

FAKULTÄT FÜR INFORMATIK

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Angewandte Informatik / Kooperative Systeme

Situationsadaptive Kommunikation in Automobilen Ad-hoc Netzen

Timo Kosch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. A. Kemper, Ph.D.

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. J. Schlichter
2. Univ.-Prof. Dr. U. Baumgarten

Die Dissertation wurde am 10.11.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 17.03.2005 angenommen.

Danksagung

Bei der Erstellung dieser Arbeit hatte ich große Freiräume, viele Anregungen und tolle Möglichkeiten, sowohl die Arbeit als auch mich selbst weiterzuentwickeln.

Mein besonderer Dank gilt Professor Schlichter, nicht nur für seine dauerhafte Unterstützung, wertvollen Anregungen, kritischen Rückfragen und die sorgfältige Durchsicht der Arbeit, sondern auch für die Möglichkeit, mich als externer Doktorand vollständig in das Team des Lehrstuhls integrieren zu können. Ebenso gilt mein Dank Professor Baumgarten für wichtige Hinweise zur Darstellung der Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die logische Argumentation.

Diese Arbeit ist zum großen Teil bei der BMW Fahrzeugforschung und später bei der BMW Forschung und Technik GmbH entstanden. Hier habe ich insbesondere durch Herrn Karl-Ernst Steinberg wunderbare Unterstützung erfahren und alle Möglichkeiten der persönlichen und fachlichen Entwicklung bekommen. Die Arbeit wurde bereichert durch den Austausch und unzählige Gespräche mit Kollegen und Doktoranden bei BMW und an der TUM. Eine Reihe von Studenten haben an der Entstehung der Arbeit mitgewirkt und ihr immer wieder neue Impulse gegeben. Für diesen vielfältigen Dialog, die Begleitung und Mitwirkung danke ich allen.

Nicht zuletzt habe ich durch meine Familie hervorragende Unterstützung, Antrieb und sehr hilfreiche Kritik erfahren. Insbesondere durch meinen Vater erhielt ich zusätzlich zu Halt und Aufmunterung wichtiges fachliches und methodisches Feedback. Neben meiner Familie möchte ich auch meinen Freunden danken für die Bereitschaft, alle Höhen und Tiefen bei der Erstellung der Arbeit mit mir zu teilen und den manchmal nicht ganz einfachen Weg mit mir zusammen zu gehen.

ZUSAMMENFASSUNG

Während das Konzept mobiler Ad-hoc Netze unter dem Begriff *Packet Radio Networks* bis in die 70er Jahre zurückreicht, erfreut sich das Forschungsgebiet durch die Verbreitung des Internet und neuer Mobilkommunikationstechnologien seit einigen Jahren steigender Aufmerksamkeit. Die Forschung konzentriert sich jedoch bislang auf die Übertragung bestehender Kommunikationsparadigmen aus dem Festnetzbereich und beschränkt sich mit wenigen Ausnahmen auf Kanalzugriffs- und Routingverfahren. Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, den Eigenschaften mobiler Ad-hoc Netze durch neue Kommunikationsmodelle, insbesondere die zeitliche Entkopplung der Kommunikation der unteren von den oberen Kommunikationsschichten, Rechnung zu tragen und die Vorteile gezielt zu nutzen.

Die Arbeit beschäftigt sich mit der situationsadaptiven Verteilung von Informationen in Ad-hoc Netzen. Dazu wird ein Verfahren zur Ermittlung situationsabhängigen Informationsbedarfs anhand des situationsbezogenen Nutzens von Informationsobjekten vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf ortsbezogenen Informationen. Basierend auf den ermittelten Informationsbedarfen und dem verfügbaren und generierten Informationsangebot werden bedarfsbezogene Informationsaustausch- und -verbreitungsverfahren eingeführt. Die Anwendung des Modells zur Realisierung situationsadaptiver Fahrerinformationssysteme wird dargestellt. Es wird gezeigt, wie basierend auf dem Modell hochaktuelle Verkehrsinformationssysteme einfach implementiert werden können. Andere Beispiele sind Park- oder Reiseinformationssysteme sowie der Austausch von Sensorinformationen zur Optimierung der Fahrregelsysteme (Fahrzeuglängs- und -querregelung durch Systeme wie ABS, dynamische Stabilitätskontrolle DSC oder Abstandsregelautomat ACC).

Die notwendigen Kommunikationsverfahren zum Informationsaustausch passen sich variierenden Ad-hoc Netz Eigenschaften an. Speziell entwickelte Protokolle optimieren das Kommunikationsverhalten, indem sie den typischen Charakteristika im automobilen Umfeld Rechnung tragen, insbesondere der hohen Dynamik und den straßenbasierten Trajektorien der Netzteilnehmer. Lösungen für die beiden Extremfälle sehr hoher und niedriger Teilnehmerdichte basieren auf der Reduktion redundanter Kommunikation einerseits sowie positionsadaptiver *store & forward* Mechanismen andererseits. Eine Softwarearchitektur als aufbauorganisatorischer Rahmen sowie sinnvolle Anwendungsschnittstellen werden vorgestellt. Das Verhalten des Systems wird beschrieben und mit Hilfe von Simulationen evaluiert.

Schlagworte: Ad-hoc Netze, Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, Dedicated Short Range Communication (DSRC), Fahrerinformationssysteme, Kontext-sensitive Systeme, Situationsadaptivität, Informationsnutzen

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xii
1 Einführung	1
1.1 Ziel der Arbeit	1
1.2 Informations- und Kommunikationssysteme im PKW	2
1.3 Mobile Informationssysteme und Ad-hoc Netze	8
1.4 Problem- und Aufgabenstellung	11
1.5 Inhalt und Aufbau	14
2 Begriffliche Grundlagen	17
2.1 Mobiles Ad-hoc Netzwerk	17
2.2 Selbstorganisation	19
2.3 Situationsadaptivität und Kontext-Sensitivät	22
3 Stand der Forschung und verwandte Arbeiten	26
3.1 Ad-hoc Netze	26
3.1.1 Routing	26
3.1.2 Geocasting	29
3.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation	33
3.2.1 DSRC: Dedicated Short Range Communication	33
3.2.2 Multi-Hop Kommunikation	35
3.3 Informationsaustausch und -verbreitung	36
3.3.1 Nachrichtenbasierte Kommunikation und Messaging Systeme	36

3.3.2	Publish/Subscribe Systeme	37
3.3.3	Sensornetze	39
3.3.4	Epidemische Algorithmen	40
3.3.5	Hoarding	40
4	Die CARISMA Systemarchitektur	42
4.1	Anforderungen an die Architektur	42
4.1.1	Anwendungsfälle	42
4.1.2	Anwendungsklassifikation und Anforderungen	45
4.2	CARISMA Architektur und Systemkomponenten	48
4.2.1	Systemarchitektur	48
4.2.2	Die prototypisch realisierten Anwendungen	52
4.2.3	Das Nachrichtensystem	52
4.2.4	Das Informations- und Dienstemanagement	55
4.2.5	Das Situationsmanagement	56
4.2.6	Die Netzwerkkomponente	58
5	Das CARISMA Ad-hoc Kommunikationsnetz	59
5.1	Technologien für die Fahrzeug-zu-Fahrzeugkommunikation	59
5.1.1	Eignung existierender Funksysteme	59
5.1.2	Der Einsatz von WLAN (IEEE802.11)	61
5.2	Beschreibung und Modellbildung	67
5.2.1	Modellierung von Fahrzeug Ad-hoc Netzen	67
5.2.2	Eigenschaften des Netzmodells	69
5.2.3	Mobilitätsmodell	70
5.3	Konnektivität	76
5.3.1	Metriken	76
5.3.2	Konnektivität entlang einer Straße	77
5.3.3	Innenstadtszenarien	80
5.3.4	Erreichbarkeit durch Mobilität in Abhängigkeit der Zeit	91
5.4	Nachrichtenkommunikation	96
5.4.1	Netzwerksimulation	96
5.4.2	Verhalten in fragmentierten Netzen	97

5.4.3	Verhalten in dichten Netzen	103
5.4.4	Versand und Weiterreichen von Paketen bei CARISMA	105
6	Situationsabhängige Informationsbedarfsbestimmung	117
6.1	Situationsadaptivität	117
6.1.1	Informationsbedarf durch Umgebungsänderung	117
6.1.2	Situationsadaptive Systeme	121
6.2	Situationsmodell	124
6.2.1	Modell zur Situationsrepräsentation	124
6.2.2	Situationen und situationsrelevante Parameter bei einer Autofahrt	125
6.3	Situationsabhängiger Informationsnutzen	127
6.3.1	Informationsmodell	127
6.3.2	Situationsbezogene Nutzenbewertung von Informationsobjekten	128
7	Situationsadaptive Kommunikation	135
7.1	Nutzenänderungsinduzierte Kommunikationsanforderung	135
7.2	Lokaler Informationsspeicher	137
7.2.1	Inhalt des Speichers und Ersetzungsstrategien	137
7.2.2	Speicherorganisation	138
7.2.3	Nutzenmaximierende Speicherung ortsbezogener Informationen	141
7.3	Nachbarschaftsbasierter Informationsaustausch	143
7.3.1	Mobilitätsinduzierter Austausch ortsbezogener Information	143
7.3.2	Austauschprotokoll	145
7.4	Adaptive Nachrichtenbasierte Kommunikation	148
7.4.1	Modellbildung	148
7.4.2	Das Versandproblem und seine Lösung bei CARISMA	151
7.4.3	Das Adressierungsproblem und seine Lösung bei CARISMA	152
7.5	Aktive Informationsbeschaffung	158
8	Weitere Aspekte	159
8.1	Dienstemanagement	159
8.2	Die Kombination mit zellularen und Broadcast-Netzen	160

9 Zusammenfassung und Ausblick	162
9.1 Kerneergebnisse	162
9.2 Veröffentlichungen	163
9.3 Offene Fragen und weitergehende Forschungsarbeiten	164
9.4 Abschlußdiskussion	165
9.5 Schlußbemerkung	166
A Abkürzungen	167
B Der Netzwerksimulator GloMoSim	170
C Das Shapefile Datenformat	171
D Mobilitätsmodell: Geschwindigkeitsberechnung	172
E Spezifikation der WLAN Fahrzeugantenne	174
Literaturverzeichnis	177

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gegenwärtige Funknetzbasierete Dienste im Automobil	3
1.2	Warnung vor lokaler Gefahr auf Autobahnausfahrt	4
1.3	Unmittelbare Verkehrsinformation in der Stadt	5
1.4	Vergleich von Ad-hoc, Broadcast und zellularen Netzen	6
1.5	Zellulare und Ad-hoc Netze	9
1.6	Einordnung der Arbeit in eine Kommunikationsklassifikation	10
1.7	Informationsangebot und -nachfrage in einem Ad-hoc Netz	12
1.8	Allgemeines Ad-hoc Netz und Fahrzeug Ad-hoc Netz (VANET)	13
1.9	Grundlegendes Systemmodell	16
2.1	Beispieltopologie für Kommunikationsverhalten, das individuellen oder sozialen Nutzen optimiert	21
2.2	Situationsabhängige Bewertung kommunizierter Informationsobjekte	23
3.1	Routenaufbau und Routentabellen bei AODV	28
3.2	Das Prinzip des <i>Geocasting</i>	30
3.3	Problem einer Weiterleitungszone in VANETS	32
3.4	Einsatz von DSRC zur automatisierten Erhebung von Straßengebühren.	34
3.5	Publish/Subscribe Systeme	37
4.1	Anwendungsszenarien in der Stadt	43
4.2	Verkehrsinformation per Video bei Ampelstop	44
4.3	Kommunikation mit Infostationen und lokalen Zugangsknoten.	45
4.4	Informationsaustausch mit Fahrzeugen in der Nähe zu Fahrtbeginn.	47
4.5	Das CARISMA Schichtenmodell	49
4.6	Situationsadaptives Nachrichtensystem	51
4.7	Lokale Gefahrenwarnung im Fahrzeug	53
4.8	Prototyp Screenshot: Kontrolle der Audio Ausgabe verschiedener Inhalte	54

4.9	Prototyp Screenshot: Browser im Fahrzeug	54
5.1	VANETS im Basismodell	59
5.2	Testbed Setup	62
5.3	Testaufbau im Fahrzeug	62
5.4	IEEE802.11b Meßergebnisse: Signalstärke und UDP Bitrate bei 30 km/h	63
5.5	Dauer der Kommunikation und UDP Bitrate bei verschiedenen Geschwindigkeiten	64
5.6	Erreichbare Datenübertragungsmenge (UDP) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	64
5.7	TCP Durchsatz bei 240 km/h Relativgeschwindigkeit	65
5.8	Testszenario Kommunikationskette	66
5.9	TCP Durchsatz einer Fahrzeugkommunikationskette	66
5.10	Ad-hoc Netzwerk Klassifikation	70
5.11	Beispiele für Trajektorien erzeugt durch verschiedene Mobilitätsmodelle	71
5.12	Datenstrukturelemente des Straßennetzmodells	74
5.13	Verzeigerung zwischen Kreuzungen und Kreuzungsverbindungsstücken	75
5.14	Eindimensionale Konnektivität	78
5.15	Mindest-Verbindungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Kombinationen von Reichweite und Knotendichte für eine Gerade von 2000m Länge	79
5.16	Verbindungswahrscheinlichkeiten für 2km und 10km Kommunikationsdistanz	80
5.17	Kombinationen von Kommunikationsreichweite und Fahrzeugdichte für verschiedene Verbindungswahrscheinlichkeiten (zwischen 20% und 99%) bei einer Entfernung der Kommunikationspartner von 2km	81
5.18	Kombinationen von Kommunikationsreichweite und Fahrzeugdichte für verschiedene Entfernungen der Kommunikationspartner (zwischen 1km und 50km) mit einer Verbindungswahrscheinlichkeit von 95%	81
5.19	Verbindungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte für verschiedene Entfernungen der Kommunikationspartner (zwischen 1km und 50km) bei $r = 1000m$ (links, schneller steigend) und $r = 400m$ (rechts, etwas weniger steil verlaufend)	82
5.20	Notwendige Fahrzeugdichte in Abhängigkeit der Entfernung der Kommunikationspartner für verschiedene Verbindungswahrscheinlichkeiten (zwischen 20% und 99%) bei $r = 400m$	82
5.21	Auswirkung des Gebäudeabschirmfaktors	83
5.22	Simulationsschnappschuß ohne Gebäudeabschirmung	84
5.23	Simulationsschnappschuß mit Gebäudeabschirmung	85

5.24	Konnektivität	86
5.25	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r ohne Abschirmung	88
5.26	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r ohne Abschirmung	88
5.27	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r bei $\xi = 40$	89
5.28	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r bei $\xi = 40$	89
5.29	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r bei $\xi = 20$	90
5.30	Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r bei $\xi = 20$	90
5.31	Auswirkung der Abschirmung auf die Konnektivität in Abhängigkeit der Dichte	92
5.32	Konnektivität in Abhängigkeit der Dichte bei verschieden starker Abschirmung	92
5.33	Mindestausbreitungsgebiet einer Gefahrenwarnung entlang einer einzelnen Straße.	94
5.34	Gemeinsame Dichtefunktion der Entfernungen zu den jeweils beiden nächsten Fahrzeugen von einer Position auf der Straße in beiden Fahrtrichtungen.	95
5.35	Zusammenhang zwischen Teilnehmerdichte und Mindestkommunikationsdistanz.	96
5.36	Nachrichtenlatenz in einem Gebiet der Größe 6.5 km^2	98
5.37	Nachrichtenlatenz in einem Gebiet der Größe 33 km^2	99
5.38	Empfangsverzögerung in Abhängigkeit der Position.	100
5.39	Fahrzeugverteilung in Simulationsschnappschuß.	101
5.40	Nachrichtenlatenz nach initialer Simulationszeit (33 km^2 Simulationsgebietsgröße).	102
5.41	Beispiel für die Redundanz beim Broadcast Sturm Problem	104
5.42	Weiterleiten in Abhängigkeit zusätzlich abgedeckter Straßenlänge	106
5.43	Das Broadcast Sturm Problem in Stadtszenarien	107
5.44	Beispiel zur Verbreitung einer Nachricht über den entferntesten Knoten jedes Kreuzungsverbindungsstücks	108
5.45	Header zu verbreitender CARISMA Nachrichtenpakete	109
5.46	Prinzipielles Verhalten der CARISMA Routingkomponente	110
5.47	Auswahl der Weiterleitungsknoten bei NGSF	112
5.48	Verhalten beim Eintreffen einer Verbreitungsnachricht	113
5.49	Vergleich von einfachem Fluten mit CARISMA Broadcast	114
5.50	Schnappschuß der Simulation des Broadcaststurmproblems	114
5.51	Anzahl der Sendeereignisse von WGSF und NGSF	116
5.52	Nachrichtenlatenz bei WGSF und NGSF im Vergleich	116
6.1	Situationsabhängige Informationsbedarfsbestimmung im Basismodell	117

6.2	Prinzipielles Systemverhalten	118
6.3	Situationsgetriggerte, doppelt entkoppelte Kommunikation	120
6.4	Situationsadaptivität im System	122
6.5	Verteilte CARISMA Komponenten im Fahrzeug	123
6.6	Modellbildung zur Fahrtzielerkennung	127
6.7	Informationsnutzen in Abhängigkeit der Entfernung vom Informationsursprung	131
6.8	Informationsnutzen in Abhängigkeit der Position	132
6.9	Informationsnutzen in Abhängigkeit des Alters des Informationsobjektes	133
6.10	Informationsnutzen in Abhängigkeit von Alter und künftigen Positionen	133
7.1	Situationsadaptive Kommunikation im Basismodell	135
7.2	Kommunikationsart in Abhängigkeit der Nutzeigenschaften	136
7.3	Verzögerung der Informationsobjekte hinsichtlich Alter, Entfernung und Nutzen	139
7.4	Beispiel für Organisation des Informationsspeichers	140
7.5	Struktur eines Informationsobjektpaketes	140
7.6	Maximierung des Nutzens statischer ortsbezogener Informationsobjekte	142
7.7	Fisheye induzierter Netzverkehr	144
7.8	Informationsaustauschverfahren zweier benachbarter Knoten	147
7.9	Problem des Übertragungsprogrammes beim nachbarschaftsbasierten nutzenoptimierenden Informationsaustausch	148
7.10	Beispiel Ad-hoc Interessennetz	149
7.11	Problem der Verkehrsinformationsverbreitung in der Stadt	153
7.12	Adressierungsproblem bei komplexeren Straßenverläufen	154
7.13	Subskriptionsvarianten	155
7.14	Problematik rein nutzenbasierter Nachrichtenverbreitung	156
8.1	Situations- und QoS adaptives Service Discovery	160
8.2	Netzwerkintegration	161
E.1	Fahrzeugantenne	174
E.2	Antennenabstrahlcharakteristik Horizontal	175
E.3	Antennenabstrahlcharakteristik Vertikal	176

Tabellenverzeichnis

3.1	Klassifikation der DSRC Forschung	35
3.2	Charakteristika und Einordnung des situativen CARISMA Nachrichtensystems . . .	39
4.1	Anforderungen verschiedener Anwendungsklassen	46
4.2	Anforderungen von Fahrerinformationsdiensten	46
4.3	Notwendige Komponenten zur Realisierung verschiedener Anwendungsklassen . .	47
4.4	CARISMA Nachrichtensystem API	55
4.5	CARISMA Dienste- und Informationsmanagement API	55
4.6	CARISMA Situations- und Nutzermanagement API	57
4.7	CARISMA Netzwerk API	58
5.1	Vergleich existierender Mobilkommunikationstechnologien	60
6.1	Informationsobjektkorrelation mit fahrrelevanten Situationsparametern	131
7.1	Klassifizierung des CARISMA Messaging	150
7.2	Charakteristika und Einordnung situativer Nachrichtenkommunikation	156
B.1	Protokollübersicht GloMoSim	170
E.1	Antennenspezifikation	174

Kapitel 1

Einführung

1.1 Ziel der Arbeit

”My car reports to the local gas station in the evening when it is low on gas, so that it can be filled at night and ready for me in the morning. I like this service, but my car is no longer the friend I once knew. If I exceed the speed limit, it reports me, and if I try to park illegally, it refuses to turn off or to let me open the door. With integrated GPS, it continually reports my position. I want to disengage these features, but the car comes with a shrink-wrap agreement whose legalese implies that the purchaser has only licensed its capabilities without any true ownership. The car now owes its primary allegiance to the new mega-company, Motorsoft. I study the car in the quiet darkness of the garage, trying fruitlessly to discern its vulnerabilities.”

— Robert W. Lucky [133]

”Die Zukunft muss man nehmen, wie sie kommt. Man muss sie natürlich so beeinflussen, daß sie auch so kommt, wie man sie nehmen möchte.”

— Curt Goertz

Das Zitat von Robert W. Lucky macht deutlich, daß sich technologische Entwicklung nicht an den prinzipiellen Möglichkeiten, sondern am Menschen orientieren muß. Während die Chancen einer verstärkten Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnologien im automobilen Bereich vorsichtig anklingen, so dürfen die hier angesprochenen Gefahren eines Kontrollverlustes und einer vollständigen Überwachung nicht vernachlässigt werden. Die vorliegende Arbeit möchte in diesem Sinne einen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit, der Verkehrseffizienz und des Komforts beim Reisen leisten.

Ziel der Arbeit ist die Versorgung des Fahrers eines Automobils mit situationsbezogen relevanter Information, zur richtigen Zeit, in hoher Qualität und zu geringen Kosten. Dazu zählt einerseits die rechtzeitige Versorgung mit der benötigten Information im gewünschten Detaillierungsgrad, andererseits aber auch die Vermeidung nicht benötigter Information. Die heutigen Informationssysteme besitzen in bezug auf diese Kriterien, d.h. Umfang, Präzision und Zeitpunkt, deutliches Verbesserungspotential. Das in dieser Arbeit vorgestellte System CARISMA (Car Information system based on Situation-adaptive Mobile Ad-hoc networking) ermöglicht eine hinsichtlich der drei genannten Kriterien verbesserte Informationsversorgung. Ein wichtiges Einsatzfeld für CARISMA ist die Warnung vor Gefahren. Durch rechtzeitige Information kann der Fahrer eines Automobils

sein Verhalten anpassen und beispielsweise die Geschwindigkeit reduzieren. Mit einer Realisierung des CARISMA Systems ist deshalb auch die Hoffnung auf die Vermeidung von Unfällen verbunden¹.

Der folgende Abschnitt stellt kurz die Historie und aktuelle Situation von Informationssystemen im Fahrzeug dar. Anschließend werden Mobilkommunikationstechnologien als Basis der Informationsübertragung beschrieben. Insbesondere wird der Einsatz sich spontan bildender, so genannter Mobiler Ad-hoc Netze im Automobilbereich für die Informationsversorgung der Verkehrsteilnehmer motiviert. Der Einsatz dieses Netztypus zur situationsbezogenen Informationsversorgung des Autofahrers bringt einige besondere Herausforderungen mit sich, die näher erläutert werden. Die im Rahmen der Arbeit behandelte Problemstellung und sich daraus ergebende Teilprobleme werden beschrieben. Es schließt sich ein Überblick verwandter Forschungsbereiche an, die sich mit Lösungen für einzelne Teilprobleme, in der Regel in anderem Kontext, beschäftigen. Am Ende des Einleitungsteils folgen Informationen über Struktur und Aufbau der Arbeit.

1.2 Informations- und Kommunikationssysteme im PKW

”Die ständig wachsende Zahl von autonomen elektronischen Systemen in einem Kfz und deren Vernetzung führt dazu, daß der Theorie Verteilter Systeme und deren praktischer Anwendung bei der Entwicklung und dem Betrieb von Kfz eine immer größere Bedeutung zukommt.”

— Berger, Bort und John [15]

Betrachtet man die Historie des Automobils, so läßt sich feststellen, daß eine steigende Zahl von Funktionen durch elektronische Komponenten unterstützt, ersetzt oder neu eingeführt wurden. Dies betrifft sowohl fahr- und sicherheitsrelevante Funktionen als auch Komforteigenschaften. Als Beispiele seien das Anti-Blockier-System, die Dynamische Stabilitätskontrolle, aber auch Zentralverriegelung und elektrische Fensterheber genannt. In der jüngeren Vergangenheit traten Navigations-, Fahrerassistenz- (z.B. automatische Abstandshaltesysteme) und Fahrerinformationssysteme hinzu (z.B. Verkehrsinformation, Online-Informationendienste)².

Viele Funktionen dieser Systeme benötigen Informationen von anderen Komponenten. Um diese Informationsversorgung zu ermöglichen, wurden die elektronischen Komponenten fahrzeugintern in den letzten Jahren immer stärker miteinander vernetzt. Dabei kommen Feldebussysteme (z.B. das Controller Area Network (CAN) [122]) zur Kommunikation fahrrelevanter Steuergeräte und optische Bussysteme (z.B. Media Oriented Systems Transport (MOST) [100]) für den Austausch multimedialer Daten zum Einsatz. Während fahrzeugintern elektronische Komponenten über diese Netze miteinander kommunizieren können, beschränken sich die Möglichkeiten des Datenaustauschs mit fahrzeugexternen Komponenten bislang noch häufig auf den Empfang von Broadcastinformationen mittels analoger Rundfunkempfänger, zum Teil mit der Möglichkeit des Empfangs

¹Das statistische Bundesamt verzeichnete für die Bundesrepublik Deutschland 6613 Getötete und 462170 Verletzte im Straßenverkehr im Jahr 2003.

²Die Entwicklung der Rolle von Elektronik und Informationstechnik im Automobil beschreibt Gaus [66] überblicksartig. Speziell auf den Einsatz von Mobilfunk-Technologien in der Verkehrstelematik geht Mehl ein [137].

von Verkehrsdaten (TMC³-Daten). In vielen Automobilen findet man heute darüber hinaus ein GSM⁴-Modul, mit dem innerhalb von GSM Funkzellen Telefongespräche geführt werden können und das als Modem zum digitalen Datenaustausch verwendet werden kann (zu GSM siehe Eberspächer et al. [57]). Es wird zum Beispiel genutzt, um bei Auslösen der Airbags SOS-Daten an die nächste Notrufzentrale zu übermitteln oder um aktuelle Wetterinformationen vom Webserver eines Informationsanbieters abzurufen und im Fahrzeugdisplay anzuzeigen. Abbildung 1.1 stellt die gegenwärtige Verwendung existierender Funkkommunikation im Auto dar. Die Information wird dabei über festgelegte Menüstrukturen abgerufen. Informationen, die sich weniger häufig ändern wie Straßenkarten oder sogenannte *Points of Interest*, liegen zum Teil auf festen Datenträgern (in der Regel auf einer DVD) im Fahrzeug vor. Für diese festen Datenträger sind dann regelmäßige Updates erforderlich. Bei einigen Diensten (Notruf, nächstgelegener Geldautomat) spielt die Position des Fahrzeugs eine Rolle. Navigationssysteme berücksichtigen darüber hinaus die Route zum Fahrtziel und filtern Verkehrsinformationen über die geplante Strecke aus Broadcasttransmissionen (TMC) heraus.

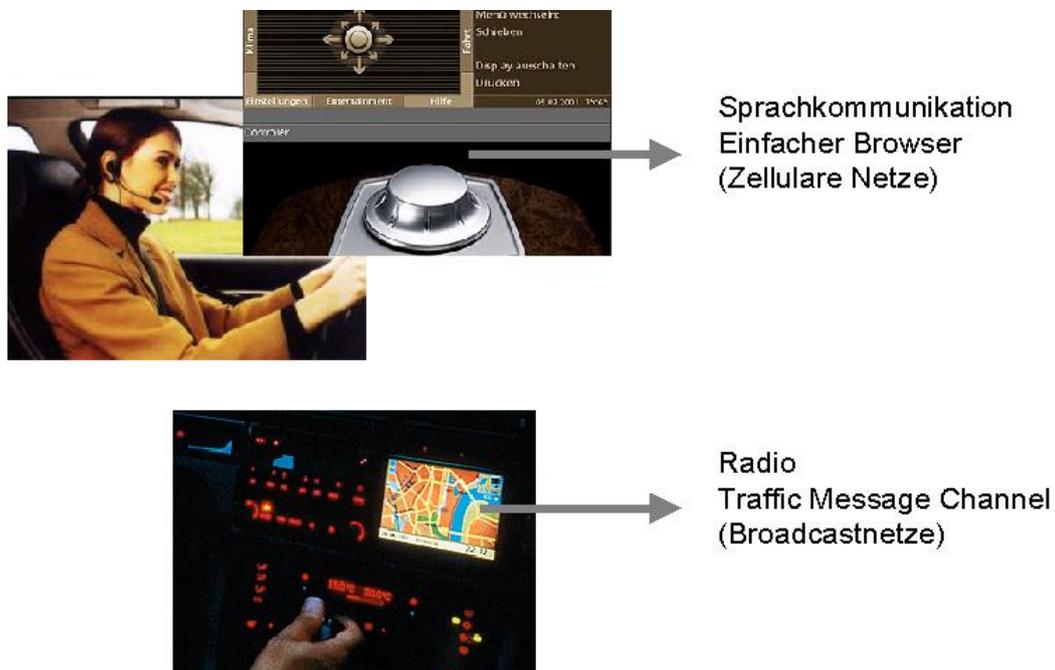


Abbildung 1.1: Gegenwärtige Funknetzbasierende Dienste im Automobil

Im Fahrzeug stehen somit einerseits lokale, über die Fahrzeugsensoren erfaßte Informationen zur Verfügung und andererseits globale, aggregierte Informationen, die für eine große Menge von Teilnehmern identisch sind. Es fehlt jedoch detaillierte, rechtzeitige und an die jeweilige Situation angepasste Information, die über das von der lokalen Sensorik erfaßte Umfeld des Fahrzeugs hinausgeht. Dazu zählen Informationen über die genaue Verkehrslage, den Straßenzustand, Gefahren oder akute Störungen auf dem vorausliegenden Streckenabschnitt.

³TMC: Traffic Message Channel, <http://www.tmcforum.com>

⁴GSM: Global System for Mobile Communication, <http://www.gsmworld.com>

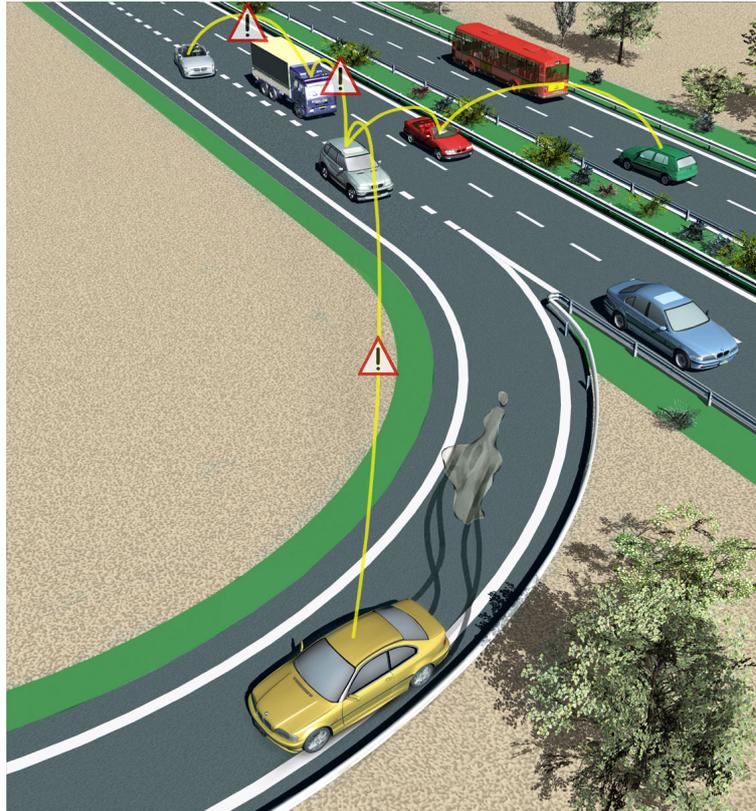


Abbildung 1.2: Warnung vor lokaler Gefahr auf Autobahnausfahrt

Ist beispielsweise die Straße rutschig, so kann dies ein Sensor im Fahrzeug nur erkennen, wenn sich das Fahrzeug bereits über der rutschigen Stelle befindet. Erforderlich ist es aber, bereits vorab über die rutschige Stelle informiert zu sein, um bspw. die Geschwindigkeit rechtzeitig zu senken. Solche Informationen können von vorausfahrenden Fahrzeugen erfaßt werden oder aus den in den Fahrzeugen verteilten Sensordaten gewonnen werden. Abbildung 1.2 stellt die beschriebene Situation dar. Das Fahrzeug im Vordergrund, das gerade die Autobahn verläßt, kommt durch eine Ölspur kurzzeitig ins Rutschen. Mit der Unterstützung der dynamischen Stabilitätskontrolle passiert das Fahrzeug unbeschadet die gefährliche Stelle. Auf Basis der Sensorinformation (Schlupf der Räder, Lenkeinschlag, Geschwindigkeit, ggfs. Reibwertsensor) kann es selbständig auf das Vorliegen einer rutschigen Stelle schließen. Es kann unter Hinzuziehen weiterer Informationen (Außentemperatur, Regensensor, Scheibenwischer eingeschaltet) unterscheiden, ob es sich um Eisglätte, Aquaplaning oder eine fremde Flüssigkeit (Ölspur etc.) auf der Straße handelt. Es generiert daraus einen Warnhinweis, den es direkt per Funk an nachfolgende Fahrzeuge weiterreicht (im Bild symbolisiert durch die gelben bogenförmigen Linien). Die Fahrer, die anschließend die Ausfahrt nehmen, können so rechtzeitig gewarnt werden und ihre Geschwindigkeit der Situation anpassen.

Ein weiteres Beispiel sind hochaktuelle Informationen über die Verkehrslage, ermittelt aus Positions- und Geschwindigkeitsinformationen mehrerer Verkehrsteilnehmer. Aus diesen Einzelinformationen können Reisezeiten für Streckenabschnitte berechnet und lokale Störungen schnell erkannt werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Der LKW blockiert temporär die Seitenstraße. Er sendet selbst die Information aus, daß er gerade be- oder entladen wird, gemeinsam

mit seiner Position. Ein bereits in die Straße eingefahrenes Fahrzeug meldet zusätzlich Stillstand. Die Fahrzeuge in der Umgebung erhalten dann direkt die Information, daß diese Straße aktuell blockiert ist. Andere lokale Hindernisse wie Schwertransporter oder Müllfahrzeuge können die Verkehrsteilnehmer in der Umgebung ebenfalls informieren. In der Abbildung kann das silberne Fahrzeug im Bild links, dessen Route entlang der blockierten Straße geplant war (symbolisiert durch den roten Streckenverlauf), bereits eine Straße früher links abbiegen und so das Hindernis umfahren. Die neue Route ist durch den grünen Streckenverlauf gekennzeichnet.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Versorgung mit solchen Informationen zu verbessern. Da benötigte Informationen in vielen Fällen bei anderen Fahrzeugen in der Umgebung vorliegen, bzw. von diesen erfaßt werden können, bietet es sich an, sie direkt von Fahrzeug zu Fahrzeug zu kommunizieren.

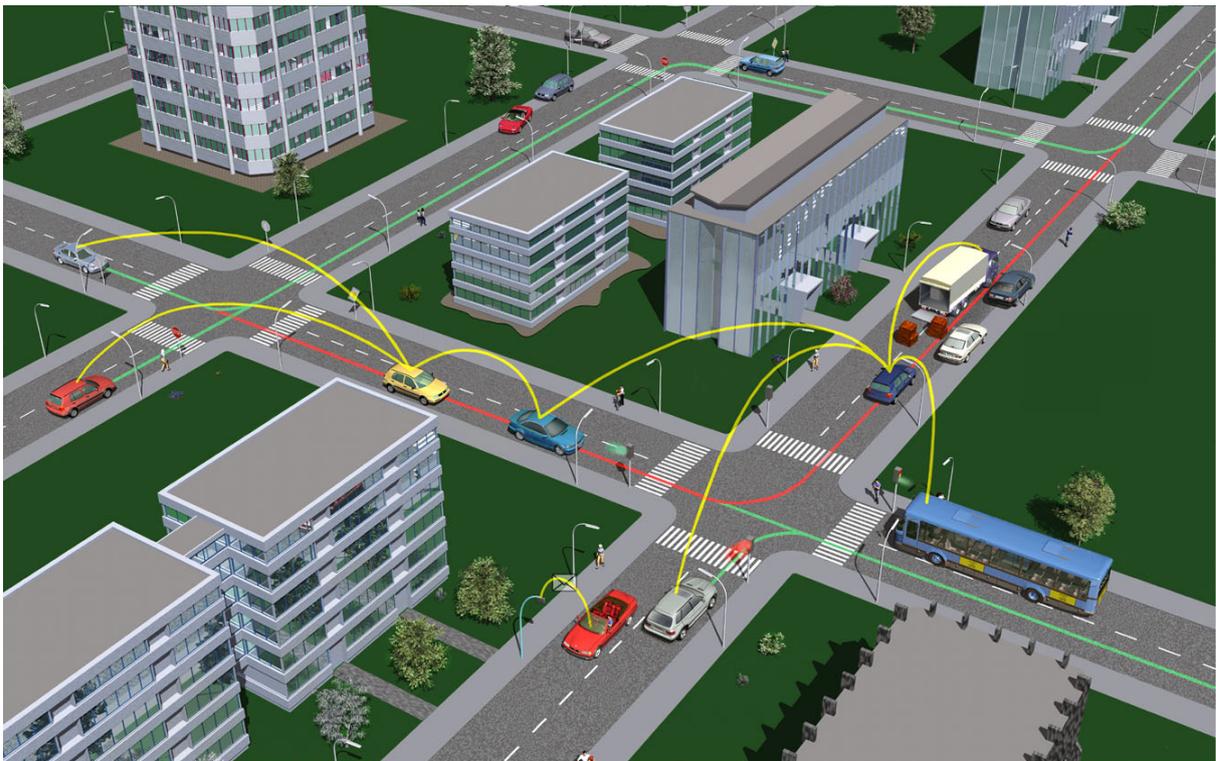


Abbildung 1.3: Unmittelbare Verkehrsinformation in der Stadt

Die heute verfügbaren zellularen und Broadcast-Netze sind dazu nur bedingt geeignet. Zellulare Systeme wie GSM ermöglichen die Kommunikation mit einem anderen mobilen Teilnehmer oder mit zentralen Informationsservern im Festnetz nach dem Client/Server Prinzip. Sie benötigen dazu eine flächendeckende Infrastruktur. Ihre Nutzung ist daher in der Regel kostenintensiv. Sie eignen sich nur bedingt, um Nachrichten an eine Menge von Teilnehmern gleichzeitig zu senden. Individuelle Anfragen mehrerer Clients nach den gleichen Informationen bei einem Server führen zu einer suboptimalen Nutzung der Netzwerkressourcen. Demgegenüber haben Broadcast-Netze den Nachteil, Informationen schlecht an die individuelle Situation anpassen zu können. Zudem trifft Information über Broadcastmedien häufig zeitverzögert ein. Abbildung 1.4 illustriert den Unterschied hinsichtlich räumlicher Multiplex-Eigenschaften. Nachrichten per Broadcast werden im

Gesamtgebiet verbreitet. Dies führt dazu, daß bspw. die Nachricht für Teilgebiet 3 zeitverzögert eintrifft und die Gesamtkapazität für nur lokal relevante Nachrichten geringer ist. Sowohl zellulare als auch Ad-hoc Netze erlauben demgegenüber eine räumliche Parallelität. Zellulare Netze sind heute dabei allerdings für individuelle Verbindungen ausgelegt, so daß jede Information in der Regel mehrfach nachgefragt wird.

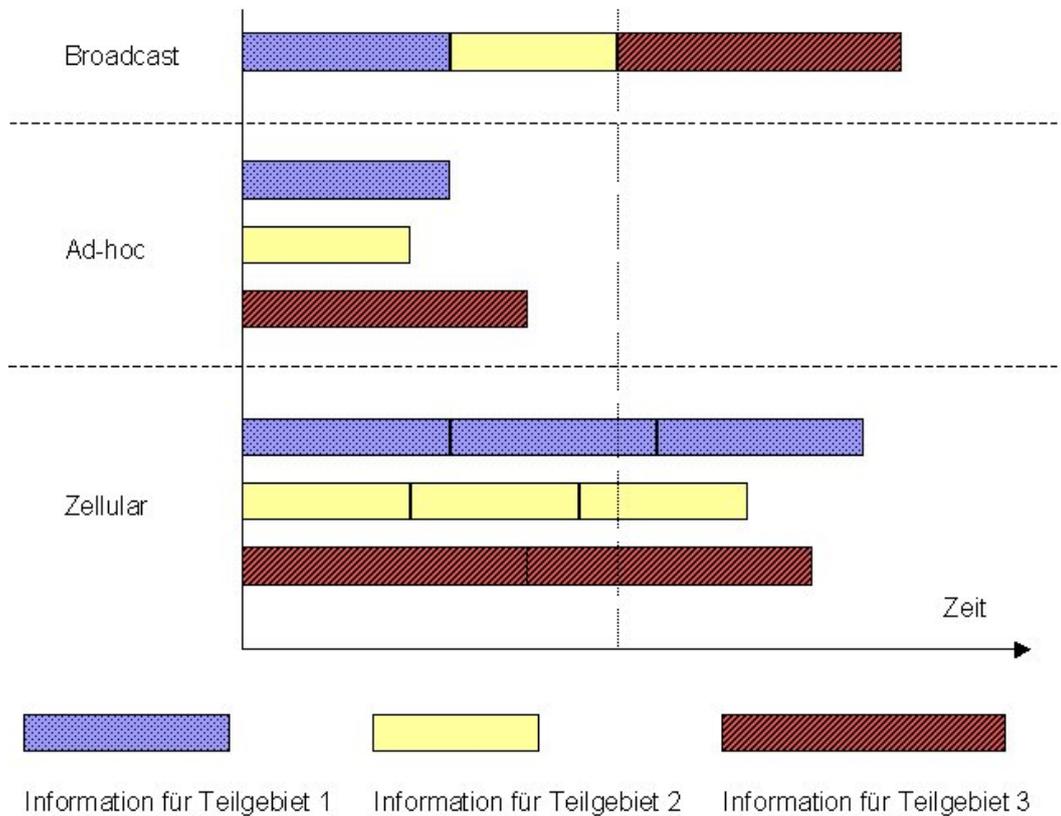


Abbildung 1.4: Vergleich von Ad-hoc, Broadcast und zellularen Netzen

An den gegenwärtig verfügbaren Verkehrsinformationssystemen wird das Verbesserungspotential sowohl hinsichtlich Präzision und Inhalt als auch hinsichtlich des Zeitpunkts der Information deutlich. Der Verkehrsfunk informiert die Fahrer heute aufgrund seiner Broadcast-Natur über viele Verkehrssituationen, von denen die meisten den einzelnen Fahrer nicht betreffen. Die Information ist häufig veraltet und nicht sehr präzise. Sie wird nicht an die Situation des Fahrers und Fahrzeugs angepaßt. Individuelle Anfragen bei Verkehrsinformationsservern über zellulare Netze sind ineffizient, da viele Teilnehmer die gleichen Informationen nachfragen und jeweils eigene Netzkapazität dafür reserviert wird, und kostenintensiv, da die Informationen auf zentralen Servern zur Verfügung gestellt werden müssen.

Da viele der angesprochenen, in einem Fahrzeug benötigten Informationen (die Verkehrssituation, das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer etc.) lokaler Natur sind, erscheint demgegenüber die direkte drahtlose Übertragung der Information zwischen den Beteiligten sinnvoll. Aufgrund der begrenzten Reichweite drahtloser Sendeeinrichtungen ist es dabei notwendig, Informationen unter den mobilen Teilnehmern weiterzuvermitteln. Die Fahrzeuge bilden dann ein so genanntes Ad-hoc Netz. Die relativ kurzreichweitige Kommunikation in einem solchen Netz ermöglicht hohe Da-

tenraten und bietet sich durch ihren dezentralen dynamischen Charakter für den lokalen situativen Informationsaustausch an. Im Gegensatz zu zellularen und Broadcastnetzen ist keine Infrastruktur und keine Administration notwendig. Aufgrund der verteilten selbstorganisierten Natur ist ein solches Ad-hoc Netz basiertes System sehr flexibel und fehlertolerant.

Wenn Menschen kommunizieren spielt der Kontext eine entscheidende Rolle. Menschen filtern Information abhängig von ihren Erfahrungen, Interessen, Vorlieben und Zielen und passen ihr Verhalten der Situation, dem Raum, der Zeit und der Rolle, die sie gerade einnehmen, an. Menschen kommunizieren in der Regel miteinander, wenn sie sich in räumlicher Nähe befinden. Die Telekommunikationstechnologien haben diese Restriktion der menschlichen Kommunikationsfähigkeit zwar erweitert, der größte Teil der Kommunikation wird dennoch weiterhin im persönlichen Gespräch abgewickelt. Ad-hoc Netze bilden diese Kommunikationsmuster in natürlicher Weise ab.

Da der Lenker eines PKWs durch die Bedienung eines Informationssystems abgelenkt würde, ist es notwendig, daß das System autonom funktioniert. Es soll Informationen selbständig personalisieren, situationsbezogen filtern und adaptieren, sowie automatisch visuell oder akustisch an den Fahrer weitergeben. Der Austausch der Informationen zwischen den Verkehrsteilnehmern muß daher ohne menschlichen Eingriff erfolgen. Um die benötigten Informationen rechtzeitig lokal verfügbar zu haben, werden bei CARISMA auf Basis des Ad-hoc Netzes daher Informationen vorausschauend potentiellen Interessenten weitergereicht bzw. von diesen selbständig ohne Interaktion mit dem Fahrer nachgefragt. Informationen werden dabei zwischen Anbieter und Nachfrager nach Möglichkeit dann übertragen, wenn diese sich in räumlicher Nähe befinden. Netzressourcen werden dabei umso weniger beansprucht, je weniger Vermittlungsstellen zur Übertragung der Information benötigt werden. Um Informationen autonom zu kommunizieren, ist es notwendig, den Informationsbedarf der Teilnehmer situationsbezogen zu modellieren und zeitnah zu prognostizieren. Der so zur Laufzeit ermittelte Informationsbedarf wird dem Kommunikationssystem bekanntgegeben, das sich um die Übertragung und Bereitstellung der Information kümmert. Die Beschaffung der Information geschieht bei CARISMA dann über drei sich ergänzende Wege.

- Nachrichtenbasiert: Das Kommunikationssystem entscheidet über den Versand neuer Nachrichten, hört Nachrichten mit, die von anderen im Netz verbreitet werden und baut situationsbezogene Filter zur Auswahl der relevanten Information.
- Anfragebasiert: Das Kommunikationssystem generiert selbständig Anfragen nach fehlender Information.
- Nachbarschaftsbasiert: Das Kommunikationssystem sucht nach Informationen bei den ständig wechselnden Nachbarn im Netz.

Dies ermöglicht einerseits eine präzise und aktuelle Information in Abhängigkeit für den Empfänger relevanter Ereignisse. Andererseits werden Antwortzeiten des Systems bei Anfragen minimiert, da die Daten bereits lokal vorhanden sind.

Der folgende Abschnitt beschreibt kurz die wesentlichen Elemente von Ad-hoc Netzen.

1.3 Mobile Informationssysteme und Ad-hoc Netze

”Never underestimate the bandwidth of a station wagon full of backup tapes hurtling down the highway.”

— Andrew Tanenbaum

Nicht nur im Automobil besitzt der mobile Mensch einen Bedarf an Information. Verbunden mit der allgemein wachsenden Mobilität ist der Wunsch, an jedem Ort und zu jeder Zeit Zugriff auf Informationen zu besitzen und kommunizieren zu können. Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelten Charles Babbage und Ada Lovelace die “Analytische Maschine”. Ada Lovelace hatte die Vision vom stummen Diener, von Maschinen, die vieles leisten können, über das sich sonst Menschen den Kopf zerbrechen müssen. Die Idee des stummen Dieners findet sich heute im Konzept des *Ubiquitous Computing* wieder. Der stumme Diener agiert hier jedoch nicht autonom, sondern in einem verteilten Systems. Als *Ubiquitous Computing*⁵ bzw. *Pervasive Computing* wird die Durchdringung des Alltags und die Ausstattung von Alltagsgegenständen mit untereinander vernetzten Rechnern bezeichnet. Wesentliche Voraussetzung dieser Vernetzung ist die Verfügbarkeit drahtloser Kommunikationsnetze, die die physische Mobilität der Netzknoten erlauben.

Interaktive mobile Informationssysteme basieren heute entweder auf zellularen Mobilfunknetzen oder drahtlosen lokalen Netzen (Wireless Local Area Networks, kurz WLANs). Die Knoten können sich in diesen Netzen frei bewegen. Die Kommunikation verläuft dabei immer über einen stationären Netzzugangsknoten. Jeder mobile Teilnehmer ist einem solchen Zugangsknoten zugeordnet. Die Zugangsknoten decken jeweils einen bestimmten geographischen Bereich ab (Funkzelle). Wenn mobile Knoten von einer Funkzelle zu einer anderen wandern, so ändert sich ihr Zugangsknoten (*Handoff* bzw. *Handover*).

Ad-hoc Netze bilden sich im Gegensatz dazu spontan. Sie bestehen ausschließlich aus den mobilen Netzknoten und kommen ohne Netzwerkinfrastruktur aus. Durch die Bewegung der Knoten und die begrenzte Kommunikationsreichweite ändert sich die Topologie des Netzes permanent. Jegliche Netzwerkfunktionalität ist verteilt in den mobilen Knoten realisiert. Die Kanalzugriffsverfahren, die für drahtlose lokale Netze eingesetzt werden (z.B. nach dem IEEE Standard 802.11), wurden so erweitert, daß sich ein Ad-hoc Netz betreiben läßt. Für die Fähigkeit zur Bildung von Ad-hoc Netzen wurden auch für UMTS Konzepte entwickelt [58]. Zellulare Netze und Ad-hoc Netze sind in Abbildung 1.5 einander gegenübergestellt. Bei zellularen Systemen werden die Funkzellen häufig als Sechsecke modelliert. Die mobilen Teilnehmer in einer Funkzelle sind der jeweiligen Basisstation zugeordnet. Für die Modellierung von Ad-hoc Netzen hat es sich etabliert, einen Kommunikationsradius anzunehmen, innerhalb dessen eine Kommunikation mit anderen Teilnehmern möglich ist. Im zugehörigen Graphen, wie in der Abbildung 1.5 dargestellt, sind Knoten, die auf diese Weise direkt miteinander kommunizieren können, über eine Kante verbunden. Die Übertragungreichweite bestimmt sich dabei allein aus der Sendeleistung. Umwelteinflüsse oder Antenneneigenschaften werden bei dieser vereinfachenden Betrachtung außer acht gelassen. Legt man eine einheitliche Sendeleistung aller Netzteilnehmer zugrunde, so kann die entstehende Netztopologie

⁵Der Begriff des *Ubiquitous Computing* geht zurück auf einen Artikel von Mark Weiser aus dem Jahre 1991[197]. Was heute unter dem Begriff zu verstehen ist, erschließt sich aus einem Artikel von Koch und Schlichter mit Bezug auf CSCW Anwendungen [106].

als ungerichteter Graph beschrieben werden, anderenfalls als gerichteter Graph. Im folgenden wird allen Betrachtungen dieses Ad-hoc Netz Modell mit einheitlicher Sendeleistung zugrunde gelegt.

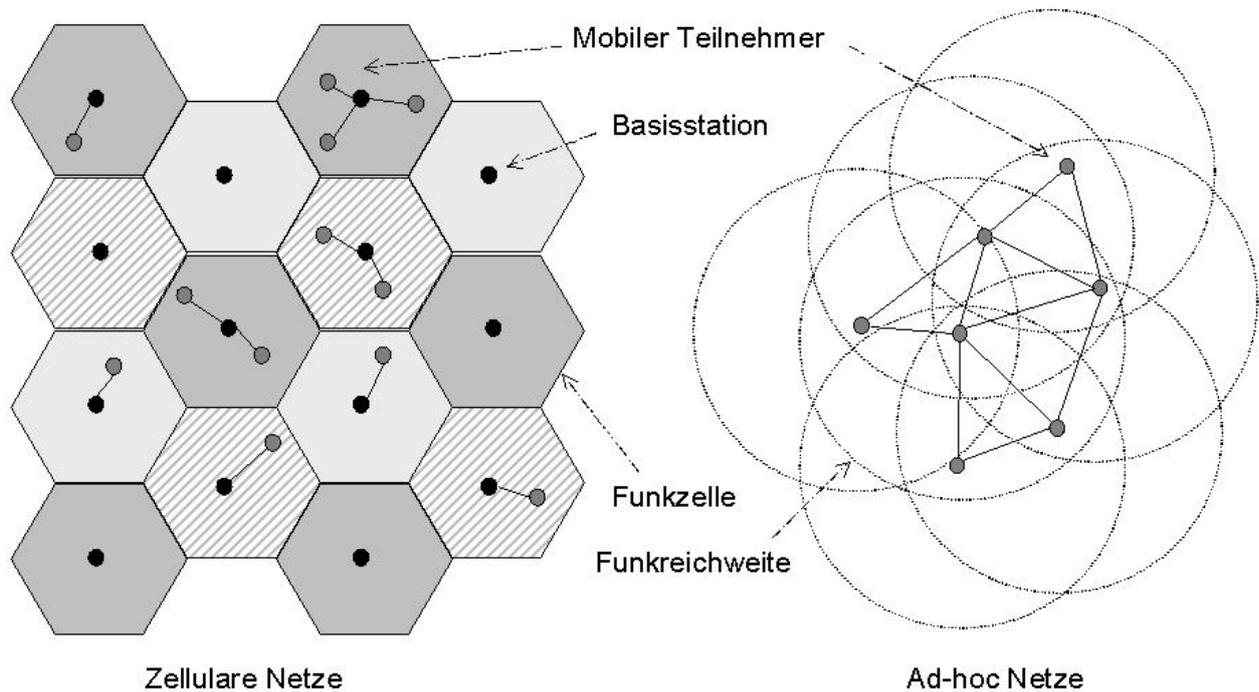


Abbildung 1.5: Zellulare und Ad-hoc Netze

In zellularen Netzen benötigen mobile Teilnehmer grundsätzlich Kontakt zu einer Basisstation, um miteinander kommunizieren zu können. Sie können dann mit allen anderen mobilen Teilnehmern, die aktuell bei einer Basisstation eingebucht sind, eine Kommunikationsverbindung aufbauen. Die Basisstationen des GSM Netzes sind in Deutschland so dicht, daß ein Teilnehmer landesweit beinahe flächendeckend Netzzugang besitzt. Die Kommunikation mit weit entfernten Netzknoten in reinen Ad-hoc Netzen ist aufgrund fehlender Basisstationen nur über andere Teilnehmer als Zwischenstationen bzw. Router möglich. Im Gegensatz zu zellularen Netzen funktionieren sie auf diese Weise ohne Infrastruktur. Ad-hoc Netze können dabei aus voneinander getrennten Fragmenten bestehen und isolierte Knoten beinhalten, so daß Verbindungen nicht zu jeder Zeit garantiert werden können und ihre Qualität schwankt. Je weiter ein Kommunikationspartner entfernt ist, desto schwieriger wird es, eine gute Kommunikationsverbindung zu ihm aufzubauen. Durch ihre selbstorganisierende Natur sind Ad-hoc Netze sehr flexibel und benötigen keine Administration sowie keine oder nur geringe manuelle Konfiguration der einzelnen Teilnehmer. Aufgrund der fehlenden Infrastruktur wird kein Netzbetreiber benötigt. Aufbau und Betrieb einer flächendeckenden Infrastruktur für zellulare Netze verursachen hohe Kosten. Sie werden daher in der Regel von wenigen großen Anbietern unterhalten. Der Aufwand spiegelt sich in den Preisen für die Nutzung der Dienste dieser Netze wider. Die Migration bei Verfügbarkeit neuer Übertragungstechnologien ist entsprechend schwierig. Die heute im Betrieb befindlichen zellularen Netze (GSM/GPRS und UMTS) erlauben die drahtlose digitale Datenübertragung mit einer Datenrate bis zu 9,6/128 kBit/s bei GSM und 2 MBit/s bei UMTS. Die Kommunikation mittels drahtloser lokaler Netztechnologien, die für Ad-hoc Netze genutzt werden können, ist mit höheren Datenraten möglich. Der

IEEE802.11b Standard spezifiziert eine Datenrate bis 11 Mbit/s brutto, bei den neueren Varianten IEEE802.11a/g sind bis zu 54 MBit/s möglich.

Ad-hoc Netze eignen sich demnach schlecht zur synchronen Kommunikation bei geringer Teilnehmerdichte und um Verbindungen über größere Distanzen aufzubauen. Im Automobil benötigt der Fahrer in der Regel aber hauptsächlich Informationen über seine nähere Umgebung. Informationen über entfernte Ereignisse benötigt er seltener und in geringerem Detaillierungsgrad. Zur Informationsübertragung ist auch nicht notwendigerweise ein fester Kommunikationskanal von Sender zu Empfänger vonnöten. Je nach Informationsart ist eine gewisse zeitliche Verzögerung tolerierbar. Durch die Nutzung von mobilen Ad-hoc Netzen können verteilt benötigte Informationen mittels vorausschauender lokaler Speicherung mit kurzen Zugriffszeiten, geringen Kommunikationskosten und minimierter Systeminteraktion zur Verfügung gestellt werden. Es liegt somit Nahe, zur Übertragung lokaler dynamischer Information zwischen Automobilen Ad-hoc Netze einzusetzen. Einerseits besitzen Informationssysteme im Automobil dort hohe Anforderungen, wo Ad-hoc Netze ihre Stärken haben. Auf der anderen Seite kommen die Schwächen der Ad-hoc Netze in diesem Anwendungsfeld kaum zum tragen. Der Lokalität des Interesses an Informationen tragen die Broadcast-Eigenschaften und die Lokalität der Kommunikation in Ad-hoc Netzen Rechnung.

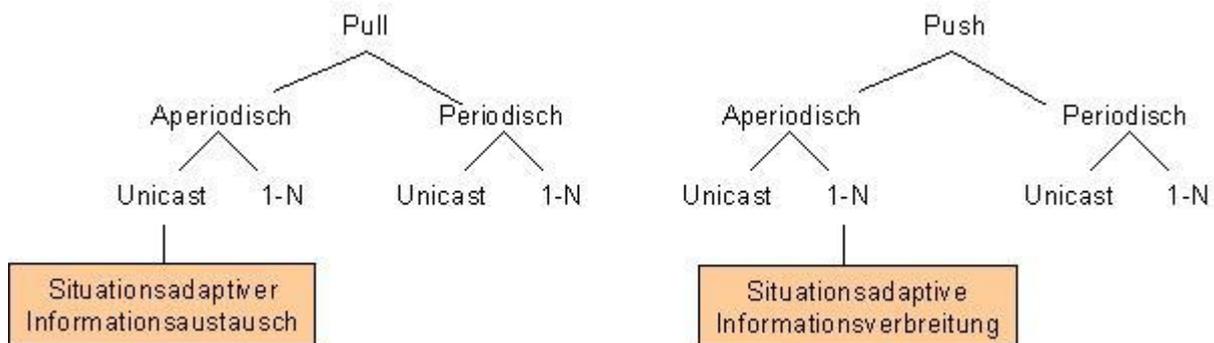


Abbildung 1.6: Einordnung der Arbeit in eine Kommunikationsklassifikation

Die Arbeit validiert die Tragfähigkeit dieser Hypothese. Das Verhalten und die Eigenschaften von Ad-hoc Netzen, die aus Automobilen bestehen, werden beschrieben. Es werden Kommunikationsverfahren vorgeschlagen die in diesem Einsatzgebiet gut funktionieren. Darauf basierend wird dargestellt, wie Informationen mit Situationsbezug effizient und zielgerichtet zwischen Fahrzeugen ausgetauscht werden können, um den Informationsbedarf der einzelnen Teilnehmer zu decken. Das CARISMA System ermittelt dazu den situationsbezogenen Informationsbedarf der Netzteilnehmer und steuert verteilt den Austausch von Information. Dabei paßt es sich den Gegebenheiten im Ad-hoc Netz an und sorgt so für eine optimierte Nutzung vorhandener Netzressourcen. Um diese Form der Kommunikation in Bezug zu bestehenden Kommunikationssystemen zu setzen, seien drei Unterscheidungsmerkmale herangezogen, wie sie Aksoy et al. beschreiben [6]:

- Kommunikation nach dem Push oder Pull Prinzip.
- Periodische vs. aperiodische Kommunikation.
- Unicast vs. Gruppenkommunikation (1:1 vs. 1:N).

Der in der vorliegenden Arbeit untersuchte Bereich kann mit dieser Klassifizierung als aperiodische M:N Kommunikation beschrieben werden, die sich aus einem adaptiven Zusammenspiel situationsbezogen automatisch getriggelter 1:N Push und 1:1 Pull Kommunikation ergibt (siehe Abb. 1.6).

Kommunikation im beschriebenen System ist somit in zweierlei Hinsicht situationsadaptiv: einerseits in Bezug auf den situationsbezogenen Informationsbedarf der Netzteilnehmer und andererseits auf die situationsbezogenen Besonderheiten der dezentralen Fahrzeugnetze (VANETS⁶).

1.4 Problem- und Aufgabenstellung

”Wer so tut, als bringe er die Menschen zum Nachdenken, den lieben sie. Wer sie wirklich zum Nachdenken bringt, den hassen sie.”

— Aldous Huxley

Das Kernproblem, für das in den folgenden Kapiteln ein Lösungsvorschlag vorgestellt wird, ist die Realisierung situationsadaptiver Fahrerinformationssysteme auf der Basis dezentraler Kommunikationsnetze zwischen Automobilen. Die Arbeit beschäftigt sich dazu mit durch situativen Informationsbedarf induzierter, in der Regel nachrichtenbasierter Kommunikation in VANETS.

Zur präziseren Problemformulierung wird diese Beschreibung zunächst in eine modellhafte Darstellung übersetzt. Es geht darum, Informationen bedarfsbezogen in einem Ad-hoc Netz von Informationsquellen zu Informationssenken zu übertragen. Jeder Knoten tritt dabei sowohl als Informationsanbieter wie auch als Informationsnachfrager auf. Für jeden Informationsanbieter gibt es eine Menge von Teilnehmern im Netz, die sich für diese Information interessieren. Da dieses Interesse von der jeweiligen Situation abhängt, sind sie dem Anbieter zum Zeitpunkt der Generierung der Information jedoch nicht bekannt.

Abbildung 1.7 stellt das Problem für ein allgemeines Ad-hoc Netz dar. Knoten X besitzt eine Information, die für alle mit I bezeichneten Knoten zum gegebenen Zeitpunkt, d.h. in der aktuellen Situation, interessant ist. Im CARISMA Verständnis beziehen diese Teilnehmer einen Nutzen aus der Information. Es entwickelt sich ein Bedarf an dieser Information, der sich in Nachfrage äußert, sofern ihnen die Verfügbarkeit der Information bekannt ist. Umgekehrt interessiert sich der Teilnehmer X für Informationen der mit A bezeichneten Knoten. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß die Interessen unterschiedlich groß sein können. Alle Teilnehmer, die entweder Interesse an der Information von X besitzen oder die für X relevante Informationen anbieten können, sind rot gekennzeichnet. Alle roten Teilnehmer sind also Kandidaten für einen Informationsaustausch mit Knoten X. Die blauen Teilnehmer können für X zu diesem Zeitpunkt nur die Rolle von Vermittlern der Information übernehmen. Ziel ist es, den Informationsbedarf aller Netzteilnehmer so gut wie möglich zu befriedigen.

⁶Im folgenden wird die Abkürzung *VANET* (Vehicle Ad-hoc Network) für von Automobilen gebildete Multihop Ad-hoc Netze gebraucht.

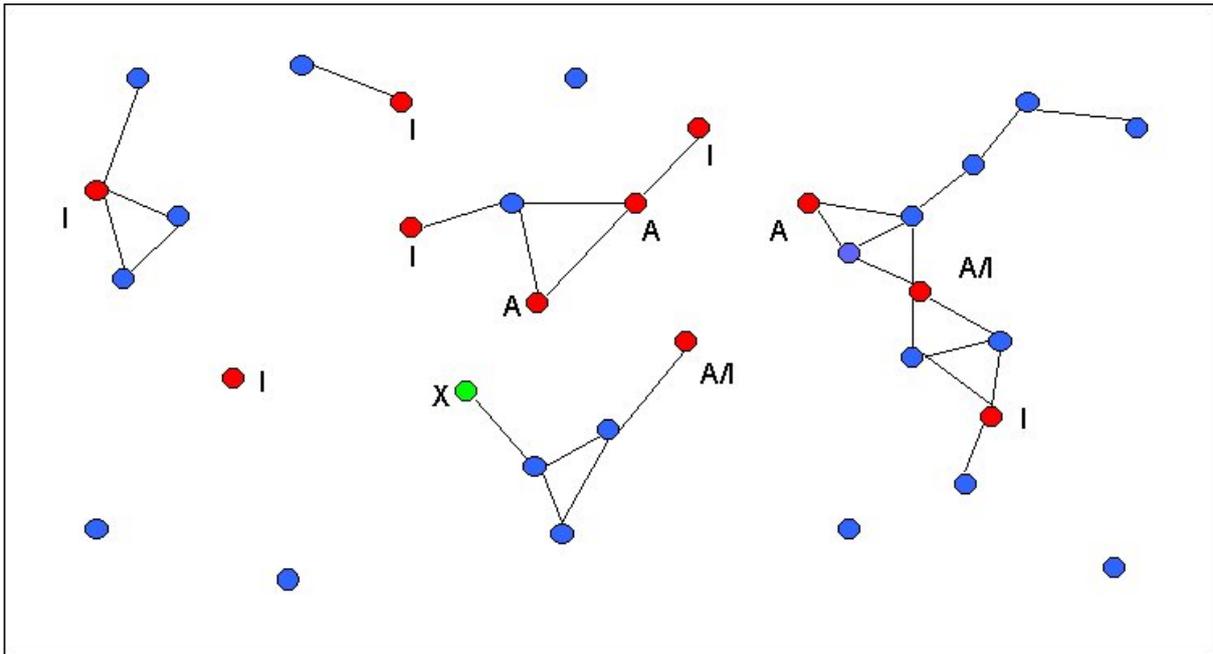


Abbildung 1.7: Informationsangebot und -nachfrage in einem Ad-hoc Netz

Während Abbildung 1.7 den Zustand des Netzes zu einem Zeitpunkt und aus der Perspektive eines einzelnen Teilnehmers wiedergibt, ist für das System maßgeblich, daß es in mehrerlei Hinsicht dynamisch ist:

- Die Topologie des Netzes ändert sich permanent durch die Mobilität der Teilnehmer.
- Das Interesse der Teilnehmer an einer Information bzw. der Nutzen einer Information für die Teilnehmer ändert sich im Laufe der Zeit durch deren sich ständig ändernde Situation.
- Informationen werden immer wieder neu generiert.
- Die realen Bezugsobjekte von Informationen ändern sich, d.h. es gibt eine in der Regel wachsende Diskrepanz zwischen realem Zustand und Beschreibung des Zustandes in einem Informationsobjekt.

Da das System autonom funktionieren soll, ergeben sich aus dieser Problembeschreibung zwei wesentliche Aufgabenteile für die Realisierung des Systems:

- Der Informationsbedarf der Teilnehmer in verschiedenen Situationen ist zu ermitteln und das Informationsangebot darauf abzustimmen.
- Basierend auf Informationsbedarf und -angebot sind Informationen im Ad-hoc Netz effizient von den Quellen zu den Senken zu übertragen. Dazu sind entsprechende Kommunikationsverfahren zu entwerfen.

Da der Informationsbedarf situationsabhängig ist, wird ein Situationsmodell entwickelt, mit dem relevante Situationen beschrieben werden können. Darauf aufbauend wird der Informationsbedarf

in Abhängigkeit der Situationen ermittelt. Situationen müssen vom System selbständig erkannt werden. Basierend auf der Situationserkennung muß der Informationsbedarf berechnet werden können. Die Informationsgenerierung sollte sich dann ihrerseits am Bedarf orientieren.

Durch die selbständige, proaktive Informationsübertragung findet die Kommunikation vor dem Informationsabruf statt, d.h. die Kommunikation der unteren Netzschichten ist von den oberen Schichten zeitlich entkoppelt. Diese zeitliche Entkoppelung durch sender- oder empfängerseitige Pufferung ist ein klassisches Merkmal asynchroner Kommunikation. Bei CARISMA erfolgt die Pufferung im Gegensatz zu anderen Kommunikationssystemen auf der Basis lokaler Entscheidungen, die von der Situation beeinflusst sind. Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten, bei denen in der Regel die Paradigmen des Festnetzes auf das Ad-hoc Netz übertragen werden, geht die vorliegende Arbeit mit der situationsadaptiven autonomen Kommunikation einen anderen Weg.

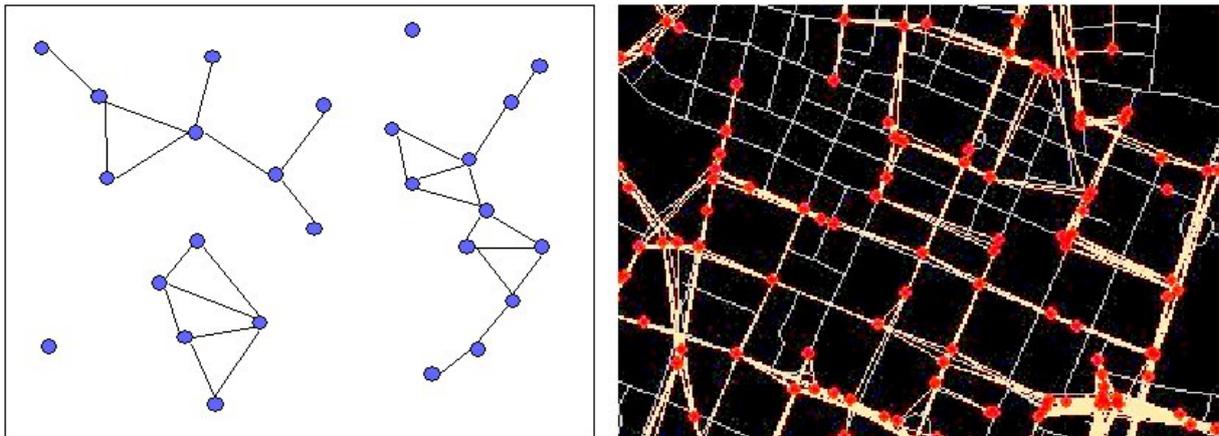


Abbildung 1.8: Allgemeines Ad-hoc Netz und Fahrzeug Ad-hoc Netz (VANET)

Das oben für allgemeine Ad-hoc Netze beschriebene Problem wird im vorliegenden Kontext für zwischen Automobilen im Straßenverkehr gebildete Ad-hoc Netze behandelt. Abbildung 1.8 illustriert den Unterschied hinsichtlich Topologie und Mobilität zwischen allgemeinen Ad-hoc Netzen und VANETS. Für den Entwurf des CARISMA Systems spielen die Eigenschaften eines solchen Ad-hoc Netzes eine sehr wichtige Rolle. Da darüber bislang wenig bekannt ist, bildet diese Analyse einen grundlegenden und wichtigen Teil der Arbeit. Es wird geklärt, wie sich die Konnektivität in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte verhält, mit welchen Wahrscheinlichkeiten Verbindungen bestimmter Reichweiten möglich sind, wie sich existierende Ad-hoc Routingprotokolle verhalten und welche Charakteristiken die Verbreitung von Nachrichten aufweist. Darauf aufbauend werden Verfahren zur Nachrichtenkommunikation und Punkt-zu-Punkt Kommunikation vorgeschlagen, die die besonderen Charakteristika von VANETS berücksichtigen, insbesondere die durch das Straßennetz eingeschränkten Freiheitsgrade der einzelnen Teilnehmer und die spezifischen Bewegungsmuster hinsichtlich Geschwindigkeit und Fahrtrichtung.

1.5 Inhalt und Aufbau

”Selbst wenn es geschähe, daß einmal zwei Spieler durch Zufall genau dieselbe kleine Auswahl von Themen zum Inhalt ihres Spieles machen sollten, könnten diese beiden Spiele je nach Denkart, Charakter, Stimmung und Virtuosität der Spieler vollkommen verschieden aussehen und verlaufen.”

— Hermann Hesse (Das Glasperlenspiel)

In der vorliegenden Arbeit wird über singuläre Konzepte und Verfahren hinausgehend deren Interaktion betrachtet. Eine Software-Architektur bildet den konzeptionellen Systemrahmen, in dem die Verfahren Komponenten zugeordnet werden und ihr Zusammenspiel untersucht wird. Sie werden in ein Systemmodell integriert, das Situationsadaptivität mit den Möglichkeiten dezentraler Netze abbildet.

Obwohl der Fokus auf dem speziellen Anwendungsgebiet der Fahrerinformationssysteme in Automobilen liegt, lassen sich viele Ergebnisse verallgemeinern und auf andere Anwendungsbereiche übertragen. Es wird gezeigt, daß Situationsinformationen sowohl für ein optimiertes Verhalten der Anwendungen als auch für eine effiziente Nutzung und Steuerung der verfügbaren Systemressourcen wichtig ist. Sie werden deshalb komponentenübergreifend und protokollschichtenunabhängig im System zur Verfügung gestellt.

Auf einem Situationsmodell basierende Situationserkennungsverfahren bilden die Basis zur Vorhersage künftigen Informationsbedarfs. Um diesen Informationsbedarf der Teilnehmer zu decken, müssen Informationen ausgetauscht werden. Dazu wird ein kombinierter Ansatz vorausschauender Informationsbeschaffung und aktiver Informationsverbreitung vorgeschlagen. Der Einsatz von Ad-hoc Netz Verfahren zum Informationsaustausch wird dabei analysiert und um neue Konzepte für den automobilen Einsatzbereich erweitert. Die dezentralen Netze werden aktiv im Hintergrund für den Informationsaustausch genutzt. Die Eigenschaften von VANETS hinsichtlich Konnektivität, Latenz und Skalierbarkeit werden für den automobilen Bereich untersucht und das Verhalten der situationsadaptiven Informationssysteme an die Netzeigenschaften angepaßt. Vorteile des CARISMA Systems sind kurze Antwortzeiten durch intelligente lokale Informationsspeicherung, die Möglichkeit zur aktiven Fahrerinformation, beispielsweise Informationen bzw. Nachrichten, die das System anhand ihres Nutzens für den Fahrer als sehr wichtig oder sehr interessant einstuft, geringe Kommunikationskosten, effiziente und ausschöpfende⁷ Ressourcennutzung und einfache Bedienung des Systems durch situationsabhängige Vorselektierung und Priorisierung von Informationen und Funktionen.

Ein charakteristisches Merkmal mobiler Ad-hoc Netze ist es, daß durch die Mobilität die benachbarten Teilnehmer ständig wechseln. Der Zeitpunkt des Informationsbedarfs wird daher selten mit dem Zeitpunkt des günstigen Informationsangebots zusammenfallen. Durch die Bewertung des Informationsbedarfs können mit CARISMA Informationen dann beschafft werden, wenn sie lokal in der Nähe verfügbar sind. Sie werden dann zwischengespeichert, bis sie nachgefragt werden oder ihre Gültigkeit verlieren.

⁷Kommunikationskapazität und Speicherplatz stehen kostenlos zur Verfügung, solange sie nicht anderweitig benötigt werden.

Einer Klärung der elementaren Begriffe in Kapitel 2 schließt sich eine Darstellung des gegenwärtigen Standes der Technik im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation in Kapitel 3 an. Als Systemüberblick und aufbauorganisatorischer Rahmen beginnt der Hauptteil mit einer Darstellung der CARISMA Systemarchitektur in Kapitel 4. In Kapitel 5 werden dann Eigenschaften von und Protokolle und Algorithmen für VANETS diskutiert. Zunächst wird die Eignung einer existierenden Ad-hoc Netz fähigen Funktechnologie (IEEE 802.11b) für den Einsatz im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation experimentell nachgewiesen. Anschließend werden Modellannahmen für die weitere Analyse getroffen und insbesondere ein spezielles Mobilitätsmodell entwickelt, das es erlaubt, auch komplexere Innenstadtszenarien zu betrachten. Das Modell wurde als wesentlicher Bestandteil eines VANET Simulators implementiert, mit dem die Eigenschaften des Netzes und das Verhalten der CARISMA Protokolle untersucht wurden. Es wird dargestellt, wie sich die Konnektivität von VANETS verhält. Darauf aufbauend wird die Verzögerung bei der Verbreitung von Nachrichten in fragmentierten Netzen durch *Store&Forward* untersucht und der Zusammenhang zwischen Knotendichte und Nachrichtenlatenz analysiert. Anschließend wird das CARISMA Verfahren zur effizienten Nachrichtenverbreitung beschrieben. Dieses löst das in dichteren Netzen auftretende Broadcast Sturm Problem. Das zugrunde liegende Prinzip kann zugleich für ein Punkt-zu-Punkt Routing eingesetzt werden. Es schließt sich die Diskussion weiterer Routingkonzepte an.

Kapitel 6 wechselt von der Netzebene auf die inhaltliche Ebene und beschreibt, wie der Informationsbedarf bei CARISMA bestimmt wird. Dazu wird zunächst allgemein beschrieben, wie Situationen modelliert werden können und anschließend das Modell auf Situationen im Fahrzeugbereich angewandt. Wesentliche Faktoren, die eine Situation im Fahrzeug kennzeichnen und den Informationsbedarf beim Autofahren bestimmen, sind das Fahrtziel und der Fahrtzweck. Es wird ein methodisches Konzept vorgestellt, Fahrtziel und Fahrtzweck zu erkennen und den mit diesen beiden Parametern korrelierten Informationsbedarf zu ermitteln. Dazu wird das Konzept der situationsbezogenen Nutzenbewertung von Informationen eingeführt.

Kapitel 7 führt schließlich die Ergebnisse der beiden vorangehenden Kapitel zusammen und zeigt, wie der situationsadaptive Informationsaustausch bei CARISMA funktioniert unter Berücksichtigung des Nutzens einer Information für die einzelnen Netzteilnehmer einerseits und der Netzcharakteristika andererseits. In Kapitel 8 wird kurz auf zwei ergänzende Aspekte eingegangen: das Zusammenspiel mit anderen Netzen in einer heterogenen Netzlandschaft und die Integration von Service Discovery Mechanismen. Kapitel 9 stellt abschließend die Übertragbarkeit des Ansatzes bzw. einzelner Konzepte auf andere Anwendungsbereiche dar und zeigt Anknüpfungspunkte und noch offene Fragestellungen auf. Die Arbeit leistet somit folgende Beiträge zur Forschung im Bereich intelligenter mobiler Informationssysteme:

- Situationsbedingter Informationsbedarf im Automobil
 - Systemarchitektur für situationsadaptive Fahrerinformationssysteme
 - Situationsmodell für Fahrerinformationssysteme
 - Konzept situationsbezogener Nutzenbewertung und Informationsbedarfsbestimmung
 - Konzept nutzenoptimierender Informationsspeicherung
 - Konzept nutzenoptimierenden Informationsaustauschs

- Adaptiver Informationsaustausch in VANETS
 - Evaluierung des Einsatzes von WLAN zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation
 - Analytische und simulationsbasierte Aussagen zu Konnektivität
 - Simulative Untersuchung der Nachrichtenlatenz in fragmentierten Netzen
 - Lösung des Broadcast-Storm Problems
 - Diskussion von Routing-Konzepten
 - Verfahren zum intelligenten adaptiven Informationsaustausch

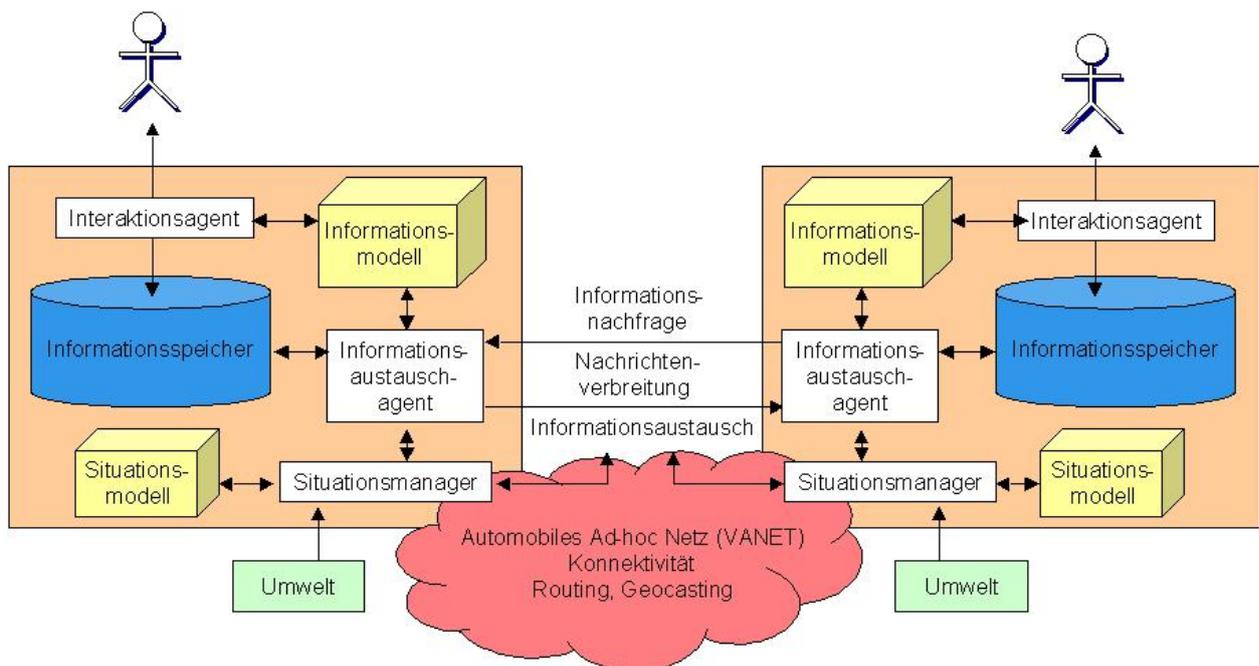


Abbildung 1.9: Grundlegendes Systemmodell

Abbildung 1.9 zeigt das grundlegende Systemmodell, dessen Komponenten und deren Verhalten in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden. Das zwischen den Fahrzeugen gebildete Ad-hoc Netz (VANET) bildet die kommunikationstechnologische Grundlage für den Informationsaustausch, ist daher zentraler Bestandteil der Arbeit und wird ausführlich in Kapitel 5 beschrieben. Fragen der automatischen Bestimmung des Informationsbedarf mit Hilfe des Konzeptes der Informationsnutzenbewertung in Abhängigkeit der jeweiligen Situation werden in Kapitel 6 adressiert. Bezogen auf das Systemmodell werden hier die Komponenten Situationsmodell, Situationsmanager und Informationsmodell des CARISMA Systems erläutert. Situations- und Informationsmodell sind in der Abbildung als Quader dargestellt, da sie keine physische Komponente des Systems darstellen, sondern nur das Modell für die Realisierung in den Komponenten und Agenten sowie für die Informations- und Speicherorganisation. In Kapitel 7 wird der situationsadaptive Informationsaustausch beschrieben. Dies betrifft die Komponenten Informationsaustauschagent, die Informationsspeicherung sowie Informationsaustausch und -verbreitung.

Kapitel 2

Begriffliche Grundlagen

2.1 Mobiles Ad-hoc Netzwerk

Zwei Typen drahtloser Datenfunknetze lassen sich unterscheiden. *Infrastrukturbasierte* Netze beinhalten eine Menge von stationären Teilnehmern, die sowohl über eine drahtgebundene, wie auch über eine funkbasierte Kommunikationsschnittstelle verfügen.¹ Mobile Teilnehmer sind zu jedem Zeitpunkt jeweils einer dieser Basisstationen zugeordnet. Teilnehmer und Basisstation besitzen dabei eine direkte Funkverbindung, d.h. sie befinden sich in Empfangsreichweite.² Kommunikationskanäle zwischen zwei mobilen Netzknoten bestehen aus einer Festnetzverbindung zwischen den beiden Basisstationen bzw. Zugangsknoten, denen die mobilen Teilnehmer zugeordnet sind, und der jeweiligen Funkstrecke von der Basisstation zum mobilen Teilnehmer. Demgegenüber bestehen *infrastrukturlose* Netze, sogenannte *Ad-hoc Netze*, ausschließlich aus mobilen Teilnehmern. Kommunikationsverbindungen zwischen zwei Teilnehmern, die sich nicht in Empfangsreichweite befinden, werden ermöglicht durch andere mobile Netzteilnehmer, die die gesendeten Datenpakete zum Empfänger weiterreichen. Jeder Netzknoten fungiert somit gleichzeitig als Router. Durch die Mobilität der Teilnehmer ändert sich die Topologie des Netzes permanent.

Die Anfänge der Ad-hoc Netze gehen bis in die 60er Jahre zurück. 1968 wurde das sogenannte ALOHA Netzwerk ins Leben gerufen, um Schulen auf Hawaii zu vernetzen [4]. Das ALOHA Netz nutzte erstmals verteilte Kanalzugriffsmechanismen (*Slotted Aloha* folgte 1972, CSMA/CA 1975). Das Protokoll war noch nicht routingfähig. 1973 wurde mit dem DARPA Packet Radio Netzwerk (PRNet) eines der ersten dezentralen mobilen Multihop-Netze aufgebaut [88, 90, 169]. Im Zuge der Entwicklung des Standards 802.11 führte das Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) den Begriff des Ad-hoc Netzes ein. Die Internet Engineering Taskforce (IETF) definiert ein Mobiles Ad-hoc Netz (MANET) als

“an autonomous system of *mobile routers* (and associated hosts) connected by wireless links - the union of which form an **arbitrary** graph. The routers are free to move **randomly** and organize themselves arbitrarily; thus, the network’s wireless topology may change rapidly and **unpredictably**. Such a network may operate in a standalone fashion, or may be connected to the larger Internet.”

Obwohl diese Definition alle entscheidenden Eigenschaften von Ad-hoc Netzen beinhaltet, wird sie hier nicht als exklusive Definition verstanden. Automobile, die mit mobilen Kommunikationseinrichtungen ausgestattet sind, bewegen sich entlang von Straßen und somit nicht vollständig

¹Die Begriffe (*Netz*)knoten und (*Netz*)teilnehmer werden synonym verwendet.

²Statt Sendereichweite wird hier dem Begriff Empfangsreichweite der Vorzug gegeben, da er den Sachverhalt der Empfangsmöglichkeit eines Signals präziser wiedergibt.

zufällig. Sie bilden auch keinen vollkommen willkürlichen Graphen. Der Graph besitzt durch den Aufenthalt der Fahrzeuge auf dem Straßennetz bestimmte Muster und Eigenschaften. Kurzfristig ist auch eine Vorhersage der Änderung der Netzwerktopologie möglich. Die in der Definition fett herausgestellten Begriffe gelten daher nicht in ihrer uneingeschränkten Allgemeinheit für fahrzeuggestützte mobile Netze. Entscheidender Begriffsbestandteil im Verständnis der vorliegenden Arbeit ist die Fähigkeit jedes am Ad-hoc Netz partizipierenden Netzteilnehmers, Datenpakete weiterzureichen, d.h. die Aufgabe eines mobilen Routers zu übernehmen. Der Begriff des Mobilien Ad-hoc Netzes sei somit durch zwei konstituierende Merkmale bestimmt:

- Mobilität zumindest einer Teilmenge der Netzknoten.
- Routingfähigkeit eines jeden Teilnehmers, d.h. Multi-Hop Fähigkeit des Netzes.

Der Einsatz von Ad-hoc Netzwerken ist besonders dort sinnvoll und notwendig, wo keine Infrastruktur für die Kommunikation, z.B. in Form zellenbasierter Mobilfunknetze zur Verfügung steht. In der Literatur werden einige Szenarien für den Einsatz von Ad-hoc Netzwerken in diesem Fall häufig genannt. Typischerweise sind dies militärische Operationen in fremden Gebieten oder Rettungsaktionen nach Naturkatastrophen. Ein weiterer Bereich ist die drahtlose Vernetzung verteilter Sensoren. Hier kommunizieren die Netzknoten zwar drahtlos über mehrere Hops miteinander, sind aber häufig nicht mobil. Als Anwendungsgebiete im Alltagsbereich werden die Vernetzung von Geräten im Haushalt oder im Büro und von tragbaren Geräten am Körper (häufig als *Personal Area Network* (PAN) bezeichnet) gesehen. Als Gründe für den Einsatz von Ad-hoc Netzwerken können daher angeführt werden

- Fehlende oder defekte Infrastruktur
- Hoher Aufwand zum Aufbau einer Infrastruktur
- Direkter Datenaustausch mobiler Teilnehmer bei geographischer Nähe
- Flexibilität und Kosteneffektivität

In Single-Hop Netzen ist die Kommunikationsreichweite so groß, daß jeder Kommunikationspartner direkt erreicht werden kann. Single-Hop Netze teilen sich die Kommunikationsressource somit allein in der temporalen Dimension. Multi-Hop Netze beziehen durch eine relativ kleinere Kommunikationsreichweite die räumliche Dimension mit ein und ermöglichen so eine gleichzeitige Kommunikation mehrerer Teilnehmer. Vergleicht man die zur Übertragung notwendige Energie zwischen einem Single-Hop und einem Multi-Hop Netz, so reduziert sich die Übertragungsenergie durch Multi-Hop Kommunikation. Während in Single-Hop Netzen die Daten direkt vom Sender zum Empfänger übertragen werden, wird in Multi-Hop Netzen ein Routing erforderlich. Dies verursacht eine Ende-zu-Ende Verzögerung, die vom Mechanismus des Weiterleitens einer Nachricht abhängt und proportional zur Anzahl der Hops ist. Die Verzögerung ist abhängig von der Segmentierung großer Datenmengen in kleinere Datenpakete.

Die Vorteile von Multihopping in reinen Funknetzen sind somit:

- reduzierte Transferenergie
- reduzierte Interferenz
- erhöhter Gesamtdurchsatz
- Konnektivität zwischen entfernten Knoten bei limitierter Sendeleistung

Reine Ad-hoc Netze können in Gebieten eingesetzt werden, in denen keine Infrastruktur vorhanden ist. Durch ihre Flexibilität und ihre selbstorganisierende Natur eignen sie sich aber auch als komplementäre Technologie zu zellularen und Verteilnetzen für weitere Einsatzgebiete im mobilen Bereich, wie z.B. zur dezentralen Fahrzeugkommunikation.

Sind Fahrzeuge mit Sende- und Empfangseinrichtungen ausgestattet, mit denen sie bis zu einer maximalen Reichweite mit anderen Fahrzeugen Daten austauschen können, dann bilden sie ein mobiles Netz. Besitzen die Fahrzeuge die Fähigkeit, Daten für andere Fahrzeuge weiterzureichen, d.h. die Aufgaben eines mobilen Routers zu übernehmen, dann sei dieses mobile Netz als Auto-mobiles Ad-hoc Netz oder kurz *VANET*³ bezeichnet.

2.2 Selbstorganisation

”Zwei Gefahren bedrohen beständig die Welt, die Ordnung und die Unordnung”

— Paul Valéry

Mobile Ad-hoc Netze werden häufig als selbstorganisierende Netze bezeichnet. Dabei wird jedoch nicht präzisiert, wie der Begriff der Selbstorganisation angewendet auf Ad-hoc Netze verstanden werden soll. In diesem Abschnitt wird zunächst die allgemeine Begriffsbedeutung erläutert und anschließend die Eigenschaft der Selbstorganisation von Ad-hoc Netzen geklärt.

Unter Selbstorganisation versteht man das Phänomen, daß sich Systeme, die aus vielen Elementen bestehen, die sich nach bestimmten Regeln verhalten, Organisationen und Ordnungen entwickeln, die sich nicht einfach aus den Gesetzen des individuellen Verhaltens der Elemente⁴ ableiten bzw. erkennen lassen, sich aber dennoch daraus ergeben. Diese Organisationen oder Ordnungen lassen sich auf Systemebene als Muster oder Strukturen beobachten.

Durch Selbstorganisation entstehen demnach quasi automatisch auf Systemebene Muster und Strukturen durch die Interaktion von Subsystemen, ohne durch das individuelle Verhalten der Subsysteme beabsichtigt zu sein. Das Gesamtsystem bildet Ordnungen, die durch die individuelle Verhaltensweise automatisch, aber nicht bewußt, entstehen. Der Zusammenhang zwischen diesen Strukturen und Ordnungen und dem individuellen Verhalten ist nicht offensichtlich. Durch geeignete individuelle Verhaltenswahl können jedoch gewünschte Ordnungen auf Gesamtsystemebene erreicht

³Als Akronym der englischsprachigen Bezeichnung Vehicle Ad-hoc Network

⁴Autonome, miteinander wechselwirkende oder kooperierende Elemente eines Gesamtsystems werden auch als *Agenten* bezeichnet.

werden. Wie sich das Gesamtsystem verhält ist dabei durch seine Komplexität⁵ schwer analytisch zu beschreiben. Es kann außerdem vom Anfangszustand abhängen und konvergentes, divergentes, zyklisches oder chaotisches Verhalten zeigen. Es existieren also keine einfachen Regeln für eine direkte Berechnung, insbesondere für mehrere wechselwirkende Iterationsvorschriften. Durch Simulationen läßt sich für einzelne Instanzen das Verhalten berechnen.

Eine wichtige Eigenschaft selbstorganisierender Systeme ist die Abwesenheit zentralisierter Steuerinstanzen. Die selbstorganisierende Natur mobiler Ad-hoc Netze entsteht also vor allem dadurch, daß ohne regelnde zentrale bzw. übergeordnete Instanz durch das individuelle Verhalten der Teilnehmer sich eine bestimmte Organisation des Gesamtsystems einstellt.

Eine diskussionswürdige Frage stellt sich in Bezug auf Ad-hoc Netze hinsichtlich der Charakteristik selbstorganisierender Systeme, aus einem großen Raum möglicher Zustände immer nur Zustände aus einem kleinen Subraum mit bestimmten Eigenschaften einzunehmen. Der Zustand eines Ad-hoc Netzes beinhaltet bei gegebener Kommunikationsreichweite die Positionen der Teilnehmer. Aus diesen ergibt sich die Vernetzungsstruktur, d.h. die Netztopologie. Zusätzlich spielt der Zustand des Kommunikationssystems eine Rolle. Dieser beinhaltet die Menge der Datenpakete, die gerade unterwegs sind, sowie lokale Knotenindividuelle Bilder der tatsächlichen Topologie, d.h. den in jedem Knoten gespeicherten Netzzustand. Dann nehmen die Netze von allen möglichen Zuständen beispielsweise nur diejenigen ein, die zu jedem Zielknoten einer Route den Nachbarn auf dem kürzesten Weg speichern. Es kann hier jedoch nicht davon gesprochen werden, daß das individuelle Verhalten nicht auf das Erreichen bestimmter stabiler Zustände ausgerichtet wäre, da bei der Wahl der nächsten Knoten entlang der Route jeder Knoten bereits das Ziel minimierter Routenlänge verfolgt.

Ad-hoc Netze unterscheiden sich also grundlegend von selbstorganisierenden Systemen, wie sie in der Natur auftreten. Sie sind von einer übergeordneten Instanz entworfen, die die Regeln für die einzelnen Agenten so aufgestellt hat, daß sich organisiertes, strukturiertes Verhalten ergibt.

Wichtig für das in dieser Arbeit untersuchte Systemverhalten ist die Bestimmung individueller Regeln oder Algorithmen, die zu einem gewünschten Verhalten des Gesamtsystems führen (in diesem Fall die optimale Verteilung von Information unter den Netzteilnehmern bei beschränkten Netzwerkressourcen, wobei optimal bedeutet, daß jedem Teilnehmer die Informationen zur Verfügung stehen, aus denen er den größten Nutzen ziehen kann). Problematisch beim Design von Ad-hoc Netzen ist dabei die Tatsache, daß die Systeme eine Komplexität aufweisen, die eine einfache Verhaltensmodellierung zur Erreichung bestimmter Gesamtsystemziele schwierig macht. Da das Aufstellen der Regeln mittels eines geplanten Analyseprozesses schwierig ist, kann man einen Ansatz auf Versuch und Irrtum verfolgen, d.h. es werden Regeln aufgestellt und das Systemverhalten simulativ oder experimentell beobachtet. Es wird also ein Regelsatz aufgestellt, der das Interaktionsverhalten der Agenten festlegt. Es wird dann eine zufällige Ausgangsstruktur des Netzes erzeugt und das Netzverhalten für diese Instanz beobachtet. Aus einer Anzahl von Versuchen lassen sich dann mit Wahrscheinlichkeiten behaftete verallgemeinerte Aussagen ableiten. Aus dieser Analyse ergibt sich, ob das System das gewünschte Verhalten besitzt. Detailwissen ist dabei irrelevant für das Verständnis des prinzipiellen Systemverhaltens. Ähnlich verhält es sich mit komplexen Systemen beispielsweise in der Physik. Es ist nicht wichtig, den exakten Zustand jedes

⁵Komplexität verstanden als *logische Tiefe* [14]

Teilchens eines Gases zu kennen. Entscheidend ist es, das Verhalten des Gases als Gesamtsystem aus den Interaktionen der Elemente zu verstehen.

Dies bedeutet für den Systementwurf eines Ad-hoc Kommunikationssystems, daß zunächst das Verhalten des komplexen Gesamtsystems verstanden werden muß. Darauf aufbauend können einzelne Verfahren und Algorithmen entwickelt und verbessert werden. Eine grundsätzliche Verbesserung ist möglich, wenn ein neues Verfahren in allen Belangen und für jeden Teilnehmer ein besseres Ergebnis bringt als ein bestehendes. In einem Ad-hoc Netz sind aber bei beschränkten Kommunikationsressourcen auch Zuteilungsentscheidungen zu treffen, d.h. während ein Teilnehmer einen Kanal belegt, steht die Übertragungskapazität anderen Teilnehmern nicht mehr zur Verfügung. Der Entwurf von Ad-hoc Kommunikationssystemen muß sich daher an zwei Zielen orientieren, der Maximierung des Gesamtnutzens, der für die Teilnehmer durch das Netz erbracht wird einerseits, und der gerechten Verteilung dieses Nutzens andererseits.

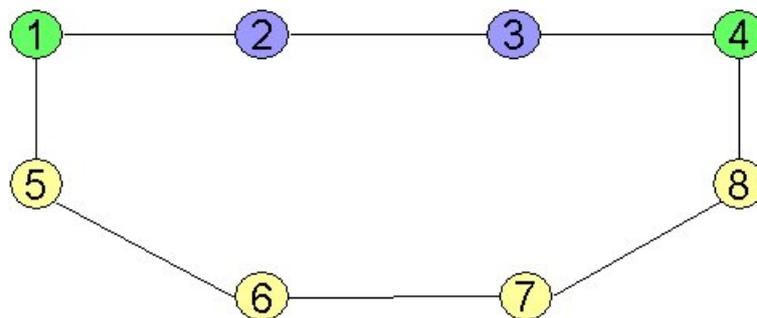


Abbildung 2.1: Beispieltopologie für Kommunikationsverhalten, das individuellen oder sozialen Nutzen optimiert

Daß die Orientierung am individuellen Nutzen zu sozial ineffizientem Verhalten führen kann und daß andererseits die Optimierung des sozialen Nutzens zu Benachteiligungen einzelner Individuen führen kann, wird am Beispiel der Abbildung 2.1 deutlich. Dieses Netz sei als Modell für ein drahtgebundenes Netz zu verstehen, da in einem Ad-hoc Netz zwei benachbarte Teilnehmer nicht gleichzeitig kommunizieren können. Dabei sei angenommen, daß der Nutzen für jeden Teilnehmer umso größer ist, je höher die Datenübertragungsrate und je geringer die Latenzzeit ist. Verfügbare Netzkapazität kann dabei auf mehrere gleichzeitig bestehende Verbindungen aufgeteilt werden. Angenommen, im Beispielnetz der Abbildung kommunizieren Knoten 2 und Knoten 3 miteinander. Möchten nun ebenfalls Knoten 1 und Knoten 4 Daten austauschen, so stehen ihnen dazu zwei Alternativen zur Verfügung: der Weg über die Knoten 2 und 3 oder der Weg über die Knoten 5, 6, 7 und 8. Angenommen, der Nutzen, errechnet aus möglicher Datenrate und Latenzzeit, ist bei der kürzeren Verbindung größer. Dann optimieren Knoten 1 und 4 bei Wahl dieser Verbindung ihren Nutzen. Der Nutzen der parallelen Verbindung zwischen 2 und 3 wird aber reduziert. Der Gesamtnutzen wäre dann größer, wenn die Knoten 1 und 4 den etwas längeren Kommunikationspfad wählen würden. Dadurch nehmen aber die Knoten 2 und 3 eine Schlechterstellung zugunsten der beiden anderen Teilnehmer in Kauf. Da eine solche Schlechterstellung von konkreten Situationen abhängt, werden sich individuelle Schlechterstellungen bei einer Orientierung am Gesamtnutzen im Laufe der Zeit relativ gleichmäßig auf die Teilnehmer verteilen.

Wird ein System also so entworfen, daß sich alle Teilnehmer ausschließlich an der Maximierung des individuellen Nutzens orientieren, kann dies zu sozial ineffizientem Systemverhalten führen.⁶ Der Entwurf von Regeln für das Verhalten eines Kommunikationssystems in Ad-hoc Netzen sollte sich also nicht allein am Nutzen für die Kommunikationspartner orientieren, sondern den Netzkontext mit einbeziehen. Das Systemdesign für die nachrichtenbasierte Informationsverbreitung bei CARISMA orientiert sich deshalb sowohl am individuellen als auch am sozialen Nutzen. Eine temporäre individuelle Schlechterstellung einzelner Teilnehmer wird in Kauf genommen, da davon ausgegangen wird, daß sich diese Schlechterstellungen im Laufe der Zeit ausgleichen. Der Einsatz von Zahlungsmitteln zur optimierten Ressourcenallokation wird nicht betrachtet und bleibt künftigen Untersuchungen vorbehalten.

2.3 Situationsadaptivität und Kontext-Sensitivität

Obwohl der Begriff der *Kontext-Sensitivität* (engl. Context-Awareness) in den letzten Jahren in vielen Veröffentlichungen im Bereich der Informatik auftaucht, hat sich noch kein einheitlicher Begriffsinhalt herausgebildet. Der Begriff scheint eng verwandt zu sein mit dem Begriff der *Situationsadaptivität*. Es stellt sich die Frage, ob die Begriffe synonym zu verwenden oder voneinander abzugrenzen sind. Mit Hilfe idiographischer Definitionen werden intensionale Begriffsbestandteile mit Bezug auf die im weiteren Zusammenhang adressierten Objekte herausgearbeitet. Eine allgemeingültige Definition wird nicht angestrebt.

Der Begriff *Kontext* wird häufig verwandt im Zusammenhang mit Sprache. Im Wahrig Fremdwörterlexikon [195] wird Kontext definiert als “der ein Wort oder eine Wendung umgebende Text, durch den die Bedeutung erst klar wird”. Meyers Lexikon definiert Kontext als “inhaltl. Zusammenhang, in dem eine Äußerung steht, auch der Sach- und Situationszusammenhang, aus dem heraus sie verstanden werden muß”. Hier wird der Begriff der *Situation* direkt zur Definition des Begriffes Kontext herangezogen. Das Encarta® World English Dictionary bezieht den Begriff Kontext nicht ausschließlich auf Sprache, sondern allgemein auf *etwas*: “surrounding conditions: the circumstances or events that form the environment within which something exists or takes place”.

In menschlicher Kommunikation spielt der Kontext immer eine implizite Rolle. Der Einfluß des nichtsprachlichen Kontext auf den Spracheinsatz in der Informatik wird jedoch bislang kaum berücksichtigt. In der Informatik wird kein Modell natürlicher Gegebenheiten verwendet, sondern stattdessen eine Konstruktion von Strukturen zur Erledigung bestimmter Aufgaben. Kommunikation ist dabei stark formalisiert. Sind die bei einer Kommunikation übertragenen Zeichen nicht so eindeutig definiert, so hängt das beim Empfänger entstehende Bild stärker von der Interpretation in Abhängigkeit des Kontextes ab. Zusätzlich stimmt er seine Reaktion bzw. sein Handeln sowohl auf den eigenen Kontext als auch auf die kommunizierten Informationen ab. Ähnlich ist es bei CARISMA. Der Kontext wird in Form von Situationen, die mit Hilfe des CARISMA Situationsmodells aus mehreren Sensordaten abgeleitet werden, berücksichtigt. Dieses Verhalten ist im Kasten von Abbildung 2.2 dargestellt. Dieses Kontextwissen geht nun seinerseits in die Auswahl, Interpretation und Bewertung von Informationen ein, die auf lokalen Sensoren basieren oder kommuniziert

⁶Verwandte Fragestellungen werden von der Spieltheorie untersucht, die auf das Buch *A Theory of Games and Economic Behaviour* von Oskar Morgenstern und John von Neumann zurückgeht [144].

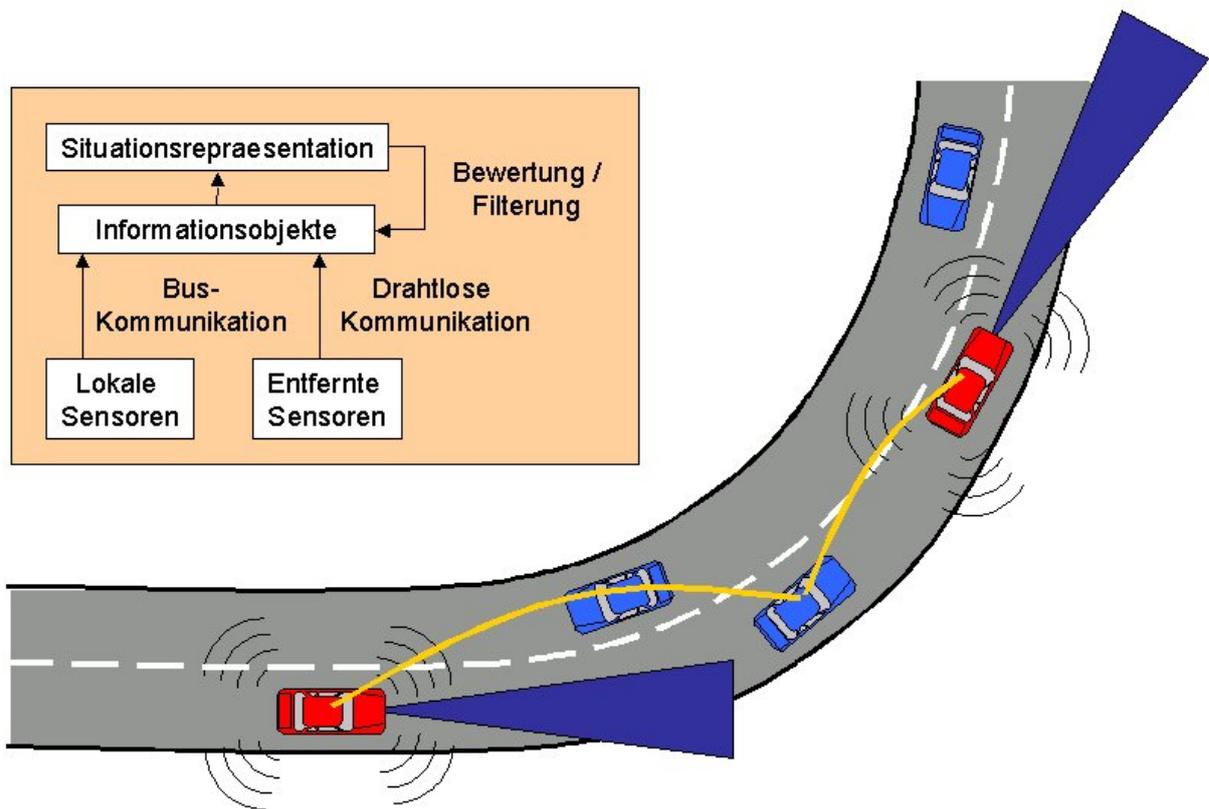


Abbildung 2.2: Situationsabhängige Bewertung kommunizierter Informationsobjekte

werden. Zusätzlich ist es die Basis für ein kontextadaptives Verhalten von Applikationen. Anhand des Beispiels der Fahrzeuge in Abbildung 2.2 wird dies deutlich. Die vom vorausfahrenden PKW kommunizierten Sensorinformationen werden auf Basis der lokal bekannten Informationen interpretiert und bewertet. Ein Kriterium dabei ist, die Relevanz der zusätzlichen Informationen zu bewerten. Diese ist beispielsweise sehr stark abhängig von der eigenen Position, Fahrtrichtung und Fahrtroute. Applikationen können auf Basis der bewerteten Informationen, die nun ihrerseits in die Situationsrepräsentation einfließen, ihr Verhalten adaptieren. Sie können die Information auch an den Fahrer weitergeben, der seinerseits sein Verhalten anpassen kann, beispielsweise die Geschwindigkeit reduzieren.

Die Bedeutung des Begriffes Kontext im textuellen Zusammenhang ist für die vorliegende Arbeit weniger relevant. Wesentlich für das weitere Verständnis ist, daß sich der Kontext auf zumindest Teile der *Umgebung* des Betrachtungsobjektes bezieht, die im *Zusammenhang* bzw. in *Verbindung* mit dem Betrachtungsobjekt stehen. Der Kontext bezieht sich nicht nur auf einen Zustand zu einem Zeitpunkt, sondern kann Ereignisse im Zeitverlauf beinhalten. Damit ist der Begriff weiter gefaßt als der der Situation, die einen *augenblicklichen Zustand* [195] meint. Ein Beispiel mag dies illustrieren. Ein Lehrer fällt die Entscheidung, einen Schüler ins Klassenbuch einzutragen. Unter der Situation, in der diese Handlung stattfindet, wird man den Schulunterricht verstehen. Der Kontext hingegen beinhaltet nicht nur den Unterricht, sondern auch das Ereignis, das zu dieser Handlung geführt hat. Diese Unterscheidung scheint theoretischer Natur. Sie spielt für das Verständnis entsprechend situations- bzw. kontextadaptiver Systeme aber eine wichtige Rolle. Eine Situation kann

auch losgelöst von bestimmten Objekten oder Subjekten definiert werden. Kontext bezieht sich demgegenüber immer auf eine Entität. Situationen sind Teil des Kontextes eines Objektes bzw. Subjektes.

Der Begriff der Adaption ist als "Anpassung(svermögen) an Umweltverhältnisse"[195, 1] etwas einfacher zu verstehen. Ein adaptives System ist demnach in der Lage, Eigenschaften oder Verhalten abhängig von seiner Umwelt zu verändern. Dazu muß es in der Lage sein, die Umwelt wahrzunehmen. Der Begriff der Sensitivität (sensitiv: "überempfindlich, feinfühlig"[195, 1]) beinhaltet wie der Begriff der Adaption die beiden Komponenten der Wahrnehmungsfähigkeit und der Reaktion auf die Wahrnehmung. Entgegen der Adaptivität drückt er jedoch eher gefühlsmäßiges Reagieren aus, das in der Regel keinem bewußten Prozeß unterliegt und daher wenig zielgerichtet ist. Er beinhaltet aber als wesentlichen Bestandteil auch die Eigenschaft, bereits auf geringe Umweltveränderungen mit größeren Änderungen zu reagieren. Adaption drückt demgegenüber einen ggfs. auch rationalen Prozeß einer für diesen Fall bewußten, aber insbesondere zielorientierten Verhaltens- oder Eigenschaftsänderung aus.

Auf der Basis der Begriffsklärung kann nun definiert werden, wann informationsverarbeitende Systeme die Eigenschaft der Situationsadaptivität bzw. der Kontext-Sensitivität besitzen. Im Sinne der Begriffsinhalte ließen sich kontext-sensitive Systeme interpretieren als Systeme, die entweder gefühlsgesteuert bzw. wenig geplant auf Ereignisse im Zeitverlauf reagieren oder die ihr Verhalten bereits bei geringen Abweichungen anpassen. Kontext-sensitive informationsverarbeitende Systeme sind nach dieser Auffassung schwieriger zu modellieren und umzusetzen als situationsadaptive. Dies liegt einerseits daran, daß der Kontext nach obiger Definition ein umfangreicheres Modell benötigt, da der Faktor Zeit nicht vernachlässigt werden kann. Andererseits ist eine genaue Beschreibung der Abhängigkeiten für eine Sensitivität gegenüber geringen Veränderungen notwendig. Da jede Anpassung des Systemverhaltens im weiteren Verlauf nach diesem Verständnis adaptiv ist, wird hier nur von adaptiven Systemen gesprochen.

Adaptive informationsverarbeitende Systeme finden sich in der Steuer- und Regelungstechnik. Sie passen sich bestimmten Meßgrößen an, d.h. dem Zustand einer oder weniger Variablen, nicht aber einer Situation im weiteren Sinne, wie sie für diese Arbeit bedeutsam ist. Situationsadaptive Systeme bilden als Systeme, die ihr Verhalten ganzen Situationen anpassen, eine Subklasse adaptiver Systeme. Sie lassen sich nicht in funktionaler Abhängigkeit einzelner Variablen beschreiben. Situationen können nicht durch eine Größe alleine beschrieben werden.

Situationen im Sinne von Zuständen bzw. Kontextzuständen ändern sich nicht kontinuierlich in dem Sinne, daß sich eine Entität in permanent wechselnden Situationen befindet. Das Eintreten einer Situation kann jedoch in Intensität und Eindeutigkeit variieren, d.h. eine Entität kann sich mehr oder weniger in einer Situation befinden. Der Übergang von einer Situation in eine andere findet deshalb in der Regel nicht sprunghaft statt. Beim Situationsübergang wird sich die Entität in der Regel immer weniger in der alten Situation befinden und immer mehr in der neuen. Situationen können sich dabei überlagern, d.h. mehrere Situationen sind gleichzeitig eingetreten, ändern sich aber im Grad ihres Eintretenseins.

Damit sich informationsverarbeitende Systeme an Situationen anpassen können, benötigen sie die Fähigkeit, die Situationen wahrzunehmen und symbolisch zu repräsentieren. Grundlage ist also ein Modell der Situationen, an die sie ihr Verhalten anpassen sollen. Die genannten Charakteristika von Situationen dienen dabei als Grundlage. Das Systemverhalten muss dann entsprechend

situationsabhängig beschrieben werden, d.h. es bestehen Abhängigkeiten zwischen der Situationswahrnehmung und dem Systemverhalten.

Generierung, Versand, Weitergabe und Akzeptanz von Informationen bei den im weiteren betrachteten automobilen Ad-hoc Netzen hängen unter anderem von Umgebungsvariablen ab. Informationen werden situationsbezogen auf ihre Relevanz für den Nutzer eingestuft. In die Verbreitung der Information gehen außerdem Eigenschaften des Netzwerkes ein. Die Anpassung an Netzwerkparameter ist nicht unbedingt ein situationsadaptives System. Auch die Berechnung von Gewichten anhand von Positionsinformation ist per se nach obigem Verständnis kein situationsadaptives System. Da das Gesamtverhalten jedoch von vielen Eigenschaften der Umgebung abhängt, kann man sagen, daß sich das System insgesamt situationsadaptiv verhält. Durch die Ad-hoc Vernetzung erweitert sich der Wahrnehmungshorizont des Fahrzeuges. Systeme und Anwendungen werden in die Lage versetzt, sich besser an die gegebene Situation anzupassen.

Kapitel 3

Stand der Forschung und verwandte Arbeiten

”To know that we know what we know, and to know that we do not know what we do not know, that is true knowledge.”

— Nikolaus Kopernikus

3.1 Ad-hoc Netze

3.1.1 Routing

Um bei CARISMA Daten zwischen zwei entfernten Teilnehmern austauschen zu können ist es notwendig, Datenpakete zu routen. Aus dem Bereich der Ad-hoc Netz Forschung existieren eine Reihe von Routingprotokollen. Im folgenden werden die wichtigsten Protokolltypen kurz vorgestellt und ihre Eignung für einen Einsatz in VANETS diskutiert. Es lassen sich grundsätzlich Protokolle unterscheiden, die reine Topologieinformationen nutzen und solche, die die Positionen der Knoten mit berücksichtigen.

Unter den topologiebasierten Verfahren werden tabellenbasierte und anforderungsgetriebene bzw. proaktive und reaktive Protokolle unterschieden. Proaktive oder tabellenbasierte Verfahren versuchen, Routen zu allen anderen Knoten lokal aktuell zu halten und erfordern den Aufbau und die Pflege von Routingtabellen in jedem Netzknoten. Zu den proaktiven Verfahren zählen u.a. Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV, [162]), das Wireless Routing Protocol (WRP, [146]), Global State Routing (GSR, [36]), Fisheye State Routing (FSR, [158]), Hierarchical State Routing (HSR, [83]), Zone-based Hierarchical Link State Routing (ZHLS, [86]) und Clusterhead Gateway Switch Routing (CGSR, [39]). Zu den Informationen, die ausgetauscht und gespeichert werden, gehört für jeden Zielknoten der nächste Knoten entlang des Routingpfades und die Hopzahl. Pakete werden periodisch oder bei bestimmten Ereignissen, insbesondere Verbindungsstatusänderungen (Link State Protokolle), versendet und im ganzen Netz verteilt. Proaktive Verfahren besitzen somit eine Komplexität an Steuernachrichten, die nur von der Mobilität, nicht vom Kommunikationsverhalten der Netzknoten abhängt (da die Route permanent aktuell gehalten wird, sind keine Steuernachrichten bei einem Verbindungsaufbau notwendig). Die Netzlast wird in den Routingtabellen nicht berücksichtigt. Der Vorteil dieser Verfahren liegt in minimaler Verzögerung beim Aufbau einer Verbindung. Der Aufwand zur Pflege der Tabellen steigt jedoch rapide mit der Dynamik des Netzes. Während es für kleine und behäbige Ad-hoc Netze möglich ist, Information über das gesamte Netz in Form von Routingtabellen in jedem Teilnehmer zu speichern, ist dies für große und dynamische Netze nicht mehr möglich. Proaktive Verfahren sind daher für große und sehr dynamische Netze wie VANETS wenig geeignet. Netzwerkinformationen in jedem

Teilnehmer aktuell zu halten ist bei dynamischen Netzen nur für einen kleinen Teil des Netzes möglich, beispielsweise kann jeder Knoten eine Liste seiner direkten Nachbarn verwalten.

Anforderungsgetriebene oder reaktive Routingprotokolle erneuern ihre Routingtabelleneinträge nicht bei jeder Topologieänderung. Sie bauen stattdessen Routen bei Bedarf auf. Dies verursacht eine Routensuchphase, bei der das Netzwerk mit einer Routenanfrage geflutet wird, wodurch sich der Verbindungsaufbau verzögert. Bei den anforderungsgetriebenen Verfahren lassen sich *Source Routing*, bei dem die gesamte Routinginformation im Paket-Kopf enthalten ist, und Distanzvektorverfahren unterscheiden, bei denen die Routinginformation in Form des nächsten Hops entlang des Pfades in jedem Knoten in einer Routingtabelle eingetragen ist.

Der Zielknoten erhält in der Regel mehrere Anforderungspakete des gleichen Quellknotens. Die Verfahren unterscheiden sich unter anderem darin, welche Metrik sie zur Auswahl der Route verwenden. ABR (Associativity-Based Routing, [190]) und SSR (Signal Stability Routing, [56]) versuchen über Assoziativitätszähler bzw. Signalstärken möglichst stabile Routen zu wählen. Zu den anforderungsgetriebenen Verfahren zählen außerdem Cluster Based Routing Protocol (CBRP, [85]), Dynamic Source Routing (DSR, [87]), Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA, [156]) und Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV, [163]).

Anforderungsgetriebene Verfahren eignen sich besser für dynamische Netze, da das Aufkommen an Steuernachrichten hier hauptsächlich von der Menge der Kommunikationswünsche abhängt und nicht so sehr von der Mobilität der Teilnehmer. Da die Berücksichtigung von Routenstabilität bei der Routenauswahl in VANETS auf andere Weise möglich ist als bei ABR oder SSR und die Bildung von Clustern bei Berücksichtigung von Positionen und straßenbasierten Strukturen nicht notwendig ist, werden nur DSR und AODV für den Einsatz in VANETS weiter betrachtet.

Der Routenaufbau bei AODV ist in Abbildung 3.1 dargestellt. In diesem Beispiel benötigt Knoten S eine Route zu Knoten D. Dazu sendet er eine Route Request (RREQ) Nachricht. Diese Nachricht wird von allen Nachbarknoten empfangen und erneut ausgesendet, falls sie die Nachricht noch nicht erhalten hatten. Duplikate werden dabei anhand der Quellknotenadresse und Sequenznummern erkannt. Jeder Knoten, der eine RREQ Nachricht erhält, die er noch nicht gesehen hat, sendet sie erneut aus. Auf diese Weise wird das Netz mit der RREQ Nachricht geflutet. Im oberen Teil der Abbildung 3.1 ist dies ersichtlich. Die schwarzen Pfeile stellen die Ausbreitung der Nachricht dar. Jeder Knoten, der eine RREQ Nachricht erhält, merkt sich die Identität des Knotens, von dem er die Nachricht erhalten hat, in einer Tabelle. Schließlich erhält der Zielknoten D die RREQ Nachricht. Er antwortet auf diese Nachricht mit einer Route Reply Nachricht (RREP). Diese Nachricht adressiert er explizit an den Knoten, von dem er die RREQ Nachricht zuerst erhalten hat. Alternativ kann er auf weitere RREQ Nachrichten warten und aus den daraus resultierenden Routen beispielsweise diejenige mit der minimalen Hopzahl auswählen. Die Zwischenknoten adressieren nun ihrerseits die RREP Nachricht an den in der Tabelle gespeicherten Vorgängerknoten, von dem sie die RREQ Nachricht zuerst erhalten haben und merken sich den Knoten, von dem sie die RREP Nachricht erhalten haben ebenfalls in einer Tabelle. Auf diese Weise wird die Route etabliert. In den Routingtabellen wird bei diesem Verfahren für jeden bekannten Zielknoten der nächste Hop in der Routingtabelle gespeichert. Diese Routingtabellen sind im unteren Teil der Abbildung für das Beispiel eingetragen. Knoten S kann nun Pakete an Knoten D verschicken. Er adressiert diese Pakete zunächst an Knoten A, der als nächster Zwischenknoten (Hop) in seiner Routingtabelle eingetragen ist. Die Tabelle von Knoten A enthält zwei Einträge. Er leitet Pakete, die an Kno-

ten D adressiert sind, zunächst an Knoten B weiter. Pakete an Knoten S kann er direkt an diesen weitersenden. Bleibt das Netz relativ stabil, so bauen sich nach und nach bei allen Teilnehmern Routingtabellen auf, die Routinginformationen für eine Menge von Zielknoten enthalten. Routen sind dabei aktiv, solange sie genutzt werden. Reißen Verbindungen einer Route, werden Route Error (RERR) Nachrichten zu den Quellknoten aktiver Verbindungen gesendet, die eine neue RREQ Nachricht aussenden. Das Verhalten von AODV in VANETS wird in Kapitel 5 weiter untersucht.

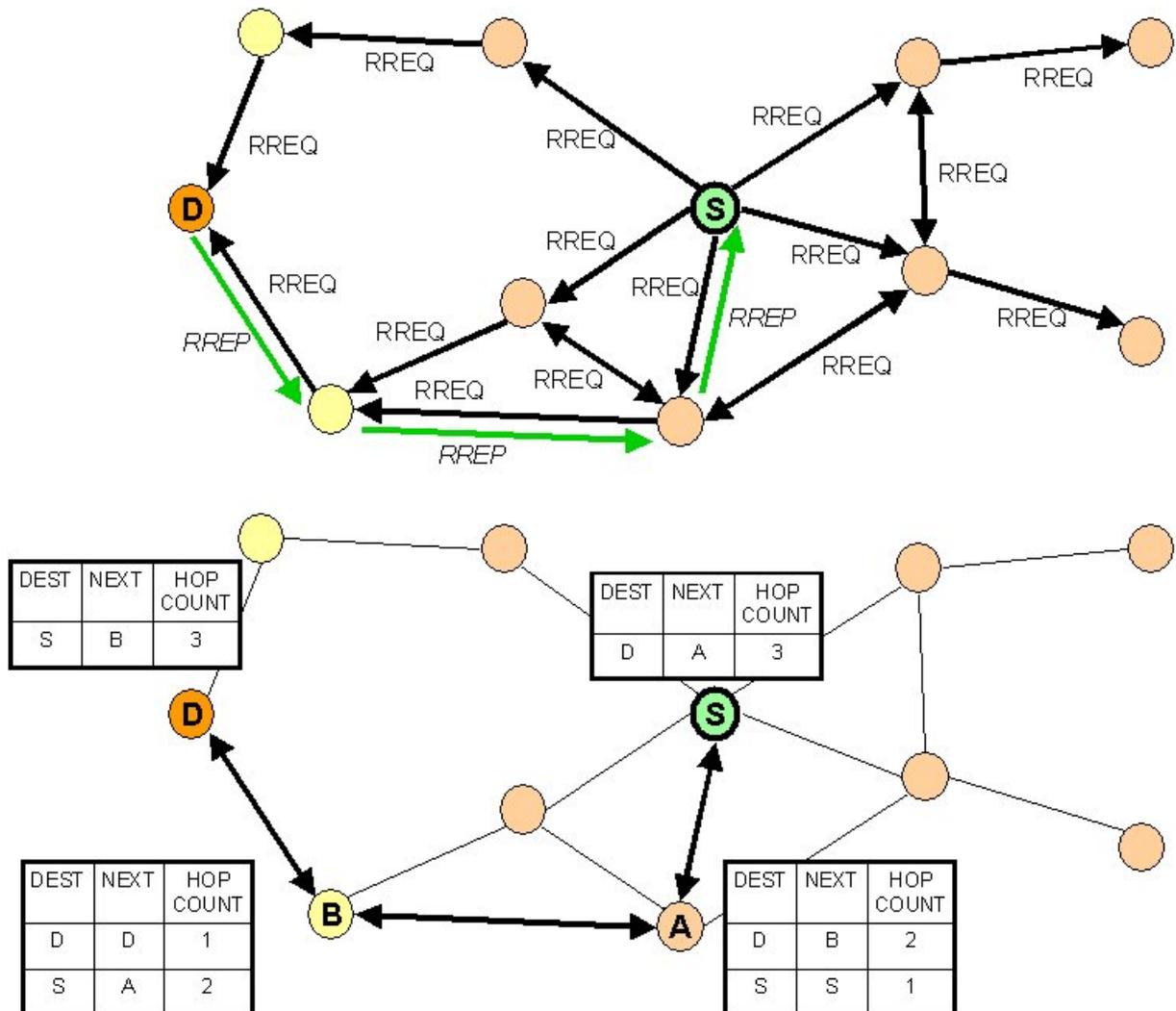


Abbildung 3.1: Routenaufbau und Routentabellen bei AODV

Zusätzlich zu den reinen proaktiven und reaktiven gibt es auch hybride Verfahren. Das ZRP (Zone Routing Protocol) arbeitet tabellenbasiert innerhalb eines bestimmten Radius (intra-zone routing) und On-Demand für Ziele außerhalb des Radius. Das *Terminodes* Routing arbeitet ebenfalls hybrid [78].

Positionsbasierte Routingverfahren nutzen statt reiner Topologieinformation die wesentlich genauere Information der Knotenpositionen. Auch die Adressierung der Netzteilnehmer erfolgt nicht über ihre ID, sondern über ihre Position. Um positionsbasiert adressieren zu können, muß dem Knoten, der einen Verbindungswunsch besitzt bzw. eine Nachricht senden will, die Position des

Zielknotens bekannt sein. Da sich diese in mobilen Netzen permanent ändern sind dazu sogenannte Ortsinformationsdienste notwendig, wie sie von Stojmenovic [182], Li et al. [126] oder Fühler et al. [61] beschrieben werden. Ortsinformationsdienste werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Es gibt nur wenig Anwendungsfälle, bei denen ein bestimmtes Fahrzeug adressiert werden soll. Stattdessen werden Routen zu lokalen Zugangsknoten benötigt, deren Position allgemein bekannt und statisch ist. Eine Route kann auch zum Abrufen geographischer Information benötigt werden. Dabei wird aber nicht ein bestimmter Teilnehmer adressiert, sondern vielmehr werden ortsbezogene Informationen gewünscht. Eine Anfrage kann entsprechend in der geographischen Nähe der gesuchten Information gestellt werden. Für das Routing machen sich positionsbasierte Routingverfahren einen einfachen Zusammenhang zwischen Geometrie und Topologie zunutze. Knoten, die sich geometrisch näher an einem Zielknoten befinden, sind ihm mit großer Wahrscheinlichkeit auch topologisch näher.

Es lassen sich Verfahren unterscheiden, die die Positionsinformation zur Optimierung eines topologischen Routings nutzen, d.h. nach wie vor Routingtabellen pflegen, und Verfahren, bei denen Pakete rein auf geographischer Basis weitergeleitet werden. Location-Aided Routing (LAR) [101] verbreitet Routensuchnachrichten nicht im ganzen Netz, sondern begrenzt die Nachrichtenverbreitung auf einen geographisch beschriebenen Teilbereich des Netzes. Ein Problem dieser eingeschränkten Suchzonen besteht darin, daß unter Umständen kein Pfad gefunden wird, obwohl einer existiert (siehe auch Abb. 3.2). Im Gegensatz zu LAR baut Gedir [183] keinen echten Pfad auf, sondern leitet Pakete in einem verbindungslosen Modus weiter. Auch beim Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR [92]) wird keine Route aufgebaut, sondern nach *best effort* Manie das Paket an den Knoten weitergereicht, der dem Zielknoten am nächsten ist.

Eine entscheidende Voraussetzung für das positionsbasierte Routen besteht darin, daß alle Netzteilnehmer zu jeder Zeit über ihre jeweilige Position informiert sein müssen. Hightower und Borriello geben einen Überblick über aktuelle Positionierungstechnologien [76]. In Fahrzeugen besteht in der Regel die Möglichkeit der Positionsbestimmung über das Global Positioning System (GPS) [91, 47, 3]. Eine alternative Positionsbestimmung ist über Signalstärken und -laufzeiten mit Hilfe von dezentralen Referenzpunkten direkt im VANET möglich. Dezentrale Ad-hoc Netz basierte Positionierungsverfahren werden von Capkun et al. beschrieben [33]. Da sich Fahrzeugpositionen über die Abbildung auf das Straßennetz und die zusätzlichen Informationen aus Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und Lenkeinschlag nach einer Initialisierung recht genau weiterverfolgen lassen, läßt sich für das CARISMA System voraussetzen, daß jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt seine Position kennt.

3.1.2 Geocasting

Der Einsatz geographisch beschränkter Routensuchgebiete bei positionsbasierten Routingverfahren bedeutet, daß die Routensuchnachricht in einem geographisch begrenzten Gebiet verbreitet wird. Diese Verbreitung einer Nachricht in einem festgelegten Gebiet wird auch als *Geocast* bezeichnet. Neben dieser Funktion als eingeschränktes Routensuchgebiet ist ein Geocast eine einfache Möglichkeit zur Verbreitung von Informationen in einem vom Sender definierten Gebiet. Ein Geocast kann also beispielsweise dazu genutzt werden, eine Verkehrsinformation an alle Teilnehmer innerhalb einer Stadt oder in einem festen Umkreis weiterzugeben.

Das Konzept des Geocast wurde von Imielinski und Navas eingeführt als Erweiterung des Internet um geographische Parameter mit entsprechenden Adressierungs- und Routingverfahren [148, 80]. Diese Art der Gruppenkommunikation kann als Spezialfall der etwas allgemeiner definierten situations- und interessensabhängigen nachrichtenbasierten Kommunikation bei CARISMA betrachtet werden, wie sie in Kapitel 7 vorgestellt wird. Für die Verteilung von Nachrichten wurden zwar auch für Ad-hoc Netze Protokolle entwickelt, die die Pakete über einen Multicast-Baum wie im Festnetz zu den Empfängern routen (z.B. AMRIS (Ad-Hoc Multicast Routing Protocol [202]), AMRoute [203], Multicast AODV [170], ODMRP (On-Demand Multicast Routing Protocol [123]), CAMP (Core-Assisted Mesh Protocol [65]), DCMP (Dynamic Core Based Multicast Routing Protocol, [49]) oder ABAM (On-demand Associativity-based Multicast Routing, [191])). Diese Vorgehensweise ist jedoch für VANETS aufgrund der hohen Dynamik nicht praktikabel.

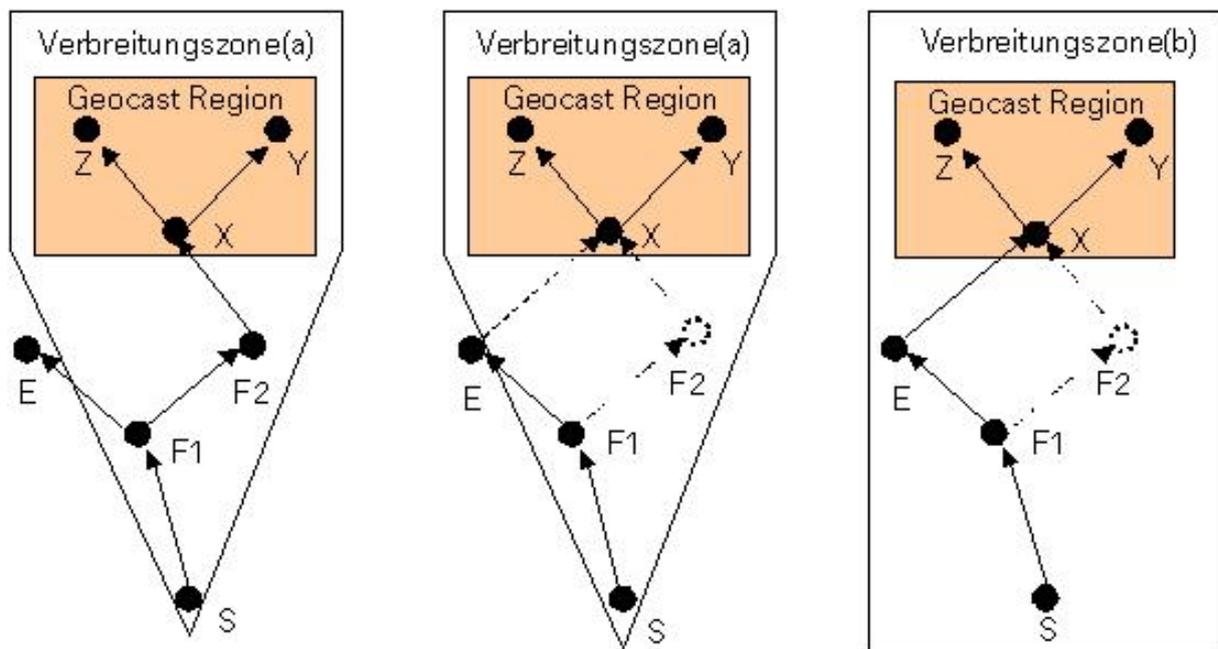


Abbildung 3.2: Das Prinzip des *Geocasting*

Der Begriff des *Broadcast* kann in einem Ad-hoc Netz zwei unterschiedliche Sachverhalte bezeichnen. Zum einen wird das Versenden eines Paketes von einem Knoten an alle seine Nachbarknoten als Broadcast bezeichnet. Zum anderen ist mit einem Broadcast der Versand einer Nachricht an alle Teilnehmer eines Netzes gemeint. Zur Unterscheidung sei die erste Variante als lokaler, die zweite als globaler Broadcast bezeichnet. Wenn im folgenden der Begriff Broadcast in Bezug auf ein Ad-hoc Netz alleine verwendet wird, so ist stets ein globaler Broadcast gemeint. Der Begriff *Fluten* bezeichnet einen globalen Broadcast, bei dem jeder Teilnehmer, der die Broadcast-Nachricht erhält, diese erneut aussendet. Ein *Geocast* ist dann ein globaler Broadcast, der auf die Netzteilnehmer in einem bestimmten Gebiet beschränkt ist. Ein Geocast nutzt somit eine implizite Adressierung basierend auf Empfängerpositionen.

Die existierenden Geocast Verfahren für Ad-hoc Netze widmen sich der Frage, wie eine Nachricht von einer Quelle in ein Geocast Gebiet geleitet wird. Innerhalb des Geocast Gebietes wird die

Nachricht dann von jedem Knoten weitergereicht, d.h. geflutet. Bei CARISMA kann davon ausgegangen werden, daß interessierte Knoten sich in der Regel in der unmittelbaren Umgebung des Senders befinden. Dennoch mag es Anwendungsfälle geben, bei denen eine Nachricht zunächst in ein Zielgebiet weitergeleitet werden muß, bevor sie verteilt wird, beispielsweise, wenn sie von einem lokalen Zugangsknoten versendet wird. Das Routen ins Zielgebiet entspricht weitgehend dem positionsbasierten Routen, wie es im vorangegangenen Abschnitt besprochen wurde.

Abbildung 3.2 visualisiert das Konzept des Geocasting. Die Geocast Region bezeichnet das Zielgebiet, in dem die Nachricht von Knoten S aus verbreitet werden soll. Die Knoten X, Y und Z befinden sich im Zielgebiet und sind damit Adressaten der Nachricht. Zwei Gruppen von Verfahren können dabei unterschieden werden. In die erste Gruppe fallen Verfahren, die zunächst einen Routingpfad ins Zielgebiet aufbauen. Erst danach werden die Pakete entlang des Pfades versendet und im Zielgebiet verteilt. Zu dieser Gruppe gehören GeoTORA [103] und Mesh-based Geocast [23]. Verfahren der zweiten Gruppe senden die Pakete und Nachrichten, ohne einen Pfad zu kennen. Der von Ko und Vaidya vorgestellte Location-Based Multicast Algorithmus [102] definiert dazu eine sogenannte *Forwarding Zone* (in der Abbildung als Verbreitungszone bezeichnet) zum Zielgebiet, um einen netzweiten Broadcast zu vermeiden.

Im linken Teil der Abbildung wird die Nachricht von Knoten S über F1 und F2 ins Zielgebiet weitergegeben. Ist der Teilnehmer F2 nicht vorhanden, wie dies im mittleren Teil der Abbildung der Fall ist, so existiert innerhalb der Verbreitungszone kein Pfad ins Zielgebiet. Die Nachricht erreicht die Knoten X, Y und Z in diesem Fall nicht, obwohl es einen Weg über den Knoten E gibt, der sich aber außerhalb des Verbreitungsgebietes befindet. Es stellt sich deshalb die Frage nach einer sinnvollen Wahl des Verbreitungsgebietes. Im rechts dargestellten Fall eines rechteckigen Gebietes wird der Pfad über Knoten E gefunden. Die größere Wahrscheinlichkeit, einen Pfad zum Ziel zu finden, wird mit einem größeren Verbrauch an Netzkapazität bezahlt.

Ko und Vaidya schlagen vor, daß nur Knoten eine Nachricht weiterleiten, die um eine bestimmte Distanz näher am Zielgebiet sind als Knoten, die die Nachricht bereits versendet haben. Dies ähnelt dem Vorgehen des Greedy Perimeter Stateless Routings von Karp und Williams [92]. Geogrid [127] verfolgt einen anderen Ansatz. Die Fläche wird bei diesem Verfahren in quadratische Zonen aufgeteilt. Innerhalb jeder Zone gibt es einen *Leader* und zu jeder Nachbarzelle einen *Gateway*-Knoten (geographische Gruppenbildung). Es ist dann ausreichend, wenn nur die *Leader* und *Gateway*-Knoten die Nachricht an die jeweilige Nachbarzone in Richtung des Zielgebietes weiterreichen.

Alle Verfahren lassen sich prinzipiell für VANETS einsetzen, berücksichtigen aber nicht die besondere Topologie. Abbildung 3.3 zeigt, daß für Straßennetze einfache geometrische Verbreitungsgebiete problematisch sind. Die Abbildung zeigt einen Kartenausschnitt des Münchner Stadtgebietes. Die Straßen sind in schwarz eingezeichnet. Die Punkte stellen mit CARISMA ausgestattete Fahrzeuge dar. Sind zwei Fahrzeuge in Kommunikationsreichweite, so sind sie mit einer hellen Linie verbunden. Ein kegelförmiges Gebiet hilft in einem solchen VANET häufig nicht weiter und auch ein rechteckiges Gebiet ist wenig sinnvoll.

Die existierenden Arbeiten zu Geocasting setzen voraus, daß das Gebiet, in dem die Nachricht verbreitet werden soll, bekannt ist. Soll jedoch der Informationsbedarf der anderen Netzteilnehmer befriedigt werden, so müßte der Sender die Informationsbedarfe der anderen Teilnehmer kennen, bevor er ein geeignetes Verbreitungsgebiet bestimmen kann. In einem hochdynamischen Netz ist

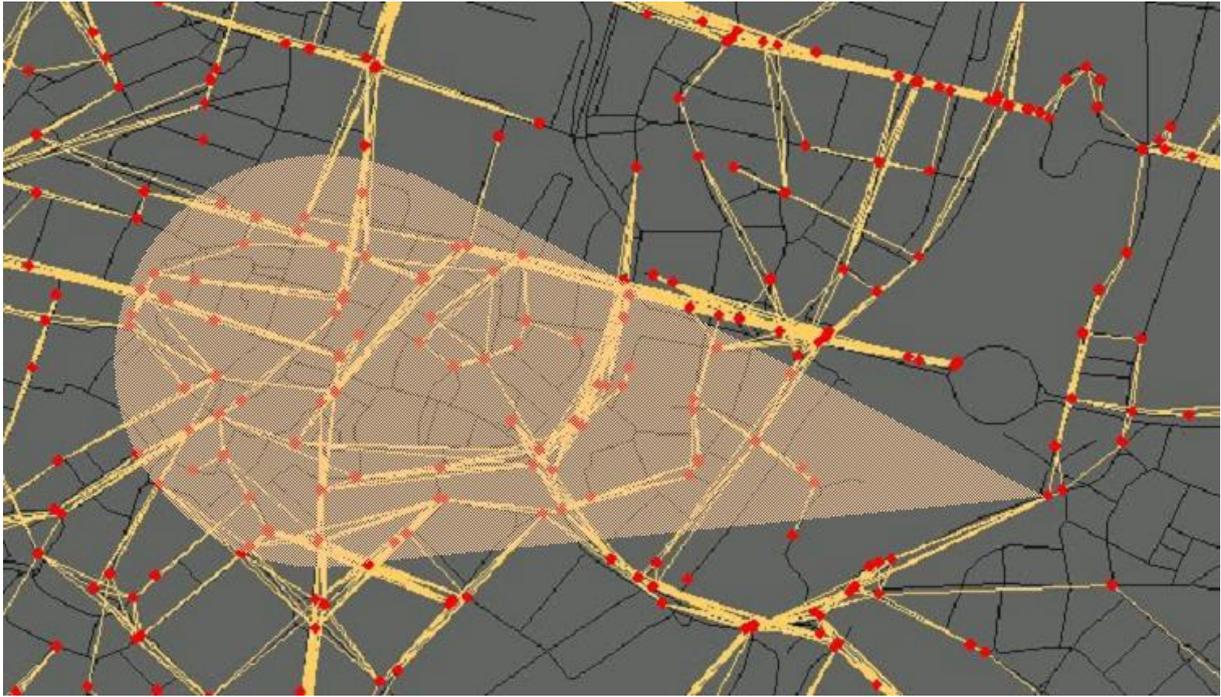


Abbildung 3.3: Problem einer Weiterleitungszone in VANETS

dies jedoch schlecht möglich. Beim situationsbasierten Verfahren von CARISMA ergibt sich das Verbreitungsgebiet während des Nachrichtenversandes im Gegensatz zu den existierenden Geocast Verfahren deshalb implizit und adaptiv aus dem situationsabhängigen Interesse der Empfängerknoten. Dadurch wird auch automatisch das oben geschilderte Problem der Geocast Zonen gelöst, denn die Informationsverbreitung erfolgt entlang des Straßennetzes.

Zhou and Singh stellen in [210] einen Informationsverbreitungsmechanismus vor, der dem CARISMA Verfahren relativ nahe kommt. Ihr *Time-Space Multicast* dient der Information militärischer Einheiten über Gefahren auf einem Schlachtfeld. Sie entwickeln dabei kein allgemeines Modell, sondern ein Verfahren für ein spezielles Szenario. In diesem Szenario werden auf einem Schlachtfeld Informationen über Bedrohungen verteilt. An dieser Information sind immer jene Knoten interessiert, die von der Bedrohung direkt aktuell oder in naher Zukunft betroffen sind. Dies hängt von ihrer Position und Bewegungsrichtung ab. In dem System werden Nachrichten bis zu einer bestimmten Entfernung in eine Richtung weitergeleitet.

3.2 Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation

3.2.1 DSRC: Dedicated Short Range Communication

Der Einsatz kurzreichweitiger mobiler Kommunikation im Bereich der Verkehrstelematik wird unter dem Begriff *Dedicated Short Range Communication* (DSRC) seit einigen Jahren erforscht. Die *Federal Communications Commission* (FCC)¹ definiert DSRC als

“*the use of non-voice radio techniques to transfer data over short distances.*”²

- *Between roadside and mobile radio units*
- *Between mobile units*
- *Between portable and mobile units*

to perform operations related to the improvement of traffic flow, traffic safety and other intelligent transportation service applications in a variety of public and commercial applications.”

Einsatzmöglichkeiten von DSRC, sowohl Fahrzeug-zu-Fahrzeug als auch Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, wurden und werden in folgenden größeren Rahmenprojekten untersucht:

- In den USA: PATH³, ADVANCE⁴ und GuideStar⁵
- In Europa: DRIVE (Dedicated Road In-VEhicle safety) [196], PROMETHEUS [46, 25], IVHW (Inter-Vehicle Hazard Warning) [38], CHAUFFEUR [177] und INVENT⁶
- In Japan: RACS (Road/Automobile Communication System) [186], AMTICS (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System) [192] und VICS⁷ (Vehicle Information and Communication System)

Der Fokus lag in diesen Projekten in der Vergangenheit auf der Steuerung von Fahrzeugfunktionen (automatisches Fahren, Kollisionsvermeidung). Für die Untersuchung des Einsatzes zur Automatisierung des Verkehrs auf besonderen Autobahnspuren⁸ [187, 67, 150, 204], zur Vermeidung von Kollisionen an Kreuzungen [141] und zur Verhinderung von Auffahrunfällen [142, 8] wurden Prototypen aufgebaut. Der einzige reale Anwendungsbereich von DSRC ist jedoch bislang die elektronische Erhebung von Straßennutzungsgebühren. In Singapur ist bspw. ein dort *Electronic*

¹Im Dokument zur Allokation des Spektrums 5.85-5.925 GHz für DSRC Anwendungen: ET Docket No. 98-95, RM-9096.

²*Short Range* wird näher spezifiziert als eine Entfernung zwischen 100m und 1000m.

³<http://www.path.berkeley.edu>

⁴<http://ais.its-program.anl.gov/advance>

⁵<http://www.dot.state.mn.us/guidestar>

⁶<http://www.invent-online.de>

⁷<http://www.vics.or.jp>

⁸im Englischen als *Platooning* bzw. *Automated Highways* bezeichnet.

Road Pricing (ERP⁹) genanntes System in Betrieb (siehe Abb. 3.4) [139]. Daß keines der anderen Systeme bislang im realen Straßenverkehr zu finden ist, liegt zum einen an den sehr hohen Anforderungen hinsichtlich Robustheit und Realzeitfähigkeit der drahtlosen Datenübertragung für diese Szenarien und zum anderen an der notwendigen kritischen Masse von Fahrzeugen, die mit einem solchen System ausgestattet sein müssen, damit es funktioniert.



Abbildung 3.4: Einsatz von DSRC zur automatisierten Erhebung von Straßengebühren.

Während das CARISMA System nach obiger Definition auch unter den Begriff DSRC fällt, so ist die Zielsetzung hierbei eine ganz andere. Es geht um die Übertragung von Daten, die der Information des Fahrers dienen und ggfs. zur besseren Parametrierung der Fahrregelsysteme eingesetzt werden können, jedoch nicht zu automatisiertem Fahren. Die Anforderungen an das Funknetz liegen somit auf Seiten höherer Datenraten und der Möglichkeit des Weiterreichens von Daten, weniger auf Seiten der Zuverlässigkeit und der Einhaltung enger Zeitschranken. Mit den drahtlosen lokalen Netztechnologien nach dem IEEE 802.11 Standard sind seit wenigen Jahren Mobilfunktechnologien mit hoher Datenrate verfügbar. Daß sie sich für den Einsatz zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation eignen, wird in Kapitel 5.1 nachgewiesen. Für die Einhaltung enger Zeitschranken sind sie jedoch nicht ausgelegt. Dies ist für die CARISMA Anwendungen aber nicht kritisch. CARISMA unterscheidet sich somit grundlegend von bisherigen Systemen, bei denen keine Routingverfahren eingesetzt wurden und die speziell für bestimmte Anwendungen aus dem Bereich der Längs- und Querregelung des Fahrzeugs bzw. für automatisierte Mautsysteme ausgelegt waren. Tabelle 3.1 macht den Unterschied der bislang vorrangig betrachteten Systeme und dem in der vorliegenden Arbeit vorgestellten System offensichtlich.

Reine Informationsanwendungen über einen einzelnen Hop können in Zukunft im Fahrzeug beispielsweise an Hot Spots einfach realisiert werden. Sie spielten bislang im Fahrzeugumfeld wissenschaftlich eine geringe Rolle. Aktuell wird aber ein fahrzeugspezifisches Anwendungsszenario im

⁹http://www.lta.gov.sg/motoring_matters/index_motoring_erp.htm

	Single-Hop	Multi-Hop
Fahrzeugs-längs- und -querregelung, Maut	Schwerpunkt existierender Arbeiten	bislang geringe Rolle
Reine Informationsnetze	bislang geringe Rolle	Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit

Tabelle 3.1: Klassifikation der DSRC Forschung

EU Projekt *Preventive Safety* mit einem Warnsystem bei Mißachtung roter Lichtsignale untersucht. Hierbei werden Lichtsignalinformationen direkt drahtlos ohne Zwischenhops ins Fahrzeug übertragen. Fahrzeugs-längsregelung basierend auf Multihop Fahrzeugkommunikation wird gegenwärtig in Deutschland im Projekt *Invent Verkehrsleistungsassistentz* untersucht. Ziel ist es hier, eine große Zeitlücke des radarbasierten Abstandshaltesystems ACC (Active Cruise Control) vor einem Stau-bereich und eine kleine Zeitlücke bei der Ausfahrt aus dem Stau automatisiert einzustellen.¹⁰

3.2.2 Multi-Hop Kommunikation

Einige wenige aktuelle Arbeiten im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation adressieren auch die Multi-Hop Kommunikation zwischen Automobilen. Zu nennen sind hier die Arbeiten von Briesemeister et al. [28, 30, 29], auf dem Grid Routing Protokoll [128] aufsetzende Untersuchungen [145], sowie die Projekte Fleetnet [74, 63, 44], CarTalk¹¹, Safenet¹² und Softnet [13], in dessen Rahmen Teile von CARISMA entstanden sind.

Briesemeister et al. betrachten in [29] die Inter-Fahrzeug-Kommunikation zur Detektion von Staus auf Autobahnen. In [28] stellen sie eine implizite Adressierung von Fahrzeugen für den Anwendungsfall der Gefahrenwarnung auf Autobahnen vor. Sie nutzen ein eindimensionales Mobilitätsmodell für das Verhalten der Fahrzeuge auf der Autobahn und beachten den Einfluß von Mobilitätsmustern auf das Kommunikationsverhalten. Sie schlagen einen Nachbarschaftsdienst vor, so daß Fahrzeuge Nachrichten zwischenspeichern und einige Zeit später weiterleiten können, sobald neue Knoten in ihre Reichweite eintreten. Sie simulieren das Systemverhalten mit variierendem Ausstattungsgrad¹³ bei konstanten Annahmen zu Verkehrsdichte und Fahrzeuggeschwindigkeit. Briesemeister et al. simulieren auch die Verbreitung von Unfallwarnnachrichten auf Autobahnen [30]. Sie betrachten eine Autobahn mit gerader Fahrspur auf 10 km Länge. Die Verbreitung wird auf maximal 20 Hops begrenzt. Über eine Simulation wird ermittelt, wieviel Prozent der Teilnehmer in welcher Zeit die Nachricht erhalten, in Abhängigkeit des Anteils der ausgerüsteten Fahrzeuge. Das System von Briesemeister et al. ist also speziell für den Einsatz auf Autobahnen zur Kommunikation von Nachrichten eines ganz bestimmten Typs ausgelegt. CARISMA verfolgt demgegenüber einen allgemeineren Ansatz.

¹⁰Der Autor ist an beiden aktuellen Projekten aktiv beteiligt.

¹¹<http://www.cartalk2000.net>

¹²<http://eewww.eng.ohio-state.edu/citr/safenet/>

¹³Mit dem Begriff Ausstattungsgrad sei die Menge der am Ad-hoc Netz teilnehmenden Fahrzeuge im Verhältnis zur Gesamtmenge der Fahrzeuge bezeichnet.

Das *Fleetnet* Projekt [63] beschäftigt sich neben der Entwicklung geeigneter Medienzugriffsmechanismen für VANETS auf Basis der UMTS Technologie hauptsächlich mit Routingverfahren für VANETS [74], während CARISMA auf ein Gesamtsystem zum situationsbezogenen Informationsaustausch ausgerichtet ist. Das Fleetnet Routing wurde für Autobahnscenarien entwickelt, während das CARISMA Routing mit Blick auf allgemeine Straßentopologien entworfen wurde und im Unterschied zum Fleetnet Routing Informationen einer digitalen Straßenkarte nutzt.

Die existierenden Arbeiten beziehen sich also auf spezielle Anwendungen und einfache Topologien entlang von Autobahnen. Darüber hinausgehend sind Architekturen, Protokolle und Algorithmen für den Einsatz von Multi-Hop Netzen im Automobilbereich bislang nicht erforscht.

3.3 Informationsaustausch und -verbreitung

Die im Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Verfahren zum Routing in Ad-hoc Netzen übertragen das klassische Kommunikationsschichtenmodell aus dem Festnetzbereich in den Bereich der mobilen selbstorganisierenden Netze. Da bei CARISMA die Kommunikation von Situationsaspekten und Informationsinhalten abhängt, ist eine vollständige Trennung des Routings vom Inhalt der Datenpakete und von der Situation der Teilnehmer nicht möglich. Es gibt eine Reihe weiterer Konzepte, die in ähnlicher Weise den Inhalt von Nachrichten bei ihrer Zustellung mit berücksichtigen oder den Zustand der Teilnehmer in Routingentscheidungen einbeziehen. Diese Konzepte werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt. Basierend auf nachrichtenbasierter Kommunikation (Abschnitt 3.3.1) vermitteln *Publish/Subscribe* Systeme Nachrichten im Festnetz inhaltsbasiert (Abschnitt 3.3.2). In Sensornetzen (Abschnitt 3.3.3) ist die Kommunikation mit dem Inhalt ebenfalls oft gekoppelt. Epidemische Algorithmen (Abschnitt 3.3.4) beziehen den Zustand der Netzteilnehmer in die Routingentscheidung mit ein. Schließlich nutzen *Hoarding* Verfahren Situationsinformation zum aktiven vorausschauenden Herunterladen von Informationen von lokalen Informationsstationen (Abschnitt 3.3.5).

3.3.1 Nachrichtenbasierte Kommunikation und Messaging Systeme

Zur Informationsverbreitung werden klassischerweise nachrichtenbasierte Systeme eingesetzt. Im Gegensatz zum Client-Server Modell, für das synchrone Punkt-zu-Punkt Kommunikation charakteristisch ist, unterstützen nachrichtenbasierte Systeme *persistente asynchrone* Punkt-zu-Mehrpunkt Kommunikation. Wird diese Form der Kommunikation in verteilten Systemen genutzt, so spricht man auch von *lose gekoppelten* Systemen. Sogenannte *Message-Oriented Middleware* (MOM) unterstützt persistente asynchrone Kommunikation. Benachrichtigungsdienste sind in verschiedenen Middlewareplattformen (CORBA (CORBA Notification Service) [151], J2EE (Jini Distributed Event Specification [81]), Java Messaging Service [143]) integriert. Bacon et al. beschreiben Ereignisse als wesentliches Element verteilter Applikationen [9]. Eine Taxonomie verteilter ereignisbasierter Systeme stellen Meier und Cahill auf [138].

Der Versand von Nachrichten ist bei CARISMA ein wichtiges Element des Informationsaustausches. Während in Festnetzen ausgezeichnete Server eine Nachricht puffern, so daß es zur Nachrichtenübermittlung nicht notwendig ist, daß Sender und Empfänger zu einem Zeitpunkt beide

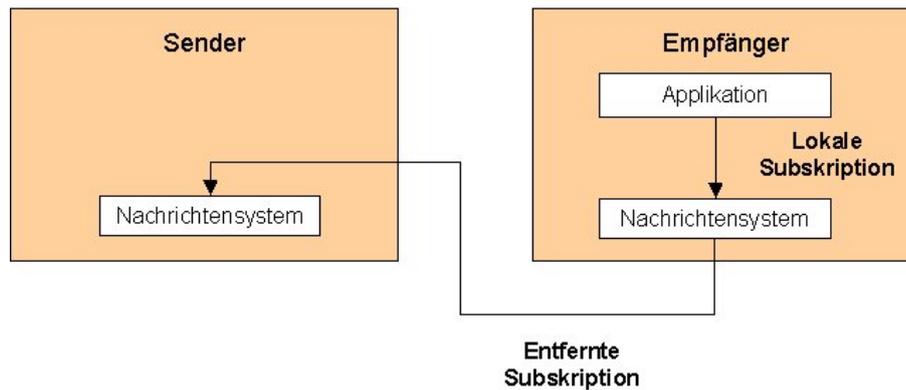


Abbildung 3.5: Publish/Subscribe Systeme

aktiv sein müssen, existieren solche Server in reinen Ad-hoc Netzen nicht. Bei CARISMA übernehmen entsprechend andere Teilnehmer die Aufgabe des Pufferns. Das Puffern entkoppelt Sender und Empfänger in diesem Fall nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich, d.h. es ist nicht notwendig, daß zum Zeitpunkt des Nachrichtenversandes eine Route zwischen Sender und Empfänger existiert.

Der entscheidende Unterschied zu existierenden nachrichtenbasierten Systemen besteht bei CARISMA darin, daß hier Nachrichten einen expliziten Orts- und Zeitbezug besitzen und die Zustellung der Nachrichten an einzelne Teilnehmer von deren situationsbedingtem Interesse, insbesondere ihrem Aufenthaltsort, abhängt.

3.3.2 Publish/Subscribe Systeme

Nachrichten interessenbasiert zu verbreiten ist auch das Ziel sogenannter *Publish/Subscribe* Systeme. Dabei geben Teilnehmer Nachrichtenservern ihr Interesse an bestimmten Nachrichten als Subskriptionen in Form logischer Filterausdrücke a priori bekannt. Das Interesse an einer Nachricht wird eindeutig bestimmt durch die Auswertung der Subskriptionen. Eine Sprache zur Filterdefinition wird von Mansouri und Sloman [135] vorgestellt. Das Nachrichtensystem verbirgt dabei die physikalische Identität des Nachrichtenservers. Dies ist in Abb. 3.5 zu sehen. Applikationen melden sich lokal für den Empfang von Nachrichten an. Das Nachrichtensystem gibt diese Subskriptionen an den Nachrichtenserver in Form einer entfernten Subskription weiter. Basierend auf diesen Subskriptionen werden für jede beim Nachrichtenserver bzw. Sender generierte Nachricht die Menge der Empfänger bestimmt.

In Abhängigkeit der Addition zusätzlicher, eine Nachricht näher beschreibender Metainformationen und des inhaltlichen Bereichs, auf den sich der Filter bezieht, unterscheidet man kanal-, subjekt- und inhaltsbezogene Systeme.

- Bei *kanalbasierten Verfahren* werden basierend auf Kategorisierungen von Nachrichten Nachrichtenkanäle gebildet. Interessenten melden sich an einem Kanal an und empfangen alle an diesen Kanal gesendeten Nachrichten. Afonso und Silva beschreiben mit *Ubidata* [5] eine

Architektur zum kanalbasierten aktiven Senden von Daten an mobile Nutzer, die sich vorher für diese Informationen angemeldet haben. Ein weiteres kanalbasiertes System ist *iBus* [134].

- Bei *subjektbasierten Verfahren* erfolgt die Interessensauswertung durch einen prädikatenlogischen Ausdruck des potentiellen Empfängers, dessen Gültigkeit über den Attributwerten eines speziellen Nachrichtenkopfes ausgewertet wird. Beispiele für subjektbasierte Systeme sind JEDI [45] und TIB/Rendezvous¹⁴.
- Bei *inhaltsbasierten Nachrichtendiensten* (engl. Content-based Messaging) erfolgt die Filterung über den kompletten Nachrichteninhalte (siehe z.B. [35]). Nachrichteninhalte werden bei diesen Systemen der Netzwerktransportschicht verfügbar gemacht, um basierend auf dem Inhalt routen zu können. Dadurch wird es möglich, daß Produzenten Nachrichten generieren, deren Empfänger ihnen nicht bekannt sind. Umgekehrt drücken Konsumenten ihr Interesse an Nachrichten mittels Prädikaten aus, unabhängig davon, woher und von wem die Nachrichten stammen. Zu inhaltsbasierten Nachrichtendiensten zählen Siena [34], Elvin [179], Gryphon [11] und Keryx [201].

Die Nachrichtenverbreitung bei CARISMA unterscheidet sich von diesen Systemen dadurch, daß sie in Ad-hoc Netzen arbeitet und die jeweilige Situation der Teilnehmer bei der Bestimmung der Nachrichtenadressaten mit einbezieht. Die Mobilität ist eine wichtige Ursache dafür, daß Teilnehmer sich in verschiedenen Situationen befinden. Dadurch lassen sich im Gegensatz zum Festnetz keine Routen im Voraus berechnen. Bei CARISMA gibt es keine ausgezeichneten Server, bei denen sich ein Knoten a priori für die Benachrichtigung eines zu erwartenden Ereignisses anmelden könnte. Stattdessen können die Interessenten erst bei Auftreten der Nachricht bestimmt werden. Aus diesem Grund erfolgt die Anmeldung nur lokal in jedem Knoten. Die Verbreitung der Nachrichten ist bei CARISMA eine Mischung aus subjekt- und inhaltsbasiertem Verfahren. Die Nachrichtenköpfe erhalten spezielle Attribute, auf die die Netzwerktransportschicht zugreifen kann. Lokale Subskriptionen basieren zusätzlich zu Filtern und Mustern, die sich aus Nutzerprofilen und -interessen ergeben, auch auf situationsbezogenen Regeln, die auf die Attribute angewandt werden. Falls die Information einer Nachricht nicht ausreicht, sie noch keine Nachricht erhalten haben oder die letzte Nachricht zu lange zurück liegt, generieren die Teilnehmer bei CARISMA autonom ergänzend zusätzliche Anfragen nach Informationen.

Tabelle 3.2 stellt die Eigenschaften des CARISMA Systems anderen nachrichtenbasierten Systemen gegenüber. Gegenüber Publish/Subscribe Systemen, die für's Festnetz entwickelt wurden, operiert CARISMA in einem Ad-hoc Netz. Der Nachrichtenversand ist beim Multicast getrieben von einem Quellknoten, bei Publish/Subscribe Systemen von Informationen basierend auf Teilnehmerinteressenden Empfängern, die ihr Interesse an einer Nachricht vorher bekannt geben, und bei CARISMA abhängig von dem Informationen zugerechneten Nutzen sowohl von Sendern als auch Empfängern. Nachrichten werden bei Multicast beliebig vom Sender verschickt. Bei Publish/Subscribe Systemen hängt der Versand von den Filterbedingungen der Subskriptionen interessierter Teilnehmer ab. Bei CARISMA sind Situationen die Auslöser für den Versand von Nachrichten. Die Adressierung erfolgt implizit und das Routing hängt ebenfalls von den Situationen

¹⁴Tibco Software: http://www.tibco.com/software/enterprise_backbone/rendezvous.jsp

der Teilnehmer ab. Weiterleitende Knoten werden on demand bestimmt, während bei Multicasting und Publish/Subscribe Systemen die Nachrichtenverbreitungskanäle bereits vorab in den Routern aufgebaut werden, da die Empfängermengen relativ stabil bleiben.

System	Netz	Treiber	Versandbedingung	Adressierung	Routing
Multicast	n. spez.	Sender Push	beliebig	explizit	tabellenbasiert pre demand
Publish/Subscribe	n.spez. i.d.R. fest	Empfänger Pull	Subskriptionsfilter	implizit	inhaltsbasiert pre demand
CARISMA	Ad-hoc	Sender und Empfänger Push & Pull	situationsbezogen	implizit	situationsbasiert on demand geographisch

Tabelle 3.2: Charakteristika und Einordnung des situativen CARISMA Nachrichtensystems

3.3.3 Sensornetze

Mit der Problematik der Informationsverbreitung hat man sich auch bei der Untersuchung drahtloser Sensornetzwerke auseinandergesetzt [82, 120]. Sensoren kommunizieren in diesen Systemen neue Beobachtungen mit anderen Sensoren. Diese neuen Beobachtungen werden aktiv bekanntgegeben. Die betrachteten Sensornetze sind dabei in der Regel statisch, fast sicher zusammenhängend und die ausgetauschten Informationen geringen Umfangs. Zur Verteilung der Information gibt es verschiedene Verfahren. Von Kulik et al. wird vorgeschlagen [120], vor den eigentlichen Daten eine Meta-Datenbeschreibung zu versenden. Darauf basierend können Interessenten die eigentlichen Daten nachfragen. Auf diese Weise soll die Netzwerkbelastung minimiert werden. Details des Verfahrens werden leider nicht beschrieben, beispielsweise, ob es einen *Timeout* beim Warten auf Interessenten gibt, wie dieser sinnvoll gewählt werden kann und ob es Situationen gibt, in denen diese Verzögerung zu negativen Effekten führt.

Intanagonwiwat et al. beschreiben ein Sensornetz mit Interessenten für Informationen, die in Form einer Menge von Attribut-Wert Paaren bestimmt werden [82]. Das Interesse wird in dieser Form von den Interessenten den Nachbarknoten mitgeteilt und im Netz verteilt. Wenn ein Sensor eine Information erzeugt, die dem Interesse eines anderen Knotens entspricht, so wird die Information zu diesem Knoten geroutet. Dieses Verfahren entspricht weitgehend der Vorgehensweise subjektbasierter Publish/Subscribe Systeme im Festnetz. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß potentiell alle Sensoren die Rolle des Nachrichtenservers übernehmen. Das CARISMA System unterscheidet sich von den beschriebenen Sensornetzen neben der hohen Mobilität und fast sicher auftretender Fragmentierung insbesondere auch dahingehend, daß das Interesse an Nachrichten des einzelnen Teilnehmers situationsabhängig ist, d.h. bei bislang untersuchten Sensornetzen ist nur die Nachrichtengenerierung dynamisch, bei CARISMA sind es auch die Netztopologie und das Interesse der Teilnehmer.

3.3.4 Epidemische Algorithmen

Epidemische Algorithmen [51] beschreiben die Verbreitung von Daten in einem Netzwerk durch lokale Interaktion. Dabei wird eine Nachricht, evtl. in einer modifizierten Form, von einem Knoten auf der Basis einer lokalen Entscheidungsprozedur oder Zufallsfunktion weitergeleitet. Vahdat und Becker untersuchen in [194] ein epidemisches Verfahren zur Zustellung von Datenpaketen in fragmentierten Netzen an einen bestimmten Empfängerknoten. Gossiping Verfahren [75] sind eine mögliche Ausprägung epidemischer Algorithmen. Sie verfolgen das Ziel, neue Informationen schnell in einem Netzwerk zu verbreiten. Daten werden dabei immer an einen regelbasiert oder zufällig ausgewählten Nachbarknoten (nicht alle) versendet. Bei *uniformen* Gossip-Verfahren wird der Nachbar unabhängig und gleichverteilt zufällig ausgewählt (auch als zufälliger Telefonanruf (*random phone call*) oder Gerüchteverbreitung (*rumor spreading*) bekannt). Bei *räumlichen* Gossip-Verfahren [96] ist die Wahrscheinlichkeit abhängig von der Entfernung. Gossip-Verfahren betrachten nicht die Broadcast-Eigenschaft drahtloser Netze und sind daher nicht einfach auf mobile Ad-hoc Netze übertragbar. Verfahren zur Vermeidung von Redundanz beim Fluten in Ad-hoc Netzen können als epidemische Verfahren begriffen werden, da die Knoten hier lokal entscheiden, ob sie Daten weiterleiten. Die Informationsverbreitung bei CARISMA erfolgt nach diesem Verständnis epidemisch, da basierend auf lokalen Entscheidungen die Verbreitung von Nachrichten geregelt wird.

3.3.5 Hoarding

Während bei vielen nachrichtenbasierten Systemen eine eintreffende Nachricht vom Nachrichtensystem sofort an die Anwendung weitergegeben wird und häufig in sich inhaltlich abgeschlossen ist, so ist eine Nachricht bei CARISMA unter Umständen nur eine Ergänzung oder Änderung einer bestehenden Informationsbasis. Diese Information kann sofort an die Anwendung weitergegeben werden, sie kann aber auch bis zum Abruf zwischengespeichert werden.

Es gibt einige Arbeiten, die sich dem Problem der vorausschauenden Datenbeschaffung unter dem Begriff des *Hoarding* widmen [207, 117, 118, 119]. Beim Hoarding werden voraussichtlich benötigte Daten nicht von anderen Teilnehmern, sondern von sogenannten Infostationen automatisch im Hintergrund auf mobile Geräte übertragen, solange eine direkte Kommunikationsverbindung besteht. Wie bei CARISMA handelt es sich in der Regel um ortsbezogene Daten. Quasi als Vorläufer solcher Systeme kann das CODA Dateisystem betrachtet werden [172], das verbindungsloses Arbeiten in mobilen Umgebungen unterstützt. Bei CODA kommen sogenannte *Prefetching* Mechanismen zum Einsatz. Im Gegensatz zu CARISMA basiert Prefetching in CODA auf inhalts-, situations- und nutzerunabhängigen Parametern und bezieht sich auf Dateien, nicht auf Informationsobjekte.

Das Projekt 7DS (Seven Degrees of Separation) [153, 154, 155] geht einen Schritt weiter und tauscht die Daten, die mobile Teilnehmer von lokalen Internet-Zugangsknoten bezogen haben, mit anderen Teilnehmern aus. Es wird vorausgesetzt, daß alle Teilnehmer Interesse an den Daten haben und es initial genau eine mobile Datenquelle gibt. Zusätzliche Informationen (Positionen, Weeginformation etc.) werden nicht genutzt. Bei 7DS werden Bewegungsmodelle für Fußgänger, im speziellen in einem U-Bahn und einem Innenstadtszenario zugrunde gelegt. Mittels Simulation

wird der Teilnehmeranteil untersucht, der am Ende eines Trips einen bestimmten Datensatz empfangen hat und die durchschnittliche Wartezeit eines Teilnehmers auf Daten. Zugrundegelegt wird ein Modell, in dem die Teilnehmer sowohl zyklisch Anfragen nach Daten stellen als auch aktiv ihren Cache-Index einer Multicast Adresse bekannt machen. Agenten können antizipativ Information basierend auf vermuteten Informationsbedürfnissen besorgen und entsprechende Anfragen generieren. Dabei wird der Informationscache anderer Knoten in der Umgebung nach der Information durchsucht, falls keine Internetverbindung besteht. Simuliert wurden relativ kleine Netze mit bis zu 50 Teilnehmern. Betrachtet werden nicht von Sensoren erfaßte Daten oder Ereignisse, sondern der Zugriff auf Internet-Seiten. Datenobjekte werden mittels URLs identifiziert und mittels einer attributbasierten Anfrage in Form einer XML Struktur angefragt. Es wird vorausgesetzt, daß Applikationskomponenten ihren Informationsbedarf dem System mitteilen. Die Arbeiten im Rahmen von 7DS sind damit dem CARISMA System sehr ähnlich. In beiden Fällen werden Daten auf Vorrat gespeichert. Sie werden jeweils sowohl automatisch verbreitet als auch individuell nachgefragt. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Art des Netzes, kleine Fußgängernetze bei 7DS und deutlich größere Fahrzeugnetze bei CARISMA. Darüber hinaus werden die Datensätze bei CARISMA nicht einfach im ganzen Netz verteilt. Welche Information ein Teilnehmer speichert ergibt sich aus seinem situationsabhängigen Interesse. Dabei spielen Orts- und Zeitaspekte eine Rolle und daran adaptiert sich auch der Informationsaustausch.

Kapitel 4

Die CARISMA Systemarchitektur

”The state of the art of Software Architecture is like teenage sex: it’s on everybody’s mind all the time, everyone talks about it all the time (but they don’t really know what they are talking about), everyone thinks everyone else is doing it, the few that are doing it: (a) are doing it poorly, (b) think it will be better next time, and (c) are not practising it safely.”

— Ron Crocker¹

4.1 Anforderungen an die Architektur

4.1.1 Anwendungsfälle

In der Einleitung wurde die Realisierung qualitativ hochwertiger, schneller und kostengünstiger Fahrerinformationssysteme als Ziel des CARISMA Systems genannt. In erster Linie ist für den Autofahrer wichtig, schnell und sicher an sein Reiseziel zu gelangen. Notwendig sind dazu Informationen über die Verkehrslage, die Parkraumsituation und konkrete Gefahren. Darüber hinausgehend sind Informationen bspw. über Baustellen, Witterungsbedingungen, sich nähernde Rettungsfahrzeuge oder Zustände und Schaltzeiten von Lichtsignalanlagen hilfreich. In Abbildung 4.1 sind einige Anwendungen in einem Stadtszenario dargestellt. Das Szenario bei den Ziffern 1 und 2 entspricht dem Szenario von Abbildung 1.3 aus der Einleitung. Bei Ziffer 3 sendet ein Rettungsfahrzeug eine Warnmeldung aus, die seine Position und geplante Route beinhaltet. Die Fahrer der Fahrzeuge auf der Route bekommen einen akustischen Warnhinweis über das sich nähernde Rettungsfahrzeug sowie die Richtung, aus der es sich nähert. Zusätzlich schaltet die Lichtsignalanlage die Strecke frei. Links oben informiert das Fahrzeug bei Ziffer 4 die anderen Verkehrsteilnehmer, daß es einen Parkplatz freigibt. Bei Ziffer 5 wird eine Nachricht an einem lokalen Zugangsknoten ins Festnetz versendet.

Gemeinsam ist den Verkehrsinformationsszenarien, daß sie sich auf reale Zustände oder Ereignisse beziehen. Sie besitzen einen räumlichen Bezug (Ort und Länge des Staus, Position der Gefahrenstelle, Position des Parkplatzes) und einen zeitlichen Bezug (Beobachtungszeitpunkt des Staus, der Gefahrensituation oder des freien Parkplatzes). Da diese Informationen für alle Autofahrer grundsätzlich relevant sind, entscheidet über das Interesse des einzelnen Autofahrers an einer Information allein deren räumlicher und zeitlicher Bezug im Verhältnis zur Situation des Fahrers.

¹Intern. Software Engineering Conference, April 28, 1995.

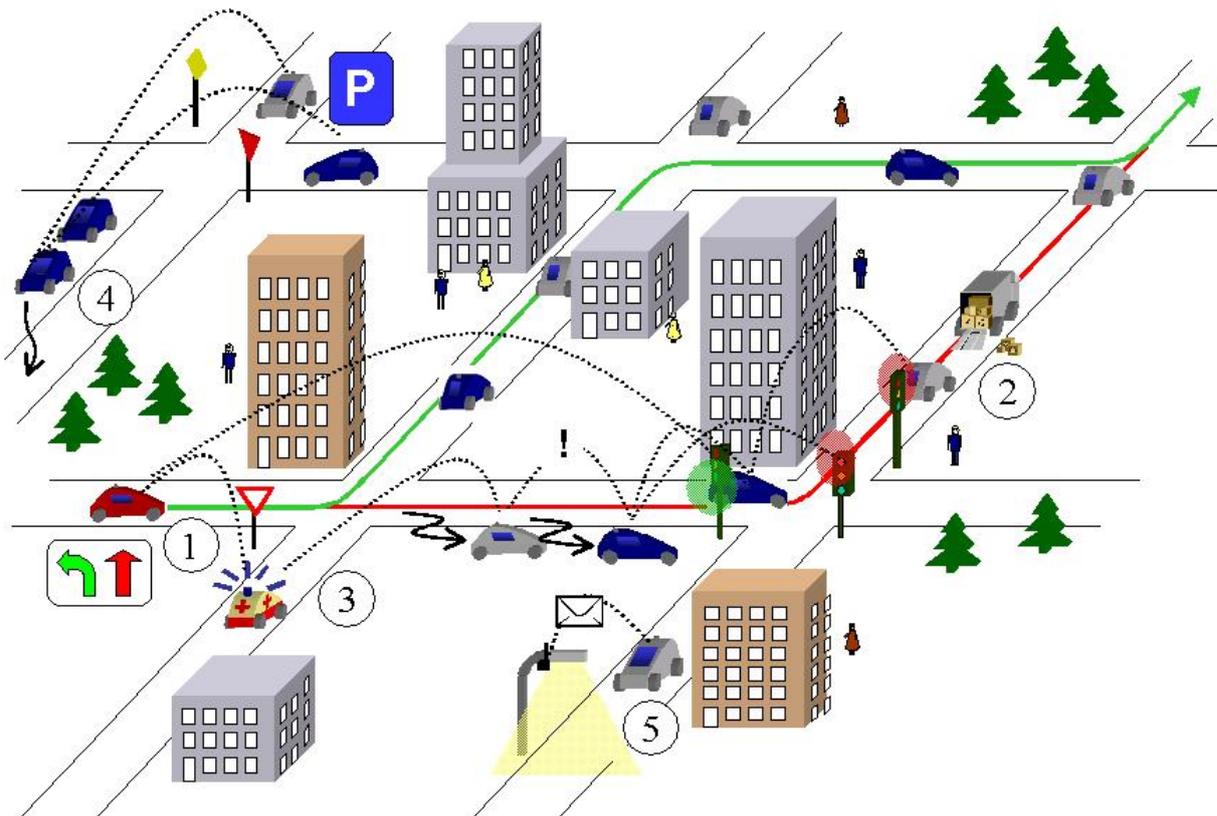


Abbildung 4.1: Anwendungsszenarien in der Stadt

Abhängig von der Entfernung wird die Information außerdem häufig in zunehmendem Abstraktionsgrad benötigt. In weiterer Entfernung ist es beispielsweise relevant zu wissen, ob in Parkhäusern in der Innenstadt noch Parkplätze verfügbar sind, um ggfs. rechtzeitig auf Park+Ride Parkplätze umzusteigen. Bei der direkten Parkplatzsuche kann dann die Information über einen konkreten freien Parkplatz hilfreich sein.²

Die jeweilige Situation spielt auch eine Rolle für das Medienformat. Während der Fahrt wird der Fahrer mit Hilfe von graphischen Symbolen und Sprachausgabe über kritische Verkehrslagen informiert. Muß er an einer Lichtsignalanlage warten, so kann er in dieser Zeit z.B. Live-Verkehrslagebilder abrufen. Abbildung 4.2 zeigt die mögliche Darstellung der Verkehrslage im Bordmonitor beim Ampelstop, die eine präzisere Einschätzung des Verkehrsflusses ermöglicht. Sendet die Lichtsignalanlage ihre Schaltzeiten, so erhält der Fahrer zusätzlich im Bildschirm graphisch die Information über die Ampelphasen. Dieses Beispiel macht die Vorteile des in der vorliegenden Arbeit gewählten Ansatzes deutlich. Der Fahrer bekommt die ihn interessierende Information durch das situationsadaptive Verhalten mit nur geringer Systeminteraktion.

Um eine Information über einen Zustand oder ein Ereignis erhalten zu können, müssen Zustand oder Ereignis wahrgenommen und symbolisch repräsentiert worden sein. Die angesprochenen Verkehrsinformationen können dabei direkt von den Verkehrsteilnehmern erfaßt werden. Die Ver-

²Parkinformati- und -reservierungssysteme auf Basis von UMTS Kommunikation werden im Projekt CoPark untersucht [173].



Abbildung 4.2: Verkehrsinformation per Video bei Ampelstop

kehrslage läßt sich beispielsweise aus durchschnittlichen Reisedauern für streckenabschnitte ermitteln (Positionen und Geschwindigkeiten können von den Fahrzeugen gemessen werden). Straßenzustände (z.B. Aquaplaning oder Eis) werden von der Bordsensorik erkannt (indirekt durch den Schlupf der Räder oder direkt mittels Reibwertsensoren [157, 200]). Rettungsfahrzeuge können ihre Route bekanntgeben und Ampelanlagen ihre Schaltzeitpunkte. Auf freie Parkplätze kann über hochgenaue Karten, Positionierungstechniken und Abstandsmeßsensoren (z.B. Radarsysteme, wie sie heute schon zum automatischen Halten des Abstandes eingesetzt werden) geschlossen werden. Die Datenerfassung soll hier aber nicht weiter betrachtet werden. Zu diesen Fragestellungen sei auf Arbeiten aus dem Umfeld von (X)FCD (Extended Floating Car Data) hingewiesen (siehe Huber et al. [79]). Bei existierenden (X)FCD Systemen werden diese Informationen aber nicht durch ein Ad-hoc Netzwerk verteilt, sondern über zellulare Netze (GSM/SMS) an eine Zentrale gemeldet.

Neben diesen verkehrsbezogenen Informationen gibt es eine Reihe weiterer lokaler Informationen, deren Relevanz für den einzelnen nicht nur von seiner augenblicklichen Situation, sondern auch von persönlichen Interessen abhängt. Dazu zählen Stadt- oder Reiseführer, Veranstaltungskalender oder Lokalnachrichten. Diese Informationen werden nicht von den Verkehrsteilnehmern erfaßt. Sie können über lokale Infostationen an vorbeifahrende Fahrzeuge übertragen werden oder per digitalem Broadcast an alle verteilt werden. Fahrzeuge, die Informationen über Infostationen oder per Broadcast empfangen haben, können diese wiederum anderen zur Verfügung stellen.

Zusätzlich zu reinen Informationssystemen soll CARISMA auch aus dem Internet bekannte Anwendungen unterstützen, die sich in der Regel durch die Eigenschaften Verteilung und Kooperation auszeichnen [24, 175]. Dazu gehören Messaging (z.B. E-Mail, Voice-Mail), Kommunikationsdienste (Sprachverbindungen, Chats) und Entertainment Dienste (Netzwerkspiele im Stau). Ebenso soll es möglich sein, Verbindungen zu lokalen Zugangsknoten aufzubauen (Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation), um in Parkhäusern, an Tankstellen oder Waschstraßen elektronisch zu zahlen, lokalen Internetzugang zu erhalten, zuhause Musikdateien ins Fahrzeug zu überspielen,

oder beim Händler eine Diagnose der elektronischen Steuergeräte durchführen zu können (siehe Abbildung 4.3).

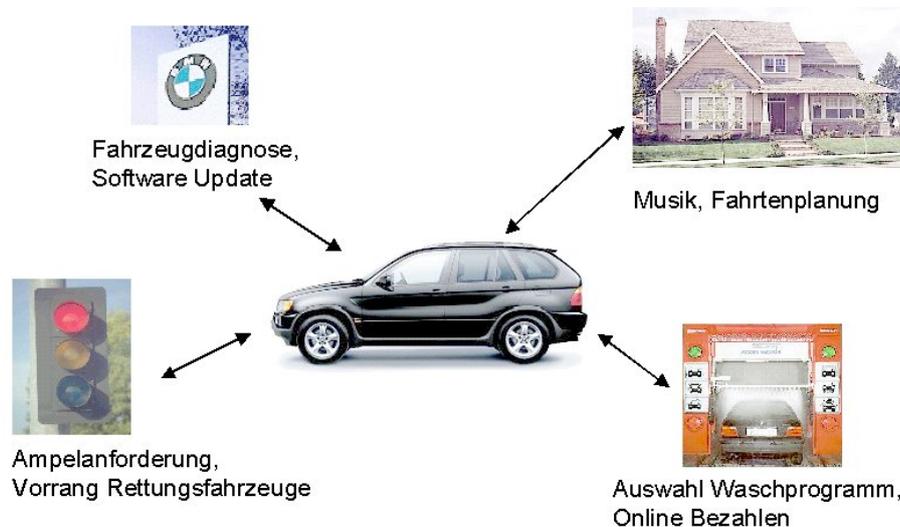


Abbildung 4.3: Kommunikation mit Infostationen und lokalen Zugangsknoten.

4.1.2 Anwendungsklassifikation und Anforderungen

Von Seiten der im vorangegangenen Paragraphen beschriebenen Anwendungen können Anforderungen an das VANET Kommunikationssystem abgeleitet werden. Dazu werden sie zu Klassen mit ähnlichen Anforderungen zusammengefaßt. Diese Klassen und ihre Anforderungen an das CARISMA Kommunikationssystem sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Sprachverbindungen und Netzwerke sind hier extra aufgeführt, da sie spezielle Anforderungen besitzen und sich keiner Klasse einfach zuordnen lassen.

Für die verschiedenen Anwendungsklassen ist es erforderlich, Daten entweder zwischen zwei Teilnehmern oder einer Gruppe von Teilnehmern zu übertragen. Dabei bestehen Anforderungen hinsichtlich der übertragbaren Datenmenge pro Zeiteinheit (Übertragungsrate), der Entfernung, die die Daten überbrücken müssen (Reichweite), dem notwendigen Grad ausgestatteter Fahrzeuge, der tolerierbaren zeitlichen Verzögerung, innerhalb derer die Datenpakete am Ziel ankommen müssen (Latenz) und der Zuverlässigkeit der Kommunikation. In einem VANET sind diese Anforderungen, neben der eingesetzten Funktechnik, vor allem direkt verknüpft mit der Dichte der Netzknoten, der Menge der Kommunikationswünsche der Netzknoten und der Entfernung der Kommunikationspartner. Denn nur, wenn genügend viele Netzknoten verfügbar sind, kann eine Nachricht schnell verbreitet oder ein Kommunikationspfad einer bestimmten Länge aufgebaut werden. Andererseits wächst mit zunehmender Teilnehmerzahl die Menge der Kommunikationswünsche, d.h. der zu übertragenden Daten. Aus den Ergebnissen der Analyse in Kapitel 5 läßt sich ablesen, wie viele Fahrzeuge ausgestattet sein müssen, um bestimmte Anwendungen realisieren zu können bzw. bei welchem Ausstattungsgrad sich welche Anwendung noch bis zu welcher Entfernung in guter Qualität betreiben läßt.

Anwendungsklasse	Übertragungsrate	Reichweite	Ausstattungsgrad	Latenz	Zuverlässigkeit
Fahrerinformation	mittel	mehrere km	gering	gering	hoch
Fahrzeugsteuerung	mittel	mehrere 100m	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Lokale Zugangsknoten	hoch	mehrere 100m	egal	gering	gering bis hoch
Sprachverbindung	hoch	unbegrenzt	hoch	hoch	mittel
Netzwerkspiele	mittel	mehrere km	hoch	mittel	mittel

Tabelle 4.1: Anforderungen verschiedener Anwendungsklassen

Systeme, die selbständig die Fahrzeuglängs- und -querregelung beeinflussen, beispielsweise Systeme zur Kollisionsvermeidung und zum automatisierten Fahren, werden zur Klasse der Anwendungen der Fahrzeugsteuerung zusammengefaßt. Sie besitzen besonders hohe Anforderungen an tolerierbare Paketlatenzzeiten und die Zuverlässigkeit des Kommunikationssystems (siehe auch Aoki und Fujii [7]). Viele Anwendungen in diesem Bereich benötigen darüber hinaus einen sehr hohen bis hundertprozentigen Ausstattungsgrad. Die notwendige Kommunikation kann jedoch vielfach auf die direkte Datenübertragung zwischen Nachbarn beschränkt bleiben. Sprachverbindungen und Netzwerkspiele besitzen eigene Charakteristika und sind deshalb keiner Klasse zugeordnet. Die Anwendungsklasse des lokalen Zugangsknoten ist sehr vielfältig und umfaßt sowohl Informations- und Musik-Download als auch drahtlose Bezahlvorgänge oder Diagnosezugriffe auf das Fahrzeug.

Anwendung	Reichweite	Latenz
Verkehrslageinformation	unmittelbare Umgebung bis viele km	wenige Sekunden bis Minuten
Gefahreninformation	mehrere 100m	wenige hundertstel bis einige Sekunden
Parkinformation	unmittelbare Umgebung bis wenige km	einige Sekunden

Tabelle 4.2: Anforderungen von Fahrerinformationsdiensten

Die Anwendungsklasse, für die CARISMA in erster Linie ausgelegt ist, sind Fahrerinformationssysteme, deren Anforderungen an Informationsaustauschreichweiten und Latenzzeiten deshalb in einer zweiten Tabelle 4.2 noch einmal einzeln aufgeführt sind. Diese beiden Anforderungen hängen meist voneinander ab, d.h. von je weiter entfernt eine Information stammt, desto geringer ist die Anforderung an ihre Aktualität und Detaillierung. Aus den Ergebnissen des Kapitels 5 läßt sich ermitteln, wie gut die Anforderungen der einzelnen Anwendungen bei bestimmten Verkehrsdichten und Ausstattungsgraden erfüllt werden können.

Tabelle 4.3 stellt dar, welche Funktionen und Komponenten hinsichtlich Kommunikation und kommunikationsbezogener Informationsverarbeitung für die verschiedenen Anwendungsklassen notwendig sind. Um eine Sprachverbindung zu einem bestimmten Teilnehmer aufzubauen, wird beispielsweise eine eindeutige Adressierung benötigt. Multihop Kommunikation bezeichnet das synchrone oder asynchrone Weiterleiten eines Datenpaketes an einen oder mehrere Empfangs-

Anwendungsklasse	Eindeutige Adresse	Multihop	Akzeptanzfilter	Informationsspeicher	TCP/IP	Datensicherheit
Fahrzeugsteuerung			X			X
Sprachverbindung	X	X			X	X
Netzwerkspiele	X	X			X	
Lokale Zugangsknoten	X		X	X	X	X
Fahrerinformation		X	X	X		X

Tabelle 4.3: Notwendige Komponenten zur Realisierung verschiedener Anwendungsklassen

knoten. Mit dem Akzeptanzfilter ist die lokale Nachrichtensubskription gemeint, mit deren Hilfe aus allen mitgehörten Informationen die lokal relevanten ausgefiltert werden. Inhaltsbasierte Informationsspeicherung ist notwendig, wenn Informationen an den Fahrer bzw. Nutzer zeitverzögert weitergegeben werden sollen. IP Unterstützung ist für bestimmte Anwendungen wie die Nutzung von E-Mail oder Webbrowsern notwendig.³ Die Sicherheit der übertragenen Daten muß fast immer gewährleistet werden.

Zusätzlich zu den reinen Kommunikationsanforderungen benötigen bestimmte Anwendungen weitere Netzwerk- bzw. Middlewarefunktionen. Zur Nutzung von Diensten an lokalen Zugangsknoten werden Service Discovery Funktionen benötigt. Abfragen von ortsbasierten Informationen erfordern entsprechende geographische Anfrage- und Adressierungsmöglichkeiten. Informationssysteme müssen in der Lage sein, Informationen direkt bei Nachbarknoten zu suchen. Für Netzwerkspiele ist es nötig, Spielpartner zu finden und dabei beispielsweise Interessen der Personen abzugleichen. Es bestehen also ähnliche Anforderungen wie bei mobilen Communities (zu mobilen Communities siehe Koch et al. [105]).

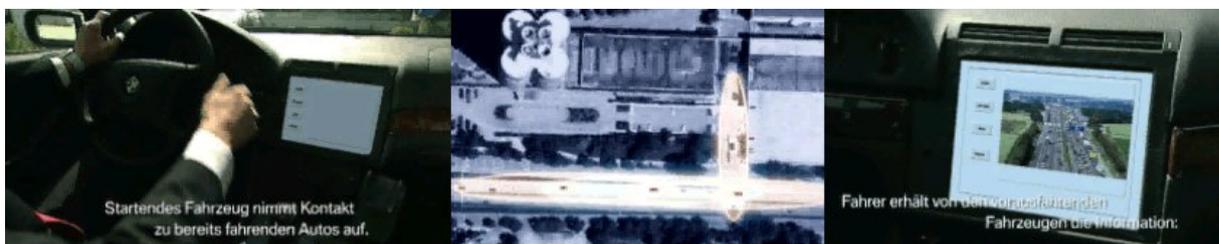


Abbildung 4.4: Informationsaustausch mit Fahrzeugen in der Nähe zu Fahrtbeginn.

Bereits zu Beginn der Fahrt benötigt der Fahrer bzw. das Navigationssystem zur Routenoptimierung erste Informationen über die Verkehrslage und mögliche Problemstellen auf der geplanten Strecke. Das Fahrzeug soll diese Informationen soweit möglich von benachbarten Fahrzeugen im VANET beziehen. Abbildung 4.4 stellt dies dar. Der Fahrer startet das System im Bild links. Im Bild in der Mitte ist aus der Vogelperspektive dargestellt, wie das Fahrzeug mit anderen Autos in der Umgebung Kontakt aufnimmt und nach benötigten Informationen sucht. Dabei wird in die-

³Die Projekte COMCAR [116] und Multimedia Car Platform (MCP, <http://mcp.fantastic.ch>) untersuchen die Nutzung von IP im Fahrzeug mit zellularen und Verteilnetzen. Bettstetter beschreibt die IP-Adressierungsproblematik allgemein [16].

sem Beispiel festgestellt, daß auf der Autobahn aktuell ein Stau besteht. Diese Information erhält der Fahrer visuell, solange er noch steht (Bild rechts). Dazu ist es notwendig, daß entsprechende Anfragesprachen und Suchverfahren zur Verfügung stehen. Ebenso müssen Mechanismen zum automatisierten Informationsaustausch benachbarter Fahrzeuge vorhanden sein.

Die Anforderungen an ein dezentrales Informations- und Kommunikationssystem im automobilen Bereich sind also sehr umfangreich und vielfältig. Die CARISMA Systemarchitektur trägt diesen Anforderungen Rechnung.

4.2 CARISMA Architektur und Systemkomponenten

4.2.1 Systemarchitektur

Im folgenden wird die CARISMA Systemarchitektur anhand ihrer Hauptkomponenten und deren Zusammenspiel beschrieben. Während sich der Rest der Arbeit im wesentlichen auf Verhaltens- und Ablaufmodelle bezieht, geht es hier um den aufbauorganisatorischen Rahmen.

Abbildung 4.5 zeigt die Hauptkomponenten des CARISMA Systems und ihre Beziehung zueinander auf der Grundlage des ISO/OSI Schichtenmodells. Sie werden im einzelnen in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Als wesentliche Anwendungen, um dem Fahrer Informationen zur Verfügung zu stellen, sind im Anwendungsteil das Navigationssystem, die Audiowiedergabe und der Webbrowser abgebildet. CARISMA unterstützt weitere Anwendungen wie z.B. Netzwerkspiele oder Videowiedergabe. Darüber hinaus ist eine Fahrerinformation über ein Head-Up Display [77] oder ein haptisches Feedback möglich, wie z.B. ein Gegendruck im Gaspedal oder Lenkrad. Die abgebildeten Applikationen sind also nicht als alleinige CARISMA Anwendungen zu verstehen. Das CARISMA Dienste- und Informationsmanagement, das Nachrichtensystem sowie das Situations- und Nutzermanagement besitzen direkte Schnittstellen zu den Anwendungen. Die Anwendungen können aber auch unmittelbar auf TCP/IP aufsetzen.

Das *CARISMA Nachrichtensystem* bietet Dienste zum Versand von Nachrichten an. Nachrichten im CARISMA System sind typisiert. Als Adressierungsschemata stehen eine *Geocast* Funktion sowie eine adaptive Informationsverbreitungsfunktion zur Verfügung. Neben dem sofortigen Versand einer Nachricht ist es möglich, Regeln für die Nachrichtengenerierung aus Sensordaten und deren Versandzeitpunkte aufzustellen. Anwendungen können sich für den Empfang von Nachrichten eines bestimmten Typs anmelden, die an sie weitergegeben werden.

Die nach außen sichtbaren Funktionen des *CARISMA Dienste- und Informationsmanagements* sind die zur Verfügung Stellung von Informationen per Benachrichtigung, auf Abruf oder zu definierten Zeitpunkten sowie die Entdeckung neuer Dienste und die Selektion und Priorisierung existierender Dienste. Während sich Anwendungen beim Nachrichtensystem für den Empfang von Nachrichten eines bestimmten Typs anmelden können, die sofort bei Eintreffen einer Nachricht dieses Typs an die Applikationskomponente weitergereicht werden, so können sich Anwendungen beim Informationsmanagement für die Bereitstellung bestimmter Informationen anmelden. Die Informationsmanagementkomponente informiert dann die Anwendung nicht bei jedem Eintreffen einer

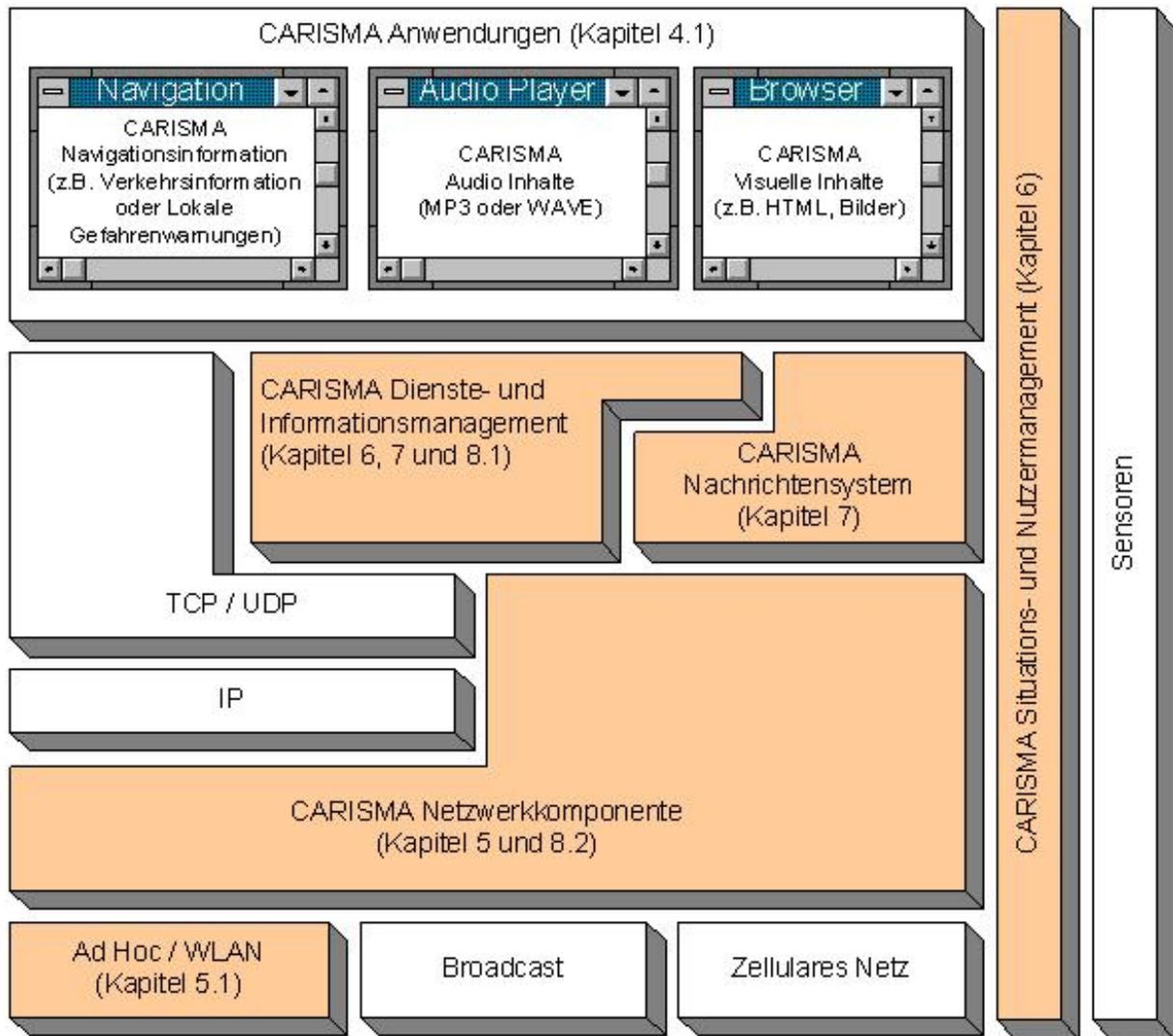


Abbildung 4.5: Das CARISMA Schichtenmodell

Nachricht, sondern sammelt Informationen aus Nachrichten und Sensoren, filtert relevante Teile heraus, speichert sie zwischen und verarbeitet sie gegebenenfalls vor, beispielsweise durch Aggregation. Sie besitzt daher eine Schnittstelle zum CARISMA Nachrichtensystem sowie ebenfalls zur CARISMA Netzwerkkomponente, um Informationen aus Nachbarfahrzeugen abzurufen oder aktive Anfragen direkt ins VANET oder über einen lokalen Zugangsknoten auch ins Internet stellen zu können. Die Anfragen können dabei auch über TCP/IP gestellt werden. Das Informationsmanagement kann selbständig in Abhängigkeit der Fahrsituation ein für die Fahrerinformation geeignetes Medienformat auswählen und den entsprechenden Wiedergabedienst wie z.B. das Navigationssystem für Symbole auf der Fahrtroute oder die Audioausgabe ansteuern.

Die *CARISMA Netzwerkkomponente* ist verantwortlich für die Auswahl eines geeigneten Netzes für eine Kommunikationsanforderung und für das Routing im VANET. Sie bietet synchrone und asynchrone Verbindungen zu bestimmten Kommunikationspartnern im VANET an. Die Adressierung kann dabei über eine IP Adresse erfolgen. Eine positionsbasierte oder anderweitig implizite

Adressierung ist ebenfalls möglich. Zusätzlich wird die Verbreitung von Nachrichten mittels Geocasting sowie ein effizientes richtungsbezogenes Weiterleiten von Nachrichten und Datenpaketen angeboten.

Das *CARISMA Situations- und Nutzermanagement* ist eine schichtenübergreifende Komponente, da die Kommunikation sowie das Verhalten von Informations- und Dienstemanagement auf verschiedenen Schichten von der Situation abhängt. Auch den Anwendungen wird eine Schnittstelle für Situationsinformationen angeboten. Situationserkennung und Situationsverwaltung sind interne Funktionen. Neben singulären Variablen wie Position und Zeit, die eine Situation beschreiben und aus einzelnen Sensorwerten gewonnen werden, spielen für CARISMA insbesondere die aus mehreren Beobachtungen abzuleitenden Informationen zur Fahrsituation, zum Zielort einer Fahrt und zum Zweck einer Fahrt eine wesentliche Rolle für die situationsbedingte Gewichtung und die Auswahl von Informationen. Zusätzlich spielen netzbezogene Daten wie beispielsweise die aktuelle Knotendichte nicht nur eine Rolle für das VANET Routingprotokoll, sondern auch für die Beurteilung von Wahrscheinlichkeiten, bestimmte Informationen in bestimmter Zeit im Netz zu finden oder als Grundlage zur Beurteilung der aktuellen Dienstqualität (QoS) des VANETS für die Auswahl eines Kommunikationskanals.

Abbildung 4.6 zeigt den prinzipiellen Ablauf im CARISMA System, das auch als Modell für ein situationsadaptives Informationssystem für allgemeine Ad-hoc Netze dienen kann. Es verdeutlicht das Zusammenspiel der Komponenten am Beispiel der CARISMA Gefahrenwarnung.

Das Gefahrenwarnsystem informiert den Fahrer unter anderem über gefährliche Straßenzustände. Informationen über den Straßenzustand erhält die Gefahrenwarnungskomponente dabei vom Situationsmanagement. Ein Gefahrenbeobachter meldet sich dafür unter anderem bei der Straßenzustandskomponente des Situationsmanagements an, um bei bestimmten kritischen Zuständen benachrichtigt zu werden. Die Straßenzustandskomponente ermittelt den Straßenzustand aus Meßwerten eines Reibwertsensors, falls vorhanden, oder aus dem Schlupf der Räder, der Geschwindigkeit und dem Lenkeinschlag. Nutzt der Gefahrenbeobachter zusätzlich Information über die Außentemperatur und die Aktivität der Scheibenwischer, so kann er einer gewissen Sicherheit zwischen Glatteis, Aquaplaning und Öl auf der Straße unterscheiden. Erkennt er nun eine kritische Situation, so kann er den lokalen Gefahreninformationsagenten⁴ direkt informieren und eine Gefahrennachricht generieren, die er über das Nachrichtensystem an andere Fahrzeuge versendet.

Das Nachrichtensystem übergibt die Gefahrenwarnungsnachricht an den Kommunikationsagenten, der über die Wahl eines geeigneten Netzes für den Versand entscheidet. Dazu nutzt er Information über die Netzwerksituation, unter anderem über die Verfügbarkeit und Auslastung verschiedener Netze. Versendet er die Nachricht über das VANET, so übergibt er sie an den VANET Router, ggfs. aufgeteilt auf mehrere Datenpakete. Dieser interagiert ebenfalls mit der Netzwerksituationskomponente und ist über die Situation im VANET informiert, insbesondere über die Verfügbarkeit von Nachbarknoten. Diese hängt ab von der Verkehrssituation, die ihrerseits vom Straßenzustand abhängt. Das Situationsmanagement erlaubt eine durch Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten verbesserte Situationsinformation. Ist kein Nachbarknoten im VANET erreichbar, so puffert der VANET Router die Pakete, ansonsten sendet er sie aus und bestimmt einen oder mehrere Nachbarn, die die Pakete weiterreichen sollen. Die Information über Nachbarschaften in Ad-hoc Netzen

⁴Statt Komponente wird in diesem Zusammenhang der Begriff Agent gebraucht, da diese Agenten selbständig Entscheidungen basierend auf beobachteten Situationen treffen, somit also autonom handeln.

kann z.B. aus zyklischen Bekanntmachungsnachrichten, die Position und ggfs. Identität eines Teilnehmers beinhalten, gewonnen werden (zur Definition eines solchen Nachbarschaftsdienstes siehe Briesemeister in [26]).

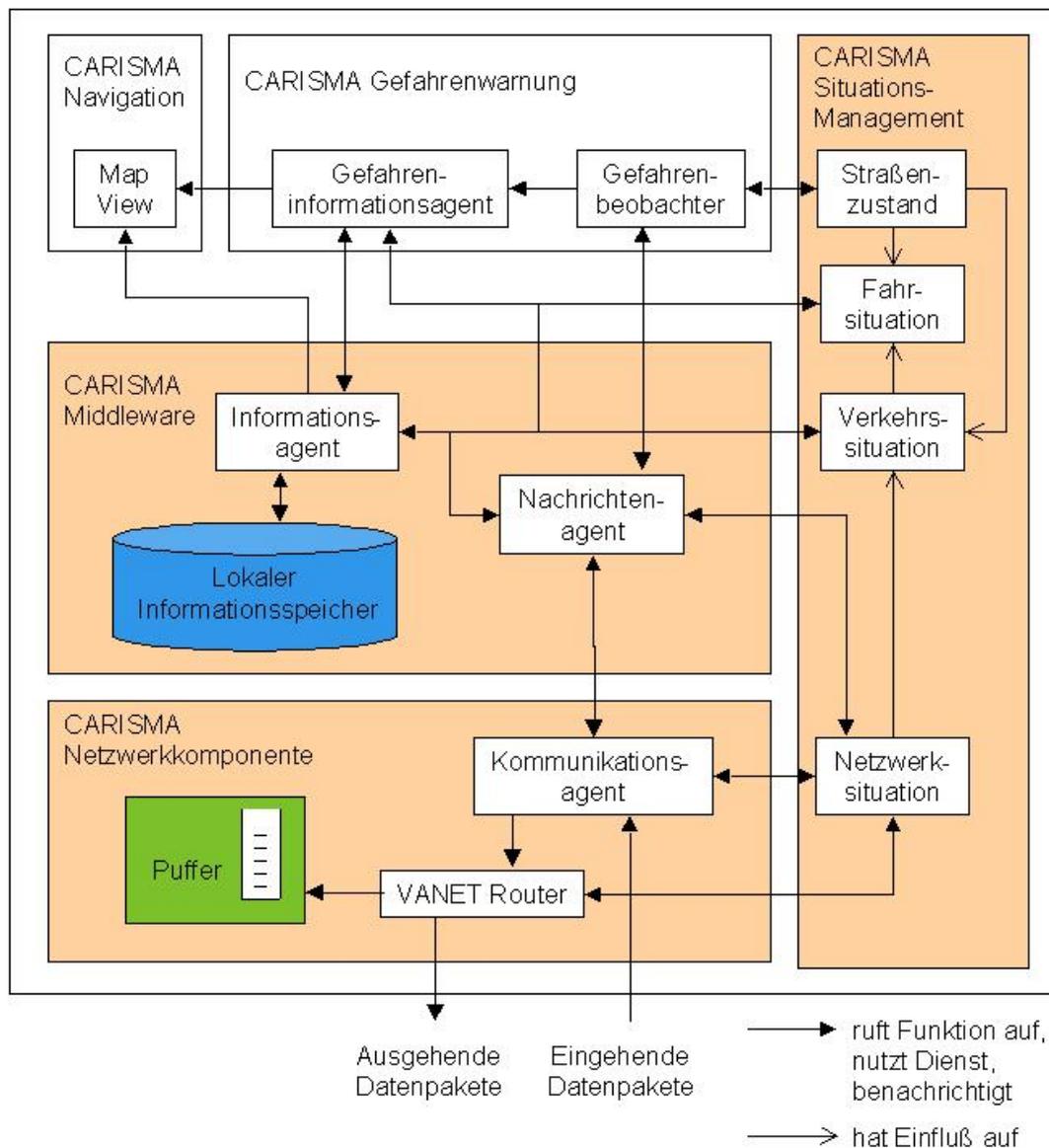


Abbildung 4.6: Situationsadaptives Nachrichtensystem

Die Nachbarknoten empfangen nun diese Pakete. Dazu beobachtet der Kommunikationsagent permanent den Netzverkehr. Er kann auch Datenpakete, die zu einer Nachricht gehören, aber über verschiedene Kommunikationsmedien eintreffen, wieder zu einer Nachricht zusammensetzen. Wurde die Nachricht als Geocast versendet, so wird sie wieder an den VANET Router übergeben, der sie ggfs. weiterversendet. Zusätzlich wird sie an das Nachrichtensystem übergeben. Dieses stellt den Inhalt dem Informationsagenten zur Verfügung. Hat sich der Gefahrenbeobachter für den Empfang von Nachrichten eines bestimmten Typs beim Nachrichtensystem angemeldet, so wird die Nachricht auch an ihn weitergegeben, wenn sie vom entsprechenden Typ ist.

Der Informationsagent sammelt Informationen aus verschiedenen Quellen. Ist eine bestimmte neue Information verfügbar, für die sich Anwendungen anmelden können, so benachrichtigt sie der Informationsagent darüber. Anwendungen können ihm dazu auch situationsabhängige Regeln mitgeben. Dann informiert der Agent nur, wenn beispielsweise die aktuelle Fahrsituation und Verkehrssituation es zulassen. Allgemein kann der Wert einer Information von Situationsparametern abhängen. Dieser Wert einer Information wird dann vom Informationsagenten mit berücksichtigt. Im Falle der Gefahrenwarnung ist eine Information dann besonders wertvoll, wenn sie sich auf die eigene Route bezieht. Dabei soll der Fahrer unmittelbar vorher informiert werden, damit er dann entsprechend rechtzeitig reagieren kann. Ist die Information zu diesem Zeitpunkt nicht mehr ganz präzise, so ist ihr Wert gesunken, z.B. wenn sich eine lokale Nebelbank in der Zeit zwischen Erhalt der Nachricht und Erreichen der kritischen Stelle verlagert hat. In diesem Fall kann der Informationsagent entscheiden, selbständig eine neue Nachricht über die veränderte Situation zu versenden. Im Fall der Gefahrenwarnung wird er dazu vom Nachrichtensystem beauftragt, das seinerseits die Beauftragung vom Gefahrenbeobachter erhalten hat. Der Informationsagent gibt per Nachricht erhaltene Gefahreninformationen an den Gefahreninformationsagenten weiter und stellt sie ggfs. weiteren Anwendungen zur Verfügung. Er gibt Informationen auch selbständig über geeignete Ausgabemedien an den Fahrer weiter.

4.2.2 Die prototypisch realisierten Anwendungen

Die Abbildung 4.7 zeigt, wie im CARISMA System eine Gefahrennachricht im Navigationssystem dargestellt wird. Sie wird in Form eines Gefahrensymbols an der Gefahrenstelle eingeblendet. Zusätzlich erhält der Fahrer eine Texteinblendung mit genauen Angaben zu Gefahrentyp und Entfernung sowie eine Sprachdurchsage, die kurz vor der Gefahrenstelle ein weiteres Mal auf die Gefährdung hinweist.

CARISMA erlaubt aber nicht nur die situationsgerechte Information des Fahrers mittels Nachrichten, sondern auch eine Interaktion und Steuerung des Systems. Die Audioausgabe kann beispielsweise, wie in Abbildung 4.8 dargestellt, durch die Anwahl verschiedener Informationskategorien gesteuert werden. In der linken Schalterleiste kann der Fahrer dazu zwischen der Wiedergabe von Nachrichten, Musik, Verkehrsnachrichten, lokalen Informationen und persönlichen Informationen wählen. Werden Audioinhalte per Sprachausgabe wiedergegeben, so erlaubt das System die zusätzliche Ausgabe vertiefender Informationen bzw. den Abbruch und den Übergang zur nächsten Information per Knopfdruck. Dies wird durch die *Mehr* bzw. *Skip* Schalter gesteuert, die z.B. über Lenkradtasten bedient werden können. Mit CARISMA ist auch situationsadaptiv vorkonfiguriertes Browsen von Informationen in visueller Form möglich (siehe Abbildung 4.9). Die Informationen werden vom Informationsagenten während der Fahrt von anderen Fahrzeugen oder lokalen Informationen gesammelt und stehen während des Stillstands des Fahrzeugs zum Abruf zur Verfügung.

4.2.3 Das Nachrichtensystem

Die Kernfunktionen, die das CARISMA Nachrichtensystem den Anwendungen zur Verfügung stellt, sind in der Tabelle 4.4 aufgelistet. Mittels *newMsg* und *sendMsg* können neue Nachrichten generiert und versendet werden. Als Adresse ist eine feste Gruppenadresse oder ein Geocast



Abbildung 4.7: Lokale Gefahrenwarnung im Fahrzeug

Gebiet möglich. Es ist aber auch eine reine “Injektion” der Nachricht ins Netz ohne Adressierung möglich. Diese Nachricht wird dann in Abhängigkeit des Nutzens für andere Netzteilnehmer adaptiv verbreitet. Empfängt ein Teilnehmer eine solche Nachricht, so wird sie von der Netzwerkkomponente an das Nachrichtensystem weitergegeben. Dieses ruft die Bewertungsfunktion des Informationsmanagements auf und berechnet das lokale Interesse an der Nachricht in Form eines Informationsnutzenwertes. Das Nachrichtensystem entscheidet auf der Basis dieses Nutzenwertes sowie des Nutzens für die anderen Netzteilnehmer (zum genauen Ablauf siehe Kapitel 7) über die Weiterleitung der Nachricht.

Zusätzlich zum direkten Versand von Nachrichten stellt das CARISMA Nachrichtensystem eine Funktion *setAdvertisementRule* zur Verfügung, mittels derer der Komponente Aufträge zum Versand von Nachrichten übergeben werden können. Diese Aufträge enthalten eine Beschreibung, wie die Nachricht aus dem lokalen Informationsspeicher zusammgebaut werden soll und eine Regel zur Bestimmung des Versandzeitpunktes oder für ein wiederholtes Versenden von Nachrichten. Für den Zusammenbau von Nachrichten und die Bewertung von Informationen ist der Informationsagent zuständig, der dazu unterbeauftragt wird. Der Versandauftrag kann mit situa-

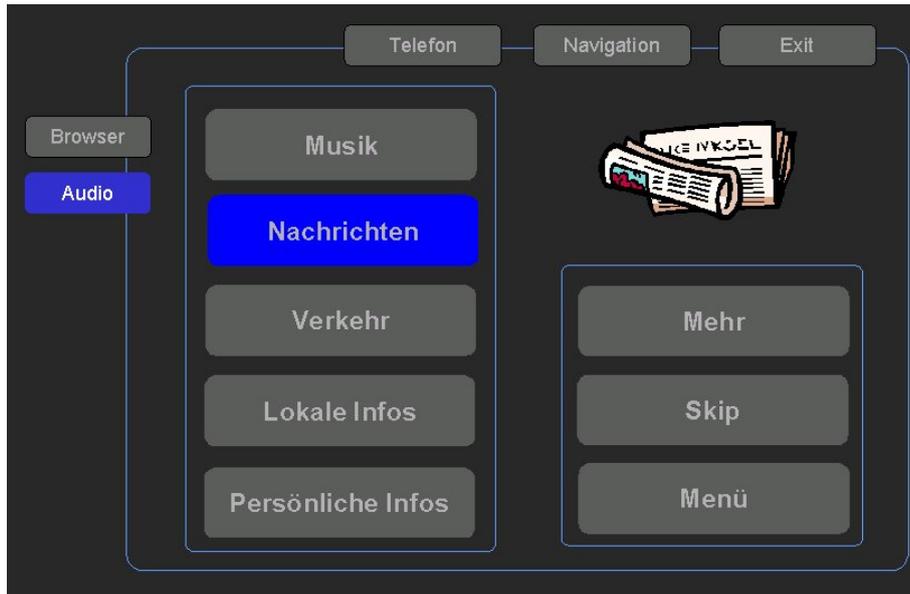


Abbildung 4.8: Prototyp Screenshot: Kontrolle der Audio Ausgabe verschiedener Inhalte

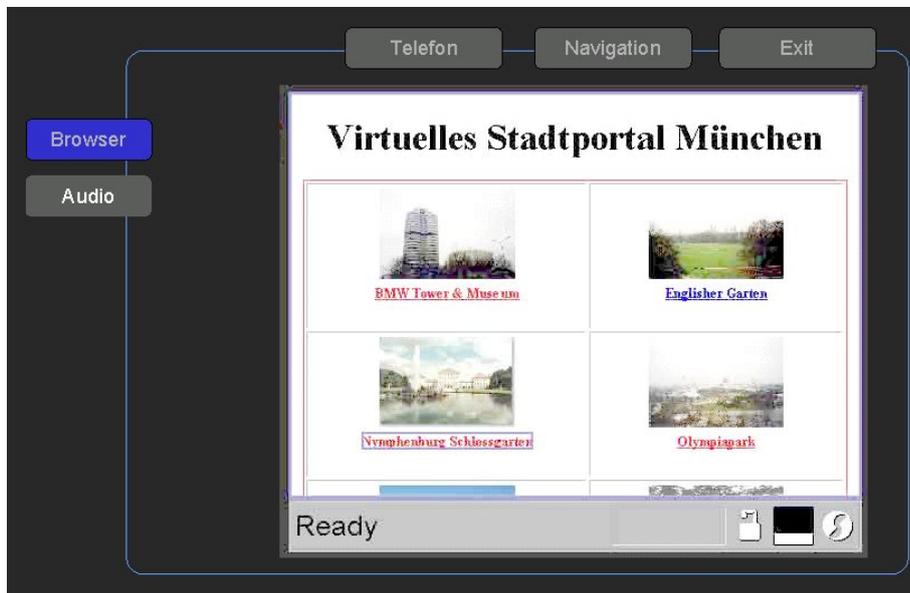


Abbildung 4.9: Prototyp Screenshot: Browser im Fahrzeug

tionsbezogenen Versandkriterien und -bedingungen verbunden sein. CARISMA nutzt außerdem Informationen über die mobilen Netze und ihre Zustände und Eigenschaften, z.B. die Verfügbarkeit, Kapazität und Auslastung, um über den Versand von Nachrichten zu entscheiden.

```

Message newMsg(String msgHeader, String msgContent)
sendMsg(Message msg, [Address addr], [recParam[] pars])
int setAdvertisementRule(Rule InformationSelectionCriterion, Rule sendCondition)
subscribeMsg(MessageType msgType, [Rule msgAcceptanceRule])

```

Tabelle 4.4: CARISMA Nachrichtensystem API

Im Gegensatz zu Nachrichtensystemen im Festnetz, bei denen Applikationen an speziellen Multicast-Ports auf das Eintreffen einer Nachricht warten, teilen Anwendungskomponenten in CARISMA dem CARISMA Nachrichtensystem ihr Interesse an bestimmten Nachrichten mittels der Funktion *subscribeMsg* mit. Diese Anmeldung kann auf die Benachrichtigung über das Eintreffen von Nachrichten mit bestimmten Inhalten oder in bestimmten Situationen in Form logischer Ausdrücke (Nachrichtenakzeptanzregel) eingeschränkt werden, beispielsweise auf Verkehrsnachrichten ab einer bestimmten Verkehrsdichte. Insbesondere kann sich die Regel aber auch auf den Nutzen der Information beziehen (siehe Kapitel 6).

4.2.4 Das Informations- und Dienstemanagement

Grundsätzlich wird über das CARISMA Informationsmanagement eine Vorverarbeitung und Transparenz der Informationsquellen erreicht, d.h. Anwendungen melden sich hier für bestimmte Informationen an, nicht für Nachrichten. Es spielt dabei keine Rolle, ob diese Informationen von lokalen Sensoren erfaßt wurden, per Nachricht eingetroffen sind oder aus mehreren Teilinformationen unterschiedlicher Quellen bestehen. Der lokale Informationsspeicher dient dann als Puffer, der den Empfang einer Nachricht von der Zustellung an die entsprechende Anwendungskomponente entkoppelt. Es ist dabei möglich, Informationen aus mehreren Nachrichten zu aggregieren und zu kombinieren, bevor sie an eine Anwendung weitergegeben werden.

```

subscribeInformation(InformationType infType, Component targetCallbackComponent,
Rule informationSelectionCriterion, Rule informationProvisionTimingCriterion)
setInfBenefitFunction(InformationType infType, FunctionExpression benefitFunction)
float calculateInfBenefit(InformationObject infObj)
Service[] availableServices([float QoSLevel])

```

Tabelle 4.5: CARISMA Dienste- und Informationsmanagement API

Das Informations- und Dienstemanagement übernimmt also die anwendungsunabhängige Verwaltung von Informationen. Die API kann Tabelle 4.5 entnommen werden. Anwendungen können sich mittels der Funktion *subscribeInformation* für die Benachrichtigung bei Verfügbarkeit von Informationen eines bestimmten Typs anmelden. Mittels einer Informationsauswahlregel können

die benötigten Informationen näher beschrieben und eingegrenzt werden sowie Kriterien zur Weitergabe der Information vorgegeben werden. Diese Kriterien können bezogen sein auf den Inhalt der Information an sich, die Menge verfügbarer Information, bestimmte Zeitpunkte oder Situationen. Bei situationsabhängigen Benachrichtigungswünschen beauftragt der Informationsagent seinerseits das Situationsmanagement mit der Benachrichtigung bei Eintreten der Situation. Redundanzen verschiedener Anwendungen können so vermieden werden. Da sowohl lokal über die Fahrzeugsensoren als auch entfernt generierte und per Nachricht kommunizierte Informationen gemeinsam verarbeitet werden, kann man von einem verteilten situationsadaptiven System sprechen.

Mittels der Funktion *setInfBenefitFunction* wird dem Informationsmanagement von der Anwendung eine Bewertungsfunktion für einen bestimmten Informationstyp übergeben werden. Anhand dieser Bewertungsfunktion wird der Nutzen eines Informationsobjektes mit der Funktion *calculateInfBenefit* berechnet. Entsprechende Nutzenfunktionen hängen für die für CARISMA relevanten Informationen neben persönlicher Interessen insbesondere vom Alter und dem Ortsbezug einer Information ab (in Relation zur Situation zum Bewertungszeitpunkt). Basierend auf diesem Informationsnutzen werden Objekte mit geringem Nutzen aus dem lokalen Informationsspeicher regelmäßig entfernt. Ein Systemprozeß übernimmt analog einem Garbage Collector diese Aufgabe. Umgekehrt werden neue Informationen, die ausreichend hoch bewertet wurden, in die Informationsdatenbank übernommen. Für ihre Bewertung spielt dabei auch der bisherige Inhalt der Informationsdatenbank eine Rolle. Genauere Informationen zu diesen Funktionen finden sich in den Kapiteln 6 und 7.

Zusätzlich zum Informationsmanagement besitzt die Komponente auch Funktionen zur Lokalisierung und Auswahl von Diensten. Das Verhalten des Service Discovery wird in Abschnitt 8.1 etwas näher erläutert. Die Funktion *availableServices* stellt eine Liste der aktuell verfügbaren Dienste zur Verfügung, die einer bestimmten Dienstgüte genügen. CARISMA Dienste verfügen über eine Beschreibung, die die Situation kennzeichnet, in denen sie in der Regel genutzt werden. Basierend auf dieser Beschreibung werden Dienste in Abhängigkeit der Teilnehmersituation hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Ein Beispiel hierfür ist der Dienst zum Lösen eines elektronischen Parktickets. Er wird angeboten, wenn das Fahrzeug auf einem Parkplatz angekommen ist, für den das Ticket benötigt wird. Ein anderes Beispiel ist der Dienst zum Bestellen an einem Drive-In Restaurant, der bei Einfahrt in eine Drive-In Fahrspur aktiviert wird.

4.2.5 Das Situationsmanagement

Die Situationsmanagementkomponente hat die Aufgabe, die Umwelt des Systems zu beobachten, Situationen zu erkennen, anderen Komponenten Informationen über die situative Lage bereit zu stellen und sie über das Eintreten von Situationen oder bestimmter Sensorwerte zu informieren. Um beim Eintritt einer Situation benachrichtigt zu werden, melden sich Komponenten mit der Funktion *callbackOnSituation* beim Situationsmanagement an. Diese Funktion ist in der Funktionsübersichtstabelle 4.6 dargestellt.

Um über Situationen informieren zu können, müssen der Komponente Regeln bekannt sein, die die Situation bestimmen. Die Komponente besitzt eine Reihe vordefinierter Situationen, die das Basisverhalten des Systems bestimmen. Zusätzlich können mit Hilfe des in der Klasse *Situation* imple-

```

Situation setSituation(Rule[] situationRule)
void callbackOnSituation(Situation crucialSituation, Object this)
float isValid(Situation sit)
float intensity(Situation sit)
int datarate(Position destinationNodePos)
float nodeDensity([StreetConnection connection], [Time time])
boolean linkAvailability(Position destinationNodePos)
float linkStability(Position startPos, Position, endPos)
Position[] tripDestination()
float tripDestinationBelief(Position destinationPos)
tripIntention[] thisTripIntention()
float tripIntentionBelief(tripIntention possibleIntention)
enum tripIntention = {Work, Holiday, Sport, Event}

```

Tabelle 4.6: CARISMA Situations- und Nutzermanagement API

mentierten Situationsmodell neue Situationen von anderen Komponenten definiert werden (*setSituation*). Zu den für die grundlegende Fahrsituation relevanten Informationen gehören der Zielort einer Fahrt sowie ihr Zweck. Mögliche Positionen des Zielortes und des Fahrtzwecks können über die Funktionen *tripDestination* sowie *tripIntention* abgerufen werden. Sie liefern jeweils Mengen möglicher Zielorte und Fahrtzwecke, geordnet nach der Sicherheit, mit der das System davon ausgeht, daß die Annahmen zutreffen. Die Funktionen *tripDestinationBelief* und *tripIntentionBelief* liefern für einzelne vermutete Zielorte und Fahrtzwecke entsprechende Werte für die Sicherheit, mit der die Vermutungen zutreffen. Allgemein liefert die Funktion *isValid* Werte für die Sicherheit, mit der das System davon ausgeht, daß eine Situation eingetreten ist. Die Funktion *intensity* liefert einen Wert für den Grad des Eintretenseins einer Situation. In Kapitel 6 wird beschrieben, wie diese Werte berechnet werden.

Neben Informationen über Fahrsituationen liefert die Komponente auch Informationen über Netzwerkzustände. Dazu zählen Werte wie die wahrscheinlich erreichbare Datenrate zu einem Knoten an einer bestimmten Zielposition (*datarate*), die aktuelle lokale Knotendichte, die Knotendichte für einzelne Straßenabschnitte zu bestimmten Zeiten (*nodeDensity*) sowie die Verbindungswahrscheinlichkeit zu einem Knoten an einer bestimmten Position (*linkAvailability*, *linkStability*). Wie sich diese Werte für VANETS ermitteln lassen, ergibt sich aus den Darstellungen zur Konnektivität und Latenzzeiten in Kapitel 5.

Die Unabhängigkeit des Situationsmanagements kapselt die Funktionen zur Situationserkennung und Verwaltung, reduziert damit die Menge der Schnittstellen zwischen den anderen Komponenten, entkoppelt die Situationswahrnehmung von der jeweiligen situationsadaptiven Systemfunktionalität, erlaubt ein einfacheres Verständnis des Systemverhaltens und ermöglicht eine präzisere Repräsentation der Umwelt im System. Durch die Situationskomponente werden darüber hinaus Interdependenzen zwischen anderen Komponenten explizit und können in deren Verhaltensmodellierung und insbesondere bei der Fehlerbehandlung berücksichtigt werden.

4.2.6 Die Netzwerkkomponente

Die Netzwerkkomponente ist für den Datenverkehr und insbesondere das Weiterreichen von Datenpaketen im VANET zuständig. Vier im Zusammenhang mit Fahrerinformation wesentliche Arten der Kommunikation werden angeboten, synchrone und asynchrone Punkt-zu-Punkt Verbindungen, Geocasting und das Injizieren und effiziente Verbreiten von Nachrichten. Dies spiegelt sich in der in Tabelle 4.7 aufgelisteten Schnittstellenbeschreibung wider. Die Eigenschaften von VANETS und die daran angepaßten Routing und Nachrichtenverbreitungsverfahren werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

```
connectionHandle openSynchronously(Address destAddress)
connectionHandle openAsynchronously(Address destAddress)
geocastSocket geocast(areaShape geocastArea)
msgDistributionHandle inject()
```

Tabelle 4.7: CARISMA Netzwerk API

Kapitel 5

Das CARISMA Ad-hoc Kommunikationsnetz

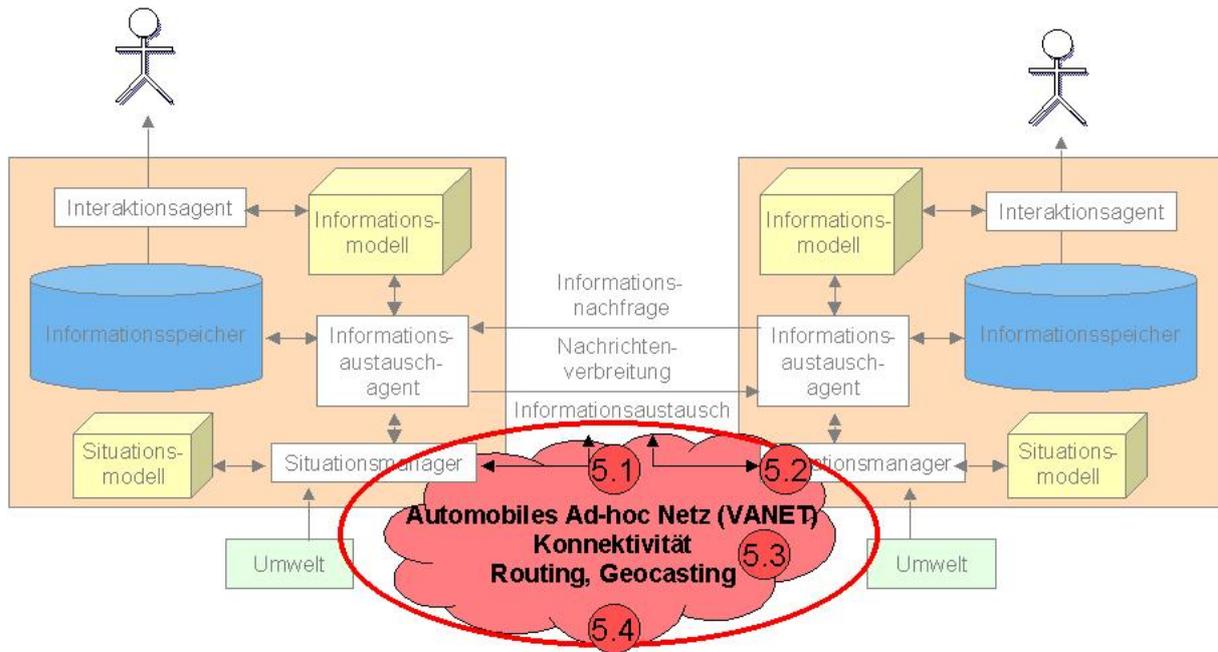


Abbildung 5.1: VANETS im Basismodell

5.1 Technologien für die Fahrzeug-zu-Fahrzeugkommunikation

5.1.1 Eignung existierender Funkssysteme

Für die Realisierung des CARISMA Systems ist die Existenz eines robusten drahtlosen Datenübertragungsverfahrens mit hohem Durchsatz grundlegend. In diesem Abschnitt wird nachgewiesen, daß auf dem IEEE Standard 802.11 basierende Funkssysteme den Anforderungen an das CARISMA Einsatzfeld prinzipiell genügen. In Abschnitt 5.2 wird die Modellbildung von VANETS diskutiert. In Abschnitt 5.3 werden Ergebnisse zur Konnektivität von VANETS präsentiert. Kommunikationsprotokolle und ihr Verhalten in VANETS werden in Abschnitt 5.4 vorgestellt und analysiert. Dieses Kapitel beschäftigt sich also mit Eigenschaften und Verhalten des Fahrzeug Ad-hoc Netzes und der grundlegenden CARISMA Kommunikation (siehe Abbildung 5.1).

Die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Automobilen erfordert eine Funktechnologie mit geringer Geschwindigkeitssensitivität (schwankende Eingangssignaleigenschaften, Doppler-Effekt).

Im Gegensatz zu den bislang untersuchten Technologien [93, 198], die mit eher niedrigen Datenraten bei hohen Anforderungen an die Realzeitfähigkeit der Systeme arbeiteten, wird für CARISMA ein System mit hohen Übertragungsraten bei wesentlich geringeren Anforderungen an die Einhaltung von Zeitschranken benötigt.¹ Zudem ist eine, im Idealfall regelbare und somit an die Teilnehmerdichte adaptierbare Kommunikationsreichweite von einigen hundert Metern erforderlich, ein dezentral gesteuerter Kanalzugriff und Discovery Verfahren als Voraussetzung zur Bildung von Ad-hoc Netzen sowie geringe, am besten keine Interferenz mit anderen Funkssystemen.

	Bluetooth	Hiperlan II	UTRA TDD
Frequenzbereich (GHz)	2,402 - 2,48	5	2,01 - 2,02
Übertragungsrate (MBit / s)	0,721 + 0,057	54	0,384 - 2
Reichweite (m)	10 oder bis 100	ca. 50	ca. 1000

	802.11b	802.11a	802.11p / WAVE
Frequenzbereich (GHz)	2,4	5	5,85 - 5,925
Übertragungsrate (MBit / s)	11	54	27
Reichweite (m)	bis 1000	einige 100	einige 100

Tabelle 5.1: Vergleich existierender Mobilkommunikationstechnologien

Grundsätzlich in Frage für einen Einsatz im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation kommen damit die in Tabelle 5.1 aufgeführten Technologien Bluetooth, Hiperlan/II, die im Fleetnet Projekt [74] untersuchte Ad-hoc Erweiterung von UMTS (UTRA TDD) und die IEEE 802.11 Varianten. Da alle betrachteten Systeme mit Frequenzen unterhalb von 50 GHz arbeiten, gibt es keine wesentlichen Unterschiede im Bezug auf Dämpfungseffekte aufgrund atmosphärischer Gegebenheiten (von Ulaby et al. [193] wurde nachgewiesen, daß Regen keine nennenswerte Dämpfung bei diesen Frequenzen erzeugt). Hiperlan/II und UTRA TDD werden nicht in die weitere Betrachtung miteinbezogen, da gegenwärtig keine Hardware für diese Systeme verfügbar ist.

Sowohl Bluetooth als auch der IEEE Standard 802.11b arbeiten im 2,4 GHz Bereich. Während mit 802.11b Reichweiten von mehreren hundert Metern möglich sind (bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests wurden bei idealen Bedingungen bis zu 1000m Kommunikationsdistanz erreicht), bewegt sich die maximale Entfernung zweier Bluetooth Geräte im Bereich von maximal etwa 100m. Die Verbindungsaufbauzeiten von Bluetooth bewegen sich, bedingt vor allem durch den Einsatz von Frequenzhopping und Zeitmultiplex, in der Größenordnung von mehreren Zehntel bis ganzen Sekunden. Zusammen mit der geringen Reichweite ist dies für viele VANET Szenarien ungeeignet. Der Verbindungsaufbau über 802.11b ist wesentlich schneller. Bluetooth bringt einen weiteren entscheidenden Nachteil mit sich. Ein Ad-hoc Netzwerk wird bei Bluetooth durch die Gruppierung von bis zu acht Teilnehmern zu einem *Pikonetz* gebildet. Größere Netze, sogenannte Scatternetze, entstehen durch die Kombination mehrerer Piconetze. Der Verwaltungsaufwand, der

¹Degauque und Lienard beschreiben überblicksartig grundlegende Übertragungsverfahren, Probleme und Anwendungen von mobiler Kommunikation im automobilen Bereich [50].

dabei entsteht, sorgt für zusätzliche Verzögerungen und ist für sehr dynamische Netze wenig geeignet. Bluetooth scheidet daher prinzipbedingt als Kommunikationstechnologie für CARISMA aus. Die weitere Betrachtung konzentriert sich daher auf den IEEE Standard IEEE802.11 (im folgenden auch einfach als WLAN bezeichnet).

5.1.2 Der Einsatz von WLAN (IEEE802.11)

Die Entwicklung des IEEE802.11 Standard zielte auf den drahtlosen Zugang zu lokalen Netzwerken über lokale Zugangsstationen (Access Points). Der Standard spezifiziert die physikalische und die Kanalschicht (*Medium Access Layer (MAC)*) des OSI-Modells. Die Spezifikation der Bitübertragungsschicht beinhaltet zwei *spread-spectrum* Funktechnologien: frequency hopping spread spectrum (FHSS) und direct sequence spread spectrum (DSSS). Diese Techniken werden im 2.4 GHz ISM² Frequenzband eingesetzt und erlauben Datenraten von 1 Mbps bzw. 2 Mbps. Durch die Nutzung des industry, scientific, medical (ISM) Bandes ist keine Lizenzierung erforderlich. Das Konzept des MAC ist dem 802.3 MAC (Ethernet) sehr ähnlich. Bei 802.3 wird Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection (CSMA/CD) verwendet. Da Kollisionserkennung bei drahtloser Übertragung für den Sender nicht möglich ist³, wird bei WLAN ein modifiziertes Protokoll (Carrier Sense Multiple Access mit Collision Avoidance (CSMA/CA)) genutzt. Eine sendewillige Station lauscht am Kanal. Wenn keine Aktivität empfangen wird, wartet die Station eine weitere zufällige Zeit und sendet, falls das Medium danach immer noch frei ist.

Aufbauend auf 802.11 gibt es mehrere Varianten und Erweiterungen, darunter den 802.11b Standard, der zwei höhere Datenraten von 5.5 Mbps und 11 Mbps spezifiziert. Da FHSS auf 2 Mbps beschränkt ist⁴, wurde DSSS als die einzige Übertragungstechnologie für 802.11b ausgewählt. Um den Einsatz in sehr störungssensitiven Umgebungen und mit einer höheren Reichweite zu ermöglichen, nutzt 802.11b *Dynamic Rate Shifting*, d.h. die Datenrate wird automatisch angepaßt, um die schwankenden Eigenschaften des Funkkanals auszugleichen. Die Variante 802.11a arbeitet im 5 GHz Band und spezifiziert Datenraten bis zu 54 MBit/s, bei jedoch etwas geringerer Kommunikationsreichweite.

Die prinzipielle Eignung des 2,4 GHz Frequenzbereiches für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation wurde von Michael et al. anhand von Messungen des Verhältnisses der Anzahl korrekt empfangener Pakete zur Anzahl übertragener Pakete insgesamt nachgewiesen [140]. Sie setzten dabei aber eine proprietäre Hardware ein. Im Rahmen von CARISMA wurde die im 2,4 GHz Bereich arbeitende IEEE 802.11 Variante b näher untersucht und im Prototyp eingesetzt.⁵

Hierzu wurden Messungen mit realen Fahrzeugen durchgeführt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.2 und die Umsetzung im Fahrzeug mit den verwendeten omnidirektionalen Fahr-

²Das ISM (Industry, Scientific, Medical) Frequenzband ist weltweit lizenzfrei verfügbar.

³Es ist nicht möglich, gleichzeitig zu senden und zu empfangen.

⁴vor allem aufgrund von FCC Regulatorien.

⁵IEEE802.11a Hardware ist erst seit 2002 in Europa auf dem Markt und der eigentlich für Hiperlan/II reservierte Frequenzbereich ist seit durch die Regulierungsbehörde in Deutschland für 802.11a freigegeben. 802.11a wird gegenwärtig in den USA im Vehicle Safety Communication Projekt (VSC) evaluiert [205]. Die amerikanische Regulierungsbehörde FCC hat im Jahre 2001 einen Teil des 802.11 Frequenzbandes für den ausschließlichen Einsatz in DSRC Systemen in den USA reserviert.



Abbildung 5.2: Testbed Setup



Abbildung 5.3: Testaufbau im Fahrzeug

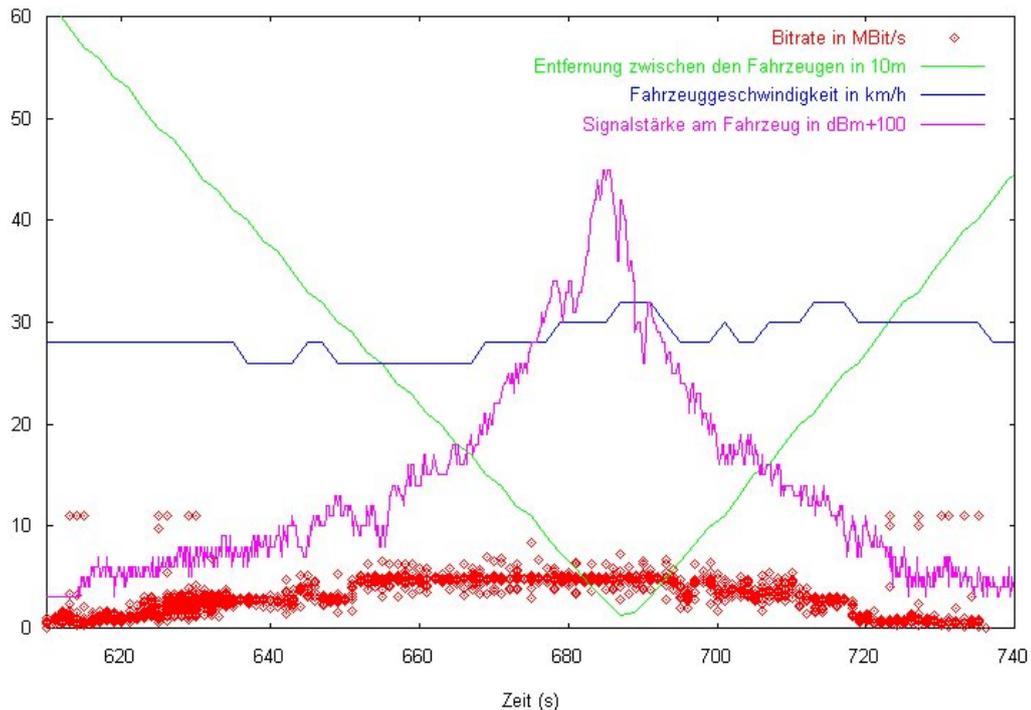


Abbildung 5.4: IEEE802.11b Meßergebnisse: Signalstärke und UDP Bitrate bei 30 km/h

zeugantennen⁶ in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Fahrzeugantennen sind mit PCMCIA Funkkarten nach IEEE 802.11b Standard verbunden.⁷ Abbildung 5.4 zeigt die Meßergebnisse der Werte Signalstärke und Bitrate für ein Fahrzeug, das mit 30 km/h an einem stationären Knoten vorbeifährt und mit diesem eine verbindungslos UDP Datagramme austauscht.⁸ Der Verlauf der Signalstärke ist gut zu erkennen. Ihre Werte wurden zur besseren Darstellung mit 100 addiert. Ihren Höchststand erreicht sie bei der direkten Vorbeifahrt, also bei minimaler Entfernung von Fahrzeug und Zugangsknoten. Der Verlauf der erzielten Datenrate (in MBit/s) läßt sich ebenfalls gut erkennen. Messungen wurden im Abstand von 0,1s durchgeführt. Die Meßwerte sind als Meßpunkte dargestellt. Unabhängig von der Geschwindigkeit war mit den in diesem Versuch verwendeten Antennen eine Verbindung bis zu einer Entfernung von etwa 400m möglich. Die erreichte Datenrate war abhängig von der Entfernung.

Abbildung 5.5 zeigt die Datenraten für Relativgeschwindigkeiten zwischen zwei Teilnehmern von 30, 50, 70 und 130 km/h. Es läßt sich gut erkennen, daß die Verbindungsdauer antiproportional zur Geschwindigkeit ist. In Abbildung 5.6 ist die jeweils übertragene Datenmenge über der Geschwindigkeit aufgetragen. Bezeichne v die Fahrzeuggeschwindigkeit, θ die Übertragungsrate in MBit/s und \mathcal{B} die übertragene Datenmenge in MByte, so gilt theoretisch $\mathcal{B} = 360 * \frac{\theta}{v} \frac{km}{h}$. Es ist gut zu

⁶Spezifikation siehe Anhang E.

⁷Es wurden PCMCIA Karten des Herstellers Lucent Orinoco verwendet. Alle Karten wurden im Ad-hoc Modus unter Linux betrieben.

⁸Die Signalstärke wurde mit Hilfe des Werkzeugs *iwspy* (<http://leaf.sourceforge.net/devel/jnilo/manpages/iwspy.html>) gemessen. Die UDP Bitrate wurde mit dem Programm *Iperf* (<http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>) bestimmt.

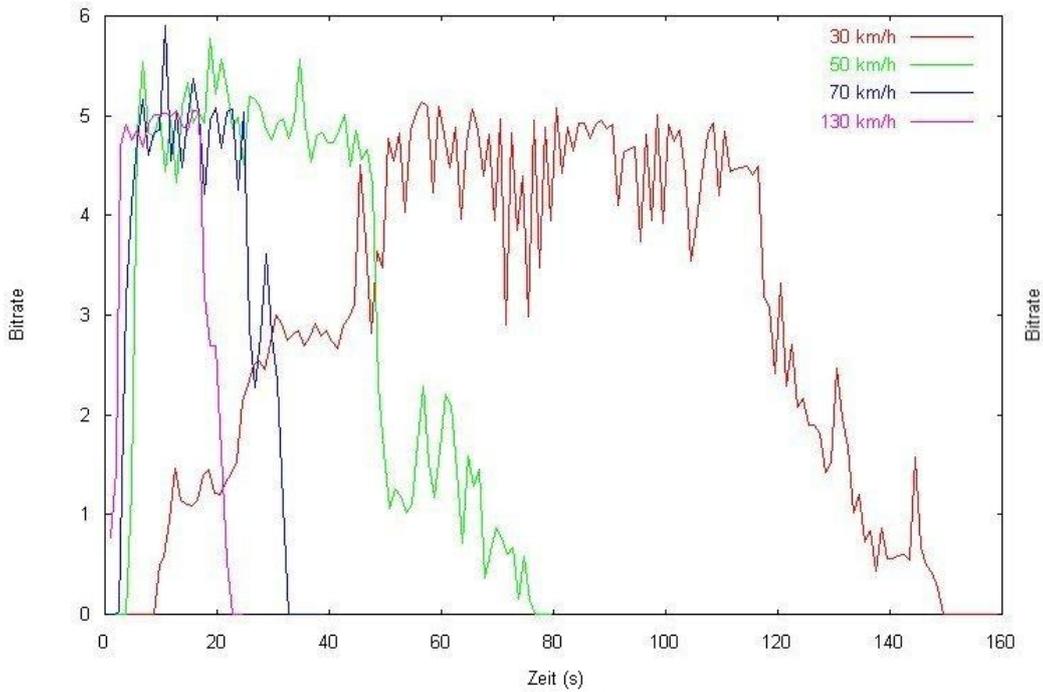


Abbildung 5.5: Dauer der Kommunikation und UDP Bitrate bei verschiedenen Geschwindigkeiten

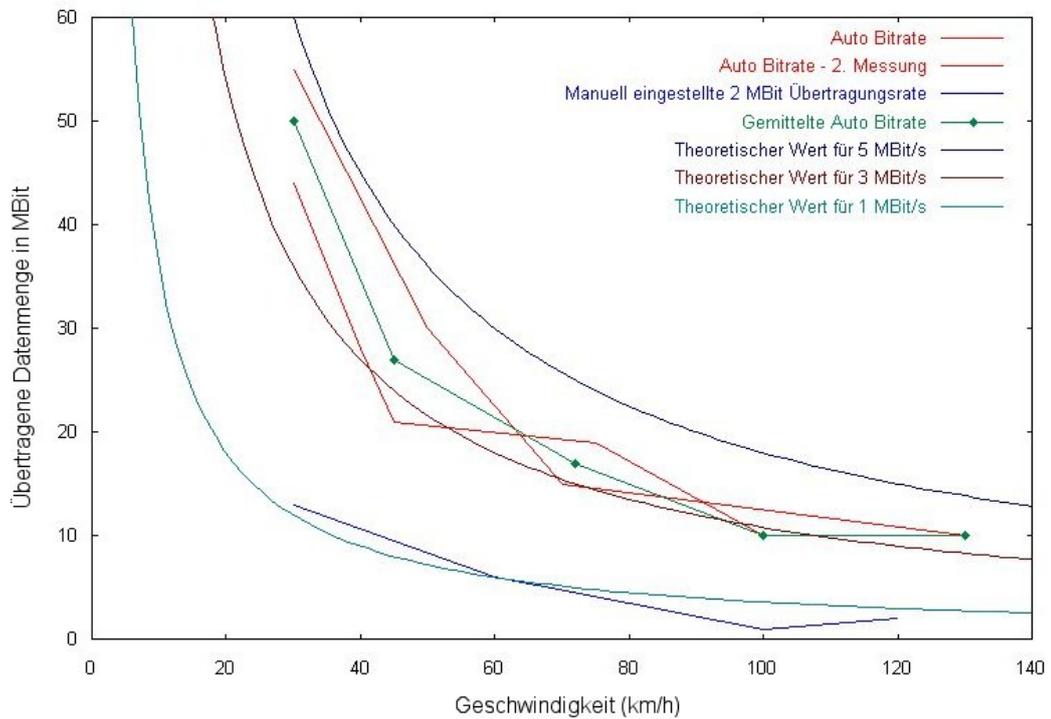


Abbildung 5.6: Erreichbare Datenübertragungsmenge (UDP) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

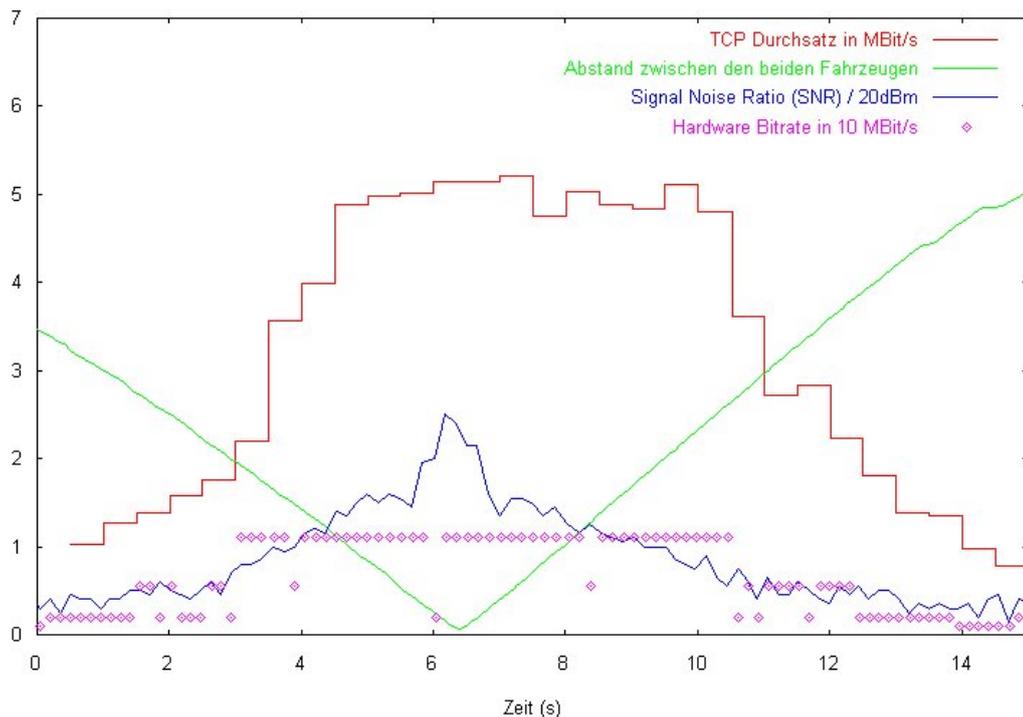


Abbildung 5.7: TCP Durchsatz bei 240 km/h Relativgeschwindigkeit

erkennen, daß die gemessenen Werte recht gut mit den zu erwartenden theoretischen Werten bei einer Verbindungsstrecke von 800m und Übertragung mit konstanter Datenrate übereinstimmen.

Die Datenmenge hängt also nur von der Verbindungsdauer ab. Ein weiterer Einfluß der Geschwindigkeit ist nicht erkennbar. Dies bestätigt auch Abbildung 5.7, die Meßergebnisse bei zwei entgegenkommenden Fahrzeugen mit einer Relativgeschwindigkeit von 240 km/h zeigt, die über TCP/IP kommunizieren.⁹ Über sechs Sekunden lang besteht die Verbindung mit einer Datenrate von mehr als 5 Mbit/s. Dies entspricht etwa der maximalen Nettodatenrate, so daß auch bei der verbindungsorientierten Kommunikation kein negativer Einfluß der Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf die Qualität der Verbindung festzustellen ist. Aus den Kurven läßt sich ablesen, daß sich der Verlauf der Datenrate nicht ganz symmetrisch zum Abstand der Fahrzeuge verhält. Dies läßt sich durch die Zeit für den Verbindungsaufbau erklären, die bei dieser Geschwindigkeit noch tolerierbar ist. Die Probleme mit dem *Slow Start* Verhalten von TCP im drahtlosen Umfeld sind hinlänglich bekannt. Offensichtlich war die Übertragungsqualität im Versuch jedoch so gut, daß dies keinen nennenswerten Effekt hatte.

In einer weiteren Meßreihe wurde untersucht, welchen Einfluß die Bildung von Kommunikationsketten auf das Kommunikationsverhalten besitzt. Abbildung 5.8 zeigt das Testszenario für die Kommunikation dreier Fahrzeuge in einer Kette. Fahrzeug S bewegt sich dabei nicht. Fahrzeug A fährt zuerst los, anschließend zeitverzögert Fahrzeug B. Dabei gibt es einen Zeitraum, in dem die Fahrzeuge eine Kommunikationskette bilden. Die beiden fahrenden Fahrzeuge wenden für den Test entlang der Strecke, dabei kommt es zu einer direkten Kommunikation aller drei Fahrzeuge,

⁹Der TCP Durchsatz wurde wie der UDP Durchsatz mit Hilfe von *Iperf* ermittelt.

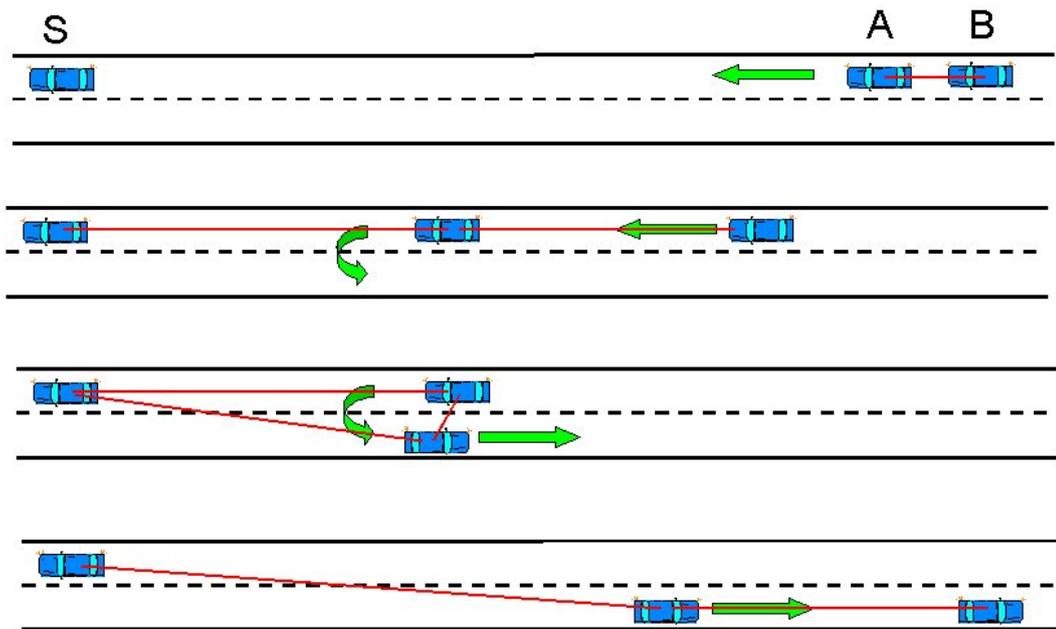


Abbildung 5.8: Testszenario Kommunikationskette

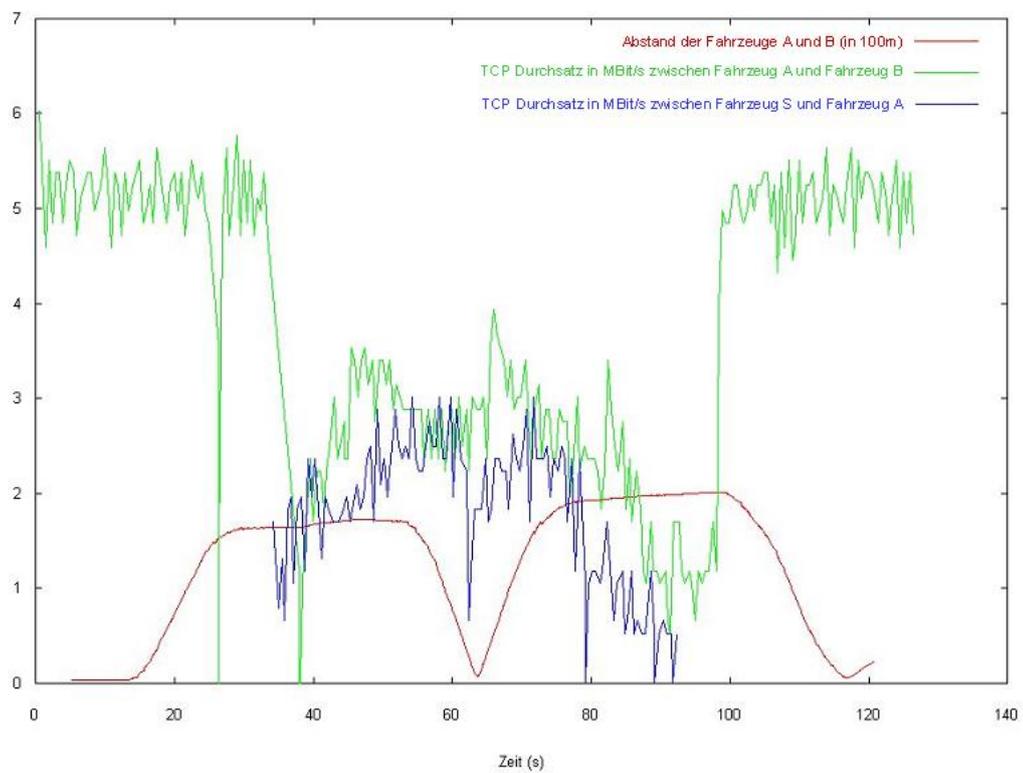


Abbildung 5.9: TCP Durchsatz einer Fahrzeugkommunikationskette

die sich dann in Kommunikationsreichweite befinden. Beim Zurückfahren bilden sie wieder eine Kommunikationskette. Das Ergebnis dazugehöriger Messungen bei einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/h zwischen den Fahrzeugen A und B zeigt Abbildung 5.9.

In diesem Szenario senden die beiden Fahrzeuge S und A. Es ist erkennbar, daß zwischen den Fahrzeugen S und A erst nach ca. 35 Sekunden Daten übermittelt werden. Diese Datenübermittlung startet, sobald eine Verbindung von S zu A etabliert wurde. Die beiden Verbindungen teilen sich den verfügbaren Kanal, d.h. statt ca. 5 Mbit/s stehen jedem Fahrzeug noch etwa 2,5 Mbit/s zur Verfügung. Grundsätzlich funktioniert die Kommunikation also auch in einer Kette und bei neu hinzutretenden Fahrzeugen sehr gut. Zum Zeitpunkt des Hinzutretens des neuen Knotens nimmt der TCP Durchsatz der bestehenden Verbindung zwischen Fahrzeug A und B zunächst rapide ab. Dieses Verhalten kann unter anderem mit Hidden Node Effekten und dem RTS/CTS Protokoll von IEEE802.11 erklärt werden, ist im Detail jedoch noch näher zu analysieren. Ggfs. kann durch Protokolladaptionen die Zeitspanne des reduzierten Datendurchsatzes verringert werden. Dies wurde im Rahmen der Arbeiten zu CARISMA nicht durchgeführt. Ziel war der Nachweis der grundsätzlichen Eignung der WLAN Kommunikationstechnik, die durch die Meßergebnisse bestätigt wird.

5.2 Beschreibung und Modellbildung

5.2.1 Modellierung von Fahrzeug Ad-hoc Netzen

Zur Beschreibung und Analyse verschiedener Aspekte von CARISMA werden ein Netzmodell und ein Kommunikationsmodell benötigt. Das Netzmodell beschreibt die topologischen Eigenschaften von VANETS, d.h. welcher Teilnehmer zu welchem Zeitpunkt mit welchem anderen Teilnehmer kommunizieren kann. Es ist eine rein beschreibende Abbildung des Kommunikationsnetzes, das sich ergibt, wenn Automobile mit drahtlosen Kommunikationseinrichtungen (im Falle von CARISMA gemäß dem IEEE 802.11b Standard) ausgestattet werden. Das Netzmodell setzt damit die Rahmenbedingungen für die Kommunikation. Das Kommunikationsmodell beschreibt darauf basierend das Verhalten der einzelnen Netzteilnehmer in Bezug auf Versand, Empfang und Weiterreichen von Datenpaketen. Im Gegensatz zum rein deskriptiven Netzmodell beinhaltet das Kommunikationsmodell spezifische CARISMA Designentscheidungen in Bezug auf das Kommunikationsverhalten. In Abschnitt 5.4 werden die CARISMA Routingmechanismen vorgestellt, deren Design ausschließlich vom Netzmodell abhängt. Im Kapitel 7 wird dann die autonome Kommunikation von Inhalten beschrieben, für die das Netzmodell die Rahmenbedingungen setzt, die aber in erster Linie von den Informationsbedürfnissen der Netzteilnehmer abhängt. Im folgenden wird also zunächst das CARISMA Netzmodell beschrieben. Alle weiteren Betrachtungen basieren auf den Annahmen dieses Modells. Die Notation lehnt sich dabei an die Konventionen der Graphentheorie an¹⁰.

Ziel des CARISMA Netzmodells ist es, die dynamische Topologie von VANETS zu beschreiben. Es besteht aus dem CARISMA Mobilitätsmodell, das die Regeln für die initiale Verteilung und die Bewegung der Fahrzeuge vorgibt, sowie folgenden Modellparametern:

¹⁰Für eine ausführliche Einführung in die Graphentheorie sei auf Jungnickel oder Diestel verwiesen [89, 53].

- der Kommunikationsreichweite r
- der Datendurchsatzrate Θ
- dem Abschirmungskoeffizienten ξ

Mit der für alle Netzteilnehmer festen Kommunikationsreichweite r wird vereinfachend angenommen, daß jeder Teilnehmer mit der gleichen Leistung sendet, keine Umwelteffekte auftreten und alle mit der gleichen Antenne ausgerüstet sind und die gleiche Empfangssensitivität besitzen, mit anderen Worten also zwei Teilnehmer genau dann miteinander kommunizieren können, wenn ihre euklidische Distanz kleiner als r ist. Alle Kommunikationskanäle sind dann bidirektional¹¹ und Knotenverbindungen sind immer symmetrisch¹². Die Netztopologie läßt sich damit als ungerichteter Graph beschreiben und allein aus der Menge der Netzknoten und ihren Positionen berechnen.

Weiterhin wird eine gemeinsame Übertragungstechnologie mit einem zuverlässigen Kanal zugrunde gelegt. Diese Übertragungstechnologie ermöglicht einen maximalen Datendurchsatz von Θ Bit/s. Der mögliche Durchsatz hängt in der Realität ab von Signalstärke und Rauschen, die sich wiederum aus der Entfernung und weiteren Umweltbedingungen (z.B. Interferenzen, Luftfeuchtigkeit) ergeben. Im Modell wird Θ als konstant angenommen.

Obwohl auf die Berücksichtigung von Umwelteinflüssen auf Kommunikationsbeziehungen prinzipiell verzichtet wird, so kann eine Eigenschaft der Kommunikationsbeziehungen nicht außer Acht gelassen werden. Im fraglichen Frequenzbereich von einigen Gigahertz ist für eine sichere Datenübertragung eine Sichtverbindung notwendig. Während Bäume und Sträucher zwar abschirmen, in der Regel eine Verbindung aber noch zulassen, ist bei blockierenden Gebäuden eine Datenübertragung in aller Regel nicht mehr möglich. Insbesondere in innerstädtischen Szenarien ist dies zu berücksichtigen. Dies geschieht mittels einer einfachen Heuristik. Dabei existieren Kanten nur dann, wenn eine Sichtverbindung zwischen den Endknoten besteht. Die Berechnung der Sichtverbindung ist abhängig vom Abschirmungskoeffizienten ξ . Die genaue Berechnung der Abschirmung wird im Zusammenhang mit dem CARISMA Mobilitätsmodell erläutert.

Durch die Mobilität der Netzknoten ändert sich die Topologie des Netzes permanent. Zu einem festen Zeitpunkt t_0 besitzt das Netz jedoch eine eindeutige Topologie, die auf der Basis der Netzmodellannahmen aus den Knotenpositionen berechnet werden kann. Diese Momentaufnahme sei als *topologischer Schnappschuß* bezeichnet. Ein topologischer Schnappschuß eines VANETS zu einem Zeitpunkt t_0 ist dann ein ungerichteter Graph mit der Knotenmenge V aller Netzknoten und der Kantenmenge E , die sich nach folgender Regel ergibt: Eine Kante zwischen zwei Knoten v_i und v_j existiert genau dann, wenn die Entfernung der beiden Knoten maximal so groß ist wie die Kommunikationsreichweite r und die beiden Knoten nicht durch die Sichtverbindung blockierende Häuser abgeschirmt sind. Formal dargestellt, wobei $d_{ij}(t_0)$ die euklidische Entfernung der beiden Netzknoten bezeichnet und $LOS_{\xi}(i, j, t_0)$ bedeutet, daß zwischen den Knoten eine Sichtverbindung (*Line Of Sight*) besteht, die vom Abschirmungsfaktor ξ abhängt)

$$E(t_0) = \{(i, j) | d_{ij}(t_0) \leq r \wedge LOS_{\xi}(i, j, t_0)\}$$

¹¹In realen Ad-hoc Netzen kommen auch unidirektionale Kanäle vor.

¹²Wenn Knoten A Knoten B hören kann, dann kann auch Knoten B Knoten A hören.

Die Kapazität jeder Kante beträgt maximal Θ . Die Kantenkapazitäten sind jedoch nicht unabhängig voneinander. Alle Kanten eines Knoten sind immer gleichzeitig aktiv. Bei (virtuell) gleichzeitigen Kommunikationsbeziehungen eines Knotens v_i zu mehreren seiner Nachbarn ist daher die Summe der Übertragungsraten der einzelnen Kommunikationsbeziehungen plus der Datenrate der von v_i versendeten Broadcast- und Multicastpakete kleiner oder gleich der maximalen Datendurchsatzrate ($\theta_i + \sum_{v_j \in NB(v_i)} \theta_{ij} \leq \Theta$, wobei $NB(v_i) = \{v_j | (i, j) \in E\}$ die Menge der Nachbarknoten von v_i , θ_i die Datenrate von Broadcast- und Multicastpaketen und θ_{ij} die Übertragungsrate der Kommunikationsbeziehung zwischen v_i und v_j bezeichnet).¹³ Dies gilt darüber hinaus auch für alle gleichzeitig aktiven Kommunikationsbeziehungen seiner Nachbarn, somit

$$\theta_i + \sum_{j \in NB(i)} (\theta_{ij} + \theta_j + \sum_{k \in NB(j)} \theta_{jk}) \leq \Theta$$

5.2.2 Eigenschaften des Netzmodells

Die Problematik von Ad-hoc Netzen besteht in der Dynamik der Netztopologie durch die Mobilität der Teilnehmer. Die Anforderungen an Kommunikationsverfahren sind deshalb grundsätzlich umso höher, je größer die Relativgeschwindigkeit der Netzteilnehmer ist, da sich die Topologie des Netzes dadurch schneller ändert. Einen weiteren wesentlichen Einfluß auf die Kommunikationsverfahren besitzt die Größe des Netzes. Auch hier nehmen die Anforderungen an die Verfahren mit steigender Netzwerkgröße zu.

In Abbildung 5.10 werden verschiedene Netztypen hinsichtlich dieser beiden Parameter verglichen. Personal Area Networks (PANs) verbinden Geräte, die ein Mensch am Körper trägt. Sowohl Größe als auch Topologieänderungen eines solchen Netzes sind sehr klein. In Büroumgebungen steigen die Werte der beiden Parameter. Sensornetze können sehr viele Netzwerkknoten umfassen, weisen jedoch in der Regel keine oder nur geringe Topologieänderungen im Lauf der Zeit auf. Fußgänger-netze können ebenfalls viele Netzwerkknoten umfassen. Fußgänger bewegen sich dabei aber mit relativ geringen Geschwindigkeiten. Militärische Netze können sehr vielfältig sein und eine große Menge an Knoten umfassen, die sich auch sehr schnell bewegen. Die Netzteilnehmer in VANETS bewegen sich ebenfalls mit relativ hohen Geschwindigkeiten und umfassen potentiell sehr viele Teilnehmer. Obwohl daher VANETS hohe Anforderungen an die Kommunikationsverfahren stellen, zeichnen sie sich durch besondere Charakteristika aus, die sich für einen effizienten Protokollentwurf nutzen lassen.

Charakteristisch für VANETS sind in diesem Zusammenhang die Verteilung und das Mobilitätsverhalten der Teilnehmer, außerdem die besondere Umgebungssituation. Die Netzknoten in einem VANET sind nicht gleichmäßig auf einer Fläche verteilt. Stattdessen bewegen sie sich entlang fester Bahnen, die unmittelbar durch die Topographie des Straßennetzes vorgegeben sind. Zusätzlich

¹³Zu einem Zeitpunkt kann immer nur ein Paket auf dem Kanal (d.h. im Graphenmodell auf allen Kanten) unterwegs sein. Deshalb sei von virtuell gleichzeitigen Kanälen gesprochen. θ_{ij} bezeichnet jeweils die mittlere Datenrate der Kommunikationsbeziehung von v_i und v_j . Es kann auch eine Kommunikationsbeziehung zu mehreren (Multicast) oder allen (lokaler Broadcast) Nachbarknoten bestehen (θ_i).

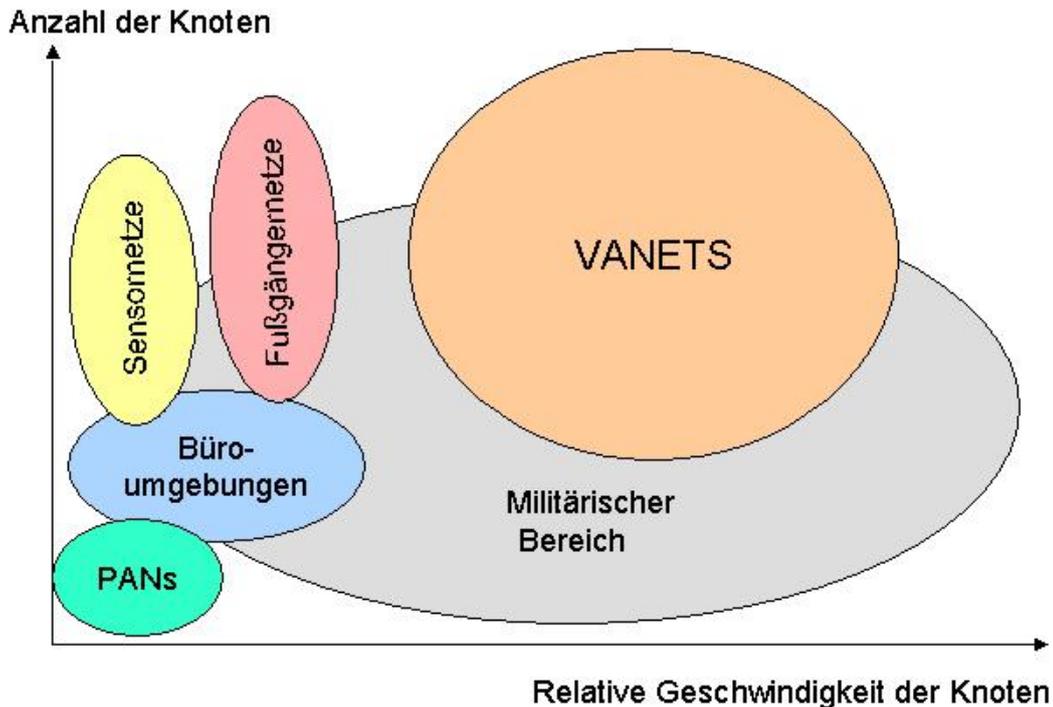


Abbildung 5.10: Ad-hoc Netzwerk Klassifikation

besitzen die speziellen Anwendungen mit ihren besonderen Anforderungen spezifische Kommunikationsmuster.

Die Teilnehmer sind entlang der Straßen quasi kettenförmig angeordnet. Sie bewegen sich hintereinander oder in entgegengesetzte Richtungen mit entsprechend entweder geringer oder großer Relativgeschwindigkeit. Diese Ketten sind miteinander verbunden an Kreuzungen oder Einbiegungen - je nach Verkehrsdichte und Anteil der VANET Teilnehmer. An Kreuzungen und Einbiegungen ist durch das Abbremsen und Warten der Fahrzeuge die Knotendichte größer, so daß eine ungleichmäßige Dichteverteilung gegeben ist. Kreuzungen in Stadtgebieten sind problematisch, da Verbindungen hier durch die Bebauung nur sehr kurzzeitig möglich sind. Abhängig vom Straßentyp sind die Fahrzeugdichte und die Geschwindigkeiten größer oder kleiner. Verteilung und Anzahl der Teilnehmer weisen zudem charakteristische Muster in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit auf. Diese VANET Eigenschaften werden im CARISMA Mobilitätsmodell berücksichtigt.

5.2.3 Mobilitätsmodell

Mobilitätsmodelle für Ad-hoc Netze

Da die Netztopologie eines Ad-hoc Netzes unmittelbar von der räumlichen Verteilung und dem Mobilitätsverhalten der Netzteilnehmer abhängt, ist das Mobilitätsmodell eine wichtige Grundlage für die Analyse des Verhaltens von Ad-hoc Kommunikationsprotokollen in verschiedenen Netzszenarien. Die Art der Bewegung als Grund für Topologieänderungen spielt eine entscheidende

de Rolle für die Effizienz und damit für den Entwurf und die Analyse von Routingalgorithmen. Wie und wie schnell sich die Topologie ändert, hängt dabei nicht nur von der Geschwindigkeit der einzelnen Teilnehmer ab, sondern auch von der Verteilung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung, von bevorzugten Aufenthaltsorten und von Abhängigkeiten zwischen den Teilnehmern. Für die Evaluierung von VANETS ist ein Mobilitätsmodell notwendig, das die wesentlichen Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens von Automobilen abbildet. Es ist dabei nicht notwendig, jedes Detail der Bewegung exakt mathematisch zu beschreiben. Entscheidend ist, daß einerseits eine Verteilung zustande kommt, die der realen Fahrzeugverteilung nahe kommt und andererseits das Mobilitätsverhalten hinsichtlich der Geschwindigkeiten und Trajektorien die wesentlichen Elemente des realen Verhaltens abbildet.

Einfache Mobilitätsmodelle betrachten geradlinige Bewegungen, deren Richtung sich immer wieder zufällig ändert [72], z.T. eingeschränkt durch einen maximalen Winkel [211]. Bei McDonald und Znati ist die Dauer der geradlinigen Bewegung negativ exponentialverteilt [136]. Die Geschwindigkeit ist eine normalverteilte Zufallsvariable und bleibt bis zur jeweils nächsten Richtungsänderung, die zufällig gleichverteilt erfolgt, konstant. Die Bahn eines Knotens, dessen Mobilitätsmodell diesen Regeln folgt, ist in Abbildung 5.11 ganz links dargestellt. In diesem Beispiel wurde die Größe des Simulationsgebietes mit 1000m*1000m gewählt. Die durchschnittliche Länge eines Bewegungsschrittes betrug 20m, gestartet wurde in der Mitte. Beim zeitdiskreten sogenannten *Random Drunken Walk* Modell [124] wählen alle Knoten in jedem Zeitschritt eine neue zufällige Richtung. Beim zeitkontinuierlichen *Random Waypoint* Modell [87] wählen Knoten einen zufälligen Zielpunkt innerhalb des Simulationsgebietes, den sie dann geradlinig ansteuern. Ein Beispiel für eine *Random Waypoint* Trajektorie zeigt die zweite Bahn von links in Abbildung 5.11. Diese Modelle beschreiben offenkundig nicht das Verhalten automobiler Bewegung.

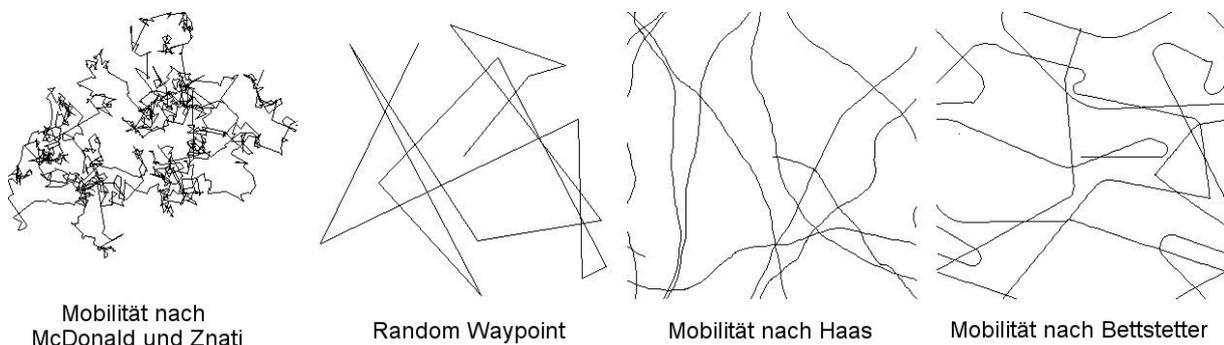


Abbildung 5.11: Beispiele für Trajektorien erzeugt durch verschiedene Mobilitätsmodelle

Bei dem von Haas [73] zur Evaluierung des Zone Routing Protokolls (ZRP) verwendeten Mobilitätsmodell werden bei jedem Uhrtick sowohl Geschwindigkeit als auch Richtung geändert. Sie werden dabei aber nicht absolut neu gewählt. Stattdessen wird ihr Betrag um einen zufälligen gleichverteilten Wert reduziert oder erhöht, wodurch weichere Bewegungsmuster erreicht werden, was den Mobilitätseigenschaften von Fahrzeugen näher kommt. Ein Beispiel für eine Bewegungsbahn, die nach diesem Mobilitätsmodell auf einem 1000m*1000m großen Simulationsterrain mit einer mittleren Geschwindigkeit von $20 \frac{m}{s}$ und einer mittleren Beschleunigung von $\pm 2.5 \frac{m}{s^2}$ berechnet wurde, ist in Abbildung 5.11 als zweite von rechts zu sehen. Das Simulationsterrain ist dabei zyklisch geschlossen. Auch bei Bettstetter [17] findet sich ein Mobilitätsmodell, das kon-

tinuierliche Änderungen von Geschwindigkeit und Richtung beinhaltet. Nach Zeitintervallen negativ exponentialverteilter Länge werden zufällig eine neue Zielgeschwindigkeit und Zielrichtung gewählt. Die Änderung erfolgt dann aber nicht in einem Zeitschritt, sondern in Stufen über mehrere Zeitschritte. Zusätzlich ist eine sofortige rechtwinklige Richtungsänderung möglich und Geschwindigkeiten passen sich an Kurvenradien an, so daß dieses Modell das Verhalten von Automobilen schon recht gut abbildet. Abbildung 5.11 zeigt ein Trajektoriebeispiel mit den gleichen Parametern wie bei Haas, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind jedoch Maximalwerte, die maximale Verzögerung beträgt $5 \frac{m}{s^2}$, die mittlere Dauer bis zur Änderung der Zielgeschwindigkeit 25s, die mittlere Dauer bis zur Änderung der Zielrichtung 25s sowie die minimale Zeit bis zum Erreichen der Zielrichtung 4s und die maximale Zeit bis zum Erreichen der Zielrichtung 10s.

Während dieses Modell das Mobilitätsverhalten einzelner Fahrzeuge recht gut beschreibt, wird der entscheidende Faktor der Abhängigkeit der Teilnehmer nicht berücksichtigt. Teilnehmer in VANETS bewegen sich alle auf wenigen, durch das Straßennetz vorgegebenen Bahnen und interagieren dabei. Dieses Problem besitzen alle diese Mobilitätsmodelle, da die Netzknoten initial auf der betrachteten Fläche jeweils zufällig gleichverteilt und ihre Bewegungen voneinander unabhängig sind. Diese Annahme ist für VANETS nicht geeignet, da Fahrzeuge sich in aller Regel auf Straßen befinden, d.h. nur ganz bestimmte Positionen für den Aufenthalt möglich sind und sich die Fahrzeuge in ihrer Bewegung gegenseitig beeinflussen.

Die Trajektorien der VANET Teilnehmer müssen sich demnach an einem Straßennetz orientieren. Damit sind auch die Zeitpunkte und Möglichkeiten zur Richtungsänderung weitgehend festgelegt. Eine neue Richtung kann nur jeweils an Kreuzungspunkten eingeschlagen werden. Dies ist analog zum Random Drunken Walk Modell durch eine zufallsbasierte Wahl einer der abzweigenden Straßenabschnitte möglich. Alternativ kann analog zum Random Waypoint Modell eine Zielkoordinate auf dem Straßennetz angesteuert werden. Die Richtungswahl an einer Kreuzung ist dann abhängig von der Methode zur Berechnung und Auswahl der Route zu diesem Zielpunkt. Die Wahl der Geschwindigkeit ist sinnvollerweise ebenfalls nicht zufällig, sondern orientiert sich an den auf bestimmten Straßen gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten. Zudem beeinflussen sich Fahrzeuge gegenseitig in ihrer Bewegung. Zur Analyse des Verkehrsflusses wurden Verkehrsmodelle entwickelt, die die Probleme der Geschwindigkeitswahl und gegenseitigen Beeinflussung berücksichtigen. Welche Konzepte dabei für ein VANET Mobilitätsmodell übernommen werden können, wird im nächsten Abschnitt untersucht.

Verkehrsmodelle

Verkehrsmodelle wurden entwickelt, um das Verhalten des Straßenverkehrs zu untersuchen und beispielsweise Stauprognosen erstellen zu können. Man unterscheidet mikroskopische und makroskopische Modelle (siehe dazu auch [99]). Mikroskopische Verkehrsmodelle beschreiben das Verhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers und seine Wechselwirkungen mit anderen Teilnehmern. Daraus berechnen sich jeweils Positionen und Geschwindigkeiten. Makroskopische Verkehrsmodelle nehmen eine aggregierte Sichtweise ein. Mit ihnen lassen sich makroskopische Größen wie Verkehrsdichte, Mittelwert und Varianz der Geschwindigkeiten berechnen. Da für eine Analyse von VANETS Position und Geschwindigkeit der einzelnen Teilnehmer bekannt sein müssen, kommt somit nur die Verwendung mikroskopischer Verkehrsmodelle in Betracht.

Die Modelle von Nagel-Schreckenberg [147] und Krauß [114] beschreiben beide zeitdiskret das Verhalten von sich hintereinander kollisionsfrei bewegenden Fahrzeugen. Das Nagel-Schreckenberg Modell diskretisiert die Position und die Geschwindigkeit durch Bewegung in Zellschritten und läßt sich so als zellulärer Automat formalisieren, während bei Krauß Position und Geschwindigkeit stetige Variablen sind. Bei Nagel-Schreckenberg wird in jedem Zeitschritt die neue Geschwindigkeit in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit und der Zahl freier Zellen vor dem Fahrzeug berechnet. Das Modell von Krauß berücksichtigt zusätzlich die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs und berechnet einen stetigen Wert für Verzögerung oder Beschleunigung. Auch menschliche Ungenauigkeiten werden miteinbezogen. Die Ortsdiskretisierung bei Nagel-Schreckenberg erlaubt eine schnellere Berechnung, die jedoch durch diesen zusätzlichen Abstraktionsschritt dazu führt, daß der maximale Durchsatz deutlich geringer ausfällt und somit die Beschreibung weniger genau ist. Zudem erlaubt das Nagel-Schreckenberg Modell, ein Fahrzeug aus maximaler Geschwindigkeit in einem Zeitschritt auf Null abzubremesen. Das Verhalten, beispielsweise beim Nähern einer Kreuzung, an der bereits ein Fahrzeug wartet, wird damit nur schlecht abgebildet.

Das CARISMA Mobilitätsmodell für VANETS

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Mobilität von Automobilen im Straßenverkehr gegenüber den oben vorgestellten Mobilitätsmodellen ist die Begrenzung der Bewegung entlang des Straßennetzes. Grundlage eines möglichst realistischen Mobilitätsmodells ist daher die Verteilung der Knoten und ihre Bewegung entlang von Straßen. Aufgrund analoger Überlegungen stellen Tian et al. ein graphenbasiertes Mobilitätsmodell vor [188]. Das CARISMA Mobilitätsmodell besteht aus folgenden Elementen:

- dem Straßennetzmodell
- der initialen Verteilung der Netzknoten
- den Bewegungsregeln für die Netzknoten

Da Verteilung und Bewegung der Knoten auf das Straßennetz begrenzt sind, wird zunächst das CARISMA Straßennetzmodell beschrieben. Topographische Informationen über den Verlauf von Straßen existieren in digitalen vektorisierten Straßenkarten. Für das CARISMA Mobilitätsmodell dienen im ESRI Shapefile Datenformat vorliegende digitale Straßenkarten als Eingangsdaten (Informationen zum Shapefile Format finden sich im Anhang C). Jede im Shapefile vorliegende Straßenkarte kann als Eingabeparameter verwendet und auf beliebige Ausschnitte begrenzt werden. Straßen sind in diesem Format als Folge von Punkten (als sogenannte *Polyline*) repräsentiert, deren Positionen über ihren Längen- und Breitengrad codiert ist. Für die Verwendung in den Simulationen werden diese Punkte in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert, d.h. der Teil der Erdoberfläche, auf dem das Straßennetz definiert ist, wird auf eine Ebene projiziert. Die räumliche Ausdehnung des Netzes wird damit prinzipiell durch ein Rechteck in der zweidimensionalen euklidischen Ebene begrenzt. Auf die Berücksichtigung der dritten Dimension, d.h. der unterschiedlichen Höhe der Netzknoten, wird verzichtet.

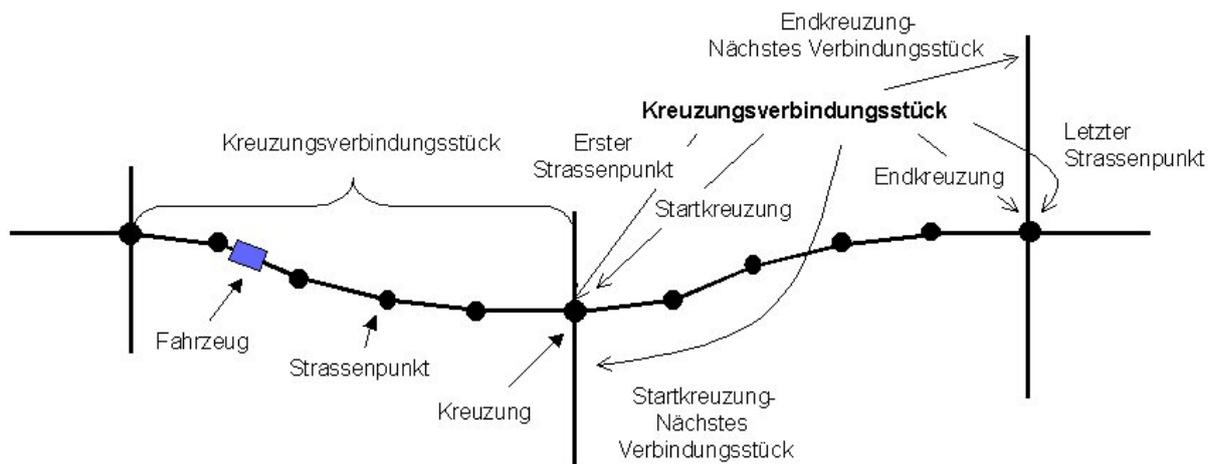


Abbildung 5.12: Datenstrukturelemente des Straßennetzmodells

Das Shapefile Datenformat enthält damit zwar die geographische Lage der Straßen, die für eine Visualisierung ausreichend ist. Die Informationen über die Straßentopologie ist aber nur indirekt vorhanden. Deshalb werden für CARISMA aus den Straßenverläufen die Kreuzungspunkte extrahiert und eine neue logische Datenstruktur generiert. Die Elemente dieser Struktur sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Das Straßennetz wird durch Kreuzungen, Kreuzungsverbindungsstücke und Straßenpunkte repräsentiert. Jede Kreuzung besitzt einen eindeutigen Straßenpunkt. Sie besitzt zusätzlich einen Zeiger auf das jeweils erste und letzte ein- und ausgehende Kreuzungsverbindungsstück. Kreuzungsverbindungsstücke bestehen aus einfach verketteten Listen von Straßenpunkten. Sie besitzen Zeiger auf die Start- und Endkreuzung, d.h. sie sind gerichtet, was die Berücksichtigung von Einbahnstraßen ermöglicht.¹⁴ Die ein- und ausgehenden Kreuzungsverbindungsstücke an einer Kreuzung sind ihrerseits jeweils untereinander verkettet. Die Zeigerstruktur ist in Abbildung 5.13 verdeutlicht. Betrachtet man das die beiden Kreuzungen verbindende Stück, so ist es ein aus der linken Kreuzung ausgehendes Stück, das dort mit den anderen ausgehenden Kreuzungsverbindungsstücken verkettet ist. An der rechten Kreuzung ist es mit den anderen eingehenden Verbindungen verzeigert. Nicht dargestellt sind die jeweils in die entgegengesetzte Richtung laufenden Verbindungsstücke.

Die initiale Verteilung der Fahrzeuge erfolgt durch eine zufällig gleichverteilte Wahl eines Kreuzungsverbindungsstückes für jedes Fahrzeug. Es wird dabei so nah wie möglich an der Endkreuzung platziert. Befinden sich also mehrere Fahrzeuge auf einem Verbindungsstück, so ist die initiale Positionierung dergestalt, daß alle Fahrzeuge hintereinander auf Einfahrt in die nächste Kreuzung warten. Ist die Kapazität eines Verbindungsstückes ausgelastet, so wird zufällig ein neues ausgewählt. Diese Verteilungsstrategie führt dazu, daß die Fahrzeuge initial relativ gleichmäßig über dem Simulationsgebiet und über die Straßen verteilt sind.

Sind die Fahrzeuge dann unterwegs, so müssen an jeder Kreuzung Richtungsentscheidungen getroffen werden. Dabei kann analog zum *Random Drunken Walk* Modell zufällig eine der verfügbaren Kreuzungsverbindungsstücke befahren werden. Dies führt jedoch zu einem ziellosen Herumfahren. Bei dieser Variante wird keine Unterscheidung zwischen Haupt- und Nebenstraßen ge-

¹⁴Aufgrund fehlender Daten wurde von dieser Möglichkeit jedoch kein Gebrauch gemacht.

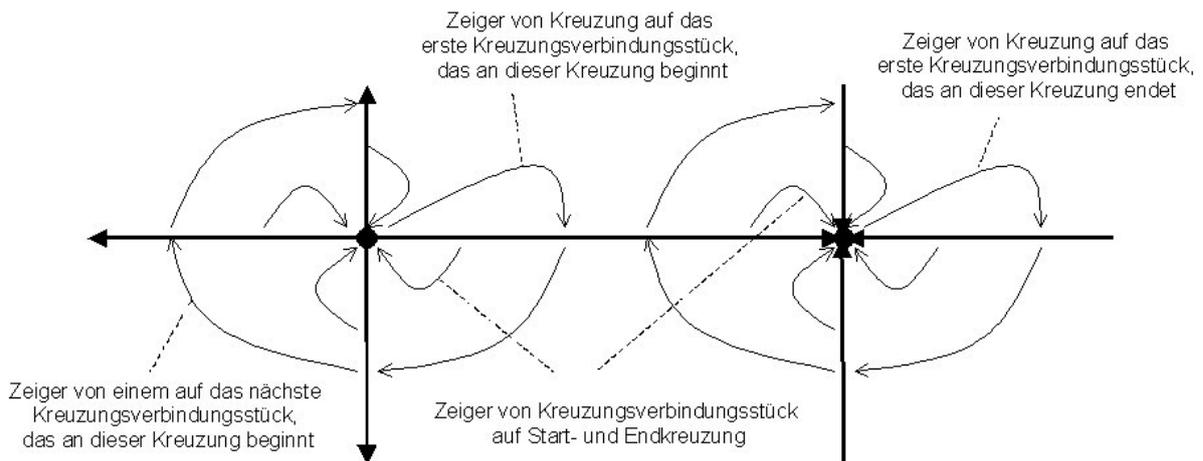


Abbildung 5.13: Verzeigerung zwischen Kreuzungen und Kreuzungsverbindungsstücken

treffen. Die Verteilung der Fahrzeuge bleibt gleichmäßig über dem Straßennetz, da keine Strecken oder Straßen bevorzugt benutzt werden. Es bildet den realen Straßenverkehr daher nur ungenügend ab. Fahrtzieladaptive Informationsverbreitungsverfahren lassen sich damit nicht simulieren.

Ein die Realität besser abbildendes Verhalten erhält man, wenn jedes Fahrzeug in Anlehnung an das *Random Waypoint* Modell einen Zielpunkt bestimmt, zu dem es die kürzeste Route entlang des Straßennetzes wählt. Zur Bestimmung des Zielpunktes lassen sich unterschiedliche Verfahren einsetzen. Es kann beispielsweise zufällig gleichverteilt eine Kreuzung gewählt werden. Wird zufällig ein Punkt des Terrains gewählt und als Zielcoordinate die Kreuzung, die diesem Punkt am nächsten liegt (dies entspricht einer Zuordnung gemäß dem Voronoi Diagramm, das sich aus allen Kreuzungspunkten bestimmt), so würde dies bei relativ gleichmäßig verteilten Kreuzungen, beispielsweise in Städten, zu ähnlichem Verhalten führen wie bei der zufälligen Wahl einer Kreuzung. In ländlichen Gebieten hingegen wären beispielsweise Landstraßenkreuzungen oder Autobahnauffahrten relativ häufig gewählte Zielkoordinaten. Bei diesen mit dem *Random Waypoint* Modell verwandten Verfahren tritt wie bei diesem ein bekannter Effekt [17] auf. Da viele Fahrzeuge durch die Mitte des Simulationsterrains fahren, ist die Fahrzeugdichte hier größer, nachdem die Simulation einige Zeit gelaufen ist. Verhindern läßt sich dies durch einen Ringschluß des Gebietes, das dann quasi zu einem Torus wird, was aber bei Straßennetzen schwierig ist. Analog zu [17] kann als Zielcoordinate ein Punkt mit negativ exponential verteilter Entfernung in zufällig gleichverteilter Richtung gewählt werden. Dieser Punkt wird dann auf die nächstgelegene Kreuzungskordinate abgebildet. Sofern nicht anders beschrieben, wird dieses Vorgehen allen im weiteren beschriebenen Simulationen zugrunde gelegt.

Wählen die Fahrzeuge immer die Route, auf der sie zu den anvisierten Zielpunkten die kürzeste Distanz zurücklegen, so zeigt sich, daß sich auf bestimmten Straßen eine wesentlich höhere Fahrzeugdichte einstellt als auf anderen Straßen. Dieses Verhalten bildet das reale Verkehrsverhalten recht gut ab. Die Wahl der Route kann auch die Zahl der Kreuzungen, verbunden mit potentieller Wartezeit, oder die geschätzte Verkehrsdichte mit berücksichtigen. Damit ließen sich interessante Simulationen hinsichtlich der Verkehrswirkung verschiedener Strategien durchführen. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit aber nicht durchgeführt.

Die Geschwindigkeitswahl der Fahrzeuge bei der Fahrt zu den jeweiligen Zielkoordinaten lehnt sich an das Verkehrsmodell von Krauß an. Die Fahrzeuge besitzen dabei eine räumliche Ausdehnung. Zur Berechnung der Geschwindigkeit wird die Zeit diskretisiert und die Geschwindigkeit für jedes Fahrzeug im Sekundentakt neu berechnet. Mit diesen Geschwindigkeiten bewegen sich die Fahrzeuge dann im nächsten Zeitschritt vorwärts. Es wird jeweils die maximal mögliche Geschwindigkeit gewählt, die innerhalb der erlaubten Höchstgeschwindigkeit v_{max} ¹⁵ liegt und ein rechtzeitiges Abbremsen vor Kreuzungen und vorausfahrenden Fahrzeugen bei einer maximalen Verzögerung von b garantiert¹⁶. Die maximale Beschleunigung beträgt a . Ein Zufallswert (r ist eine Zufallszahl zwischen 0 und 1) reduziert die gewählte Geschwindigkeit und bringt ein Element unterschiedlichen Fahrverhaltens ins Modell ein:

$$v_{n+1} = \max(0, v_n - b, \min(v_{max}, v_n + a, v_{safe}) - 0,5ar)$$

An Kreuzungen treten dann Konflikte zwischen Fahrzeugen auf, wenn diese in die gleiche Straße einbiegen wollen. Die Einfahrt wird in diesem Fall analog den in den Vereinigten Staaten üblichen *4-Way Stops* geregelt: die Fahrzeuge halten an und fahren in Eintreffreihenfolge über die Kreuzung. Zwei Fahrzeuge können gleichzeitig in eine Kreuzung einfahren, wenn sie unterschiedliche Zielstraßenstücke ansteuern. Auf eine Modellierung von Ampelkreuzungen und Vorfahrtsstraßen wurde verzichtet. Auch beim Einfahren in Straßen an Kreuzungen werden Sicherheitsabstände zum Vordermann eingehalten.

5.3 Konnektivität

5.3.1 Metriken

Aufgrund der Dynamik und der Komplexität des Systems ist eine formal-analytische Beschreibung nur für stark vereinfachte Systeme und Teilprobleme möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Analyse von Systemeigenschaften und Verhalten einerseits sowie die Evaluierung neu entworfener Algorithmen andererseits hauptsächlich mit Hilfe von Simulationen. Den nachfolgend durchgeführten Simulationen liegt das Straßennetz der Stadt München zugrunde.

Untersucht man topologische Schnappschüsse von simulierten Netzen, so können Aussagen zur Konnektivität des Netzgraphen abgeleitet werden. Konnektivität ist die Voraussetzung für den Aufbau von Multihop-Kommunikationskanälen und die schnelle Verbreitung von Informationen. Es existieren Arbeiten zur Konnektivität von Ad-hoc Netzen für zufällig in einem Gebiet gleichverteilte Netzknoten [206, 55, 171, 18, 69, 42, 181]. Es ist aber bislang nicht bekannt, wie sich die Konnektivität von VANETS verhält. Aus der hier durchgeführten Analyse läßt sich ablesen, wieviel Fahrzeuge ausgestattet sein müssen, damit Netzteilnehmer durchschnittlich mit einer großen Zahl anderer Netzteilnehmer verbunden sind. Es stellt sich dabei die Frage, was eine sinnvolle Metrik für die Beschreibung der Konnektivität von VANETS ist.

¹⁵ Aufgrund mangelnder Datenbasis wurde die Orientierungsgeschwindigkeit für die Simulation in dieser Arbeit auf $18\text{m/s} = 64,8\text{km/h}$ festgelegt.

¹⁶ Die genaue Berechnung ist in Anhang D beschrieben.

In den existierenden Arbeiten zur Untersuchung der Konnektivität interessiert die Autoren meist die Frage, wie groß die Knotendichte sein muß, damit der das Netz beschreibende Graph mit hoher Wahrscheinlichkeit verbunden ist, d.h. daß zwischen jedem Knotenpaar ein Weg im Graphen existiert. Näherungsweise wird manchmal die Wahrscheinlichkeit für die notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung untersucht, daß kein Knoten im Netz isoliert ist (z.B. bei Bettstetter [18]). Diese Maße sind für VANETS nicht geeignet, da in Seitenstraßen nahezu immer mit isolierten Teilnehmern zu rechnen ist. Stattdessen ist es wichtig zu wissen, bei welcher Teilnehmerdichte sich große Zusammenhangskomponenten bilden und wie die räumliche Ausdehnung dieser Komponenten ist. Daraus läßt sich weiter die mittlere Entfernung erreichbarer Knoten ableiten sowie die Wahrscheinlichkeit dafür, zu einem Knoten in einer bestimmten Entfernung einen Kommunikationskanal aufbauen zu können. Als Metrik für den Zusammenhangsgrad von VANETS diene deshalb der Anteil der Netzteilnehmer c , mit denen ein Knoten durchschnittlich verbunden ist. Bezeichne n die Gesamtknotenzahl und c_i die Anzahl der Knoten, zu denen von Knoten i im Graphen ein Weg existiert, dann gilt

$$c = \frac{\sum_{i \in V} c_i}{n * (n - 1)}$$

Die Abhängigkeit dieser Zahl von der Menge und Größe der Zusammenhangskomponenten im Graphen wird anhand einer alternativen, äquivalenten Berechnung deutlich. Bezeichne n_x die Anzahl der Zusammenhangskomponenten der Größe x in einem Graphen, dann gilt

$$c = \frac{\sum_{x=1..n} x * (x - 1) * n_x}{n * (n - 1)}$$

Erläuterung: Die Zahl der Nachbarn eines Knoten in einer Zusammenhangskomponente der Größe x beträgt $x - 1$. Da dies für alle Knoten in der Komponente gilt, ist diese Zahl mit x zu multiplizieren. Gibt es mehrere Komponenten dieser Größe, so ist der Wert entsprechend mit n_x zu multiplizieren. Dies ist für alle existierenden Zusammenhangskomponenten durchzuführen und aufzusummieren. Schließlich ist diese Zahl noch durch alle Knoten zu dividieren und in Relation zur maximal möglichen Zahl von Nachbarn $n - 1$ zu setzen.

Die Konnektivität in Ad-hoc Netzen mit zufällig gleichverteilten Netzknoten hängt allgemein ab von der Flächengröße des Netzes A , der Knotenanzahl n , die sich zur Knotendichte $\rho_V = \frac{n}{A}$ normieren lassen, und der Sendereichweite r . In VANETS spielen als weitere Faktoren der Straßenverlauf (Autobahn oder Innenstadt) und Abschirmungen, z.B. durch Bebauung eine Rolle. Im Gegensatz zu vielen anderen Mobilitätsmodellen ist die Knotendichte in VANETS nicht homogen. Dies ist einerseits in der Bewegung entlang der Straßen begründet, andererseits aber auch darin, daß sich Fahrzeuge nicht unabhängig voneinander bewegen. Deshalb hängt die Konnektivität zusätzlich ab vom Anteil ausgestatteter Fahrzeuge im Verhältnis zu den nicht ausgestatteten. Auch im CARISMA Mobilitätsmodell ändert sich die Knotendichteverteilung im Laufe der Zeit.

5.3.2 Konnektivität entlang einer Straße

Zunächst sei die Konnektivität entlang einer einzelnen Straße betrachtet. Dies ist für alle Verbindungen entlang von einzelnen Straßen relevant, die über die Kommunikationsreichweite hinaus-

gehen, insbesondere für Hauptstraßen, Landstraßen und Autobahnen. Hartenstein et al. simulieren in [74] ein Szenario mit gegebener Fahrzeugdichte und einem Ausstattungsgrad von zehn Prozent auf einer 2*2 spurigen Autobahn.

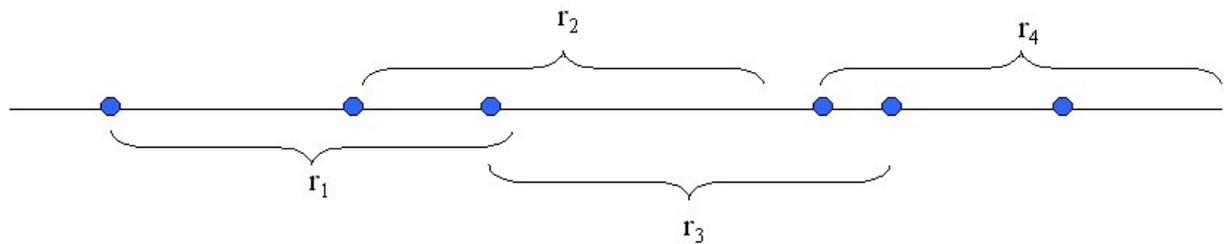


Abbildung 5.14: Eindimensionale Konnektivität

Modelliert man Autobahnen und Landstraßen für die Konnektivätsbetrachtung vereinfachend als eindimensionale Netze, so kann man auf existierende Ergebnisse in Form von Abschätzungen und analytischen Ausdrücken zur Berechnung der Konnektivität zurückgreifen. Mehrere Fahrspuren schlagen sich dann in einer höheren Knotendichte nieder. In Abbildung 5.14 ist eine beispielhafte Darstellung zu sehen. Alle Knoten befinden sich auf einer Geraden. Für den Aufbau einer Kommunikationsbeziehung ist es notwendig, daß ausgehend vom Startknoten über Zwischenknoten bis zum Zielknoten innerhalb der Kommunikationsreichweite r sich immer mindestens ein Nachbar-knoten befindet, d.h. es darf keine Lücke zwischen Start- und Zielknoten mit einer Länge größer als r auftreten.

Sei die Wahrscheinlichkeit für das Antreffen von Knoten entlang einer Geraden für jede Position gleich (Gleichverteilung der Knotenpositionen¹⁷). Die (homogene) Knotendichte betrage $\rho_V = \frac{i}{l}$ mit im Mittel i Stationen innerhalb einer Strecke l . Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Station sich innerhalb der Strecke l befindet, aber nicht in Reichweite r einer initialen Station, beträgt dann $P = (1 - \frac{r}{l})^i$ für $l \geq r$. Für eine Dichte von i unabhängig voneinander mit gleicher Wahrscheinlichkeit platzierten Stationen ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, daß keine Station innerhalb von r platziert wird, zu $P = (\frac{l-r}{l})^i$, mit $i = \rho_V * l$ also $P = ((1 - \frac{r}{l})^l)^{\rho_V}$. Dies erinnert an die Definition der e-Funktion ($e^x = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{x}{n})^n$) und es gilt im Grenzübergang $\lim_{l \rightarrow \infty} P = e^{-r\rho_V}$. Die räumliche Verteilung der Stationen entlang einer Geraden kann demnach als eindimensionaler Poisson-Prozess modelliert werden.

Santi et al. geben

$$P_{Conn} \geq 1 - (l - r)(1 - \frac{r}{l})^n$$

als untere Schranke für die Wahrscheinlichkeit P_{Conn} an, daß bei einer Menge n entlang einer Geraden der Länge l zufällig platzierten Netzknoten mit Kommunikationsreichweite r alle Knoten miteinander verbunden sind [171]. Wählt man eine feste Länge der gewünschten Kommunikationsstrecke l , so erhält man eine Fläche, die die Mindestwahrscheinlichkeit für eine Verbindung zu einem Kommunikationspartner in dieser Entfernung für verschiedene Kombinationen von Knotendichten und Kommunikationsreichweiten anzeigt. In Abbildung 5.15 ist dies beispielhaft für

¹⁷In der Realität bilden sich zwar häufig Gruppen von Fahrzeugen, insbesondere für mehrspurige Autobahnen und die gleichzeitige Betrachtung beider Fahrtrichtungen diene jedoch die Annahme der Gleichverteilung als ausreichende Näherung.

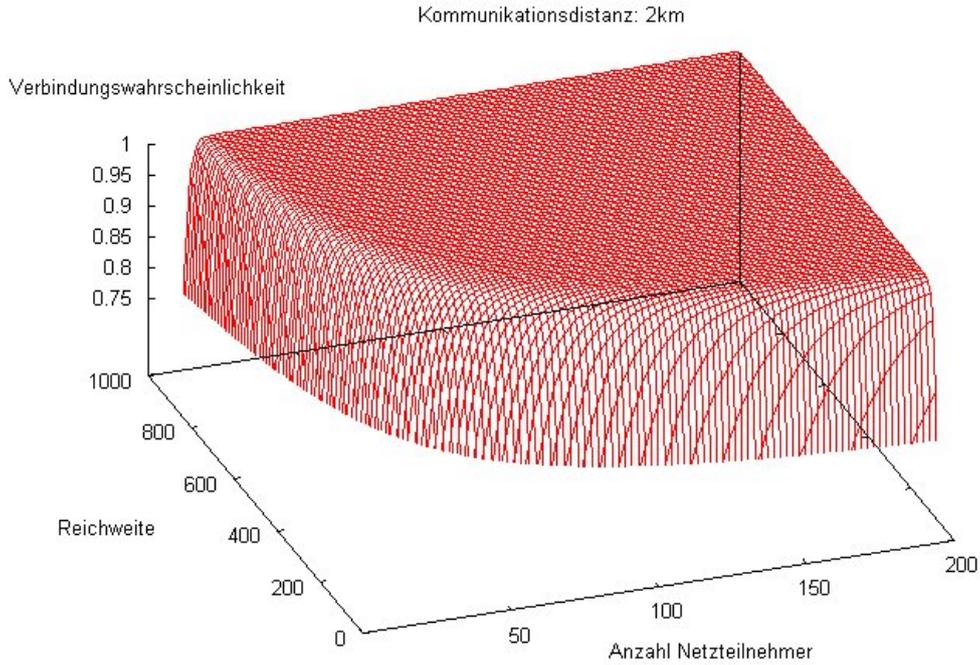


Abbildung 5.15: Mindest-Verbindungswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Kombinationen von Reichweite und Knotendichte für eine Gerade von 2000m Länge

eine zu überbrückende Entfernung von 2km dargestellt. Es ist unmittelbar ersichtlich, daß es kritische Kombinationen von Knotendichte und Kommunikationsreichweite gibt, bei denen die Verbindungswahrscheinlichkeit sehr stark steigt. Dieses Phasenübergangsphänomen als Eigenschaft der Konnektivität von Ad-hoc Netzen wird von Krishnamachari et al. beschrieben, die auf die Verwandtschaft mit “Null-Eins” Eigenschaften von Bernoulli Zufallsgraphen in Bezug auf monotone Grapheneigenschaften wie die Konnektivität hinweisen [115]. Dousse et al. geben eine Formel zur direkten Berechnung von P_{Conn} an [55]. Für $l \geq r$ berechnet sich diese Wahrscheinlichkeit als

$$P_{Conn} = \sum_{i=0}^{\lfloor l/r \rfloor} \frac{(-\rho_V e^{-\rho_V r} (l - ir))^i}{i!} - e^{-\rho_V r} \sum_{i=0}^{\lfloor l/r \rfloor - 1} \frac{(-\rho_V e^{-\rho_V r} (l - (i+1)r))^i}{i!}$$

Mit Hilfe dieser Formel wurden für CARISMA relevante Werte berechnet. In Abbildung 5.16 ist die Verbindungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte und Kommunikationsreichweite für Verbindungen zu 2km und 10km entfernten Kommunikationspartnern dargestellt. Die Abschätzung aus Abbildung 5.15 kommt relativ nahe an diese berechneten Werte heran. Aus dem Graphen der Abbildung 5.17 sind die bei einer Entfernung der Kommunikationspartner von 2km möglichen Kombinationen von Fahrzeugdichte und Kommunikationsreichweite für Verbindungswahrscheinlichkeiten von 20%, 50%, 80%, 90%, 95% und 99% ablesbar. Diese Kurven entsprechen den Schnittlinien einer horizontalen Ebene mit der Fläche aus Abbildung 5.16, wobei die Ebene die z-Achse in der Höhe der jeweiligen Verbindungswahrscheinlichkeit schneidet. Aus der

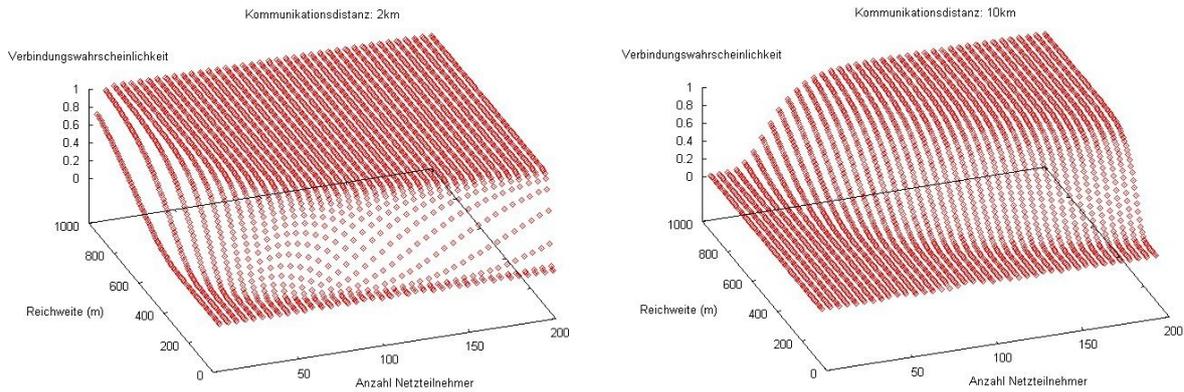


Abbildung 5.16: Verbindungswahrscheinlichkeiten für 2km und 10km Kommunikationsdistanz

Abbildung 5.18 lassen sich die möglichen Kombinationen für eine fast sichere Verbindung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zu Kommunikationspartnern in 1km, 2km, 5km, 10km, 20km und 50km Entfernung entnehmen. Für eine WLAN-typische Reichweite von etwa 400m läßt sich ermitteln, daß für 2km Entfernung etwa 16 Fzg./km für eine fast sichere Verbindung benötigt werden, für 5km etwa 18 Fzg./km und für 20km etwa 23 Fzg./km, d.h. im Mittel ein Fahrzeug ca. alle 63m, 56m bzw. 44m. Die notwendigen Fahrzeugdichten, um Verbindungen zu anderen Fahrzeugen in unterschiedlichen Entfernungen mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten aufbauen zu können, sind in Abbildung 5.19 aufgetragen. Der logarithmische Zusammenhang sorgt dafür, relativ schnell auch größere Entfernungen überbrückt werden können, sobald eine kritische Fahrzeugdichte erreicht ist. Er ist auch aus Abbildung 5.20 gut ersichtlich. Bei Verdoppelung der Fahrzeugdichte erreicht man mit der gleichen Wahrscheinlichkeit einen viermal so weit entfernten Kommunikationspartner.

5.3.3 Innenstadtszenarien

Im Gegensatz zu Autobahnen und Landstraßen lassen sich Straßennetze in Städten nicht durch ein dimensionales Netz beschreiben. Fahrzeuge als Netzknoten bewegen sich in Städten ebenfalls entlang von Straßen, die aber über Kreuzungen und Einmündungen miteinander verbunden sind. Die im Netzmodell getroffene Annahme, daß Teilnehmer unmittelbar Daten von anderen Teilnehmern empfangen können, die sich innerhalb eines Kommunikationsradius r befinden, ist für WLAN Netze in Städten nicht zutreffend. WLAN Verbindungen werden durch Bebauung und andere Hindernisse abgeschirmt. Diese Abschirmung hat entscheidenden Einfluß auf die Konnektivität des Kommunikationsgraphen. In der Realität sind die Abschirmungs-, sowie Beugungs- und Reflexionseffekte nicht trivial. Im folgenden wird die Abschirmung mit Hilfe eines simplifizierenden Modells berücksichtigt. Dieses Modell erhebt nicht den Anspruch, die tatsächlichen Effekte in einer Stadt korrekt abzubilden. Es kann aber als ausreichende Näherung für die Untersuchung der Konnektivität und des Routingverhaltens betrachtet werden. Die für die Konnektivität wesentliche Problematik, Fahrzeuge in Nachbarstraßen aufgrund der Bebauung nicht direkt erreichen zu können, wird durch einen Abschirmungsfaktor in das CARISMA Netzmodell aufgenommen. Dazu wird die Information aus der digitalen Straßenkarte genutzt. Eine direkte Kommunikationsver-

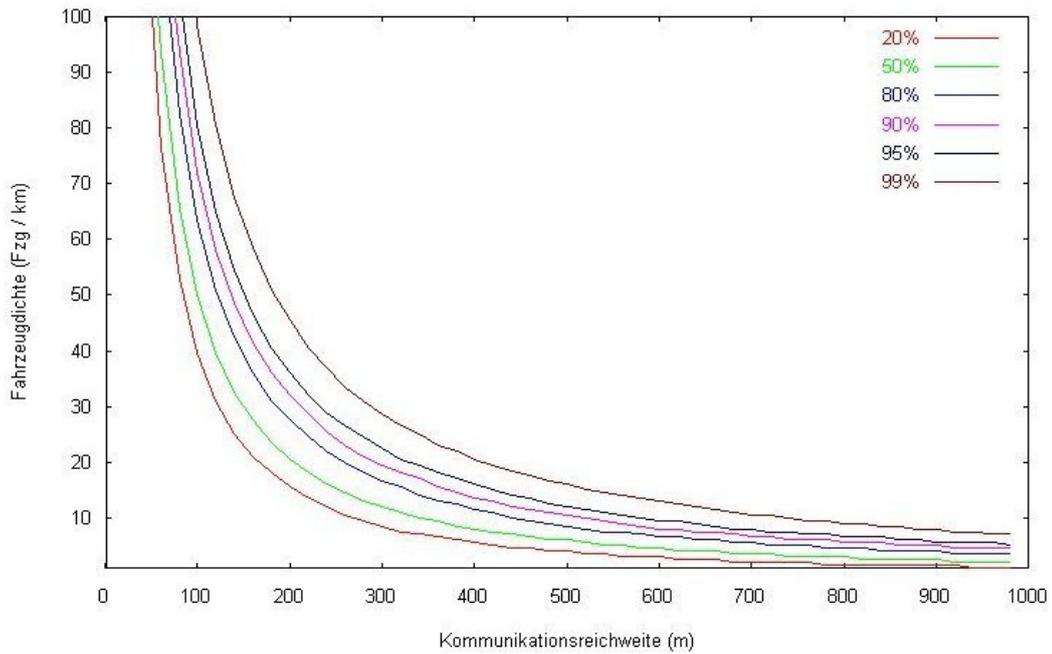


Abbildung 5.17: Kombinationen von Kommunikationsreichweite und Fahrzeugdichte für verschiedene Verbindungswahrscheinlichkeiten (zwischen 20% und 99%) bei einer Entfernung der Kommunikationspartner von 2km

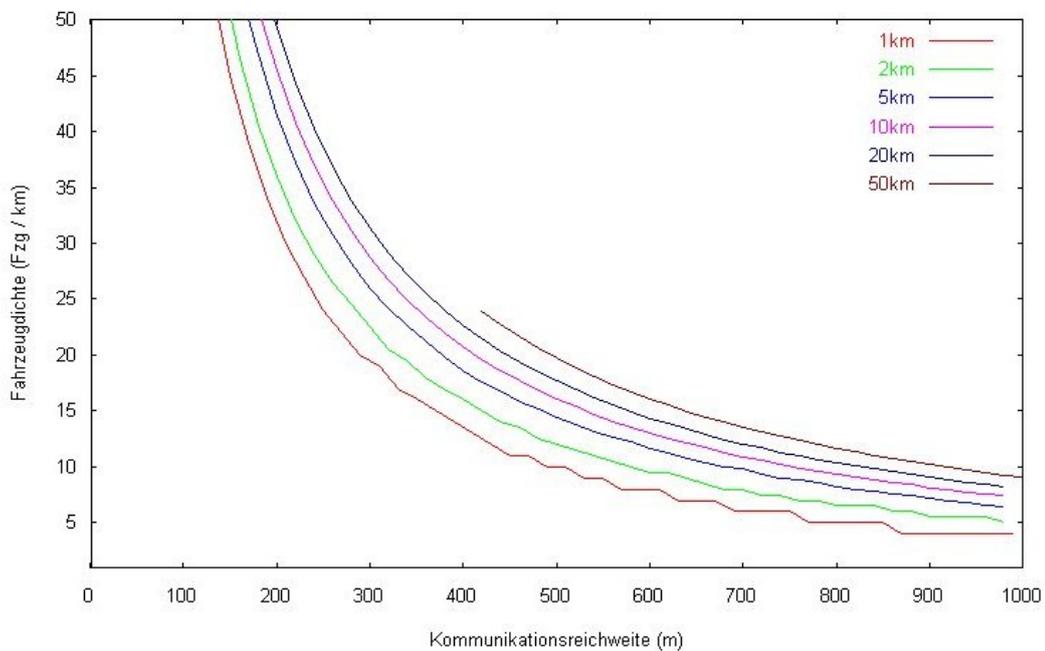


Abbildung 5.18: Kombinationen von Kommunikationsreichweite und Fahrzeugdichte für verschiedene Entfernungen der Kommunikationspartner (zwischen 1km und 50km) mit einer Verbindungswahrscheinlichkeit von 95%

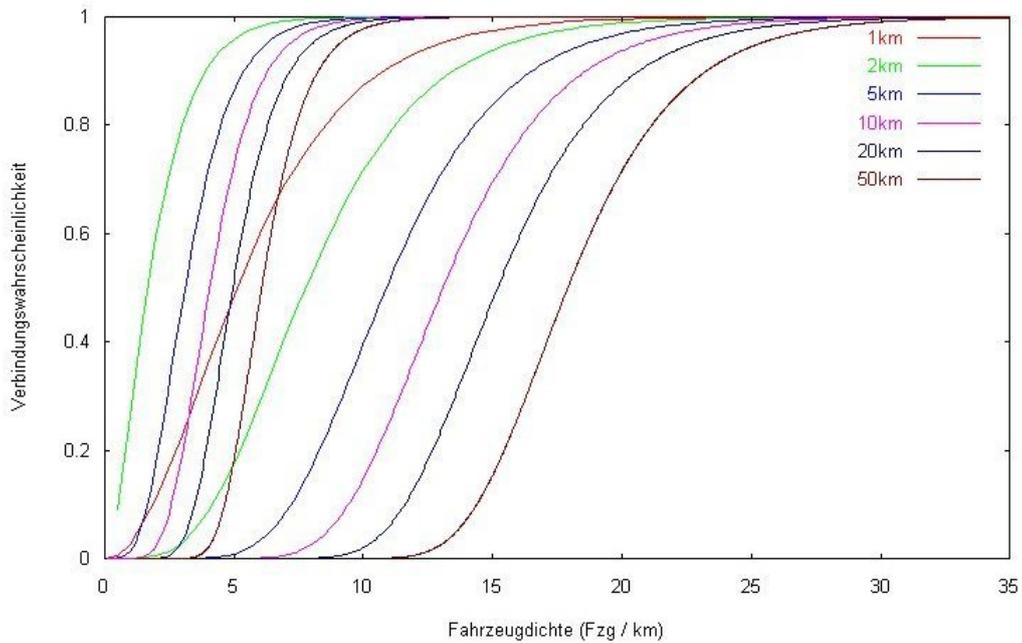


Abbildung 5.19: Verbindungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte für verschiedene Entfernungen der Kommunikationspartner (zwischen 1km und 50km) bei $r = 1000m$ (links, schneller steigend) und $r = 400m$ (rechts, etwas weniger steil verlaufend)

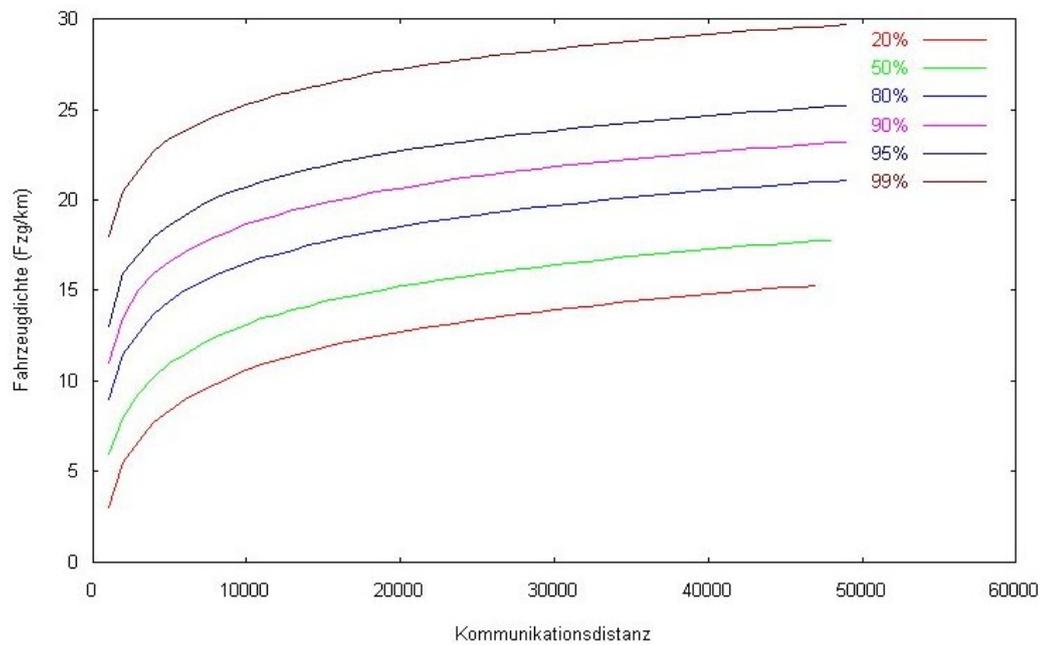


Abbildung 5.20: Notwendige Fahrzeugdichte in Abhängigkeit der Entfernung der Kommunikationspartner für verschiedene Verbindungswahrscheinlichkeiten (zwischen 20% und 99%) bei $r = 400m$

bindung zwischen zwei Fahrzeugen, die weniger als die maximale Kommunikationsreichweite r voneinander entfernt sind, besteht in diesem Modell dann, wenn der minimale Abstand der direkten Verbindungslinie zwischen beiden Netzteilnehmern ($line(i, j)$) vom Straßennetz $STREETS$ an jedem Punkt kleiner als ein vorgegebener Schwellenwert ξ (Gebäudeabschirmfaktor) ist:

$$v_j \in NB(v_i) \Leftrightarrow d_{ij} \leq r \wedge d_{max}(line(i, j), STREETS) \leq \xi$$

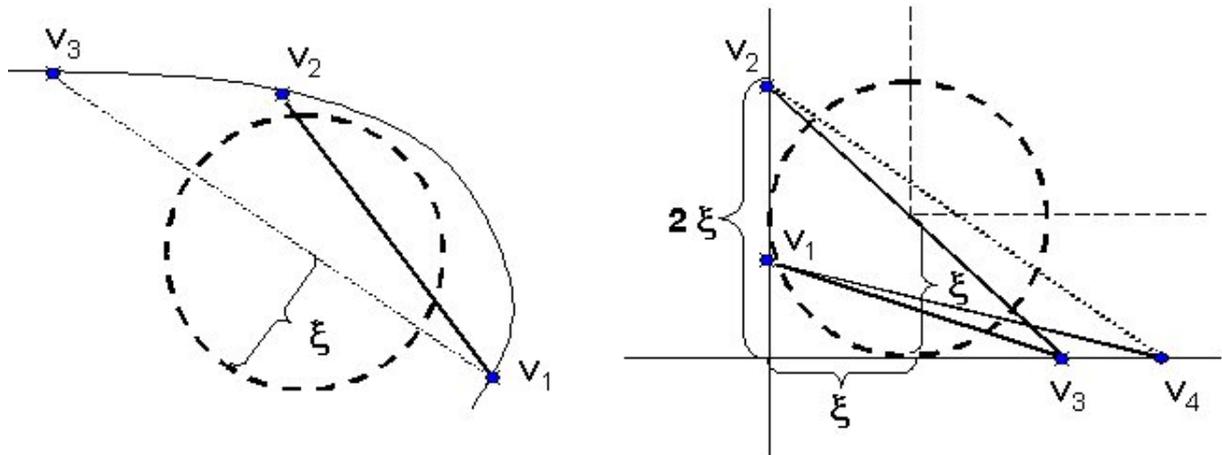


Abbildung 5.21: Auswirkung des Gebäudeabschirmfaktors

Die Bedeutung dieser Regel wird durch Abbildung 5.21 verständlich. Im linken Teil der Abbildung befinden sich drei Fahrzeuge v_1 , v_2 und v_3 , die sich auf einem gebogenen Straßenstück bewegen. Eine Kommunikation innerhalb der Kurve ist nur zwischen den jeweils näheren Fahrzeugen möglich. Die beiden weiter voneinander entfernten Fahrzeuge v_1 und v_3 können nicht direkt miteinander kommunizieren, da es Punkte auf der Verbindung gibt, die weiter als ξ von der Straße entfernt sind. Diese Regel bedeutet an Kreuzungen, daß Fahrzeuge, die nicht weiter als ξ vom Kreuzungsmittelpunkt entfernt sind, im Falle gerader Straßen sicher bis zu ihrer Kommunikationsreichweite mit allen Fahrzeugen in allen Richtungen kommunizieren können. Dies wird aus dem rechten Teil der Abbildung ersichtlich. Auch wenn zwei Fahrzeuge sich außerhalb dieses Bereiches befinden, können sie noch miteinander kommunizieren (z.B. v_2 und v_3). Dabei muß die Gerade der Kommunikationsverbindung den Kreis mit Radius ξ um den Kreuzungsmittelpunkt aber zumindest berühren, d.h. mindestens einer der beiden Kandidaten darf nicht weiter als 2ξ vom Kreuzungsmittelpunkt entfernt sein. In der Abbildung können deshalb v_2 und v_4 nicht miteinander kommunizieren. Der Schwellenwert ξ kann variabel gewählt werden, in der Stadt aufgrund dichter Bebauung bspw. kleiner als auf dem freien Land. Sofern nicht anders angegeben wird in den folgenden Simulationen ein Wert von $\xi = 40m$ angenommen.

Die Auswirkungen des Gebäudeabschirmfaktors werden anhand der Abbildungen 5.22 und 5.23 deutlich. Die Abbildungen zeigen die Visualisierung der CARISMA VANET Simulation. Als Simulationsgebiet ist hier ein Teil des Münchner Stadtgebietes zu sehen. Die Fahrzeuge sind dargestellt als rote Punkte. In Abbildung 5.22 ist keine Gebäudeabschirmung berücksichtigt. Die Verbindung zwischen zwei Teilnehmern hängt hier nur von der Kommunikationsreichweite ab. In Abbildung 5.23 wurde die Gebäudeabschirmung mit $\xi = 40m$ berücksichtigt. Einer geringen



Abbildung 5.22: Simulationsschnappschuß ohne Gebäudeabschirmung



Abbildung 5.23: Simulationsschnappschuß mit Gebäudeabschirmung

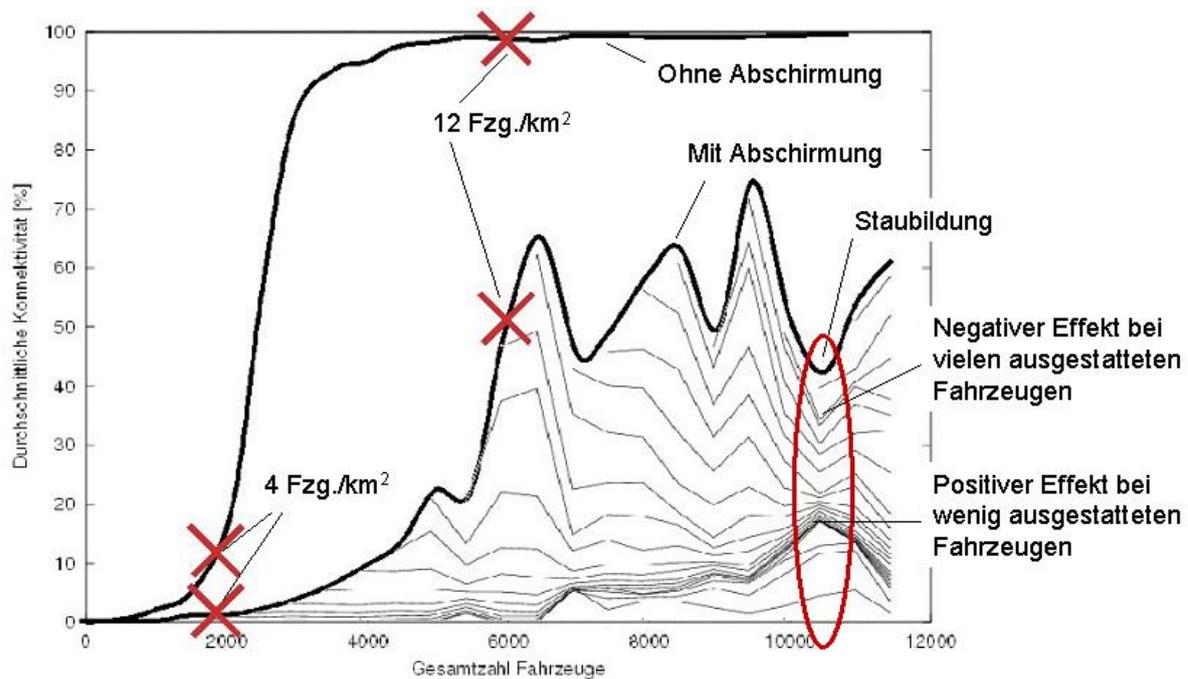


Abbildung 5.24: Konnektivität

Dichte ausgestatteter Fahrzeuge in den jeweils oberen Abbildungen steht eine relativ hohe Dichte in den beiden unteren Abbildungsteilen gegenüber. Die Fahrzeugdichte berechnet sich aus dem Quotienten der Anzahl Netzteilnehmer und der Simulationsfläche. Als Terrain wird jeweils die konvexe Hülle des simulierten Straßennetzes verwendet.

Insbesondere bei höheren Dichten ausgestatteter Fahrzeuge kommt die Wirkung der Gebäudeabschirmung zum Tragen. Die Simulationsergebnisse der zu den Abbildungen 5.22 und 5.23 berechneten Konnektivität c können Abbildung 5.24 entnommen werden. Während in den Simulationsschnappschüssen nur ein Ausschnitt aus dem Münchner Straßennetz dargestellt ist, zeigt der Graph der Abbildung das Ergebnis der Simulation über dem kompletten Münchner Stadtgebiet. Variiert wurde die Anzahl der Fahrzeuge insgesamt (x-Achse) und der jeweilige Anteil der Netzteilnehmer (verschiedene Kurven). Den einzelnen schmalen Linien, immer mit Berücksichtigung der Abschirmung, entsprechen also jeweils verschiedene Anzahlen an ausgestatteten Fahrzeugen, von 500 ganz unten bis 11500 ganz oben.

Bei niedriger Knotendichte bilden sich nur lokal kleinere Zusammenhangskomponenten. Bei einer kritischen Knotendichte werden diese lokalen Zusammenhangskomponenten wie bereits im eindimensionalen Fall relativ schnell zu einer großen Komponente verbunden, wenn keine Abschirmung berücksichtigt wird. Die Gebäudeabschirmung führt dazu, daß die verteilten Zusammenhangskomponenten langsamer zusammenwachsen und der Anstieg der Konnektivität entsprechend weniger steil ausfällt. Zudem gibt es auch bei hohen Knotendichten noch isolierte Netzknoten. Dies äußert sich in einer langsameren Annäherung an eine Konnektivität von 1. Die Berechnung der Konnektivität in Abbildung 5.24 erfolgte nach einer initialen Zeitspanne von 2000 Sekunden, in denen sich die Fahrzeuge nach dem CARISMA Mobilitätsmodell bewegten. Für jede simulierte Fahrzeuganzahl wurden die Fahrzeuge erneut zufällig verteilt und die Bewegung neu berechnet. Dies erklärt,

weshalb die Kurven zwar prinzipiell mit wachsender Fahrzeugzahl steigen, aber nicht monoton. In manchen Fällen bilden sich zufallsbedingt Staus. Durch Staus steigt die Knotendichte in einigen Bereichen des Simulationsgebietes, während sie in anderen sinkt. Bei wenig ausgestatteten Fahrzeugen hat dies einen positiven Effekt auf die mittlere Konnektivität. Umgekehrt kann der Effekt negativ bei vielen ausgestatteten Fahrzeugen sein, wenn durch die lokale Konzentration die Bildung einer großen Zusammenhangskomponente verhindert wird. Dieser Staueffekt läßt sich gut bei der Gesamtfahrzeugzahl von 10500 beobachten.

In der dreidimensionalen Darstellung der Abbildung 5.25 ist die Konnektivität in Abhängigkeit von r und ρ_V ohne Berücksichtigung von Abschirmungseffekten abgebildet. Auffällig ist die Verwandtschaft mit dem Verhalten im eindimensionalen Fall mit dem relativ schnellen Übergang von geringer zu nahezu vollständiger Konnektivität. Abbildung 5.26 zeigt mit den einzelnen Kurven für verschiedene Werte von r notwendige Teilnehmerdichten für gute Konnektivität. Bei kleineren Werten von r wird eine sehr hohe Knotendichte benötigt, während ab einer gewissen Reichweite eine zusätzliche Erhöhung nur wenig bringt. Mit WLAN und einfachen omnidirektionalen Fahrzeugantennen erreichbare Reichweiten von $400m - 500m$ befinden sich gerade in diesem kritischen Bereich und sind somit ausreichend. Ob dies auch noch gilt, wenn die Gebäudeabschirmung ξ mit berücksichtigt wird, beantworten die Abbildungen 5.27 und 5.28 für $\xi = 40m$. Auch hier fällt die für gute Konnektivität benötigte Knotendichte bei Werten um $r = 400m$ deutlich. Es ist zu beobachten, daß der Anstieg besonders bei kleineren Reichweiten flacher ausfällt, während er für größere r sich der S-Kurve annähert. Deren Flanke ist gegenüber den Werten aus Abbildung 5.26 nach rechts verschoben. Ein steiler Anstieg, auch bei $r = 1000m$, erfolgt erst bei Dichten von $\rho_V > 10 \frac{Fzg}{km^2}$ (bei $\xi = 40m$). Demgegenüber sind ohne Abschirmung Dichten von weniger als 5 Fahrzeugen pro km^2 ausreichend. Der zunächst noch ebenfalls recht steile Anstieg bei $\xi = 40$ fällt ab einer erreichten Konnektivität von etwa $c = 0,5$ ab und nähert sich dann wesentlich langsamer einer Konnektivität von $c = 1$ (während ohne Abschirmung bei $r \geq 800m$ eine Konnektivität von $c > 0,95$ bereits bei $\rho_V < 10 \frac{Fzg}{km^2}$ erreicht wird, ist dies bei Abschirmung von $\xi = 40m$ erst bei $\rho_V > 60 \frac{Fzg}{km^2}$ der Fall). Dies läßt sich damit erklären, daß sich eine große Zusammenhangskomponente entlang der Hauptstraßen bildet, es aber einige kleine Zusammenhangskomponenten oder isolierte Knoten in anderen Bereichen des Straßennetzes gibt, die durch Abschirmungseffekte auch bei großen Dichten keinen Anschluß an die große Komponente bekommen.

Die Abbildungen 5.29 und 5.30 zeigen die Ergebnisse bei der Simulation mit stärkerer Berücksichtigung der Gebäudeabschirmung ($\xi = 20m$). Während für kleinere Kommunikationsreichweiten kein wesentlicher Unterschied zur Konnektivität bei $\xi = 40m$ erkennbar ist, gilt dies nicht mehr für größere Kommunikationsreichweiten von mehr als etwa $500m$. Hier bringt die zusätzliche Kommunikationsreichweite keine weitere Verbesserung. Dies erklärt sich aus der Kettenbildung entlang der Straßen, für die die Kommunikationsreichweite entscheidend ist. Für die Verknüpfung dieser Ketten untereinander spielt aber die Gebäudeabschirmung die wesentliche Rolle. Eine Erhöhung der Kommunikationsreichweite hat hierbei nur einen geringen Effekt.

Die Auswirkung unterschiedlich starker Abschirmung werden in den Abbildungen 5.31 und 5.32 ersichtlich. Die Kommunikationsreichweite wurde hier auf den für WLAN Fahrzeugantennen realistischen Wert von $r = 500m$ gesetzt. Die Abschirmung ξ wurde von $\xi = 10m$ bis $\xi = 200m$ in Schritten von $10m$ variiert. Der Abschirmungseffekt ist bei kleinen Werten von ξ sehr groß. Enge Straßen mit einem Häuserabstand von $20m$ haben also einen großen Einfluß auf die Konnektivität.

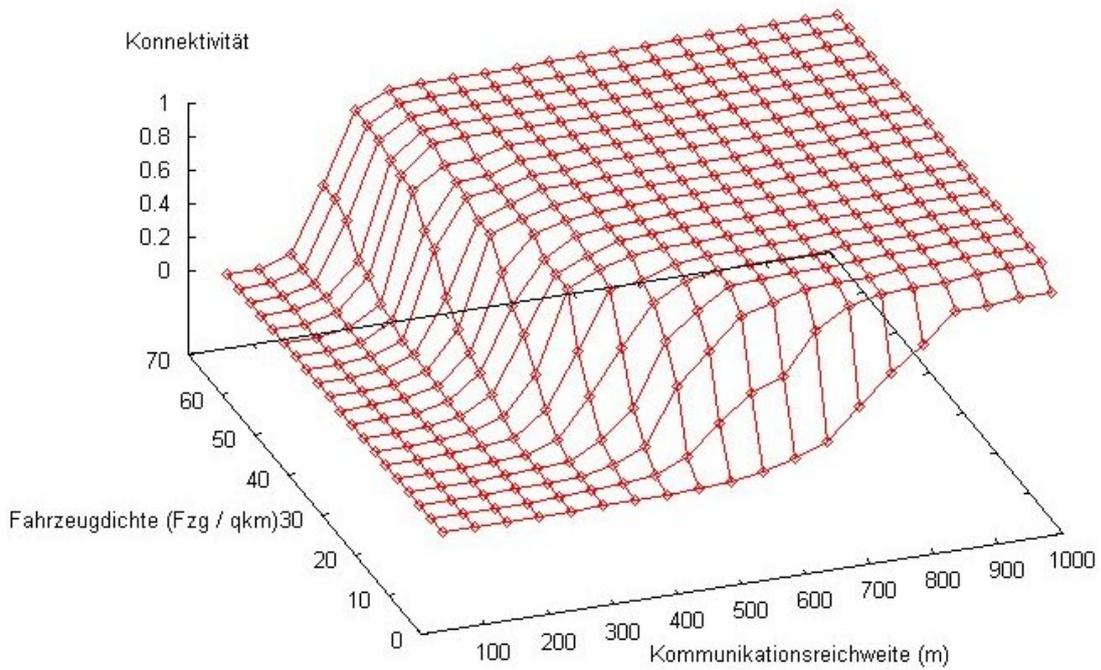


Abbildung 5.25: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r ohne Abschirmung

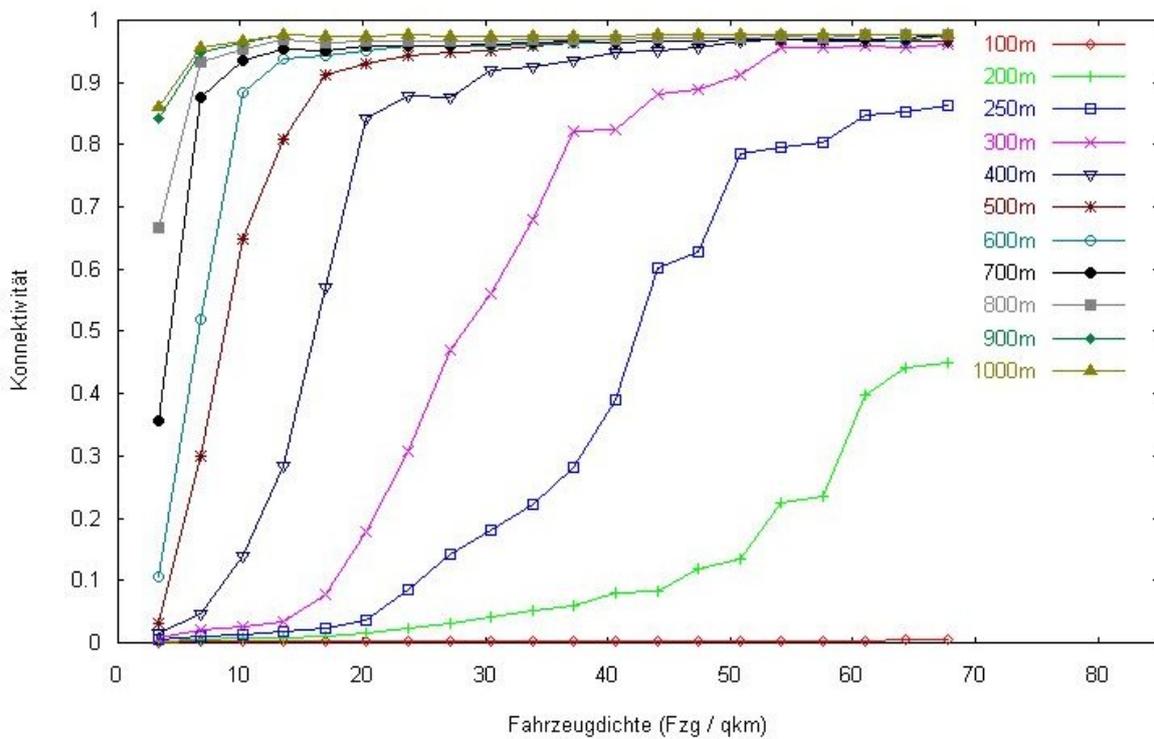


Abbildung 5.26: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r ohne Abschirmung

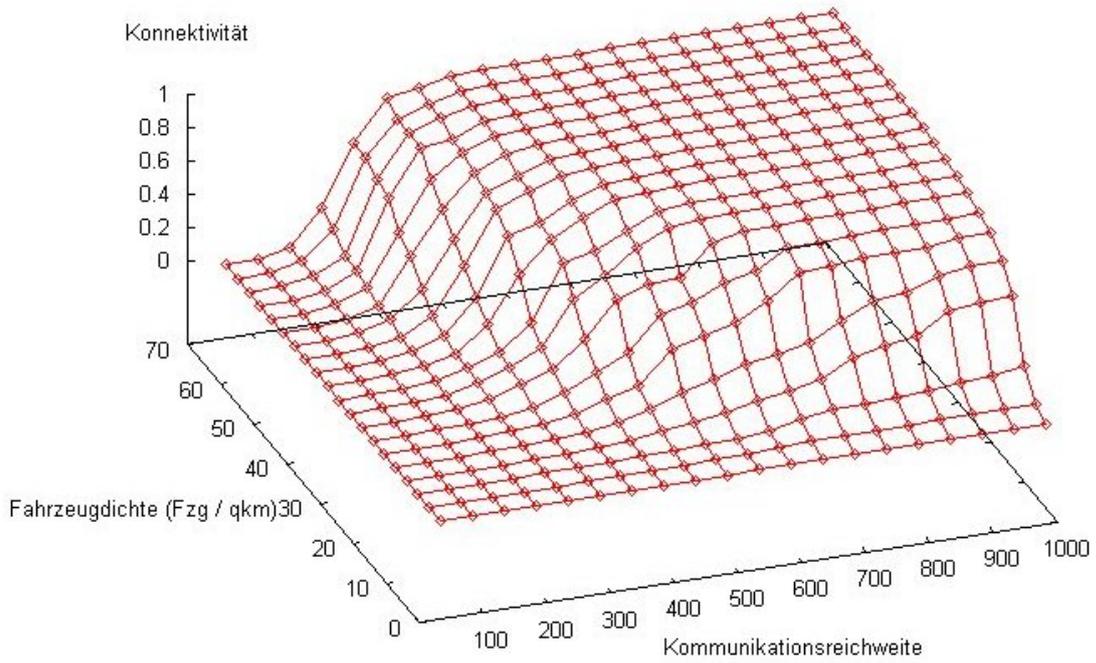


Abbildung 5.27: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r bei $\xi = 40$

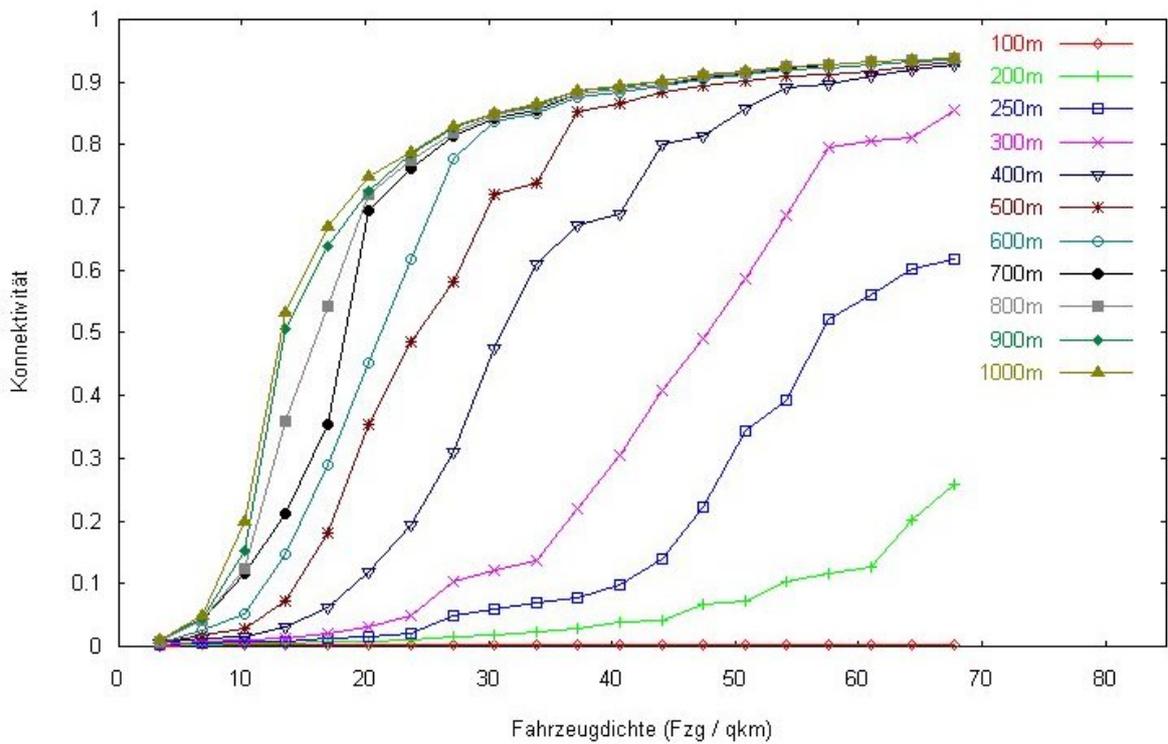


Abbildung 5.28: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r bei $\xi = 40$

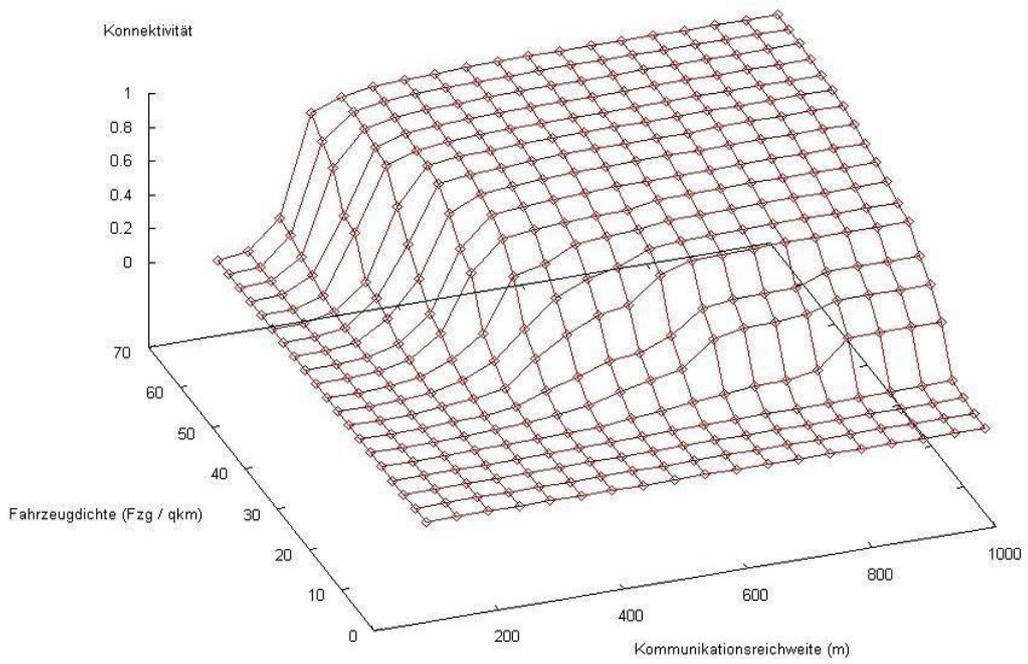


Abbildung 5.29: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V und r bei $\xi = 20$

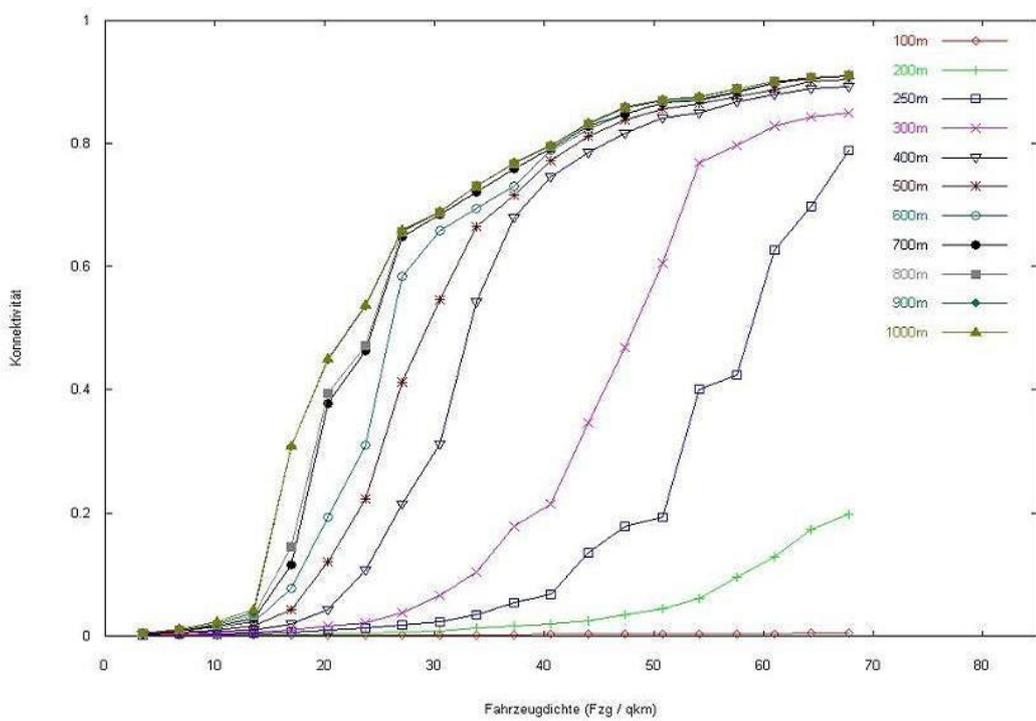


Abbildung 5.30: Konnektivität in Abhängigkeit von ρ_V bei verschiedenen r bei $\xi = 20$

Bei 40m, also auf breiteren Hauptstraßen mit mehreren Spuren ist dieser Einfluß bereits deutlich geringer. Auf diesen größeren Straßen ist zudem in der Regel der Verkehr dichter, so daß sich hier viel schneller größere Zusammenhangskomponenten bilden können, die auch untereinander an großen Kreuzungen miteinander verknüpft sind. Einzelne Fahrzeuge oder kleine Gruppen in Seitenstraßen finden dagegen schwieriger Anschluß an diese Komponenten.

Beobachtet man die Verteilung der Autos bei der Simulation mit dem CARISMA Mobilitätsmodell, so stellt man fest, daß ausgehend von einer relativ gleichmäßigen initialen Verteilung, sich nach einer gewissen Zeit die Fahrzeugdichte entlang bestimmter Straßen erhöht, während sie in anderen Straßen sinkt. Dieser Effekt wurde bereits anhand der Abbildung 5.24 erläutert. Dieses Verhalten erklärt sich aus der Wegewahl zur Zielcoordinate. Jedes Fahrzeug wählt den kürzesten Weg zu seinem Zielpunkt. Hauptstraßen bieten dabei häufig die nicht nur schnellste, sondern auch von der Wegstrecke kürzeste Verbindung. Es ist demnach sinnvoll, sich die Entwicklung der Konnektivität nach einer Einschwingphase der Bewegung und Fahrzeugverteilung anzusehen.

Die Mobilität der Knoten kann also die Konnektivität beeinflussen. Bei den einfachen im vorangegangenen Paragraphen vorgestellten Mobilitätsmodellen wird in der Regel mit einer Gleichverteilung der Netzknoten gestartet. Aufgrund der Mobilität der Knoten ist die Gleichverteilungsannahme nach einiger Zeit aber nicht immer weiterhin gerechtfertigt. Bettstetter zeigt beispielsweise, daß die Bewegungen beim Random Waypoint Modell nach einiger Zeit zu einer kissenförmigen Verteilung der Knoten führen [20].

Bei einer Gleichverteilung der Knoten kann von einer *homogenen Konnektivität* gesprochen werden. Der Erwartungswert der Knotendichte ist dabei an jedem Punkt des Netzes gleich. Dies gilt damit auch für die Konnektivität in beliebig herausgegriffenen, gleich großen Teilgebieten. Die Konnektivitätsheterogenität nimmt mit steigenden Unterschieden der mittleren Knotendichte zu. Neben dieser *räumlichen Heterogenität* kann die Änderung der Knotendichte im Laufe der Zeit beobachtet werden. Dies sei als *zeitliche Heterogenität* bezeichnet.

Das Random Drunken Walk Modell läßt sich damit als dichtehomogenisierendes Mobilitätsmodell charakterisieren, da es asymptotisch zu einer Gleichverteilung führt, d.h. daß es eine zeitliche Heterogenität gibt, wenn nicht mit einer Gleichverteilung gestartet wird, die jedoch immer schwächer wird. Sowohl die räumliche als auch die zeitliche Homogenität nehmen zu. Dagegen ist das CARISMA Mobilitätsmodell durch Kreuzungseffekte einerseits und Bildung lokaler Staus andererseits sowohl räumlich als auch zeitlich heterogen. Normales Random Waypoint ist räumlich heterogen, aber zeitlich asymptotisch homogen.

5.3.4 Erreichbarkeit durch Mobilität in Abhängigkeit der Zeit

Die bisherige Betrachtung bezog sich auf den Zustand von VANETS zu einzelnen Zeitpunkten. Es hat sich herausgestellt, daß die für eine Verbindung zwischen entfernten Knoten notwendige Konnektivität erst bei relativ hohen Teilnehmerdichten erreicht wird, insbesondere wenn Verbindungen über längere Strecken und um Straßenecken herum aufgebaut werden sollen. Für Übertragungen größerer Datenmengen zwischen zwei nicht allzu weit entfernten Teilnehmern können dennoch ausreichend gute Verbindungen möglich sein. Ist die Teilnehmerdichte entlang der Kommunikati-

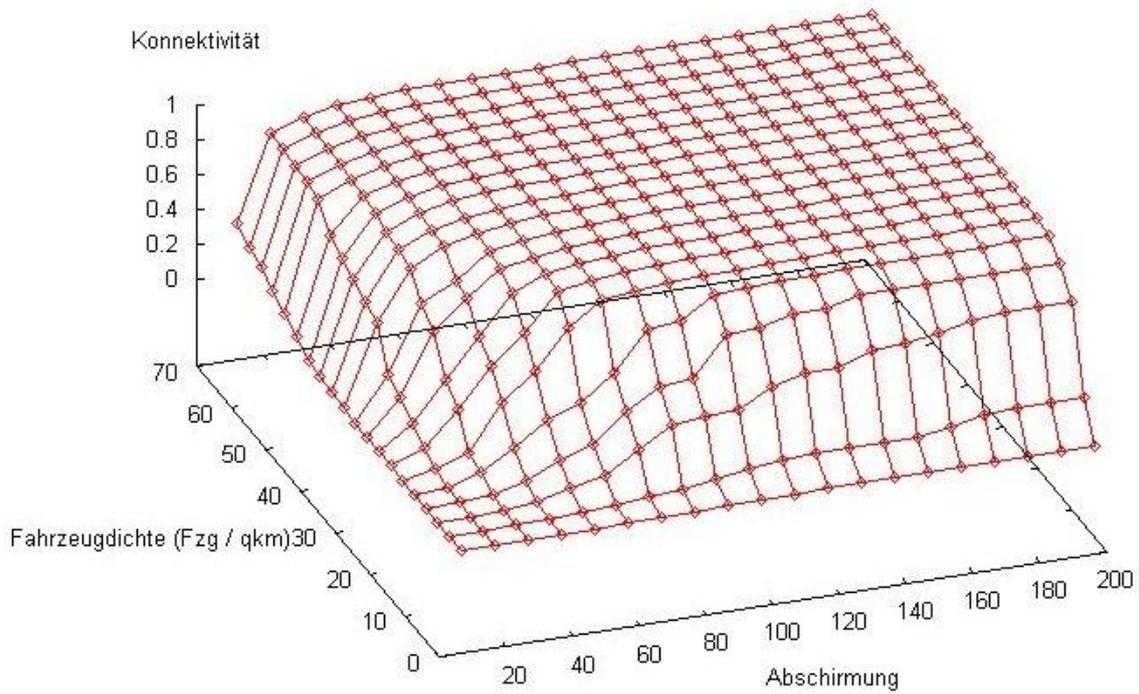


Abbildung 5.31: Auswirkung der Abschirmung auf die Konnektivität in Abhängigkeit der Dichte

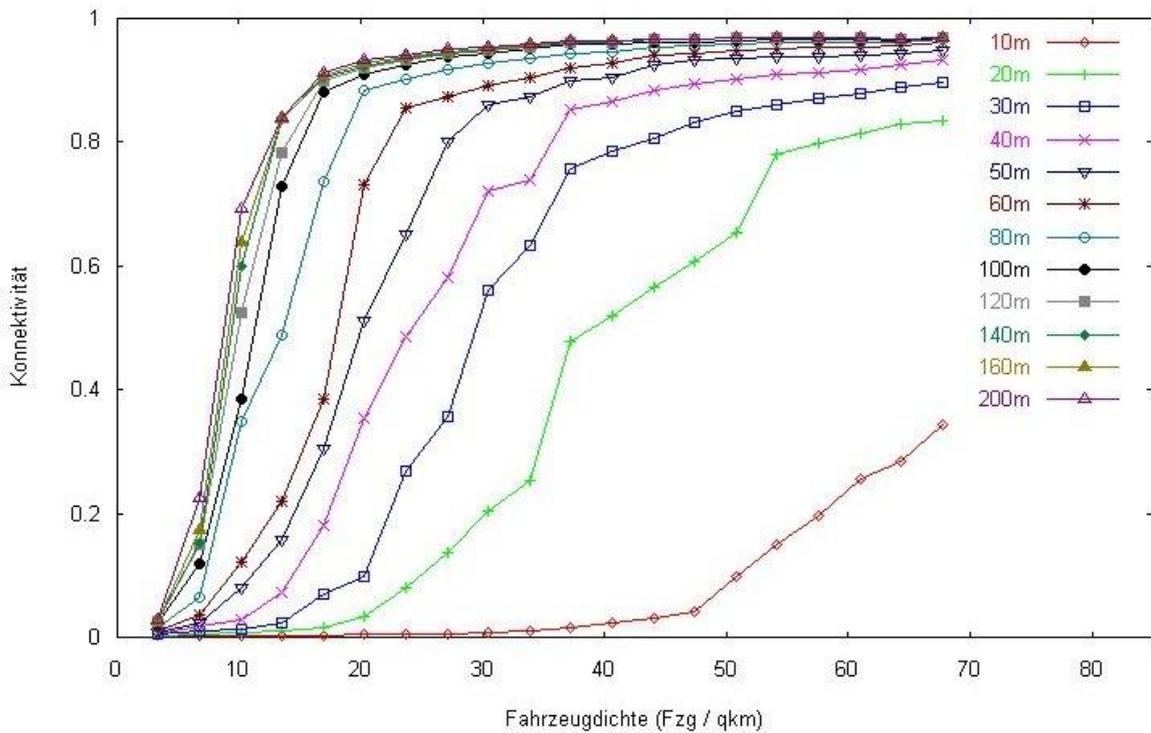


Abbildung 5.32: Konnektivität in Abhängigkeit der Dichte bei verschieden starker Abschirmung

onswege, d.h. entlang der Straßen, bekannt, so sind Aussagen über die Wahrscheinlichkeit möglich, eine Verbindung zu einem Kommunikationspartner aufzubauen.

Die Teilnehmerdichte kann in der digitalen Karte als dynamisches Attribut Straßenverbindungen zugeordnet werden. Es bietet sich an, diese Dichte anhand der Menge begegneter Fahrzeugknoten Straßenabschnittsweise in allen Fahrzeugen zu ermitteln und diese Information unter den Fahrzeugen dezentral auszutauschen. Dazu kann das im nächsten Kapitel vorgestellte adaptive Informationsaustauschverfahren genutzt werden.

Wie aus der Anforderungsanalyse bekannt, sind viele der auszutauschenden Informationen asynchroner Natur, d.h. eine direkte Verbindung zwischen zwei Knoten zu einem Zeitpunkt ist nicht unbedingt erforderlich. Eine gewisse Verzögerung bei der Datenübertragung ist je nach Art der Information tolerabel. Da sich die Fahrzeuge bewegen, können Konnektivitätslücken durch ein Zwischenspeichern und Weiterreichen von Datenpaketen geschlossen werden. Es wird daher im folgenden zunächst untersucht, wie der Zusammenhang zwischen Knotendichte und Latenzzeiten bei der Datenübertragung ist. Analog zur Konnektivitätsbetrachtung werden analytische Ergebnisse für den eindimensionalen Fall und Simulationsergebnisse für zweidimensionale Straßennetze vorgestellt.

Aus der Betrachtung der Konnektivitätswahrscheinlichkeit im eindimensionalen Fall ist bekannt, daß zwischen zwei sich in einer Entfernung x befindlichen Knoten bei einer Knotendichte ρ_V sich Lücken einer bestimmten Größe mit berechenbaren Wahrscheinlichkeiten befinden. Da sich Fahrzeuge bewegen, können diese Lücken im Graphen geschlossen werden, um Daten zwischen den Fahrzeugen auszutauschen. Jüngere Arbeiten zur Erweiterung der Graphentheorie um temporale Aspekte offerieren Beschreibungsmittel für dieses dynamische Netzverhalten.

Während Kempe et al. den Kanten Kommunikationszeitpunkte zuordnen [97], werden im Gegensatz dazu hier Kantenlebenszeiten wie folgt definiert: Jede Kante e_i in einem temporalen Graphen existiert von einem Startzeitpunkt $s(e_i)$ bis zu einem Endzeitpunkt $f(e_i)$, wobei der Endzeitpunkt echt größer ist als der Startzeitpunkt $s(e_i) < f(e_i)$. Ein *zeitrespektierender Weg* wird dann definiert als ein Weg W im Graphen von einem Knoten v_i zu einem Knoten v_j , für den gilt: $\forall k < l : s(e_l) \leq f(e_k)$, d.h. der Startzeitpunkt jeder Kante entlang des Weges ist kleiner als der oder gleich dem Endzeitpunkt der Vorgängerkante. k und l sind beliebige Knoten entlang des Weges, wobei k vor l liegt. Es gibt damit eine Zeitspanne $f(e_j) - s(e_i) \leq t_W \leq s(e_j) - f(e_i)$ (t_W bezeichne diese Zeitspanne der Existenz des Weges W , e_i bezeichne die erste und e_j die letzte Kante des Weges), für die eine echte Kommunikationsverbindung von v_i zu v_j existiert.

Für die Nachrichtenkommunikation interessiert auch die Existenz eines Pfades, der nur stückweise besritten werden kann. Für eine asynchrone Verbindung wird deshalb eine *zeitrespektierende Kantenstaffel* als ein Weg von v_i nach v_j im temporalen Graphen definiert, für dessen Kantenlebenszeiten gilt: $\forall k < l : f(e_k) < f(e_l)$. Soll eine bestimmte Datenmenge entlang dieses Weges übertragen werden, so müssen zusätzliche Bedingungen für die Kantenlebensdauern gelten.

Basierend auf dieser Definition kann nun die Erreichbarkeit eines Knotens von einem anderen Knoten innerhalb einer Zeit t definiert werden als t -Erreichbarkeit: Ein Knoten v_j heißt dann *t -erreichbar* von v_i , wenn es eine zeitrespektierende Kantenstaffel innerhalb der Zeit t von v_i nach v_j gibt.

Da es zum Versand von Nachrichten entscheidend ist zu wissen, wieviele andere Knoten innerhalb einer bestimmten Zeit t unter Zuhilfenahme von Zwischenspeicherung erreichbar sind, dient für temporale Graphen analog zur Metrik c als Konnektivitätsmetrik c_t für den Zusammenhangsgrad von temporalen Graphen der Anteil der Netzteilnehmer, die von einem Knoten durchschnittlich t -erreichbar sind. Bezeichne erneut n die Gesamtknotenzahl und c_{it} die Anzahl der Knoten, die von Knoten v_i t -erreichbar sind, dann gilt

$$c_t = \frac{\sum_{i \in V} c_{it}}{n * (n - 1)}$$

Existieren entlang einer Straße Lücken im Netz oder sind die Knoten sogar meistens isoliert, so stellt sich die Frage, wie weit eine Nachricht entlang einer Straße transportiert werden muß, um mit großer Wahrscheinlichkeit an ein nachfolgendes Fahrzeug geliefert worden zu sein, bevor dieses eine bestimmte Stelle der Straße erreicht. Abbildung 5.33 motiviert die Fragestellung anhand des Beispiels einer Gefahrenwarnung. Die Gefahrenstelle ist durch das Verkehrsschild gekennzeichnet. Um rechtzeitig auf die Gefahr reagieren zu können, müssen Fahrzeuge über die Gefahr spätestens im Abstand s vor der Gefahrenstelle informiert sein. In einem fragmentierten Netz kann die Nachricht nur mit Hilfe des Gegenverkehrs, der die Nachricht entgegennimmt und weitertransportiert, an nachfolgende Fahrzeuge übergeben werden. Der vordere Wagen auf der unteren Fahrspur gibt in einem Abstand x von der Gefahrenstelle die Nachricht an ein sich auf die Gefahrenstelle zubewegendes Fahrzeug weiter. Dieses Fahrzeug erhält die Nachricht in etwas größerer Entfernung ($x + r$), abhängig von der Kommunikationsreichweite r . Bis zu welcher Entfernung x sollte nun der vordere Wagen auf der unteren Fahrspur die Nachricht transportieren, bevor er sie verwirft ?

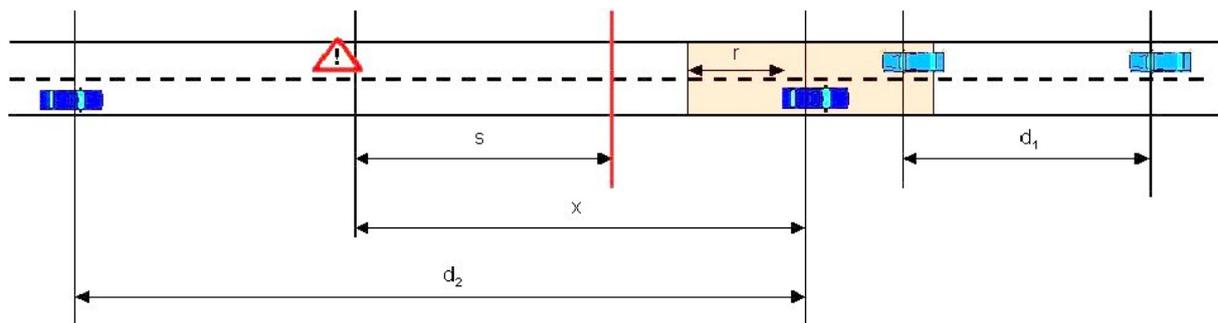


Abbildung 5.33: Mindestausbreitungsgebiet einer Gefahrenwarnung entlang einer einzelnen Straße.

Angenommen, alle Fahrzeuge bewegen sich mit der gleichen konstanten Geschwindigkeit v . Die Fahrzeugdichte der oberen Fahrspur sei ρ_V^1 , die der unteren Fahrspur ρ_V^2 . Die Entfernung d zum nachfolgenden Fahrzeug sei exponentialverteilt und folge der Dichtefunktion $f(d) = \rho_V e^{-\rho_V d}$. Im Falle der beiden sich treffenden Fahrzeuge folgen die Entfernungen zu den jeweils nachfolgenden Fahrzeugen auf der oberen und unteren Fahrspur dann der gemeinsamen Dichtefunktion

$$f(d_1, d_2) = \rho_V^1 \rho_V^2 e^{-\rho_V^1 d_1 - \rho_V^2 d_2}$$

(die Funktion ist in Abbildung 5.34 für $d_1 = d_2 = 0.2$ dargestellt). Entscheidend für das System ist nun, daß die Wahrscheinlichkeit, daß der hintere Wagen der unteren Fahrspur, der die Nachricht vom vorderen Wagen der oberen Fahrspur erhält, die im Abstand x von der Gefahrenstelle eingezeichnete Linie mit hoher Wahrscheinlichkeit eher erreicht als das nächste Fahrzeug auf der oberen Fahrspur. Dies ist dann der Fall, wenn $d_2 - x + s \leq d_1 + r + x - s$. Aufgelöst nach x ergibt sich $x \geq \frac{1}{2}(d_2 - d_1 - r) + s$.

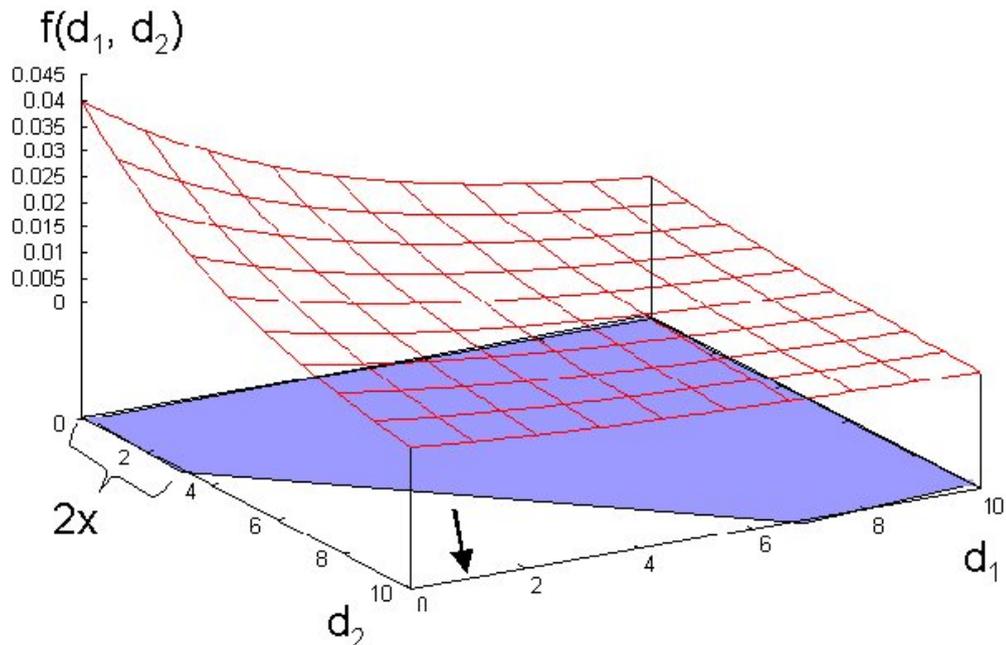


Abbildung 5.34: Gemeinsame Dichtefunktion der Entfernungen zu den jeweils beiden nächsten Fahrzeugen von einer Position auf der Straße in beiden Fahrtrichtungen.

Das Problem sei nun unabhängig von s und r betrachtet. Dann ist ein Wert für x gesucht, bei dem mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit $d_1 + x \geq d_2 - x$. Diese Wahrscheinlichkeit P_x kann auf Basis der in Abbildung 5.34 dargestellten Dichtefunktion in Abhängigkeit von x berechnet werden als das Integral über der in der Abbildung schraffierte Fläche

$$P_x = \rho_V^1 \rho_V^2 \int_{d_1=0}^{\infty} \int_{d_2=0}^{d_1+2x} e^{-\rho_V^1 d_1 - \rho_V^2 d_2} dd_1 dd_2$$

Löst man das Integral auf, so ergibt sich

$$P_x = \frac{\rho_V^2}{\rho_V^1} - \frac{\rho_V^2}{\rho_V^1 + \rho_V^2} e^{-2\rho_V^2 x}$$

Für $\rho_V^1 = \rho_V^2 = \rho_V$ vereinfacht sich dies zu

$$P_x = 1 - \frac{1}{2} e^{-2\rho_V x}$$

Für feste gewünschte Wahrscheinlichkeiten ist in Abbildung 5.35 der Zusammenhang zwischen Knotendichte auf der x-Achse und notwendiger Mindestkommunikationsdistanz x auf der y-Achse dargestellt. Um mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9% das nachfolgende Fahrzeug rechtzeitig zu treffen, muß eine Nachricht beispielsweise bei einer Fahrzeugdichte von 0.2 je Fahrtrichtung (im Mittel ein Fahrzeug pro 5km je Fahrtrichtung) mindestens etwa 15km weit transportiert werden. Berücksichtigt man die sichere Reaktionsdistanz s und die Kommunikationsreichweite r , so erhöht sich dieser Wert, gemessen von der Gefahrenstelle, um s und verringert sich um r .

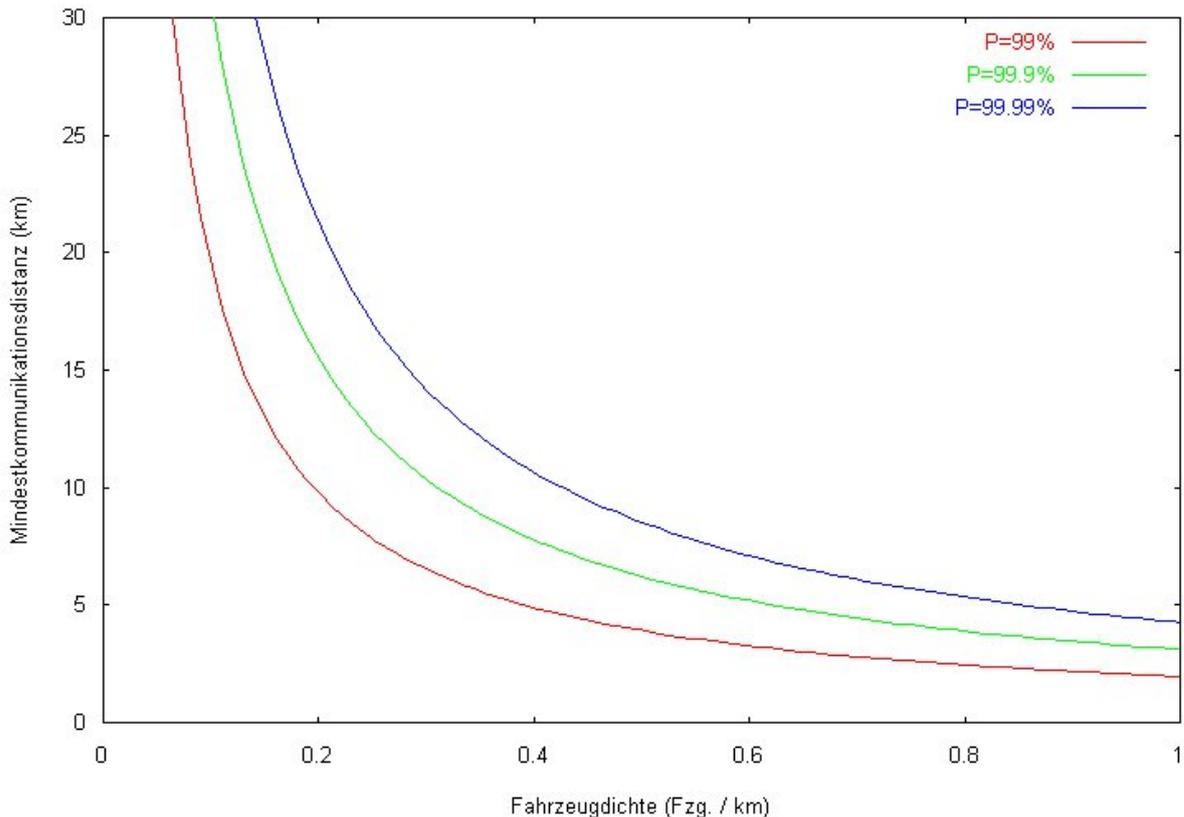


Abbildung 5.35: Zusammenhang zwischen Teilnehmerdichte und Mindestkommunikationsdistanz.

5.4 Nachrichtenkommunikation

5.4.1 Netzwerksimulation

Zur Untersuchung des Kommunikationsverhaltens in VANETS wird ein Netzwerksimulator benötigt. Zur Simulation des physikalischen Netzwerkverhaltens und der Kanalzugriffsverfahren werden Komponenten des an der Universität von Los Angeles entwickelten Netzwerksimulators GloMoSim [209] eingesetzt. GloMoSim nutzt die parallele diskrete Ereignissimulation von Parsec [10]. GloMoSim erhielt den Vorzug vor anderen Netzwerksimulatoren, weil er speziell zur Evaluierung

von drahtlosen Ad-hoc Netzen entwickelt wurde. Aus diesem Grund stehen Implementierungen vieler Ad-hoc Routingprotokolle für GloMoSim zur Verfügung. Er besitzt darüber hinaus eine geringere Komplexität als der in Berkeley entstandene ns2¹⁸.

Für den Kanalzugriff steht in GloMoSim eine Implementierung des IEEE802.11b Zugriffsverfahrens zur Verfügung. Da IEEE802.11b sich aufgrund der Meßergebnisse im realen Versuch als geeignet für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation erwiesen hat, wird es für die folgenden Kommunikationssimulationen verwendet. Neben diesem MAC Protokoll wird ein Modell für die physikalische Datenübertragung benötigt. Signale an der Empfangsantenne bestehen prinzipiell aus direkten *line-of-sight* (LOS) Wellen und diese überlagernde reflektierte Wellen. Für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation kommen Tushar and Linnartz zu dem Ergebnis, daß die Kommunikation am besten mit einem Rice'schen Fading-Modell mit zwei Hauptkomponenten abgebildet werden kann, einer direkten LOS Welle und einer starken Reflektionswelle der Fahrbahn [187]. Daneben gibt es schwächere Reflektionswellen, die als Zufallsvariablen betrachtet werden und für die ein statistisches Modell benutzt wird. Auf der physikalischen Übertragungsebene steht in GloMoSim eine Implementierung des Rice'schen Fadingmodells zur Verfügung, das allen folgenden Simulationen zugrundegelegt ist.

5.4.2 Verhalten in fragmentierten Netzen

Aus der Analyse der Konnektivität im Lauf der Zeit wird deutlich, daß je nach Knotendichte und Zeitspanne eine variierende Zahl anderer Knoten von einem bestimmten Knoten t-erreichbar sind. Die t-Erreichbarkeit ist die notwendige Voraussetzung dafür, daß Nachrichten, die von einem Quellknoten versendet werden, eine Menge von Zielknoten durch Zwischenspeicherung erreichen können, auch wenn zu einem einzelnen Zeitpunkt kein Pfad existiert. Da die Übertragung von Nachrichten voraussetzt, daß die Kanten lange genug existieren, um die Nachricht zwischen zwei Knoten weiterzugeben, kann die Menge der t-erreichbaren Knoten als obere Schranke der mit einer Nachricht erreichbaren Knoten interpretiert werden. In diesem Abschnitt wird die Verzögerung bei der Nachrichtenverbreitung simulativ untersucht, d.h. wie viele Teilnehmer durchschnittlich nach welcher Zeit eine Nachricht innerhalb eines Gebietes erhalten haben. Auf Basis dieser Analyse können beispielsweise *time-to-live* Zeiten von Nachrichten in Abhängigkeit der Knotendichte und des Verbreitungsgebietes geeignet gewählt werden.

Um Nachrichten in fragmentierten Netzen weiterreichen zu können, wird ein Nachrichtenpuffer als Zwischenspeicher und ein Nachbarschaftsdienst benötigt. Einen solchen Nachbarschaftsdienst, realisiert im Data Link Layer, der eine Tabelle der Nachbarknoten verwaltet und über Verbindungen zu neuen Nachbarn informiert, die durch das regelmäßige Aussenden von Hallo-Nachrichten detektiert werden, beschreiben Briesemeister und Hommel [27]. Sie untersuchen simulativ, wie auch Chen und Murphy [37], die Verzögerung beim Versand von Nachrichten entlang von Autobahnen. Im Gegensatz dazu wird hier die Verbreitung in zweidimensionalen Gebieten betrachtet, d.h. Geocasting in VANETS. Nachrichten werden an alle Fahrzeuge adressiert, die sich in einem geographisch begrenzten Gebiet aufhalten. Dazu wird die Verzögerung in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte bei der Simulation in einem Teil des Münchener Stadtgebietes untersucht.

¹⁸<http://www.isi.edu/nsnam/ns>

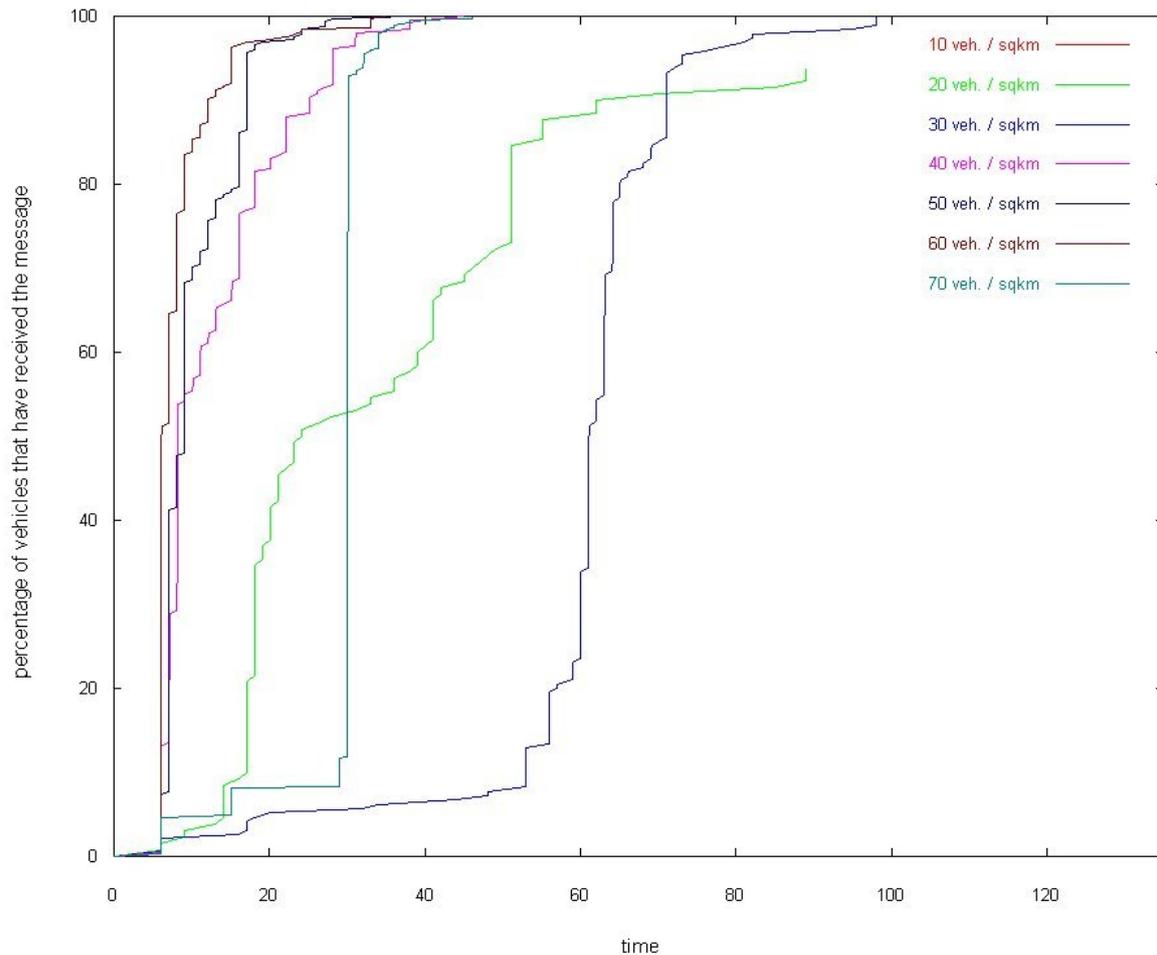


Abbildung 5.36: Nachrichtenlatenz in einem Gebiet der Größe 6.5 km^2 .

In einem Simulationslauf generiert ein zufällig ausgewähltes Fahrzeug eine Nachricht. Dieses Fahrzeug reicht die Nachricht an alle Fahrzeuge weiter, denen es begegnet. Diese Fahrzeuge speichern die Nachricht und reichen sie ihrerseits weiter. In Abhängigkeit der Zeit wird der Anteil der Fahrzeuge gemessen, der die Nachricht erhalten hat.

Für die Simulation wird ein vereinfachtes Modell gewählt, bei dem das Zielgebiet der Nachricht dem kompletten Simulationsterrain entspricht. Fahrzeuge fahren gemäß dem CARISMA Mobilitätsmodell zu einer neuen Zielkoordinate, sobald sie einen Zielort erreicht haben. In der Realität würden sie entweder stehenbleiben und parken oder aus dem Gebiet herausfahren. Dieser Unterschied zum Verhalten in der Simulation spielt eine Rolle, wenn man die Fahrzeuge betrachtet, die die Nachricht bereits erhalten haben. Sie bleiben im Zielgebiet und können die Nachricht weiterreichen, obwohl sie es in der Realität verlassen würden. Legt man jedoch die Annahme zugrunde, daß Fahrzeuge in stark fragmentierten Netzen eine Geocast Nachricht nicht nur innerhalb des Zielgebietes weiterreichen, sondern auch innerhalb eines Gürtels um das Zielgebiet herum an die Fahrzeuge, die sich auf das Zielgebiet zubewegen, so kann das Verhalten in diesem Simulationsmodell

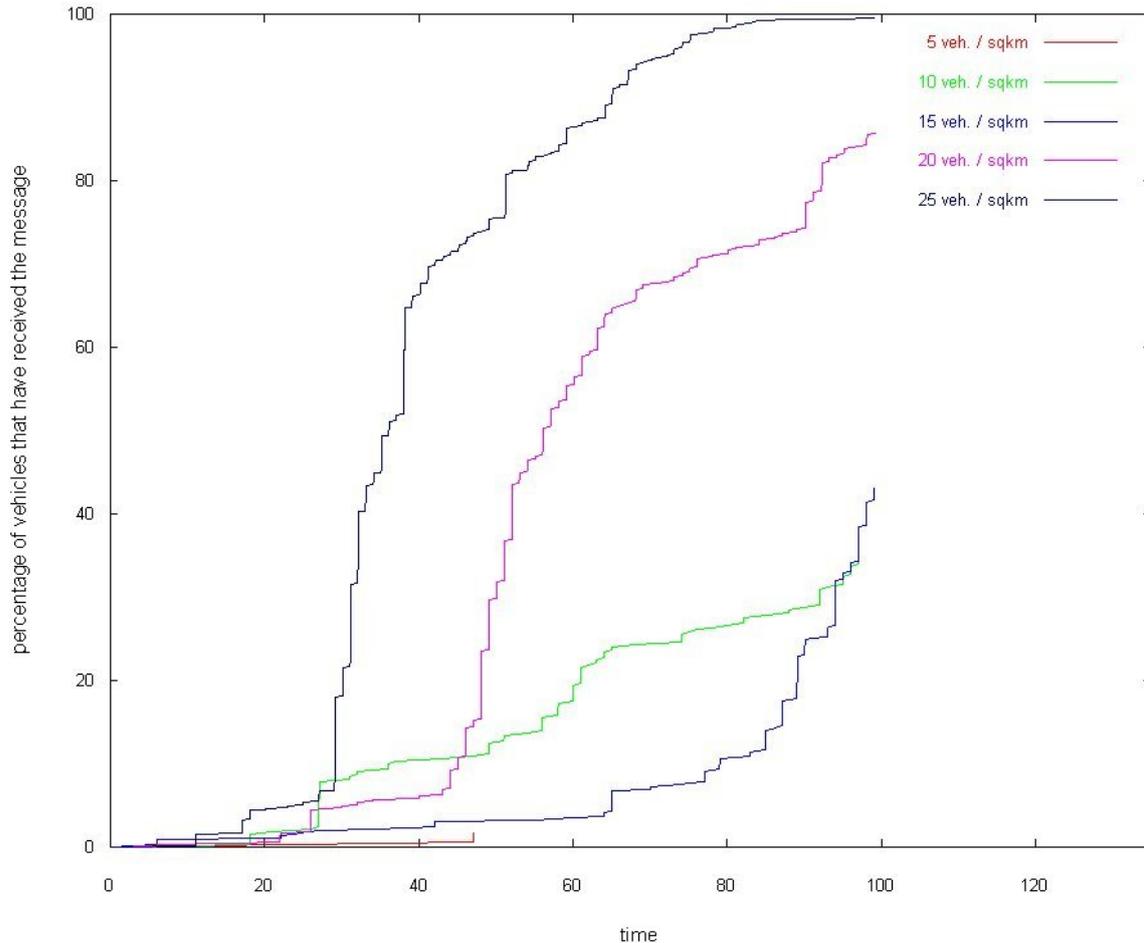


Abbildung 5.37: Nachrichtenlatenz in einem Gebiet der Größe 33 km^2 .

interpretiert werden als der Wiedereintritt eines anderen Fahrzeugs, das die Nachricht außerhalb des Geocast Gebietes erhalten hat.

Für alle Simulationsläufe ist die Kommunikationsreichweite r auf 500m festgesetzt und der Gebäudeabschirmfaktor ξ auf 40m. Es werden nur einzelne Instanzen mit zufällig generierten initialen Fahrzeugpositionen und einem zufällig gewählten Fahrzeug als Nachrichtenquelle betrachtet, d.h. es werden keine Durchschnittswerte berechnet. Auch aus den einzelnen Instanzen lassen sich bereits wertvolle Einsichten in das Systemverhalten gewinnen. Nachrichten werden von den Teilnehmern im Sekundentakt zyklisch weitergegeben. Der Initiator-knoten startet mit dem Versand 5s nach Simulationsstart, d.h. zu einem Zeitpunkt, da die Fahrzeuge noch gleichmäßig über das Simulationsgebiet verteilt sind. Nach 100s wird die Simulation abgebrochen, d.h. die Nachricht wird 95s lang weitergereicht.

Abbildung 5.36 zeigt Simulationsergebnisse für ein Gebiet mit einer Größe von 6.5 km^2 im Innenstadtbereich von München. Der dazugehörige Ausschnitt aus der Straßenkarten ist in Abbildung 5.39 zu sehen. Der Graph in der Abbildung zeigt den Anteil der Fahrzeuge, die die Nachricht

erhalten haben als Prozentzahl der Gesamtfahrzeugzahl in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit in Sekunden. Die verschiedenen Kurven zeigen die Ergebnisse bei einer unterschiedlichen Dichte ausgestatteter Fahrzeuge. Die Ausstattungsrate wurde hier zwischen 10 und 70 Fahrzeugen pro km^2 variiert.

Da die Kurven auf jeweils neu generierten Fahrzeuginstanzen beruhen, d.h. die Positionen und Bewegungen sowie die Nachrichtenquelle sind jeweils verschieden, repräsentieren sie keine Mittelwerte und können sich deshalb auch schneiden, wie im Fall der Kurven mit 20 $Fzg./km^2$ und 30 $Fzg./km^2$. Offenbar verbessern höhere Dichten als 40 $Fzg./km^2$ die Situation nicht viel weiter. Hier kommt der bereits aus der Konnektivitätsanalyse bekannte schnelle Übergang eines unverbundenen zum verbundenen Netz zum tragen. Es gibt also auch eine kritische Fahrzeugdichte, die für eine schnelle Nachrichtenverbreitung notwendig ist.

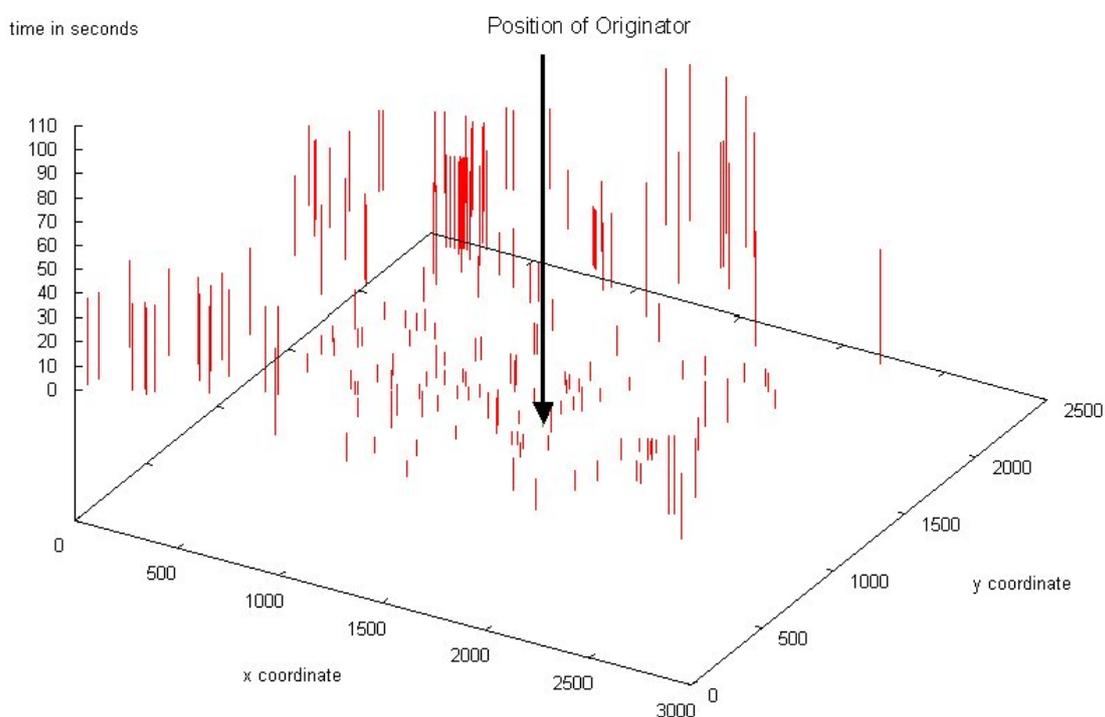


Abbildung 5.38: Empfangsverzögerung in Abhängigkeit der Position.

Die Kurven zeigen häufig einen S-förmigen Verlauf. Dieser läßt sich damit erklären, daß der Quellknoten bei geringer Knotendichte initial keinen oder nur sehr wenige Nachbarn hat. Die Nachricht wird also am Anfang nur zu den wenigen Nachbarknoten weitergeleitet. Sobald diese Knoten weitere treffen, tritt eine Art Schneeballeffekt auf. Der Anteil der Fahrzeuge, die die Nachricht erhalten, wächst in dieser Phase schnell. Bei der Annäherung an die 100% flacht die Kurve wieder ab, da es in der Regel isolierte Knoten in Seitenstraßen oder auch ganze Knotengruppen gibt, die erst spät erreicht werden. Bei höheren Knotendichten ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß der Quell-



Abbildung 5.39: Fahrzeugverteilung in Simulationsschnappschuß.

knoten am Anfang einer großen zusammenhängenden Gruppe angehört. Die Kurve steigt dann unmittelbar mit dem ersten Aussenden der Nachricht rasant an.

Abbildung 5.37 zeigt das Verhalten in einem größeren Simulationsterrain von 33 km^2 . Die Latenzzeit für die ersten 60% der Fahrzeuge erhöht sich dabei nicht sehr. Die Kurven nähern sich aber der 100% Marke wesentlich langsamer. Das kann dadurch erklärt werden, daß sich, insbesondere in den Randgebieten, mehr isolierte Knoten und Gruppen befinden, die später erreicht werden. Es vergeht auch mehr Zeit, bis die Nachricht alle äußeren Bezirke erreicht.

Abbildung 5.38 zeigt die Empfangslatenzzeit in Abhängigkeit der Empfängerfahrzeugpositionen für das 6.5 km^2 Simulationsgebiet mit einer Fahrzeugdichte von 30 Fzg./km^2 . X- und Y-Achse repräsentieren die X und Y Positionen der Fahrzeuge. Die Nachrichtenquelle liegt ziemlich genau in der Mitte des Terrains. Die Länge der Impulse beschreibt die Latenzzeit in Sekunden (Z-Achse). Die Teilnehmer, die sich nahe am Ausgangsfahrzeug befinden, erhalten die Nachricht sehr schnell. Aus Abbildung 5.39 läßt sich die zugehörige Fahrzeugverteilung ersehen, kurz nachdem die Nachricht versandt wurde. Man sieht eine Reihe isolierter Knoten und sogar ganze Gruppen von Knoten ohne Verbindung zum ursprünglichen Nachrichtensender. Die Latenzzeit ist für diese Fahrzeuge viel größer. Aus Abbildung 5.38 läßt sich herauslesen, daß es Gruppen gibt, die die Nachricht ins-

gesamt spät erhalten. Alle Teilnehmer einer solchen Gruppe weisen dann aber, wie nicht anders zu erwarten, eine nahezu identische Latenzzeit auf.

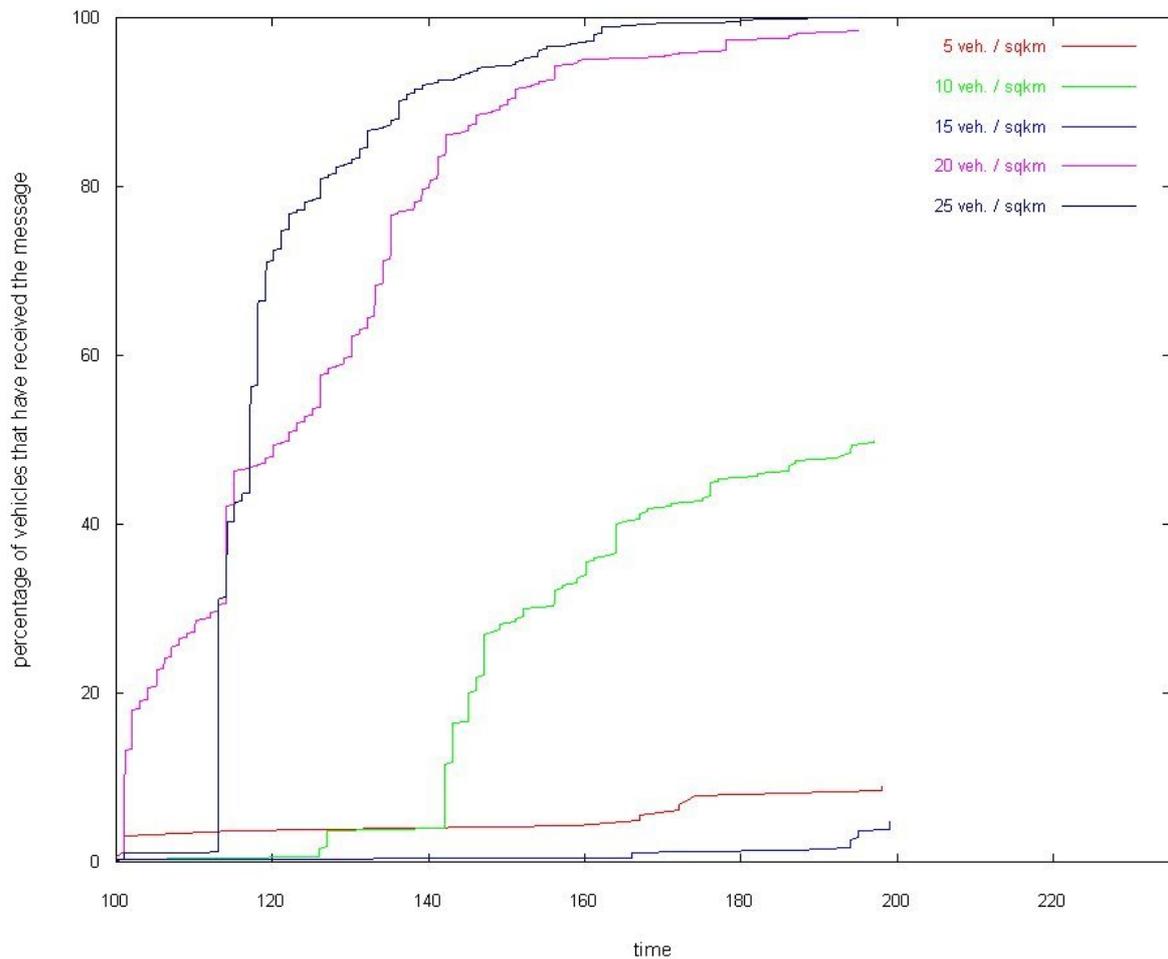


Abbildung 5.40: Nachrichtenlatenz nach initialer Simulationszeit (33 km^2 Simulationsgebietsgröße).

Da beim CARISMA Mobilitätsmodell nach einer Zeit die Fahrzeuge nicht mehr gleichmäßig verteilt sind, sondern bevorzugt Hauptstraßen benutzen, werden zum Vergleich mit den bisherigen Simulationsergebnissen in Abbildung 5.40 noch die Latenzzeiten einer Nachricht präsentiert, die versendet wird, nachdem die Fahrzeuge bereits 100s lang unterwegs sind. Für die Mehrzahl der Autos reduziert sich die Latenzzeit. Generell gilt, daß durch die höhere Konzentration der Fahrzeuge auf den Hauptstraßen diese eine Nachricht schneller erhalten. Dafür sinkt die Knotendichte in den anderen Gebieten des Simulationsterrains mit der Folge, daß einzelne Knoten trotzdem relativ lange auf eine Nachricht warten müssen. Da sich jedoch alle Fahrzeuge prinzipiell in Richtung der Hauptstraßen bewegen, auf denen sie schnell auf andere Fahrzeuge treffen, die die Nachricht bereits besitzen, macht sich der Effekt der geringeren Dichte in einigen Simulationsgebietsteilen nicht so sehr bemerkbar.

5.4.3 Verhalten in dichten Netzen

Das Verbreiten von Nachrichten in Ad-hoc Netzen wird häufig benötigt, nicht nur zur Verteilung von Informationen, sondern auch bei der Suche von Routen für Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Für solche Verbindungen sind, wie aus den Ergebnissen der Konnektivitätsanalyse ersichtlich, höhere Knotendichten Voraussetzung. Bei hoher Knotendichte, also einem höheren Ausstattungsgrad gekoppelt mit dichtem Verkehr, ist ein einfaches Fluten des Netzes aber problematisch. Beim reinen Fluten des Netzes oder von Teilen des Netzes leiten alle Teilnehmer, die eine Nachricht bzw. ein Datenpaket empfangen, dieses weiter, d.h. versenden es erneut. Der Aufwand zur Verbreitung besitzt damit eine Komplexität linear in der Anzahl der Knoten ($O(n)$). Wenn jeder Knoten eine Broadcast Nachricht weitersendet, führt dies in dichten Netzen zu unnötiger Redundanz, zu erhöhtem Wettbewerb um den Kanal und zu Kollisionen¹⁹. Je dichter das Netz ist, desto mehr unnötige Netzwerkressourcen werden beansprucht, bis hin zu einer Überlastung des Netzes. Dieses Phänomen ist als *Broadcast Sturm* in allen digitalen Kommunikationsnetzen bekannt.

Eine empirische Studie zu einfachem Fluten wurde von Ganesan et al. [64] in einem drahtlosen Netz mit 160 Knoten durchgeführt. Sie haben gezeigt, daß aufgrund von Effekten der physikalischen und Medienzugriffsschicht, insbesondere durch Kollisionen, eine geflutete Nachricht auch in einem vollständig verbundenen Netzwerk nicht alle Knoten erreicht. Viele der auftretenden Effekte sind im Rahmen von Simulationen schwer nachzubilden und benötigen reale Testumgebungen. Die mittlere Paketverlustrate steigt in Abhängigkeit von Entfernung und hängt von der Beschaffenheit der Umgebung ab. Insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen ist die Studie von Ganesan et al. ein Hinweis darauf, daß solche Effekte nicht vernachlässigt werden können. Das Broadcast-Verhalten von Zeitmultiplex-Netzen (TDMA) wird in einer Reihe von Arbeiten untersucht [12, 41, 31]. Diese Arbeiten beschäftigen sich vor allem mit dem Einfluß der Kanalzugriffsmechanismen auf das Broadcasting. Sie sind daher für das vorliegende Problem relevant und werden der Vollständigkeit halber hier aufgeführt. Im folgenden wird jedoch auf eine spezielle Betrachtung der Kanalzugriffsschicht verzichtet. Ziel ist hier die Behebung der Ursache des Broadcast Sturm Problems, die Vermeidung redundanter Nachrichten.

Um alle Knoten zu erreichen ist es in der Regel nicht notwendig, daß jeder Teilnehmer eine Nachricht wiederholt. In Abbildung 5.41 wird dies für ein typisches VANET Szenario an einer Kreuzung deutlich. Die schraffierte Fläche entspricht der Kommunikationsreichweite. Die von Knoten S generierte Nachricht muss nicht von allen Teilnehmern wiederholt werden. Es reicht für die Ausbreitung entlang der Straßen, wenn die beiden Knoten F die Nachricht weiterleiten. Auf das Problem des Weiterreichens in Seitenstraßen, in der Abbildung also zu den mit einem Fragezeichen versehenen Knoten wird noch genauer eingegangen.

Für ein bestimmtes (statisches) Netz bzw. einen topologischen Schnappschuß läßt sich das theoretische Optimum, d.h. das Erreichen aller Netzteilnehmer mit einer Nachricht mit minimaler Zahl weiterleitender Knoten, als die Menge der Knoten eines Minimum Connected Dominating Set

¹⁹RTS/CTS wird bei 802.11 nur zur Unicast Kommunikation verwendet. Für Broadcast kommt ein reines CS-MA/CA Schema zum Einsatz.

(MCDS; die Definition eines MCDS findet der Leser z.B. bei Diestel [53] oder Jungnickel [89]) berechnen²⁰.

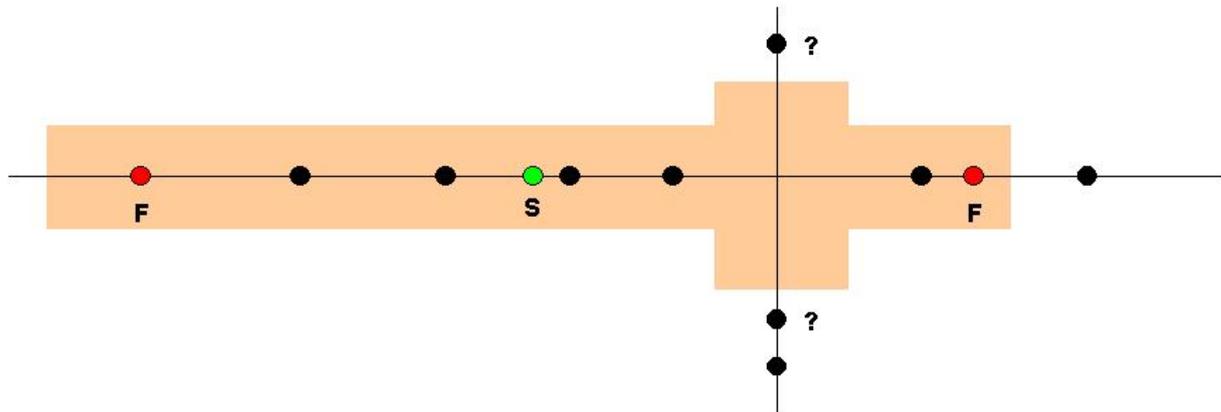


Abbildung 5.41: Beispiel für die Redundanz beim Broadcast Sturm Problem

Seddigh et al. machen sich in [184, 178] die Eigenschaften zusammenhängender dominierender Graphen zur Reduktion des Broadcast-Overheads zunutze. Sie beschreiben einen lokalen Algorithmus zum Aufbau einer zusammenhängenden dominierenden Menge, die dabei nicht minimal sein muß. Aufbau und Pflege dieser Menge erzeugen jedoch zusätzlichen Netzverkehr und sind für hochdynamische Netze wie VANETS schlecht geeignet. Pagnani und Rossi [152] nutzen in ähnlicher Weise Gruppierungsverfahren (*Clustering*). Nach der Gruppenbildung werden Pakete effizient über die *Clusterheads* verteilt. Kwon und Gerla beschreiben ein Verfahren, bei dem Gruppen passiv gebildet werden und somit kein Overhead durch zusätzliche Kontrollnachrichten entsteht [121]. Chlamtac und Kutten schlagen ein baumbasiertes Verfahren zum globalen Broadcasting in Ad-hoc Netzen vor, das jedoch aufgrund ihrer Dynamik für VANETS ebenfalls nicht geeignet ist [40]. Eine umfassende Adressierung mit der Vorstellung alternativer Lösungen erfährt das Broadcast Sturm Problem für zweidimensionale Ad-hoc Netze bei Ni et al. [149]. Dort werden probabilistische, zähler-, distanz-, lokations-, und gruppierungsbasierte Verfahren zur Effizienzsteigerung unterschieden. Williams und Camp [199] vergleichen die von Ni et al. vorgestellten mit weiteren, nachbarschaftsbasierten Verfahren. Sie berücksichtigen in ihrer Analyse die nachbarschaftsbasierten Methoden *Flooding with Self Pruning* (FSP) und *Dominant Pruning* (DP) aus [132], *Scalable Broadcast Algorithm* (SBA) [160], *Multipoint Relaying* (MR)[164], *Ad-hoc Broadcast Protocol* (AHBP)[161], *Connected Dominating Set-Based Broadcast Algorithm* (CDSB)[159] und *Lightweight and Efficient Network Wide Broadcast* (LENWB) [185]. Die nachbarschaftsbasierten Verfahren nutzen fast ausschließlich die Information der 2-Hop Nachbarschaft. Sie lassen sich danach

²⁰Für temporale Graphen kann ein zeitrespektierendes MCDS in Bezug auf einen Sendeknoten definiert werden als die minimale Menge aktivierter Knoten, über die von einem Knoten v_i zeitrespektierende Kantenstaffeln zu allen anderen Knoten entstehen. Ein Knoten wird dabei immer nur zu einem Zeitpunkt aktiviert. Nur die zu diesem Zeitpunkt aktiven adjazenten Kanten werden für zeitrespektierende Kantenstaffeln berücksichtigt. Ein Knoten kann mehrfach aktiviert werden und wird dann auch mehrfach in die Menge aktivierter Knoten aufgenommen. Da für eine solche Berechnung in der Zukunft immer noch ein niedrigerer Wert erwartet werden kann (es sei denn, es muß nur ein Knoten einmal aktiviert werden), ist die Berechnung dieser minimalen Menge nur für vorgegebene Zeitschranken sinnvoll. Es ist offensichtlich, daß ein zeitbeschränktes und zeitrespektierendes CDS nicht für alle Zeitschranken existiert. Ein verzögerungsminimales CDS ist das CDS mit der kleinsten Zeitschranke

unterscheiden, ob jeder Knoten selbst entscheidet, ob er ein Paket weitersendet (Self Pruning, SBA und LENWB) oder ob sein Vorgänger dies für ihn entscheidet.

Der entscheidende Vorteil der Verfahren gegenüber reinem Fluten des Netzes ist die Einsparung von Netzwerkkapazität. Unter den von Ni et al. [149] betrachteten Verfahren schnitt das lokationsbasierte am besten ab. Es berechnet die durch ein erneutes Aussenden einer Nachricht zusätzlich erreichte Fläche. Nur wenn sie über einem bestimmten Wert liegt, wird die Nachricht erneut versendet. Die Simulationsergebnisse in statischen Netzen von Williams und Camp zeigen, daß sich alle Verfahren in losen Graphen ähnlich verhalten wie Flooding, aber für dichtere Graphen wesentlich besser skalieren [199]. Die Simulationen legen nahe, daß alle Verfahren in der gleichen Größenordnung skalieren und sich nur durch konstante Faktoren unterscheiden. Sie erreichen allerdings nicht alle Teilnehmer. Dies gilt insbesondere für das lokationsbasierte Verfahren in losen Graphen. Während reines Fluten bei einer Simulation mit einem Null-MAC noch gut abschneidet, zeigt die Simulation mit dem 802.11 MAC wie auch bei den Experimenten von Ganesan et al. [64], daß die Zustellungsrate für dichtere Netze deutlich abnimmt. Nachbarschaftsbasierte Methoden erreichen eine im Vergleich zum lokationsbasierten Verfahren höhere Zustellrate auch in Netzen mit geringerer Knotendichte. Sie haben jedoch Schwierigkeiten in sehr mobilen Netzen. Auch der Overhead durch für nachbarschaftsbasierte Verfahren notwendige Hallo-Pakete (die für eine 2-Hop Nachbarschaft die Adressen aller Nachbarn beinhalten müssen) ist in sehr dichten und dynamischen Netzen nicht zu vernachlässigen. Insbesondere für zyklische Hallo-Pakete ist dieser Overhead umso größer, je kürzer die Zykluszeit aufgrund der Dynamik gewählt werden muß.

Als Parameter zur Beurteilung eines Verfahrens zur Verminderung des Broadcast Sturm Problems dienen in der folgenden Analyse die *Effizienz* (Eingesparte Kommunikationsressourcen in Form der Zahl vermiedener Sendeereignisse im Vergleich zu reinem Fluten) und die *Latenzzeit*. Das Verhalten wird in Abhängigkeit der Knotendichte untersucht. Ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal, die *Effektivität* (Anteil der Knoten, die die Broadcast-Nachricht (vollständig) erhalten), spielt in allgemeinen Ad-hoc Netzen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die CARISMA Verfahren garantieren für VANETS, daß nahezu hundert Prozent der Knoten im Zielgebiet eine Nachricht auch erhalten. Ergebnisse zur Effektivität sind deshalb nicht gesondert aufgeführt.

5.4.4 Versand und Weiterreichen von Paketen bei CARISMA

Für straßenbasierte Netze ergeben sich einige Vereinfachungen des Broadcast Sturm Problems, die eine effiziente Nachrichtenverbreitung ermöglichen. Statt einer zweidimensionalen Fläche besteht das Netz aus einer graphenähnlichen Struktur. Routing und Fluten verlaufen entlang der Straßentopologie. Mit zunehmender Abschirmung ist das Problem zudem durch den geringeren mittleren Knotengrad weniger stark ausgeprägt. Während das lokationsbasierte Verfahren in allgemeinen zweidimensionalen Netzen zwar prinzipiell auch bei höherer Netzdynamik gut arbeitet, schneidet es bei der Zustellrate im Vergleich zu nachbarschaftsbasierten Methoden schlechter ab. Übertragen auf VANETS spielt nicht die neu erreichte Fläche eine Rolle, sondern die neu erreichten Straßenabschnitte. Eine Möglichkeit zur Verbesserung des Verhaltens beim Verbreiten von Nachrichten ist also die Übertragung des lokationsbasierten Verfahrens auf VANETS. Knoten berechnen die Länge der neu erreichten Straßenabschnitte und senden eine Nachricht weiter, wenn diese über einem bestimmten Schwellenwert liegt.

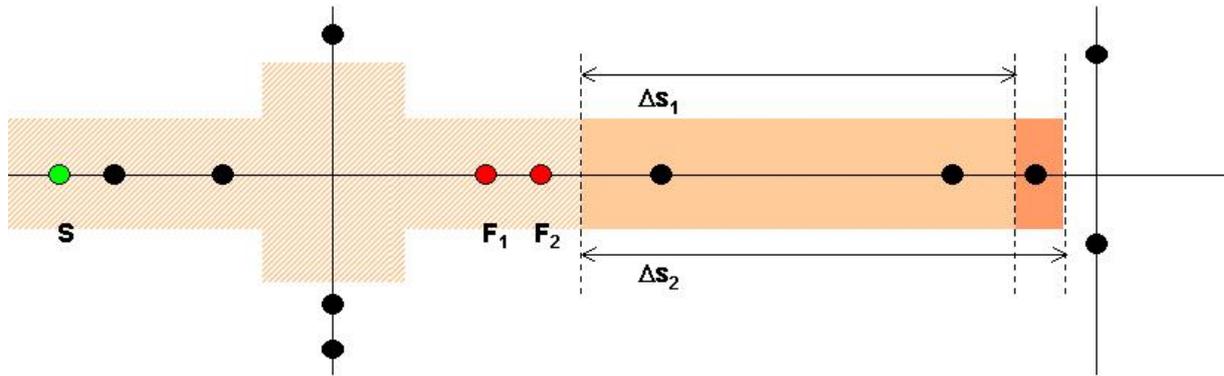


Abbildung 5.42: Weiterleiten in Abhängigkeit zusätzlich abgedeckter Straßenlänge

In Abbildung 5.42 empfangen die beiden Knoten F_1 und F_2 eine Nachricht von Knoten S . Die zusätzlich erreichte Straßenlänge bei einem erneuten Aussenden durch F_1 oder F_2 beträgt Δs_1 bzw. Δs_2 . Angenommen, beide Knoten liegen damit über dem Schwellenwert für das Weiterreichen der Nachricht. Dann entscheiden beide Knoten zunächst, daß sie die Nachricht erneut aussenden. Sie konkurrieren damit um den Kanal. Der Knoten, der sich durchsetzt, versendet die Nachricht. Die zusätzlich erreichte Straßenlänge des anderen Knotens reduziert sich dadurch und er versendet die Nachricht nicht noch einmal. Dieses Verfahren sei als straßenlängenbasiertes Weiterreichen (SLTF (Street Length Threshold Forwarding)) bezeichnet. Idealerweise versendet in diesem Beispiel der Knoten F_2 die Nachricht, da er die größte zusätzlich erreichte Straßenlänge besitzt. Ohne Berücksichtigung abzweigender Straßen überdeckt der am weitesten entfernte Knoten entlang einer Straße außerdem die zusätzlich erreichbare Straßenlänge aller anderen potentiellen Weiterleiter vollständig. Dieser am weitesten entfernte Knoten läßt sich durch den Austausch von Nachbarschaftsnachrichten direkt aus der Liste der Nachbarn und deren Positionen ermitteln. Dazu reicht das Wissen über die 1-Hop Nachbarschaft. Eine andere Variante besteht darin, entfernungsabhängige Wartezeiten für das Weiterreichen einer Nachricht zu definieren, wie auch Briesemeister et al. [27] und Füßler et al. [62] vorschlagen. Der am weitesten entfernte Knoten besitzt dann die kürzeste Wartezeit und sendet daher die Nachricht als erster erneut aus. Knoten in geringerer Entfernung hören diese Übertragung mit und senden nicht mehr. Die Wahl des am weitesten entlang einer Straße befindlichen Knotens als Weiterleiter ist eng verwandt mit der Idee der Wahl des am nächsten am Zielknoten befindlichen Teilnehmers für das Weiterreichen eines Paketes in zweidimensionalen Netzen beim Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [92]. Die beiden nachbarschaftsbasierten und wartezeitbasierten Varianten seien als deshalb als NGSF (Neighbourhood Greedy Street Forwarding) und WGSF (Wait Greedy Street Forwarding) bezeichnet.

In echten Straßennetzen ist zusätzlich die Ausbreitung einer Nachricht in abzweigende Straßen zu berücksichtigen. In Abbildung 5.43 ist dies für ein Innenstadtszenario dargestellt. Fahrzeug S versendet eine Nachricht. Seine Kommunikationsreichweite wird durch die schraffierte Fläche dargestellt. Die Nachricht verbreitet sich quasi wellenförmig entlang der Straßen. Nach dem oben beschriebenen Verfahren, den am weitesten entfernten Knoten entlang einer Straße als Weiterleiter auszuwählen, würden in diesem Beispiel entlang der horizontal verlaufenden unteren Straße in westlicher Richtung der links unten durch einen Kreis gekennzeichnete Teilnehmer W und in östlicher Richtung Knoten O die Nachricht weiterreichen. Dabei wird jedoch nicht berücksich-

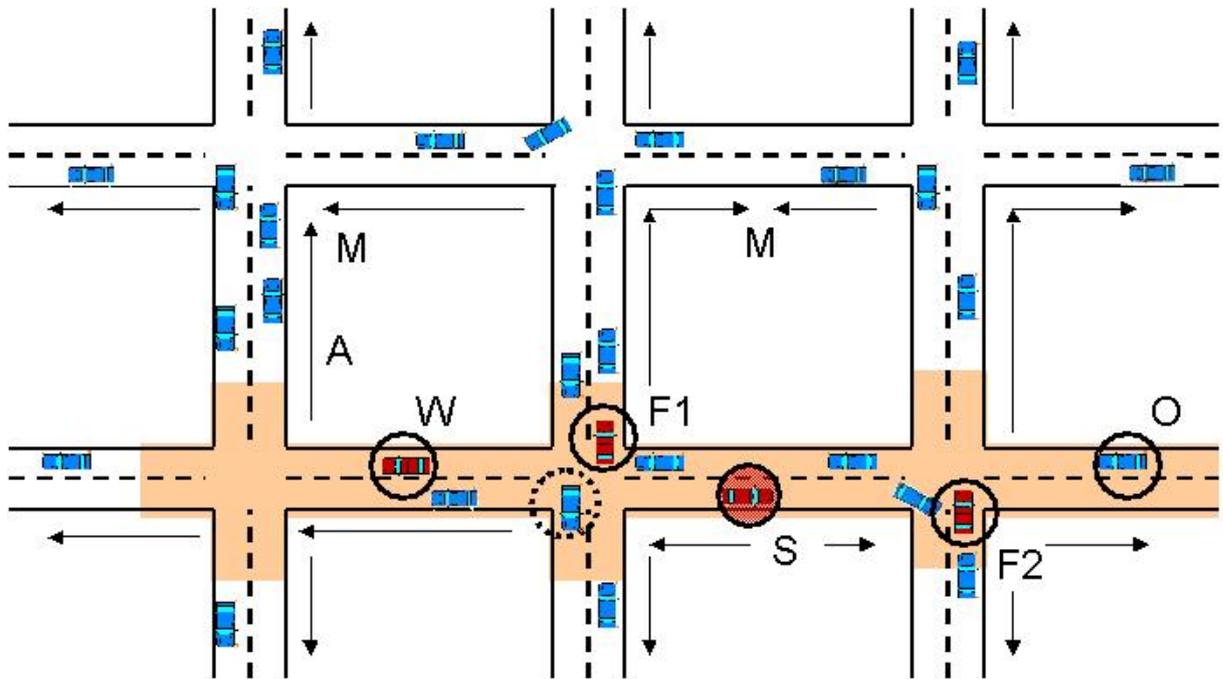


Abbildung 5.43: Das Broadcast Sturm Problem in Stadtszenarien

tigt, daß die Nachricht auch in die abzweigenden Seitenstraßen weitergeleitet werden soll. Durch die Gebäudeabschirmung in Städten erreicht die Nachricht nur Fahrzeuge in abzweigenden Straßen, die sich in Kreuzungsnähe befinden. In der linken senkrecht verlaufenden Straße gibt es kein Fahrzeug, das die Nachricht empfängt (A in der Abbildung). Es ist deshalb sinnvoll, daß der rot gekennzeichnete weiterleitende PKW *F1* die Nachricht im Kreuzungsbereich erneut aussendet, sofern Verbindung zu mindestens einem Wagen in der Seitenstraße besteht. Der gepunktet eingekreiste Wagen befindet sich wie *F1* ebenfalls im Kreuzungsbereich und könnte die Nachricht weiterleiten. Da er aber nur einen kleinen zusätzlichen Bereich abdecken würde, ist in diesem Fall ein erneutes Aussenden nicht sinnvoll. Auf der rechten Seite sollte zusätzlich zum entferntesten Teilnehmer das rote markierte Fahrzeug *F2* im Kreuzungsbereich die Nachricht weiterleiten, da es die Fahrzeuge in der Seitenstraße erreicht.

Durch die Teilung an Kreuzungspunkten ergeben sich mehrere in Abbildung 5.43 durch Pfeile gekennzeichnete Ausbreitungsfronten, die an anderen Punkten wieder aufeinander treffen (im Beispiel bei *M* in der oberen waagerechten Straße). An diesen Stellen wird die Nachricht nicht mehr weitergeleitet, da alle Fahrzeuge hinter der entgegenkommenden Ausbreitungsfront die Nachricht bereits erhalten haben. Nachrichtenpaketduplikate werden anhand global eindeutiger Nachrichten-IDs erkannt, in Form der eindeutigen Quellenadresse, eines Versandzeitstempels der Gesamtnachricht und Sequenznummern der einzelnen Nachrichtenpakete. Die Nachrichten-IDs werden in einer Tabelle für die Lebensdauer der Nachricht gespeichert.

Bei der Verbreitungsvariante SLTF werden Seitenstraßen anhand der Gesamtlänge der neu erreichten Straßen mit berücksichtigt. Wenn vorausgesetzt wird, daß der Gebäudeabschirmfaktor für jede Kreuzung bekannt ist, dann kann die Länge der neu erreichten Abschnitte realitätsnah berechnet werden. Um entlang von Straßen ohne Abzweigungen oder in Seitenstraßen hinein weiterleiten

zu können, ist der Schwellwert deutlich unterhalb der Kommunikationsreichweite anzusetzen. In weniger dichtem Verkehr kann dies dennoch dazu führen, daß eine Nachricht nicht weitergeleitet wird, obwohl ein geeigneter Nachbar zur Verfügung stünde. In dichtem Verkehr wird umgekehrt häufig nicht der geeignetste (entfernteste) Teilnehmer die Nachricht weiterleiten. Im Gegensatz zu SLTF ermitteln NGSF und WGSF zuverlässig den entferntesten Nachbarn. Sie sind damit effizienter und effektiver, werden jedoch in der Regel eine etwas höhere Latenzzeit besitzen, die jedoch bei WGSF erst mit dem ersten Weiterleiten einer Nachricht auftritt. Es werden nachfolgend deshalb nur noch NGSF und WGSF miteinander verglichen. Seitenstraßen werden für diese beiden Verfahren im folgenden anhand der digitalen Straßenkarte direkt miteinbezogen. Dazu leiten der auf jedem Kreuzungsverbindungsstück jeweils am weitesten entfernte Teilnehmer eine Nachricht weiter.

Im Beispiel der Abbildung 5.44 initiiert Knoten S eine Verbreitungsnachricht. Knoten F ist der entfernteste entlang des Kreuzungsverbindungsstückes, empfängt die Nachricht von S und leitet sie weiter. Alle Teilnehmer zu seiner Linken haben die Nachricht nun bereits gesehen und bleiben passiv. Alle Teilnehmer im schraffierten Gebiet zur Rechten kommen als Weiterleiter in Frage. Knoten N ist als entferntester auf seinem Straßenabschnitt einer der nächsten Weiterleiter. Der Nachteil der Selektion von N ist, daß dieser die Nachricht nicht zu T weiterleiten kann, während Knoten P dazu in der Lage wäre. Wenn es jedoch auf dem oberen Straßenabschnitt einen Knoten E gibt, kann T über diesen als entferntester Weiterleiter des oberen Kreuzungsverbindungsstückes erreicht werden. Simulationsergebnisse zeigen, daß NGSF oder WGSF in der Regel an die 100% der Teilnehmer in einem Gebiet in der Stadt erreichen. Dies erklärt sich daraus, daß, auch wenn Knoten E nicht verfügbar ist, die Wahrscheinlichkeit groß ist, daß T schließlich von einer Wellenfront über andere Kreuzungsverbindungen erreicht wird.

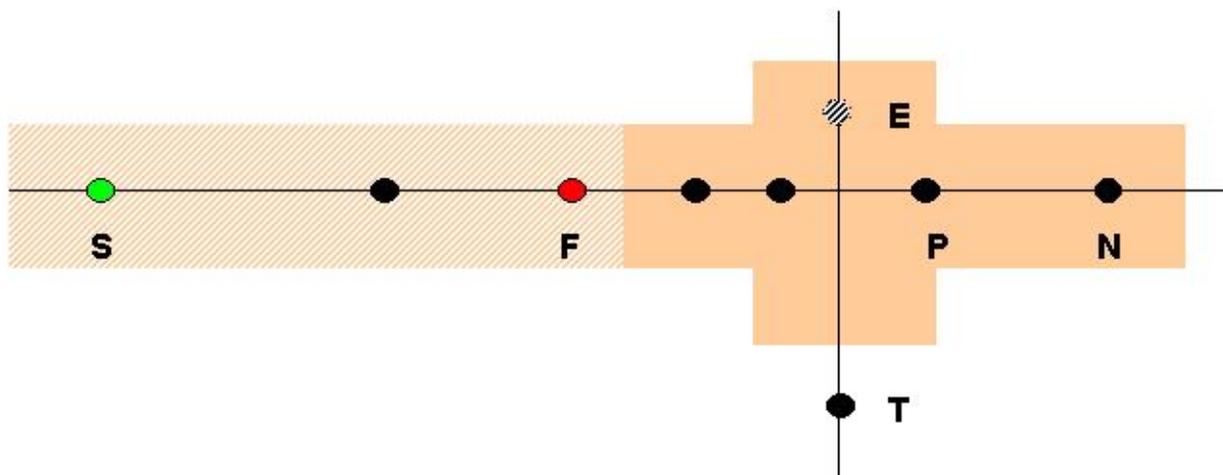


Abbildung 5.44: Beispiel zur Verbreitung einer Nachricht über den entferntesten Knoten jedes Kreuzungsverbindungsstückes

Der Nachrichtenversand erfolgt bei CARISMA über das CARISMA Messaging. Dieses besitzt eine Schnittstelle zum Versand von Geocast Nachrichten. Das CARISMA Messaging fügt dem Nachrichteninhalte einen Nachrichtenkopf mit dem Pakettyp (Geocast-Nachricht), Länge, Checksumme, einen Zeitstempel, der den Versandzeitpunkt des ersten Paketes einer Nachricht beinhaltet, die Position des Quellknotens, das Geocast Gebiet (bspw. also einer festen Entfernung vom Quell-

knoten) sowie den Nachrichtentyp (bspw. Gefahrenwarnung) hinzu (siehe Abbildung 5.45). Die Entscheidung über die Weiterleitungsknoten fällt das CARISMA Routing, an das dieses Paket übergeben wird. Wie aus Abbildung 5.45 ersichtlich, fügt es einen Routingpaketkopf hinzu, der sich aus dem Routingpakettyp (DISS = Verbreitungspaket), einer Checksumme, einer Sequenznummer, der Adresse des Quellknotens (Sequenznummer und Quelladresse sind für jedes Paket eindeutig, so daß Duplikate erkannt werden) und der aktuellen Hopzahl zusammensetzt. Bei NGSF kommen die explizite Auflistung der Teilnehmer, die das Paket weiterleiten sollen, und bei WGSF die Adresse des Weiterleiters, seine Position und die ID seines Kreuzungsverbindungsstücks hinzu.

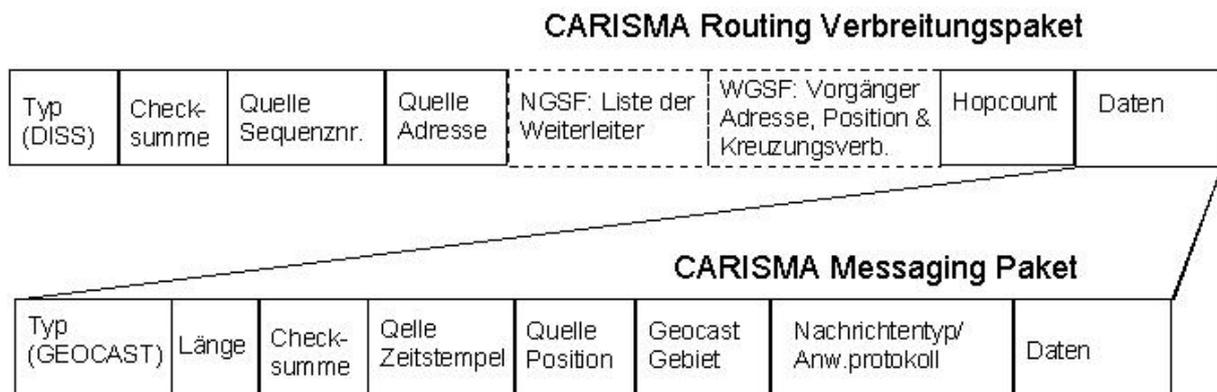


Abbildung 5.45: Header zu verbreitender CARISMA Nachrichtenpakete

Das prinzipielle Verhalten der CARISMA Routingkomponente ist als SDL Diagramm in Abbildung 5.46 dargestellt. Es ist sowohl der Versand von Paketen an Teilnehmer mit einer bestimmten IP Adresse möglich, d.h. eine Punkt-zu-Punkt Kommunikation, als auch die Verbreitung von Nachrichten. Nachrichtenpakete sind vom Typ *DISS*. Über den Pakettyp wird geregelt, wie mit einem Paket zu verfahren ist. Die Komponente reagiert außerdem auf das Eintreffen von Nachrichten, die von der Medienzugriffsschicht an sie weitergereicht werden. Dabei wird zwischen zu verbreitenden Paketen (vom Typ *DISS*), Routingpaketen für Punkt-zu-Punkt Verbindungen und Steuerpaketen, die keine Anwendungsdaten enthalten, unterschieden. Zusätzlich wird auf interne Protokollereignisse reagiert, z.B. den Ablauf eines Timers.

Im folgenden wird das Verhalten beim Versand und Weiterreichen von Nachrichten beschrieben, d.h. Paketen vom Typ *DISS*. Sowohl beim initialen Versand als auch beim Weiterreichen von Paketen sollen wie oben beschrieben nur jeweils die entferntesten Nachbarn auf jedem Kreuzungsverbindungsstück das Paket erneut versenden.

Um diese Nachbarn zu bestimmen, senden Quell- und Weiterleitungsknoten einer Verbreitungsnachricht bei NGSF zunächst eine Nachbarschaftsanfragennachricht (NREQ Paket). Diese Nachricht besteht aus den Datenfeldern Pakettyp (NREQ), DISS Zeitstempel, Quelladresse, Adresse, Position und Kreuzungsverbindungsnummer des NREQ initiiierenden Knotens. Alle Knoten, die diese Nachricht erhalten, überprüfen zunächst anhand der global eindeutigen Kombination aus Zeitstempel und Adresse des Quellknotens, ob sie das zugehörige DISS Paket bereits erhalten haben. Nur wenn sie die Nachricht noch nicht kennen, reagieren sie ggfs. mit einer Antwort (NREP Paket). Es antworten also nur maximal diejenigen Teilnehmer, die in Ausbreitungsrichtung der Nachricht liegen. Würden alle gleichzeitig antworten, so entstünden in dichten Netzen Kollisio-

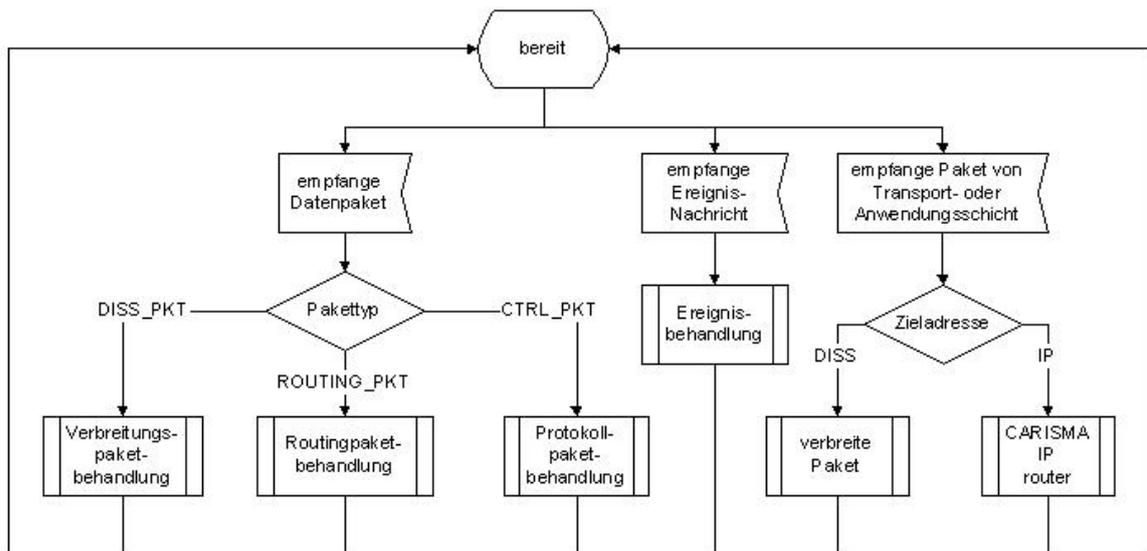


Abbildung 5.46: Prinzipielles Verhalten der CARISMA Routingkomponente

nen bei der Übertragung. Kanalzugriffsverfahren nutzen zur Vermeidung dieser Kollisionen häufig zufällige *Backoff* bzw. Verzögerungszeiten. Bei CARISMA wird bereits die Weitergabe des NREP Antwortpaketes von der Netzwerk- an die MAC Schicht um eine zufällige Zeitdauer verzögert. Ist diese Zeit verstrichen, so überprüft der Knoten, ob die Nachricht überhaupt noch versendet werden muß.

Hat bereits ein anderer Knoten geantwortet, der sich auf dem gleichen Kreuzungsverbindungsstück befindet und weiter entfernt ist von der Quelle oder dem letzten Weiterleiter, so wird keine NREP Nachricht mehr gesendet. Dazu speichert jeder Teilnehmer die Informationen aus zwischenzeitlich mitgehörten NREP Nachrichten in den beiden Tabellen *DISSTabelle* und *NbrPosTabelle*. In der *DISSTabelle* wird gespeichert, welcher Nachbarknoten auf welche Verbreitungsnachricht bereits mit einem NREP Paket geantwortet hat. Dies ist notwendig für den Fall, daß in der Zwischenzeit weitere NREQ Pakete, die zu verschiedenen Verbreitungsnachrichten gehören, versendet wurden. In der *NbrPosTabelle* werden die Positionen der Nachbarknoten gemeinsam mit den Kreuzungsverbindungsstücken gespeichert, auf denen sie sich gerade befinden. Das NREP Paket enthält dazu jeweils die Position und den Index des Kreuzungsverbindungsstücks des antwortenden Knotens.

Nach dem Versand der NREQ Nachricht setzt der weiterleitende Knoten einen *Timer*, um auf Antworten von Nachbarknoten zu warten. Ist dieser Timer abgelaufen (bei CARISMA nach 40 ms), wird überprüft, wann die letzte NREP Nachricht eingetroffen ist. Wurde keine NREP Nachricht empfangen, wird die NREQ Nachricht erneut ausgesendet. Dies wird für die Lebensdauer der Nachricht wiederholt, solange sich keine Nachbarn melden, um Konnektivitätslücken zu schließen. Wurden NREP Antworten empfangen und liegt die Zeitspanne seit dem Erhalt der letzten NREP Nachricht im Bereich der Kanalzugriffsverzögerungszeit, so wird der Timer erneut gesetzt und gewartet. Hat der weiterleitende Knoten bei Ablauf des Timers mindestens eine Antwort, für eine bestimmte Zeitspanne (bei CARISMA für 10 ms) aber keine NREP Nachrichten mehr erhalten, so geht er davon aus, daß alle Nachbarn geantwortet haben. Er wählt dann die nächsten Weiterleiter mit Hilfe der empfangenen NREP Nachrichten aus. Der Algorithmus dazu ist in Abbildung 5.47

dargestellt. Der Knoten durchläuft dabei seine DISSTabelle, um alle Antworten auf die betreffende Nachricht herauszusuchen. Für jeden Eintrag sucht er dann in der nbrPosTabelle die Informationen über Position und Kreuzungsverbindungsstück. Für jedes neue Kreuzungsverbindungsstück wird dann der jeweilige Nachbar als weiterleitender Knoten gesetzt. Wird ein weiterer Nachbar auf einem Kreuzungsverbindungsstück in größerer Entfernung gefunden, so ersetzt dieser den vorher gespeicherten. Auf diese Weise sind nach einmaligem Durchlauf alle weitesten Nachbarn auf ihren jeweiligen Kreuzungsverbindungsstücken bekannt. Der Knoten sendet die Verbreitungsnachricht dann aus.

Das prinzipielle Verhalten beim Empfang der Verbreitungsnachricht für jeden Nachbarknoten ist in Abbildung 5.48 dargestellt. Zunächst wird anhand der Einträge der *MulticastSeenTabelle* überprüft, ob die Nachricht bereits früher empfangen wurde. Ist dies nicht der Fall, so wird der Tabelle ein neuer Eintrag hinzugefügt, bestehend aus der für jede Nachricht eindeutigen Kombination von Quelladresse und Sequenznummer. Anhand des Nachrichtentyps bzw. Applikationsprotokolls wird dann über die weitere Behandlung entschieden. Die Nachricht wird jeweils an das CARISMA Messaging, das Informationsmanagement oder direkt an eine Anwendung weitergegeben. Zusätzlich wird bei einem Geocast überprüft, ob sich der Knoten noch im Geocast-Gebiet befindet. Bei einer informationsbezogenen adaptiven Verbreitung (Typ INF) wird über die Weiterleitung auf der Basis einer Informationsnutzenbewertung entschieden (siehe Kapitel 6 und 7). Soll das Paket noch weitergereicht werden, so ist in der Abbildung das Verhalten der beiden alternativen Verfahren NGSF und WGSF dargestellt. Für NGSF wird zunächst überprüft, ob der Knoten als Weiterleiter vom Vorgänger ausgewählt wurde. Falls ja, löscht er alle Einträge seiner nbrPosTabelle und sendet eine neue NREQ Nachricht aus, wie beschrieben. Für WGSF setzt der Knoten eine Wartezeit.

Im Gegensatz zu NGSF kommt das Wartezeitverfahren WGSF so ohne Nachbarschaftsnachrichten aus. Statt zunächst eine NREQ Nachricht zu senden, leitet jeder Knoten die Nachricht nach dem Empfang unter bestimmten Voraussetzungen direkt weiter. Der Quellknoten versendet die Nachricht, die neben seiner Adresse und der Sequenznummer auch seine Position und sein aktuelles Kreuzungsverbindungsstück beinhaltet. Alle seine Nachbarn empfangen die Nachricht und warten für einen bestimmten Zeitraum, der abhängig ist von ihrer Entfernung zum Sender. Diese Wartezeit läuft zuerst für den am weitesten entfernten Knoten ab. Dieser ersetzt die Werte der Adresse des letzten Weiterleiters, der Position und des Kreuzungsverbindungsstücks mit seinen eigenen und sendet die Nachricht unmittelbar weiter. Knoten zwischen diesem und dem letzten Weiterleiter bzw. der Quelle hören diesen erneuten Versand mit. Sie inaktivieren ihre Wartezeit, wenn sie sich auf dem gleichen Kreuzungsverbindungsstück befinden und senden die Nachricht nicht mehr aus. Auf diese Weise wird bei WGSF genau wie bei NGSF sichergestellt, daß die Nachricht von den jeweils am weitesten entfernten Teilnehmern auf den verschiedenen Straßenverbindungsstücken weitergeleitet wird. Der Vorteil von WGSF gegenüber NGSF ist dabei, daß es keine NREQ und NREP Nachrichten benötigt, die zwar klein sind, aber zusätzlichen Netzverkehr verursachen. Dies wird erkauft mit einer Verzögerung bei der Nachrichtenverbreitung, verursacht durch die Wartezeiten. Je größer die Knotendichte, desto geringer ist dabei die Verzögerung und desto größer die Einsparung zusätzlicher Nachrichten im Vergleich zu NGSF.

Für ein effizientes Verhalten von WGSF ist eine geeignete Wahl der Verzögerungszeiten wichtig. Die Wahl der Verzögerungszeit sollte in Abhängigkeit der geschätzten (oder bekannten) aktuellen Knotendichte erfolgen. Ihr Wert beeinflußt entscheidend, ob es zu MAC Kollisionen kommt und wie lang die Nachrichtenverzögerung ist. ΔMAC bezeichne die Wartezeit, bei der im Anschluß

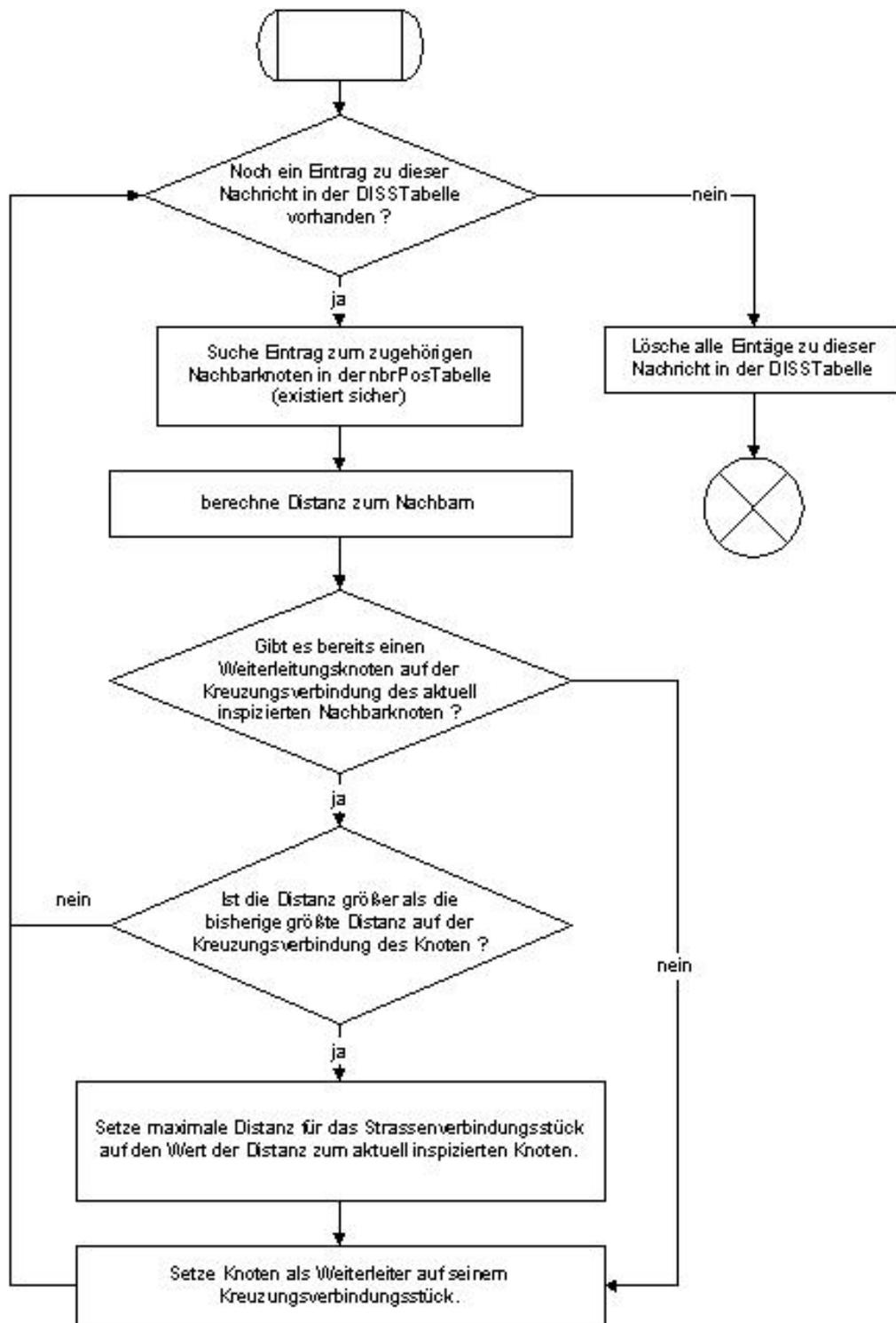


Abbildung 5.47: Auswahl der Weiterleitungsknoten bei NGSF

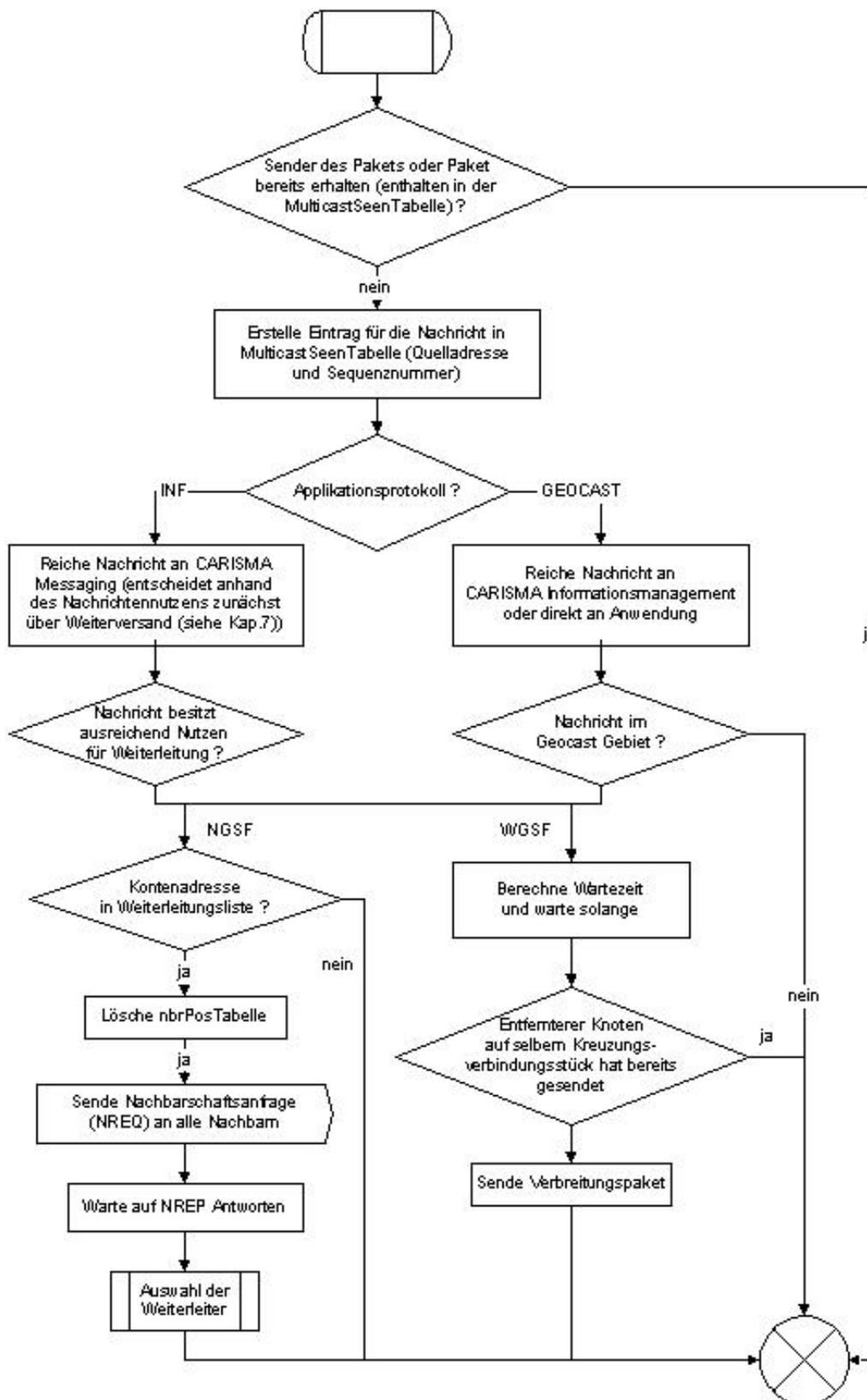


Abbildung 5.48: Verhalten beim Eintreffen einer Verbreitungsnachricht

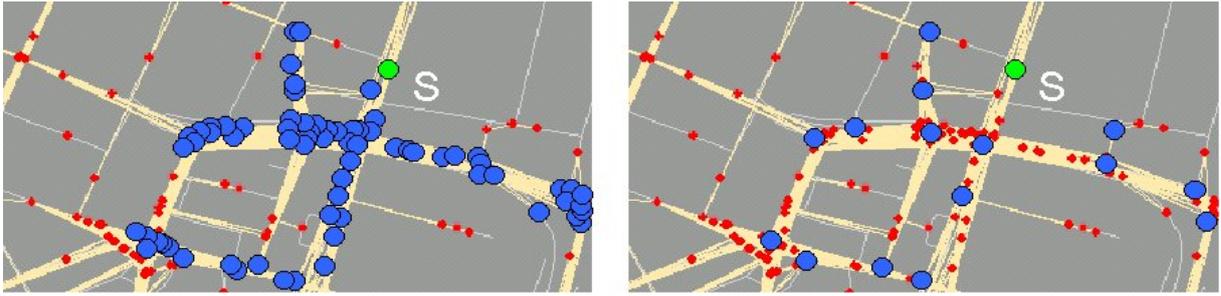


Abbildung 5.49: Vergleich von einfachem Fluten mit CARISMA Broadcast

an den Versand eines Paketes das nächste Paket von einem anderen Teilnehmer gerade ohne Kollision versendet werden kann. Bei CARISMA berechnet sich der Wert der Verzögerungszeit dann als $\Delta t = \Delta MAC * ((r - distLastNode) * \rho_V)$. Die maximale Kommunikationsreichweite r wird dabei um den Abstand zum Vorgänger vermindert. Dieser Wert ist dann umso kleiner, je weiter entfernt ein Knoten ist. Ist ein Teilnehmer beispielsweise $300m$ (bei $r = 400m$) entfernt, so ist $r - distLastNode = 100m$. Dieser Wert wird mit der Knotendichte gewichtet. Findet man im Mittel einen Knoten alle $20m$, dann ist $\rho_V = \frac{1}{20m}$. Liegt außerdem der Wert von ΔMAC bei $5ms$, dann gilt für das Beispiel $\Delta MAC * ((r - distLastNode) * \rho_V) = 25ms$. Auf abzweigenden Straßen weichen die Distanzen zweier hintereinander fahrender Fahrzeuge unter Umständen nur geringfügig voneinander ab. Um diesen Effekt zu vermeiden, kann alternativ die Wartezeit in Abhängigkeit der Entfernung entlang des Straßennetzes (statt der euklidischen Distanz) berechnet werden.

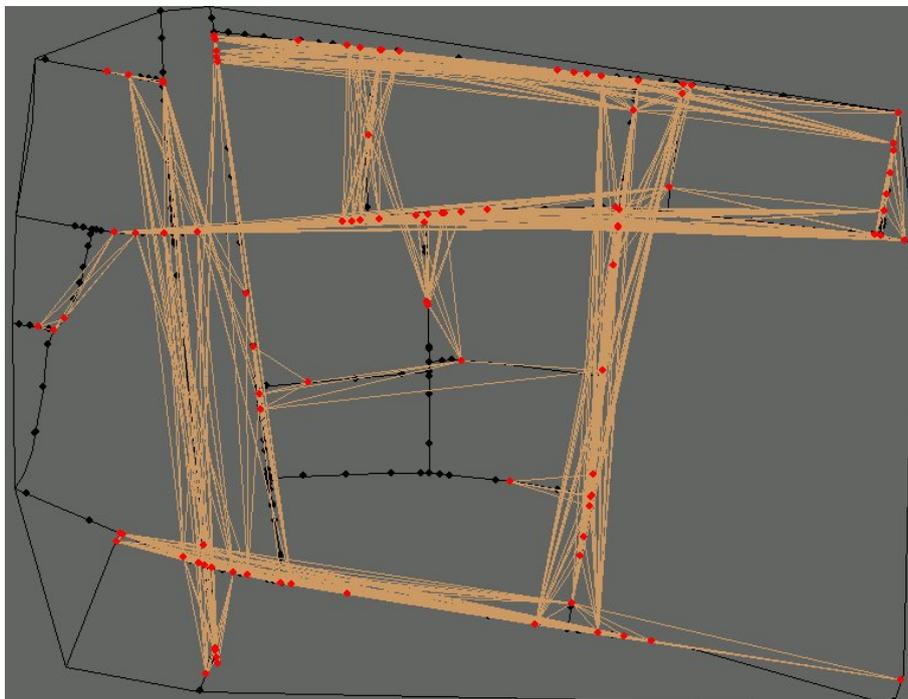


Abbildung 5.50: Schnappschuß der Simulation des Broadcaststurmproblems

Abbildung 5.50 zeigt die Karte und einen Schnappschuß der Simulation von NGSF und WGSF mit dem CARISMA Netzwerksimulator. Das Simulationsgebiet umfaßt eine Fläche von 0.46km^2 , auf dem sich 300 Fahrzeuge bewegen. Für die Analyse wurde die Anzahl der Fahrzeuge, die sich am Netz beteiligen, von 20 auf 300 in Schritten von 20 gesteigert. Die Abbildung zeigt den Fall 100 partizipierender Fahrzeuge (in rot) und 200 weiterer Fahrzeuge (in schwarz). Abbildung 5.49 stellt den Einsparungseffekt gegenüber einfachem Fluten dar. Der grüne Teilnehmer S initiiert eine zu verbreitende Nachricht. Die blau markierten Teilnehmer wiederholen die Nachricht. Im linken Teil der Abbildung ist zu sehen, was bei einfachem Fluten passiert, wenn jeder Knoten die Nachricht wiederholt. Im rechten Teil der Abbildung wiederholen nur Teilnehmer im Kreuzungsbereich bzw. entfernteste Teilnehmer die Nachricht, was zu einer deutlichen Reduktion der Sendeereignisse führt. Sowohl NGSF als auch WGSF verbrauchen deutlich weniger Netzwerkressourcen als reines Fluten, insbesondere bei steigender Knotendichte. Dies wird durch die Simulation bestätigt. Abbildung 5.51 zeigt das Ergebnis beim Versand jeweils einer Nachricht und Verbreitung der Nachricht im gesamten Simulationsgebiet. Beim reinen Fluten wiederholt jeder Teilnehmer die Nachricht einmal, so daß die Kurve proportional zur Menge der Teilnehmer verläuft. Sowohl NGSF als auch WGSF skalieren mit steigender Teilnehmerzahl besser. Interessanterweise kommt es bei WGSF zu mehr Sendeereignissen als bei NGSF. Dies kann durch zwei Charakteristiken dieser Methode erklärt werden.

Die erste bezieht sich auf die Wartezeit der Knoten. Die Wartezeit hängt von ihrer Distanz zum letzten Weiterleiter ab. Fahren zwei Fahrzeuge dicht hintereinander auf einer Straße, die senkrecht zur Straße des Senders verläuft, dann ist ihre Distanz zu diesem nur geringfügig unterschiedlich. Damit diese Fahrzeuge ihre Nachrichten nicht zur gleichen Zeit senden, muß die Wartezeit die beiden eindeutig unterscheiden. Dazu müßten sehr kleine Distanzunterschiede zu ausreichenden Differenzen der Wartezeit führen. Dies führt jedoch zu langen Wartezeiten für näher gelegene Nachbarknoten, was die Nachrichtenlatenz vergrößert. Die Nachrichtenlatenzkurven der Abbildung 5.52 bestätigen dieses Verhalten. Abgebildet sind jeweils die Kurven bei 200 teilnehmenden Fahrzeugen und 100 weiteren Fahrzeugen. Bei reinem Fluten trat so gut wie keine Verzögerung auf. Auf die Darstellung dieser Kurve wurde hier verzichtet. NGSF führt zur schnellsten Verbreitung der Nachricht. Das Verhalten von WGSF hängt vom Konnektivitätsfaktor für die Berechnung der Wartezeit ab. Ein höherer Wert reduziert die Anzahl der Retransmissionen der Nachricht, vergrößert aber die Nachrichtenlatenz. Eine mögliche Verbesserung könnte in einer kombinierten Berücksichtigung der Distanz vom Sender und der Distanz der Kreuzung am Ende des Kreuzungsverbindungsstücks, auf dem sich das Fahrzeug befindet, die dem Sender am nächsten gelegen ist, bestehen. Diese Untersuchung bleibt künftigen Studien vorbehalten.

Die zweite Charakteristik der WGSF Methode gegenüber NGSF, die zu einer höheren Zahl an Sendeereignissen führt, besteht darin, daß bei WGSF alle Knoten am Ende ihrer Wartezeit die Nachricht weiterleiten, falls dies nicht bereits ein anderer auf ihrer Kreuzungsverbindung getan hat, unabhängig davon, ob sie überhaupt einen neuen Nachbarn erreichen. Bei NGSF ist dies nicht der Fall. Gerade die Randeffekte bei dem relativ kleinen Simulationsgebiet führen hier zu einem Unterschied zwischen den beiden Varianten, d.h. bei NGSF wird die Nachricht nicht mehr versendet, wenn kein neuer Teilnehmer erreicht wird. Bei WGSF ist dies den Teilnehmern nicht bekannt.

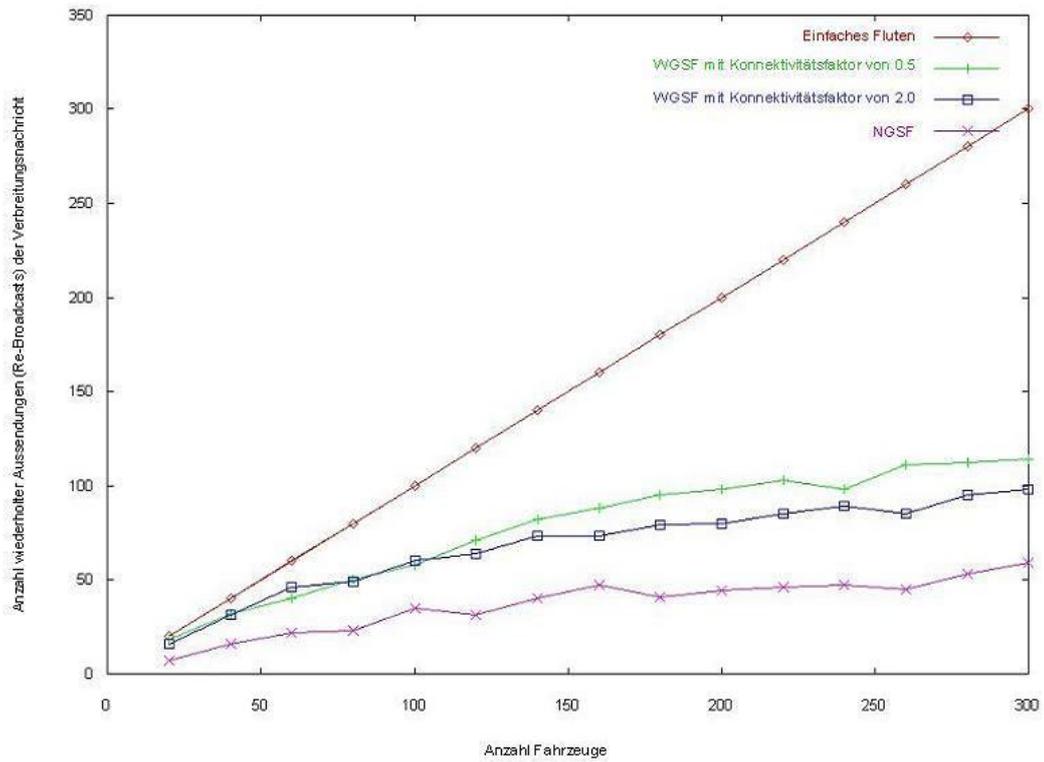


Abbildung 5.51: Anzahl der Sendeereignisse von WGSF und NGSF

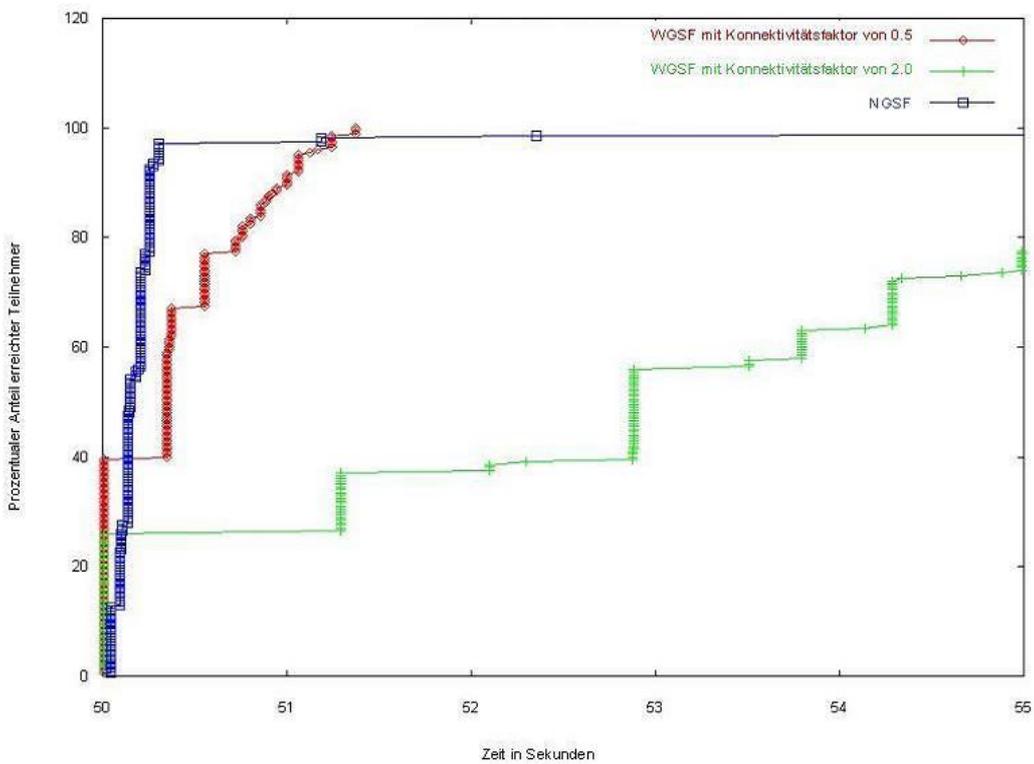


Abbildung 5.52: Nachrichtenlatenz bei WGSF und NGSF im Vergleich

Kapitel 6

Situationsabhängige Informationsbedarfsbestimmung

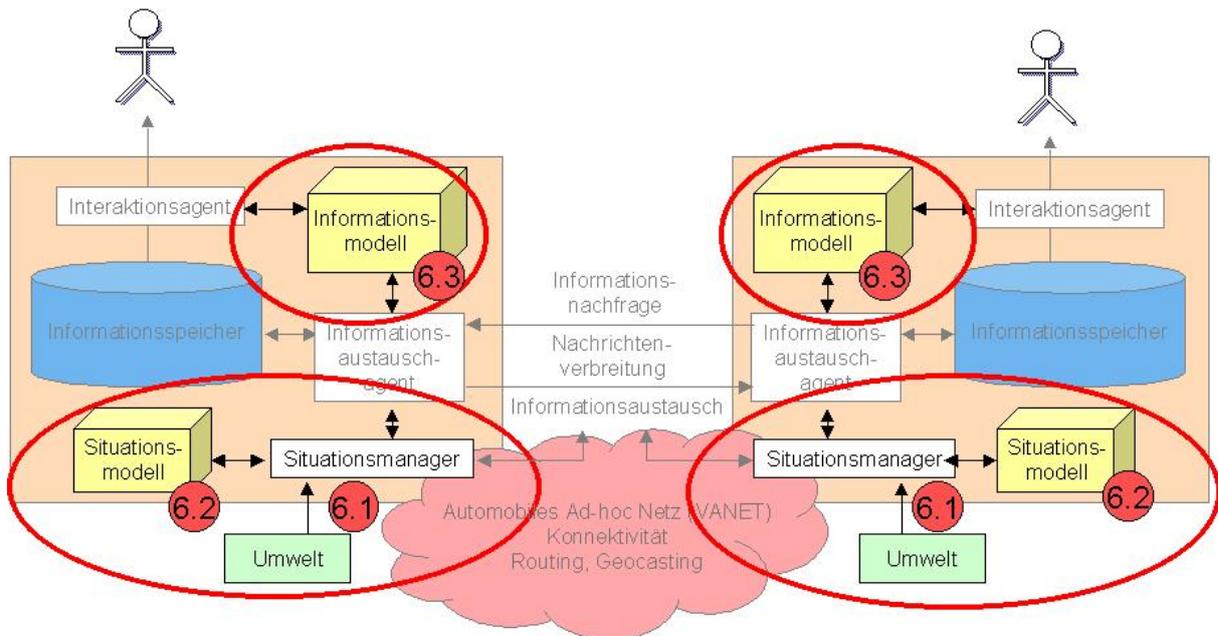


Abbildung 6.1: Situationsabhängige Informationsbedarfsbestimmung im Basismodell

6.1 Situationsadaptivität

6.1.1 Informationsbedarf durch Umgebungsänderung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Eigenschaften von VANETS und die CARISMA Netzwerkkomponente beschrieben wurden, bezieht sich dieses Kapitel auf das Situations- und Informationsmanagement von CARISMA. Bezogen auf das Basismodell beschäftigt sich das Kapitel also mit dem Situations- und Informationsmodell und dem Situationsmanager (siehe Abbildung 6.1). Um den Fahrer eines Automobils situationsbezogen informieren zu können, müssen die notwendigen Informationen in der jeweiligen Situation rechtzeitig zur Verfügung stehen. Eine wesentliche Anforderung an CARISMA ist deshalb, den situationsbezogenen Informationsbedarf der Netzteilnehmer zu kennen, um das Informationsangebot daran ausrichten und die Information vorab selbständig von Anbietern zu Nachfragern übertragen zu können. Die CARISMA Methode zur Ermittlung des situationsbezogenen Informationsbedarfes wird nachfolgend vorgestellt.

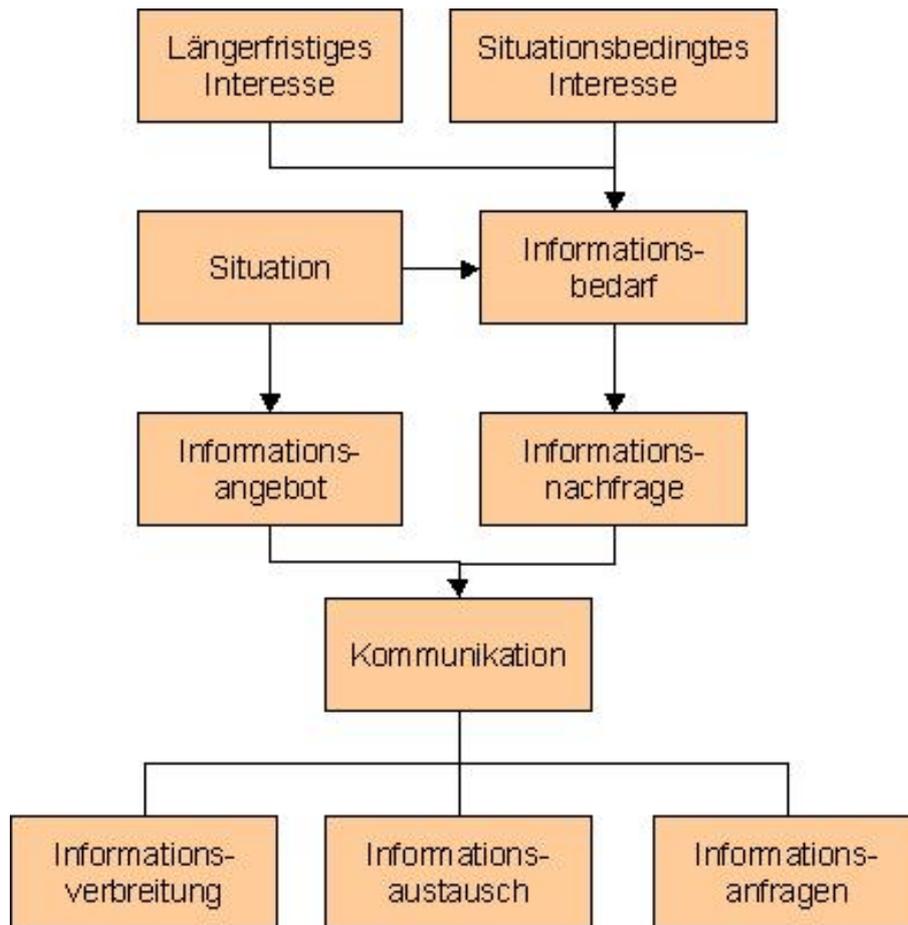


Abbildung 6.2: Prinzipielles Systemverhalten

Um ein Automobil sicher und schnell zum Fahrtziel zu steuern, benötigt der Fahrzeuglenker Informationen über sich dynamisch ändernde Zustände für ihn relevanter Objekte der Welt. Situationsbezogene Information bezieht sich deshalb in der Regel auf die Umgebung des Fahrzeuges. Ändert sich diese Umgebung, so ist dies potentiell für den CARISMA Nutzer interessant. Die Änderung der Umgebung für einen CARISMA Teilnehmer begründet sich auf zwei Ursachen:

- Die Umgebung ändert sich selbst im Lauf der Zeit:
Besitzt ein Teilnehmer bereits ein Bild seiner Umgebung, erfährt aber nichts über deren Änderung, so weicht sein Bild im Lauf der Zeit immer mehr von der Realität ab. Vorausgesetzt, der Teilnehmer strebt es an, ein möglichst präzises Bild der Realität zu besitzen, um sein Handeln darauf einstellen und abstimmen zu können, so wird sein Bedarf an neuen Informationen in der Regel mit der Abweichung des Bildes von der Realität wachsen.
- Die Umgebung ändert sich durch Bewegung des Teilnehmers:
Die Umgebung ändert sich in diesem Fall auch dann, wenn die Umgebung selbst statisch ist. Auch in diesem Fall entsteht eine Diskrepanz zwischen dem lokalen Bild der Umgebung und der tatsächlichen Umgebung, solange der Teilnehmer keine neuen Informationen über die wechselnde Umgebung erhält.

Entscheidend für den situationsbedingten Informationsbedarf eines CARISMA Netzteilnehmers ist also eine wachsende Diskrepanz zwischen der Umgebung und dem Bild der Umgebung in zeitlicher und räumlicher Hinsicht. Umgebungsbeschreibende Informationsobjekte werden deshalb bei CARISMA unabhängig von ihrem sonstigen Inhalt um orts- und zeitbezogene Metadaten erweitert. Für den Autofahrer ist dabei im Hinblick auf seine Umgebung insbesondere der vor ihm liegende Teil relevant, d.h. all das, was ihn auf seiner Route erwartet. Er möchte vorab beispielsweise über Probleme und Gefahren auf seiner Strecke informiert sein, um rechtzeitig reagieren zu können.

An welchen Informationstypen ein Teilnehmer dabei Interesse besitzt, hängt neben seinen persönlichen Eigenschaften und Interessen auch von seiner Situation ab. Die Information über einen freien Parkplatz ist beispielsweise nur dann interessant, wenn der Teilnehmer auf der Suche nach einem Parkplatz in der entsprechenden Gegend ist. Eine autonome Ermittlung des Informationsbedarfes benötigt deswegen Wissen über die aktuelle Situation, über Bewegungsrichtungen und geplante Fahrtrouten, sowie über den bereits bekannten Informationsstand.

Das prinzipielle CARISMA Systemverhalten ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Der situationsbezogene Informationsbedarf leitet sich ab aus längerfristigen und situationsbedingten Interessen. Die Situation, in der sich der Teilnehmer gerade befindet, spielt die wesentliche Rolle. Sie hat neben dem Informationsbedarf auch Einfluß auf das Informationsangebot. Gibt es ein Informationsangebot, so entsteht aus dem Informationsbedarf Nachfrage nach dieser Information. Diese Nachfrage kann durch Kommunikation, d.h. die Übertragung vom Informationsanbieter zum Informationsnachfrager, befriedigt werden. Für diese Übertragung stehen drei Kommunikationsmöglichkeiten zur Verfügung. Die *Informationsverbreitung* ist getrieben durch den Informationsanbieter. Er ist davon überzeugt, daß es ein ausreichendes Interesse an seiner Information gibt und sendet sie selbständig an potentielle Nachfrager. Die Nachfrager können ihrerseits *Anfragen* nach Informationen stellen. Die dritte Variante ist eine Mischform. Der *Informationsaustausch* bedeutet bei CARISMA, daß sich zwei zufällig im Netz begegnende Teilnehmer über ihr Informationsangebot austauschen und dann ggfs. gezielt einzelne Informationen nachfragen.

Die mittels einer dieser Varianten in ein Fahrzeug übertragene Information kann dann den eigentlichen Informationsnutzer (den Fahrer oder eine Softwarekomponente) in zwei Varianten erreichen: durch automatische Weitergabe oder durch explizite Nachfrage. Die automatische Weitergabe kann sich dabei auf ein Ereignis beziehen und den Nutzer über den Eintritt dieses Ereignisses informieren. Ein Beispiel hierfür ist die Information über eine Gefahrenstelle auf der Straße. Die automatische Weitergabe kann auch einen permanent informierenden Charakter haben, beispielsweise über die Verkehrslage auf der geplanten Route. Hierzu werden in der Kartendarstellung des Navigationssystems bei CARISMA Straßen gemäß der aktuellen Verkehrslage eingefärbt (grün für freie Fahrt, rot für Stau). Der Nutzer kann auch explizit Informationen anfragen. Dies wird typischerweise der Fall sein bei der Suche nach einer bestimmten Information, z.B. einem freien Hotelzimmer. Sowohl Fahrer als auch Softwarekomponenten können sich bei CARISMA für die automatische Weitergabe bestimmter Informationen anmelden. Basierend auf einer Benachrichtigung besteht die Möglichkeit für den Informationsverbraucher, zusätzlich vertiefende Information anzufordern. Beispielsweise kann sich ein Nutzer für eine Benachrichtigung bei neuen Theatervorstellungen anmelden. Möchte er dann mehr über eine bestimmte Veranstaltung erfahren, so wird ihm dies per weiterer Anfrage ermöglicht.

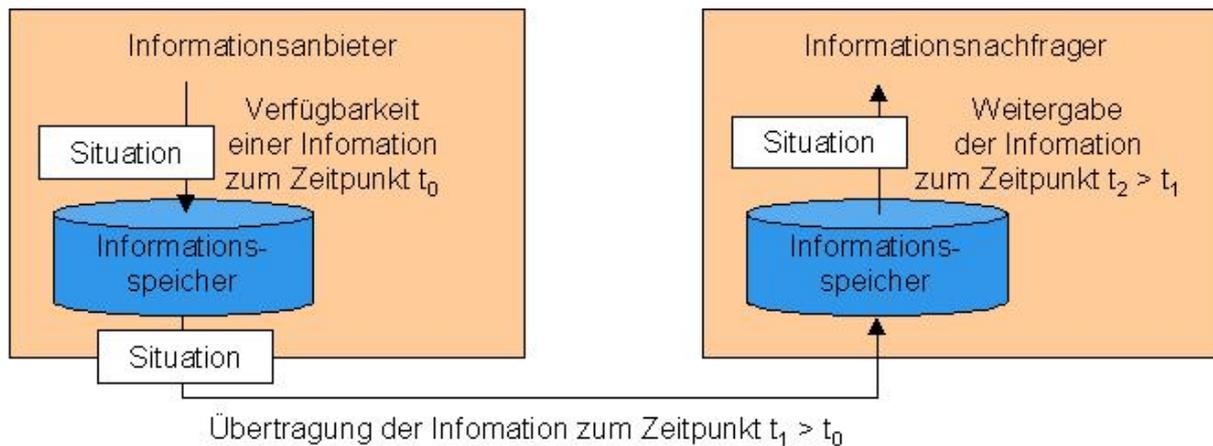


Abbildung 6.3: Situationsgetriggerte, doppelt entkoppelte Kommunikation

Informationen müssen dem Verbraucher dabei *rechtzeitig* zur Verfügung stehen. Diese Rechtzeitigkeit ergibt sich beispielsweise daraus, daß er sein Handeln auf Basis der Information adaptieren kann. Die Warnung vor einer glatten Stelle auf der Straße muß also so rechtzeitig erfolgen, daß der Fahrer seine Geschwindigkeit reduzieren kann. Information über einen Stau muß verfügbar sein, solange die Möglichkeit besteht, den Stau zu umfahren. Auch Information, die abgerufen wird, sollte zum Zeitpunkt der Nachfrage spätestens verfügbar sein. Hieraus ergibt sich als Anforderung für CARISMA, dafür zu sorgen, daß Informationen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt beim Nachfrager verfügbar sind.

Sind voraussichtlich benötigte Informationen nur bei anderen Teilnehmern verfügbar, so müssen sie rechtzeitig im Voraus übertragen werden. In einem VANET ist dies umso wichtiger, als nicht garantiert werden kann, daß es jederzeit eine Kommunikationsverbindung zum Informationsanbieter gibt. Diese vorausschauende Übertragung löst somit das Problem, daß Angebot und Nachfrage zeitlich und räumlich auseinanderfallen können. In der Realgüterwirtschaft ist dieses Phänomen ebenfalls zu beobachten. Zur Lösung wird dort auf Lagerhaltung zurückgegriffen. Die lokale Speicherung von Informationselementen kann als Analogie dazu begriffen werden. Die lokal verfügbaren Informationen werden dann weiteren Netzteilnehmern zur Verfügung gestellt.

Da Lagerhaltung Ressourcen beansprucht, wäre eine Just-In-Time Lieferung der benötigten Informationen günstig. Dabei sind allerdings die Kommunikationskosten zu berücksichtigen. Die vorausschauende Informationsspeicherung ermöglicht nicht nur den Zugriff auf Informationsobjekte, die ansonsten aufgrund von Netzwerkpartitionierungen zwischenzeitlich unerreichbar wären, sondern auch den unmittelbaren lokalen Zugriff auf Informationsobjekte, deren Anbieter im Netzwerk zunächst lokalisiert werden müßten und potentiell sehr weit weg liegen können. Die Kommunikation findet, zeitlich vorverlagert, dann statt, wenn Informationsobjekte bei direkten Nachbarn im VANET verfügbar sind. Dies senkt Kommunikationskosten, erhöht aber die Speicherkosten. Insgesamt ist das Ziel einer rechtzeitigen Information unter Minimierung der Kosten zu erreichen.

Abbildung 6.3 stellt die zeitlich entkoppelte, situationsabhängige CARISMA Kommunikation dar. Beim Informationsanbieter wird eine Information zu einem Zeitpunkt t_0 verfügbar. Zu einem späteren Zeitpunkt t_1 wird diese Information zum Informationsnachfrager übertragen. Hier wird sie ggfs. noch einmal zwischengespeichert, bis sie, situationsgetriggert, zu einem Zeitpunkt t_2 an den

Interessenten weitergereicht oder von diesem nachgefragt wird. Durch die lokale Speicherung stellt der Nachfrager nun seinerseits die Information weiteren Interessenten zur Verfügung. Wichtige Teilfragen sind dabei:

- Welche Information soll lokal gespeichert werden ?
- Welche Information soll von Netznachbarn übertragen werden ?
- Wann soll welche Information versendet werden ?
- Wie wird die Information distributiert ?

Zur Bestimmung des situationsbezogenen Informationsbedarfs ist es notwendig, Situationen zu definieren und zu erkennen, in welchen Situationen sich Fahrer und Fahrzeug zu einem Zeitpunkt befinden. Bei CARISMA werden Situationen explizit im System repräsentiert. Der Bedarf an Informationen eines bestimmten Typs ist dann abhängig von den Situationen definiert. Situationen dienen bei CARISMA also der Bestimmung des Bedarfes an einer bestimmten Informationskategorie. Darauf aufbauend werden einzelne Instanzen von Informationsobjekten eines bestimmten Typs hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Relevanz beurteilt.

6.1.2 Situationsadaptive Systeme

Zur Realisierung situationsadaptiver Fahrerinformationssysteme bei CARISMA sind Sensoren zur Wahrnehmung der situationsbestimmenden Parameter, die Repräsentation der Situationen im System, Algorithmen zur Erkennung der Situationen, und eine Methode zur Informationsauswahl in Abhängigkeit der Situationen notwendig.

Abbildung 6.4 stellt die Komponenten zur Realisierung der Situationsadaptivität bei CARISMA dar und kann auch als Modell für andere situationsadaptive Systeme verstanden werden. Situationen sind dabei allgemeiner Natur und unabhängig von den sich an sie adaptierenden Komponenten repräsentiert. Sie werden demnach in der Regel auch unabhängig von einer bestimmten Anwendung modelliert. Eine grundlegende Architektur für kontextsensitive Systeme wurde von Schilit beschrieben [174].

Voraussetzung für die Adaptionfähigkeit ist die Fähigkeit des Systems zur Beobachtung und Wahrnehmung der relevanten Situationen. Nicht nur Umweltzustände, sondern auch interne Systemzustände und Nutzereingaben werden dazu von Sensoren erfaßt. Beobachtungskomponenten legen relevante Sensorinformation in einem Zustandsspeicher ab. Sie werden dazu von Situationsagenten beauftragt, die ihnen mitteilen, welche Sensorinformationen sie in welcher Genauigkeit benötigen. Dieser Zustandsspeicher beinhaltet eine Menge einfacher Sensormeßwerte mit ihren Meßzeitpunkten.

Situationsagenten können die Beobachter beauftragen, sie bei bestimmten Ereignissen zu informieren, insbesondere dann, wenn ein Sensorwert einen Schwellenwert über- oder unterschreitet, von einem vorgegebenen Wert stark abweicht oder seine Werte sehr schnell ändert, beispielsweise also, wenn eine bestimmte Geschwindigkeit überschritten wird oder das Fahrzeug stark abgebremst

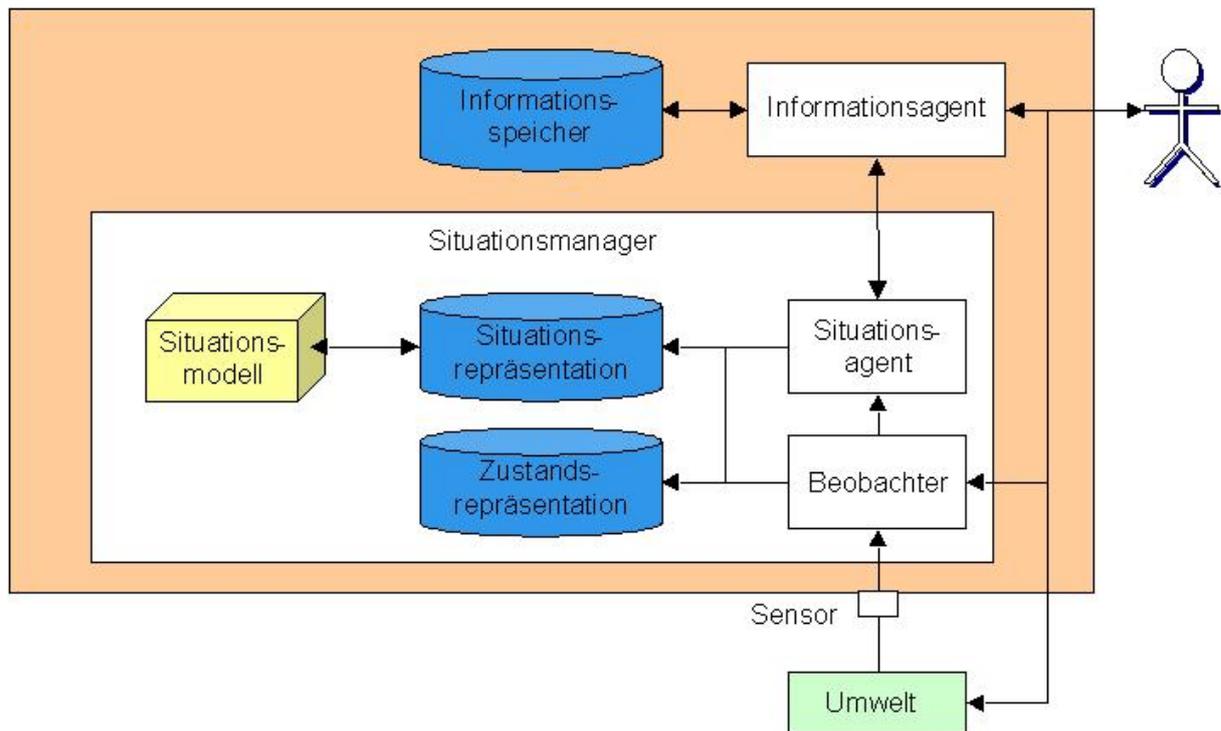


Abbildung 6.4: Situationsadaptivität im System

wird. Die Situationsagenten stellen dann anderen Agenten im System Informationen über Situationen bereit und können sie beim Eintreten bestimmter Situationen benachrichtigen. Situationen gehen dabei über einzelne Sensormesswerte hinaus. Sie lassen sich meist nur aus der Kombination mehrerer beobachteter Messwerte ableiten. In einem Situationsmodell muß dazu definiert sein, von welchen Werten eine Situation abhängt. Basierend auf dem Situationsmodell interpretieren die Situationsagenten die wahrgenommenen Werte und klassifizieren sie in a priori definierte Situationen. Das Systemverhalten adaptiert sich dann an die jeweiligen Situationen. Das Gesamtsystem besteht somit aus einer Menge adaptiver Subsysteme bzw. selbständig handelnder Agenten, deren adaptierende Variablen gemeinsam und unabhängig verwaltet werden. Dadurch wird eine Entkopplung der Sensorik von der Aktorik erreicht, die im Fahrzeug dann zusätzlich zu mechanischen Systemen auch autonom agierende Informations- und Kommunikationssysteme umfaßt.

Die Zustandsrepräsentation bildet die Wissensbasis des Umweltzustandes und im Situationsmodell sind die Regeln definiert, wie Situationsinformation aus der Zustandsrepräsentation gewonnen wird. Die Situationsinformation bildet nun ihrerseits die Wissensbasis, auf der Agenten über logische Deduktion weitere Entscheidungen treffen. Die Wissensbasen enthalten vorgegebenes Basiswissen sowie Regeln zur Aneignung neuen Faktenwissens durch Umweltbeobachtung.

Eine verteilte Realisierung von CARISMA im Fahrzeug basierend auf dem allgemeinen Situations-systemkonzept ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Im Auto sind die Sensoren verteilt und geben ihre Messwerte nach Anfrage, häufig auch zyklisch, über ein Bussystem bekannt. Die Beobachtungs- und Situationskomponente hängt ebenfalls am Fahrzeugbus, erhält somit die kommunizierten Messwerte und stellt ihrerseits Anfragen an die Sensorsysteme. Sie leitet Situationsinformation aus den einzelnen Beobachtungen ab, die sie anderen Komponenten zur Verfügung stellt oder nach Regi-

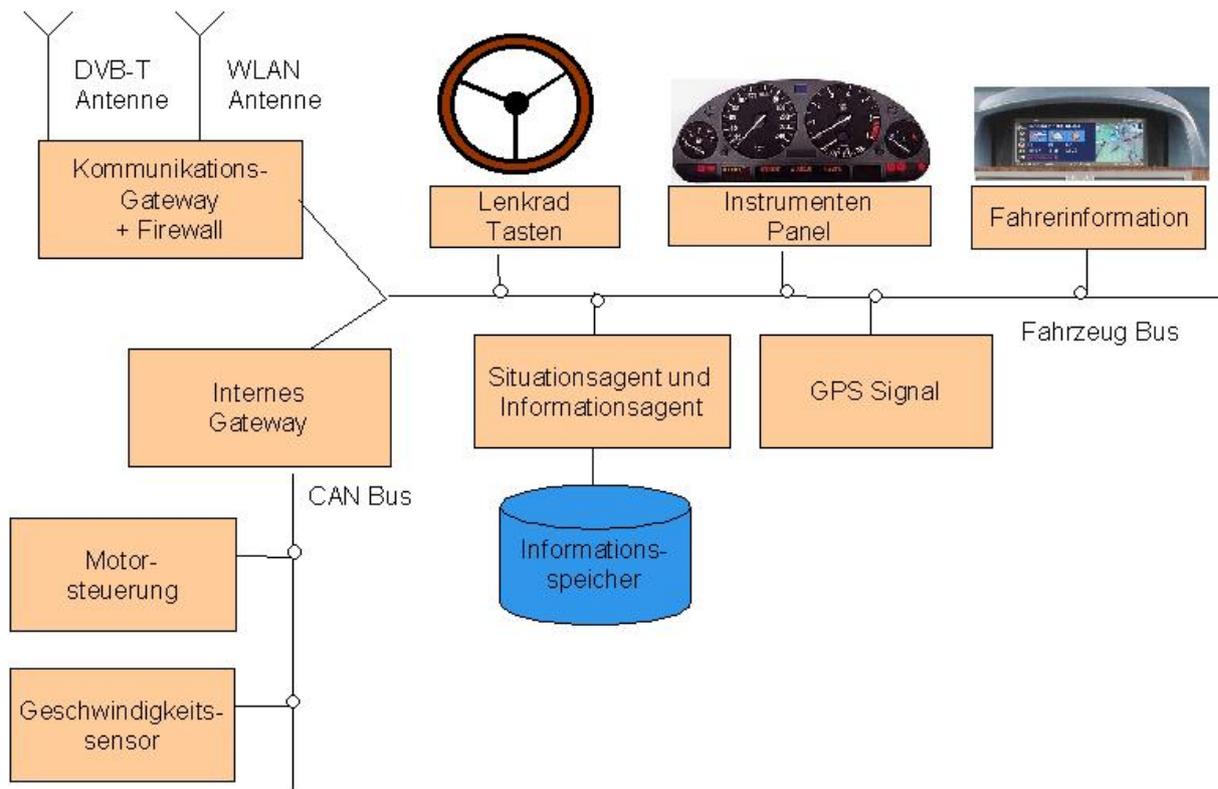


Abbildung 6.5: Verteilte CARISMA Komponenten im Fahrzeug

strierung aktiv bekannt gibt. Dazu beobachtet sie zusätzlich das Fahrerverhalten über gleichfalls über das Fahrzeugbussystem gesendete Signale von Eingabekomponenten, beispielsweise von den Lenkradtasten.

Speziell für CARISMA maßgebend ist darüber hinaus die Fähigkeit des fahrzeugübergreifenden Informationsaustausches. Die Möglichkeit der lokalen Kommunikation über WLAN wird über ein Kommunikationsgateway möglich, das über weitere drahtlose Mobilkommunikationsschnittstellen sowie eine Firewall verfügt (ein solches Fahrzeug-Gateway wurde von Kellerer et al. beschrieben [94, 95]). Als Teil dieses Gateways ist die CARISMA Routingkomponente realisiert. Der Kommunikationsbus, an dem die CARISMA Situationsmanagementkomponente hängt, ist über ein internes Gateway mit weiteren Fahrzeugbussen wie dem CAN-Bus (Controller Area Network) verbunden. Der fahrrelevante CAN-Bus wird so über ein doppeltes Gateway vor unberechtigten Zugriffen von aussen geschützt. Die CARISMA Situationskomponente kombiniert somit die fahrzeuginternen Beobachtungen mit Informationen, die über das Ad-hoc Netz zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden.

6.2 Situationsmodell

6.2.1 Modell zur Situationsrepräsentation

Um mit Situationen operieren zu können, ist eine symbolische Repräsentation notwendig, d.h. ein Situationsmodell, das den abstrakten Zustand einer Situation in eine formalsprachliche Repräsentation überführt. Im folgenden wird zunächst ein Grobkonzept für ein solches Situationsmodell eingeführt. Anschließend wird es konkret auf Situationen bei Fahrten mit Automobilen angewendet. Situationen sind bei CARISMA als Variablen definiert, die eine diskrete Wertemenge abzählbar vieler Zustände besitzen. Die Verkehrssituation kann beispielsweise als Variable mit der diskreten Wertemenge frei, flüssig, zähflüssig, stockend und Stau definiert werden. In vielen Fällen sind die Werte der so definierten Situationen nicht direkt beobachtbar. Auf das Eintreten einer Situation läßt sich jedoch aus einer oder mehreren *beobachtbaren Umweltvariablen* und aus dem Eintreten anderer Situationen schließen. Eine *Umweltvariable* ist dabei eine Variable, die eine Eigenschaft der Umwelt beschreibt. Sie ist *beobachtbar*, wenn ihr Wert direkt über Sensoren wahrgenommen werden kann.

Eine einfache Möglichkeit dazu sind regelbasierte Systeme auf Basis der Aussagenlogik. Sie eignen sich für logische Deduktionen in deterministischen Strukturen. In einer einfachen Form können bei CARISMA Situationsabhängigkeiten deshalb mit Inferenzregeln beschrieben werden. Bezeichne S die Menge der aktuell gültigen Situationen, mit S_i ($i = 1..n$) seien die einzelnen definierten Situationen bezeichnet, x_j^e ($j = 1..m$) sei eine Umweltvariable aus der Menge der beobachtbaren Umweltvariablen X^e und W_{j,s_i}^e bezeichne einen Teil des Wertebereiches von x_j^e , dann wird das Eintreten einer Situation wie folgt als Implikation formalisiert

$$x_{j_1}^e \in W_{j_1,s_i}^e \wedge \dots \wedge x_{j_q}^e \in W_{j_q,s_i}^e \longrightarrow S_i \in S.$$

Situationszustände lassen sich in dieser Weise als Zustandsräume interpretieren, d.h. als Subräume des Hyperraumes, der von allen beobachtbaren Variablen gebildet wird, von denen das Eintreten einer Situation abhängt. Der Situationsagent ermittelt aus den relevanten Umweltvariablen $x_{j_k}^e$ diejenigen, die selten in den notwendigen Wertebereich kommen, als kritische Variablen und beauftragt den Beobachter, ihn zu informieren, sobald eine solche kritische Variable einen Wert aus dem gegebenen Bereich annimmt. Erst dann überprüft er die Werte der anderen situationsdefinierenden Variablen. Die Beobachter ermitteln dazu die Häufigkeiten der einzelnen Variablenwerte zur Laufzeit und stellen diese Informationen dem Situationsagenten zur Verfügung. Analog dazu merken sie sich die Änderungsgeschwindigkeiten der Variablenwerte. Dies ermöglicht eine wahrheitsbehafte Aussage darüber, wann eine Variable ausgehend vom aktuellen Wert frühestens einen Schwellenwert erreicht.

Definiert man ein Situationsmodell in dieser Form, so ist eine Situation genau dann eingetreten, wenn die Variablenwerte einen Punkt innerhalb des Subraumes beschreiben. Situationen besitzen dabei scharfe Grenzen und gelten entweder oder gelten nicht. Dies kann problematisch sein, wie sich aus dem Beispiel der Verkehrssituationen ergibt. Wie ist die Grenze zwischen stockendem Verkehr und Stau zu wählen? Bewegt sich der Verkehrsfluß in der Realität an der gewählten Grenze, so würde die Situation ständig wechseln, was unerwünschte Reaktionen davon abhängiger Systemfunktionen nach sich ziehen würde. Eine weichere Definition ergibt sich, wenn man zur

Beschreibung der Situationen Fuzzy-Mengen [208] zuläßt. Dann können Situationen auch nur zu einem gewissen Grad eingetreten sein. Beispielsweise läßt sich damit dann ein stark stockender Verkehr mit etwas Stau abbilden. Der Grad des Eingetretenseins einer Situation zu einem Zeitpunkt t sei dazu mit $deg(S_i, t)$ bezeichnet. $deg(S_i, t)$ definiert dabei eine Abbildung in Abhängigkeit der situationsdefinierenden Variablenwerte x_j^e mit allen reellen Zahlen in $[0..1]$ als Wertebereich.

Sind von einigen definierenden Variablen keine Werte bekannt, so läßt sich ggfs. dennoch eine Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der Situation berechnen. Analog zum subjektivistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff läßt sich dabei von dem Grad des Überzeugtseins sprechen, daß eine Situation eingetreten ist. Dieser Grad des Überzeugtseins des Vorliegens einer Situation zu einem Zeitpunkt t sei als $belief(S_i, t)$ bezeichnet, mit dem Intervall $[0..1]$ als Wertebereich. Solche Überzeugtheitsgrade können aus bedingten Wahrscheinlichkeiten mittels Bayes'scher Netze modelliert und berechnet werden (zu Bayes'schen Netzen siehe z.B. [43, 84, 98]). Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Kommunikation liegt, wird nicht näher hierauf eingegangen. Für die Menge der zu einem Zeitpunkt t eingetretenen Situationen bei CARISMA, unter Berücksichtigung variierender Intensitäten und Unsicherheiten, gilt also

$$S(t) = \{S_1(deg(S_1, t); belief(S_1, t)), \dots, S_m(deg(S_m, t); belief(S_m, t))\}$$

Basierend auf diesem Modell lassen sich Beziehungen zwischen Situationen definieren. Zwei Situationen sind dann beispielsweise *unvereinbar*, wenn sie gemeinsame definierende Variablen besitzen, deren für die Situationen charakteristischer Wertebereich sich nicht überschneidet. Eine Situation A *bedingt* eine Situation B, wenn der Subraum der Situation B komplett im situationsdefinierenden Raum der Situation A enthalten ist. Auf diese Weise lassen sich relativ generisch definierte Situationen auch weiter einschränken und eine Situationshierarchie aufbauen. Besitzen zwei Situationen keine gemeinsamen definierenden Variablen, so können dennoch Beziehungen zwischen ihnen bestehen. Beispielsweise kann eine Situation mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eingetreten sein, wenn eine andere Situation vorliegt, so sind Staus bei schlechtem Wetter wahrscheinlicher als bei gutem. Eine Abhängigkeit zwischen Situationen kann darüber hinaus in zeitlicher Hinsicht dadurch gegeben sein, daß kausale Zusammenhänge zwischen den Situationen bestehen. Basierend auf gegenwärtigen Situationen lassen sich dann künftige Situationen prognostizieren.

6.2.2 Situationen und situationsrelevante Parameter bei einer Autofahrt

Zwei wesentliche Aspekte einer Autofahrt sind das Fahrtziel und der Fahrtzweck, d.h. wohin der Fahrer fährt und warum er dahin fährt. Diese beiden situativen Aspekte haben einen wesentlichen Einfluß auf den Informationsbedarf und auf die Bewertung des Nutzens einzelner Informationsobjekte für den Fahrer. Basierend auf dem Situationsmodell ist der Fahrtzweck eine Situationsvariable mit einer Menge möglicher Ausprägungen. Das Fahrtziel ist ein ortsbezogener Situationsparameter und geht deshalb differenzierter in eine ortsbezogene Nutzenbewertung ein. Das Fahrtziel bedingt dabei zu einem gewissen Grad die Fahrtroute. Es spielt eine wesentliche Rolle bei der Bewertung von Informationsobjekten im Hinblick auf deren räumlichen Bezug.

CARISMA benötigt Informationen über Fahrtziel und Fahrtstrecke, um beispielsweise selbständig entscheiden zu können, ob das Fahrzeug von einer Verkehrssituation betroffen ist oder nicht. Ist

ein Navigationssystem vorhanden, so wird der Fahrer bei neuen und unbekanntem Zielen diese in der Regel zur Zielführung eingeben. Ohne Navigationssystem oder bei bekannten und häufig gefahrenen Routen steht diese Information CARISMA nicht unmittelbar zur Verfügung. Gerade Routinefahrten, beispielsweise zur Arbeitsstätte oder zum Training, finden jedoch häufig zu charakteristischen Zeiten statt. Basierend auf Beobachtungen in der Vergangenheit stellt CARISMA deshalb basierend auf Jahreszeit, Wochentag und Tageszeit Vermutungen über das angesteuerte Fahrtziel an. Diese Vermutung wird im Verlauf der Fahrt basierend auf der bereits zurückgelegten Strecke präzisiert. Die Abhängigkeitsstruktur läßt sich als Bayes'sches Netz modellieren. Ist dann der Wochentag beispielsweise Montag und die Tageszeit morgens, dann kann mit einer gewissen Sicherheit darauf geschlossen werden, daß der Fahrer sich auf dem Weg zur Arbeitsstätte befindet. Der Ausschluß potentieller Zielorte aufgrund der bereits zurückgelegten Strecke dient als zusätzliche Information und die Wahrscheinlichkeit für Zielorte im Fahrkorridor steigt. Die Abhängigkeiten im Bayes'schen Netz werden dazu im Vorfeld modelliert. Die Übergangswahrscheinlichkeiten werden dann basierend auf den beobachteten Zusammenhängen zur Laufzeit permanent adaptiert. Sehr häufig wird der Fahrer nach Besuch eines Zielortes wieder zum Heimatort zurückkehren. In Abbildung 6.6 sind drei Fahrtziele mit Attributen und relativen Häufigkeiten, mit denen diese Fahrtziele angesteuert werden, sowie die Heimatposition beispielhaft eingetragen. In diesem einfachen Modell hat der Fahrer in der Vergangenheit von seiner Wohnung aus in 70% der Fälle die Universität angesteuert, 25% der Fahrten gingen zum Tennisplatz und in 5% der Fälle war das Einkaufszentrum das Ziel. Eine Tripklassifikation wird, wie beschrieben, genauer, wenn diese relativen Häufigkeiten von anderen Variablen wie dem Wochentag oder der Uhrzeit abhängen.

Eng verbunden mit dem Fahrtziel ist der Zweck einer Fahrt. Fastenmeier et al. benennen die Fahrt von und zur Arbeit, die Erledigungsfahrt, die Freizeitfahrt und die Wochenendfahrt als vier repräsentative Fahrttypen [60]. Diese Fahrttypen lassen sich in einer zweiten Stufe verfeinern und so z.B. als Freizeitfahrt die Fahrt zum Sport, zu Verwandten oder zu Freunden unterscheiden. Ein Klassifikationsalgorithmus ordnet, ebenfalls mit bestimmter Sicherheit, jede unternommene Fahrt einer dieser Klassen zu. Wesentliche Hinweise zum Fahrtzweck können aus dem Zielort einer Fahrt gewonnen werden. Sofern entsprechende Attribute in einer digitalen Karte vorhanden sind, kann beispielsweise erkannt werden, ob sich der Zielort in einem Industriegebiet oder einem Skigebiet befindet. Es läßt sich ebenfalls ermitteln, ob das Fahrzeug in der Nähe einer Adresse aus dem Adreßbuch parkt. Steuert der Fahrer einen Parkplatz an, so läßt sich aus den Attributen der Bereiche in der Umgebung des Parkhauses (Innenstadt, Oper, Messegelände, Stadion etc.) auf den Fahrtzweck schließen. Neben positiven sind negative Inferenzregeln in einem *Preprocessing* hilfreich. Bestimmte Faktoren schließen bestimmte Fahrtzwecke fast sicher aus (bspw. gesetzliche Ladenöffnungszeiten hinsichtlich der Einkaufsfahrt, der zurückgelegte Weg etc.). Diese Elemente werden aus der Wertemenge in einem dem eigentlichen Inferenzprozeß vorgeschalteten Schritt entfernt. Basierend auf dieser Klassifikation werden dann Filter für Informationskategorien zusammengesetzt. Im Gegensatz zum Zielort kann der tatsächliche Zweck einer Fahrt auch im nachhinein nicht beobachtet werden. Um den Erkennungsalgorithmus zu verbessern, ist eine Rückmeldung mit Bewertung vom Fahrer notwendig.

Eine genauere Analyse der Methoden würde einen realen Test mit mehreren Testpersonen erfordern. Eine solche aufwändige Validierung des Konzepts ist im Rahmen künftiger Forschungsaktivitäten geplant. Hier soll diese kurze Darstellung der prinzipiellen Vorgehensweise genügen. Sie dient als Basis für Auswahl und Bewertung von Informationen.

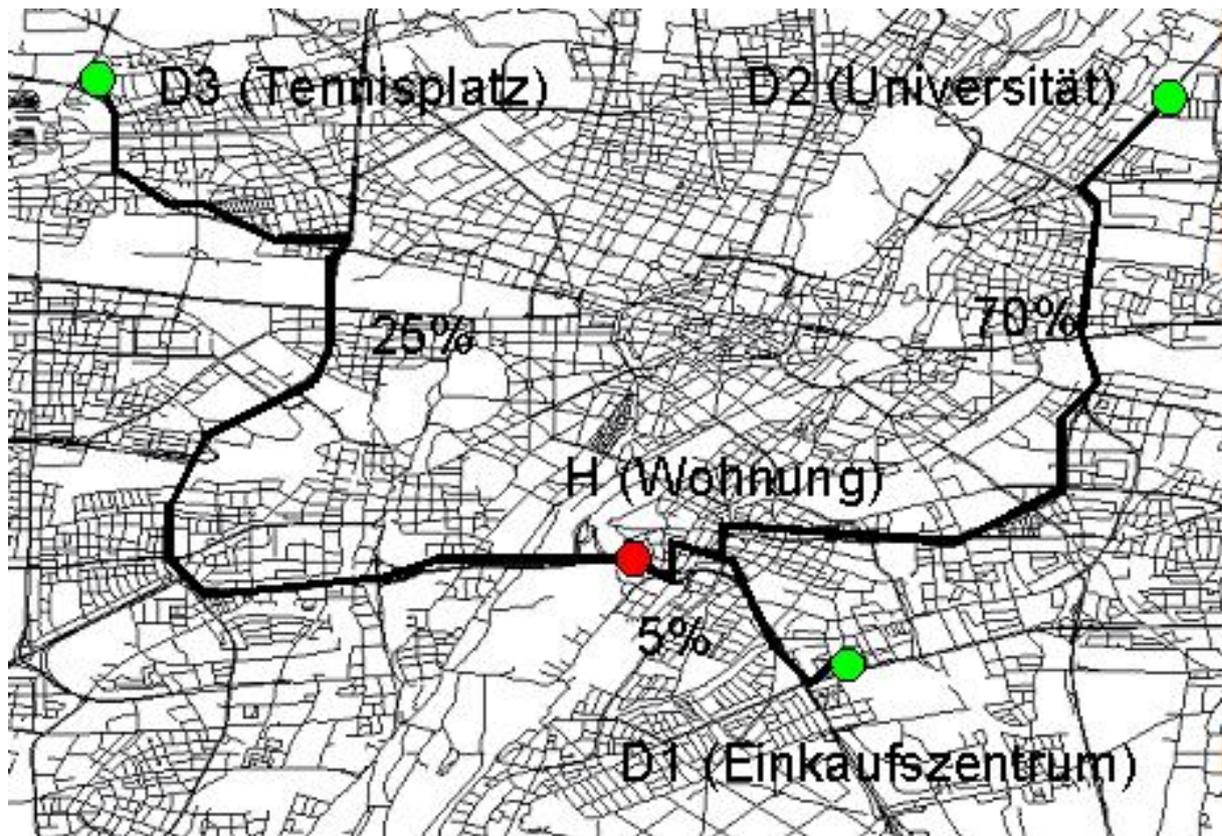


Abbildung 6.6: Modellbildung zur Fahrtzielerkennung

6.3 Situationsabhängiger Informationsnutzen

6.3.1 Informationsmodell

Um mit Informationen situationsabhängig arbeiten zu können, z.B. in Bezug auf Auswahl, Bewertung, Übertragung oder Darstellung, muß ein Bezug zwischen der Situation und der Information modelliert werden. Einem Informationsobjekt kann dazu explizit eine Beschreibung der Situationen, in der es gültig ist oder für die es relevant ist, hinzugefügt werden. Bei CARISMA wird dieser Bezug aber nicht explizit hinzumodelliert. Stattdessen werden Informationsobjekte bei CARISMA kategorisiert und ihr Orts- und Zeitbezug explizit gemacht. Unter einem Informationsobjekt *INF* wird dabei eine logisch abgeschlossene Menge von Zeichen verstanden (z.B. eine Datei). Der Typ bzw. die Kategorie eines Informationsobjektes sei mit κ bezeichnet. Der Ortsbezug beschreibt beispielsweise die Lage eines freien Parkplatzes, der Zeitbezug den Beginn einer Veranstaltung. Durch die explizite Modellierung dieser Bezüge können Informationsobjekte inhaltsunabhängig situationsbezogen verarbeitet werden.

Der Ortsbezug einer Information wird durch eine Ortsabbildung definiert. Eine Ortsabbildung ordnet dazu einem Informationsobjekt einen Wert in einem Ortsmodell zu. Das Ortsmodell kann beispielsweise aus Streckenzügen oder aus Punkten bestehen. Es kann auch aus einer Menge von Ortsnamen bestehen, die Städte und Gemeinden bezeichnen. Zusätzlich wird dem Ort eines In-

formationsobjekts eine Semantik zugewiesen. Die Semantik bezeichnet die Bedeutung des Ortes in Bezug auf das Informationsobjekt, z.B. seine Position. In vielen Fällen kann auf eine explizite Angabe des Ortsmodells und der Semantik verzichtet werden, da sie für die Informationskategorie eindeutig sind. Beispielsweise muß für einen Gefahrenhinweis bei der Ortsangabe nicht extra darauf hingewiesen werden, daß sich dort die Gefahr befindet. In der weiteren Betrachtung dient als Ortsmodell eine Koordinate im WGS84 Koordinatensystem, das vielen digitalen Karten in Navigationssystemen zugrunde liegt¹.

Der zeitliche Bezug eines Informationsobjektes besitzt unterschiedliche Bedeutung, je nachdem ob es sich bei dem Informationsobjekt um Zustands- oder Ereignisinformation handelt. Für Zustandsinformation kann entweder ein Gültigkeitszeitraum angegeben werden oder ein Beobachtungszeitpunkt, zu dem ein Zustand gültig war. Für Ereignisse wird der Zeitpunkt des Ereigniseintrittes angegeben. In der folgenden Betrachtung wird als zeitlicher Bezug immer ein Zeitpunkt als Beobachtungs- oder Ereigniszeitpunkt angenommen.

Anhand einiger Beispiele soll die Bedeutung des räumlichen und zeitlichen Bezuges verdeutlicht werden. Für eine Verkehrsinformation ist es wichtig zu wissen, auf welchen Straßenabschnitt sich die Information bezieht und wann der berichtete Verkehrszustand beobachtet wurde. Zur Interpretation einer Information von einer Lichtsignalanlage sind die Position der Ampel, ihre Blickrichtung und ihre Schaltzeitpunkte notwendig. Für eine Information zu einem Gebäude ist die Lage des Gebäudes wichtig. Bei einer Nachricht über einen freien Parkplatz ist Information über dessen Position und der Beobachtungszeitpunkt erforderlich. Bei einem sich nähernden Rettungsfahrzeug interessiert neben dessen Position zu einer Zeit auch die geplante Wegstrecke.

Die Relevanz von Informationsobjekten für einen bestimmten Fahrer wird damit in vielen Fällen allein aus ihrem Typ und ihrem räumlichen und zeitlichen Bezug im Verhältnis zur Situation des Fahrers ermittelt. Ortsbezogene Informationen werden bei CARISMA deshalb anwendungsunabhängig verwaltet.

6.3.2 Situationsbezogene Nutzenbewertung von Informationsobjekten

Faktoren, die die Wertigkeit einer Information bzw. Nachricht für ein Individuum bestimmen, sind nach Schulz unter anderem Nähe (räumliche, politische, kulturelle), Dynamik, Valenz und Identifikation [176]. Der subjektive Wert, den ein Autofahrer einer Information zuordnet, hängt einerseits von seinen persönlichen Merkmalen und Interessen ab, andererseits von der Situation, in der er sich gerade befindet. Beide Aspekte spielen eine wichtige Rolle. Hier wird jedoch nur der situative Aspekt untersucht. Basierend auf der (Fahr-)Situationserkennung sowie der inhaltsunabhängigen Erweiterung von Informationsobjekten um ihren Typ und ihren räumlichen und zeitlichen Bezug wird der situationsbezogene Wert eines Informationsobjektes beurteilt. Bestimmte Informationen sind danach in bestimmten Situationen von größerem Nutzen als andere. Das ist intuitiv sofort einleuchtend.

Es sei basierend auf dieser Beobachtung vorausgesetzt, daß sich Informationen Wertigkeiten bzw. Nutzenwerte zuordnen lassen, die je nach Situation variieren. Informationsnutzenwerte repräsentieren nach diesem Verständnis das Interesse an einer Information, je größer das Interesse, desto

¹<http://www.wgs84.com>

größer der Nutzen. Der Nutzenwert repräsentiert so das (vermutete) Interesse eines Teilnehmers an einer Information zu einem Zeitpunkt. Der Nutzenwert wird definiert als eine reelle Zahl im Intervall $[0..1]$, die das Ergebnis einer Nutzenfunktion $u(INF)$ ist, die auf ein Informationsobjekt INF in einer gegebenen Situation angewandt wird. Der Informationsnutzen spiegelt die Relevanz eines Informationsobjektes für einen Teilnehmer wider. Dies setzt eine besondere Interpretation des Begriffes *Nutzen* voraus.

Der Nutzenbegriff bezieht sich normalerweise auf den Nutzen, den eine Information dadurch für ein Individuum bringt, daß es auf der Grundlage der Information sein Handeln ändert, d.h. Handlungsalternativen besser bewerten kann, eine Entscheidung für eine bessere Alternative fällen kann und daraus einen Nutzen bezieht. Die Wahl der Handlungsalternative richtet sich nach dem Nutzen, den der Handelnde aufgrund seiner Handlung erwartet. Der Nutzen einer Information ließe sich danach dadurch quantitativ bestimmen, daß bestimmte Ziele (meßbar) besser erreicht werden können. Am Beispiel einer Verkehrsinformation, die dazu führt, daß der Fahrer eine Alternativstrecke wählt, die schneller zum Ziel führt, wird dies unmittelbar deutlich. Auch eine Warnmeldung, die ihn zu vorsichtigem Fahren bewegt und so sicher durch eine Gefahrenstelle führt, besitzt einen unmittelbaren Nutzen.

Der Nutzenbegriff bezieht sich mit dem Verständnis des Interesses an einer Information nicht nur auf objektiv quantitativ meßbare Kriterien, sondern auch auf subjektiv empfundene, ihr individuell zugeordnete Wertigkeit, somit auch auf Informationen, die keine unmittelbare Reaktion auslösen. Ein Beispiel dafür ist das Ergebnis eines Fußballspiels. Die Befriedigung eines Interesses per se führt nach diesem Verständnis zu einem Nutzen für den Informationsempfänger.

Persönliche Interessen beziehen sich meist nur auf den Informationstyp, nicht auf den räumlichen oder zeitlichen Bezug. Gleiches gilt für diskretisierte Situationen. Sowohl persönliche Profile als auch Situationsinformationen dienen somit zum Ausfiltern unerwünschter Information anhand des Informationstyps einerseits und zur Berechnung einer Wertigkeit, d.h. gemäß dem hier zugrunde gelegten Verständnis eines Nutzens erwünschter Information andererseits. Die Situation im Fahrzeug bedeutet, daß der Fahrer immer Interesse an Informationen vom Typ *Verkehrslage* besitzt. Das Interesse an einer konkreten Ausprägung einer Information dieses Typs hängt aber davon ab, ob ihn die Information betrifft bzw. ob er aus der Information einen Nutzen bezieht. An Informationen über die Parkplatzsituation, d.h. an Informationen vom Typ *Parken* ist der Autofahrer demgegenüber nur dann interessiert, wenn er einen Parkplatz sucht. Auch hier bezieht er aus der konkreten Information über einen freien Parkplatz einen unterschiedlichen Nutzen, je nachdem, wie weit entfernt der Parkplatz vom eigentlichen Reiseziel ist.

In Datenbanksystemen werden Filterbedingungen verwendet, um aus einer großen Menge an Informationen diejenigen herauszufiltern, die einer Anfragebedingung genügen (z.B. mittels SQL-Anfragen). In ähnlicher Form werden Subskriptionen in Publish/Subscribe Systemen ausgedrückt. Für CARISMA wird der Nutzen eines Informationsobjektes in einem zweistufigen Verfahren berechnet.

Bei CARISMA dienen situations- und personenbezogene Filter als erste Stufe bei der Bewertung eines Informationsobjektes. Für jede definierte Situation S_i gibt es Informationskategorien κ , die in dieser Situation nützlich sind und eine Menge, an denen in dieser Situation kein Interesse besteht. Darüber hinaus gibt es situationsunabhängige Informationskategorien. Bezeichne $u_S(S_i, \kappa_j)$ den situationsbedingten Nutzenwert einer Informationskategorie κ_j in einer Situation S_i , dann be-

rechnet sich der grundsätzliche situationsbedingte Nutzen einer Informationskategorie κ_j zu einem Zeitpunkt als das Maximum der Nutzenfaktoren über alle zu diesem Zeitpunkt gültigen Situationen:

$$u_S(\kappa_j, t) = \max(u_S(S_i, \kappa_j)) (\forall S_i. S_i \in S(t))$$

Ein Informationsobjekt, dessen Typ in keiner der zu einem Zeitpunkt gültigen Situationen ein Nutzen zugeordnet ist, wird in einem vorgelagertem Schritt ausgefiltert. Ist eine Situation nur zu einem gewissen Grad eingetreten, so hat dies Auswirkungen auf den Nutzenwert des Informationsobjektes. Der situationsbedingte Nutzenwert einer Informationskategorie $u_S(S_i, \kappa_j)$ ist dann mit dem Grad des Eintretenseins zu gewichten.

Ist eine Situation nur mit einer gewissen Sicherheit eingetreten, so überträgt sich diese Unsicherheit ebenfalls auf den Nutzen eines Informationsobjektes. Der grundsätzliche situationsbedingte Nutzen einer Informationskategorie κ_j zu einem Zeitpunkt t berechnet sich dann als das Maximum der Nutzenfaktoren über alle zu diesem Zeitpunkt gültigen Situationen, gewichtet um deren Grad des Eintretenseins und Grad des Überzeugtseins, daß sie eingetreten sind:

$$u_S(\kappa_j, t) = \max(u_S(S_i, \kappa_j) * deg(S_i, t) * belief(S_i, t)) (\forall S_i. S_i \in S(t))$$

Dieser Berechnungsweise liegt die Annahme zugrunde, daß der Nutzen eines Informationsobjektes nicht dadurch steigt, daß mehrere Situationen eintreten, in denen das Informationsobjekt einen Nutzen besitzt. Vielmehr wird der Nutzen durch die Situation bestimmt, für die er am größten ist.

Für ein vorausschauendes Zwischenspeichern von situationsabhängigen Informationen ist darüber hinaus wichtig zu beurteilen, ob ein Informationsobjekt in einer künftig eintretenden Situation einen Nutzen bringt. Basierend auf der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise sind also nicht nur die zu einem aktuellen Zeitpunkt t gültigen Situationen, sondern auch künftige Situationen zu berücksichtigen. Dabei spielt natürlich auch das Alter der Information zum Zeitpunkt des Eintretens einer künftigen Situation eine Rolle. Das Situationsmanagementsystem muß also über die aktuellen Situationen hinaus eine Liste der in naher Zukunft zu erwartenden Situationen mit einem Wahrscheinlichkeitsmaß für ihr Eintreten verwalten.

Neben ihrem Typ spielen der Zeit- und der Ortsbezug eines Informationsobjektes für ihren situationsbezogenen Nutzen eine entscheidende Rolle. Bezogen auf ihren Ort ist der Nutzen einer Verkehrsinformation beispielsweise meist umso kleiner, je weiter sie von der Position des Informationsempfängers entfernt ist. Die Distanz allein ist in vielen Fällen aber nicht ausreichend für eine Bewertung. Stau- und Gefahrenmeldungen besitzen dann einen hohen Nutzen, wenn sie sich auf die geplante Fahrtroute beziehen. Informationen über freie Parkplätze sind dann interessant, wenn sich die Parkplätze in der Nähe des geplanten Fahrtziels befinden und dieses Fahrtziel in Kürze erreicht wird. Meldungen über Theatervorstellungen sind umso interessanter, je geringer der Anfahrtsweg ist. Abbildung 6.7 zeigt ein Beispiel für eine ortsabhängige Informationsnutzenkurve. In diesem einfachen Beispiel hängt der Nutzen nur von der Entfernung des bewertenden Teilnehmers vom Ursprung der Information ab.

Bezogen auf die beiden Situationsparameter Fahrtzweck und Fahrtziel sind zur Bewertung von Informationsobjekten vier mögliche Varianten der Nutzenberechnung zu unterscheiden. Hierbei wird der Unterschied zwischen allgemeiner situationsbezogener Bewertung, ortsbezogener Bewertung und kombinierter Bewertung deutlich. In Tabelle 6.1 werden die vier möglichen Varianten des

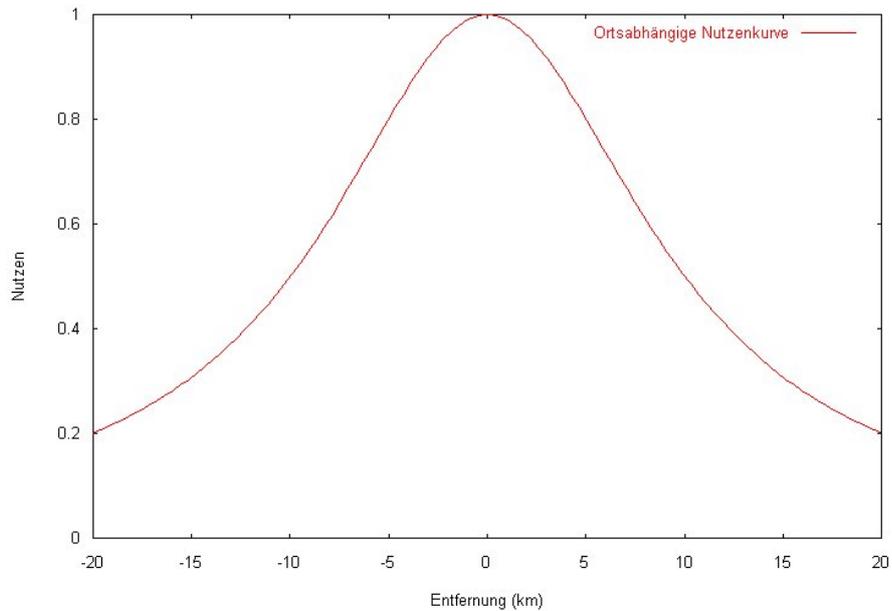


Abbildung 6.7: Informationsnutzen in Abhängigkeit der Entfernung vom Informationsursprung

		Fahrtzweckkorrelation	
		Ja	Nein
Fahrtzielkorrelation	Ja	Nutzenbewertung anhand von Situation und Position	Situationsbezogene Nutzenfunktion
	Nein	Ortsbezogene Nutzenfunktion	keine situationsabhängige Nutzenbewertung

Tabelle 6.1: Informationsobjektkorrelation mit fahrrelevanten Situationsparametern

Situationsbezugs hinsichtlich Fahrtzweck und Fahrtziel unterschieden. Der Nutzen eines Informationsobjekts kann dabei abhängen vom Fahrtziel, vom Fahrtzweck, von beidem oder von keinem von beiden. Reine Fahrtzielkorrelation führt zur Anwendung einer rein positionsbezogenen Nutzenfunktion. Ein Beispiel dafür sind Verkehrsinformationen, die unabhängig vom Fahrtzweck für den Fahrer interessant sind. Bei reiner Fahrtzweckkorrelation wird der Nutzen in Abhängigkeit des vermuteten Fahrtzwecks berechnet. Ein Beispiel hierfür sind Hintergrundinformationen zu den Spielen des Tages auf der Fahrt zu einer Fußballbundesligabegegnung. Besteht keinerlei Korrelation, so haben die beiden Variablen keinen Einfluß auf den Nutzen des Informationsobjektes. Ein Beispiel hierfür sind die politischen Nachrichten des Tages. Besteht sowohl eine Fahrtzweck- als auch eine Positionskorrelation so kommen die Nutzenfunktionen, wie oben beschrieben, kombiniert zum Einsatz. Parkinformationen sind hierfür ein Beispiel.

Die Nutzenkurven unterscheiden sich für die verschiedenen Informationskategorien und zwischen den Teilnehmern. Deshalb besitzt jeder Teilnehmer eine individuelle Ortsnutzenkurve für jede Informationskategorie. Zusätzlich kann es notwendig sein, die Parameter der Kurve ebenfalls situationsadaptiv zu wählen. Beispielsweise kann zu Haupteinkaufszeiten eine Information über einen

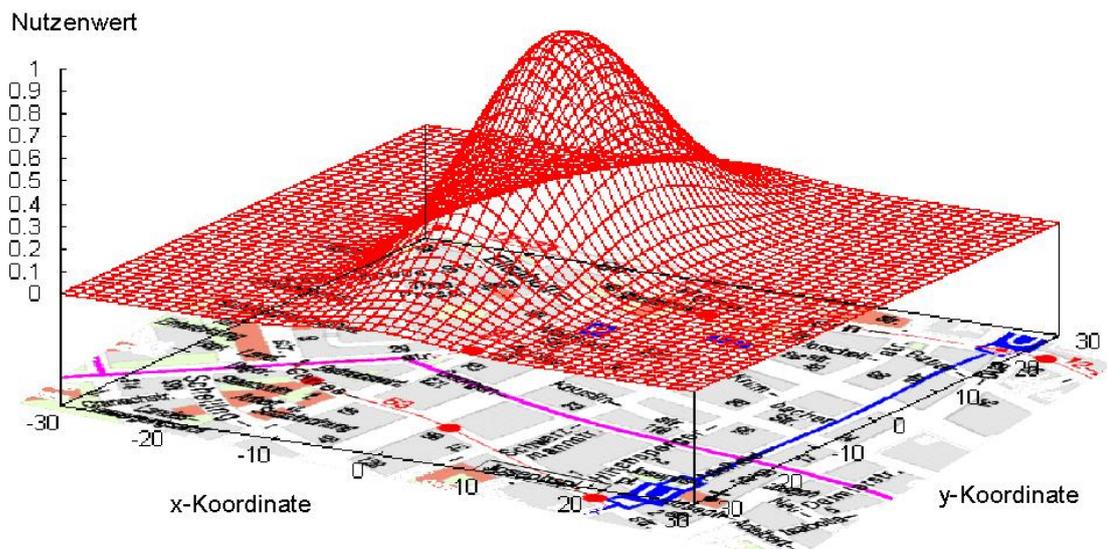


Abbildung 6.8: Informationsnutzen in Abhängigkeit der Position

weiter entfernten Parkplatz einen höheren Nutzen bedeuten als zu einer Zeit, in der viele Parkplätze in der Nähe des Reiseziels verfügbar sind. Außerdem wird ein weiter entfernter Parkplatz beim Sonntagsspaziergang eher akzeptiert als beim Opernbesuch bei schlechtem Wetter, wenn der Nutzer in Abendgarderobe zur Oper nicht weit laufen möchte. Für einzelne Informationskategorien ist also der ortsbezogene Informationsnutzen in Abhängigkeit der Situation zu definieren.

Abbildung 6.3.2 zeigt den Zusammenhang zwischen Position des Bewerter und dem Nutzen eines Informationsobjektes mit einer dreidimensionalen Nutzenkurve über einem Kartenausschnitt. In diesem Beispiel ist der Nutzen monoton fallend, aber richtungsabhängig. Der ortsabhängige Nutzen kann auch eine kompliziertere Form annehmen. Abbildung 6.3.2 kann beispielsweise als allgemeine Nutzenkurve für die Position eines Parkplatzes im Verhältnis zur Position des Parkplatzsuchers interpretiert werden. In der Regel wird bei einem Parkplatz nicht allein die Entfernung des Parkplatzes zum Fahrzeug, sondern insbesondere die Position des Parkplatzes im Verhältnis zum Fahrtziel eine Rolle spielen. Die Berechnung des Informationsnutzens erfordert also je nach Kategorie die Berücksichtigung verschiedener Variablen. Auf diese Weise kann auch der Nutzen einer Verkehrsinformation beispielsweise in Abhängigkeit der eigenen Position und des Zielortes bewertet werden.

Der zeitliche Bezug einer Information hat seinerseits Auswirkungen auf ihren Nutzenwert. Eine Verkehrsmeldung, die bereits einige Stunden alt ist, wird die reale Situation kaum noch zutreffend beschreiben. Eine Information über ein Konzert ist nutzlos, sobald das Konzert vorüber ist. Eine Informationsnutzenbewertung muß also die Abweichung berücksichtigen, die zwischen dem sich ändernden realen Zustand und der Zustandsinformation besteht. Dazu besitzt jeder Teilnehmer eine Bewertungsfunktion, die abhängig ist von der Semantik des zeitlichen Bezugs und des Informationstyps. Basierend auf dem Informationstyp wird aus einer Menge von Basisfunk-

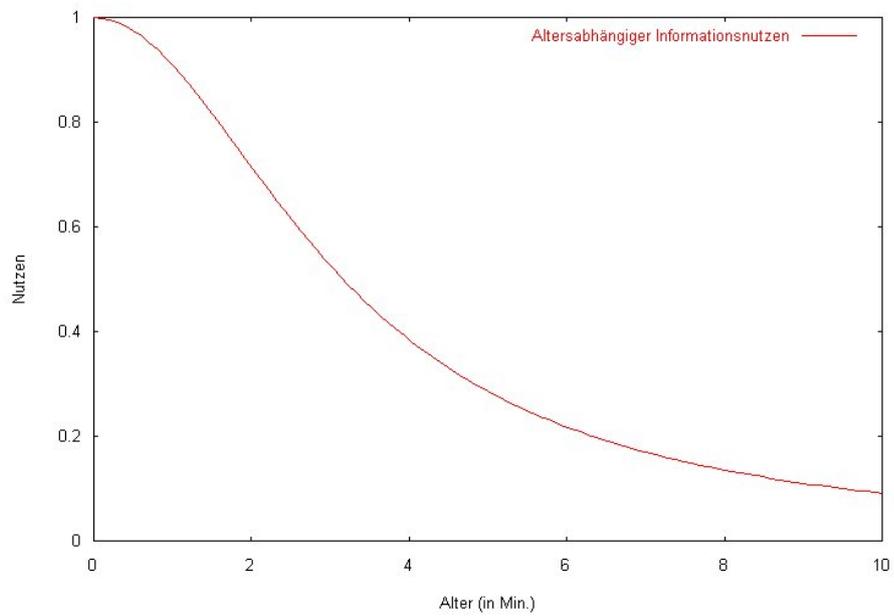


Abbildung 6.9: Informationsnutzen in Abhängigkeit des Alters des Informationsobjektes

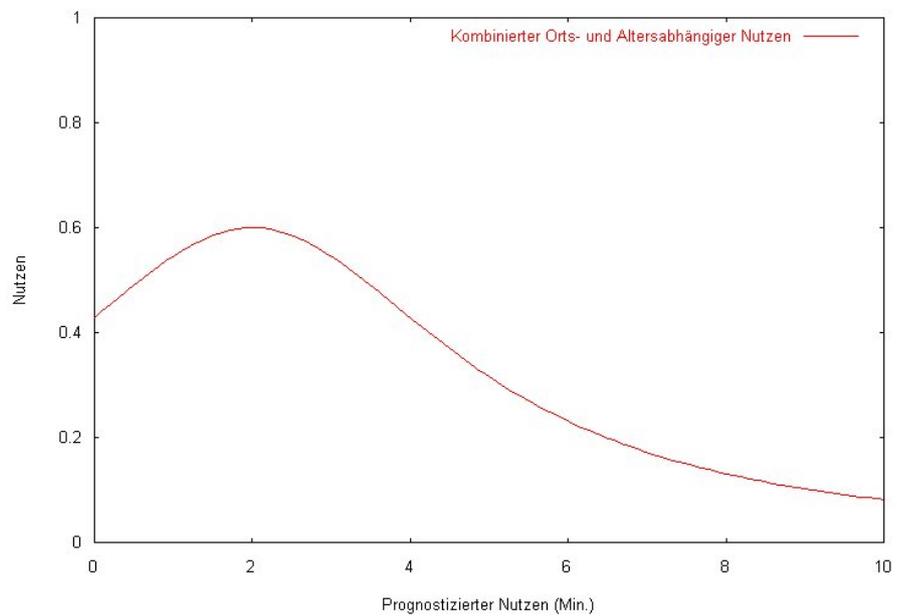


Abbildung 6.10: Informationsnutzen in Abhängigkeit von Alter und künftigen Positionen

tionen, die die Alterung einer Information beschreiben, eine ausgewählt und geeignet parametrisiert. Zur Erhöhung der Genauigkeit kann die aktuell beobachtete Informationsänderungsrate einer Zustandsinformation dieser als weiteres Attribut beigefügt werden. Sie beschreibt, mit welcher Geschwindigkeit der Unterschied zwischen dem realen Zustand und seiner symbolischen Repräsentation zunimmt (beispielsweise wird neben der gemessenen Außentemperatur angegeben, wie schnell die Temperatur fällt oder steigt). Abb. 6.9 stellt eine Informationsnutzenkurve dar, die einem Informationsobjekt in Abhängigkeit seines Alters Nutzenwerte zuordnet. Diese Kurve ist abhängig von der Informationskategorie.

Ist der Nutzen einer Information abhängig sowohl von ihrem Alter als auch von der Position des bewertenden Netzteilnehmers, so ist, ähnlich wie bei der oben beschriebenen situationsbezogenen Beurteilung, die Änderung des Nutzens in der Zukunft mit zu berücksichtigen. Ist die geplante Trajektorie des Teilnehmers bekannt, lassen sich also künftige Positionen und Zeitpunkte für das Erreichen dieser Positionen berechnen, so können für diese künftigen Zeitpunkte sowohl der orts- als auch der zeitabhängige Nutzen berechnet werden. Der ortsabhängige Nutzen wird dann zu den künftigen Zeitpunkten mit dem verbleibenden, mit dem Alter abnehmenden Nutzen gewichtet. Es ergibt sich dann eine gemeinsame Nutzenkurve, wie sie beispielhaft in Abbildung 6.10 zu sehen ist. Der Nutzen nimmt in dieser Abbildung zunächst zu, weil der ortsbezogene Nutzen durch die Bewegung des Teilnehmers schneller wächst als der Nutzen durch das zunehmende Alter der Information abnimmt. Diese Tendenz kehrt sich dann wieder um. Konsequenz aus einer solchen Nutzenkurve kann sein, ein mitgehörtes Informationsobjekt zunächst zu speichern. Fällt es in der Zukunft unter einen bestimmten Nutzen, so wird es wieder aus dem Speicher entfernt (zur nutzenabhängigen Informationsspeicherverwaltung siehe Abschnitt 7.2.1). Gehört die Information zu einer Kategorie, die automatisch an den Fahrer weitergegeben wird, so läßt sich der Zeitpunkt für den maximalen Nutzen anhand dieser Kurve bestimmen. Zu diesem Zeitpunkt wird die Information dann dem Fahrer präsentiert.

Zusätzlich zu den bislang betrachteten Aspekten wird eine weitere Metainformation über ein Informationsobjekt zur Berechnung seines Nutzens herangezogen, der Detaillierungsgrad und der Medienmix, d.h. ob es sich um Text-, Bild-, Audio- oder Videoinformation handelt. Beispielsweise kann ein Hotel durch seinen Namen und seine Adresse beschrieben sein, die Beschreibung kann in einer zweiten Detaillierungsstufe Bilder des Eingangsbereiches und der Zimmer beinhalten und in einem noch detaillierteren Modell einen virtuellen Rundgang. Das Medienformat ist damit ein wesentliches Element der Qualität der Information. Qualitätsaspekte wie das Medienformat oder die Aktualität, die bei CARISMA explizit durch den zeitlichen Bezug berücksichtigt wird, gehen direkt in die Nutzenbewertung ein. In einem Ad-hoc Netz spielen für die Qualität einer Information auch das Vertrauen in ihre Richtigkeit eine wichtige Rolle, die eng zusammenhängt mit der Vertrauenswürdigkeit der Informationsquelle. Kryptographische Verfahren sind ein wichtiges Instrument, um diese Vertrauenswürdigkeit herzustellen. Darauf zielen auch Eichler et al. mit ihrem Ansatz für den sicheren Austausch von Information in Fahrzeug Ad-hoc Netzen ab [59]. Die höhere Qualität einer Information geht meist mit höheren Kommunikations- und Speicherkosten einher. Dies ist bei der Nutzenoptimierung bei begrenzten Ressourcen zu berücksichtigen.

Der Nutzen eines Informationsobjekts kann darüber hinaus nicht unabhängig von bereits bekannter Information gesehen werden, d.h. der Neuigkeitsgrad einer Information spielt ebenfalls eine Rolle für ihren Nutzen. Ist beispielsweise bereits bekannt, daß an einer Stelle ein Stau von 5km Länge besteht, so ist die Information, daß der Stau nun 6km lang ist, weniger wertvoll.

Kapitel 7

Situationsadaptive Kommunikation

”You cannot hope to build a better world without improving the individuals. To that end each of us must work for his own improvement, and at the same time share a general responsibility for all humanity, our particular duty being to aid those to whom we think we can be most useful.”

— Marie Curie

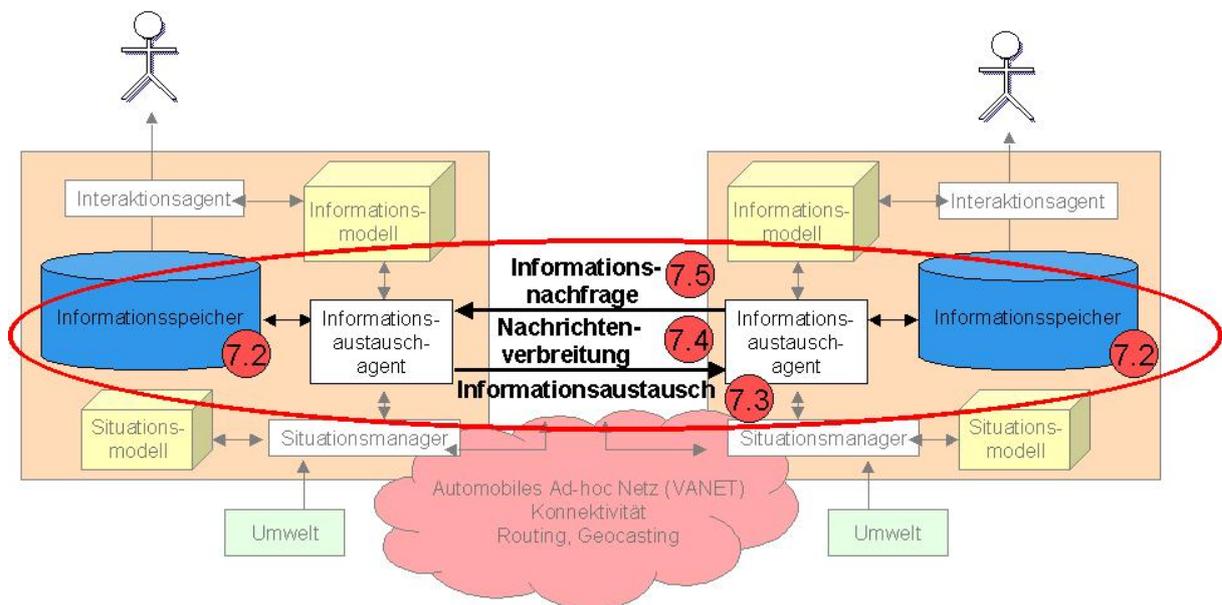


Abbildung 7.1: Situationsadaptive Kommunikation im Basismodell

7.1 Nutzenänderungsinduzierte Kommunikationsanforderung

Basierend auf der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Nutzenbewertung von Informationsobjekten kann nun das Problem des situationsadaptiven Informationsaustausches gelöst werden. Der CARISMA Informationsaustauschagent wählt dazu für eine Übertragung jeweils die Informationsobjekte, die einen möglichst großen Nutzenzuwachs beim Empfänger versprechen. Die Nutzenbewertung dient somit als Grundlage für einen adaptiven autonomen Informationsaustausch, der in Abhängigkeit verfügbarer Netzkapazität auf die Maximierung des Informationsnutzens bei den Teilnehmern im Netz ausgerichtet ist.

Bezogen auf das CARISMA Basismodell beschreibt dieses Kapitel die situationsbezogene Kommunikation, d.h. die drei Kommunikationsarten im VANET, wie aus Abbildung 7.1 ersichtlich. Als Grundlage werden im ersten Teil des Kapitels der CARISMA Informationsspeicher und die nutzenmaximierende Speicherung ortsbezogener Informationen beschrieben. Darauf aufbauend wird die nutzenbasierte autonome situationsadaptive Kommunikation erläutert, beginnend mit dem Informationsaustausch benachbarter Fahrzeuge, der sich automatisch aus dem nutzenmaximierenden Verhalten der einzelnen Netzknoten ergibt. Die nutzenbezogene Informationsverbreitung bei CARISMA wird als ein neues Paradigma für adaptive nachrichtenbasierte Kommunikation vorgestellt. Abschließend wird kurz auf anfragebasierte Kommunikation eingegangen.

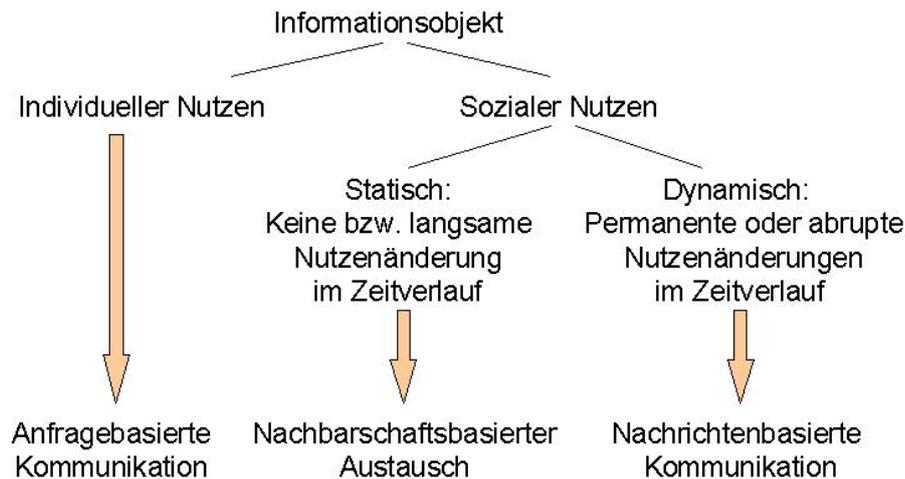


Abbildung 7.2: Kommunikationsart in Abhängigkeit der Nutzeigenschaften

Im weiteren seien ausschließlich ortsbezogene Informationen betrachtet. Im vorigen Kapitel wurde die Abhängigkeit des Nutzens vom Alter eines Informationsobjektes sowie von der Relation seines Ortsbezuges zur Position eines Interessenten dargestellt. Hängen die Informationen stark von individuellen Interessen oder Situationen ab und besitzen deshalb nur für einen oder wenige Teilnehmer einen Nutzen, dann werden sie nur auf deren Anfrage hin übertragen. Informationen von allgemeinerem Interesse seien unterschieden in eher dynamische Informationen, deren Nutzen sich abrupt oder kontinuierlich deutlich ändert, und eher statische Informationen, deren Nutzen sich nur langsam oder gar nicht über die Zeit ändert. Dynamische Informationen werden dann als Nachrichten aktiv verbreitet, während statische ortsbezogene Informationen direkt unter benachbarten Knoten ausgetauscht werden. Bei den statischen ortsbezogenen Informationen basiert ein Nutzengewinn beim Empfänger nicht auf einer Änderung des Informationsobjektes selbst, sondern auf der wechselnden Situation des Empfängers. Als Beispiele seien Verkehrsinformationen als eher dynamische und Hotelinformationen als eher statische betrachtet.

Sollen Verkehrsinformationen dezentral an Interessenten geliefert werden, so ist in einem einfachen System der zyklische Versand des beobachteten Verkehrszustandes über fest definierte Straßenabschnitte durch jeden Teilnehmer möglich, d.h. mit einer festen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Diese Information kann dann beispielsweise immer bis zu einer bestimmten Entfernung verbreitet werden. Beim nutzenbasierten Ansatz von CARISMA versendet ein Teilnehmer demgegenüber eine Verkehrsinformation nur, wenn sie einen bestimmten Nutzuwachs gegenüber der

dem Teilnehmer bereits bekannten Information enthält. Es ist dann davon auszugehen, daß auch für viele weitere Teilnehmer in der Nähe ein entsprechender Nutzenzuwachs erreicht wird. Da dieser aber in der Regel unter den Teilnehmern differiert und mit der Entfernung zudem abnimmt, wird die Nachricht nur solange weitergegeben, wie noch ein ausreichender Nutzen bei den Empfängern erwartet werden kann.

Im Gegensatz dazu bleibt die Information über ein bestimmtes Hotel für eine gewisse Zeitspanne konstant. Erst nach längerer Zeit ohne Änderungen wird ein Teilnehmer nachfragen, ob es neuere Informationen über das Hotel gibt. Da Hotelinformationen von allgemeinem Interesse sind, kann er dazu seine direkten Netznachbarn befragen. Gleichermaßen werden Hotelinformationen von benachbarten Knoten bezogen, wenn ein Teilnehmer in eine neue Gegend fährt. Er wird dabei nicht unbedingt eine konkrete Anfrage nach Hotelinformationen in der Gegend stellen. Vielmehr werden diese Informationen ohne konkrete Anfrage zwischen benachbarten Knoten rein auf Basis der Nutzenbewertung unter Hinzuziehung des ortsabhängigen Nutzens sowie ggfs. weiterer Nutzenkriterien ausgetauscht. Ändert sich allerdings etwas wesentliches an der Hotelinformation, so zeigt das Hotelinformationsobjekt kurzzeitig ein dynamisches Verhalten und diese Änderung wird dann entsprechend aktiv als Nachricht verbreitet. Abbildung 7.2 stellt den Zusammenhang zwischen den Nutzeigenschaften einer Information und der Art ihrer Kommunikation dar.

7.2 Lokaler Informationsspeicher

7.2.1 Inhalt des Speichers und Ersetzungsstrategien

Die Aufgabe des lokalen Informationsspeichers bei CARISMA ist es, Informationen vorzuhalten, die von Informationsnutzern aktuell oder in naher Zukunft nachgefragt werden oder über die sie informiert werden sollen. Diese Funktion besitzt eine gewisse Ähnlichkeit mit klassischen *Caching* Verfahren, die ebenfalls das Ziel verfolgen, die Nachfrage nach einem Datenelement aus den zwischengespeicherten Elementen beantworten zu können. Bei diesen werden die Daten allerdings nicht im Voraus, sondern beim ersten Zugriff in den Cachespeicher geladen. Beim sogenannten *semantischen Cachen* werden zur Cache-Verwaltung inhaltsbasierte Metriken bei der Auswahl zu ersetzender Cache Einträge herangezogen [48, 167]. Es wird dabei angenommen, daß auf inhaltlich ähnliche Datenelemente in engem zeitlichen Bezug zugegriffen wird. Bei CARISMA erfolgt die Auswahl von Informationsobjekten basierend auf deren situationsbezogener Nutzenbewertung. Dem liegt die Annahme zugrunde, daß das Interesse an Informationsobjekten mit höher bewertetem Nutzen größer ist und diese deshalb eher nachgefragt werden als Objekte mit geringerem Nutzen. Verwandt mit diesem Vorgehen sind *Prefetching* Verfahren, die zum Ziel haben, Datenelemente zwischenzuspeichern, bevor sie angefordert werden [154]. Sie basieren auf Modellen, die bevorstehende Datenzugriffe vorhersagen. Existierende Verfahren nutzen dazu, ähnlich wie klassische Caching Verfahren, Zugriffsmuster auf Datenelemente als Entscheidungsgrundlage. Am ehesten vergleichbar ist das Vorgehen bei CARISMA mit *Hoarding* Verfahren [117, 118, 119], die ebenfalls Situationsinformationen in ihre Speicherentscheidung miteinbeziehen. Dazu zählt einerseits beobachtetes situationsabhängiges Anforderungsverhalten des einzelnen Nutzers, andererseits (ähnlich wie bei *Collaborative Filtering* Ansätzen [168, 104]) das Verhalten anderer Nutzer

in gleicher oder ähnlicher Situation. Die Entscheidung basiert nicht allein auf Zugriffsmustern, sondern bezieht Inhalt und Umweltrelationen der Datenelemente mit ein.

Die Kapazität des lokalen Informationsspeichers kann prinzipiell völlig ausgeschöpft werden, um Informationsobjekte zu speichern. Bei Erreichen der Speichergrenze müssen dann Entscheidungen zwischen konkurrierenden Informationsobjekten getroffen werden. Bei Caching Verfahren wird aus den existierenden Elementen eines ausgewählt, auf das mit großer Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft nicht mehr zugegriffen wird. Klassische Strategien dazu bedienen sich Statistiken aus vergangenen Zugriffen auf die Datenelemente (z.B. Least Recently Used (LRU)). Für den Informationsspeicher bei CARISMA werden auf Basis der Nutzenbewertung neue Objekte nur dann in den Speicher aufgenommen, wenn ihnen ein höherer Nutzen als den existierenden zugeordnet wird. Die Objekte mit dem geringsten Nutzen werden aus dem Cache entfernt. Zur einfacheren Speicherverwaltung kommen auch auf einzelne Objektattribute bezogene Strategien zum Einsatz. Dies ist möglich für Informationsobjekte, deren Nutzen wesentlich von einem bestimmten Attribut abhängt. Unter den eher dynamischen Informationsobjekten wird dann ausschließlich auf Basis des Zeitstempels ausgewählt, unter den eher statischen allein auf Basis des Ortsbezugs. Diese Ersetzungsstrategien werden bezeichnet als

- *Lowest Information Benefit* (LIB)
- *Oldest Timestamp* (OTS)
- *Furthest Georelation* (FGR)

7.2.2 Speicherorganisation

Der Informationsspeicher erfordert für diese Strategien eine entsprechende Struktur. Abbildung 7.3 zeigt das CARISMA Grundprinzip zur Informationsobjektverwaltung. Jedes Objekt erhält dazu einen Eintrag in einer Indextabelle. In den Spalten der Indextabelle sind Verweise auf die Einträge des Objektes in einer Nutzentabelle, Entfernungstabelle und Alterstabelle enthalten sowie ein Zeiger auf den Speicherort des eigentlichen Objektinhaltes. Relativ statische Informationsobjekte sind in der Nutzentabelle und in der Entfernungstabelle eingetragen, aber nicht in der Alterstabelle, da das Alter für den Nutzen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für relativ dynamische Informationsobjekte bestehen Einträge in Nutzen- und Alterstabelle, nicht jedoch in der Entfernungstabelle. In der Nutzentabelle sind die Objekte nach fallendem Nutzen sortiert. Der eingetragene Nutzenwert repräsentiert bei monoton fallender Nutzenkurve den aktuellen Wert, sonst den maximalen Nutzenwert, den das Objekt voraussichtlich in Zukunft erreicht.

Entfernungs- und Alterstabelle sind nach Distanzen bzw. Alter sortiert und erlauben so, schnell die am weitesten entfernten oder ältesten Objekte effizient zu ermitteln. Die zusätzlichen Einträge in der Nutzentabelle erlauben dann die Bewertung hinsichtlich des Nutzens, in den ggfs. weitere Nutzenbewertungen eingehen. Es lassen sich so schnell die entferntesten oder ältesten Objekte ermitteln, die aber hinsichtlich ihrer Nutzenbewertung noch deutlich differieren können. Die Rückverzeigerung zur Indextabelle dient der Nutzenbewertung bei einer zyklischen Inspektion der Tabellen, um ggfs. Anfragen nach neueren Informationsobjekten zu generieren.

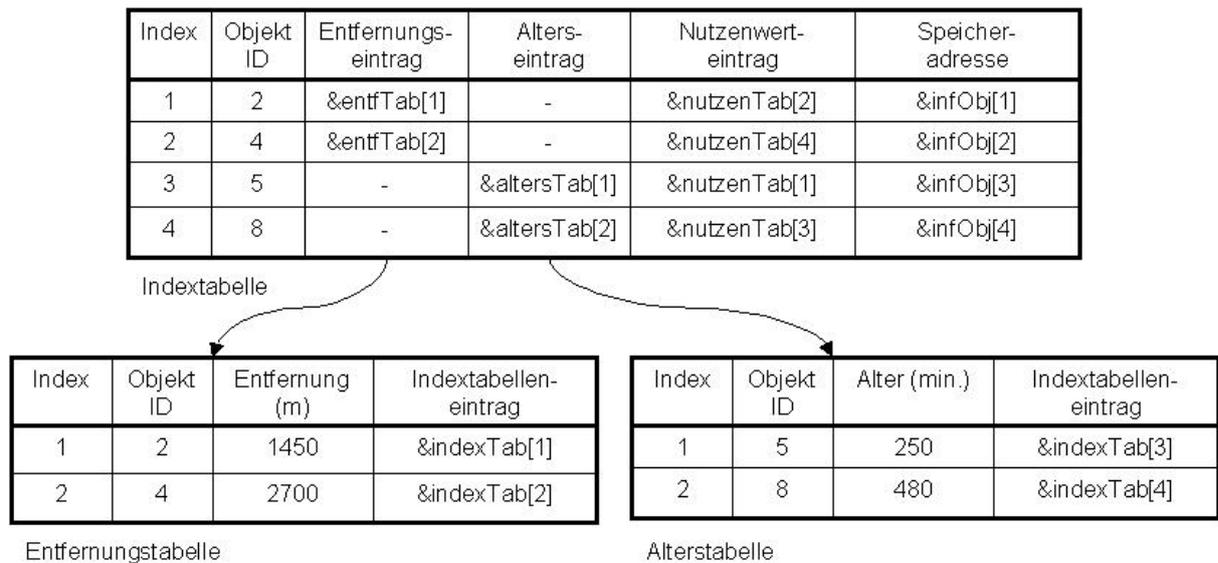


Abbildung 7.3: Verzeigerung der Informationsobjekte hinsichtlich Alter, Entfernung und Nutzen

Da sich Eigenschaften und Nutzenwerte von Objekten verschiedener Informationskategorien unterscheiden, werden sie bei CARISMA getrennt verwaltet. Abbildung 7.4 zeigt ein Beispiel für diese Organisation. In einer Kategorientabelle sind Einträge für alle Informationskategorien vorhanden. Es ist angegeben, wieviel Speicher für Objekte jeder Kategorie genutzt wird, wie häufig der Nutzer auf Objekte einer Kategorie im Mittel zugreift und ein Gesamtnutzenfaktor, den der Nutzer Informationsobjekten einer Kategorie zuordnet.

Da sich der Nutzenwert auf ein Informationsobjekt als ganzes bezieht ist für eine nutzenoptimierende Speicherung die Größe der Informationsobjekte relevant. Definiert man einen Nutzenwert pro Speichereinheit, dann besteht die Gefahr, daß ein großes Objekt mit hohem Nutzen aus dem Speicher entfernt wird und viele kleinere mit jeweils wesentlich geringerem Nutzen erhalten bleiben. Dies wäre nur dann sinnvoll, wenn der Nutzer auch tatsächlich den Nutzen aller kleineren Objekte erhalten würde, d.h. auf diese tatsächlich alle zugreift. Vor diesem Hintergrund werden neben dem Nutzen Zugriffswahrscheinlichkeiten berücksichtigt und in die Tabellen eingetragen, d.h. der Nutzenwert wird mit der Zugriffswahrscheinlichkeit gewichtet. Statt einen speichergrößennormierten Nutzenwert anzugeben, wird der Speicherbedarf getrennt angegeben, was eine größere Flexibilität mit dem Umgang verschiedener Informationskategorien erlaubt.

Für jede Kategorie werden die Informationsobjekte getrennt verwaltet. So kann auf kategorispezifische Besonderheiten Rücksicht genommen werden. Beispielhaft sind in Abb. 7.4 Vorschläge für die Verwaltung von *Points of Interest* (POI) und Informationen über Parkmöglichkeiten dargestellt. POIs sind dabei von verschiedenem Typ und ließen sich auch noch weiter unterteilen. Die Untergliederung in Typen erlaubt die typspezifische Zuteilung von Nutzenwertfaktoren und Zugriffshäufigkeiten sowie die Verwaltung der eigentlichen Informationsobjekte in gesonderten Tabellen. Diese Tabellen enthalten neben der Referenz auf das Informationsobjekt selbst seinen Nutzenwert, sowie seine Position und sein Alter. Analog zur Abbildung 7.3 ist die Trennung dieser Attribute für schnelleren Zugriff in mehrere Tabellen sortiert nach Entfernung, Alter oder Nutzen denkbar.

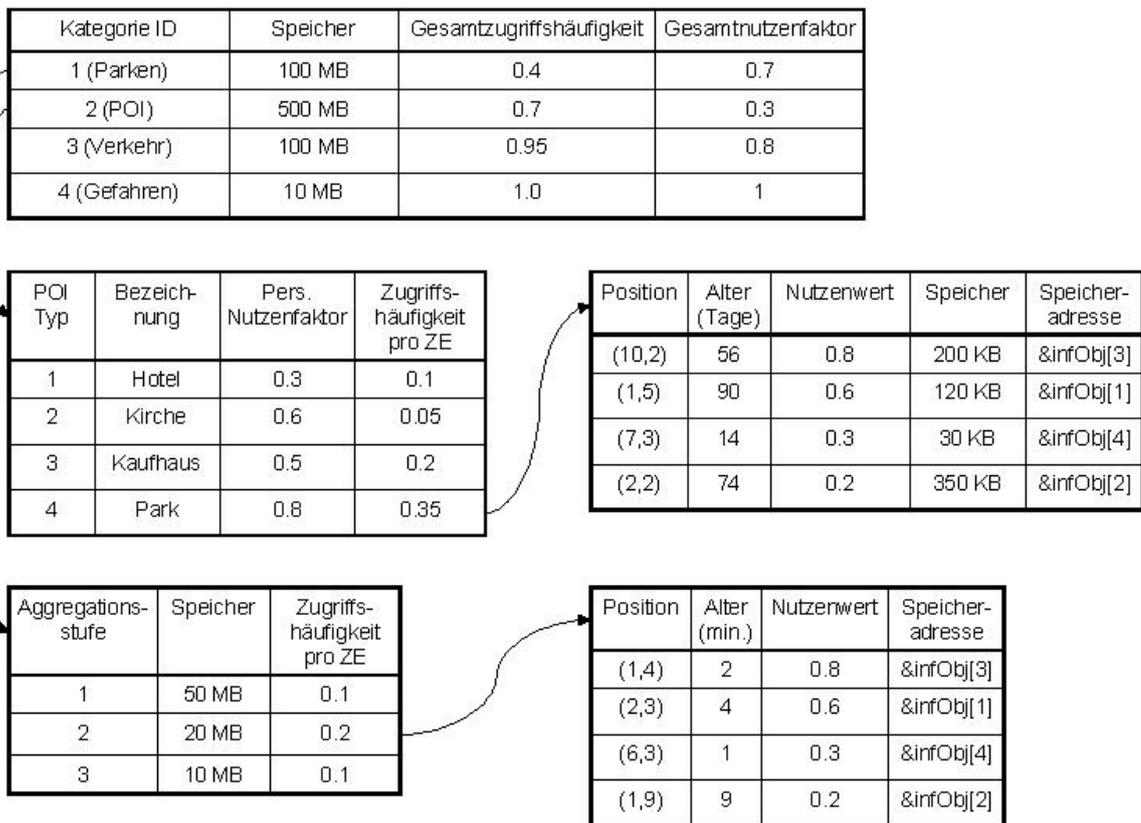


Abbildung 7.4: Beispiel für Organisation des Informationsspeichers

Kategorie	Aggregation	Typ	Ortsbezug	Zeitbezug	<i>Inhalt</i>
-----------	-------------	-----	-----------	-----------	---------------

Abbildung 7.5: Struktur eines Informationsobjektpaketes

Parkinformationen sind im Beispiel in drei Aggregationsgrade unterteilt. Ist ein Autofahrer auf der Suche nach einem Parkplatz, so interessiert ihn bspw. auf dem Weg in die Stadt zunächst, wie die Parkplatzsituation in dem von ihm angesteuerten Stadtteil aussieht. Bei der Anfahrt dann benötigt er für seine konkrete Fahrtroutenentscheidung Informationen über die Situation auf bestimmten Parkplätzen oder in bestimmten Parkhäusern. Dort angekommen interessiert ihn die genaue Lokation freier Parkplätze. Im Gegensatz zu POIs ändert sich die Information hierbei sehr schnell. In den Nutzenwert geht außerdem der Wert des Informationsobjektes mit ein, d.h. gibt es in einem Parkhaus keine freien Plätze mehr, so ist der Nutzen dieser Information auch dann nur gering, wenn es sich in der Nähe des Fahrtziels befindet. Abbildung 7.5 zeigt, in welchem Format ein Parkinformationsobjekt mit seinen Attributen übertragen wird.

Die Modellierung der Informationsobjekte mit Orts- und Zeitbezügen in bestimmten Orts- und Zeitmodellen erlaubt die einfache Aktualisierung der Tabellen beim Eintreffen neuer Information. Da sich diese Information auf einen definierten Bereich bezieht, läßt sich anhand der Tabellen einfach ermitteln, ob bereits eine Information für diesen Bereich vorliegt, die, falls die eingetrof-

fene Information aktueller ist, ersetzt wird. Ebenso kann aus der Alterstabelle schnell abgelesen werden, ob, insbesondere in einem fragmentiertem Netz, in dem Nachrichten verzögert eintreffen, eine Nachricht bereits erhalten wurde.

Die Nutzenwerte der Objekte im Speicher ändern sich im Laufe der Zeit. Je nach Änderungsrate der verschiedenen Informationskategorien und Häufigkeit eintreffender Informationsobjekte werden die Tabellen regelmäßig inspiziert und Nutzenwerte neu berechnet.

7.2.3 Nutzenmaximierende Speicherung ortsbezogener Informationen

Die Betrachtung sei im folgenden beschränkt auf Informationsobjekte, die einen Ortsbezug besitzen, sich im Verlauf der Zeit aber nicht ändern. Es sei außerdem vorausgesetzt, daß der Nutzen dieser Informationsobjekte für einen Teilnehmer umso größer ist, je geringer die Entfernung vom Aufenthaltsort des Teilnehmers ist. Der Nutzenwert hänge also nur von der Entfernung ab, nicht von der Richtung, in der sich ein Informationsobjekt befindet. Alle Informationsobjekte derselben Kategorie seien darüber hinaus gleich groß. Informationsobjekte werden dann für jede Kategorie immer bis zu einer maximalen Entfernung vom Teilnehmer gespeichert. Würde man das Problem auf Objekte ausschließlich einer Kategorie beschränken, so würde es sich auf die Bestimmung der maximalen Entfernung reduzieren, bis zu der noch alle Objekte in den lokalen Informationsspeicher passen. Es sei weiterhin eine stetige, mit der Entfernung monoton fallende Nutzenfunktion und eine homogene Dichte der Informationsobjekte über einem Gebiet vorausgesetzt.

Das Problem der Maximierung des Informationsnutzens kann unter diesen Annahmen mathematisch wie folgt als Optimierungsproblem beschrieben werden: Die (homogene) Dichte der Informationsobjekte einer Kategorie κ_i in einem Gebiet sei mit ρ_{INF}^i (in $\frac{\text{Anzahl Informationsobjekte}}{\text{km}^2}$) bezeichnet, die Größe eines Informationsobjektes einer Kategorie in Kilobytes als s_i und die maximale Entfernung von der Position des Teilnehmers, bei der ein Objekt noch gespeichert wird, mit D_i . Sei weiterhin S_C die Speicherkapazität eines Teilnehmers, so ist die Summe der integrierten Nutzenwerte der einzelnen Informationskategorien bis zur jeweils maximalen Entfernung, bis zu der die Objekte gespeichert werden, zu maximieren. Dabei gilt die Nebenbedingung, daß die Summe der gespeicherten Informationsobjekte, die sich aus der Informationsobjektdichte, der Größe der Informationsobjekte und des jeweiligen Speichergebietes errechnet, nicht größer sein darf als der verfügbare Speicherplatz:

$$\begin{aligned} \text{Max.} \quad & \sum_{i=1..n} \int_{d_i=0}^{D_i} u_i(d_i) dd_i \\ \text{N.B. :} \quad & \sum_{i=1..n} \pi d_i^2 \rho_{INF}^i s_i \leq S_C \end{aligned}$$

Es sei nun angenommen, daß es Objekte zweier Informationskategorien κ_1 und κ_2 mit verschiedener Nutzenfunktion u_{κ_1} und u_{κ_2} gibt. Beide Nutzenfunktionen seien mit der Entfernung monoton abnehmend. Zwei beispielhafte Nutzenfunktionen ($u_{\kappa_1} = \frac{1}{0,09x^4+1}$ und $u_{\kappa_2} = \frac{1}{x^2+1}$) sind in Abbildung 7.6 aufgetragen. Die Größe der Objekte und ihre Dichte über einem Gebiet sei identisch ($s_1 = s_2 = s$ und $\rho_{INF}^1 = \rho_{INF}^2 = \rho_{INF}$). Dann gilt, daß alle Informationsobjekte der Kategorie κ_1 und alle Objekte der Kategorie κ_2 mit einem Nutzen größer als ein bestimmter fester Nutzen

u_c gespeichert werden. Für diesen Nutzen gilt $u_c = u_{\kappa_1}(d_1) = u_{\kappa_2}(d_2)$ unter Beachtung der Kapazitätsrestriktion $\pi d_1^2 \rho_{INFs} + \pi d_2^2 \rho_{INFs} \leq S_C$. Dies lässt sich für den Fall zweier Kategorien nach den beiden gesuchten Variablen d_1 und d_2 auflösen. Für die beiden Beispielfunktionen gilt $u_c = \frac{1}{0.09d_1^4+1} = \frac{1}{d_2^2+1}$. Formt man diese Gleichung nach d_1 um, dann ist $d_1 = \sqrt{\frac{d_2}{0.3}}$. Setzt man dies für d_1 in die Kapazitätsrestriktionsgleichung ein, so ergibt sich $\frac{d_2}{0.3} + d_2^2 \leq \frac{S_C}{\pi \rho_{INFs}}$. Für eine Speichergröße von $S_C = 600MB$, einer Informationsobjektdichte von $\rho_{INF} = \frac{1000}{km^2}$ und einer Objektgröße von $s = 100KB$ ergibt sich daraus eine Speicherentfernung von $d_2 = 0,5km$ und $d_1 = 1,3km$. Es werden alle Objekte mit einem Nutzen größer als $u_c = 0,8$ gespeichert.

Der dadurch erzielte Nutzen im Speicher ist maximal. Würde man nämlich ein Objekt wieder herausnehmen, dessen Nutzen mindestens so groß ist wie u_c , so stehen nur Objekte mit einem kleineren Nutzen ($\leq u_c$) zur Verfügung, um stattdessen in den Speicher aufgenommen zu werden.

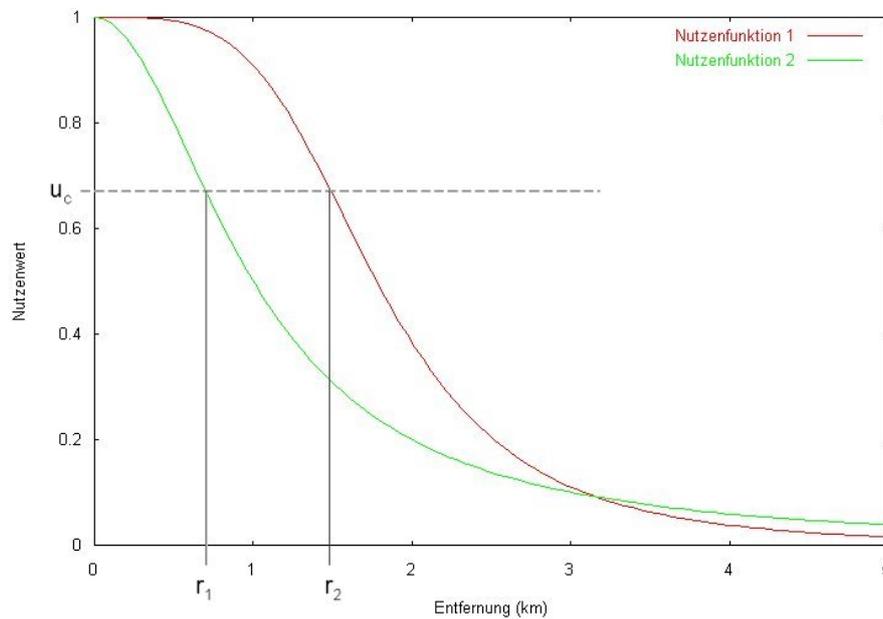


Abbildung 7.6: Maximierung des Nutzens statischer ortsbezogener Informationsobjekte

Das Optimierungsproblem lässt sich allgemein für n Informationskategorien mit verschiedenen, aber monoton fallenden entfernungsbezogenen Nutzenfunktionen bei identischer Objektgröße und -dichte bzw. entsprechend normierten Nutzenfunktionen lösen. Dazu ersetze man x in den Nutzenfunktionen durch $\frac{1}{\pi} \sqrt{r}$ und stelle die Nutzenfunktionen nach r um, d.h. bilde die Umkehrfunktionen in Abhängigkeit von y . Da die Nutzenfunktionen nach dieser Modellannahme monoton sind, existieren die Umkehrfunktionen. Diese Umkehrfunktionen werden nun addiert und mit S_C gleichgesetzt. Kennt man den Wert für S_C , so lässt sich anhand dieser Formel, ggfs. numerisch mittels Näherungsverfahren, der Wert für y berechnen. Mit diesem Wert können nun wiederum die einzelnen optimalen Entfernungen für die Speicherung der Objekte der verschiedenen Kategorien berechnet werden.

Bei der praktischen Realisierung wird das Optimierungsproblem durch den folgenden einfachen Algorithmus iterativ gelöst.

- Sortiere alle Informationsobjekte nach abnehmendem Nutzen, normiert hinsichtlich Objektgröße und -dichte.
- Nehme das vorderste Objekt aus dieser Liste auf in den Informationsspeicher bis zu dessen Kapazitätsgrenze.

Stehen Objekte in verschiedenen Detaillierungsgraden, und somit auch verschiedener Größe, zur Verfügung, so führt dieser Algorithmus automatisch zu einer Speicherbelegung, die mit einem *Fisheye* Blick auf das Netz verglichen werden kann. Bei zwei Objekten identischer Kategorie und Entfernung, aber unterschiedlichem Detaillierungsgrad, wird der Nutzenwert des Objektes mit mehr Details (z.B. Bildern) zwar höher sein als der des anderen, normiert auf den Nutzen pro Größeneinheit jedoch in der Regel kleiner. Dies führt dazu, daß mit steigender Entfernung der Detaillierungsgrad der in den Informationsspeicher aufgenommenen Objekte abnimmt und der Aggregationsgrad steigt. Große, detaillierte Objekte (z.B. Hotelinformationen illustriert mit vielen Bildern) oder viele exakte Informationsobjekte (z.B. über einzelne freie Parkplätze), sind dann nur mit Bezug auf die nahe Umgebung verfügbar. Kleinere Objekte mit weniger oder aggregierter Information stehen auch aus größerer Entfernung zur Verfügung.

7.3 Nachbarschaftsbasierter Informationsaustausch

7.3.1 Mobilitätsinduzierter Austausch ortsbezogener Information

Sobald sich ein Teilnehmer bewegt, ändern sich die Nutzenbewertungen seiner gespeicherten ortsbezogenen Informationsobjekte. Die nutzenmaximierende Speicherung in Abhängigkeit der Entfernung erfordert dann eine ständige Aktualisierung. Würde eine solche Aktualisierung andauernd für jeden Teilnehmer durchgeführt, so wäre das Netz damit schnell ausgelastet.

Für automobiler Netze kann aber davon ausgegangen werden, daß ein Teilnehmer eine Heimatposition besitzt und ein Gebiet, in dem er sich vorwiegend bewegt. Um die Netzlast zu minimieren, werden bei CARISMA deshalb langfristige ortsbezogene Informationsobjekte einer Heimatzone permanent gespeichert, unabhängig von der Bewegung des Teilnehmers. Die Objekte der Heimatzone werden auch dann im Speicher gehalten, wenn die Heimatzone verlassen wird. In diesem Fall wird es notwendig, die Objekte der besuchten Gegend (Zielzone) in den Speicher zu laden. Dazu werden auf der Reise zum Zielort die Objekte bei Nachbarknoten angefragt. Im Fahrkorridor zum Zielort werden Objekte in einem kleineren Umkreis gespeichert (Reisezone). Abbildung 7.7 stellt dieses Konzept graphisch dar.

Eine sinnvolle Wahl der Entfernungsbereiche, innerhalb derer auf der Fahrt und am Zielort Objekte gespeichert werden, darf sich nicht allein an der Kapazität des lokalen Speichers ausrichten. Wesentlich für eine geeignete Wahl der Parameter ist der durch die Bewegung induzierte Netzverkehr. Jeder Teilnehmer sammelt Informationsobjekte von anderen, idealerweise entgegenkommenden Fahrzeugen bzw. Fahrzeugen, deren Heimatzone sich mit der Zielzone überschneidet.

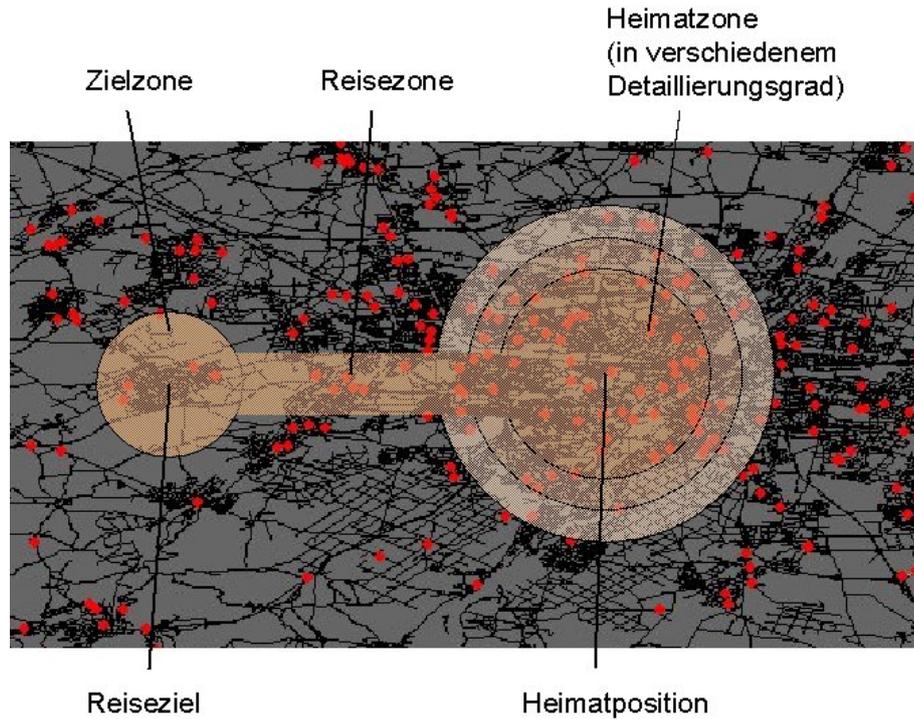


Abbildung 7.7: Fisheye induzierter Netzverkehr

Die generierte Netzlast kann anhand der Größe der Informationsvorhaltegebiete, der Dichte und Größe der Informationsobjekte, sowie der Dichte der Netzteilnehmer und deren Mobilitätsmuster abgeschätzt werden. Modellhaft sei wie oben eine identische Nutzenfunktion, Größe und Dichte für alle dauerhaften ortsbezogenen Informationsobjekte angenommen. Heimatzonen, Reise- und Zielzonen seien für alle Netzteilnehmer identisch. Der Radius der Heimatzone sei mit r_H , die Breite der Reisezone mit r_R und der Radius der Zielzone mit r_Z bezeichnet. Θ bezeichne die Ein-Hop Netzkapazität, d.h. die maximal übertragbare Datenmenge pro Zeiteinheit zu einem direkten Netznachbarn (zur Kapazität von Ad-hoc Netzen siehe Silvester und Kleinrock [180], Blake et al. [125] und Gupta und Kumar [70]). Es sei vorausgesetzt, daß Reisen immer vom Mittelpunkt der Heimatzone zu einem beliebigen zufälligen anderen Punkt verlaufen. Weiterhin sei angenommen, daß innerhalb eines Zeitintervalls zu jedem Zeitpunkt eine konstante Teilmenge aller Fahrzeuge $\frac{1}{R}$ auf dem Weg zu einem Fahrtziel außerhalb ihrer Heimatzone ist.

Die Datenmenge der Informationsobjekte der Zielzone ($C_Z = s_{INF} * \rho_{INF} \pi r_Z^2$) ist während der Fahrt zu übertragen. Von der Übertragung der Daten aus der Reisezone sei hier abgesehen. Dann dauert die Datenübertragung pro Teilnehmer und Reise zu einem entfernten Reiseziel $\frac{C_Z}{\Theta}$. Bezeichne t_R die Dauer der Reise zu diesem Ziel, so ist $\frac{C_Z}{\Theta t_R}$ der Zeitanteil der Reise, der zur Übertragung der Daten benötigt wird, unter der Voraussetzung, daß alle Daten von Nachbarn übertragen werden können. Dies bedeutet, daß bei einer Knotendichte ρ_V mindestens der Anteil $\rho_V \frac{C_Z}{R \Theta t_R}$ der Ein-Hop Kapazität des Netzes im Mittel für die Übertragung langfristig stabiler ortsbezogener Informationsobjekte benötigt wird. Dies ist eine einfache Schranke ohne Berücksichtigung von Protokoll-overhead und Rechenzeiten für die Informationssuche. Je dichter das Netz ist, desto mehr Überschneidungen sind zwischen den Anforderungen benachbarter Knoten zu erwarten, so daß

mit einer Übertragung mehrere Anforderungen befriedigt werden können. Die Kurve wird deshalb mit steigender Knotendichte flacher verlaufen. Ist das Netz stattdessen fragmentiert, so steht die Ein-Hop Kapazität nicht permanent zur Verfügung. Der anteilige Verbrauch an der Gesamtkapazität erhöht sich dann um den reziproken Faktor, zu dem das Netz zur Verfügung steht, verläuft hier also auch flacher, aber auf höherem Niveau. Eine präzisere Beantwortung dieser Fragen bedarf einer genaueren simulativen Analyse oder eines recht komplexen Modells, das über den Rahmen dieser Arbeit hinausgeht.

7.3.2 Austauschprotokoll

Um die eher statischen ortsbasierten Informationen zu erhalten, wird ein Protokoll zum Austausch dieser Informationen zwischen benachbarten Knoten benötigt. Die Organisation des Informationsspeichers bei CARISMA erlaubt eine Informationssuche anhand von Nutzenkriterien und mittels Informationskategorie, Ort und Zeit. Die Sortierung anhand dieser Kriterien erlaubt den schnellen Vergleich der Informationsobjekte zweier benachbarter Knoten. Zum Austausch mehrerer zwischengespeicherter Nachrichten in fragmentierten Netzen nutzen Vahdat und Becker in ähnlicher Weise einen Überblicksvektor, der den Inhalt eines Nachrichtenpuffers zusammenfaßt und bei Erreichen eines neuen Nachbarn mit dessen Vektor verglichen werden kann [194]. Nachrichten werden bei Ihnen im Puffer nach dem FIFO Prinzip (First In First Out) gespeichert. Sie besitzen keine Lebenszeit, sondern werden solange zwischengespeichert, wie noch Platz im Puffer ist. Epidemische Verfahren zur dezentralen Datenreplikation mit Priorisierung über gewichtete faire Pufferverfahren sprechen Demers et al. an [52]. Die Priorisierung wird bei CARISMA automatisch über den zugewiesenen Nutzen erreicht. Begegnen sich zwei Teilnehmer im Netz, so kommt bei CARISMA ein mehrstufiges Verfahren zum Einsatz:

- Austausch von Grundinformation (*Kennenlernphase*): Position, Fahrtrichtung, Heimatzone
- Austausch von Informationen über Wissen und Fähigkeiten (*Beurteilungsphase*): Infokategorien, Orts- und Zeitbezüge
- Austausch von Wissen, Inanspruchnahme von Diensten (*Kooperationsphase*): Austausch der eigentlichen Informationsobjekte

Das Nachbarschaftsinformationsaustauschprotokoll dient dem Austausch von eher stabilen Informationsobjekten, wenn ein Ziel außerhalb der Heimatzone angesteuert wird. Bei fortgeschrittenem Alter einiger langfristiger weit verbreiteter Informationsobjekte werden diese ebenfalls direkt von Nachbarn bezogen. Zusätzlich werden beim Start des Fahrzeuges die Nachbarn befragt, um schnell ein Bild der Umgebung zu erhalten. Dabei wird auch dynamische Information übertragen und nicht gewartet, bis diese per Nachricht eintrifft. Beispielsweise wird die aktuelle Verkehrslage sofort von den Nachbarn bezogen.

Im Protokoll werden in der Kooperationsphase solange die Objekte mit dem größten Nutzenzuwachs übertragen, bis entweder die Verbindung beendet ist oder der Nutzen der Objekte im Informationsspeicher nicht weiter erhöht werden kann. Abbildung 7.8 zeigt etwas detaillierter den Ablauf zwischen zwei Teilnehmern, die in Reichweite voneinander kommen und beide vorher

isoliert waren. Über das Nachbarschaftsprotokoll entdecken sie sich zunächst und erhalten Informationen über Position, Fahrtrichtung und Heimatzone des jeweils anderen. Knoten 2 sendet dann einen Angebotsvektor mit den Metadaten der dynamischen Informationsobjekte mit dem größten geschätzten Nutzen für den Partner. Dabei berücksichtigt er Position und Fahrtrichtung des Kommunikationspartners, d.h. von den Informationsobjekten, die sich im Fahrtriktor des Kommunikationspartners befinden. Zusätzlich sendet er einen Nachfragevektor mit Hinweisen auf die langfristigen Objekte, die er noch benötigt. Knoten 1 stellt seinerseits einen solchen Nachfragevektor zusammen, auf Basis des erhaltenen Angebotsvektors. Er berechnet zusätzlich eine Antwortmenge von Informationsobjekten, die der Anfrage des anderen entsprechen und bietet ggfs. weitere Objekte mit potentiell großem Nutzen für den Gegenüber an. Anschließend werden die Objekte in der Reihenfolge abnehmenden Nutzens übertragen. Um eine gewisse Fairness zu gewährleisten werden die Informationsobjekte wechselweise übertragen.

Um einerseits eine nur teilweise Übertragung großer Informationsobjekte zu vermeiden und andererseits das Übertragungsprogramm zu optimieren, wird in einem verfeinerten Verfahren zunächst die Dauer der Verbindung geschätzt. Besonders bei den großen Relativgeschwindigkeiten auf der Autobahn sowie in der Stadt bei häufig kurzen Verbindungszeiten durch Bebauungsabschattungen ist diese Abschätzung besonders relevant. Aus Abbildung 7.9 wird beispielhaft das Potential zur Optimierung des einfachen Protokolls deutlich. Bei der Wahl des Objektes mit dem größten Nutzenzuwachs wird zunächst Objekt 1 mit einem Nutzenzuwachs von 0,1 pro Übertragungseinheit und einem Gesamtnutzen von 0,6 ausgewählt. Die verbleibende Restzeit reicht dann allerdings nicht mehr zur vollständigen Übertragung eines der beiden anderen Objekte. Die Gesamtzeit würde jedoch zur Übertragung von Objekt 2 und Objekt 3 ausreichen, mit einem Gesamtnutzen von 0,7. Das hier geschilderte Optimierungsproblem der Maximierung des Informationsnutzens bei gegebener Kapazitätsrestriktion durch Auswahl der richtigen Informationsobjekte aus einer Menge zur Verfügung stehender entspricht einem klassischen binären Optimierungsproblem, dem Knapsack-Problem¹ (siehe z.B. Domschke und Drexl [54]).

Das beschriebene Optimierungsproblem geht von einer Nicht-Teilbarkeit der Objekte aus. Sehr große Informationsobjekte und Informationsobjekte, die weit verbreitet sind, d.h. mit großer Wahrscheinlichkeit schnell bei einem weiteren Nachbarn verfügbar sind, können jedoch auch partitionsweise übertragen werden. Verfahren zum segmentierten Laden von Dateien sind als unter der Bezeichnung Tornado-Coding [32] bekannt. Goel et al. [68] untersuchen den Einfluß segmentweisen Ladens einer Datei in Ad-hoc Netzwerken von mehreren anderen Teilnehmern. Sie sprechen von *populären* Dateien und untersuchen unter ganz spezifischen Bedingungen den Einfluß eines segmentweisen Ladens einer solchen populären Datei. Durch die Segmentierung wird eine populäre Datei in ihrem Szenario dabei sehr viel schneller im Netz verteilt.

Zur Bestimmung des Informationsbedarfes ist einerseits das Alter bereits gespeicherter Objekte wichtig, andererseits aber auch die Menge noch fehlender Objekte für einen neuen geographischen Bereich. Um diese zu bestimmen speichert jeder Teilnehmer für sinnvolle Einheiten (z.B. Stadtteile, Landkreise, Autobahnabschnitte) die bekannte Menge oder Dichte verfügbarer Objekte einer bestimmten Kategorie. Für Verkehrsinformationen ist die Menge der verfügbaren Informationen eindeutig, sie entspricht der Information über die Reisezeiten auf den einzelnen Straßenabschnitt-

¹Knapsack-Problem: Ein Wanderer kann Gegenstände verschiedenen Gewichts und Nutzens in seinen Rucksack packen. Mit welcher Kombination erzielt er bei gegebenem Höchstgewicht den maximalen Nutzen ?

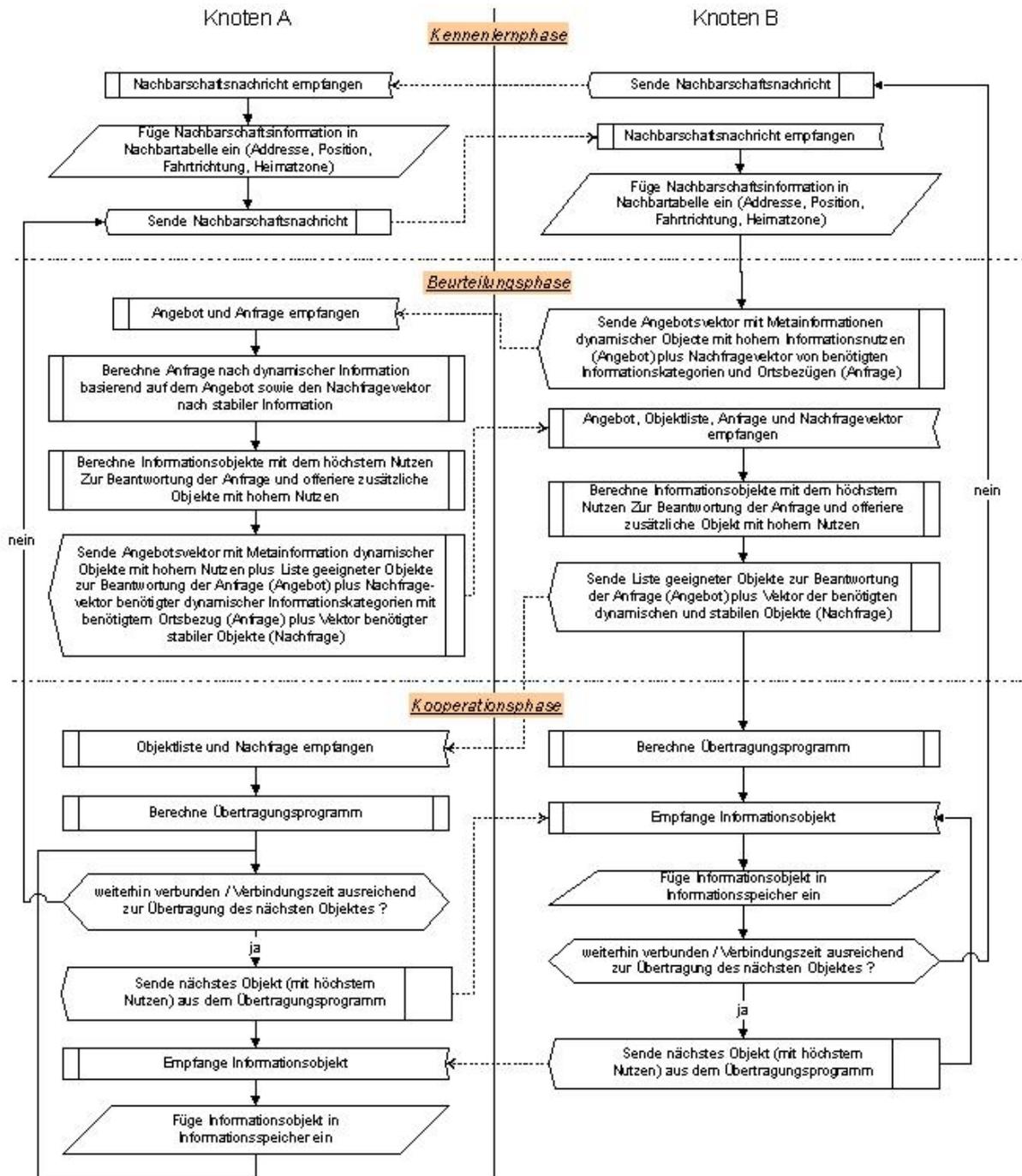


Abbildung 7.8: Informationsaustauschverfahren zweier benachbarter Knoten

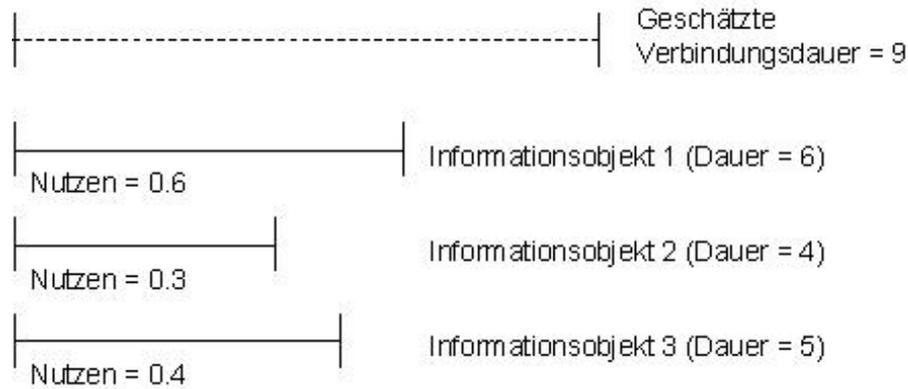


Abbildung 7.9: Problem des Übertragungsprogrammes beim nachbarschaftsbasierten nutzenoptimierenden Informationsaustausch

ten. Fehlende oder alte Information ist hier einfach zu ermitteln. Für andere Informationskategorien wie z.B. Hotels ist die verfügbare Informationsmenge nicht bekannt. In diesen Fällen sind jedem Teilnehmer eine Teilmenge der Informationsobjekte bekannt. Zusätzlich zu den eigenen bekannten Objekten speichert jeder Teilnehmer für definierte geographische Gebiete die Identitäten (insbesondere eindeutige Ortsbezüge) aller ihm bekannter Objekte, auch wenn er sie nicht selbst gespeichert hat. Auf diese Weise sind die Teilnehmer in der Lage, abzuschätzen, wieviel Informationsobjekte ihnen in einer Kategorie fehlen. Sobald ein Teilnehmer durch Vergleich solcher Objektvektoren nur marginale neue Information erhält, reduziert er sein Erneuerungszeitintervall.

7.4 Adaptive Nachrichtenbasierte Kommunikation

7.4.1 Modellbildung

Im Gegensatz zur statischen Information werden dynamische Informationsobjekte, deren Werte sich schnell ändern oder die bei Beobachtung neuer Ereignisse generiert werden, und die sozial einen hohen Nutzen besitzen, aktiv in Form von Nachrichten versandt. Der Zeitbezug, der bei der bisherigen Betrachtung weitgehend außer Betracht blieb, spielt nun eine gewichtigere Rolle, d.h. die Zeit ist neben dem Ort ein dominierender Faktor des Nutzenwertes. Der nutzenbasierte Austausch über das Nachbarschaftsprotokoll führt bereits zu einer Verbreitung dynamischer Informationen, da diesen *neuen* Informationen von vielen Teilnehmern ein hoher Nutzen zugeordnet wird und sie deshalb bevorzugt zwischen Nachbarn ausgetauscht werden. In dichteren Netzen ist es aber sinnvoll, neue Ereignisse unmittelbar bekannt zu geben. Sie werden in Form von Nachrichten verbreitet.

Inhaltsbasierte Benachrichtigungssysteme sind im Festnetz häufig über eine vorherige Anmeldung für bestimmte Nachrichten als sogenannte Publish-Subscribe Systeme realisiert. Im Gegensatz zum Festnetz ist es in Ad-hoc Netzen Nachrichtenkonsumenten jedoch nicht möglich, sich a priori für

eine Benachrichtigung anzumelden. Ein Grund dafür ist, daß keine ausgezeichneten Nachrichtenserver existieren. Jeder Knoten kann Informationen generieren (z.B. Sensorwerte) und temporär die Rolle eines Informationsservers übernehmen. Da der Nutzen dieser Information für andere häufig von deren Situation abhängt, läßt sich deren Interesse prinzipiell nicht im voraus bestimmen. Es ist daher dem Teilnehmer, der eine neue Information generiert, zunächst nicht bekannt, wer sich für die Information interessiert. Klassische Publish/Subscribe Systeme bieten eine Lösung des Problems mittels Anmeldung für den Spezialfall langfristigen Interesses in statischen Kommunikationsnetzen. Bei CARISMA sind demgegenüber sowohl das Informationsinteresse der einzelnen Knoten als auch die Netztopologie dynamisch.

Abbildung 7.10 zeigt zwei kurz aufeinander folgende Schnappschüsse eines Ad-hoc Netzes mit einer Informationsquelle und einer Teilmenge aller Knoten, die Interesse an der Information besitzen, d.h. nach dem CARISMA Modell ihr einen bestimmten Nutzen zuordnen. Der Informationsquelle sind sie bei Generierung der Information nicht bekannt. In der Graphik sind die Knoten, die einen positiven Nutzen aus der Nachricht ziehen, rot eingefärbt und nummeriert. Durch den Versand einer Beschreibung des Nachrichteninhaltes wäre es denkbar, im Ad-hoc Netz vor dem eigentlichen Nachrichtenversand die Menge der Empfänger verteilt zu bestimmen und dabei gleichzeitig einen temporären Baum aufzubauen, über den die Nachricht verbreitet wird [120]. In fragmentierten Netzen wie in Abbildung 7.10 ist dies jedoch grundsätzlich nicht möglich und prinzipiell aufgrund der Dynamik für VANETS ungeeignet.

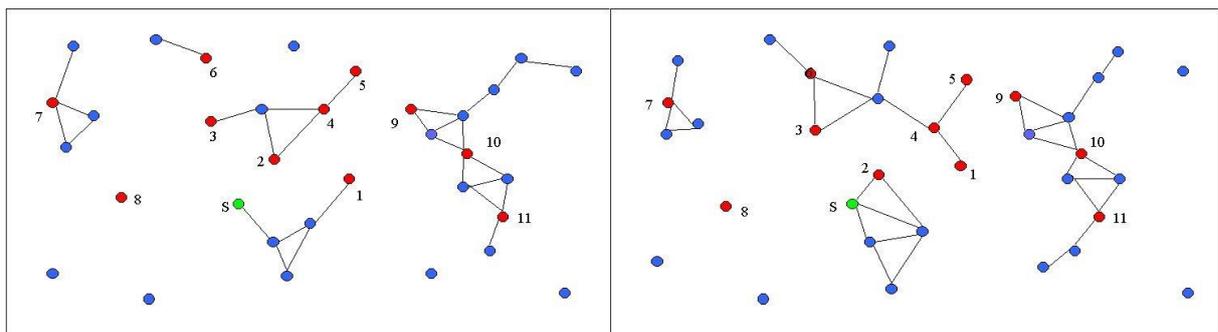


Abbildung 7.10: Beispiel Ad-hoc Interessennetz

In fragmentierten Netzen werden neu generierte Informationen über ein Zwischenspeichern mit neuen Nachbarn ausgetauscht, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Auch in dichten, zusammenhängenden Netzen bleibt das Ziel von CARISMA die Maximierung des Gesamtinformationsnutzens über alle Teilnehmer. Entsprechend funktioniert auch das CARISMA Messaging nutzenbasiert. Als Nebenbedingungen restringieren neben den lokalen Informationsspeichern die beschränkte Kapazität des Netzes die Menge der möglichen Nachrichten, d.h. die Erneuerungsrate und Verbreitungsgebiete von Informationsobjekten. Dabei ist zwischen diesen beiden Parametern ein sinnvoller Mittelweg zu wählen. Weder ist es wünschenswert, eine lokale Verkehrsnachricht über hunderte von Kilometern zu verbreiten, noch ist es erforderlich, jede Sekunde eine neue Information über einen Straßenabschnitt zu generieren. Da nicht beliebig viele Informationsobjekte verbreitet werden können, sind also sowohl die Menge und Größe der Informationsobjekte wie auch deren Verbreitungsgebiete zu begrenzen. Mit Hilfe des Konzepts der situationsbezogenen Informationsnutzengewichtung kann auch für dieses Problem eine permanente Adaption des

Verhaltens und damit eine gute Balance zwischen diesen beiden Parametern erreicht werden. Es wird außerdem sichergestellt, daß die Nachrichten mit dem größten Nutzengewinn am weitesten verbreitet werden.

Verglichen mit klassischen Gruppenkommunikationsarten unterscheidet sich diese Art der Kommunikation hinsichtlich des Versandes, hinsichtlich der Adressierung, die implizit durch die situationsbezogene Nutzenbewertung der Empfänger gegeben ist, und hinsichtlich des notwendigen Routings, da die Kommunikation in einem mobilen Ad-hoc Netz stattfindet. In Tabelle 7.1 wird dieser *Situative Multicast* abgegrenzt vom klassischen Multicast in festen Netzen oder Ad-hoc Netzen, sowie von inhaltsbasierten Verfahren in festen Netzen mit expliziten Routern.

	Explizite Adressierung	Implizite Adressierung
statisch	<i>Klassischer Multicast</i>	<i>Inhaltsbasierter Multicast</i>
ad hoc	<i>Multicast in Ad-hoc</i>	Situativer Multicast

Tabelle 7.1: Klassifizierung des CARISMA Messaging

Da die Kommunikation bei CARISMA autonom stattfindet, muß das System selbständig alle im Zusammenhang mit dem Nachrichtenversand auftretenden Entscheidungen treffen. Dabei ist prinzipiell folgende Frage zu beantworten: *Wann soll welche Nachricht wie an wen versendet werden?* Diese Fragen sind bei jedem Nachrichtenversand zu beantworten, d.h. in jedem Nachrichtensystem sind drei Grundprobleme zu lösen:

- Das Versandproblem (wann?, was?)
- Das Adressierungsproblem (an wen?)
- Das Routingproblem (wie?)

Das *Versandproblem* bezieht sich auf die Frage, Welche Informationen wann mittels einer Nachricht übermittelt werden sollen. Bei einem nachrichtenbasierten Verkehrsinformationssystem beispielsweise ist zu klären, ob der beobachtete Verkehrszustand in regelmäßigen Zeitabständen oder nur bei relevanten Änderungen der bereits bekannten Information anderen Teilnehmern mitgeteilt werden soll. Das *Adressierungsproblem* besteht darin, die Empfängermenge einer Nachricht zu bestimmen. Schließlich wird mit dem *Routingproblem* die Frage bezeichnet, wie die Nachricht vom Sender zu den Empfängern transportiert werden soll.

Der Spezialfall eines statischen Netzes mit situationsunabhängigen Interessentenmengen führt auf inhaltsbasierte Benachrichtigungsdienste. Eine rein ortsbasierte Adressierung reduziert das Problem zu Geocasting. Durch die Vereinfachung einzelner Systemaspekte entstehen also Systeme mit speziellen Lösungsvarianten der drei Grundprobleme Versand, Adressierung und Routing.

Da durch die Situationsbezogenheit das Interesse an einer Nachricht bzw. der Nutzen des transportierten Informationsobjektes bei CARISMA erst nach der Veröffentlichung bzw. Generierung erfolgen kann, sei der CARISMA Ansatz im Gegensatz zum Publish/Subscribe Modell als *Publish/Accept/Relay* Modell bezeichnet. Im Zusammenhang mit den drei Komponenten Publish,

Accept und Relay stehen jeweils das Versandproblem, das Adressierungsproblem und das Routingproblem.

Da die Entscheidung über die Bildung einer Nachricht, die Festlegung des Inhalts und die Auswahl der Adressaten bei bisherigen Systemen in der Regel vom Menschen vorgenommen wird (z.B. bei E-Mails), ist im wesentlichen das Routingproblem untersucht worden. Soll das System aber autonom über den Versand einer Nachricht entscheiden, so sind die beiden anderen Probleme für mobile, verteilte Informationssysteme ebenfalls zu lösen. Das CARISMA Routing zur Verbreitung von Datenpaketen in VANETS wurde bereits in Kapitel 5 vorgestellt. Im folgenden wird der nutzenbasierte Ansatz zur Lösung des Versand- und Adressierungsproblems behandelt.

7.4.2 Das Versandproblem und seine Lösung bei CARISMA

Das Versandproblem bezieht sich auf die Entscheidung über die Initiierung einer neuen Nachricht, d.h. ihren Inhalt und Versandzeitpunkt.

Für CARISMA wird zur Lösung des Versandproblems jeder Informationskategorie eine Menge von *Versandbedingungen* zugeordnet. Eine Versandbedingung s_{cond} ist dabei eine aussagenlogisch verknüpfte Menge von Ereignisbedingungen E_{cond} und Situationen s_i oder reinen Nutzenschwellwerten. Eine Nachricht wird dann versendet, wenn eine ihrer Versandbedingungen wahr wird. Die Versandbedingung kann im einfachsten Fall ein zyklischer Versand der Information sein. Als Versandbedingung wird dann $Systemzeit \% Zykluszeit = 0$ gesetzt, d.h. die Nachricht wird jedesmal versendet, wenn die Systemzeit in Sekunden modulo der Zykluszeit null ist. Grundsätzlich kann jede Verknüpfung von Ereignissen und Situationen definiert werden. Dazu meldet sich der Informationsmanager beim Situationsmanagement für die Benachrichtigung beim Eintreten der Situationen und Ereignisse an. Ein Ereignis tritt zu dem Zeitpunkt ein, zu dem die Ereignisbedingung E_{cond} zum ersten Mal erfüllt wird. Ein Ereignis wird dann beispielsweise ausgelöst, wenn sich kontinuierlich ändernde Variablen (z.B. Verkehrsdichte) bestimmte Größen annehmen oder sich um bestimmte Werte vom letzten bekannten Zustand unterscheiden.

Grundsätzlich sind auf der Basis des Nutzenmodells die Versandbedingungen so zu wählen, daß Nachrichten dann generiert und versendet werden, wenn sie einen hohen sozialen Nutzenwert besitzen (einen ähnlichen Ansatz verfolgen On-Demand Broadcasting Verfahren, wie sie beispielsweise bei Aksoy und Franklin beschrieben werden [6]). Bei der Entscheidung sind zusätzlich die Ressourcenrestriktionen des Netzes zu berücksichtigen.

Jeder Teilnehmer besitzt bei CARISMA anhand seiner lokal gespeicherten Informationsobjekte ein Bild des aktuellen Weltzustands. Dieses Bild weicht im Laufe der Zeit umso schneller vom realen Zustand der Welt ab, je schneller sich die realen Werte der Beobachtungsvariablen ändern. Das Versenden einer neuen Nachricht ist dann angebracht, wenn durch die Aktualisierung des Bildes eine Nutzenerhöhung erreicht wird, die die dadurch entstehenden Kosten überwiegt. Ist dies lokal bei einem Teilnehmer der Fall, so ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß auch seine Nachbarn von der neuen Information entsprechend profitieren, sofern die Informationskategorie von allgemeinem Interesse ist.

Basierend auf dem nutzenorientierten Ansatz sind Versandbedingungen also nutzenabhängig zu formulieren. Ein Informationsobjekt wird dann versendet, wenn es einen Mindestnutzen besitzt. In

die Berechnung dieses Mindestnutzens fließen dabei Annahmen über das Interesse bei den anderen Teilnehmern ein. Die entsprechende Nutzenfunktion ist demnach auch unabhängig von subjektiven Bewertungen und bezieht sich auf den Informationstyp, den Unterschied zu lokal bereits bekannter Information und Wissen über die Menge im Mittel interessierter Teilnehmer in der direkten Umgebung.

Die reine Abhängigkeit von einem bestimmten festen Mindestnutzen berücksichtigt nicht den Nutzen anderer Nachrichten im Netz sowie die damit zusammenhängende Verfügbarkeit von Netzkapazität. Statt der statischen Angabe eines Mindestnutzens sollen analog zum Nachbarschaftsprotokoll alle Nachrichten mit dem höchsten Nutzen versendet werden. Ist die Netzkapazität erreicht, so wird eine Nachricht nur versandt, wenn ihr Nutzen lokal höher bewertet wird als der kleinste Nutzen aller Nachrichten innerhalb einer gewissen Zeitspanne.

Ein Beispiel mag das Verhalten illustrieren. Ein Netz bestehe aus N Netzknoten, die alle einen lokalen Systemzustand W_i wahrnehmen. Alle Teilnehmer besitzen das gleiche Interesse, d.h. eine identische Nutzenfunktion. Die Ein-Hop Kapazität sei erneut bezeichnet mit Θ . Eine Nachricht n besitzt eine Größe von $size(n)$. Die beobachteten Systemzustände ändern sich linear, allerdings verschieden schnell bei den einzelnen Netzteilnehmern. Am Anfang sende niemand. Da die wahrgenommene Information bei allen Teilnehmern neu ist, erhält sie einen hohen Nutzenwert. Jeder Knoten startet also mit dem Versand der Nachricht.

Jede generierte Nachricht wird zu allen Netzknoten übertragen. Es werden somit N Nachrichten der Größe $size(n)$ generiert, die bis zu N mal weitergeleitet werden. Eine untere Schranke für den Kapazitätsverbrauch einer Nachricht ist dann $N \frac{size(n)}{\Theta}$. Pro Zeitschritt können entsprechend maximal $\frac{\Theta}{N * size(n)}$ Nachrichten versendet werden. Besäßen alle Nachrichten den gleichen Nutzen, so sollte jeder Knoten im Mittel alle $\frac{N * size(n)}{\Theta}$ Zeitschritte eine Nachricht versenden. Da die Knoten nicht in der Lage sind, diesen Wert zu berechnen, muß sich ihr Verhalten regelbasiert diesem Wert annähern, d.h. bei ausgelastetem Netz wird die Sendefrequenz verringert und bei freien Netzkapazitäten wird die Sendefrequenz erhöht.

Der Informationsnutzen einer Nachricht hängt im allgemeinen von individuellen Bedürfnissen sowie aktuellen und künftigen Situationen ab. Er ist daher unter den Teilnehmern verschieden. Die Frage, welche Teilnehmer den größten Nutzen von einer Nachricht haben, d.h. sich besonders für die Nachricht interessieren, führt direkt zum Adressierungsproblem.

7.4.3 Das Adressierungsproblem und seine Lösung bei CARISMA

Adressen dienen dazu, die Empfänger einer Nachricht zu bestimmen. Sie enthalten darüber hinaus für ein Nachrichtensystem interpretierbare Informationen über den Aufenthaltsort der Empfänger, um die Nachricht zustellen zu können. Die Zuordnung von Nachrichten zu Empfängern geschieht in existierenden Nachrichtensystemen auf drei verschiedene Arten:

- Explizit (z.B. IP Multicasting)
Die Empfänger werden explizit vom Sender anhand eines eindeutigen Namens aufgezählt oder es gibt einen Namen mit einer eindeutigen Zuordnung zur Empfängergruppe.

- Implizit (z.B. Geocasting)
Die Empfängermenge ergibt sich aus Empfängereigenschaften.
- Inhaltsbasiert (z.B. Publish/Subscribe Systeme, inhaltsbasierte Nachrichtensysteme)
Die Menge der Empfänger wird aus dem Interesse am Inhalt einer Nachricht ermittelt.

Für eine Reihe von Anwendungsfällen besteht die Notwendigkeit, Informationen an Teilnehmer weiterzugeben, deren Identität dem Sender nicht notwendigerweise bekannt ist. Eine Adressierung über einen eindeutigen Namen ist für diese Fälle nicht möglich. Die Adressierung kann dann die Form einer Beschreibung der Empfänger, also potentiellen Interessenten, annehmen. Die Empfängermenge einer Nachricht bestimmt sich in diesem Fall anhand von Zuständen und Eigenschaften der Teilnehmer sowie anhand ihres Kontextes. Wenn der Sender davon ausgehen kann, daß Teilnehmer mit bestimmten Eigenschaften an einer Nachricht interessiert sind, dann kann er eine solche implizite Adressierung wählen. In Fahrzeugnetzen wird ein Fahrzeug, das beispielsweise über Sensoren feststellt, daß die Straße vereist ist, nicht explizit die Adressen aller Fahrzeuge kennen, für die die Nachricht relevant ist. Eine Möglichkeit, diese Fahrzeuge zu adressieren, besteht aber in einem Geocast (siehe Abschnitt 5.4). Die CARISMA Messaging Schnittstelle unterstützt diese Möglichkeit der geographischen Adressierung.



Abbildung 7.11: Problem der Verkehrsinformationsverbreitung in der Stadt

In vielen Fällen ist es allerdings schwierig für den Sender, ein genaues geographisches Verbreitungsgebiet für eine Nachricht zu bestimmen. Abbildung 7.11 visualisiert dieses Problem anhand eines Beispiels. Sie zeigt eine Karte eines Teiles der Stadt München. Der innere Kreis bezeichnet

eine Gegend, in der der Verkehr dicht geworden ist. Diese Information wird verteilt von mehreren Fahrzeugen wahrgenommen. Sie senden allerdings gemäß dem CARISMA Lösungsansatz für das Versandproblem nur dann eine Nachricht, wenn diese nutzenbringende neue Information enthält. Sind die Nachrichten generiert, stellt sich die Frage nach der Adressierung. Ein einfacher Geocast würde die Information im Netz bis zu einer bestimmten Entfernung verbreiten, z.B. im Gebiet, das durch den äußeren Kreis beschrieben wird. Ein solches einfaches geometrisches Geocast Gebiet ist dabei nur bedingt sinnvoll, da die Fahrzeuge in einigen Straßen nicht von der Situation betroffen sind, andererseits aber die Nachricht für weiter entfernte Fahrzeuge auf Hauptstraßen relevant ist. Es stellt sich somit die Frage, wie festgelegt werden kann, zu welchen Teilnehmern bzw. in welches Gebiet eine Nachricht verbreitet werden soll. Die Problematik wird bei Betrachtung der Abbildung 7.12 noch deutlicher. Hier soll Gefahreninformation zu den Fahrzeugen gesendet werden, die auf die Gefahrenstelle zufahren. Eine rechteckige Weiterleitungszone ist dabei nicht sinnvoll. Die Empfänger der Nachricht werden nicht allein durch ihre Position determiniert, sondern auch durch ihre Fahrtrichtung und Fahrtroute.

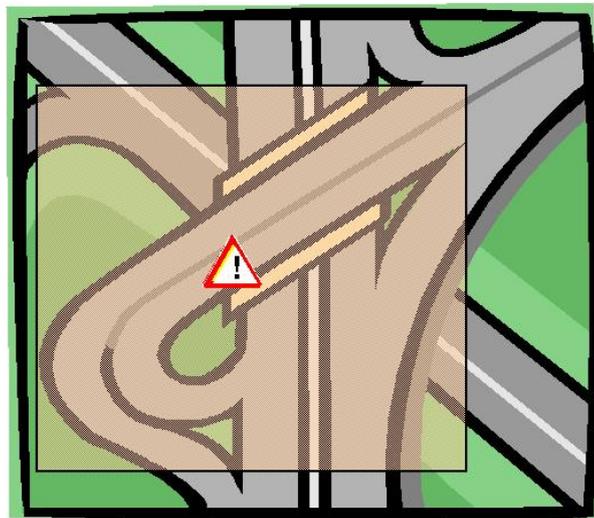


Abbildung 7.12: Adressierungsproblem bei komplexeren Straßenverläufen

Aus der konkreten Problembeschreibung der Abbildung 7.12 wäre ein naheliegender Lösungsvorschlag, das Nachrichtenverbreitungsgebiet anhand des Straßennetzes zu berechnen. Aber auch das Adressierungsproblem läßt sich für ortsbezogene Informationen basierend auf dem Informationsnutzen lösen. Dazu werden bei CARISMA Nachrichten in die Gebiete verbreitet, in denen die Teilnehmer einer Nachricht einen ausreichend hohen Nutzen zuordnen. Wie weit und wohin eine Nachricht verbreitet wird entscheidet sich dann dezentral bei den Empfängern. Der Vorteil gegenüber einer straßennetzbasierten Lösung liegt in der noch größeren Flexibilität. Es ist weniger a priori Wissen über die Aufenthaltsorte der Empfänger notwendig und die Größe von Verbreitungsgebieten paßt sich automatisch der Netzlast an. Das Verfahren eignet sich auch für Informationen, die keinen Bezug zu Straßenverläufen haben.

Wie bei *inhaltsbasierten Nachrichtensystemen* enthält der Kopf einer Nachricht Attribut-Wert Paare mit Metainformationen, bei CARISMA insbesondere Informationskategorien, Orts- und Zeitbezüge (siehe Abb. 7.5). Während bei inhaltsbasierten Nachrichtensystemen diese Werte bei Nach-

richtenservern oder ausgezeichneten Nachrichtenroutern anhand von Filterbedingungen ausgewertet werden, die von den Empfängern vorher im Rahmen einer Subskription übergeben wurden (siehe z.B. [35]), melden Applikationen bei CARISMA ihr Interesse an Benachrichtigungen bei Verfügbarkeit neuer Informationen mit einem bestimmten Nutzen lokal dem Informationsagenten. Sie können dem Informationsagenten auch spezielle Nutzenfunktionen übergeben, um anwendungsspezifisch den Nutzen einzelner Informationsobjekte bewerten zu können (siehe Abbildung 7.13). Diese Informationen können dabei prinzipiell lokal oder entfernt generiert worden sein, per Nachricht empfangen, von Nachbarknoten übertragen oder aktiv nachgefragt worden sein. Dies bleibt für die Anwendung transparent. Der Informationsagent abonniert nun seinerseits Nachrichten bestimmter Informationskategorien beim lokalen Nachrichtensystem und übernimmt die Nutzenbewertung der Informationsobjekte eintreffender Nachrichten. Auf diese Weise beurteilen die Empfänger die Relevanz von Nachrichten durch die Berechnung ihres persönlichen Informationsnutzens.

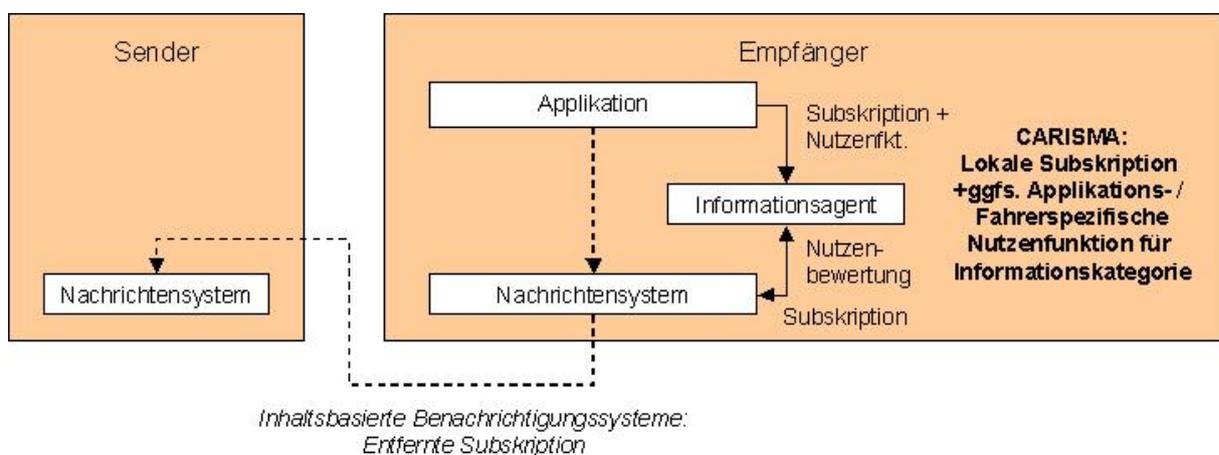


Abbildung 7.13: Subskriptionsvarianten

Tabelle 7.2 verdeutlicht den Unterschied des CARISMA Nachrichten- und Informationssystems zu klassischen Nachrichtensystemen anhand der Adressierungs- und Subskriptionsschemen. Bei IP Multicasting öffnen Paketempfänger einen lokalen *Multicast Socket*, d.h. sie melden sich lokal für den Empfang von Datenpaketen an. Pakete werden an eine explizite Multicast Adresse gesendet. Bei einem Geocast wird implizit über die Lokation der Empfänger adressiert. Sowohl bei Publish/Subscribe Systemen als auch bei CARISMA erfolgt die Adressierung mittels Attributen der zu versendenden Information. Basierend auf diesen Attributen wird das Empfängerinteresse ausgewertet und so die Empfängermenge bestimmt. Bei CARISMA erfolgt dies im Gegensatz zu Publish/Subscribe Systemen während der Verbreitung der Information lokal bei den potentiellen Empfängern.

Entscheidend für das Funktionieren einer derartigen adaptiven Nachrichtenverbreitung ist eine Korrelation zwischen Position und Informationsnutzen. Für Nachrichten mit ortsbezogenen Informationen kann angenommen werden, daß sich die Teilnehmer mit dem größten Nutzen an einer Nachricht in der Nähe des Ursprungsortes befinden und mit größerer Entfernung, also geographisch weiterer Verbreitung, der zusätzlich erzielbare Nutzensgewinn bei den Teilnehmern geringer wird. Durch unterschiedliche Nutzenfunktionen und Situationen, in denen sich die Teilnehmer be-

		Subskription	
		entfernt	lokal
Adressierung	explizit		IP Multicast
	implizit		Geocast
	inhaltsbasiert	Publish/Subscribe	Situative Kommunikation bei CARISMA

Tabelle 7.2: Charakteristika und Einordnung situativer Nachrichtenkommunikation

finden, sind die Informationsbewertungen auch benachbarter Teilnehmer in der Regel verschieden. Für die Verbreitung ist das Gesamtinteresse ausschlaggebend. Das Verbreitungsgebiet eines Informationsobjektes wird dann implizit durch den erzielbaren Nutzen einer weiteren Verbreitung in Abhängigkeit verbrauchter Netzkapazität determiniert.

Durch die Auswertung der Nutzenfunktionen kann ein durchschnittlicher Informationsnutzen innerhalb eines Gebietes A berechnet werden als der Quotient aus der Summe der Nutzenwerte aller Knoten und der Gesamtzahl der Knoten in A . Mit zunehmender Entfernung wird dabei im Mittel sowohl der Anteil der an einer Nachricht interessierten Teilnehmer als auch deren individuelle Nutzenbewertung abnehmen, allerdings nicht notwendigerweise monoton (auch wenn die Informationsnutzenwerte für den einzelnen Teilnehmer monoton mit der Entfernung von dessen Ortsbezug abnehmen).

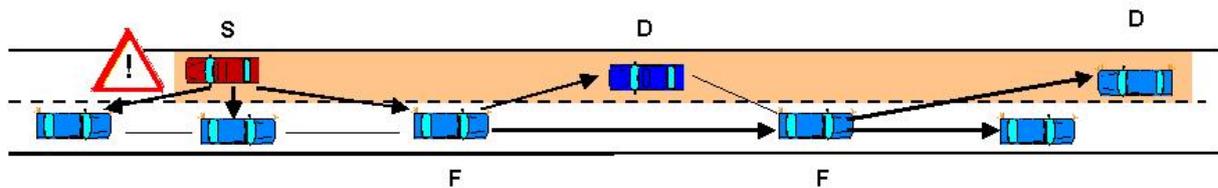


Abbildung 7.14: Problematik rein nutzenbasierter Nachrichtenverbreitung

Für die adaptive Nachrichtenverbreitung eignet sich das NREQ Verfahren aus Kapitel 5.4.3 in modifizierter Form. Mit einer U-NREQ² Anfrage werden bereits die Nachrichtenattribute mitgesendet. Die Nachbarn betten in die U-NREP Antwort ihre Nutzenbewertung mit ein. Knoten, die eine Nachricht eines anderen superioren Teilnehmers mitgehört haben, unterdrücken ihre NREP Antwort nun nicht unbedingt. Falls ihr Nutzen größer ist als der durchschnittlich bekundete Nutzen der Teilnehmer, die bereits geantwortet haben, so senden sie eine U-NREP Nachricht mit ihrer Nutzenbewertung. Sie setzen dabei aber einen Schalter, der darauf hinweist, daß sie nicht als Weiterleiter in Frage kommen und nur ihren relativ hohen Nutzen kundtun. Der weiterleitende Knoten berechnet ebenfalls aus allen U-NREP Nachrichten den durchschnittlichen Nutzenwert der Nachricht bei den noch nicht erreichten Teilnehmern. Er leitet die Nachricht dann nur weiter, wenn sie zu einer ausreichenden Nutzenerhöhung führt.

Ein Problem ergibt sich bei diesem einfachen Vorgehen bei nur lokal geringem Nutzen, wie im Beispiel der Abbildung 7.14. Hier beziehen die ersten drei Empfänger der Nachricht keinen Nut-

²Utility-NREQ

zen, wohl aber die erst nach Weiterleiten erreichten Teilnehmer. Um solche *lokalen Minima* zu überwinden wird dem Nachrichtenkopf ein Zähler hinzugefügt, der im Falle des Unterschreitens des Mindestnutzens inkrementiert wird. Erst wenn dieser Zähler einen bestimmten Wert erreicht, wird die Nachricht dann nicht mehr versendet. Wird der Nutzenwert wieder überschritten, kann ein solcher Zähler entweder wieder auf Null gesetzt oder dekrementiert werden.

Abschließend wird beispielhaft in einem allgemeinen Ad-hoc Netz eine sinnvolle Grenze der Nachrichtenverbreitung bestimmt. Dazu bezeichne $A = \pi R^2$ das runde Aufenthaltsgebiet mit Radius R . Die Knotendichte sei hoch. Straßen und Abschirmungen gebe es keine. Die Betrachtung sei weiterhin beschränkt auf eine Nachricht n , die von einem Quellknoten angeboten wird. Die Nutzenbewertung sei binär, d.h. Knoten besitzen entweder einen Nutzen an einer Nachricht oder nicht. Innerhalb des Gebietes gebe es N_u Knoten, die der Nachricht einen Nutzen zuordnen. Im Durchschnitt ist jeder der Knoten $\frac{2}{3}R$ vom Mittelpunkt des Gebietes entfernt. Durch die hohe Knotendichte wird mit einem Hop fast die komplette Kommunikationsreichweite r überbrückt. Würde nun jeder dieser Knoten bei der Nachrichtenquelle einzeln anfragen, so ist $size(n) * N_u * \frac{2}{3} \frac{R}{r}$ eine untere Schranke für die generierte Netzlast. Würde die Nachricht andererseits mit Hilfe von effizienten Broadcastverfahren im Netz verbreitet, dann ist $size(n) * \frac{A}{\pi r^2}$ eine untere Schranke für die dadurch erzeugte Netzlast. Das Verbreiten der Nachricht wäre in diesem Fall näherungsweise dann effizienter, wenn es weniger Netzressourcen verbraucht als individuelle Anfragen aller interessierter Knoten:

$$\begin{aligned} size(n) \frac{\pi R^2}{\pi r^2} &\leq size(n) * N_u * \frac{2}{3} \frac{R}{r} \\ \Leftrightarrow \left(\frac{R}{r}\right)^2 &\leq N_u * \frac{2}{3} \frac{R}{r} \\ \Leftrightarrow N_u &\geq \frac{3}{2} * \frac{R}{r} \end{aligned}$$

Da die Entscheidung in der Realität nicht darüber getroffen werden soll, ob eine Nachricht in einem Gebiet gegebener Größe mit gegebener Dichte interessierter Teilnehmer verbreitet werden soll, sondern darüber, ab welcher (entfernungsabhängig abnehmender) Dichte die Nachricht nicht weiter verbreitet werden soll, gilt dann als Grenzwert für die Verbreitung $\rho_{N_u} \geq \frac{3}{2 * \pi * R * r}$, wobei R die bereits zurückgelegte Entfernung zum Ursprung der Nachricht bezeichnet. Mit zunehmender Entfernung lohnt sich in diesem Modell die Verbreitung also noch bei abnehmender Dichte interessierter Teilnehmer. Dies hängt damit zusammen, daß als Alternative nur individuelle Anfragen ins Kalkül gezogen wurden.

In Straßennetzen orientieren sich sinnvolle Verbreitungsgrenzen am mittleren Nutzen im Verhältnis zum Netzressourcenverbrauch. Besitzt eine Nachricht für einen Teilnehmer einen geringeren Nutzen als alle Informationsobjekte, die er in seinem Informationsspeicher vorhält, so ist ihr Nutzen für ihn gleich null. Nachrichten werden dann maximal soweit verbreitet, wie Teilnehmer ihr noch einen Nutzen zuweisen und der mittlere Nutzen über die Teilnehmer höher ist als der eines um die Netzressource konkurrierenden Informationsobjektes.

7.5 Aktive Informationsbeschaffung

Die Verteilung der interessierten Knoten kann ggfs. große Lücken aufweisen. Urlaubsheimfahrer sind evtl. noch weit weg, aber auch an Informationen interessiert. Falls bestimmte erwartete oder benötigte Informationen nicht bereits als Nachricht empfangen und gespeichert wurden, so werden sie vom Informationsagenten nachgefragt.

Konkreter Informationsbedarf entsteht durch Diskrepanzen zwischen dem ermittelten Informationsbedarf und den im lokalen Cache vorhandenen Informationen. Diese Diskrepanzen beziehen sich auf das Fehlen gewünschter Informationsobjekte sowie den Nutzen hinsichtlich räumlicher Nähe, Alter und Detaillierungsgrad.

Für bestimmte Informationsobjekte gibt es einen Zeitpunkt des absoluten Informationsbedarfs (dies ist der letzte Zeitpunkt, zu dem eine Entscheidung getroffen werden muß, die von der Information abhängt (z.B. Stau umfahren)).

Der Bedarf an einer Information wird umso größer, je wahrscheinlicher die Information benötigt wird und je kleiner die Zeitspanne zu dem Zeitpunkt, ab dem die Information zur Verfügung stehen sollte. Andererseits verursacht die Beschaffung der Information Kosten (in Abhängigkeit der Entfernung zu vermuteten Informationsanbietern und in Abhängigkeit des zu nutzenden Netzwerkes). Sobald der erwartete Nutzen der Information diese Kosten übersteigt, wird eine Anfrage gestartet und die Information beschafft.

Zur aktiven vorausschauenden Informationsbeschaffung sind dedizierte Anfragesprachen mit temporalen und räumlichen Operatoren notwendig. *Queries* werden automatisiert auf der Basis der Situationsanalyse gebildet. Basierend auf der Anfrage muß ein geeigneter Informationsanbieter gefunden werden. Für ortsbasierte Anfragen ist zu erwarten, daß ein Knoten die Anfrage mit umso größerer Wahrscheinlichkeit beantworten kann, je näher er dem räumlichen Anfragebezug ist. Anhand von Ad-hoc Netz- und Informationsverteilungsmodellen lassen sich prinzipiell Trefferwahrscheinlichkeiten und Latenzzeiten für Anfragen berechnen. Eine weitergehende Betrachtung situationsabhängiger nutzenbezogener autonomer Generierung von Anfragen ist ein weiterer interessanter Bereich für künftige Forschungsarbeiten.

Kapitel 8

Weitere Aspekte

Neben der Anwendungsklasse der Fahrerinformation, auf den sich der Hauptteil der Arbeit bezieht, wurden in Kapitel 4 Dienste an lokalen Zugangsknoten und Fahrzeugsteuerung als weitere Applikationsklassen genannt, sowie Netzwerkspiele und Sprachverbindungen als spezielle Dienste. Das Management mehrerer Dienste im Fahrzeug ist deshalb auch eine wichtige Aufgabe von CARISMA, die in Abschnitt 8.1 grob skizziert wird. Wie Fahrerinformationsdienste nicht die einzigen Dienste im Fahrzeugumfeld sind, so sind Ad-hoc Netze nicht der einzige drahtlose Übertragungsweg. Deshalb geht Abschnitt 8.2 noch kurz auf das Zusammenspiel des Ad-hoc Netzes mit anderen Netzen ein. Sowohl Dienstemanagement als auch das Management heterogener Netze fügt sich dabei einfach in die CARISMA Systemarchitektur ein. Beide Aspekte profitieren außerdem vom Situationsmanagement und dem Wissen über Zustand und Verhalten des Fahrzeug Ad-hoc Netzes.

8.1 Dienstemanagement

In diesem Abschnitt wird kurz auf das Dienstekonzept bei CARISMA eingegangen. In VANETS spielen dazu lokale Zugangsknoten bzw. feste Infostationen eine entscheidende Rolle. Dienste können aber nicht nur von Infostationen, sondern auch von anderen Fahrzeugen angeboten werden (Gura et al. beschreiben z.B. eine Live-WebCam der Verkehrssituation vor einem LKW [71]). Notwendige Voraussetzung für die Nutzung dezentral angebotener Dienste ist ein Service Discovery Mechanismus. Bei CARISMA werden die entdeckten Dienste situationsbezogen gefiltert, wenn sie eine Beschreibung der Situationen enthalten, für die sie nützlich sind. Zusätzlich werden sie nach ihren QoS Anforderungen gefiltert, falls der Zugangsknoten nur über Zwischenhops erreicht wird.

Alle existierenden Service Discovery Mechanismen stellen Information über verfügbare Dienste in besuchten, unbekanntem Netzumgebungen zur Verfügung (Bettstetter und Renner geben einen Überblick und einen Vergleich verschiedener Service Discovery Ansätze, unter anderem Jini¹, SLP² (Service Location Protocol), Salutation, UPnP (Universal Plug and Play) [19]). Sie nutzen gewöhnlich ein Dienstverzeichnis, bei dem sich verteilte Dienste registrieren. Einige arbeiten auch ohne ein solches Verzeichnis. Eine solche rein dezentrale Funktionalität ist für CARISMA Voraussetzung. Das CARISMA Service Discovery basiert auf dem Service Location Protocol (SLP).

Service Discovery bei CARISMA funktioniert über mehrere Hops. Stehen mehrere lokale Zugangsknoten und andere Netzteilnehmer als Diensteanbieter zur Verfügung, so integriert CARIS-

¹see <http://www.sun.com/Jini/>

²see <http://www.srvloc.org/>

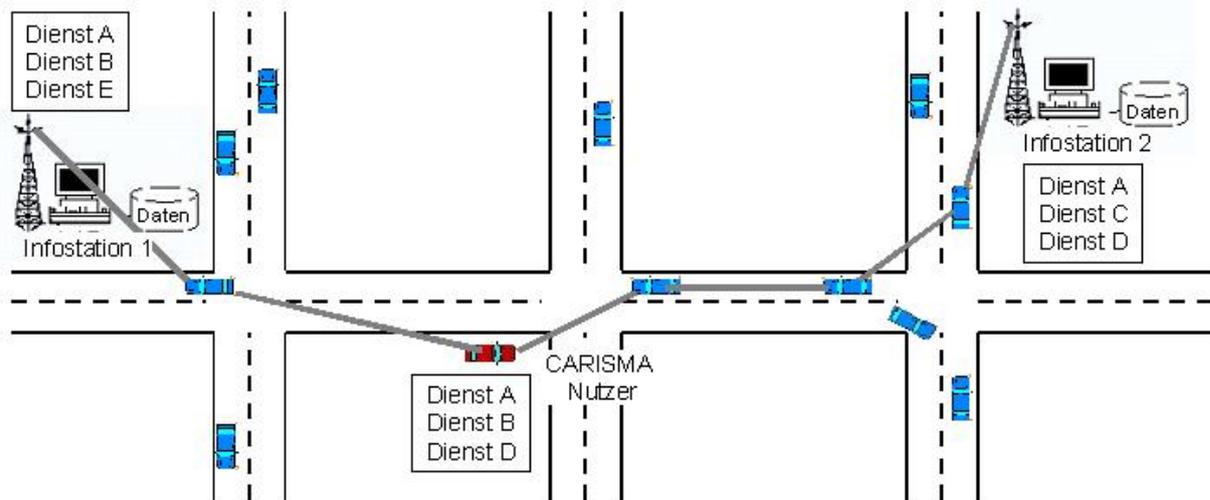


Abbildung 8.1: Situations- und QoS adaptives Service Discovery

MA das verteilte Angebot im lokalen Dienstebrowser (siehe Abbildung 8.1). Aufgrund der Interaktionsanforderungen bei der Dienstenutzung ist diese für den Fahrer für einige Dienste nur im Stand möglich. Der CARISMA Nutzer in der Abbildung parkt deshalb am Straßenrand. Diensteeigenschaften und QoS Anforderungen werden mittels Attributen beschrieben. CARISMA filtert die Dienste heraus, deren QoS Anforderungen nicht durch eine Multihop Verbindung garantiert werden können. Die Basis für die Beurteilung von Verbindungswahrscheinlichkeiten und Latenzzeiten wurden in Abschnitt 5.3 dargestellt. Bei mehrfach angebotenen Diensten wird derjenige ausgewählt, dessen Nutzen unter Berücksichtigung der Verbindungsgüte zur anbietenden Infostation am größten ist. In der Abbildung entdeckt der CARISMA Nutzer zwei Infostationen in seiner Umgebung. Zur linken besteht ein besserer Kontakt. Deshalb wird der Dienst A, den beide Stationen anbieten, von der linken Infostation ausgewählt. Die restlichen Dienste werden wie beschrieben ausgefiltert, so daß der Anwender im Fahrzeug ein integriertes Dienstangebot erhält.

8.2 Die Kombination mit zellularen und Broadcast-Netzen

Die CARISMA Systemarchitektur ermöglicht eine einfache Integration der Fahrzeug Ad-hoc Netze mit anderen drahtlosen Netzen. Die situationsbezogene Nutzenbewertung und Zwischenspeicherung von Information kann analog der über das Ad-hoc Netz bezogenen Information auch für Informationsobjekte verwendet werden, die über ein Broadcast Netz empfangen werden. Die netzunabhängige Bewertung und Integration übernimmt der Informationsagent. Der prinzipielle Ablauf in CARISMA zeigt Abbildung 8.2. Eingehende Informationsobjekte werden vom Informationsagenten entweder an eine Applikation weitergeleitet, im Informationsspeicher abgelegt oder verworfen, unabhängig davon, über welches Netz sie eingetroffen sind.

Der Kommunikationsagent bietet als Schnittstelle einen Virtuellen Socket. Über diesen virtuellen Socket werden Ein- und Ausgabeströme geöffnet, die an keine feste Netzschnittstelle gebunden sind. Der Kommunikationsagent wählt für angeforderte Verbindungen situativ die geeignete Netz-

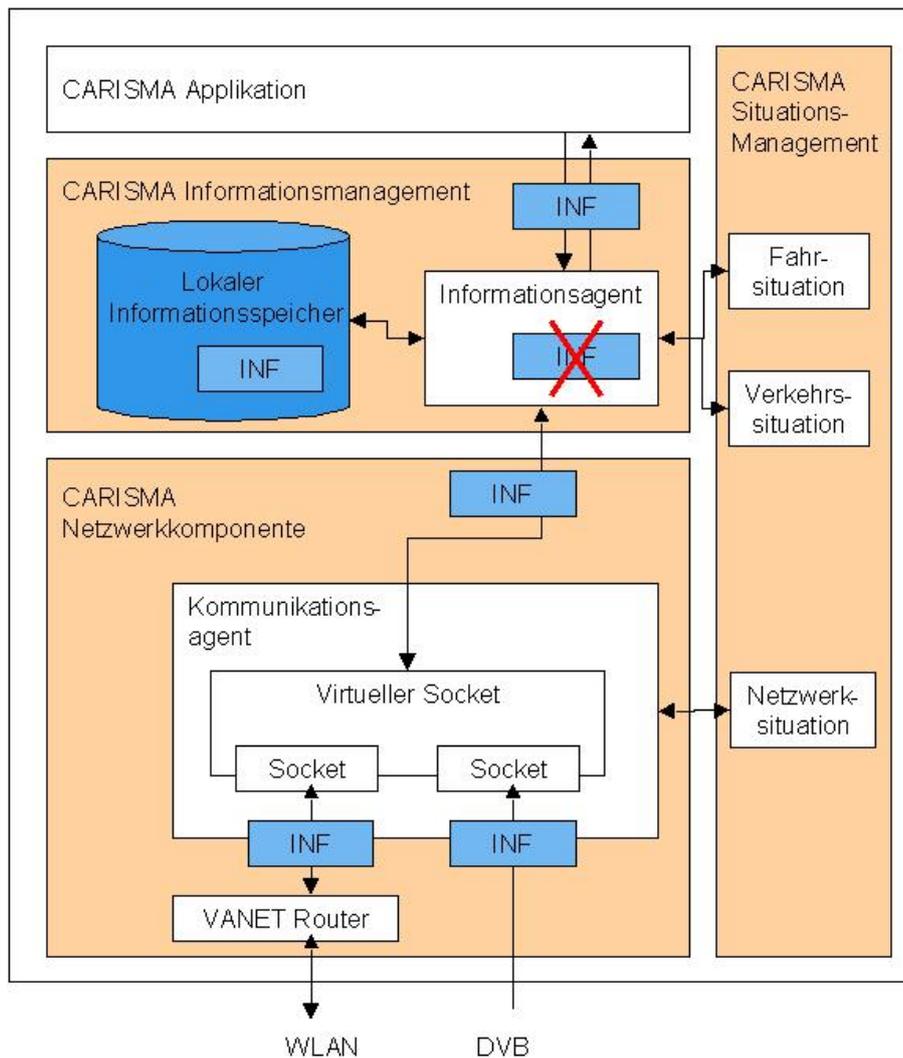


Abbildung 8.2: Netzwerkintegration

werkschnittstelle (z.B. WLAN oder UMTS). Er bedient sich dazu der Netzwerkinformation des Situationsmanagements, insbesondere zu über das VANET verfügbare Internet Zugangsknoten und die Verbindungsqualität zu diesen Stationen. Eine generische Netzschnittstelle, ein Verfahren zur adaptiven Wahl eines geeigneten Netzes und das Handover zwischen heterogenen Netzen anhand der Anforderungen der Anwendung, der Nutzerpräferenzen und der situativen Netzwerkeigenschaften auf der Basis der Nutzen- und Entscheidungstheorie beschreiben Liebl und Baumgarten [130, 131, 129]. Ein allgemeines Konzept für ein fahrzeugbasiertes Kommunikationsgateway stellen Kellerer et al. dar [94, 95].

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Kernergebnisse

Mit CARISMA wurde ein neuartiges Fahrerinformationssystem vorgestellt, das auf dem direkten Austausch von Informationen zwischen Verkehrsteilnehmern in einem sogenannten automobilen Ad-hoc Netz (VANET) beruht. Da Autofahrer wenig Möglichkeiten zur Interaktion besitzen, bewertet CARISMA den Nutzen von Informationen für den Fahrer selbständig. Die dazu notwendige situationsabhängige Nutzenbewertung von Informationen wurde als grundlegend neues Konzept für mobile intelligente Informationssysteme eingeführt. Orts- und Zeitbezüge von Informationen fließen dabei mit ein. Basierend auf dieser Bewertung wurde ein Modell für autonome nutzenoptimierende dezentrale Kommunikation vorgestellt. Elemente dieses Modells lassen sich auf viele andere Anwendungsbereiche übertragen. Über die Nutzenbewertung wird eine Entkopplung einzelner Aspekte wie Informationskategorie, Orts- und Zeitbezug von der Verarbeitung der Informationen erreicht. Informationen unterschiedlichen Typs können mittels gleicher Algorithmen zur Speicherung oder Übertragung ausgewählt werden. Neue Informationstypen lassen sich dem System einfach hinzufügen. Es werden lediglich die Funktionen zur Nutzenbewertung benötigt.

Die CARISMA Systemarchitektur als Grundlage und Rahmen zur Realisierung unterschiedlicher situationsadaptiver Anwendungen wurde in Kapitel 4 beschrieben. Die CARISMA Architektur kann als allgemeines Systemmodell für situationsadaptive dezentrale verteilte Informationssysteme dienen. In Kapitel 5 wurden wesentliche Ergebnisse für den Aufbau und Betrieb eines VANETS vorgestellt. Die Eignung des WLAN Standards IEEE802.11b wurde nachgewiesen. Das Verhalten hinsichtlich des Netzzusammenhangs bzw. der Konnektivität wurde analytisch und simulativ hergeleitet. Darauf aufbauend wurden Ergebnisse zum Verhalten bei der Verbreitung von Nachrichten in fragmentierten Netzen präsentiert. Aus diesen Ergebnissen lassen sich insbesondere kritische Fahrzeugdichten für die Anforderungen verschiedener Anwendungen ermitteln. Schließlich wurden die CARISMA Verfahren zur effizienten Verbreitung von Nachrichten und zum Aufbau von Punkt-zu-Punkt Verbindungen in VANETS beschrieben und ihr Verhalten simulativ evaluiert. Diese Routingalgorithmen bilden gemeinsam mit dem nutzenbezogenen Austausch von Informationen zwischen benachbarten Teilnehmern in fragmentierten Netzen und der impliziten adaptiven Ermittlung von Nachrichtenverbreitungsgebieten, wie sie in Kapitel 7 dokumentiert wurden, die wesentlichen VANET Kommunikationsmechanismen von CARISMA.

Kapitel 6 und 7 beschäftigten sich dann konzeptionell mit der situationsbezogenen Nutzenbewertung von Informationen und deren nutzenoptimierendem Austausch. Diese beiden Kapitel werfen dabei durch den grundlegend neuen Ansatz naturgemäß mehr Fragen auf als sie beantworten können. Die Einführung des Konzeptes der Informationsnutzenbewertung als Basis eines autonom funktionierenden mobilen verteilten Informationsnetzes konzentrierte sich deshalb im Rahmen dieser Arbeit auf die Zusammenhänge der damit verbundenen Aspekte, deren Strukturierung

und Analyse, und auf eine erste Näherung an Detailfragen. Zur Beantwortung der Fragen war häufig eine starke Simplifizierung notwendig. Diese ersten einfachen Modellierungsbruchstücke können vielleicht als Basis einer umfangreicheren Theorie gesehen werden. Detaillierte Analysen des Verhaltens einzelner Teile und Ausprägungen bleiben nachfolgenden Forschungsarbeiten vorbehalten.

9.2 Veröffentlichungen

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden vorab in verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht.

Der prinzipielle Einsatz von Ad-hoc Netzen zur Realisierung vorausschauender Systeme aus CARISMA Sicht wurde 2004 auf der *Tagung Fahrerassistenzsysteme* in Garching gesamthaft vorgestellt [107]. Die CARISMA Softwarearchitektur wurde am Beispiel der Anwendung der lokalen Gefahrenwarnung 2004 auf dem *Workshop on Intelligent Transportation Systems (WIT)* in Hamburg erläutert [109]. An diesem Beispiel wurden dort auch die Ergebnisse zur Nachrichtenlatenz in innerstädtischen VANETS beschrieben. Zuvor wurde die Architektur auf der *International Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)* 2002 in Orlando [13] und dem *Workshop on Multiradio Multimedia Communications (MMC)* 2003 in Dortmund [21] am Beispiel des virtuellen Stadtportals vorgestellt. Fahrzeugintegrations- und Fahrerinformationsaspekte waren wichtige Aspekte in einem Artikel beim ersten *Workshop für Artificial Intelligence in Mobile Systems (AIMS)* 2001 im Rahmen der *International Joint Conference on Artificial Intelligence* in Seattle [166].

Die Messergebnisse des Verhaltens von WLAN zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen wurden auf der *International Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* 2001 in Orlando präsentiert [110]. VANET-spezifische Herausforderungen für Routingverfahren und Erweiterungen des Routingprotokolls AODV um geographische Aspekte wurden in einem Artikel im *ACM Mobile Communications Review Magazine (MC²R)* im Juli 2002 publiziert [111] und beim *VDE Kongreß Networlds* 2002 in Dresden präsentiert [113]. Der Algorithmus zur effizienten Informationsverbreitung, d.h. zur Lösung des Broadcast Sturm Problems wurde 2004 im Rahmen des *World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)* veröffentlicht [108].

Eine erste Darstellung der interessen- bzw. nutzenorientierten Kommunikation wurde mit dem Konzept der interessensadaptiven Nachrichtenverbreitung auf der *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transport Systems* 2002 in Singapur kommuniziert [112]. Die Idee einer ortsbezogenen Speicherung von eher statischen Informationsobjekten in verschiedenem Detaillierungsgrad abhängig von ihrer Entfernung wurde unter dem Begriff des *Fisheye Network View* auf dem *World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)* 2002 in Chicago erstmals vorgestellt [22].

9.3 Offene Fragen und weitergehende Forschungsarbeiten

Wesentliches Ergebnis des Teils zur situationsadaptiven Kommunikation ist die grundlegende Darstellung des Zusammenhangs von Situation, Information und Kommunikation mit der Identifikation wesentlicher Systemeigenschaften. Dabei werden viele neue Problemstellungen herausgearbeitet. Dieser neue Ansatz wirft naturgemäß viele neue Fragen auf. Viele dieser Fragen werden diskutiert, aber nicht immer im Detail analysiert. Eine detaillierte Analyse dieser Probleme ist ein wichtiger Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsarbeiten.

Der in dieser Arbeit vorgestellte konzeptionelle Ansatz wurde aufgrund des sehr großen Aufwandes nicht vollständig simuliert. Die aufgebaute Simulationsumgebung kann jedoch als Basis für eine umfassendere simulative Analyse dienen. Sie ist um die rein konzeptionell vorgestellten situationsbezogenen Komponenten zu erweitern.

Konkret ergeben sich aus den verschiedenen behandelten Problemaspekten viele weiterführende Fragestellungen und offene Punkte. Beispielhaft seien hier aufgeführt

- Detailliertere Analyse der WLAN Charakteristiken bei Kommunikationsketten und wechselnden Kommunikationspartnern
- Effekt lokaler Zugangsstationen auf die Konnektivität und die Verbreitung von Informationen
- Verfahren zur automatisierten Klassifikation von Situationen
- Detailliert ausgearbeitetes Verfahren zur Zielortprädiktion
- Verfahren zum Erlernen des individuellen Informationsbedarfs in Abhängigkeit von Situationsparametern
- Detailliertere Analyse des Kapazitätsverbrauchs beim Austausch langfristig stabiler Informationsobjekte
- Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Anteil aller langfristig stabiler Informationsobjekte einer Zielzone auf dem Weg dorthin von Nachbarknoten zu erhalten
- Simulation nutzenoptimierender Verbreitungsverfahren im Vergleich zu einfachem Geocasting
- Nutzenoptimierendes Informationsaustauschprotokoll für drei und mehr benachbarte Teilnehmer
- Simulative Analyse des Verhaltens der Adaption von Informationsquelleninjektionsraten und Verbreitungsgebietsgrößen über Informationsnutzenschwellen
- Verfahren zur Adaption von Informationsnutzenschwellen in Abhängigkeit der Netzwerklast
- Entwurf und Simulation spezieller Anwendungsprotokolle, z.B. für Verkehrsnachrichten und Parkinformation

- Analyse kooperativen und nicht kooperativen Verhaltens der Teilnehmer bei Routing und Informationsaustausch
- Verfahren zur Gewährleistung der Privatsphäre bei gleichzeitiger Sicherstellung der Korrektheit und Authentizität kommunizierter Informationen
- Verfahren zur situationsabhängigen nutzenbezogenen autonomen Generierung von Anfragen

Nicht zuletzt wird ein Testbed mit vielen Fahrzeugen, trotz des damit verbundenen großen Aufwandes, für eine Validierung des Systemkonzepts als erforderlich angesehen.

9.4 Abschlußdiskussion

Für einige Applikationen und Informationstypen mag der nutzenbasierte Ansatz eine unnötige Komplexität mitbringen. Dies gilt vor allem für jene Anwendungen, bei denen der Nutzen und die Interessenten bereits zur Entwicklungszeit des Systems klar definiert sind und entweder nicht von Situationsfaktoren abhängen oder diese Situationsfaktoren klar determiniert und einfach sind. Ein Beispiel hierfür ist die Information über die Schaltungszeiten einer Ampel. Sie ist für alle Verkehrsteilnehmer interessant, die die Ampel überqueren wollen. Es ist auch klar, daß die Information nur in unmittelbarer Nähe relevant ist, so daß ein einfaches zyklisches Aussenden bis zu einer maximalen Entfernung hier ausreichend ist. Für Verkehrsinformationen im Vergleich dazu ist ein starres System, das sich nach genau vorgegebenen Parametern verhält, weniger geeignet. Der CARISMA Ansatz ermöglicht ein selbständiges nutzerbezogenes adaptives Systemverhalten. Anwendungen mit neuen Informationskategorien lassen sich leicht realisieren. Das System adaptiert sein Gesamtverhalten automatisch.

Ad-hoc Kommunikation wird nur ein Bestandteil des drahtlosen Datenaustausches von Automobilen in der Zukunft sein. Sie eignet sich, wie die Arbeit zeigt, besonders für den lokalen situativen Informationsaustausch. Darüber hinaus werden Automobile voraussichtlich mehrere Schnittstellen zu heterogenen Funknetzen besitzen. Diese werden sich weiterhin hinsichtlich ihrer Reichweite, Zuverlässigkeit, Datenrate, Kosten, notwendige Infrastruktur, Topologie etc. unterscheiden. Es ist zu erwarten, daß in Zukunft über ähnliche Konzepte wie das des Kommunikationsagenten aus Kapitel 8.2 eine abstrakte Netzschnittstelle verfügbar sein wird. Viele Anwendungen werden darauf aufsetzen und kommunizieren, ohne sich über die Nutzung eines bestimmten physikalischen Netzes bewußt zu sein. Nach Auffassung des Autors werden eine Reihe von Anwendungen mit besonderen Charakteristika aber im wesentlichen an bestimmte Netztypen gebunden bleiben. Auch falls sie alle einem Kommunikationsagenten ihre Kommunikationsanforderungen mitteilen, der ihnen geeignete physikalische Netzschnittstellen zuordnet, werden besondere Anforderungen in vielen Fällen auch weiterhin sinnvoll nur durch eines oder wenige darauf spezialisierte Netze erfüllt werden. Die statische Zuweisung von Kommunikationskanälen wird sich nach Ansicht des Autors aber zu einer dynamischen, verteilten, situationsbezogenen Kooperation von Anwendungs-, System- und Netzkomponenten weiterentwickeln.

Daß die Nutzung von Mobiltelefonen beim Autofahren das Unfallrisiko erhöht, wurde von Redelmeier und Tibshirani nachgewiesen [165]. Es gibt jedoch nur eine dem Autor bekannte Studie,

die den Einfluss der Nutzung anderer Informations- und Kommunikationssysteme im Auto untersuchen [189]. Aufgrund der Erfahrung mit den Mobiltelefonen ist eine besondere Sensibilität hinsichtlich der Effekte anderer, potentiell ablenkender Systeme angebracht. CARISMA basierte Informationssysteme liefern insbesondere fahr- und sicherheitsrelevante Informationen für den Fahrer. Die Art und Weise der Weitergabe dieser Information an den Fahrer ist für den Erfolg entscheidend. Der Autor wünscht sich, daß CARISMA in Zukunft einen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses und generell für verbesserte nutzerorientierte flexible mobile Informationssysteme leisten können wird.

9.5 Schlußbemerkung

Die Ergebnisse dieser Arbeit wird der Autor in ein neues Forschungsprojekt *Network On Wheels* einbringen, an dessen Vorbereitung und Definition der Autor beteiligt war. Ziel des Projektes ist ein erster herstellerübergreifender Prototyp zur Realisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation. Zusätzlich zu diesem Projekt wurde ein europäisches Standardisierungsgremium gegründet, das die herstellerübergreifende Standardisierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationsprotokolle zum Ziel hat, das *Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC)*. Der Autor ist Leiter der Architekturgruppe dieses Konsortiums, die neben der Systemarchitektur für die Koordination der Arbeitsgruppen der physikalischen und MAC-Schicht, Netzwerkschicht und Datensicherheit zuständig ist. Daneben ist der Autor beteiligt an drei weiteren neuen Forschungsprojekten, die den Einsatz der VANET Kommunikation zur Verbesserung der Sicherheit an Kreuzungen, zur lokalen Gefahrenwarnung und zur Stauvermeidung und -auflösung auf Autobahnen zum Ziel haben.

Anhang A

Abkürzungen

ABAM	On-demand Associativity-based Multicast Routing
ABR	Associativity-Based Routing
ACC	Active Cruise Control
AMRIS	Ad-Hoc Multicast Routing Protocol
AMRoute	Ad hoc Multicast Routing Protocol
AMTICS	Advanced Mobile Traffic Information and Communication System
AODV	Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing
BSP	Broadcast Storm Problem
CAMP	Core-Assisted Mesh Protocol
CAN	Controller Area Network
CARISMA	Car Information System based on Mobile Ad-hoc Networking
CBRP	Cluster Based Routing Protocol
CGSR	Clusterhead Gateway Switch Routing
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
COM	Component Object Model
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
DAB	Digital Audio Broadcast
DARPA	Defense Advanced Research Project Agency
DCMP	Dynamic Core Based Multicast Routing Protocol
DRIVE	Dedicated Road In-VEhicle Safety
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DS/SS	Direct Sequence / Spread Spectrum
DVB	Digital Video Broadcast
ERP	Electronic Road Pricing
FCC	Federal Communications Commission ¹
FGR	Furthest Georelation
FH/SS	Frequency Hopping / Spread Spectrum
FSR	Fisheye State Routing
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile Communication

¹

GSR	Global State Routing
HSR	Hierarchical State Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
KFZ	Kraftfahrzeug
LAR	Location Aided Routing
LOS	Line of Sight
LRU	Least Recently Used
LRUC	Least Recently Used Category
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MCDS	Minimum Connected Dominating Set
MOM	Message Oriented Middleware
MOST	Media Oriented Systems Transport
NGSF	Neighbourhood Greedy Street Forwarding
NREP	Neighbour Reply
NREQ	Neighbour Request
ODMRP	On-Demand Multicast Routing Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
OTS	Oldest Timestamp
PAN	Personal Area Network
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PKW	Personenkraftwagen
PRNet	Packet Radio Network
PAR	Publish / Accept / Relay
QoS	Quality of Service
QoI	Quality of Information
RACS	Road/Automobile Communication System
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RERR	Route Error
RTS/CTS	Request To Send/Clear To Send
SLP	Service Location Protocol
SMS	Short Message Service
SSR	Signal Stability Routing
TCP	Transport Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TMC	Traffic Message Channel
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPnP	Universal Plug'n'Play
UTRA TDD	UMTS Terrestrial Radio Access Time Division Duplex
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle

VANET	Vehicle Ad Hoc Network
VCP	Virtual City Portal
VICS	Vehicle Information and Communication System
VoIP	Voice over IP
WGSF	Wait Greedy Street Forwarding
WLAN	Wireless Local Area Network
WRP	Wireless Routing Protocol
(X)FCD	(Extended) Floating Car Data
ZHLS	Zone-based Hierarchical Link State Routing
ZRP	Zone Routing Protocol

Anhang B

Der Netzwerksimulator GloMoSim

GloMoSim wurde an der University of California at Los Angeles entwickelt. Er basiert auf dem diskreten parallelen Ereignissimulator PARSEC. Die aktuell in GloMoSim implementierten Protokolle sind der folgenden Tabelle B.1 zu entnehmen.

Netzwerkschicht	Implementierte Protokolle
Mobilität	Random Waypoint, Random Drunken, Trace File
Radio Propagation	Two Ray, Free Space
Radio Model	Noise Accumulating
Paketempfangsmodelle	SNR bounded, BER based with BPSK/QPSK Modulation
Data Link (MAC)	CSMA, IEEE802.11, MACA
Netzwerk (Routing)	IP mit Bellman-Ford, AODV, DSR, Fisheye, weitere
Transport	TCP, UDP
Anwendungen	Constant Bit Rate, FTP, HTTP, Telnet

Tabelle B.1: Protokollübersicht GloMoSim

Anhang C

Das Shapefile Datenformat

Das ESRI Shapefile Format [2] dient der Speicherung geographischer Daten in vektorieller Form. So können bebaute Flächen, Flussläufe oder auch Straßennetze im Shapefile Format codiert werden. Dazu werden verschiedene Datentypen, sogenannte Shapetypen, unterstützt. Zur Repräsentation von Straßennetzen eignet sich beispielsweise der Shapetyp *Polyline*. Eine Polyline besteht aus einer Menge von Kanten, die wiederum aus einer oder mehreren Teilen besteht, die ihrerseits eine Sequenz von Punkten enthalten. Diese Teile können verbunden sein oder sich schneiden:

```
PolyLine
{
Double[4]          Box          // Bounding Box als XMin, YMin, XMax, YMax
Integer           NumParts     // Anzahl Teile der Polyline
Integer           NumPoints    // Gesamtzahl Punkte
Integer[NumParts] Parts       // Index des ersten Punktes eines Teils
Point[NumPoints]  Points      // Punkte für alle Teile
}
```

Eine Straße wird in diesem Format als Folge von Punkten modelliert, besteht also aus linearen Teilstücken. Krümmungsinformation ist nicht vorhanden. Es ist möglich, Information über die Anzahl Fahrspuren, deren Breite oder die jeweils zulässige Höchstgeschwindigkeit im Shapefile Format zu codieren. Die dieser Arbeit vorliegenden Datensätze enthielten diese Information jedoch nicht.

Zur Speicherung von Attributen wird eine Datenbankdatei im dBase Tabellenformat (.dbf) verwendet. Um den Bezug zu den einzelnen geographischen Objekten herzustellen und um einen schnelleren Zugriff auf diese zu ermöglichen, wird eine Indexdatei (.shx) verwendet. Die geographischen Objekte sind hintereinander in einer eigenen Datei abgelegt (.shp).

Koordinaten von Punkten werden in Form von Längen- und Breitengraden angegeben. Es werden also Positionen auf einer Kugeloberfläche beschrieben. Da Positionen in GloMoSim in Form kartesischer Koordinaten verarbeitet werden, wurden für die Simulation die Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten umgerechnet.

Anhang D

Mobilitätsmodell: Geschwindigkeitsberechnung

Die Implementierung des Fahrzeugmobilitätsmodells arbeitet zeitdiskret in Schritten von einer Sekunde und ortskontinuierlich. Jede Sekunde wird für jedes Fahrzeug seine Geschwindigkeit neu berechnet. Alle Fahrzeuge bewegen sich nach der Berechnung zeitgleich um die zugehörig zurückgelegte Wegstrecke nach vorne. In die Berechnung der neuen Geschwindigkeit gehen die aktuelle Geschwindigkeit v , der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug g , die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs v_l , sowie die maximale Geschwindigkeit v_{max} , die maximale Beschleunigung a und die maximale Verzögerung b ein. Für alle Simulationen wurde $v_{max} = 18 \frac{m}{s}$, $a = 3 \frac{m}{s^2}$ und $b = 5 \frac{m}{s^2}$ gesetzt.

Fahrzeuge überholen einander nicht und fahren nicht auf ihre Vordermänner auf. Um dies zu vermeiden wird für die Berechnung der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs der kleinstmögliche Bremsweg g_l des vorausfahrenden Fahrzeugs benötigt. Setzt der Vordermann die maximale Verzögerung b ein, so beträgt seine Geschwindigkeit im folgenden Zeitschritt $v_l - b$. Benötigt er t_l Zeitschritte bis zum vollständigen Stillstand, dann beträgt seine Geschwindigkeit im letzten Schritt vor dem Stillstand $v_l - t_l b$. Da er linear verzögert, beträgt seine Durchschnittsgeschwindigkeit für die t_l Zeitschritte $v_l - 0.5b(t_l + 1)$. Daraus läßt sich sein kleinstmöglicher Bremsweg g_l bestimmen als

$$g_l = (v_l - 0.5b(t_l + 1))t_l$$

mit $t_l = \lfloor \frac{v_l}{b} \rfloor$.

Basierend auf diesem minimalen Bremsweg des Vordermannes kann die maximale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs berechnet werden, bei der es noch rechtzeitig hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug im Fall einer Vollbremsung zum Stillstand kommt. Diese Geschwindigkeit sei als sichere Geschwindigkeit v_{safe} bezeichnet. Der Bremsweg bei dieser Geschwindigkeit darf dann maximal genauso groß sein wie die Summe aus dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug g und dessen kleinstmöglichem Bremsweg g_l . Bezeichnet t die Zeit bis zum vollständigen Stillstand, dann gilt erneut für die Durchschnittsgeschwindigkeit über die t Zeitschritte $v - 0.5b(t + 1)$. Der Bremsweg ist dann entsprechend $(v - 0.5b(t + 1))t$. Die sichere Geschwindigkeit v_{safe} muß dann die folgende Bedingung erfüllen

$$\begin{aligned} (v_{safe} - 0.5b(t + 1))t &\leq g + g_l \\ \Leftrightarrow v_{safe}t - 0.5b(t + 1)t &\leq g + g_l \end{aligned}$$

mit $t = \lfloor \frac{v_{safe}}{b} \rfloor \Leftrightarrow v_{safe} = (t + 1) * b$ also

$$\begin{aligned} b(t + 1)t - 0.5b(t + 1)t &\leq g + g_l \\ \Leftrightarrow 0.5b(t + 1)t &\leq g + g_l \\ \Leftrightarrow t^2 + t - 2\frac{g + g_l}{b} &\leq 0 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow t \leq 0.5 \left\{ 1 + \sqrt{1 + 8 \frac{g + g_l}{b}} \right\}$$

Berücksichtigung der Ganzzahlbeschränkung führt zu

$$t = \lfloor 0.5 \left\{ 1 + \sqrt{1 + 8 \frac{g + g_l}{b}} \right\} \rfloor$$

Also ist der maximal sichere Wert v_{safe} für v

$$v_{safe} = \frac{g + g_l}{t} + 0.5b(t - 1)$$

$$\Leftrightarrow v_{safe} = \frac{g + g_l}{\lfloor 0.5 \left\{ 1 + \sqrt{1 + 8 \frac{g + g_l}{b}} \right\} \rfloor} + 0.5b(\lfloor 0.5 \left\{ 1 + \sqrt{1 + 8 \frac{g + g_l}{b}} \right\} \rfloor - 1)$$

Anhang E

Spezifikation der WLAN Fahrzeugantenne

Für die WLAN Übertragungsmessungen wurde eine omnidirektionale Fahrzeugantenne verwendet, die seitlich auf der Fahrerseite am Dach montiert wurde. Die wesentlichen Parameter können Tabelle E.1 entnommen werden. Abbildung E.1 zeigt ein Bild der Antenne, die Abbildungen E.2 und E.3 zeigen die horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik.

Antenne	
Frequenzbereich	2400 - 2500 MHz
Impedanz	50 Ohm
Antennengewinn	5 dBi +/- 1 dBi (ohne Kabel)
Polarisation	linear vertikal
Sendeleistung	bis 1 Watt ¹
Länge	25 cm
Kabel	
Attenuation	$\leq 3,5 dB$
Länge	2,5 m

Tabelle E.1: Antennenspezifikation



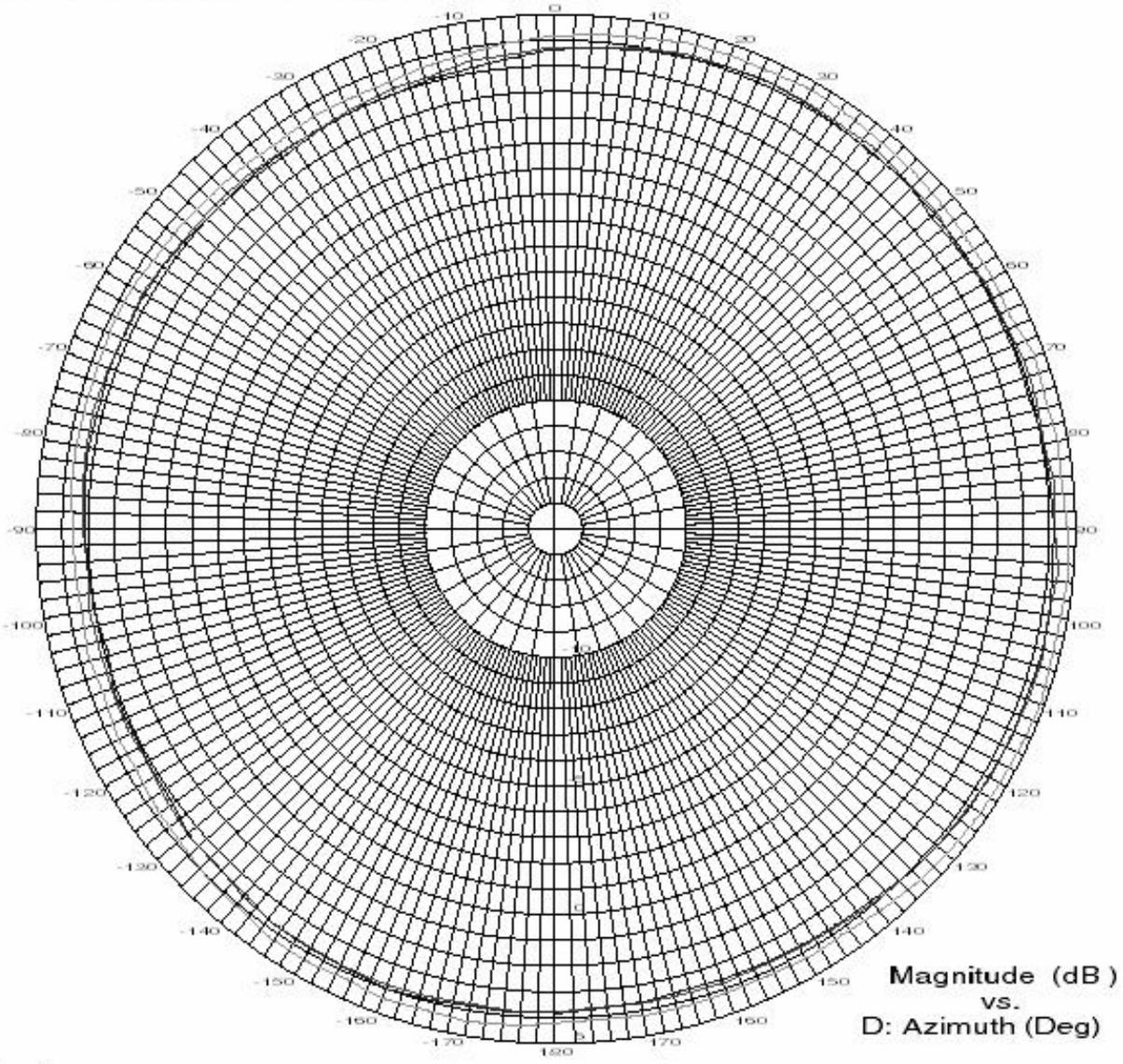
Abbildung E.1: Fahrzeugantenne

File: 5DBMOBOA.DAT
Date: 12-Oct-99
Time: 16:03
Operator: sc
Ser. no.: P1
Channel: QC B/R
Frequency: See Legend

Mobile, Gain Omni

Tx pol: Horiz. Rx pol: Horiz.
A: Elevation: -89.95 Deg

Calibration status:
File: 5DBMOBOA.DAT
Chan.:QC B/R
Table: emco-a-h
Units: dBi



Overlays
Frequency : 2.400 GHz —
Frequency : 2.441 GHz —
Frequency : 2.483 GHz —

Omni 5dBi Antenna horiz.

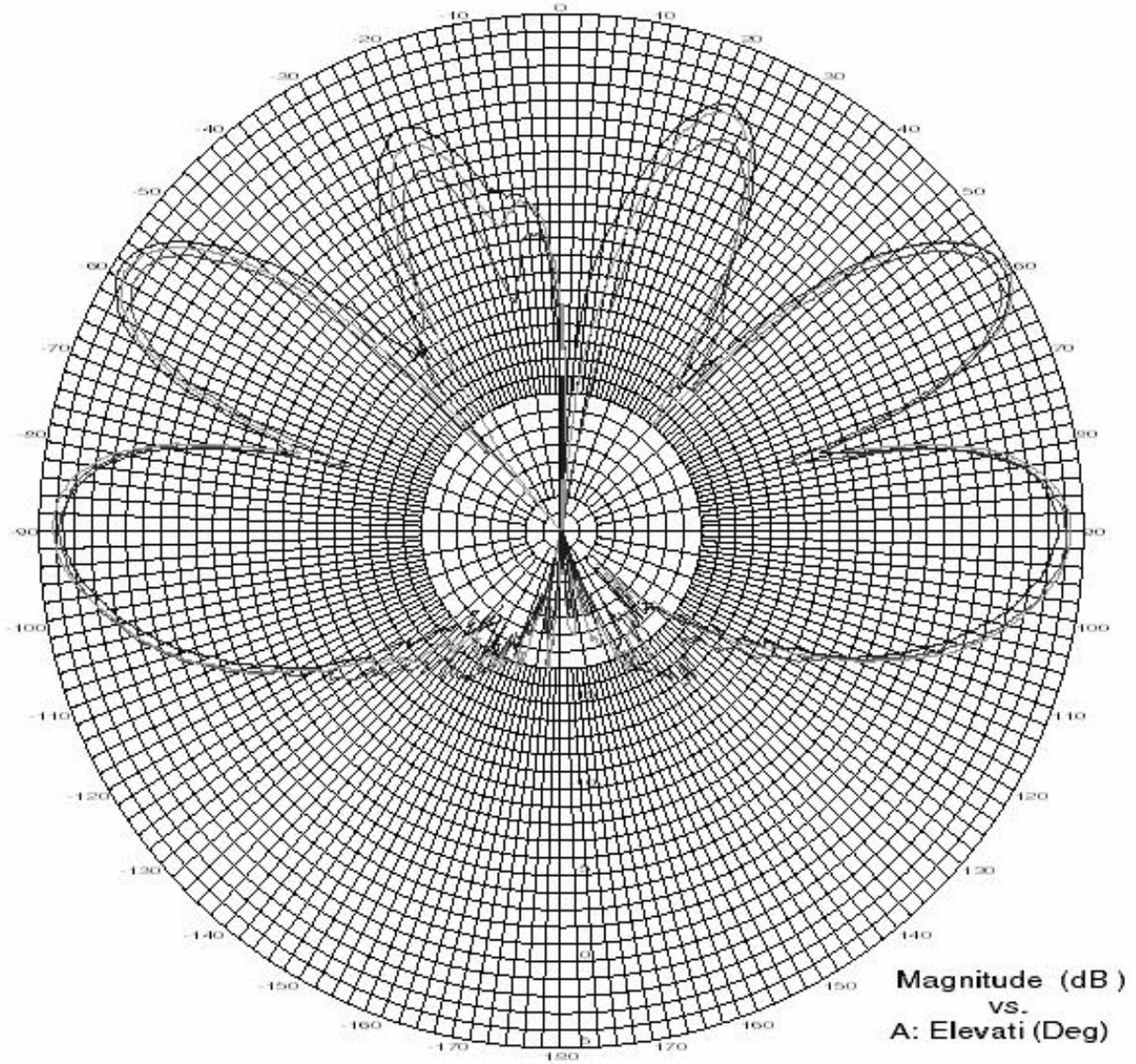
Abbildung E.2: Antennenabstrahlcharakteristik Horizontal

File: 5DBMOBOE.DAT
Date: 12-Oct-99
Time: 16:06
Operator: sc
Ser. no.: P1
Channel: OC B/R
Frequency: See Legend

Mobile, Gain Omni

Tx pol: Horiz. Rx pol: Horiz.
D: Azimuth : 0.04 Deg

Calibration status:
File: 5DBMOBOE.DAT
Chan.:OC B/R
Table: emco-a-h
Units: dBi



Overlays
Frequency : 2.400 GHz —
Frequency : 2.441 GHz - -
Frequency : 2.483 GHz . .

Magnitude (dB)
vs.
A: Elevati (Deg)

Omni 5 dBi vert.

Abbildung E.3: Antennenabstrahlcharakteristik Vertikal

Literaturverzeichnis

- [1] *Duden Fremdwörterbuch*. Dudenverlag.
- [2] *ESRI Shapefile Technical Description*. Whitepaper, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands (CA), USA, 1998.
- [3] *About GPS*, 2001. <http://www.garmin.com/aboutGPS/>.
- [4] ABRAMSSON, N.: *The ALOHA System - Another Alternative for Computer Communications*. In: *American Federation of Information Processing Societies (AFIPS) Conference Proceedings*, Band 37, Montvale (NJ), USA, 1970.
- [5] AFONSO, ANA PAULA und MARIO J. SILVA: *Dynamic Information Dissemination to Mobile Users*. In: *Proc. Mobility in Databases and Distributed Systems (MDDS)*, Florenz, Italien, September 1999.
- [6] AKSOY, DEMET und MICHAEL FRANKLIN: *Scheduling for Large-Scale On-Demand Data Broadcasting*. In: *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, San Francisco (CA), USA, März 1998.
- [7] AOKI, MASAYOSHI und HARUKI FUJII: *Inter-vehicle communication: Technical Issues on Vehicle Control Application*. *IEEE Communications Magazine*, 34(10):90–93, Oktober 1996.
- [8] ASHER, HARRY J. und BERNARD A. GALLER: *Collision Warning in a Mix of Equipped and Unequipped Vehicles*. In: *Proceedings of the Fourth World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Berlin, Deutschland, Oktober 1997.
- [9] BACON, JEAN, JOHN BATES, RICHARD HAYTON und KEN MOODY: *Using Events to Build Distributed Applications*. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Services in Distributed and Networked Environments (SDNE)*, Whistler (BC), Kanada, Juni 1995.
- [10] BAGRODIA, RAJIVE, RICHARD MEYER, MINEO TAKAI, YU-AN CHEN, XIANG ZENG, JAY MARTIN und HA YOON SONG: *Parsec: A Parallel Simulation Environment for Complex Systems*. *IEEE Computer Magazine*, 31(10):77–85, Oktober 1998.
- [11] BANAVAR, GURUDUTH, TUSHAR DEEPAK CHANDRA, BODHI MUKHERJEE, JAY NAGARAJARAO, ROBERT E. STROM und DANIEL C. STURMAN: *An Efficient Multicast Protocol for Content-based Publish-Subscribe Systems*. In: *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Austin (TX), USA, Mai 1999.

- [12] BAR-YEHUDA, REUVEN, ODED GOLDREICH und ALON ITAI: *On the Time-Complexity of Broadcast in Multi-Hop Radio Networks: An Exponential Gap Between Determinism and Randomization*. *Journal of Computer and System Sciences*, 45(1):104–126, 1992.
- [13] BAUCH, MONIKA, THOMAS REICHER, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL, PETER STIES und TIMO KOSCH: *SOFTNET: Service Engineering for Soft Networking*. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, Orlando (FL), USA, Juli 2002.
- [14] BENNETT, CHARLES H.: *Dissipation, Information, Computational Complexity and the Definition of Organisation*. In: PINES, DAVID (Herausgeber): *Merging Syntheses of Science*. Addison-Wesley, Redwood City (CA), USA, 1988.
- [15] BERGER, TORSTEN, PETER BORT und DIRK JOHN: *Verteilte Systeme im Kraftfahrzeug*. *it+ti*, 41:7–11, 1999.
- [16] BETTSTETTER, CHRISTIAN: *Toward Internet-Based Car Communications: On Some System Architecture and Protocol Aspects*. In: *Proceedings of the Sixth EUNICE Open European Summer School*, Twente, Niederlande, September 2000.
- [17] BETTSTETTER, CHRISTIAN: *Smooth is Better than Sharp: A Random Mobility Model for Simulation of Wireless Networks*. In: *Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, Rom, Italien, Juli 2001.
- [18] BETTSTETTER, CHRISTIAN: *On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Lausanne, Schweiz, Juni 2002.
- [19] BETTSTETTER, CHRISTIAN und CHRISTOPH RENNER: *A Comparison of Service Discovery Protocols and Implementation of the Service Location Protocol*. In: *Proceedings of the Sixth EUNICE Open European Summer School*, Twente, Niederlande, September 2000.
- [20] BETTSTETTER, CHRISTIAN und CHRISTIAN WAGNER: *The Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model*. In: *Proceedings of the German Workshop on Mobile Ad-hoc Networks (WMAN)*, Ulm, Deutschland, März 2002.
- [21] BOGENBERGER, RICHARD, WOLFGANG KELLERER, TIMO KOSCH, THOMAS REICHER, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL, PETER STIES und MATHIAS WAGNER: *Virtual City Portal - A Multi-Network Personal Information Systems for Automobile Users*. In: *Proceedings of the IEEE/ITG Workshop on Multiradio Multimedia Communications, Communication Technology for Vehicles (MMC)*, Dortmund, Deutschland, Februar 2003.
- [22] BOGENBERGER, RICHARD und TIMO KOSCH: *Ad-hoc Peer-to-Peer Communication-Webs on the Street*. In: *Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Chicago (IL), USA, Oktober 2002.
- [23] BOLENG, JEFF, TRACY CAMP und VISHY TOLETY: *Mesh-based Geocast Routing Protocols in an Ad-hoc Network*. In: *Proceedings of the Workshop on Parallel and Distributed*

- Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, San Francisco (CA), USA, April 2001.
- [24] BORGHOFF, UWE M. und JOHANN SCHLICHTER: *Rechnergestützte Gruppenarbeit - Eine Einführung in Verteilte Anwendungen*. Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1998.
- [25] BRAESS, HANS-HERMANN: *PROMETHEUS, Contribution to a Comprehensive Concept for Future Road Traffic*. In: PAUWELUSSEN, J.P. und H.B. PACEJKA (Herausgeber): *Smart Vehicles*. Swets & Zeitlinger, Lisse, Niederlande, 1995.
- [26] BRIESEMEISTER, LINDA: *Group Membership and Communication in Highly Mobile Ad Hoc Networks*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland, 2001.
- [27] BRIESEMEISTER, LINDA und GÜNTER HOMMEL: *Overcoming Fragmentation in Mobile Ad Hoc Networks*. *Journal of Communications and Networks*, 2(3):182–187, September 2000.
- [28] BRIESEMEISTER, LINDA und GÜNTER HOMMEL: *Role-Based Multicast in Highly Mobile but Sparsely Connected Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [29] BRIESEMEISTER, LINDA und GÜNTER HOMMEL: *Integrating Simple yet Robust Protocol Layers for Wireless Ad Hoc Intervehicle Communications*. In: *Proceedings of the Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (CNDS)*, San Antonio (TX), USA, Januar 2002.
- [30] BRIESEMEISTER, LINDA, LORENZ SCHÄFERS und GÜNTER HOMMEL: *Disseminating Messages among Highly Mobile Hosts based on Inter-Vehicle Communication*. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Dearborn (MI), USA, Oktober 2000.
- [31] BRUSCHI, DANILO und MASSIMILIANO DEL PINTO: *Lower Bounds for the Broadcast Problem in Mobile Radio Networks*. *Distributed Computing*, 10(3):129–135, 1997.
- [32] BYERS, JOHN, MICHAEL LUBY und MICHAEL MITZENMACHER: *Accessing Multiple Mirror Sites in Parallel: Using Tornado Codes to Speedup Downloads*. In: *Proceedings of the 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, New York (NY), USA, März 1999.
- [33] CAPKUN, SRDAN, MAHER HAMDI und JEAN-PIERRE HUBAUX: *GPS-Free Positioning in Mobile ad-hoc Networks*. In: *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Maui (Hawaii), USA, Januar 2001.
- [34] CARZANIGA, ANTONIO, DAVID S. ROSENBLUM und ALEXANDER L. WOLF: *Interfaces and Algorithms for a Wide-area Event Notification Service*. Technischer Bericht CU-CS-888-99, University of Colorado, Department of Computer Science, Oktober 1999.
- [35] CARZANIGA, ANTONIO, DAVID S. ROSENBLUM und ALEXANDER L. WOLF: *Content-Based Addressing and Routing: A General Model and its Application*. Technischer Bericht CU-CS-902-00, University of Colorado, Department of Computer Science, Januar 2000.

- [36] CHEN, TSU-WEI und MARIO GERLA: *Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Atlanta (GA), USA, Juni 1998.
- [37] CHEN, XIANGCHUAN und AMY L. MURPHY: *Enabling Disconnected Transitive Communication in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC)*, Newport (Rhode Island), USA, August 2001.
- [38] CHEVREUIL, MARTIAL: *IVHW: An Inter-vehicle Hazard Warning System Concept within the DEUFRAKO program*. In: *Proceedings of the e-Safety Congress and Exhibition*, Lyon, France, November 2002.
- [39] CHIANG, CHING-CHUAN: *Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel*. In: *Proceedings of the IEEE Singapore International Conference on Networks (SICON)*, Singapur, April 1997.
- [40] CHLAMTAC, IMRICH und SHAY KUTTEN: *Tree-based Broadcasting in Multihop Radio Networks*. *IEEE Transactions on Computing*, C-36(10):1209–1223, Oktober 1987.
- [41] CLEMENTI, ANDREA E.F., ANGELO MONTI und RICCARDO SILVESTRI: *Distributed Multi-Broadcast in Unknown Radio Networks*. In: *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC)*, Newport (Rhode Island), USA, August 2001.
- [42] CLEMENTI, ANDREA E.F., PAOLO PENNA und RICCARDO SILVESTRI: *The Power Range Assignment Problem in Radio Networks on the Plane*. In: *Proceedings of the 27th Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS)*, Band 1770 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*. Springer, 2000.
- [43] COWELL, ROBERT G., A. PHILIP DAWID, STEFFEN L. LAURITZEN und DAVID J. SPIEGELHALTER: *Probabilistic Networks and Expert Systems*. Springer-Verlag, New York (NY), USA, 1999.
- [44] CSEH, CHRISTIAN, REINHOLD EBERHARDT und WALTER FRANZ: *Mobile Ad-Hoc Funknetze für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation*. In: *Tagungsband 1. Deutscher Workshop über Mobile Ad Hoc Netze (WMAN)*, Ulm, Deutschland, März 2002.
- [45] CUGOLA, GIANPAOLO, ELISABETTA DI NITTO und ALFONSO FUGGETTA: *The JEDI Event-based Infrastructure and its Application to the Development of the OPSS WFMS*. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 27(9):827–850, September 2001.
- [46] DABBOUS, WALID und CHRISTIAN HUITEMA: *PROMETHEUS: Vehicle to Vehicle Communications*. Research Report, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Sophia Antipolis, Frankreich, August 1988.
- [47] DANA, PETER H.: *Global Positioning System Overview*, 2000. <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>.

- [48] DAR, SHAUL, MICHAEL J. FRANKLIN, BJÖRN T. JÓNSSON, DIVESH SRIVASTAVA und MICHAEL TAN: *Semantic Data Caching and Replacement*. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Very Large Data Bases (VLDB)*, Mumbai (Bombay), Indien, September 1996.
- [49] DAS, SUBIR KUMAR, B. S. MANOJ und C. SIVA RAM MURTHY: *Dynamic Core Based Multicast Routing Protocol (DCMP)*. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Lausanne, Schweiz, Juni 2002.
- [50] DEGAUQUE, PIERRE und MARTINE LIENARD: *Introduction to Mobile Communication*. In: PAUWELUSSEN, J.P. und H.B. PACEJKA (Herausgeber): *Smart Vehicles*, Seiten 98–110. Swets & Zeitlinger, Lisse, Niederlande, 1995.
- [51] DEMERS, ALAN, DAN GREENE, CARL HAUSER, WES IRISH, JOHN LARSON, SCOTT SHENKCR, HOWARD STURGIS, DAN SWINEHART und DOUG TERRY: *Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance*. In: *Proceedings of the Sixth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC)*, Vancouver (BC), Kanada, August 1987.
- [52] DEMERS, ALAN, SRINIVASAN KESHAV und SCOTT SHENKER: *Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm*. *Journal of Internet Research and Experience*, 1(1):3–26, September 1990.
- [53] DIESTEL, REINHARD: *Graph Theory*. Springer-Verlag, 1997.
- [54] DOMSCHKE, WOLFGANG und ANDREAS DREXL: *Einführung in Operations Research*. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 1990.
- [55] DOUSSE, OLIVIER, PATRICK THIRAN und MARTIN HASLER: *Connectivity in Ad-hoc and Hybrid Networks*. In: *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom)*, New York (NY), USA, Juni 2002.
- [56] DUBE, ROHIT, CYNTHIA D. RAIS, KUANG-YEH WANG und SATISH K. TRIPATHI: *Signal Stability Based Adaptive Routing for Ad Hoc Mobile Networks*. *IEEE Personal Communications Magazine*, Seiten 36–45, Februar 1997.
- [57] EBERSPÄCHER, JÖRG, HANS-JÖRG VÖGEL und CHRISTIAN BETTSTETTER: *GSM - Global System for Mobile Communication. Vermittlung, Dienste und Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen*. Teubner Verlag, Stuttgart, Deutschland, 2001.
- [58] EBNER, ANDRE, HERMANN ROHLING, RÜDIGER HALFMANN und MATTHIAS LOTT: *Synchronization In Ad Hoc Networks Based On UTRA TDD*. In: *Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Lissabon, Portugal, September 2002.
- [59] EICHLER, STEPHAN, FLORIAN DÖTZER, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL, JAVIER FABRA und JÖRG EBERSPÄCHER: *Secure Routing in a Vehicular Ad Hoc Network*. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Los Angeles (CA), USA, September 2004.

- [60] FASTENMEIER, WOLFGANG, GÜNTER REICHART und RUDOLF HALLER: *Welche Informationen brauchen Fahrer wirklich ?* In: *VDI-Berichte Nr. 948*, Seiten 15–33. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland, 1992.
- [61] FÜSSLER, HOLGER, HANNES HARTENSTEIN, MICHAEL KÄSEMANN und MARTIN MAUVE: *Analysis of a Location Service for Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Tagungsband 1. Deutscher Workshop über Mobile Ad Hoc Netze (WMAN)*, Ulm, Deutschland, März 2002.
- [62] FÜSSLER, HOLGER, JÖRG WIDMER, MARTIN MAUVE und HANNES HARTENSTEIN: *A Novel Forwarding Paradigm for Position-Based Routing (with Implicit Addressing)*. In: *Proceedings of the IEEE 18th Annual Workshop on Computer Communications (CCW)*, Dana Point (CA), USA, Oktober 2003.
- [63] FRANZ, WALTER, HANNES HARTENSTEIN und BERND BOCHOW: *Internet on the Road via Inter-Vehicle Communications*. In: BAUKNECHT, KURT, WILFRIED BRAUER und THOMAS A. MÜCK (Herausgeber): *Tagungsband der GI/OCG-Jahrestagung, Informatik 2001: Wirtschaft und Wissenschaft in der Network Economy - Visionen und Wirklichkeit, Mobile Communications over Wireless LAN: Research and Applications*. Österreichische Computer Gesellschaft (OCG), Wien, Österreich, September 2001.
- [64] GANESAN, DEEPAK, BHASKAR KRISHNAMACHARI, ALEC WOO, DAVID GULLER, DEBORAH ESTRIN und STEPHEN WICKER: *An Empirical Study of Epidemic Algorithms in Large Scale Multihop Wireless Networks*. Technischer Bericht IRB-TR-02-003, Intel Research, Berkeley (CA), USA, März 2002.
- [65] GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J. und EWERTON L. MADRUGA: *The Core Assisted Mesh Protocol (CAMP)*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Ad-Hoc Networks, 17:1380–1394, August 1999.
- [66] GAUS, HERMANN: *Aufstieg zur Schlüsseltechnologie*. *Automobil Elektronik*, Seiten 10–14, Oktober 1998.
- [67] GEHRING, OTTMAR und HANS FRITZ: *Practical Results of a Longitudinal Control Concept for Truck Platooning with Vehicle to Vehicle Communication*. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Boston (MA), USA, November 1997.
- [68] GOEL, SIDDHARTA K., MANISH SINGH, DONGYAN XU und BAOCHUN LI: *Efficient Peer-to-Peer Data Dissemination in Mobile Ad-Hoc Networks*. In: *Proceedings of the International Workshop on Ad Hoc Networking (IWAHN)*, Vancouver (BC), Kanada, August 2002.
- [69] GUPTA, PIYUSH und PANGANMALA R. KUMAR: *Critical Power for Asymptotic Connectivity in Wireless Networks*. In: MCENEANY, W.M., G. YIN und Q. ZHANG (Herausgeber): *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications.*, Seiten 547–566. Birkhäuser, Boston (MA), USA, 1998.
- [70] GUPTA, PIYUSH und PANGANMALA R. KUMAR: *The Capacity of Wireless Networks*. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404, März 2000.

- [71] GURA, NILS, ALBERT HELD und JÖRG KAISER: *Proactive Services in a Distributed Traffic Telematics Application*. In: BAUKNECHT, KURT, WILFRIED BRAUER und THOMAS A. MÜCK (Herausgeber): *Tagungsband der GI/OCG-Jahrestagung, Informatik 2001: Wirtschaft und Wissenschaft in der Network Economy - Visionen und Wirklichkeit, Mobile Communications over Wireless LAN: Research and Applications*, Wien, Österreich, September 2001.
- [72] GUÉRIN, ROCH A.: *Channel Occupancy Time Distribution in a Cellular Radio System*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 36(3):89–99, 1987.
- [73] HAAS, ZYGMUNT J.: *A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks*. In: *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications*, Seiten 562–566, San Diego (CA), USA, Oktober 1997.
- [74] HARTENSTEIN, HANNES, BERND BOCHOW, ANDRE EBNER, MATTHIAS LOTT, MARKUS RADIMIRSCH und DIETER VOLLMER: *Position-Aware Ad Hoc Wireless Networks for Inter-Vehicle Communications: the Fleetnet Project*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Long Beach (CA), USA, Oktober 2001.
- [75] HEDETNIEMI, SANDRA, STEPHEN HEDETNIEMI und ARTHUR LIESTMAN: *A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks*. Networks, 18:319–349, 1988.
- [76] HIGHTOWER, JEFFREY und GAETANO BORRIELLO: *A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing*. Technical Report UW-CSE 01-08-03, University of Washington, Computer Science and Engineering, Seattle (WA), USA, 2001.
- [77] HOOEY, B. L. und B. F. GORE: *Development of Human Factors Guidelines for Advanced Traveler Information Systems and Commercial Vehicle Operations: Head-up Displays and Driver Attention for Navigation Information*. Technischer Bericht, Federal Highway Administration, Washington (DC), USA, 1998.
- [78] HUBAUX, JEAN PIERRE, JEAN-YVES LE BOUDEC, THOMAS GROSS und MARTIN VETTERLI: *Towards Self-Organizing Mobile Ad-Hoc Networks: the Terminodes Project*. IEEE Communications Magazine, 39(1):118–124, Januar 2001.
- [79] HUBER, WERNER, MICHAEL LÄDKE und RAINER OGGER: *Extended Floating Car Data for the Acquisition of Traffic Information*. In: *Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Toronto (OT), Kanada, November 1999.
- [80] IMIELINSKI, TOMASZ und JULIO C. NAVAS: *GPS-based Geographic Addressing, Routing and Resource Discovery*. Communications of the ACM, 42(4):86–92, 1999.
- [81] INC., SUN MICROSYSTEMS: *Jini Distributed Event Specification*, 1999.
- [82] INTANAGONWIWAT, CHALERMEK, RAMESH GOVINDAN und DEBORAH ESTRIN: *Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks*. In: *Proceedings of the Sixth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Boston (MA), USA, August 2000.

- [83] IWATA, ATSUSHI, CHING-CHUAN CHIANG, GUANGYU PEI, MARIO GERLA und TSU-WEI CHEN: *Scalable Routing Strategies for Ad Hoc Wireless Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Special Issue on Ad-Hoc Networks), Seiten 1369–1379, August 1999.
- [84] JENSEN, FINN V.: *An Introduction to Bayesian Networks*. UCL Press Ltd., London, UK, 1996.
- [85] JIANG, MINGLIANG, JINYANG LI und Y.C. TAY: *Cluster Based Routing Protocol*. IETF Draft, August 1999.
- [86] JOA-NG, MARIO und I-TAI LU: *A Peer-to-Peer Zone-based Two-level Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad Hoc Networks:1415–1425, August 1999.
- [87] JOHNSON, DAVID B. und DAVIS A. MALTZ: *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Networks*. In: IMIELINSKI, T. und H. KORTH (Herausgeber): *Mobile Computing*, Seiten 152–181. Kluwer, 1996.
- [88] JUBIN, JOHN und JANET D. TORNOW: *The DARPA Packet Radio Network Protocol*. Proceedings of the IEEE, Special Issue on Packet Radio Networks, 75(1):21–32, Januar 1987.
- [89] JUNGNICHEL, DIETER: *Graphs, Networks and Algorithms*. Springer-Verlag, 3rd Auflage, 1999.
- [90] KAHN, ROBERT E.: *The Organization of Computer Resources into a Packet Radio Network*. IEEE Transactions on Communication, COM-25:169–178, Januar 1977.
- [91] KAPLAN, ELLIOTT D. (Herausgeber): *Understanding the GPS: Principles and Applications*. Artech House Publishers, Boston (MA), USA, 1996.
- [92] KARP, BRAD und H.T. KUNG: *GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks*. In: *Proceedings of the Sixth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [93] KATO, AKIHITO, TETSUO HORIMATSU und MASAYUKI FUJISE: *Experimental Investigation for Inter-Vehicle-Communication System Using Millimeter Wave*. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Turin, Italien, November 2000.
- [94] KELLERER, WOLFGANG, CHRISTIAN BETTSTETTER, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL, PETER STIES, KARL-ERNST STEINBERG und HANS-JÖRG VÖGEL: *(Auto) Mobile Communication in a Heterogeneous and Converged World, Special Issue on European R&D on Fourth-Generation Mobile and Wireless IP Networks*. IEEE Personal Communications Magazine, 8(6):41–47, Dezember 2001.
- [95] KELLERER, WOLFGANG, HANS-JÖRG VÖGEL und KARL-ERNST STEINBERG: *A Communication Gateway for Infrastructure Independent 4G Wireless Access*. IEEE Communications Magazine, 9(3), März 2002.

- [96] KEMPE, DAVID, JON KLEINBERG und ALAN DEMERS: *Spatial Gossip and Resource Location Protocols*. In: *Proceedings of the 33rd ACM Symposium on Theory of Computing (STOC)*, Heraklion (Kreta), Griechenland, Juli 2001.
- [97] KEMPE, DAVID, JON KLEINBERG und AMIT KUMAR: *Connectivity and Inference Problems for Temporal Networks*. In: *Proceedings of the 32nd ACM Symposium on Theory of Computing (STOC)*, Portland (OR), USA, 2000.
- [98] KEVIN B. KORB, ANN E. NICHOLSON: *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall / CRC Press, Boca Raton (FL), USA, 2003.
- [99] KLAR, AXEL, R. D. KÜHNE und R. WEGENER: *Mathematical Models for Vehicular Traffic*. *Surveys on Mathematics for Industry*, 6(3):215–226, 1996.
- [100] KÖNIG, RAINER und CHRISTIAN THIEL: *Media Oriented Systems Transport (MOST) - Standard für Multimedia Networking im Fahrzeug*. *it+ti*, 41:36–42, 1999.
- [101] KO, YOUNG-BAE und NITIN H. VAIDYA: *Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Fourth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Dallas (TX), USA, Oktober 1998.
- [102] KO, YOUNG-BAE und NITIN H. VAIDYA: *Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms*. In: *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, New Orleans (LA), USA, Februar 1999.
- [103] KO, YOUNG-BAE und NITIN H. VAIDYA: *GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Network Protocols (ICNP)*, Osaka, Japan, November 2000.
- [104] KOCH, MICHAEL: *Kollaboratives Filtern*. In: SCHWABE, GERHARD, NORBERT STREITZ und RAINER UNLAND (Herausgeber): *CSCW-Kompendium*, Seiten 351–357. Springer Verlag, Berlin, Deutschland, 2001.
- [105] KOCH, MICHAEL, GEORG GROH und CHRISTIAN HILLEBRAND: *Mobile Communities: Extending Online Communities into the Real World*. In: *Proceedings of the Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*, Dallas (TX), USA, August 2002.
- [106] KOCH, MICHAEL und JOHANN SCHLICHTER: *Ubiquitous Computing*. In: SCHWABE, GERHARD, NORBERT STREITZ und RAINER UNLAND (Herausgeber): *CSCW-Kompendium*, Seiten 507–517, Berlin, Deutschland, 2001. Springer Verlag.
- [107] KOSCH, TIMO: *Den Horizont der Fahrerassistenz erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-hoc Vernetzung*. In: *Tagungsband der Fachtagung Fahrerassistenzsysteme*, Garching, Deutschland, März 2004.
- [108] KOSCH, TIMO: *Efficient Information Dissemination in Vehicle Ad-hoc Networks*. In: *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Nagoya, Japan, Oktober 2004.

- [109] KOSCH, TIMO: *Local Danger Warning based on Vehicle Ad-hoc Networks: Prototype and Simulation*. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Deutschland, März 2004.
- [110] KOSCH, TIMO und CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL: *Mobile Ad Hoc Networking Tested for Vehicle-to-Vehicle Communication*. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, Orlando (FL), USA, Juli 2001.
- [111] KOSCH, TIMO und CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL: *Geocast Enhancements for AODV in Vehicular Networks*. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6:96–97, Juli 2002.
- [112] KOSCH, TIMO, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL und LI AI: *Information Dissemination in Multihop Inter-Vehicle Networks - Adapting the Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)*. In: *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Singapur, September 2002.
- [113] KOSCH, TIMO, CHRISTIAN SCHWINGENSCHLÖGL und CHRISTIAN BETTSTETTER: *Situative IP-basierte Fahrerinformationssysteme: Szenarien, Routing und prototypische Realisierung*. In: *Tagungsband der ITG-Fachtagung 'Technologien und Anwendungen für die mobile Informationsgesellschaft'*, VDE Kongress *Networks*, Dresden, Deutschland, Oktober 2002.
- [114] KRAUSS, STEFAN: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Doktorarbeit, Universität Köln, 1998.
- [115] KRISHNAMACHARI, BHASKAR, STEPHEN B. WICKER und RÁMON BÉJAR: *Phase Transition Phenomena in Wireless Ad-Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Symposium of Ad-hoc Wireless Networks, IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)*, San Antonio (TX), USA, November 2001.
- [116] KROH, RAINER, ALBERT HELD, MICHAEL ALDINGER, RALF KELLER, THORSTEN LOHMAR und ERNÖ KOVACS: *High-Quality Interactive and Broadband IP Services for the Vehicle on the Net - The COMCAR Approach*. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Turin, Italien, November 2000.
- [117] KUBACH, UWE und KURT ROTHERMEL: *Ein Hoarding-Verfahren für ortsbezogene Informationen*. *Informatik - Forschung und Entwicklung*, 16(4):189–199, 2001.
- [118] KUBACH, UWE und KURT ROTHERMEL: *Exploiting Location Information for Infostation-Based Hoarding*. In: *Proceedings of the 7th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Rom, Italien, Juli 2001.
- [119] KUBACH, UWE und KURT ROTHERMEL: *A Map-Based Hoarding Mechanism for Location-Dependent Information*. In: *Proceedings of the Second International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, Hong Kong, China, Januar 2001.
- [120] KULIK, JOANNA, WENDI RABINER HEINZELMAN und HARI BALAKRISHNAN: *Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks*. In: *Proceedings of*

- the Fifth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Seattle (USA), August 1999.
- [121] KWON, TAEK JIN und MARIO GERLA: *Efficient Flooding with Passive Clustering (PC) in Ad Hoc Networks*. ACM Computer Communication Review, 32(1), Januar 2002.
- [122] LAWRENZ, WOLFHARD: *CAN Controller Area Network. Grundlagen und Praxis*. Hüthig-Verlag, 4. Aufl. Auflage, 2000.
- [123] LEE, SUNG-JU, MARIO GERLA und CHING-CHUAN CHIANG: *On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)*. In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, New Orleans (LA), USA, September 1999.
- [124] LEI, ZHUYU und CHRISTOPHER ROSE: *Probability Criterion Based Location Tracking Approach for Mobility Management of Personal Communication Systems*. In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)*, Seiten 977–981, Phoenix (AZ), USA, November 1997.
- [125] LI, JINYANG, CHARLES BLAKE, DOUGLAS S.J. DE COUTO, HU IMM LEE und ROBERT MORRIS: *Capacity of Ad Hoc Wireless Networks*. In: *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Rom, Italien, Juli 2001.
- [126] LI, JINYANG, JOHN JANNOTTI, DOUGLAS S. J. DE COUTO, DAVID R. KARGER und ROBERT MORRIS: *A Scalable Location Service for Geographic Ad-hoc Routing*. In: *Proceedings of the Sixth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Boston (MA), USA, Oktober 2000.
- [127] LIAO, WEN-HWA, YU-CHEE TSENG, KUO-LUN LO und JANG-PING SHEU: *GeoGRID: A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based on GRID*. Journal of Internet Technology, 1(2):23–32, Dezember 2000.
- [128] LIAO, WEN-HWA, YU-CHEE TSENG und JANG-PING SHEU: *GRID: A Fully Location-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks*. Telecommunication Systems, 18(1):37–60, 2001.
- [129] LIEBL, WOLFGANG J.: *A Generic Interface for Uniform, User Transparent Access to Heterogeneous Wireless Networks*. In: INFORMATIK E. V., GESELLSCHAFT FÜR (Herausgeber): *Informatiktage 2000*. Konradin Verlag, Bad Schussenried, Deutschland, Oktober 2000.
- [130] LIEBL, WOLFGANG J.: *Optimale Kommunikation mobiler Systeme in heterogenen Funknetzen*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2002.
- [131] LIEBL, WOLFGANG J. und UWE BAUMGARTEN: *Handover and Network Selection Support by External (Non Radio) Information*. In: *Proceedings of the IP based Cellular Networks Conference (IPCN)*, Paris, Frankreich, Mai 2000.

- [132] LIM, HYOJUN und CHONGKWON KIM: *Multicast Tree Construction and Flooding in Wireless Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Third ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [133] LUCKY, ROBERT W.: *Connections*. IEEE Spectrum Magazine, 36(3):19, März 1999. Reflections Column.
- [134] MAFFEIS, SILVANO: *iBus: The Java Intranet Software Bus*. Technischer Bericht, SoftWired AG, Zürich, Schweiz, Februar 1997.
- [135] MANSOURI-SAMANI, MASOUD und MORRIS SLOMAN: *GEM: A Generalized Event Monitoring Language for Distributed Systems*. IEE/IOP/BCS Distributed Systems Engineering Journal, 4(2):96–108, Juni 1997.
- [136] MCDONALD, A. BRUCE und TAIEB ZNATI: *Link Availability Models for Mobile Ad-hoc Networks*. Technischer Bericht TR 99-07, Department of Computer Science, University of Pittsburgh, 1999.
- [137] MEHL, HORST: *Mobilfunktechnologien in der Verkehrstelematik*. Informatik-Spektrum, 19(4):182–190, 1996.
- [138] MEIER, RENÉ und VINNY CAHILL: *Taxonomy of Distributed Event-Based Programming Systems*. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems: International Workshop on Distributed Event-Based Systems (ICDCS/DEBS'02)*, Wien, Österreich, Juli 2002.
- [139] MENON, A.P.G. und CHIN KIAN KEONG: *The Making of Singapore's Electronic Road Pricing System*. In: *Proceedings of the International Conference on Transportation into the Next Millenium*, Singapur, September 1998.
- [140] MICHAEL, LACHLAN B., NOBUTERU AKASHI, NOBUYOSHI FUJIMOTO, MASAO NAKAGAWA, KIYOHITO TOKUDA und KIYOSHI MIZUI: *DS/SS Inter-Vehicle Communication Experiments in 2.4 GHz ISM Band*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles (IV)*, Stuttgart, Deutschland, Oktober 1998.
- [141] MICHAEL, LACHLAN B. und NAKAGAWA MASAO: *Smart Intersections Using DS/SS CD-MA Vehicle-Road Communication*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles (IV)*, Stuttgart, Deutschland, Oktober 1998.
- [142] MIYATAKE, HIDETAKA, TOMOKAZU TAMAKI und TADAMITSU IRITANI: *Prevention Method of Head-on Collision Using Inter-Vehicle Communication in VHF Region*. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Turin, Italien, November 2000.
- [143] MONSON-HAEFEL, RICHARD und DAVID CHAPPELL: *Java Message Service*. O'Reilly, 1. Aufl. Auflage, 2000.
- [144] MORGENSTERN, OSKAR und JOHN VON NEUMANN: *A Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press, Princeton (NJ), USA, 1944.

- [145] MORRIS, ROBERT, JOHN JANNOTTI, FRANS KAASHOEK, JINYANG LI und DOUGLAS DECOUTO: *CarNet: A Scalable Ad Hoc Wireless Network System*. In: *Proceedings of the 9th ACM SIGOPS European Workshop: Beyond the PC: New Challenges for the Operating System*, Kolding, Dänemark, September 2000.
- [146] MURTHY, SHREE und J.J. GARCIA-LUNA-ACEVES: *An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks*. *ACM Mobile Networks and Applications Journal*, Special Issue on Routing in Mobile Communication Networks:183–197, Oktober 1996.
- [147] NAGEL, KAI und MICHAEL SCHRECKENBERG: *A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic*. *Journal de Physique I*, Seiten 2221–2229, 1992.
- [148] NAVAS, JULIO C. und TOMASZ IMIELINSKI: *Geocast - Geographic Addressing and Routing*. In: *Proceedings of the Third ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Budapest, Ungarn, September 1997.
- [149] NI, SZE-YAO, YU-CHEE TSENG, YUH-SHYAN CHEN und JANG-PING SHEU: *The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network*. In: *Proceedings of the Fifth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Seattle (WA), USA, August 1999.
- [150] OHTOMO, MASAYA, RYOUJI KIMURA, SHIGEKI FUKUSHIMA und NOBORU FUJII: *Automatic Following System Utilizing Vehicle-to-Vehicle Communication*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles (IV)*, Stuttgart, Deutschland, Oktober 1998.
- [151] (OMG), OBJECT MANAGEMENT GROUP: *CORBAServices: Common Object Services Specification - Notification Service Specification*. Version 1.0, 2000.
- [152] PAGNANI, E. und G.P.ROSSI: *Providing Reliable and Fault Tolerant Broadcast Delivery in Mobile Ad-Hoc Networks*. *Mobile Networks and Applications*, 5(4):175–192, 1999.
- [153] PAPADOPOULI, MARIA und HENNING SCHULZRINNE: *Seven Degrees of Separation in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)*, San Francisco (CA), USA, November 2000.
- [154] PAPADOPOULI, MARIA und HENNING SCHULZRINNE: *Design and Implementation of a Peer-to-Peer Data Dissemination and Prefetching Tool for Mobile Users*. In: *Proceedings of the First NY Metro Area Networking Workshop*, IBM TJ Watson Research Center, Hawthorne, New York (NY), USA, März 2001.
- [155] PAPADOPOULI, MARIA und HENNING SCHULZRINNE: *Effects of Power Conservation, Wireless Coverage and Cooperation on Data Dissemination among Mobile Devices*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Long Beach (CA), USA, Oktober 2001.
- [156] PARK, VINCENT D. und M. SCOTT CORSON: *A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks*. In: *Proceedings of the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, Kobe, Japan, April 1997.

- [157] PASTERKAMP, WIM R. und HANS B. PACEJKA: *The Tire as a Sensor to Estimate Friction*. *Vehicle Systems Dynamics*, 29:409–422, 1997.
- [158] PEI, GUANGYU, MARIO GERLA und TSU-WEI CHEN: *Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, New Orleans (LA), USA, Juni 2000.
- [159] PENG, WEI und XICHENG LU: *Efficient Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks Using Connected Dominating Sets*. *Journal of Software*, 1999.
- [160] PENG, WEI und XICHENG LU: *On the Reduction of Broadcast Redundancy in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [161] PENG, WEI und XICHENG LU: *AHBP: An Efficient Broadcast Protocol for Mobile Ad Hoc Networks*. *Journal of Computer Science and Technology*, 16(2):114–125, März 2001.
- [162] PERKINS, CHARLES E. und PRAVIN BHAGWAT: *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*. *ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (SIGCOMM)*, August/September 1994.
- [163] PERKINS, CHARLES E. und ELIZABETH M. ROYER: *Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, New Orleans (LA), USA, Februar 1999.
- [164] QUAYYUM, AMIR, LAURENT VIENNOT und ANIS LAOUITI: *Multipoint Relaying: An Efficient Technique for Flooding in Mobile Wireless Networks*. *Rapport de Recherche 3898*, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA), März 2000.
- [165] REDELMEIER, DONALD A. und ROBERT J. TIBSHIRANI: *Association between Cellular-Telephone Calls and Motor Vehicle Collisions*. *The New England Journal of Medicine*, 336(7), Februar 1997.
- [166] REICHER, THOMAS und TIMO KOSCH: *Software Design Issues for Experimentation in Ubiquitous Computing*. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence: Second Workshop on Artificial Intelligence in Mobile Systems (IJCAI/AIMS)*, Seattle (WA), USA, 2001.
- [167] REN, QUN und MARGARET H. DUNHAM: *Using Semantic Caching to Manage Location Dependent Data in Mobile Computing*. In: *Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [168] RESNICK, PAUL, NEOPHYTOS IACOVOU, MITESH SUCHAK, PETER BERGSTROM und JOHN RIEDL: *GroupLens: An Open Architecture for Collaborative Filtering of Netnews*. In: *Proceedings of the Conference on Computer Supported Cooperative Work*, Chapel Hill (NC), USA, Oktober 1994.

- [169] ROBERTS, LAWRENCE G.: *Extensions of Packet Communication Technology to a Hand-Held Personal Terminal*. In: *American Federation of Information Processing Societies (AFIPS) Conference Proceedings*, Band 40, Seiten 295–298, Atlantic City (NJ), USA, Mai 1972.
- [170] ROYER, ELIZABETH M. und CHARLES R. PERKINS: *Multicast Operation of the Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol*. In: *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Seattle (WA), USA, August 1999.
- [171] SANTI, PAOLO, DOUGLAS M. BLOUGH und FEODOR VAINSTEIN: *A Probabilistic Analysis for the Range Assignment Problem in Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Long Beach (CA), USA, Oktober 2001.
- [172] SATYANARAYANAN, MAHADEV, JAMES J. KISTLER und ELLEN H. SIEGEL: *Coda: A Resilient Distributed File System*. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Workstation Operating Systems*, Cambridge (MA), USA, November 1987.
- [173] SCHARF, DIETMAR und RUDOLPH BAYER: *CoPark - ein mobiler datenbankbasierter Dienst und ein neuartiges Konzept zur Parkraumbewirtschaftung in Ballungszentren*. In: *Tagungsband zum Workshop Mobile Datenbanken und Informationssysteme*, Magdeburg, Deutschland, März 2002.
- [174] SCHILIT, BILL N.: *System Architecture for Context-Aware Mobile Computing*. Doktorarbeit, Columbia University, New York (NY), USA, 1995.
- [175] SCHLICHTER, JOHANN: *Software Architectures for Cooperative Systems*. *ACM SIGOIS Bulletin*, 15(3):34–35, April 1995.
- [176] SCHULZ, WINFRIED: *Die Konstruktion von Realität in den Nachrichtenmedien*. Alber, Freiburg/München, 1976.
- [177] SCHULZE, MATTHIAS: *Die elektronische Deichsel - ein zukunftsweisendes Fahrerassistenzsystem*. In: *Tagungsband zum Internationalen Verkehrssymposium*, Villach, Österreich, 2000.
- [178] SEDDIGH, MAHTAB, JULIO SOLANO GONZALEZ und IVAN STOJMENOVIC: *RNG and Internal Node Based Broadcasting Algorithms in Wireless One-to-one Networks*. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 5(2):394–397, 2001.
- [179] SEGALL, BILL und DAVID ARNOLD: *Elvin Has Left the Building: A Publish/Subscribe Notification Service with Quenching*. In: *Proceedings of the Australian UNIX and Open Systems Users Group (AUUG) Annual Conference*, Brisbane, Australien, September 1997.
- [180] SILVESTER, JOHN A. und LEONARD KLEINROCK: *On the Capacity of Multihop Slotted ALOHA Networks with Regular Structure*. *IEEE Transactions on Communications*, COM-31(8):974–982, August 1983.

- [181] SÁNCHEZ, MIGUEL, PIETRO MANZONI und ZYGMUNT HAAS: *Determination of Critical Transmission Range in Ad-Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Multiaccess Mobility and Teletraffic for Wireless Communications Workshop (MMT)*, Venedig, Italien, Oktober 1999.
- [182] STOJMENOVIC, IVAN: *Home Agent Based Location Update and Destination Search Schemes in Ad Hoc Wireless Networks*. Technical Report TR-99-10, University of Ottawa, September 1999.
- [183] STOJMENOVIC, IVAN und XU LIN: *GEDIR: Loopfree Location Based Routing in Wireless Networks*, November 1999.
- [184] STOJMENOVIC, IVAN und MAHTAB SEDDIGH: *Internal Nodes Based Broadcasting Algorithms in Wireless Networks*. In: *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Maui (Hawaii), USA, Januar 2001.
- [185] SUCEC, JOHN und IVAN MARSIC: *An Efficient Distributed Network-Wide Broadcast Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks*. Center for Advanced Information Processing (CAIP) Technical Report 248, Rutgers University, September 2000.
- [186] TAKADA, K., Y. TANAKA, A. IGARASHI und D.FUJITA: *Road/Automobile Communication System and its Economic Effect*. In: *Proceedings of the IEEE Vehicle Navigation and Information System Conference*, Toronto, Kanada, September 1989.
- [187] TANK, TUSHAR und JEAN-PAUL M.G. LINNARTZ: *Vehicle-to-Vehicle Communications for AVCS Platooning*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 46(2):528–536, Mai 1997.
- [188] TIAN, JING, JÖRG HÄHNER, CHRISTIAN BECKER, ILLYA STEPANOV und KURT ROTHERMEL: *Graph-based Mobility Model for Mobile Ad Hoc Network Simulation*. In: *Proceedings of the Annual Simulation Symposium (ANSS)*, San Diego (CA), USA, April 2002.
- [189] TIJERINA, LOUIS: *Issues in the Evaluation of Driver Distraction Associated with In-Vehicle Information and Telecommunications Systems*. Internet Forum on Driver Distraction, US Department of Transportation NHTSA: <http://www.driverdistraction.org>, 2000.
- [190] TOH, CHAI-KEONG: *A Novel Distributed Routing Protocol to Support Ad Hoc Mobile Computing*. In: *Proceedings of the 15th IEEE Annual International Phoenix Conference on Computing and Communications*, Phoenix (AZ), USA, März 1996.
- [191] TOH, CHAI-KEONG, GUILLERMO GUICHAL und SANTITHORN BUNCHUA: *On-demand Associativity-based Multicast Routing for Ad hoc Mobile Networks (ABAM)*. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Boston (MA), USA, September 2000.
- [192] TSUZAWA, MASAMI und HIROYUKI OKAMOTO: *Advanced Mobile Traffic Information and Communication System - AMTICS*. In: *Proceedings of the IEEE Vehicle Navigation and Information System Conference*, Toronto, Kanada, September 1989.

- [193] ULABY, FAWWAZ T., RICHARD K. MOORE und ADRIAN K. FUNG: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume 3: From Theory to Application*. Artech House Publishers, Norwood (MA), USA, 1986.
- [194] VAHDAT, AMIN und DAVID BECKER: *Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks*. Technical Report CS-2000-06, University of California at San Diego, San Diego (CA), USA, Juli 2000.
- [195] WAHRIG-BURFEIND, RENATE (Herausgeber): *Wahrig Fremdwörterlexikon*. Deutscher Taschenbuch Verlag (dtv), München, Deutschland, 1999.
- [196] WALKER, J.: *DRIVE, PROMETHEUS and GSM*. In: *Proceedings of the Conference on Mobile Radio Technology, Marketing and Management (COMEX)*, London, UK, 1992.
- [197] WEISER, MARK: *The Computer for the Twenty-First Century*. Scientific American, September 1991.
- [198] WIDODO, ARI und TAKA AKI HASEGAWA: *An Autonomous Distributed Inter-Vehicle Communication Network Using Multicode Sense CDMA*. In: *Proceedings of the International Symposium On Spread Spectrum Techniques And Applications (ISSSTA)*, Sun City, Südafrika, September 1998.
- [199] WILLIAMS, BRAD und TRACY CAMP: *Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Lausanne, Schweiz, Juni 2002.
- [200] WIT, CARLOS CANUDAS DE und PANAGIOTIS TSIOTRAS: *Dynamic Tire Friction Models for Vehicle Traction Control*. In: *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix (AZ), USA, Dezember 1999.
- [201] WRAY, MIKE und RYCHARDE HAWKES: *Distributed Virtual Environments and VRML: an Event-based Architecture*. In: *Proceedings of the 7th International WWW Conference (WWW7)*, Brisbane, Australien, April 1998.
- [202] WU, CHUN-WEI und Y.C. TAY: *Ad hoc Multicast Routing Protocol Utilising Increasing ID-Numbers (AMRIS)*. In: *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, Atlantic City (NJ), USA, November 1999.
- [203] XIE, JASON, RAJESH R. TALPADE, ANTHONY MCAULEY und MINGYAN LIU: *AMRoute: Ad hoc Multicast Routing Protocol*. ACM Mobile Networks and Applications (MONET), 7(6):429–439, Dezember 2002.
- [204] XU, QING, K. HEDRICK, RAJA SENGUPTA und J. VAN DER WERF: *Effects of Vehicle-Vehicle Roadside-Vehicle Communication on Adaptive Cruise Controlled Highways*. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Vancouver (BC), Kanada, September 2002.

- [205] XU, QING, TONY MAK, JEFF KO und RAJA SENGUPTA: *MAC Protocol Design for Vehicle Safety Communications in Dedicated Short Range Communications Spectrum*. In: *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington (DC), USA, Oktober 2004.
- [206] XUE, FENG und PANGANMALA R. KUMAR: *The Number of Neighbours Needed for Connectivity of Wireless Networks*. *ACM Wireless Networks*, 10(2):169–181, März 2004.
- [207] YE, TAO, HANS-ARNO JACOBSEN und RANDY H. KATZ: *Mobile Awareness in a Wide Area Wireless Network of Info-Stations*. In: *Proceedings of the Fourth ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Denver (CO), USA, September 1998.
- [208] ZADEH, LOTFI A.: *Fuzzy Sets*. *Information and Control*, 8(3):338–353, 1965.
- [209] ZENG, XIANG, RAJIVE BAGRODIA und MARIO GERLA: *GloMoSim: A Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks*. In: *Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS)*, Banff (AL), Kanada, Mai 1998.
- [210] ZHOU, HU und SURESH SINGH: *Content-based multicast (CBM) in ad hoc networks*. In: *Proceedings of the ACM/IEEE Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Boston (MA), USA, August 2000.
- [211] ZONOOZI, MAHMOOD M. und PREM DASSANAYAKE: *User Mobility Modeling and Characterization of Mobility Patterns*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 15(7):1239–1252, 1997.

Index

- Ad-hoc Netze, 17
- Adaption, 24
- Adressierung
 - Explizite, 153
 - Implizite, 153
 - Inhaltsbasierte, 153
- Adressierungsproblem, 150, 152
- Agenten, 19
- ALOHA Netzwerk, 17
- Aussagenlogik, 124
- Automated Highways, 33

- Bayes'sches Netz, 125
- Benachrichtigungssysteme
 - Publish/Accept/Relay, 150
 - Publish/Subscribe, 148, 153
- beobachtbar, 124
- Bluetooth, 60
- Broadcast Sturm, 103
- Broadcastnetze, 5

- Caching, 137
 - Semantisch, 137
- CAN, 2, 123
- Collaborative Filtering, 137
- CSMA/CA, 61
- CSMA/CD, 61

- Dedicated Short Range Communication, 33

- Ein-Hop-Kapazität, 144
- Electronic Road Pricing, 34
- Epidemische Algorithmen, 40

- Fahrtziel, 125
- Fahrzeug-Gateway, 123
- Fahrzeugbus, 123
 - CAN, 123
- Fisheye Netzblick, 143
- Floating Car Data, 44
- Forwarding Zone, 31

- Fragmentiertes Netz, 97
- Gebäudeabschirmfaktor, 83
- Geocast, 29
- Geocasting, 153
- GloMoSim, 96
- Gossiping, 40
- Graphentheoretische Modellierung, 67
- GSM, 3

- Hiperlan II, 60
- Hoarding, 40, 137
- Homogene Konnektivität, 91

- Information
 - dynamisch, 136
 - statisch, 136
- Informationsaustauschprotokoll
 - Angebotsvektor, 146
 - Beurteilungsphase, 145
 - Kennenlernphase, 145
 - Kooperationsphase, 145
 - Nachfragevektor, 146
- Informationskategorie, 127, 129
 - Altersnutzenkurve, 134
 - Ortsnutzenkurve, 132
 - Situationsbedingter Nutzenwert, 130
- Informationsnutzen
 - Fahrtzielkorrelation, 131
 - Fahrtzweckkorrelation, 131
- Informationsobjekt, 127
 - Detaillierungsgrad, 134
 - Medienformat, 134
 - Neuigkeitsgrad, 134
 - Nutzenwert, 128
 - Ortsbezug, 127
 - Wertigkeit, 128
 - Zeitbezug, 128
- Informationsspeicher, 137
 - Alterstabelle, 138
 - Entfernungstabelle, 138

- Ersetzungsstrategien
 - Furthest Georelation (FGR), 138
 - Lowest Information Benefit (LIB), 138
 - Oldest Timestamp (OTS), 138
- Heimatzone, 143
- Indextabelle, 138
- Kategorientabelle, 139
- Nutzenmaximierung, 141
- Nutzentabelle, 138
- Reisezone, 143
- Zielzone, 143

- Komplexität, 20
- Konnektivität, 76
 - Straßennetz, 77
- Kontext, 22
- Kontext-Sensitivität, 22

- Lenkradtasten, 123
- logische Tiefe, 20
- Lose gekoppeltes System, 36

- Messaging
 - Subskription, 155
- Minimum Connected Dominating Set (MCDS), 104
- Mobilitätsmodell, 70
 - Random Drunken Walk, 71
 - Random Waypoint, 71
- MOST, 2
- Multi-Hop Netze, 18
- Multicast
 - Inhaltsbasiertes, 150
 - Klassischer, 150
 - Situativer, 150
- Multicasting, 152

- Nachricht
 - Nutzenzuwachs, 137
- NGSF (Neighbourhood Greedy Street Forwarding), 106
- ns2, 97
- Nutzen
 - Nutzenbegriff, 129
 - Nutzenfunktion, 129
- Nutzenfunktion
 - positionsbezogene, 131
 - situationsbezogene, 131

- Optimierungsproblem
 - Knapsack-Problem, 146
 - Maximierung des Informationsnutzens, 146
- Ortsinformationsdienste, 29

- Packet Radio Netzwerk, 17
- Parsec, 96
- Personal Area Network, 18
- Pervasive Computing, 8
- Pikonetze, 60
- Platooning, 33
- Prefetching, 137
- PRNet, 17
- Publish/Subscribe
 - Inhaltsbasiert, 38
 - Kanalbasiert, 38
 - Subjektbasiert, 38

- Räumliche Heterogenität, 91
- Rice'sches Fadingmodell, 97
- Routingproblem, 150
- Routingverfahren
 - Anforderungsgetriebene, 27
 - AODV, 27
 - Distanzvektorverfahren, 27
 - Hybride, 28
 - Positionsbasierte, 28
 - Proaktive, 26
 - Reaktive, 27
 - Source Routing, 27
 - Tabellenbasierte, 26

- Scatternetze, 60
- Selbstorganisation, 19
- Sensitivität, 24
- Sensornetze, 69
- Service Discovery, 159
- Shapefile Datenformat, 73
- Situation, 23
 - definierende Variable, 124
 - Fahrtziel, 125
 - Fahrtzweck, 125
 - Grad des Überzeugtseins, 125

- Grad des Eingetretenseins, 125
- Unvereinbarkeit, 125
- Situationsadaptivität, 22
- Situationsadaptivitaet, 121
- Situationsagent, 122
- Situationsmodell, 122, 124
- Situationszustandsraum, 124
- Slotted Aloha, 17
- SLTF (Street Length Threshold Forwarding),
106
- sozialer Nutzen, 21
- Subjektivistischer Wahrscheinlichkeitsbegriff,
125
- Subskription
 - entfernte, 155
 - lokale, 155
- t-Erreichbarkeit, 93
- Temporale Graphen und Netze, 93
- TMC, 3
- Tornado-Coding, 146
- Ubiquitous Computing, 8
- Umweltvariable, 124
- UTRA TDD, 60
- VANET, 19
- Verbreitungszone, 31
- Verkehrsmodelle, 72
 - Krauß, 73
 - Makroskopische, 72
 - Mikroskopische, 72
 - Nagel-Schreckenberg, 73
- Versandbedingung, 151
- Versandproblem, 150, 151
- WGS84 Koordinatensystem, 128
- WGSF (Wait Greedy Street Forwarding), 106
- WLAN, 61
 - IEEE802.11, 61
- Zeitliche Heterogenität, 91
- Zeitrespektierende Kantenstaffel, 93
- Zeitrespektierender Weg, 93
- Zellulare Netze, 5, 8