: *Proceedings of the 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, IEEE, 2014, S. 104–107
- [131] UMARE, Nikita; PATIL, Sulbha: Performance of Zigbee/IEEE 802.15. 4 in VANET For Vehicle Overtaking Assistance System. In: *International Journal on Advanced Research in Technology and Management*. 2014, S. 1–5



- [132] ALTINTAS, Onur; SEKI, Koichi; KREMO, Haris; MATSUMOTO, Makiko; ONISHI, Ryokichi; TANAKA, Hideaki: Vehicles as Information Hubs During Disasters: Glueing Wi-Fi to TV White Space to Cellular Networks. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine* Bd. 6. IEEE, 2014, S. 68–71
- [133] ZHU, Zhenkai; ZHANG, Lixia; WAKIKAWA, Ryuji: Supporting mobility for internet cars. In: *IEEE Communications Magazine* 49 (2011), Nr. 5, S. 180–186
- [134] ZHENG, Kan; ZHENG, Qiang; CHATZIMISIOS, Periklis; XIANG, Wei; ZHOU, Yiqing: Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges and Solutions. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. IEEE, 2015, S. 1
- [135] THE CALM FORUM (Hrsg.): *The CALM Handbook: Communications Access for Land Mobiles for the Provision of Intelligent Transport Services Using Wireless Interfaces*. März 2006
- [136] ENKELMANN, Wilfried; BECHLER, Marc; BERNINGER, Harald; BOHNER, Thomas M.; BRANDES, Rolf; CALISKAN, Murat; COSENZA, Stefano; DEHN, Joachim; HÄUSLER, Florian; HAYASHI, Masato; HINSBERGER, Arno; LIN, Lan; IRION, Joachim; KERNCHEN, Ralf; KRATZSCH, Claudia; LÜBKE, Andreas; MIKA, Adalbert; NYGREN, Niclas; PAULUS, Ingrid; RADUSCH, Ilja; STÖBE, Markus: *Deliverable D4.1 - Detailed Description of Selected Use-Cases and Corresponding Technical Requirements*. 20. Oktober 2008
- [137] TOOR, Yasser; MUHLETHALER, Paul; LAOUITI, Anis; LA FORTELLE, Arnaud: Vehicle Ad Hoc networks: Applications and Related Technical Issues. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 10. IEEE, 2008, S. 74–88
- [138] WILLKE, Theodore; TIENRAKOOL, Patcharinee; MAXEMCHUK, Nicholas: A Survey of Inter-Vehicle Communication Protocols and their Applications. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 11. IEEE, 2009, S. 3–20
- [139] SCHAAF, Gunther; PASSMANN, Christian; MÖNNICH, Jörg; HAUG, Matthias; NIEWELS, Frank: A Method for Evaluation and Selection of C2X Communication Functions. In: *Proceedings of the 8th European Congress on ITS*. 2011, S. 1–10
- [140] BUCHENSCHWEIT, Andreas; SCHAUB, Florian; KARGL, Frank; WEBER, Michael: A VANET-Based Emergency Vehicle Warning System. In: *Proceedings of the Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2009, S. 1–8
- [141] MARTINEZ, Francisco; TOH, Chai-Keong; CANO, Juan-Carlos; CALAFATE, Carlos; MANZONI, Pietro: Emergency Services in Future Intelligent Transportation Systems Based on Vehicular Communication Networks. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 2 (2010), Nr. 2, S. 6–20

## LITERATURVERZEICHNIS

- [142] AL-SULTAN, Saif; AL-BAYATTI, Ali H.; ZEDAN, Hussein: Context-Aware Driver Behavior Detection System in Intelligent Transportation Systems. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 62. IEEE, 2013, S. 4264–4275
- [143] SHARMA, Vaibhav: Introducing ‘Rating System for Vehicles’ in Existing VANET Infrastructure. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Information and Communication Technology*. 2010, S. 1–12
- [144] LIU, Congyi; CHIGAN, Chunxiao: RPB-MD: A Novel Robust Message Dissemination Method for VANETs. In: *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, S. 1–6
- [145] HAAS, Jason J.; HU, Yih-Chun: Communication Requirements for Crash Avoidance. In: *Proceedings of the 7th ACM International Workshop on Vehicular InterNetworking*, ACM, 2010 (VANET ’10), S. 1–10
- [146] PURSCHWITZ, Arne; SERGEYS, Filip; GRUGL, Karl-Maria; FISCHER, Hennes: *ITS for Motorcycles: Challenges and a Step towards VRU - Safety*. 2015 (Car-2-Car Forum 2015)
- [147] YIN, Jijun; ELBATT, Tamer; YEUNG, Gavin; RYU, Bo; HABERMAS, Stephen; KRISHNAN, Hariharan; TALTY, Timothy: Performance Evaluation of Safety Applications over DSRC Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc NETWORKS*. ACM, 2004, S. 1
- [148] ELBATT, Tamer; GOEL, Siddhartha K.; HOLLAND, Gavin; KRISHNAN, Hariharan; PARIKH, Jayendra: Cooperative Collision Warning Using Dedicated Short Range Wireless Communications. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ACM, 2006 (VANET ’06), S. 1–9
- [149] BISWAS, Subir; TATCHIKOU, R.; DION, F.: Vehicle-to-Vehicle Wireless Communication Protocols for Enhancing Highway Traffic Safety. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 44. IEEE, 2006, S. 74–82
- [150] FRANKE, Kai; GONTER, Mark; LESCHKE, André; KÜÇÜKAY, Ferit: Steigerung der Fahrzeugsicherheit durch Car2X-Kommunikation. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* Bd. 114. 2012, S. 918–923
- [151] AN, Natalya; MAILE, Michael; JIANG, Daniel; MITTAG, Jens; HARTENSTEIN, Hannes: Balancing the Requirements for a Zero False Positive/Negative Forward Collision Warning. In: *Proceedings of the 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, IEEE, 2013, S. 191–195

- [152] MASSIE, Dawn L.; CAMPBELL, Kenneth L.; BLOWER, Daniel F.: Development of a Collision Typology for Evaluation of Collision Avoidance Strategies. In: *Accident Analysis & Prevention* Bd. 25. 1993, S. 241–257
- [153] KOSCH, T.; ADLER, Christian; EICHLER, S.; SCHROTH, C.; STRASSBERGER, M.: The Scalability Problem of Vehicular Ad Hoc Networks and How to Solve It. In: *Wireless Commun* 13 (2006), Nr. 5, S. 22–28
- [154] MILLER, R.; QINGFENG HUANG: An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System. In: *Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference*, 2002, S. 317–321
- [155] MAILE, Michael; DELGROSSI, Luca: Cooperative Intersection Collision Avoidance System for Violations (CICAS-V) for Avoidance of Violation-based Intersection Crashes. In: *Enhanced Safety of Vehicles*. 2009, S. 1–14
- [156] MAILE, M.; CHEN, Qi; BROWN, G.; DELGROSSI, L.: Intersection Collision Avoidance: From Driver Alerts to Vehicle Control. In: *Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2015, S. 1–5
- [157] TIELERT, Tessa; KILLAT, Moritz; HARTENSTEIN, Hannes; LUZ, Raphael; HAUSBERGER, Stefan; BENZ, Thomas: The Impact of Traffic-Light-to-Vehicle Communication on Fuel Consumption and Emissions. In: *Internet of Things (IOT)*, 2010, S. 1–8
- [158] MISENER, James; BARNES, M.; CHAN, Ching-Yao; CODY, Delphine; DICKEY, Susan; GOODSSELL, R.; GORDON, Tim; KIM, Zu W.; KUHN, Tom; LIAN, Thang; NELSON, David; NOWAKOWSKI, Christopher; NUBUKAWA, K.; SHARAFSALEH, Ashkan; SHLADOVER, Steven; SPRING, John; VAN DER WERF, Joel; ZHANG, Wei-Bin; ZHANG, Liping; ZHOU, Kun: Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS): Signalized Left Turn Assist and Traffic Signal Adaptation: UCB-ITS-PRR-2010-20. In: *PATH Research Report* (2010)
- [159] OLAVERRI-MONREAL, Cristina; GOMES, Pedro; FERNANDES, Ricardo; VEIRA, Fausto; FERREIRA, Michel: The See-Through System: A VANET-Enabled Assistant for Overtaking Maneuvers. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2010, S. 123–128
- [160] VINEL, A.; BELYAEV, E.; EGIAZARIAN, K.; KOUCHERYAVY, Y.: An Overtaking Assistance System Based on Joint Beaconing and Real-Time Video Transmission. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61 (2012), Nr. 5, S. 2319–2329
- [161] FUCHS, Simone; RASS, Stefan; KYAMAKYA, Kyandoghene: A Constraint-Based and Context-Aware Overtaking Assistant with Fuzzy-Probabilistic Risk Classification. In: *Wireless Applications and Computing*. 2008, S. 93

## LITERATURVERZEICHNIS

- [162] BÖHM, Annette; JONSSON, Magnus; UHLEMANN, Elisabeth: Adaptive Cooperative Awareness Messaging for Enhanced Overtaking Assistance on Rural Roads. In: *Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2011, S. 1–5
- [163] WANG, Ziyuan; KULIK, Lars; RAMAMOZHANARAO, Kotagiri: Proactive Traffic Merging Strategies for Sensor-enabled Cars. In: *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ACM, 2007, S. 39–48
- [164] VINEL, Alexey; BELYAEV, Evgeny; BELLALTA, Boris; HU, Honglin: Live Video Streaming in Vehicular Networks. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 8435. Cham : Springer International Publishing, 2014, S. 156–162
- [165] AN, Natalya; RIIHILJARVI, Janne; MAHONEN, Petri: Studying the Delay Performance of Opportunistic Communication in VANETs with Realistic Mobility Models. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2009, S. 1–5
- [166] AN, Natalya; MITTAG, Jens; HARTENSTEIN, Hannes: Designing Fail-Safe and Traffic Efficient 802.11p-based Rear-End Collision Avoidance. In: *Ad Hoc Networks* Bd. 37. 2016, S. 3–13
- [167] ALSABAAN, Maazen; ALASMARY, Waleed; ALBASIR, Abdurhman; NAIK, Kshirasagar: Vehicular Networks for a Greener Environment: A Survey. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 15. IEEE, 2013, S. 1372–1388
- [168] WEDEL, Jan W.; SCHÜNEMANN, Björn; RADUSCH, Ilja: V2X-Based Traffic Congestion Recognition and Avoidance. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks*, 2009, S. 637–641
- [169] KNORR, Florian; SCHRECKENBERG, Michael: Influence of Inter-Vehicle Communication on Peak Hour Traffic Flow. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* Bd. 391. 2012, S. 2225–2231
- [170] PAN, Juan; KHAN, M. A.; POPA, I. S.; ZEITOUNI, K.; BORCEA, C.: Proactive Vehicle Re-Routing Strategies for Congestion Avoidance. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, IEEE, 2012, S. 265–272
- [171] LI, Fan; WANG, Yu: Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* Bd. 2. IEEE, 2007, S. 12–22
- [172] DJAHEL, Soufiene; DOOLAN, Ronan; MUNTEAN, Gabriel-Miro; MURPHY, John: A Communications-Oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities: Challenges and Innovative Approaches. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 17. IEEE, 2015, S. 125–151

- [173] TSAO, Shiao-Li; CHENG, Chien-Ming: Design and Evaluation of a Two-Tier Peer-to-Peer Traffic Information System. In: *IEEE Communications Magazine*. IEEE, 2011, S. 165–172
- [174] THEMANN, Philipp; ZLOCKI, Adrian; ECKSTEIN, Lutz: Energieeffiziente Fahrzeuglängsführung durch V2X-Kommunikation. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* Bd. 116. 2014, S. 62–67
- [175] KUNDU, Sanjiban; KUNDU, Sandipan: Flexible Vehicle Speed Control Algorithms for Eco-Driving. In: *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference*, 2015, S. 1–5
- [176] BÖHM, Annette; JONSSON, Magnus; KUNERT, Kristina; VINEL, Alexey: Context-Aware Retransmission Scheme for Increased Reliability in Platooning Applications. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 8435. Cham : Springer International Publishing, 2014, S. 30–42
- [177] SJÖBERG, Katrin: *Platooning – When, Where and How*. 4. November 2015 (Car-2-Car Forum 2015)
- [178] HUMPHREYS, Hugh L.; BATTERSON, Joshua; BEVLY, David; SCHUBERT, Raymond: *An Evaluation of the Fuel Economy Benefits of a Driver Assistive Truck Platooning Prototype Using Simulation*. 2016 (SAE Technical Paper 2016-01-0167)
- [179] KOKOLAKI, E.; KARALIOPOULOS, M.; STAVRAKAKIS, I.: Value of Information Exposed: Wireless Networking Solutions to the Parking Search Problem. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, IEEE, 2011, S. 187–194
- [180] KOKOLAKI, Evangelia; KARALIOPOULOS, Merkouris; STAVRAKAKIS, Ioannis: Opportunistically Assisted Parking Service Discovery: Now It Helps, Now It Does Not. In: *Pervasive and Mobile Computing* Bd. 8. 2012, S. 210–227
- [181] TONGUZ, Ozan; BOBAN, Mate: Multiplayer games over Vehicular Ad Hoc Networks: A new application. In: *Ad Hoc Networks* Bd. 8. 2010, S. 531–543
- [182] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM: *Draft C2C-CC Basic System Standards Profile*. 1.0.4. 31. Januar 2014
- [183] SAE INTERNATIONAL: *J2945/1 – Dedicated Short Range Communication (DSRC) Minimum Performance Requirements*. 2016
- [184] MORGAN, Y. L.: Notes on DSRC & WAVE Standards Suite: Its Architecture, Design, and Characteristics. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 12. IEEE, 2010, S. 504–518

## LITERATURVERZEICHNIS

- [185] IWAHASHI, Toshimune: New Developments in ITS Information and Communications Systems in Japan. In: *New Breeze* Bd. 24. 2012, S. 1–6
- [186] KISHIMOTO, Kengo; YAMADA, Masaya; JINNO, Masayuki: Cooperative Inter-Infrastructure Communication System Using 700 MHz Band. In: *Sei Technical Review*. 2014, S. 19–23
- [187] TANIGUCHI, Yuichi; OOTA TOSHIFUMI, KOBAYASHI, MASAFUMI; URAYAMA, Hirofumi; KOREEDA, Yoshiteru: Driving Safety Support Systems Utilizing ITS Radio System. In: *Sei Technical Review*. 2014, S. 14–18
- [188] FUJITA, Koichi: Vehicle Safety and Information Technology: (interne englische Übersetzung durch Steffen Seeliger und Gao Shan). In: *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers* Bd. 118. 2015, S. 1–5
- [189] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*. V1.1.1. 2010-09
- [190] DIAS, Joao A.; RODRIGUES, Joel J.; ZHOU, Liang: Cooperation Advances on Vehicular Communications: A Survey. In: *Vehicular Communications* Bd. 1. Elsevier Science Publishers, 2014, S. 22–32
- [191] KENNEY, John B.: Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. IEEE, 2011, S. 1162–1182
- [192] IEEE: *Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture*. 2013. 11. Dezember 2013
- [193] UZCATEGUI, Roberto; ACOSTA-MARUM, Guillermo: Wave: A Tutorial. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 47. IEEE, 2009, S. 126–133
- [194] SCHMIDT-EISENLOHR, Felix: *Interference in Vehicle-to-Vehicle Communication Networks: Analysis, Modeling, Simulation and Assessment*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2010
- [195] IEEE: *Logical Link Control*. 1998. 7. Mai 1998
- [196] COTTINGHAM, David N.; WASSELL, Ian J.; HARLE, Robert K.: Performance of IEEE 802.11a in Vehicular Contexts. In: *Proceedings of the 65th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2007, S. 854–858
- [197] WELLENS, Matthias; WESTPHAL, Burkhard; MAHONEN, Petri: Performance Evaluation of IEEE 802.11-based WLANs in Vehicular Scenarios. In: *Proceedings of the 65th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2007, S. 1167–1171

- [198] GONZÁLEZ, Victor; SANTOS, Alberto L.; PINART, Carolina; MILAGRO, Francisco: Experimental Demonstration of the Viability of IEEE 802.11B Based Inter-vehicle Communications. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities*, Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2008, S. 1:1–1:7
- [199] MA, Xiaomin; CHEN, Xianbo; REFAI, Hazem H.: Performance and Reliability of DSRC Vehicular Safety Communication: A Formal Analysis. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2009 (2009), S. 1–13
- [200] SJÖBERG, Katrin: *Medium Access Control for Vehicular Ad Hoc Networks*. Bd. 3513. Göteborg : Chalmers, 2013
- [201] MITTAG, Jens; SCHMIDT-EISENLOHR, Felix; KILLAT, Moritz; TORRENT-MORENO, Marc; HARTENSTEIN, Hannes: MAC Layer and Scalability Aspects of Vehicular Communication Networks. In: *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. 2010, S. 219–269
- [202] ARMSTRONG, Lee; FISHER, Wayne: *Status of Project IEEE 802.11 Task Group p*. [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp\\_update.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp_update.htm). Version: 2010
- [203] *Cars That Talk: Commission Earmarks Single Radio Frequency for Road Safety and Traffic Management*. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-08-1240\\_en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-1240_en.htm?locale=en). Version: 5. August 2008
- [204] VAN EENENNAAM, Martijn: *Providing over-the-horizon awareness to driver support systems by means of multi-hop ad hoc vehicle -to-vehicle communication*. <http://essay.utwente.nl/58509/>. Version: 2008
- [205] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Access Layer Specification for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band*. V1.2.0. 2012-11
- [206] STROM, Erik G.: On Medium Access and Physical Layer Standards for Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. IEEE, 2011, S. 1183–1188
- [207] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications Equipment Operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz Frequency Band; Harmonized EN Covering the Essential Requirements of Article 3.2 of the R&TTE Directive*. V1.2.0. 2013-05

## LITERATURVERZEICHNIS

- [208] IEEE: *IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and Information Exchange Between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. D7.01. 1. Juli 2009
- [209] HAN, Chong; DIANATI, Mehrdad; TAFAZOLLI, Rahim; KERNCHEM, Ralf; SHEN, Xuemin: Analytical Study of the IEEE 802.11p MAC Sublayer in Vehicular Networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 13. IEEE, 2012, S. 873–886
- [210] JIANG, Daniel; DELGROSSI, Luca: IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2008, S. 2036–2040
- [211] KAREDAL, Johan; TUFVESSON, Fredrik; ABBAS, Taimoor; KLEMP, Oliver; PAIER, Alexander; BERNADÓ, Laura; MOLISCH, Andreas F.: Radio Channel Measurements at Street Intersections for Vehicle-to-Vehicle Safety Applications. In: *Proceedings of the 71st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2010, S. 1–5
- [212] MAHLER, Kim; PASCHALIDIS, Panagiotis; WISOTZKI, Mike; KORTKE, Andreas; KEUSGEN, Wilhelm: Evaluation of Vehicular Communication Performance at Street Intersections. In: *Proceedings of the 80th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2014, S. 1–5
- [213] AYGÜN, Bengi; BOBAN, Mate; WYGLINSKI, Alexander M.: *ECPR: Environment- and Context-aware Combined Power and Rate Distributed Congestion Control for Vehicular Communications*. <http://arxiv.org/abs/1502.00054>. Version: 2015
- [214] REINDERS, René; VAN EENENNAAM, Martijn; KARAGIANNIS, Georgios; HEIJENK, Geert: Contention Window Analysis for Beaconing in VANETs. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing conference*, IEEE, 2011, S. 1481–1487
- [215] WANG, Yi; AHMED, Akram; KRISHNAMACHARI, Bhaskar; PSOUNIS, Konstantinos: IEEE 802.11p Performance Evaluation and Protocol Enhancement. In: *Proceedings of the International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, IEEE, 2008, S. 317–322
- [216] VAN ROOYEN, Gert-Jan; ZEDADALLY, Sherali; BOOYSEN, Martinus J.: Survey of Media Access Control Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IET Communications* Bd. 5, S. 1619–1631
- [217] RAUCH, Andreas; KLANNER, Felix; DIETMAYER, Klaus: Analysis of V2X Communication Parameters for the Development of a Fusion Architecture for Cooperative Perception Systems. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, S. 685–690



- [218] DEMMEL, Sebastien; LAMBERT, Alain; GRUYER, Dominique; RAKOTONIRAINY, Andry; MONACELLI, Eric: Empirical IEEE 802.11p Performance Evaluation on Test Tracks. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, S. 837–842
- [219] HAFEEZ, Khalid A.; ZHAO, Lian; MA, Bobby; MARK, Jon W.: Performance Analysis and Enhancement of the DSRC for VANET’s Safety Applications. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 62. 2013, S. 3069–3083
- [220] BIANCHI, Giuseppe: Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Bd. 18. 2000, S. 535–547
- [221] IEEE: *Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Multi-Channel Operation*. 2016. 29. Januar 2016
- [222] CHEN, Qi; JIANG, Daniel; DELGROSSI, Luca: IEEE 1609.4 DSRC Multi-Channel Operations and its Implications on Vehicle Safety Communications. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2009, S. 1–8
- [223] GRÄFLING, Sebastian; MÄHÖNEN, Petri; RIIHIJÄRVI, Janne: Performance Evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for Vehicular Communications. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, IEEE, 2010, S. 344–348
- [224] GHANDOUR, Ali J.; DI FELICE, Marco; BONONI, Luciano; ARTAIL, Hassan: Modeling and Simulation of WAVE 1609.4-based Multi-channel Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2012, 148–156
- [225] VAN EENENNAAM, Martijn; VAN DE VENIS, Anne; KARAGIANNIS, Georgios: Impact of IEEE 1609.4 Channel Switching on the IEEE 802.11p Beaconing Performance. In: *Proceedings of the IFIP Wireless Days*, 2012, S. 1–8
- [226] WEN, Jyh-Horng; WENG, Chien-Erh: Performance Evaluation of IEEE 1609 WAVE for Vehicular Communications. In: *International Journal of Vehicular Technology*. Hindawi Publishing, 2013, S. 1–8
- [227] ECKHOFF, David; SOMMER, Christoph: A Multi-Channel IEEE 1609.4 and 802.11p EDCA Model for the Veins Framework. In: *Proceedings of the 5th ACM/ICST International Workshop on OMNeT++*. 2012, S. 1–2
- [228] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture*. V1.1.2. 2014-03

## LITERATURVERZEICHNIS

- [229] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service*. V1.2.0. 2013-08
- [230] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 2: Scenarios*. V1.2.0. 2013-07
- [231] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 2: Media-dependent Functionalities for ITS-G5*. V1.1.1. 2013-10
- [232] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality*. V1.2.0. 2013-10
- [233] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Geographical Area Definition*. V1.0.0. 2010-12
- [234] KÜHLMORGEN, Sebastian; LLATSER, Ignacio; FESTAG, Andreas; FETTWEIS, Gerhard: Performance Evaluation of ETSI GeoNetworking for Vehicular Ad Hoc Networks. In: *81st Vehicular Technology Conference, IEEE*, 2015, S. 1–6
- [235] KARP, Brad; KUNG, H. T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2000, S. 243–254
- [236] LAM, Kong: *Design of a Medium Access control Protocol that Exploits the Structures of Vehicular Networks*. Urbana-Champaign, USA, University of Illinois, Diss., 2011
- [237] MITTAG, Jens; THOMAS, Florian; HÄRRI, Jérôme; HARTENSTEIN, Hannes: A Comparison of Single- and Multi-hop Beaconing in VANETs. In: *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Vehicular InterNetworking*, ACM, 2009, S. 69–78
- [238] NADEEM, Tamer; SHANKAR, Pravin; IFTODE, Liviu: A Comparative Study of Data Dissemination Models for VANETs. In: *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services*. IEEE, 2006, S. 1–10

- [239] PANICHPAPIBOON, Sooksan; PATTARA-ATIKOM, Wasan: A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2011, S. 784–798
- [240] RUIZ, Patricia; DORRONSORO, Bernabé; BOUVRY, Pascal; TARDÓN, Lorenzo: Information Dissemination in VANETs Based Upon a Tree Topology. In: *Ad Hoc Networks* Bd. 10. 2012, S. 111–127
- [241] NITTEL, Silvia; DUCKHAM, MATT; KULIK, Lars: Information Dissemination in Mobile Ad-Hoc Geosensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Geographic Information Science* Bd. 3234, Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science), S. 206–222
- [242] SOMMER, Christoph; TONGUZ, Ozan; DRESSLER, Falko: Traffic information systems: efficient message dissemination via adaptive beaconing. In: *IEEE Communications Magazine* 49 (2011), Nr. 5, S. 173–179
- [243] LEE, Euisin; LEE, Eun-Kyu; GERLA, Mario; OH, Soon: Vehicular Cloud Networking: Architecture and Design Principles. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 52. IEEE, 2014, S. 148–155
- [244] TORRENT-MORENO, Marc; FESTAG, Andreas; HARTENSTEIN, Hannes: System Design for Information Dissemination in VANETs. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation*, 2006, S. 27–33
- [245] VINEL, Alexey; CAMPOLO, Claudia; PETIT, Jonathan; KOUCHERYAVY, Yevgeni: Trustworthy Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks: Delay Analysis. In: *IEEE Communications Letters* Bd. 15. IEEE, 2011, S. 1010–1012
- [246] PENG, Wei; LU, Xi-Cheng: On the Reduction of Broadcast Redundancy in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 1st Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing*. IEEE, 2008, S. 129–130
- [247] WISCHHOF, Lars; EBNER, André; ROHLING, Hermann: Information Dissemination in Self-Organizing Intervehicle Networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 6. IEEE, 2005, S. 90–101
- [248] WOLFSON, Ouri; XU, Bo; YIN, Huabei: Dissemination of Spatial-Ttemporal Information in Mobile Networks with Hotspots. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop On Databases Information Systems and Peerto-Peer Computing*. IEEE, 2004, S. 1–15
- [249] WOLFSON, Ouri; XU, Bo; TANNER, Robert M.: Mobile peer-to-peer data dissemination with resource constraints. In: *Mobile Data Management, 2007 International Conference on*, 2007, S. 16–23

## LITERATURVERZEICHNIS

- [250] XU, Bo; OUKSEL, Aris; WOLFSON, Ouri: Opportunistic Resource Exchange in Inter-Vehicle Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Mobile Data Management*. IEEE, 2004, S. 4–12
- [251] ZHUANG, Yanyan; PAN, Jianping; LUO, Yuanqian; CAI, Lin: Time and Location-Critical Emergency Message Dissemination for Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Bd. 29. IEEE, 2011, S. 187–196
- [252] LI, Xiaolei (Hrsg.); HAN, Jiawei (Hrsg.); LEE, Jae-Gil (Hrsg.); GONZALEZ, Hector (Hrsg.): *Traffic Density-Based Discovery of Hot Routes in Road Networks*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2007
- [253] DUA, Amit; KUMAR, Neeraj; BAWA, Seema: A Systematic Review on Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Vehicular Communications* Bd. 1. Elsevier Science Publishers, 2014, S. 33–52
- [254] KAKKASAGERI, M. S.; MANVI, S. S.: Information Management in Vehicular Ad Hoc Networks: A Review. In: *Journal of Network and Computer Applications* Bd. 39. Elsevier Science Publishers, 2014, S. 334–350
- [255] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol*. V1.1.1. 2011-02
- [256] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 6: Internet Integration; Sub-part 1: Transmission of IPv6 Packets over GeoNetworking Protocols*. V1.1.1. 2011-03
- [257] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements*. V1.2.0. 2013-08
- [258] BOBAN, Mate; D’OREY, Pedro M.: Measurement-Based Evaluation of Cooperative Awareness for V2V and V2I Communication. In: *Proceedings of the Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2014, S. 1–8
- [259] D’OREY, Pedro M.; BOBAN, Mate: Empirical Evaluation of Cooperative Awareness in Vehicular Communications. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2014, S. 1–5
- [260] BOBAN, Mate; D’OREY, Pedro: Exploring the Practical Limits of Cooperative Awareness in Vehicular Communications. In: *arXiv.org* (2015), S. 1–13

- [261] SAE INTERNATIONAL: *Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. J2735\_201601. 19. Januar 2016
- [262] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM); Rationale for and Guidance on Standardization*. V1.1.1. 2011-06
- [263] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM)*. V1.0.0. 2014-01
- [264] GOLESTAN, K.; JUNDI, A.; NASSAR, L.; SATTAR, F.; KARRAY, F.; KAMEL, M.; BOUMAIZA, S.: Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs): Capabilities, Challenges in Information Gathering and Data Fusion. In: *Lecture Notes in Computer Science* Bd. 7326. Springer, 2012, S. 34–41
- [265] ABRAHAM, Tamas; RODDICK, John F.: Survey of Spatio-Temporal Databases. In: *GeoInformatica* Bd. 3. Kluwer, 1999, S. 61–99
- [266] JENSEN (Hrsg.); SCHNEIDER (Hrsg.); SEEGER (Hrsg.); TSOTRAS (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Symposium on Advances in Spatial and Temporal Databases*. Bd. 3633. Springer, 2005 (Lecture Notes in Computer Science)
- [267] TANG, Xinming: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Book Series*. Bd. 5: *Advances in Spatio-Temporal Analysis*. London and New York : Taylor & Francis, 2008
- [268] SAMET, Hanan: *Spatial Data Structures*. 1995
- [269] RIGAUX, Philippe; SCHOLL, Michel O.; VOISARD, Agnes: *Introduction to Spatial Databases: With Application to GIS*. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2002
- [270] SHEKHAR, Shashi; CHAWLA, Sanjay: *Spatial Databases: A Tour*. Upper Saddle River, USA : Prentice Hall, 2003
- [271] GILLANI, Saira; SHAHZAD, Farrukh; QAYYUM, Amir; MEHMOOD, Rashid: A Survey on Security in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 7865. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013, S. 59–74
- [272] MERSHAD, Khaleel; ARTAIL, Hassan: A Framework for Secure and Efficient Data Acquisition in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 62. 2013, S. 536–551

## LITERATURVERZEICHNIS

- [273] SONG, Joo-Han.; WONG, Vincent W.; LEUNG, VICTOR C. M.: Wireless Location Privacy Protection in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications*, IEEE, 2009, S. 1–6
- [274] 88. KONFERENZ DER DATENSCHUTZBEAUFTRAGTEN DES BUNDES UND DER LÄNDER: *Datenschutz im Kraftfahrzeug – Automobilindustrie ist gefordert*. 2014
- [275] BISWAS, Subir; MISIC, Jelena: A Cross-Layer Approach to Privacy-Preserving Authentication in WAVE-Enabled VANETs. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 62 (2013), Nr. 5, S. 2182–2192
- [276] STUDER, Ahren; LUK, Mark; PERRIG, Adrian: Efficient Mechanisms to Provide Convoy Member and Vehicle Sequence Authentication in VANETs. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Security and Privacy in Communications Networks*, 2007, S. 422–432
- [277] LIN, Xiaodong; LI, Xu: Achieving Efficient Cooperative Message Authentication in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 62. IEEE, 2013, S. 3339–3348
- [278] DHURANDHER, S. K.; OB Aidat, M. S.; JAISWAL, A.; TIWARI, A.; TYAGI, A.: Vehicular Security Through Reputation and Plausibility Checks. In: *IEEE Systems Journal* Bd. PP. IEEE, 2013, S. 1–11
- [279] PARUCHURI, Vineetha: Inter-Vehicular Communications: Security and Reliability Issues. In: *Proceedings of the International Conference on ICT Convergence*. IEEE, 2011, S. 737–741
- [280] STUBING, Hagen; FIRL, Jonas; HUSS, Sorin A.: A Two-Stage Verification Process for Car-to-X Mobility Data Based on Path Prediction and Probabilistic Maneuver Recognition. In: *Proceedings of the Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2011, S. 17–24
- [281] BISSMEYER, Norbert; STRESING, Christian; BAYAROU, Kpatcha M.: Intrusion Detection in VANETs Through Verification of Vehicle Movement Data. In: *Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2010, S. 166–173
- [282] BISSMEYER, Norbert; MAUTHOFER, Sebastian; BAYAROU, Kpatcha M.; KARGL, Frank: Assessment of Node Trustworthiness in VANETs Using Data Plausibility Checks with Particle Filters. In: *Proceedings of the Vehicular Networking Conference*, IEEE, 2012, S. 78–85
- [283] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM: *Trust Evaluation and Trust Assurance for Security of C2XC Stations*. 0.2. 12.07.2012
- [284] CHO, Jin-Hee; SWAMI, Ananthram; CHEN, Ing-Ray: A Survey on Trust Management for Mobile Ad Hoc Networks. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 13. 2011, S. 562–583

- [285] DING, Qing; LI, Xi; JIANG, Ming; ZHOU, XueHai: Reputation-Based Trust Model in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. IEEE, 2010, S. 1–6
- [286] DING, Qing; LI, Xi; JIANG, Ming; ZHOU, XueHai: Reputation Management in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Multimedia Technology*. IEEE, 2010, S. 1–5
- [287] LO, Nai-Wei; TSAI, Hsiao-Chien: A Reputation System for Traffic Safety Event on Vehicular Ad Hoc Networks. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications* Bd. 2009. Hindawi Publishing, 2009, S. 9:1–9:2
- [288] MICHIARDI, Pietro; MOLVA, Refik: Core: a Collaborative Reputation Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 6th Joint Working Conference on Communications and Multimedia Security: Advanced Communications and Multimedia Security*, 2002, S. 107–121
- [289] RIDGE, Mike; DEKELBAUM, Robert: *V2V Next Steps: A Proposal for Simplification of V2V Safety Systems*. Version: 2013. <http://papers.sae.org/gsdownload/?prodCd=2013-01-0982> (SAE Technical Paper 2013-01-0982)
- [290] LYAMIN, Nikita; VINEL, Alexey; JONSSON, Magnus; LOO, Jonathan: Real-Time Detection of Denial-of-Service Attacks in IEEE 802.11p Vehicular Networks. In: *IEEE Communications Letters* Bd. 18. IEEE, 2014, S. 110–113
- [291] DJAHEL, Soufiene; NAIT-ABDESSELAM, Farid; ZHANG, Zonghua: Mitigating Packet Dropping Problem in Mobile Ad Hoc Networks: Proposals and Challenges. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Bd. 13. 2011, S. 658–672
- [292] SCHOCH, Elmar; KARGL, Frank: On the Efficiency of Secure Beaconing in VANETs. In: *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Wireless Network Security*, ACM, 2010, S. 111–116
- [293] PAPADIMITRATOS, Panos; CALANDRIELLO, Giorgio; HUBAUX, Jean-Pierre; LIOY, Antonio: Impact of Vehicular Communications Security on Transportation Safety. In: *Proceedings of the INFOCOM Workshops*. IEEE, 2008, S. 1–6
- [294] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; ITS Communications Security Architecture and Security Management*. V1.1.1. 2012–06

## LITERATURVERZEICHNIS

- [295] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Trust and Privacy Management*. V1.1.1. 2012-06
- [296] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security Header and Certificate Formats*. V1.1.1. 2013-04
- [297] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM (Hrsg.): *Public Key Infrastructure Memo*. 30. Mai 2012
- [298] LAGANÁ, Marcello; PETIT, Jonathan; JOUVRAY C.; FEIRI, Michael; BISSMEYER, Norbert; PRESERVE – PREPARING SECURE VEHICLE-TO-X COMMUNICATION SYSTEMS (Hrsg.): *Deliverable 5.3 – Deployment Issues Report V3*. 20. Dezember 2013
- [299] HANKERSON, Darrel; MENEZES, Alfred; VANSTONE, Scott: *Guide to Elliptic Curve Cryptography*. New York : Springer, 2004
- [300] HAAS, Jason J.; HU, Yih-Chun; LABERTEAUX, Kenneth P.: Real-World VANET Security Protocol Performance. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference, IEEE, 2009*, S. 1–7
- [301] WANG, Fei; XU, yongjun; ZHANG, Hanwen; ZHANG, Yujun; ZHU, Liehuang: 2FLIP: A Two-Factor Lightweight Privacy Preserving Authentication Scheme for VANET. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. IEEE, 2015, S. 1
- [302] IEEE: *Standard for Wireless Access in Vehicular Environments—Security Services for Applications and Management Messages*. 2016. 29. Januar 2016
- [303] WHYTE, William; WEIMERSKIRCH, Andre; KUMAR, Virendra; HEHN, Thorsten: A Security Credential Management System for V2V Communications. In: *Vehicular Networking Conference, IEEE, 2013*, S. 1–8
- [304] CHIU, Dah-Ming; JAIN, Raj: Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestion Avoidance in Computer Networks. In: *Computer Networks and ISDN Systems* Bd. 17. 1989, S. 1–14
- [305] JAIN, Raj: A Binary Feedback Scheme for Congestion Avoidance in Computer Networks with Connectionless Network Layer. In: *Proceedings of the SIGCOMM* Bd. 18. ACM, 1988, S. 138–156
- [306] HE, Jianhua; CHEN, Hsiao-hwa; CHEN, Thomas; CHENG, Wenqing: Adaptive Congestion Control for DSRC Vehicle Networks. In: *IEEE Communications Letters* Bd. 14. IEEE, 2010, S. 127–129



- [307] SCHMIDT, Robert K.; BRAKEMEIER, Achim; LEINMÜLLER, Tim; BÖDDEKER, Bert; SCHÄFER, Günter: Architecture for Decentralized Mitigation of Local Congestion in VANETs. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications*. IEEE, 2010, S. 1–6
- [308] SEPULCRE, Miguel; MITTAG, Jens; SANTI, Paolo; HARTENSTEIN, Hannes; GOZALVEZ, Javier: Congestion and Awareness Control in Cooperative Vehicular Systems. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. IEEE, 2011, S. 1260–1279
- [309] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Range; Access Layer Part*. V1.1.1. 2011-07
- [310] ZANG, Yunpeng; STIBOR, Lothar; CHENG, Xi; REUMERMAN, Hans-Jürgen; PARUZEL, Arthur; BARROSO, Andre: Congestion Control in Wireless Networks for Vehicular Safety Applications. In: *Proceedings of The 8th European Wireless Conference, 2007*, S. 7
- [311] BERENS, Friedbert: *Decentralized Congestion Control for ITS-G5: ETSI STF469*. Helmond, Niederlande, März 2015 (4th ITS Cooperative Mobility Services Event)
- [312] AUTOLITANO, Alessia; CAMPOLO, Claudia; MOLINARO, Antonella; SCOPIGNO, Riccardo M.; VESCO, Andrea: An Insight into Decentralized Congestion Control Techniques for VANETs from ETSI TS 102 687 V1.1.1. In: *Proceedings of the IFIP Wireless Days*, IEEE, 2013, S. 1–6
- [313] SUBRAMANIAN, Sundar; WERNER, Marc; LIU, Shihuan; JOSE, Jubin; LUPOAIE, Radu; WU, Xinzhou: Congestion Control for Vehicular Safety: Synchronous and Asynchronous MAC Algorithms. In: *Proceedings of the 9th ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, Systems, and Applications*, ACM, 2012, S. 63–72
- [314] VESCO, Andrea; SCOPIGNO, Riccardo; CASETTI, Claudio; CHIASSERINI, Carla-Fabiana: Investigating the Effectiveness of Decentralized Congestion Control in Vehicular Networks. In: *Proceedings of the Globecom Workshops*, IEEE, 2013, S. 1314–1319
- [315] ECKHOFF, David; SOFRA, Nikoletta; GERMAN, Reinhard: A Performance Study of Cooperative Awareness in ETSI ITS G5 and IEEE WAVE. In: *Proceedings of the 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, IEEE, 2013, S. 196–200

## LITERATURVERZEICHNIS

- [316] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Cross Layer DCC Management Entity for Operation in the ITS G5A and ITS G5B Medium; Report on Cross layer DCC Algorithms and Performance Evaluation*. V1.1.1. 2014-09
- [317] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Intelligent Transport Systems (ITS); Cross Layer DCC Management Entity for Operation in the ITS G5A and ITS G5B Medium; Validation Set-Up and Results*. V1.1.1. 2015-09
- [318] AYGÜN, Bengi; EL GAMAL, Mostafa; WYGLINSKI, Alexander M.: Performance Analysis for High-Velocity Connected Vehicles. In: *Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2015, S. 1–5
- [319] BUBURUZAN, Teodor: *WG Road Map: Starting Day 2 - 3 - 4 Related Activities and Roadmap Development*. CAR 2 CAR - Newsletter, 2015
- [320] ENGEL, Monique: *Benefit of Vehicle2Vehicle Communication for Automated Driving*. CAR 2 CAR Forum, 3. November 2015
- [321] BRICKLEY, Olivia; PESCH, Dirk: Ensuring "Always Satisfactorily Connected" in Cooperative Vehicular Networks. In: *Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2015, S. 1–6
- [322] POCOVI, Guillermo; LAURIDSEN, Mads; ALVAREZ, Beatriz S.; PEDERSEN, Klaus I.; MOGENSEN, Preben E.: Automation for On-road Vehicles: Use Cases and Requirements for Radio Design. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2015, S. 1–5
- [323] CAMPOLO, Claudia; MOLINARO, Antonella: Multichannel Communications in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 51. IEEE, 2013, S. 158–169
- [324] LEINMÜLLER, Tim; SPAANDERMAN, Paul; BOBAN, Mate; BRAKEMEIER, Achim; SCHMIDT, Robert K.: Multi-Channel Usage in Day 2 and Beyond EU V2X Systems. In: *Proceedings of the 2015 ITS World Congress*. 2015, S. 1–7
- [325] GÜNTHER, Hendrik-Jörn; TRAUER, Oliver; WOLF, Lars: The Potential of collective Perception in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications*, IEEE, 2015, S. 1–5
- [326] HÄRRI, Jérôme: Car-2-X Simulations: Tools, Methodologies and Performance Results. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation*. IEEE, 2008, S. 1

- [327] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM: *The Handbook for Vehicle-to-X Cooperative Systems Simulation*. 2011
- [328] STANICA, Razvan; CHAPUT, Emmanuel; BEYLOT, André-Luc: Simulation of Vehicular Ad-Hoc Networks: Challenges, Review of Tools and Recommendations. In: *Computer Networks* Bd. 55. 2011, S. 3179–3188
- [329] HASSAN, Aamir: *VANET simulation: Technical report, IDE0948*,. Halmstad, Schweden, 2009
- [330] MARTINEZ, Francisco J.; TOH, Chai K.; CANO, Juan-Carlos; CALAFATE, Carlos T.; MANZONI, Pietro: A Survey and Comparative Study of Simulators for Vehicular Ad Hoc Networks (VANETS). In: *Wireless Communications and Mobile Computing* Bd. 11. Wiley InterScience, 2011, S. 813–828
- [331] KURKOWSKI, Stuart; CAMP, Tracy; COLAGROSSO, Michael: MANET Simulation Studies: The Incredibles. In: *Mobile Computing Review* Bd. 9. 2005, S. 50–61
- [332] AREM, Bart; NOORT, Martijn; NETTEN, Bart: Simulation Approaches to Intelligent Vehicles. In: ESKANDARIAN, Azim (Hrsg.): *Handbook of Intelligent Vehicles*. London : Springer, 2012, S. 139–163
- [333] TREIBER, Martin; KESTING, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Heidelberg : Springer, 2010
- [334] CHOWDHURY, Debashish; SANTEN, Ludger; SCHADSCHNEIDER, Andreas: Statistical Physics of Vehicular Traffic and Some Related Systems. In: *Physics Reports* Bd. 329. 2000, S. 199–329
- [335] BRACKSTONE, Mark; McDONALD, Mike: Car-Following: A Historical Review. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* Bd. 2. Pergamon Press, 1999, S. 181–196
- [336] FILZEK, Björn; BREUER, Bert: Distance Behaviour on Motorways with Regard to Active Safety - A Comparison Between Adaptive-Cruise-Control (ACC) and Driver. In: *Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Amsterdam, 2001, S. 1–8
- [337] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen*, TU Darmstadt, Diss., 2007
- [338] GHULAM H. BHAM; RAHIM F. BENEKOHAL: A High Fidelity Traffic Simulation Model Based on Cellular Automata and Car-Following Concepts. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 12. Pergamon Press, 2004, S. 1–32

## LITERATURVERZEICHNIS

- [339] KRAUSS, Stefan: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Diss., 1998
- [340] NEUBERT, Lutz: *Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten*. Universität Duisburg, 2000
- [341] SCHÜLLER, H.: *Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung*. Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, 2010
- [342] TAYAL, Sandeep; TRIPATHI, Malay R.: VANET-Challenges in Selection of Vehicular Mobility Model. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. IEEE, 2012, S. 231–235
- [343] SCHICK, Peter: *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*. Stuttgart : Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2003
- [344] SCHULZ, Alexandra; FRÖMING, Robert: Analyse des Fahrerverhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategien von Assistenzsystemen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* Bd. 110. 2008, S. 1124–1131
- [345] BITZER, Timo F.: *Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs*, Universität Stuttgart, Diss., 2010
- [346] KRAJZEWICZ, Daniel; ERDMANN, Jakob; BEHRISCH, Michael; BIEKER, Laura: Recent Development and Applications of SUMO—Simulation of Urban Mobility. In: *International Journal On Advances in Systems and Measurements* Bd. 5. IARIA, 2012, S. 128–138
- [347] *SUMO - Simulation of Urban MObility*. <http://sumo.sourceforge.net>. Version: 2016
- [348] PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG: *VISSIM 5.40 User Manual*. Berlin, 2012
- [349] BAI, Fan; KRISHNAMACHARI, Bhaskar: Spatio-Temporal Variations of Vehicle Traffic in VANETs: Facts and Implications. In: *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on VehiculAr InterNETworking*, ACM, 2009, S. 43–52
- [350] BASTANI, Saeed; LANDFELDT, Bjorn; LIBMAN, Lavy: A Traffic Density Model for Radio Overlapping in Urban Vehicular Ad hoc Networks. In: *Proceedings of the 36th Conference on Local Computer Networks*, IEEE, 2011, S. 85–92

- [351] BASTANI, Saeed; LANDFELDT, Bjorn; LIBMAN, Lavy: On the Reliability of Safety Message Broadcastin Urban Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, ACM, 2011, S. 307–316
- [352] KERNER, Boris S.: *The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*. Berlin : Springer, 2004
- [353] BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ANDREASSON, I.: A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic Simulation. In: *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference*, IEEE, 2006, S. 1102–1107
- [354] LV, Peng; ZHENG, Bo; ZHOU, Zhongyong: Simulation of VANET in a More Realistic Scenario. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE, 2011, S. 1–3
- [355] HÄRRI, Jérôme; FIORE, Marco; FILALI, Fethi; BONNET, Christian: Vehicular Mobility Simulation with VanetMobiSim. In: *Simulation* Bd. 87. The Society for Modeling and Simulation International, 2011, S. 275–300
- [356] FIORE, Marco; HÄRRI, Jérôme; FILALI, Fethi; BONNET, Christian: Vehicular Mobility Simulation for VANETs. In: *Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium*, IEEE, 2007, S. 301–309
- [357] AHUJA, Bhawna; GOHIL, Ankit; KUMAR, Ripunjay; CHHIKARA, Ruchika: Simulation of VANET using VanetMobiSim and NS-2. In: *Wireless Communication* Bd. 5. 2013, S. 381–384
- [358] TIELERT, Tessa; SCHMIDT-EISENLOHR, Felix; HARTENSTEIN, Hannes: Visualizing and Understanding Spatio-Temporal Correlations of Data Dissemination in Vehicular Environments. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2008, S. 1–2
- [359] *TAPAS Cologne Scenario*. <http://sumo.dlr.de/wiki/Data/Scenarios/TAPASCologne>. Version: 2015
- [360] WEGENER, Axel; PIÓRKOWSKI, Michał; RAYA, Maxim; HELLBRÜCK, Horst; FISCHER, Stefan; HUBAUX, Jean-Pierre: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators. In: *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, ACM, 2008, S. 155–163
- [361] PAPALEONDIU, Leontios G.; DIKAIAKOS, Marios D.: TrafficModeler: A Graphical Tool for Programming Microscopic Traffic Simulators through High-Level Abstractions. In: *69th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2009, S. 1–5

## LITERATURVERZEICHNIS

- [362] BABULAK, Eduard; WANG, Ming: Discrete Event Simulation. In: *Discrete Event Simulation: State of the Art*. 2008, S. 1–10
- [363] SCHMIDT-EISENLOHR, Felix; TORRENT-MORENO, Marc; MITTAG, Tens; HARTENSTEIN, Hannes: Simulation Platform for Inter-Vehicle communications and Analysis of Periodic Information Exchange. In: *Proceedings of the 4th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services*, IEEE, 2007, S. 50–58
- [364] NUCKELT, Jorg; ABBAS, Taimoor; TUFVESSON, Fredrik; MECKLENBRAUKER, Christoph; BERNADÓ, Laura; KURNER, Thomas: Comparison of Ray Tracing and Channel-Sounder Measurements for Vehicular Communications. In: *Proceedings of the 77th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2013, S. 1–5
- [365] MANGEL, Thomas; KLEMP, Oliver; HARTENSTEIN, Hannes: 5.9 GHz Inter-Vehicle communication at Intersections: A Validated Non-Line-of-Sight Path-Loss and Fading Model. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* Bd. 2011. Hindawi Publishing, 2011, S. 182
- [366] CAVIN, David; SASSON, Yoav; SCHIPER, André: On the Accuracy of MANET Simulators. In: *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Principles of Mobile Computing*. ACM, 2002, S. 38–43
- [367] PROTZMANN, Robert; SCHÜNEMANN, Bjorn; RADUSCH, Ilja: The Influences of Communication Models on the Simulated Effectiveness of V2X Applications. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 49. IEEE, 2011, S. 149–155
- [368] GOZALVEZ, Javier; SEPULCRE, Miguel; BAUZA, Ramon: Impact of the Radio Channel Modelling on the Performance of VANET Communication Protocols. In: *Telecommunication Systems* Bd. 50. Springer, 2012, S. 149–167
- [369] MITTAG, Jens; PAPANASTASIOU, Stylianos; HARTENSTEIN, Hannes; STROM, Erik G.: Enabling Accurate Cross-Layer PHY/MAC/NET Simulation Studies of Vehicular Communication Networks. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. 2011, S. 1311–1326
- [370] ABBAS, Taimoor; BERNADÓ, Laura; THIEL, A.; MECKLENBRÄUKER, C. F.; TUFVESSON, Fredrik: Measurements Based Channel Characterization for Vehicle-to-Vehicle Communications at Merging Lanes on Highway. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications*, IEEE, 2013, S. 1–5
- [371] SHIVALDOVA, Veronika; MECKLENBRAUKER, Christoph F.: Real-World Measurements-Based Evaluation of IEEE 802.11p System Performance. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications*, IEEE, 2013, S. 1–5

- [372] REICHARDT, Lars; MAURER, Jürgen; FUGEN, Thomas; ZWICK, Thomas: Virtual Drive: A Complete V2X Communication and Radar System Simulator for Optimization of Multiple Antenna Systems. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 99. 2011, S. 1295–1310
- [373] BOBAN, Mate; VINHOZA, TIAGO T. V.; FERREIRA, Michel; BARROS, Joao; TONGUZ, Ozan K.: Impact of Vehicles as Obstacles in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Bd. 29. IEEE, 2011, S. 15–28
- [374] ABBAS, Taimoor; SJÖBERG, Katrin; KAREDAL, Johan; TUFVESSON, Fredrik: *A Measurement Based Shadow Model for Vehicle-to-Vehicle Network Simulations*. Version: 2012. <http://arxiv.org/pdf/1203.3370>
- [375] VLASTARAS, Dimitrios; ABBAS, Taimoor; NILSSON, Mikael; WHITON; RUSS; OLBÄCK, Magnus; TUFVESSON, Fredrik: Impact of a Truck as an Obstacle on Vehicle-to-Vehicle Communications in Rural and Highway Scenarios. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications*. 2014, S. 1–6
- [376] CHEN, Qi; JIANG, Daniel; TIELERT, Tessa; DELGROSSI, Luca: Mathematical Modeling of Channel Load in Vehicle Safety Communications. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2011, S. 1–5
- [377] MECKLENBRÄUKER, Christoph F.; MOLISCH, Andreas F.; KAREDAL, Johan; TUFVESSON, Fredrik; PAIER, Alexander; BERNADÓ, Laura; ZEMEN, Thomas; KLEMP, Oliver; CZINK, Nicolai: Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance. In: *Proceedings of the IEEE* 99 (2011), Nr. 7, S. 1189–1212
- [378] TALIWAL, Vikas; JIANG, Daniel; MANGOLD, Heiko; CHEN, Chi; SENGUPTA, Raja: Empirical Determination of Channel Characteristics for DSRC Vehicle-to-vehicle Communication. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc NETWORKS*. ACM, 2004, S. 88
- [379] TORRENT-MORENO, Marc; JIANG, Daniel; HARTENSTEIN, Hannes: Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-Based Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc NETWORKS*. ACM, 2004, S. 10
- [380] KILLAT, Moritz; SCHMIDT-EISENLOHR, Felix; HARTENSTEIN, Hannes; RÖSEL, Christian; VORTISCH, Peter; ASSENMACHER, Silja; BUSCH, Fritz: Enabling Efficient and Accurate Large-scale Simulations of VANETs for Vehicular Traffic Management. In: *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ACM, 2007, S. 29–38

## LITERATURVERZEICHNIS

- [381] KILLAT, Moritz: *The Impact of Inter-Vehicle Communication on Vehicular Traffic*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2009
- [382] BRAKEMEIER, Achim: *White Paper on Network Design Limits and VANET Performance*. 2009
- [383] NAKAGAMI, Minoru: The m-Distribution – A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading. In: *Statistical Methods of Radio Propagation*. 1960
- [384] RAPPAPORT, Theodore S.: *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. Auflage. Upper Saddle River, USA : Prentice Hall, 2002
- [385] PARSONS, J.D: *The Mobile Radio Propagation Channel*. 2. Auflage. Chichester : Wiley, 2000
- [386] MOLOGNI, Juliano F.; NUNES, Anderson S.; SIQUEIRA, Cesareo L. R.; FIGUEIREDO, Diogo L.; RIBAS, Jefferson C.; JUNIOR, Arismar C. S.; ALVES, Marco A. R.: *Challenges on the Design of Automotive Radar Systems and V2V Technology*. 2014 (SAE Technical Paper 2014-36-0356)
- [387] SHAGDAR, Oyunchimeg; DANIEL, Alex; PRIMAK, Serguei: Beacon Delivery over Practical V2X Channels. In: *International Conference on ITS Telecommunications*, IEEE, 2013, S. 68–73
- [388] CHRISTOPH SOMMER; ZHENG YAO; REINHARD GERMAN; FALKO DRESSLER: On the Need for Bidirectional Coupling of Road Traffic Microsimulation and Network Simulation. In: *In 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, ACM, 2008, S. 41–48
- [389] WEGENER, Axel; HELLBRUCK, Horst; WEWETZER, Christian; LUBKE, Andreas: VANET Simulation Environment with Feedback Loop and its Application to Traffic Light Assistance. In: *Proceedings of the Globecom Workshops*, IEEE, 2008, S. 1–7
- [390] SOMMER, Christoph; GERMAN, Reinhard; DRESSLER, Falko: Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing* Bd. 10. IEEE, 2011, S. 3–15
- [391] QUECK, Tobias; SCHÜNEMANN, Björn; RADUSCH, Ilja; MEINEL, Christoph: Realistic Simulation of V2X Communication Scenarios. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Services Computing Conference*, IEEE, 2008, S. 1623–1627
- [392] SCHÜNEMANN, Björn: V2X Simulation Runtime Infrastructure VSimRTI: An Assessment Tool to Design Smart Traffic Management Systems. In: *Computer Networks* Bd. 55. 2011, S. 3189–3198



- [393] LOCHERT, Christian; SCHEUERMANN, Björn; MAUVE, Martin: Probabilistic aggregation for data dissemination in VANETs. In: *Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, ACM, 2007 (VANET '07). – ISBN 978-1-59593-739-1, S. 1–8
- [394] ROTH, Christoph; SANDER, Oliver; HÜBNER, Michael; BECKER, Jürgen: Car-to-X Simulation Environment for Comprehensive Design Space Exploration Verification and Test. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* Bd. 3. SAE, 2010, S. 17–26
- [395] SOMMER, Christoph; DRESSLER, Falko: *Simulation of Vehicular Communications: Principles and Challenges: Tutorial Lecture*. 2012 (MMB 2012)
- [396] TARIQ, Ali B.: Beaconing in a Highway Scenario: Vulnerable Vehicles Problem. In: *Proceedings of the 11th Conference of the FRUCT Association*. 2012, S. 169–175
- [397] CAVIGLIONE, Luca; CIACCIO, Giuseppe; GIANUZZI, Vittoria: Architecture of a Communication Middleware for VANET Applications. In: *Proceedings of the 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*. IEEE, 2011, S. 111–114
- [398] GNANAMURTHY, Ramasamy K.; SARAVANAN, K.; THANGAVELU, Arunkumar: Middleware Architecture for Intelligence in Vehicular Safety over VANET (InVANET). In: *Proceedings of the International Conference on the Current Trends in Information Technology*. IEEE, 2009, S. 1–7
- [399] NADEEM, Tamer; DASHTINEZHAD, Sasan; LIAO, Chunyuan; IFTODE, Liviu: TrafficView: Traffic Data Dissemination using Car-to-Car Communication. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*) Bd. 8. ACM, 2004, S. 6
- [400] NASSAR, L.; JUNDI, A.; GOLESTAN, K.; SATTAR, F.; KARRAY, F.; KAMEL, M.; BOUMAIZA, S.: Vehicular Ad-hoc Networks (VANEts): Capabilities, Challenges in Context-Aware Processing and Communication Gateway. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2012, S. 42–49
- [401] STÜBING, Hagen; BECHLER, Marc; HEUSSNER, Dieter; MAY, Thomas; RADUSCH, Ilya; RECHNER, Horst; VOGEL, Peter: simTD: A Car-to-X System Architecture for Field Operational Tests. In: *IEEE Communications Magazine*. IEEE, 2010, S. 148–154
- [402] FELD, Michael; MÜLLER, Christian: The Automotive Ontology: Managing Knowledge Inside the Vehicle and Sharing it Between Cars. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, ACM, 2011, S. 1–8

## LITERATURVERZEICHNIS

- [403] CHALLA, S.; GULREZ, T.; CHACZKO, Z.; PARANESHA, T. N.: Opportunistic information fusion: a new paradigm for next generation networked sensing systems. In: *7th International Conference on Information Fusion*, IEEE, 2005, S. 720–727
- [404] DARMS, Michael: *Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme*, TU Darmstadt, Diss., 2007
- [405] ROGOVA, Galina L.; NIMIER, Vincent: Reliability in Information Fusion: Literature Survey. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion*, 2004, S. 1158–1165
- [406] THOMAIDIS, George; VASSILIS, Kaffes; LYTRIVIS, Panagiotis; TSOGAS, Manolis; KARASEITANIDIS, Giannis; AMDITIS, Angelos: Target Tracking and Fusion in Vehicular Networks. In: *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, S. 1080–1085
- [407] LYTRIVIS, Panagiotis; THOMAIDIS, George; AMDITIS, Angelos: Sensor Data Fusion in Automotive Applications. In: *Design of an Intelligent Housing System Using Sensor Data Fusion Approaches*. Intech, 2009, S. 123–140
- [408] RÖCKL, Matthias; FRANK, Korbinian; STRANG, Thomas; KRANZ, Matthias; GACNIK, Jan; SCHOMERUS, Jan: Hybrid Fusion Approach Combining Autonomous and Cooperative Detection and Ranging Methods for Situation-Aware Driver Assistance Systems. In: *Proceedings of the 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, IEEE, 2008, S. 1–5
- [409] HAN, Liang; WU, Ke: Radar and Radio Data Fusion Platform for Future Intelligent Transportation System. In: *Proceedings of the European Radar Conference*, IEEE, 2010, S. 65–68
- [410] GIANNOTTI, Fosca; NANNI, Mirco; PINELLI, Fabio; PEDRESCHI, Dino: Trajectory Pattern Mining. In: *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ACM, 2007, S. 330–339
- [411] LYTRIVIS, P.; THOMAIDIS, G.; TSOGAS, M.; AMDITIS, Angelos: An Advanced Cooperative Path Prediction Algorithm for Safety Applications in Vehicular Networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 12. IEEE, 2011, S. 669–679
- [412] TAMKE, Andreas; DANG, Thao; BREUEL, Gabi: A Flexible Method for Criticality Assessment in Driver Assistance Systems. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, S. 697–702

- [413] HILLENBRAND, Jörg; KROSCHER, Kristian; SCHMID, Volker: Situation Assessment Algorithm for a Collision Prevention Assistant. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2005, S. 459–465
- [414] SOBHANI, Amir; YOUNG, William; BAHROLOLOOM, Sareh; SARVI, Majid: Calculating Time-to-Collision for Analysing Right Turning Behaviour at Signalised Intersections. In: *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice* Bd. 22. 2013, S. 1–16
- [415] KUEHBECK, Thomas; HAKOBYAN, Gor; SIKORA, Axel; CHIBELUSHI, Claude C.; MONIRI, Mansour: Evaluation of Performance Enhancement for Crash Constellation Prediction via Car-to-Car Communication. In: *Communication Technologies for Vehicles* Bd. 8435. Cham : Springer International Publishing, 2014, S. 57–68
- [416] SHIN, Donghoon; KIM, Boemjun; SEO, Jongsang; YI, Kyongsu: Effects of Wireless Communication on Integrated Risk Management based Automated Vehicle. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2015, S. 1767–1772
- [417] PETIT, Jonathan: Analysis of ECDSA Authentication Processing in VANETS. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security*, IEEE, 2009, S. 1–5
- [418] SCHMIDT, Karsten; ZWECK, Harald; DANNEBAUM, Udo: *Hardware and Software Constraints for Automotive Firewall Systems?* 2016 (SAE Technical Paper 2016-01-0063)
- [419] ZOGG, Jean-Marie: *GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten*. Thalwil : Selbstverlag, 2009
- [420] QUDDUS, Mohammed A.; OCHIENG, Washington Y.; NOLAND, Robert B.: Current Map-Matching Algorithms for Transport Applications: State-of-the Art and Future Research Directions. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 15. 2007, S. 312–328
- [421] LOU, Yin; ZHANG, Chengyang; ZHENG, Yu; XIE, Xing; WANG, Wei; HUANG, Yan: Map-Matching for Low-Sampling-Rate GPS Trajectories. In: *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, ACM, 2009, S. 352–361
- [422] EFATMANESHNIK, Mahmoud; KEALY, Allison; BALAEI, Asghar T.; DEMPTER, Andrew G.: Information Fusion for Localization Within Vehicular Networks. In: *Journal of Navigation* Bd. 64. 2011, S. 401–416
- [423] JABBOUR, Maged; BONNIFAIT, Philippe; CHERFAOUI, Veronique: Map-Matching Integrity Using Multihypothesis Road-Tracking. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* Bd. 12. 2008, S. 189–201

## LITERATURVERZEICHNIS

- [424] RAMM, Katrin: *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C*. Bd. 619: *Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse*. Stuttgart, München : Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2008
- [425] CIVILIS, Alminas; JENSEN, Christian S.; PAKALNIS, Stardas: Techniques for Efficient Road-Network-Based Tracking of Moving Objects. In: *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* Bd. 17. IEEE, 2005, S. 698–712
- [426] BOUKERCHE, Azzedine; OLIVEIRA, Horacio A.; NAKAMURA, Eduardo F.; LOUREIRO, Antonio A.: Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems. In: *Computer Communications* Bd. 31. 2008, S. 2838–2849
- [427] ABUMANSOOR, Osama; BOUKERCHE, Azzedine: A Secure Cooperative Approach for Nonline-of-Sight Location Verification in VANET. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 61. IEEE, 2012, S. 275–285
- [428] ALAM, Nima; TABATABAEI BALAEI, Asghar; DEMPSTER, Andrew G.: Relative Positioning Enhancement in VANETs: A Tight Integration Approach. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 14. IEEE, 2013, S. 47–55
- [429] MENZEL, Marc; SCHERPING, Richard; KLAMMER, Cedric; CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM (Hrsg.): *Draft C2CCC Whitepaper on Positioning and Timing*. 5. September 2013
- [430] CENERARIO, Nicolas; DELOT, Thierry; ILARRI, Sergio: A Content-Based Dissemination Protocol for VANETs: Exploiting the Encounter Probability. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (2011), Nr. 3, S. 771–782
- [431] PASLAY, P. R.; SLIBAR, A.: The Motion of Automobiles in Unbanked Curves. In: *Ingenieur-Archiv* Bd. 24. 1956, S. 412–424
- [432] BLAU, P. J.: *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. 2. Auflage. Boca Raton, USA : CRC Press, 2009
- [433] BURG, Heinz; MOSER, Andreas: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, 2009
- [434] DAVIS, Philip J.: *Interpolation and Approximation*. New York : Dover Publications, 1975

- [435] DEKRA AUTOMOBIL GMBH: *Road Safety Report 2013 Rural Roads*. Stuttgart, April 2013
- [436] UPPOOR, Sandesh; TRULLOLS-CRUCES, Oscar; FIORE, Marco; BARCELO-ORDINAS, Jose M.: Generation and Analysis of a Large-Scale Urban Vehicular Mobility Dataset. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing* Bd. 13. IEEE, 2014, S. 1061–1075
- [437] KENDALL, Maurice G.; GIBBONS, Jean D.: *Rank Correlation Methods*. 5. Auflage. London and New York : E. Arnold und Oxford University Press, 1990
- [438] KONSORTIUM simTD (Hrsg.): *Deliverable D21.2: Konsolidierter Systemarchitekturentwurf*. 9. Oktober 2009
- [439] WEIDENDORFER, Josef; KOWARSHIK, Markus; TRINITIS, Carsten: A Tool Suite for Simulation Based Analysis of Memory Access Behavior. In: *Proceedings of the International Conference on Computational Science* Bd. 3038. 2004, S. 440–447
- [440] LI, Zhenhui; DING, Bolin; HAN, Jiawei; KAYS, Roland: Swarm: mining relaxed temporal moving object clusters. In: *Proc. VLDB Endow* 3 (2010), Nr. 1-2, 723–734. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1920841.1920934>
- [441] XU, Qing; SENGUPTA, Raja; MAK, Tony; KO, Jeff: Vehicle-to-Vehicle Safety Messaging in DSRC. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc NETWORKS*. ACM, 2004, S. 19
- [442] WOLFSON, Ouri; XU, Bo; YIN, Huabei; RISHE, Naphtali: Resource Discovery Using Spatio-temporal Information in Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Lecture Notes in Computer Science* Bd. 3833. Springer, 2005, S. 129–142
- [443] LU, R.; LIN, X.; ZHU, H.; SHEN, X.: SPARK: A New VANET-Based Smart Parking Scheme for Large Parking Lots. In: *Proceedings of INFOCOM*, IEEE, 2009, S. 1413–1421
- [444] SISTLA, Prasad A.; WOLFSON, Ouri; XU, Bo: Opportunistic Data Dissemination in Mobile Peer-to-Peer Networks. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Advances in Spatial and Temporal Databases*, Springer, 2005, S. 346–363
- [445] CALISKAN, Murat; GRAUPNER, Daniel; MAUVE, Martin: Decentralized Discovery of Free Parking Places. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ACM, 2006, S. 30–39
- [446] TALEB, Tarik; OCHI, Mitsuru; JAMALIPOUR, Abbas; KATO, Nei; NEMOTO, Yoshiaki: An Efficient Vehicle-Heading Based Routing Protocol for VANET Networks. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference* Bd. 4. IEEE, 2006, S. 2199–2204

## LITERATURVERZEICHNIS

- [447] SINGH, Ajit; KUMAR, Mukesh; RISHI, Rahul; MADAN, D. K.: A Relative Study of MANET and VANET: Its Applications, Broadcasting Approaches and Challenging Issues. In: MEGHANATHAN, Natarajan (Hrsg.); KAUSHIK, Brajesh K. (Hrsg.); NAGAMALAI, Dhinaharan (Hrsg.): *Advances in Networks and Communications* Bd. 132. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3-642-17877-1, S. 627–632
- [448] BISWAS, Subir; MISIC, Jelena: Relevance-based verification of VANET safety messages. In: *International Conference on Communications*, IEEE, 2012, S. 5124–5128
- [449] HUANG, Longjiao; LENG, Supeng; SHAO, Caixing; LIU, Changyue: An Information Relevance Related Broadcast scheme for Safety Packets in VANETs. In: *12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision*, IEEE, 2012, S. 1576–1581
- [450] CHEN, Yuh-Shyan; LIN, Yun-Wei; LEE, Sing-Ling: A Mobicast Routing Protocol in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, IEEE, 2009, S. 1–6
- [451] ZHOU, Zhong; WU, Wei: LoI: Efficient Relevance Evaluation and Filtering for Distributed Simulation. In: *Science in China Series F: Information Sciences* Bd. 52. 2009, S. 470–489
- [452] SZCZUREK, Piotr; XU, Bo; WOLFSON, Ouri; LIN, Jie: Estimating Relevance for the Emergency Electronic Brake Light Application. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Nr. 4, S. 1638–1656
- [453] CENERARIO, Nicolas; DELOT, Thierry; ILARRI, Sergio: Dissemination of Information in Inter-Vehicle Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 2008 Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2008, S. 763–768
- [454] DELOT, Thierry; CENERARIO, Nicolas; ILARRI, Sergio: Estimating the Relevance of Information in Inter-Vehicle Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Data Management Workshops*. IEEE, 2008, S. 151–158
- [455] MITROPOULOS, George K.; KARANASIOU, Irene S.; HINSBERGER, Arno; AGUADO-AGELET, Fernando; WIEKER, Horst; HILT, Hans-Josef; MAMMAR, Said; NOECKER, Gerhard: Wireless Local Danger Warning: Cooperative Foresighted Driving Using Intervehicle Communication. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 11. IEEE, 2010, S. 539–553
- [456] CHENG, Albert M. K.; RAJAN, Koushik: A Digital Map/GPS Based Routing and Addressing Scheme for Wireless Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2003, S. 17–20

- [457] DELOT, Thierry; ILARRI, Sergio: Data Gathering in Vehicular Networks: the VESPA experience. In: *Fifth IEEE Workshop On User MObility and Vehicular Networks (LCN ON-MOVE 2011)* (2011), S. 801–808
- [458] OBARA, Keiji; AKAMATSU, Ryosuke; SHIGENO, Hiroshi: BRNT: Broadcast Protocol with Road Network Topology for Urban Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference*, 2015, S. 1–5
- [459] PHIWKAMPHON, Rattaphon; SAIVICHIT, Chaiyachet: Classification Algorithm for Selective Broadcast Based on Road Incidence Relevance Analysis. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2013, S. 1–5
- [460] DIESTEL, Reinhard: *Graphentheorie*. 2. Auflage. Berlin : Springer, 2000
- [461] SZCZUREK, Piotr; XU, Bo; LIN, Jie; WOLFSON, Ouri: Machine Learning Approach to Report Prioritization with an Application to Travel Time Dissemination. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Computational Transportation Science*, ACM, 2009, S. 31–36
- [462] SZCZUREK, Piotr; XU, Bo; LIN, Jie; WOLFSON, Ouri: Spatio-Temporal Information Ranking in VANET Applications. In: *International Journal of Next-Generation Computing*. 2010, S. 62–86
- [463] SZCZUREK, Piotr; XU, Bo; WOLFSON, Ouri; LIN, Jie; RISHE, Naphtali: Prioritizing Travel Time Reports in Peer-to-Peer Traffic Dissemination. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing*, IEEE, 2010, S. 454–458
- [464] SZCZUREK, Piotr; XU, Bo; WOLFSON, Ouri; LIN, Jie; RISHE, Naphtali: Learning the Relevance of Parking Information in VANETs. In: *Proceedings of the 7th ACM International Workshop on Vehicular Internetworking*. ACM, 2010, S. 81–82
- [465] DENG, Wei-wei; PENG, Hong: Research on a Naive Bayesian Based Short Message Filtering System. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Dalian : IEEE, 2006, S. 1233–1237
- [466] ADLER, Christian; EICHLER, Stephan; KOSCH, Timo; SCHROTH, Christoph; STRASSBERGER, Markus: Self-Organized and Context-Adaptive Information Diffusion in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems*. IEEE, 2006, S. 307–311

## LITERATURVERZEICHNIS

- [467] KOSCH, Timo; EHMANN, Dirk: Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen und Funktionalitätserweiterungen durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien. In: *Tagungsband der 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2006, S. 1–7
- [468] ZHONG, Ting; XU, Bo; SZCZUREK, P.; WOLFSON, Ouri: Trafficinfo: An Algorithm for VANET Dissemination of Real-Time Traffic Information. In: *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2008, S. 1–12
- [469] MORALES, Mildred Madai C.; HAW, Rim; LEE, Jun; HONG, Choong S.: An Efficient Destination-Based Data Management Policy for Vehicular Networks. In: *11th International Conference on ITS Telecommunications*, IEEE, 2011, S. 399–404
- [470] BAI, Fan; KRISHNAMACHARI, Bhaskar: Exploiting the Wisdom of the Crowd: Localized, Distributed Information-Centric VANETs. In: *IEEE Communications Magazine* Bd. 48. IEEE, 2010, S. 138–146
- [471] LI, Zhengming; LIU, Congyi; CHIGAN, Chunxiao: GPAS: A General-Purpose Automatic Survey System Based on Vehicular Ad Hoc Networks. In: *IEEE Wireless Communications* Bd. 18. IEEE, 2011, S. 61–66
- [472] ZHANG, Yang; ZHAO, Jing; CAO, Guohong: Roadcast: A Popularity Aware Content Sharing Scheme in VANETs. In: *Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, IEEE, 2009, S. 223–230
- [473] CHENG, Sheng-Tzong; LI, Jian-Pan: Using Interest-Aware Probabilistic for Leisure Information Dissemination in VANETs. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE, 2012, S. 772–777
- [474] MAZILU, S.; TELER, M.; DOBRE, C.: Securing Vehicular Networks Based on Data-Trust Computation. In: *Proceedings of the International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, IEEE, 2011, S. 51–58
- [475] WIBISONO, Waskitho; ZASLAVSKY, Arkady; LING, Sea: CoMiHoC: A Middleware Framework for Context Management in MANET Environment. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, IEEE, 2010, S. 620–627
- [476] YASAR, Anar-Ul-Haque; VANROMPAY, Yves; PREUVENEERS, Davy; BERBERS, Yolande: Optimizing Information Dissemination in Large Scale Mobile Peer-to-Peer Networks Using Context-Based Grouping. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2010, S. 1065–1071



- [477] YASAR, Ansar-Ul-Haque; PARIDEL, Koosha; PREUVENEERS, Davy; BERBERS, Yolande: When efficiency matters: Towards quality of context-aware peers for adaptive communication in VANETs. In: *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2011, S. 1006–1012
- [478] BUCHHOLZ, Thomas; SCHIFFERS, Michael: Quality of Context: What It Is And Why We Need It. In: *Proceedings of the 10th Workshop of the OpenView University Association*, 2003, S. 1–14
- [479] SAILHAN, F.; ISSARNY, V.: Energy-Aware Web Caching for Mobile Terminals. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, IEEE, 2002, S. 820–825
- [480] BOLL, Susanne; HEINRICH, Christian; KLAS, Wolfgang; WANDEL, Jochen: MPEG-L/MRP: Adaptive Stream of MPEG Videos for Interactive Internet Applications. In: *Proceedings of the 9th ACM international conference on Multimedia*. ACM, 2001, S. 626
- [481] ZHIWEI CHEN; YUNJIE XU: User-Oriented Relevance Judgment: A Conceptual Model. In: *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2005, S. 101b
- [482] DATTA, Anwitaman; QUARTERONI, Silvia; ABERER, Karl: Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Wireless Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Lecture Notes in Computer Science* Bd. 3226. Springer, 2004, S. 126–143
- [483] ZHANG, Linjuan; GAO, Deyun; ZHAO, Weicheng; CHAO, Han-Chieh: A Multilevel Information Fusion Approach for Road Congestion Detection in VANETs. In: *Mathematical and Computer Modelling* Bd. 58. 2013, S. 1206–1221
- [484] PERICH, Filip; JOSHI, Anupam; FININ, Timothy; YESHA, Yelena: On Data Management in Pervasive Computing Environments. In: *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* Bd. 16. IEEE, 2004, S. 621–633
- [485] SCHWARTZ, Ramon S.; OHAZULIKE, Anthony E.; VAN DIJK, Hylke W.; SCHOLTEN, Hans: Analysis of Utility-Based Data Dissemination Approaches in VANETs. In: *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2011, S. 1–5
- [486] CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford: *Introduction to Algorithms*. 3. Auflage. Cambridge : Mit Press, 2009
- [487] BRODAL, Gerth S.: Worst-Case Efficient Priority Queues. In: *Proceedings of the 7th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, ACM, 1996, S. 52–58

## LITERATURVERZEICHNIS

- [488] ATKINSON, M. D.; SACK, J.-R.; SANTORO, N.; STROTHOTTE, T.: Min-max Heaps and Generalized Priority Queues. In: *Communications of the ACM* Bd. 29. ACM, 1986, S. 996–1000
- [489] NAIN, Philippe: *Basic Elements of Queuing Theory – Application to the Modelling of Computer Systems*. 1998
- [490] BAYER, Rudolf: Symmetric Binary B-Trees: Data Structure and Maintenance Algorithms. In: *Acta Informatica* Bd. 1. 1972, S. 290–306
- [491] IEEE: *Standard for Binary Floating-Point Arithmetic*. 1985. Piscataway, USA, 1985