

Kontextbereitstellung in Automobilen Ad-hoc Netzen

Dissertation

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

vorgelegt von
Markus Straßberger
geb. Dunst

Tag der Einreichung: 23. April 2007

Kontextbereitstellung in Automobilen Ad-hoc Netzen

Dissertation

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

vorgelegt von
Markus Straßberger
geb. Dunst

Tag der Einreichung: 23. April 2007
Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juni 2007

1. Berichterstatter: **Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien**,
Ludwig-Maximilians-Universität München
2. Berichterstatter: **Prof. Dr. Johann Schlichter**,
Technische Universität München

Zusammenfassung

Je detaillierter ein Fahrer über den Streckenabschnitt informiert ist, den er in naher Zukunft befahren wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er rechtzeitig und angemessen auf komplexe Verkehrssituationen reagiert. Die umfassende Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Kontextinformationen im Fahrzeug leistet vor diesem Hintergrund einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz.

Ziel dieser Arbeit ist eine zuverlässige Vorhersage der zukünftigen Fahrsituation auf Basis des gemeinschaftlich bekannten Wissens der Verkehrsteilnehmer. Dabei steht die Verwaltung ortsbezogener Kontextinformationen, die Fusion von verschiedenartigen Informationsquellen, sowie die Problematik der Verteilung der von den Fahrzeugen erzeugten Kontextinformationen über automobile Ad-hoc Netzen im Fokus der Arbeit.

Aufbauend auf einer formalen Lösungsspezifikation beschreibt die Arbeit einen zweistufigen Bewertungsprozess, der es erlaubt, auf Basis verteilter Sensorbeobachtungen unterschiedlicher Fahrzeuge ein Wahrscheinlichkeitsmaß für das Eintreten eines konkreten Zustands eines relevanten Fahrkontexts abzuleiten. Die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften des Kontextaspekts werden dabei gewichtet interpoliert. Anschließend werden auf Basis eines Bayesschen Netzes die kausalen Zusammenhänge unterschiedlicher Kontextaspekte quervalidiert.

Zudem wird aufgezeigt, wie Kontextinformationen zwischen Fahrzeugen in einem automobilen Ad-hoc Netzwerk ausgetauscht werden können. Das aus drahtgebundenen Netzen bekannte Konzept der Nutzenmaximierung des Netzwerks wird hierzu auf die speziellen Charakteristika automobiler Netze erweitert. Es wird zudem eine schichtenübergreifende Lösungsarchitektur vorgestellt, die situationsadaptiv sowohl kurze Latenzzeiten für kritische Nachrichten, als auch eine nachhaltige Skalierbarkeit des Netzes in Szenarien mit geringen und hohen Fahrzeugdichten sicherstellt. Der Kanalzugriff und die Verbreitung der Kontextinformationen im Netzwerk basieren dabei auf einer situationsabhängigen Bewertung des Anwendungsnutzens der zu übertragenden Nachrichten. Mit Hilfe von Simulationen wird das Verhalten des Systems bewertet.

Durch eine ontologiebasierte Verwaltung wird auch nichtfahrzeugbezogenen Systemen eine domänenübergreifende Nutzung der Sensorinformationen und kausalen Zusammenhänge ermöglicht.

Schlagwort: Ad-hoc Netze, Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, Dedicated Short Range Communication (DSRC), Kontext-sensitive Systeme, Kontextverbreitung, Network Utility Maximization, Prädiktive Fahrerassistenz

Abstract

A significant lack of information is widely considered as root cause of road accidents. The better the drivers are informed about the road condition in front, the greater is the probability that they react appropriately - even in complex situations. Thus, the comprehensive availability of traffic related and high quality context information significantly contributes to increase road safety and traffic efficiency.

In this context, this thesis provides a technical concept to reliably predict the future driving situation of a vehicle in order to inform the driver about road, traffic, or weather related events in a timely manner. The prediction is based on distributed vehicle probe data that is proactively shared via a vehicular ad hoc network. The thesis thereby focuses on the management of location based context information, information fusion from different sources, and the dissemination of critical context information in vehicular ad hoc networks.

On top of a formal specification of the problem and solution domain, the thesis in particular provides a two-step evaluation process to derive a probability measure for a specific road or weather condition, taking into account the requirements of embedded automotive systems. A weighted interpolation of observations takes into account both spatial and temporal characteristics of a single context aspect. Subsequently, the prediction is refined exploiting causal interdependencies of different aspects using Bayesian Networks. In addition, an integrated approach is presented, enabling situation centric message transmissions and low latency channel access when necessary. Channel access and information dissemination is based on an explicit and situation-centric utility evaluation of outgoing messages. A cross layer architecture is described that enables a scalable interchange and local dissemination of context information within the vehicular ad hoc network, whereas the network may be either fully meshed or intermittent connected. The performance of the system is evaluated by various simulations.

In addition, an ontology based management of location based context information and causal dependencies of different aspects enables a generic interoperability with other - non-automotive - context sensitive application domains.

Danksagung

Das Leben in einem Bienenstock zu koordinieren ist nicht jedermanns Sache, muss doch jener Koordinator viele Einzelereignisse korrelieren und den sich wechselnden Rahmenbedingungen stets neu Rechnung tragen. Er muss beispielsweise Wetterdaten einholen, um den richtigen Zeitpunkt zum Aussenden der Honigsammlerinnen zu planen, oder die aktuellen Lieferungen jeder eintreffenden Honigsammlerin auswerten, um die weitere Ertragskraft der nahen Frühlingswiese zu prognostizieren. Jede Menge Arbeit also, die da anfällt. Nun sagt man Bienen nach, zumeist recht fleißig zu sein, indes schafft seit Bienen Generationen nicht einmal die Fleißigste von ihnen alleine all die Arbeit des Bienenstocks - nicht einmal die Königin selbst. So haben sich Bienen und Königin vor langer Zeit gütig darauf verständigt, die Arbeit sinnvoll auf einzelne Bienen zu verteilen, was seither in regelmäßiger Folge zu zumeist qualitativ sehr hochwertigem Honig führt. Andererseits kann sich aber so keine Biene mehr allein den wertvollen Honigertrag auf die eigenen Fahnen respektive Fühler schreiben. Möchte man den Bienen nun für den leckeren Honig danken, so drängt sich zwangsläufig die Frage auf, welcher Biene denn nun eigentlich zuvorderst zu danken sei. Den Honigsammlerinnen, die emsig die Rohstoffe herbeischaffen? Oder den Kundschafterinnen, die Neuigkeiten auskundschaften und vor Irrwegen warnen? Oder den Wächterinnen, die stets aufpassen, dass sich nichts Ungewolltes in den Bienenstock einschleicht? Oder doch lieber dem Imker, der sich um das Wohlergehen des Stocks als Ganzes liebevoll kümmert und für einen dauerhaft prächtigen Honigertrag überhaupt erst die richtigen Rahmenbedingungen schafft?

Mit Danksagungen für Dissertationen verhält es sich in der Regel ähnlich. Es bedarf vieler uneigennütziger Unterstützer aller Art, denen es natürlich hierfür entsprechend gebührend zu danken gilt. Für die kreative und offene Atmosphäre beispielsweise, oder die nachhaltige Unterstützung, für den Rückhalt, die vielen bilateralen Diskussionen, die legendären Ausflüge, das anschließende nach Hause bringen, die konstruktiven Verbesserungsvorschläge, die nette Integration ins Team, die Hilfsbereitschaft bei der Bewältigung dieses ominös-mystischen Interaktionsparadigmas mit Namen Linux, die Hilfe beim Saubermachen, die vielen neuen Ideen, die handwerkliche Umsetzung von Powerpointkonzepten, fürs Korrekturlesen, fürs schlichte Ertragen, oder für das kurzfristige Einspringen auf Fachkonferenzen.

Nun dient in Zeiten der Kommerzialisierungen der wissenschaftlichen Leistungen eine Erwähnung des eigenen Namens in einer Danksagung neben der Aufbesserung des eigenen Egos auch in zunehmendem Maße der Beeinflussung der eigenen Reputation, zumal wenn die Danksagung öffentlich für jeden lesbar niedergeschrieben ist. Daher

lässt sich das schlichte Danken für den Honig wohl doch nicht eins zu eins übertragen, gibt es doch bei derlei Gedanke eben auch diffizile Normen und Regeln des sozialen Gesellschaftsgefüges zu beachten, welche eine solche Danksagung zu einer wohl zu durchdenkenden Angelegenheit machen, um keinem der liebenswerten Unterstützer ungewollt auf die Füße zu treten. Zu den wichtigsten Fragestellungen einer öffentlichen Danksagung gehört dabei die sorgfältige Wahl der Reihenfolge der Zudankenden, impliziert diese doch zumeist, wenn auch nicht immer gewollt, auch eine Reihenfolge der Dankesquantität. Diese Problematik lässt sich nicht ohne weiteres umgehen, gilt doch auch hier das Treu'sche Reihenfolgedilemma, welches besagt, dass man immer nur genau eine Sache am Anfang bringen kann. Auch das ungewollte Vergessen einer ehrbaren Dankesperson bei der Namensnennung ist vor diesem Hintergrund äußerst ärgerlich, wenn nicht gar unverzeihbar, und soll sogar, auch wenn das der Autor nicht recht glauben mag, in manchen schlimmen Fällen schon Freundschaften und ganze Familien zerrüttet haben.

Um derlei Problemen aus dem Wege zu gehen wäre es hinreichend, ganz auf eine öffentliche Danksagung zu verzichten. Andererseits möchte man den Dankanwärtern aber auch nicht den ihnen gebührenden Dank vorenthalten. Ein Ausweg aus diesem Dilemma wäre zweifelsfrei ein kontextadaptiver Dienst, der dem aktuell Lesenden, sofern es sich bei diesem um einen Dankesberechtigten handelt, immer eine ihm maßgeschneiderte Danksagung präsentiert. Bei einer elektronischen Veröffentlichung müsste man hierzu beim Zugriff auf das Dokument dieses entsprechend verändern, was ohne Zweifel möglich wäre. Möchte man ähnliches indes auch in der gedruckten Version realisieren, bedinge dies weiterhin ein dynamisch bedruckbares Papier, welches wohl noch ein paar Jahre auf sich warten lassen wird. Um diese Wartezeit zu überbrücken ließe sich zumindest das Treu'sche Reihenfolgedilemma dadurch vermeiden, den Leser einfach mit Du anzusprechen. Ich danke Dir herzlich für Deine Unterstützung. Jedoch ist damit zu rechnen, dass die meisten Leser diesen billigen Trick schnell durchschauen werden. Eine ausgefeiltere Lösung bestände darin, aus der Beschränkung der Eindimensionalität der üblichen Dankesliste auszubrechen und die Namen der Dankesverdienten in ein zweidimensionales Buchstabenfeld einzubetten, wie dies aus den bei Senioren zumeist sehr beliebten Wortsuchspielen aus der Fernsehzeitung bekannt ist. Die Reihenfolge der Integration, welche wiederum Rückschlüsse auf die Wichtigkeit des Dankempfängers zulassen würde, wäre durch den Algorithmus hinreichend gut verschleiert. Ein ausreichend großes Suchfeld vorausgesetzt vermindern sich auch die zwischenmenschlichen Konsequenzen, die aus dem Vergessen eines Dankanwärters resultiert, muss doch der Vergessene erst alle möglichen Präfixe des Suchfeldes hinsichtlich des Nichtenhaltens seines Namenspräfixes auswerten, um das Vergessen sicher nachweisen zu können. Dies kann einem, je nach angewandtem Suchalgorithmus des Lesers, zumindest noch ein paar zusätzliche Tage des sozialen Wohlgefallens sichern.

Aus ökonomischen Gesichtspunkten wäre es selbstverständlich geschickter gewesen, diese Verfahren der Lösung des Reihenfolgedilemmas für Danksagungen patentieren zu lassen, anstatt sie hier zu erörtern. Aber was ist bei einer Dissertation schon ökonomisch. Vielleicht sollte man sich ohnehin lieber auf die alten Tugenden besinnen, aus Zeiten, in denen guter Honig nicht selbstverständlich war und man jeder Biene noch von Herzen für das Festmahl dankte - ohne öffentliches Aufsehen, ohne vordergründige Bauchpinselei, schlicht um des eigentlichen Dankens Willen. Zu der Zeit schrieb man gerne einmal eine persönliche Widmung an den hilfsbereiten Unterstützer, dem man

danken wollte. Personalisiert und auf den Kontext des individuellen Lesers zugeschnitten. Manche Dinge sind eben Ihrer Zeit voraus.

Bis sich also das dank sagende Buchstabenfeld, welches im Anschluss exemplarisch abgebildet ist, weltweit durchsetzen wird, belasse ich es bei dem, was zeitlos ist - einer persönlichen Widmung.

D F G C L I N H O F F R E T T A T S H C O H I S O F R Y G W Q
Q A B G M R E I S S E C D E T F G H A V I I K L M P W E T B S
A R D C T F K E M L L O K T X B Y I I B N K F D C V L T S W S
Z E H I D R F A K L I N N U T T U X G R U S K K D H W B N E A
T N I H A E E R F T A U S C H D C C N O Q W L O L V J Z M Y Y
E G I U N Y E U E L E V M H F R S A H Y F O O L E U O G C R S
E I S J I M T E E T C K O O E U C E R H D S R L F V R E Y G E
D E M E C A G K H J S C H L I C H T E R O A E M N B E I V H E
I R C L I N N H O F F C D Z Z E R E M U E L N E E R I O P C O
O E B E I N A U L S D A H W C K O T M B T R Z I H O E R O X L
P S K K O L L F F U C H S O E Y T E A S Z G N E C I M T E Y M
Y S E N T R A M J S L H L M E I H E H R E Y E R S U L K E B B
D Q M K E S T E I N B E R G Q N S C H X R J R H T O L O D M E
F R E P P E U K A F P G B P E O T S C H K E O R N I U R U K D
G L T N R E B F I P I K Z T E L E T S O K A L E E C E S I H R
B L E K I N D M U B R E N M A H L E R S E I B I G N M C T I J
R O R S C H H R O E L L E Q R E L I A S M V S S N A Y H R R U
O K H O F F P E W S A L K I N H Q Y G D B E I E D D F H E T H
I F B E R N S T E I N F I W S E V E M C R Y R R W V F I D T G
Z M D U R S C H T H A M M E R L I N H O F B A R E R E P N E V
G L I K N U F C S C H S R E F F I H C S M R O E L L I M F U S
R A H F I J E I U M L O H B O F U R E J F N G U H J R S C I A

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Abstract	vii
Danksagung	ix
Abbildungsverzeichnis	xvii
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Einordnung der Arbeit	1
1.2 Prädiktive Fahrerassistenz	4
1.3 Nutzen	5
1.4 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit	6
1.5 Vorgehensmodell und Struktur der Arbeit	7
2 Kooperative Fahrerassistenzsysteme	9
2.1 Begriffliche Grundlagen	9
2.2 Zukünftige kooperative Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeug	22
2.2.1 Fahraufgabenbezogene Anwendungen	22
2.2.2 Nicht fahraufgabenbezogene Anwendungen	28
2.3 Klassifikation von kooperativen Fahrerassistenzsystemen	30
2.3.1 Informationsbedarf	31
2.3.2 Situationserkennung	32
2.3.3 Einfluss auf das Fahrgeschehen	37
2.4 Anforderungen und Systemeigenschaften	40
2.4.1 Individuelle Situationsanalyse	41
2.4.2 Kooperative Situationsanalyse	42
2.4.3 Wissensverwaltung	43
2.4.4 Informationsverbreitung	48
2.4.5 Benutzerschnittstelle	54

2.4.6	Datensicherheit und Datenschutz	56
3	Kontextmanagement im Fahrzeug	59
3.1	Kontextbäume als Modellierungsgrundlage	59
3.1.1	Die Deus-Sicht	60
3.1.2	Individualsicht	68
3.2	Beschreibung und Auswertung von Kontextinformationen	77
3.2.1	Ontologien	78
3.2.2	Basisontologien	78
3.2.3	Spezialisierte Ontologien	79
3.3	VCM: Ein Fahrzeugkontextmodell auf Basis des Context-Meta-Models	81
3.3.1	Elemente und Struktur des Fahrzeugkontextmodells	81
3.3.2	Ortskorrelierte Verwaltung von Kontextinformationen im Fahrzeug	86
4	Automobile Ad-hoc Netze	93
4.1	Historische Entwicklung automobiler Ad-hoc Netze	93
4.2	Das Problem der Markteinführung	95
4.3	Modellierung automobiler Ad-hoc Netze	98
4.4	Physikalische Schicht und Medienzugriff	104
4.5	Routing und Informationsverbreitung	108
4.5.1	Routing Verfahren	109
4.5.2	Broadcast Verfahren	116
4.5.3	Informationsverbreitung	118
4.5.4	Zusammenfassung	126
4.6	Simulationsumgebung	127
4.6.1	Der Mobilitätsgenerator GenMobTrace	128
4.6.2	Network Simulator 2 (NS2)	129
4.6.3	Anwendungssimulator AppSim	130
5	Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen	133
5.1	Probabilistische Netze als Deduktionsgrundlage	136
5.1.1	Der Satz von Bayes und probabilistische Netze	137
5.1.2	Dynamische Bayessche Netze	140
5.1.3	Objektorientierte Bayessche Netze	141
5.1.4	Eigenschaften und Einschränkungen Bayesscher Netze in der Anwendungsdomäne kooperativer Telematiksysteme	141
5.2	Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen	142
5.2.1	Modellierung Bayesscher Netze zur Ableitung lokaler höherwertiger Kontextaspekte	142
5.2.2	Die wesentlichen kausalen Zusammenhänge der Fahrsituation	143
5.3	Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen	152
5.3.1	Vorhersagestrategie des Fahrkontextes	153
5.3.2	Abbildung räumlicher Zusammenhänge in Bayesschen Netze	155
5.3.3	Das Konzept der Wahrscheinlichkeitsgebirge: Abbildung räumlich-zeitlicher Einflussfaktoren	158

5.3.4	Wechselwirkungen von Kontextaspekten	164
5.4	Repräsentation kausaler Abhängigkeiten in OWL-DL	166
5.5	Ein Overlay-Bayesnetz über dem VCM	168
5.5.1	Generierung der Netzstruktur und Initialisierung der Einträge der bedingten Wahrscheinlichkeiten	168
5.5.2	Situationsabhängige Instanziierung von Teilnetzen	170
5.6	Bewertung	170
6	Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in auto- mobilen Ad-hoc Netzen	175
6.1	Annahmen und Paradigmen	175
6.2	Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen	178
6.2.1	Das Netzwerknutzenoptimierungsproblem in statischen Netzen	178
6.2.2	Das Netzwerknutzenoptimierungsproblem in automobilen Ad-hoc Netzen	179
6.3	Ein nutzenoptimierendes Kontextverbreitungskonzept	188
6.3.1	Fahrzeugzentrische Nachrichtendifferenzierung	188
6.3.2	Fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung	201
6.4	Eine schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur	212
6.5	Simulative Evaluation	219
6.5.1	Überblick und Parametrisierung	219
6.5.2	Einfluss der fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung	223
6.5.3	Einzelbetrachtungen des Empfängernutzens	224
6.5.4	Einfluss unterschiedlicher Nachrichtendifferenzierungsparadigmen	226
6.5.5	Einfluss einer kontinuierlichen fahrzeuginternen Relevanzreeva- luierung	227
6.5.6	Einfluss des Wettbewerbsfensters	227
6.5.7	Einfluss der Art der Wartezeitadaptation	230
6.5.8	Einfluss der verfügbaren Bandbreite	233
6.5.9	Einfluss der Verkehrsdichte	233
6.5.10	Einfluss der Netzwerklast auf die Länge der Nachrichtenwarte- schlange	234
6.5.11	Fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung auf Basis von IEEE 802.11e/p	235
6.5.12	Qualität der Nutzenabschätzung	239
6.5.13	Effekt auf die Nachrichtenlatenz in Kreuzungsszenarien	241
6.5.14	Auswirkungen der impliziten Nachrichtenpriorisierung	242
6.5.15	Implizites Verbreitungsgebiet	245
6.5.16	Implizite Nachrichtenlebensdauer	248
6.6	Bewertung und Zusammenfassung	249
7	Zusammenfassung und Ausblick	255
7.1	Kernergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag	255
7.2	Offene Fragen und Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten	257
7.3	Schlussbemerkung	258
	Literaturverzeichnis	261

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zunahme des Straßenverkehrs und Entwicklung der Personenschäden in Europa seit 1960 [Sta06a]	2
1.2	Entwicklung der Unfallzahlen in Deutschland seit 1990 [Sta06b]	2
1.3	Prädiktive Sensorsysteme der nächsten Fahrzeugeneration (Quelle: Dr. Rasshofer, BMW Group Forschung und Technik)	4
1.4	Zielhierarchie der Unfallvermeidung und Steigerung der Verkehrseffizienz	4
1.5	Szenario einer kooperativen lokalen Gefahrenwarnung (Quelle: BMW Group Forschung und Technik)	5
1.6	Vorgehensmodell	8
2.1	Typische Zeithorizonte der 3 Ebenen der Fahraufgabe nach Donges und Braess [BD06]	10
2.2	Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen nach [Don99]	11
2.3	Beispiele für die Einteilung von Fahrerassistenzsystemen [EWGN00, Grü05]	12
2.4	Klassifikation von Sicherheitsmaßnahmen in Fahrzeugen	13
2.5	Einordnung von Assistenzfunktionen im Hinblick auf ihre Zugehörigkeit zu Sicherheits- und Komfortfunktionen nach Naab [Naa04]	14
2.6	Klassischer Informationsfluss aktueller Telematiksysteme	15
2.7	Prinzipielles Funktionsprinzip des infrastrukturbasierten <i>Floating Car Data</i> -Systems (Quelle: BMW Group)	16
2.8	Erweiterung des Informationsfluss durch direkte Kommunikation und Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern	17
2.9	Verfeinerte Klassifizierung niederwertigen und höherwertigen Kontextes	20
2.10	Anwendungsfelder der lokalen Gefahrenwarnung [PRe06b]	23
2.11	Querverkehr- und Kreuzungsassistenz (Quelle F. Klanner, BMW Group Forschung und Technik)	25
2.12	Überblick über elektronische Systeme in Fahrzeugen	30
2.13	Bedarf an höherwertigen Kontextinformationen ausgewählter individueller Assistenzsysteme nach Naab [Naa04]	31
2.14	Überblick Klassifikation kooperativer Telematikanwendungen im Fahrzeug	32

2.15	Qualität der Situationsdynamik	35
2.16	Quantität der Dynamik ausgewählter Situationen	36
2.17	Eigenschaften verschiedener kooperativer Telematikanwendungen	39
2.18	Räumliche Einflussbereiche von Kontextaspekten.	48
2.19	Prinzip des Physical Store and Forward [PRe06b]	51
2.20	Typische charakteristische Eigenschaften verschiedener kooperativer Fahrerassistenzklassen	55
2.21	Exemplarische Benutzerschnittstelle [Kos04b]	56
2.22	Erweiterter Regelkreislauf über verschiedene Fahrzeuge hinweg	58
3.1	Spezialisierungshierarchie der Klasse der Entitäten	61
3.2	Bewegungskorrelierter Kontextbaum	64
3.3	Ortskorreliertes rekursives Aufspannen der Unterräume eines Kontextbaums in einem zweidimensionalen Modellraumschnappschuss	65
3.4	Wechsel der Bewegungskorrelation im Kontextbaum	66
3.5	Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision nach [Sch97] (a) und [Pro06] (b)	70
3.6	Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$, dass der reale Wert x_j maximal $\Delta\delta$ vom beobachteten Wert \hat{x}_j abweicht.	71
3.7	Konzeptualisierung von Ontologien nach [CJB99]	79
3.8	Das Kontext-Meta-Modell nach Fuchs [Fuc04, HKBF05]	80
3.9	Modellschichtung	81
3.10	Schematischer Überblick über das Fahrzeugkontextmodell	82
3.11	Eigenschaften der Klasse Beobachtung	85
3.12	Mögliche Skala der Fahrtrichtungsangabe	86
3.13	Eigenschaften der Klasse Aggregat	87
3.14	Distanzbezogene Anpassung der Auflösung von Streckenabschnitten und zugehöriger modifizierter GeoHorizont	89
3.15	Schematischer Aufbau eines Quadtrees	90
4.1	Überblick über Forschungsaktivitäten und beteiligte Partner (Auszug, Stand Juni 2005)	95
4.2	Überblick über das Zusammenwirken der Institutionen und Forschungsprojekte ([Mie06])	96
4.3	Überblick über den Stand der internationalen Frequenzvergabe [PRe07]	97
4.4	Notwendige Penetrationsrate für kooperative Assistenzanwendungen	98
4.5	Phasenübergangphänomen nach Kosch [Kos05a]	99
4.6	Entwicklung der Ausstattungsrates an Fahrzeugen entsprechend des Grades der Ausstattung an Neufahrzeugen ([MMP ⁺ 05])	100
4.7	Vereinfachtes Medienzugriffsschema von IEEE 802.11	106
4.8	Exemplarischer Verlauf der Koordination des Kanalzugriffs von drei Konten	107
4.9	Interne Nachrichtendifferenzierung bei IEEE 802.11 e [IEE05a]	108
4.10	Aktuelle Warteschlangenarchitektur von IEEE 802.11p (nach [IEE04])	109
4.11	Beispiele für die Intention hinter einigen Provocations und Mollifications nach [WER05]	123
4.12	Kommunikationsarten in Abhängigkeit der Nutzeigenschaften nach Kosch [Kos05b]	125

4.13	Informationsobjektkorrelation nach Kosch [Kos05b]	125
4.14	Integrative Kopplung der Simulationskomponenten	128
4.15	Kürzeste Routenwahl in GenMobTrace [Mer06]	129
4.16	Vereinfachtes Klassenmodell des Anwendungssimulators AppSim	131
4.17	Überblick über die statische Kopplung zwischen Mobilitätsgenerator Gen-MobTrace, Netzwerksimulator NS2 und Anwendungssimulator AppSim	132
5.1	Modell einer modularen Sensordatenfusion im Fahrzeug [Naa04]	134
5.2	Graphisches Modell eines einfachen dynamischen Bayesschen Netzes nach [Kja95]	140
5.3	Qualitativen kausalen Zusammenhänge zur Detektion von (starkem) Regen	144
5.4	Integration externer Datenquellen	145
5.5	Vereinfachte quantitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Starkregen	146
5.6	Bipartite Struktur technischer, nicht kausaler Abhängigkeiten	147
5.7	Qualitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Sichtbehinderung aufgrund von Nebel	150
5.8	Bipartite technische Strukturierung eines Bayesschen Netzes zur Inferenz von Nebel	151
5.9	Qualitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Aquaplaning	152
5.10	Räumlicher Einfluss von Beobachtungen	155
5.11	Räumliche Strukturierung eines Bayesschen Netzes zur Modellierung räumlichen Einflusses zwischen Beobachtungen und Hypothesen	156
5.12	Zeitliche Entfaltung Bayesscher Netze	157
5.13	Zyklenbildung bei Abbildung eines gegenseitigen räumlichen Einflusses zwischen Beobachtungen und Hypothesen	157
5.14	Räumliches Wahrscheinlichkeitsgebirge	158
5.15	Aspektspezifische Konsolidierung der Varianz auf Basis der Anzahl der Beobachtungen, sowie der maximalen konsolidierten Aussagekraft der Beobachtungen	162
5.16	Eintrittswahrscheinlichkeit von Regen auf Basis einer vier-stufigen Diskretisierung der Regenintensität	163
5.17	Kausale Konsolidierung interpolierter Kontextaspekte für einen spezifischen Ort	165
5.18	Exemplarisches (vereinfachtes) Bayessches Netz zur Detektion verminderter Fahrbahntraktion	167
5.19	Repräsentation Bayesscher Netze in OWL-DL	167
5.20	Beispiel der Kodierung eines CPT-Objektes in OWL-DL	168
5.21	Beispiel der Kodierung eines CPTEntry-Objektes in OWL-DL	168
5.22	Beispiel der Kodierung eines CPTState-Objektes in OWL-DL	169
5.23	Kodierung eines Bayesschen Netzes in OWL-DL: CPTParent	169
5.24	Linearisierung eines n-dimensionalen Hyperkubus	170
5.25	Exemplarische Schnappschüsse eines Teils des Simulationsgebietes	171
5.26	Entwicklung des Grades des Dafürhaltens für starken Regen in Fahrzeug 5 auf Basis individueller Inferenz	172
5.27	Entwicklung des Grades des Dafürhaltens für starken Regen in Fahrzeug 45 auf Basis kooperativer Prädiktion an einer entfernten Position	173

5.28	Vergleich zwischen Prädiktion und tatsächlicher Ausprägung des Kontextaspekts Regen an einer entfernten Position	173
6.1	Mögliche Metriken zur Nutzenquantifizierung kooperativer Fahrerassistenzsysteme auf Basis der verkehrssicherheitsbezogenen Zielhierarchie	182
6.2	Beispiele für Kontext zur Verwendung in der Relevanz-Funktion	197
6.3	Vergleich der Vorgehensweisen bei Auftreten eines Warteschlangenüberlaufs [Sch06]	200
6.4	Möglichkeiten der nutzenorientierten Anpassung der individuellen Wartezeit eines Netzwerkknotens nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung	203
6.5	Einfluss einer expliziten Nutzenanpassung des Wettbewerbsfensters, bei Fortsetzung des Wartezeitmessers nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung	204
6.6	Einfluss einer expliziten Nutzenanpassung des Wettbewerbsfensters, bei Neuinitialisierung des Wartezeitmessers nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung	205
6.7	Lineare nutzenorientierte Adaption des Wettbewerbsfensters bzw. Wartezeitmessers	206
6.8	Hyperbolische Anpassung der Kanalzugriffswartezeit	207
6.9	Parametrisierung der logistischen Anpassung des Wartezeitmessers	208
6.10	Sigmoidale Anpassung des Wartezeitmessers durch Parametrisierung des Tangens Hyperbolicus	209
6.11	Sigmoidale Anpassung des Wartezeitmessers durch Parametrisierung einer modifizierten schnellen Aktivierungsfunktion	210
6.12	Schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur im Fahrzeug nach [FTMT ⁺ 05]	213
6.13	Informationsfluss im Fahrzeug nach [MTM06]	214
6.14	Rein relevanzbasierter Informationsfluss im Fahrzeug	216
6.15	Schichtenübergreifende nutzenzentrische Kommunikationsarchitektur [Sch06]	219
6.16	Qualitative Verbesserung des globalen aggregierten Netzwerknutzens aufgrund einer nutzenbasierten fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung	223
6.17	Nutzenhistorie ohne Anwendung einer nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung	225
6.18	Nutzenhistorie bei Anwendung einer nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung	225
6.19	Überblick über die qualitativen Effekte unterschiedlicher Nachrichtendifferenzierungsparadigmen	226
6.20	Einfluss einer kontinuierlichen fahrzeuginternen Reevaluation der Nachrichtenrelevanz	228
6.21	Einfluss der Wettbewerbsfensterwahl auf den Prozess der fahrzeugübergreifenden Nachrichtenpriorisierung	229
6.22	Einfluss der Art der Wartezeitadaption auf die Nutzenentwicklung (fortgesetzt vs neuinitialisiert)	230
6.23	Effektive Kanalauslastung in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaption (fortgesetzt vs neuinitialisiert)	232

6.24	Dichtefunktion der resultierenden Back-Off Zähler in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaption (fortgesetzt versus neuinitialisiert)	232
6.25	Nutzenentwicklung in Abhängigkeit der verfügbaren Bandbreite	234
6.26	Mögliche Nutzenentwicklung in Abhängigkeit der Teilnehmersichte	235
6.27	Einfluss der Netzwerklast auf die Länge der Nachrichtenwarteschlange	236
6.28	Nutzenentwicklung bei Anwendung von IEEE802.11e und einem schichtenübergreifenden Architekturansatz in Abhängigkeit der Netzwerklast	237
6.29	Entwicklung der Länge der Warteschlangen der vier verwendeten Prioritätsklassen des Kontrollkanals von IEEE 802.11p	238
6.30	Effekt einer modifizierten Parametrisierung des Kanalzugriffs bei IEEE 802.11e	240
6.31	Durchschnittliche Abweichung zwischen der Relevanzabschätzung und tatsächlichem Empfängernutzen	241
6.32	Durchschnittliche Übertragungslatenzzeiten im Kreuzungsbereich ohne (a) und unter Verwendung einer räumlich motivierten Nachrichtendifferenzierung (b)	243
6.33	Auswirkungen einer nutzenbasierten Nachrichtenpriorisierung im Falle zweier unterschiedlich gewichteter Gefahrenmeldungen	244
6.34	Anzahl der gewarnten Fahrzeuge im Falle zweier unterschiedlich gewichteter Gefahrenmeldungen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung	244
6.35	Auswirkungen einer nutzenbasierten Nachrichtenpriorisierung im Falle von fünf unterschiedlich gewichteten Gefahrenmeldungen	245
6.36	Anzahl der gewarnten Fahrzeuge im Falle von fünf unterschiedlich gewichteten Gefahrenmeldungen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung	246
6.37	Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung	247
6.38	Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten und unterschiedlich gewichteten Gefahrenstellen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung	247
6.39	Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und vermindeter verhältnismäßiger räumlicher Nutzenkorrelation	248
6.40	Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von fünf gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und räumlicher Nutzenkorrelation	249
6.41	Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von fünf gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und vermindeter verhältnismäßiger räumlicher Nutzenkorrelation	250
6.42	Implizite Nachrichtenlebensdauer im Falle von drei sequenziell auftretenden Gefahrenquellen und zeitlicher Nutzenkorrelation	251

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Einordnung der Arbeit

Durch die fortlaufende Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen, die die Fahrzeuginsassen im Falle eines Unfalls schützen und die unmittelbaren Unfallfolgen minimieren, konnte seit Einführung des Sicherheitsgurtes Anfang 1970 die Zahl der im Verkehr getöteten Personen nachhaltig reduziert werden (siehe Abbildung 1.1). Zusätzlich konnte im Mittel auch die Schwere der Unfallfolgen verringert werden. Trotz dieser im Grunde sehr erfreulichen Tendenz kamen im Jahre 2002 weltweit jedoch noch immer rund 1,2 Millionen Menschen im Straßenverkehr ums Leben [WHO02]. Um diesem Trend der steigenden Unfallzahlen entgegenzuwirken, werden passive Sicherheitsmaßnahmen heutzutage durch Assistenzsysteme wie ABS (Anti-Blockier-System), DSC (Dynamische Stabilitätskontrolle) oder ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) ergänzt, die aktiv versuchen, Fahrzeuge in kritischen Situationen zu stabilisieren. Derartige Sicherheitssysteme konnten dazu beitragen, die Zahl der Verkehrstoten weiter zu minimieren und sorgen seit Anfang 1990 zumindest für eine Stagnation der Unfallzahlen (siehe Abbildung 1.2).

Eines der wesentlichen Ziele, sowohl seitens der Politik, als auch seitens der Kraftfahrzeugindustrie, ist und bleibt daher eine nachhaltige Reduzierung der Zahl an Verkehrsunfällen. Bei der Umsetzung dieses Ziels spielen eine Vielzahl an unterschiedlichen Wirkfaktoren eine Rolle, die darauf ausgerichtet sind, in den signifikanten Phasen vor, während und nach einem Unfall die Verkehrsteilnehmer bestmöglich vor negativen Einwirkungen zu schützen.

1 Einführung

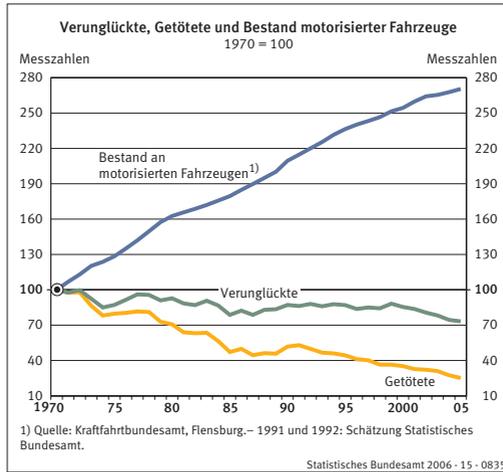


Abbildung 1.1: Zunahme des Straßenverkehrs und Entwicklung der Personenschäden in Europa seit 1960 [Sta06a]

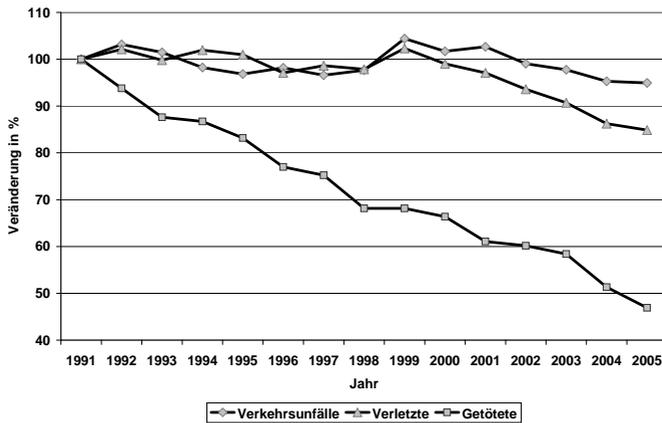


Abbildung 1.2: Entwicklung der Unfallzahlen in Deutschland seit 1990 [Sta06b]

1.1 Motivation und Einordnung der Arbeit

Eine Studie von Gründl [Grü05] aus dem Jahre 2005 über die spezifischen Ursachen, die unmittelbar oder mittelbar zu einem Unfallgeschehen führen, macht deutlich, dass die überwiegende Zahl der Verkehrsunfälle durch individuelle Fahrfehler verursacht wird. Laut Gründl war wiederum die Hauptursache, die zu einem Fahrfehler und somit in Folge auch zu einem Unfall führte, dass den betroffenen Fahrern wichtige Informationen bezüglich des sie umgebenden Verkehrsgeschehens erst zu spät oder überhaupt nicht zur Verfügung standen.

Menschliche Fehler können in komplexen Verkehrssituationen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Deshalb ist es umso entscheidender, durch eine gezielte Gestaltung der Rahmenbedingungen die auf den Fahrer einwirkende Komplexität des Verkehrsgeschehens zu minimieren. Neben straßenbaulichen Maßnahmen spielen dabei vor allem weiterführende Assistenzkonzepte in den Fahrzeugen eine entscheidende Rolle. Die Aufmerksamkeit der Fahrer soll in komplexen Verkehrssituationen gezielt auf relevante Sachverhalte und mögliche Gefährdungspotentiale gelenkt werden. Je genauer der Fahrer über den Streckenabschnitt informiert ist, den er in naher Zukunft befahren wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er rechtzeitig und angemessen auf die entsprechende Situation reagiert. Daher setzt man seit einigen Jahren zusätzlich in zunehmendem Maße auf Assistenzsysteme, die die unmittelbare Fahrzeugumgebung erfassen und so frühzeitig agieren können. Als Basis hierzu dienen in der Regel dedizierte Sensorsysteme wie Radar, Lidar, Ultraschall oder Bilderkennungungsverfahren.

Derartige Sensorsysteme bieten den Vorteil, dass sie die Umgebung des Fahrzeugs sehr genau erfassen können. Sie sind jedoch in der Regel teuer und benötigen viel Platz. Aus diesem Grund sind solche Sensorsysteme bisher lediglich für LKW und Fahrzeuge der Oberklasse oder oberen Mittelklasse verfügbar. Eine besondere Problemklasse bilden hierbei Motorräder, die aufgrund des sehr begrenzten Bauraums nur sehr bedingt Möglichkeiten zur Integration solcher Sensorsysteme bieten. Gerade Motorräder sind jedoch besonders anfällig für ungünstige Straßenverhältnisse und zudem in kritischen Fahrsituationen nur schwer stabilisierbar. Ein weiterer Nachteil von lokalen Sensorsystemen ist ihre begrenzte Reichweite, die, abhängig vom eingesetzten System, von lediglich wenigen Metern bis hin zu wenigen hundert Metern vor oder hinter dem Fahrzeug reicht und eine direkte Sichtverbindung erfordert. Dies hat zur Folge, dass meist nur Ereignisse erfasst werden können, die sich in unmittelbarer Umgebung des eigenen Fahrzeugs befinden. Eine weitere Vorausschau, und damit verbunden ein erweiterter Handlungszeitraum, ist deshalb nicht möglich. Zudem wirkt sich gerade in schlecht einsehbaren Kreuzungssituationen, die oft ein besonders hohes Unfallrisiko bergen¹, die stark eingeschränkte Wirkungsweise bei Sichtverdeckung besonders negativ aus. Darüber hinaus beschränkt sich das Erkennungspotential meist auf Gegenstände und Personen auf oder neben der Fahrbahn. Besondere Straßenzustände wie beispielsweise der momentane Reibwert, der Verschmutzungsgrad der Fahrbahn, oder plötzlich auftretende Sichtbehinderungen können zurzeit nicht oder nur bedingt im Vorfeld erkannt werden (siehe Abbildung 1.3). Eine vielversprechende und kostengünstige Ergänzung zu derartigen Sensorsystemen ist die Vernetzung von Fahrzeugen. Kernidee hierbei ist, dass viele moderne Fahrzeuge schon heute über die notwendige Sensorik verfügen, um zumindest ihre aktuelle Fahrsituation bzw. ihren aktuellen Fahrkontext hinreichend

¹In etwa jeder dritte Unfall mit Personenschaden ereignet sich in Kreuzungssituationen [Sta06b]

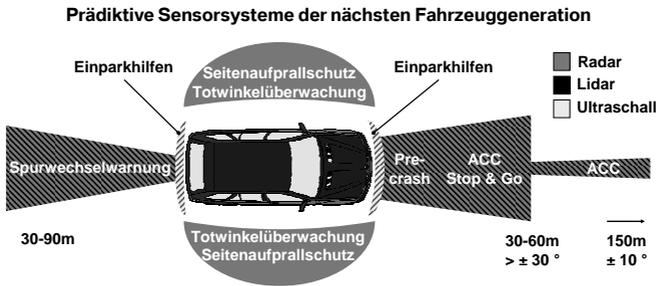


Abbildung 1.3: Prädiktive Sensorsysteme der nächsten Fahrzeuggeneration (Quelle: Dr. Raschofer, BMW Group Forschung und Technik)

genau zu bestimmen. Erkennt ein Fahrzeug eine Gefahrensituation, kann es diese Erkenntnis anderen Fahrzeugen unmittelbar zur Verfügung stellen. Fahrzeuge haben auf diese Weise die Möglichkeit, den Fahrkontext der umgebenden Fahrzeuge mit zu verarbeiten. Dies ermöglicht wiederum eine erweiterte Vorausschau der zukünftigen Fahr-situation und so eine Vergrößerung des Handlungszeitraums. Abbildung 1.4 zeigt die resultierende Zielhierarchie der Unfallvermeidung und Steigerung der Verkehrseffizienz.

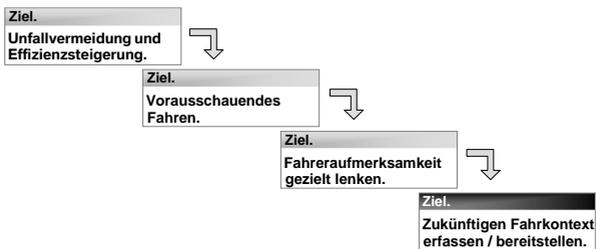


Abbildung 1.4: Zielhierarchie der Unfallvermeidung und Steigerung der Verkehrseffizienz

1.2 Prädiktive Fahrerassistenz

Abbildung 1.5 zeigt exemplarisch die Wirkweise eines solchen kooperativen Systems am Beispiel einer durch einen Ölfleck bedingten ungünstigen Fahrbahnbeschaffenheit in einer Autobahnausfahrt. Fahrzeug A hatte dabei bisher keine Kenntnis bezüglich dieser Situation. Aufgrund der nicht ausreichend an die gegebenen Umweltbedingungen angepassten Fahrweise kommt das Fahrzeug in eine kritische Fahr-situation, kann jedoch

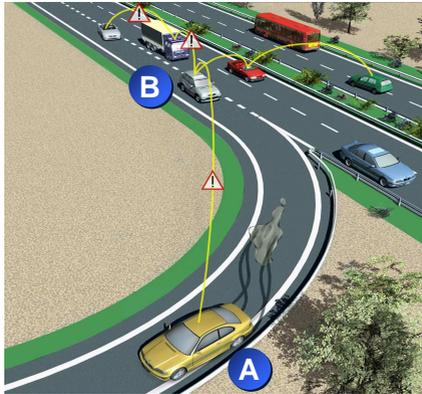


Abbildung 1.5: Szenario einer kooperativen lokalen Gefahrenwarnung (Quelle: BMW Group Forschung und Technik)

durch die vorhandenen Assistenzsysteme stabilisiert werden. Durch den Regelungseingriff und unter Berücksichtigung weiterer lokaler Sensormesswerte hat Fahrzeug A nach dem Passieren des entsprechenden Streckenabschnitts Kenntnis über das dort existente Gefahrenpotential. Es sendet daher eine entsprechende Information an die umliegenden Fahrzeuge. Im Verlauf des Verbreitungsprozesses erhält auch Fahrzeug B diese Information. Der Fahrer von Fahrzeug B kann so aufgrund der frühzeitigen Kenntnis des Gefahrenpotentials seine Fahrweise rechtzeitig an die Fahrbahnbeschaffenheit anpassen.

1.3 Nutzen

Durch die Kooperation von Verkehrsteilnehmern ist es möglich, die Situation, in der sich ein Fahrzeug in Zukunft befinden wird, umfassend und frühzeitig zu prognostizieren. Dabei können insbesondere die zuvor erwähnten Nachteile lokaler Sensorik beseitigt werden. Es gilt:

- Der Vorausschauhorizont wird durch das Verteilen der Informationen im Prinzip beliebig groß. Dem Fahrer bleibt so ausreichend Zeit zu agieren.
- Abhängig vom Kommunikationssystem kann zwar eine Sichtverbindung zur direkten Kommunikation erforderlich sein, durch die Verteilung von Informationen über eine Vielzahl an Fahrzeugen hinweg kann dies jedoch ausgeglichen werden. Es ist somit keine direkte Sichtverbindung nötig, um Informationen zwischen Fahrzeugen auszutauschen.
- Eine kooperative Vorhersage der Fahrsituation benötigt keine zusätzlichen Sensorsysteme. Das System ist so vergleichsweise preiswert und kann auch in kleinen Fahrzeugen eingesetzt werden; insbesondere auch in Motorrädern.

Eine umfassende Fahrerinformation basiert aus diesen Gründen idealer Weise aus der ganzheitlichen Verwertung aller verfügbaren Informationsquellen, also insbesondere

- der lokalen Sensorik des eigenen Fahrzeugs,
- dem Wissen der anderen Fahrzeuge,
- dem Wissen externer Anbieter, wie beispielsweise Einsatzkräfte, lokale Behörden, Verkehrsdienste, Wetterdienste oder Straßenmeistereien,
- statische geografische Gegebenheiten, beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kurvenradien oder Fahrspurbreiten,
- statistisches Wissen über Häufungen von Gefahrenpotenzialen an bestimmten Orten zu bestimmten Zeitpunkten, sowie
- Wissen über die individuellen Besonderheiten des Fahrers und des Fahrzeugs.

1.4 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die technische Konzeption einer zuverlässigen Vorhersage der zukünftigen Fahrsituation. Diese Vorausschau erfolgt auf Basis der Rahmenbedingungen im Fahrzeug und des im Fahrzeug verfügbaren Informationsangebotes. Der Fahrer soll gezielt, umfassend und rechtzeitig über verkehrs-, wetter- und straßenzustandsrelevante Ereignisse informiert werden. Dabei steht die Fusion von verschiedenartigen Informationsquellen, sowie die damit unmittelbar verbundene Problematik der Verteilung der von den Fahrzeugen erzeugten Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen im Fokus der Arbeit. Besonderes Augenmerk richtet sich insbesondere auf folgende Fragestellungen:

- Wie kann eine Vielzahl an unterschiedlichen und sich gegebenenfalls widersprechenden Informationen aus unterschiedlichen Quellen von verschiedenen Orten mit unterschiedlicher Qualität zu einer robusten und fehlertoleranten Prädiktion der Fahrsituation unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und räumlichen Wirkfaktoren genutzt werden?
- Wie können die notwendigen Informationen auf Basis eines automobilen Ad-hoc Netzwerkes unter Berücksichtigung sich spontan verändernder Konnektivität effektiv und effizient verbreitet werden?
- Wie kann diese Vielzahl an Informationen, sowie deren Zusammenhänge und Wechselwirkungen unter Berücksichtigung räumlicher Ausprägung effizient im Fahrzeug verwaltet werden?

Das erarbeitete Konzept trägt dabei zudem den wesentlichen Anforderungen hinsichtlich Datensicherheit Rechnung, und dient als Grundlage einer, im Rahmen dieser Arbeit nicht näher im Detail betrachteten, kontextadaptiven und personalisierbaren Benutzerschnittstelle. Als Voraussetzung für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass

ein Ad-hoc Kommunikationssystem mit hinreichend großer Kommunikationsreichweite in einer ausreichend großen Anzahl an Fahrzeugen existiert. Als zugrunde liegende Übertragungstechnologie soll dabei ein auf die besonderen Anforderungen im Automobilbereich abgestimmtes Derivat des IEEE 802.11a Standards dienen, wie es von derzeit laufenden oder kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekten und Gremien (siehe Kapitel 4) vorgeschlagen und entwickelt wird.

1.5 Vorgehensmodell und Struktur der Arbeit

Aufbauend auf einer detaillierten Analyse der betrachteten Problemdomäne kooperativer Assistenzsysteme (Abschnitt 2.3), werden drei wesentliche Teilproblemaspekte identifiziert (die Verwaltung, Verbreitung und Deduktion des verteilten Fahrkontextes) und unter weiterer Berücksichtigung des automobilen Anwendungsfeldes und den damit verbundenen typischen Eigenschaften und Einschränkungen ein umfassender Anforderungskatalog entwickelt (Abschnitt 2.4).

Daraus abgeleitet wurde ein generisches theoretisches Lösungskonzept zur prädiktiven Kontextableitung in kontextadaptiven automobilen Systemen (Abschnitt 3.1). Die in den einzelnen Teilproblem-domänen existierenden und mit der Thematik verwandten Ansätze aus den Bereichen der Kontextverwaltung (Kapitel 3), automobiler Ad-hoc Netze (Kapitel 4), sowie der Wissensinferenz bzw. Kontextableitung (Kapitel 5) wurden aufgezeigt und hinsichtlich der speziellen Anwendungsdomäne ausgewertet und evaluiert. Darauf aufbauend wurde ein eigenes, integratives Lösungskonzept entwickelt, welches die untersuchten Teilproblemaspekte der Kontextdarstellung (Kapitel 3), der Kontextdeduktion und -prädiktion (Kapitel 5) sowie der Kontextverbreitung (Kapitel 6) in automobilen Ad-hoc Netzen umfasst. Das dargestellte Lösungskonzept wurde weiterhin theoretisch und simulativ hinsichtlich seiner Effektivität bewertet. Abbildung 1.6 zeigt das Vorgehensmodell im Überblick.

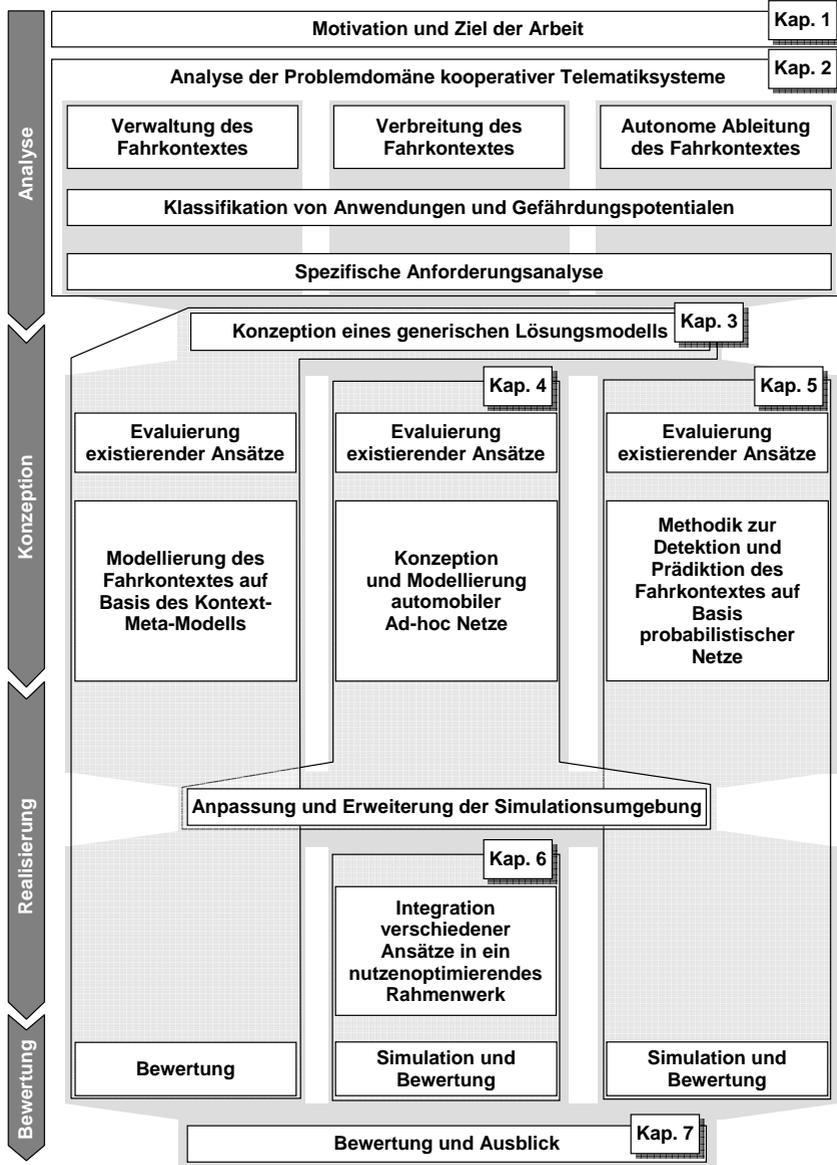


Abbildung 1.6: Vorgehensmodell

Kapitel 2

Kooperative Fahrerassistenzsysteme

2.1 Begriffliche Grundlagen

In modernen Fahrzeugen kommt mittlerweile eine große Anzahl an unterschiedlichen elektronischen Systemen zum Einsatz, mit unterschiedlichen Aufgabengebieten und Anwendungszwecken. Die Spanne reicht dabei von Systemen zur Erhöhung der Fahrstabilität in kritischen Fahrsituationen, über Navigationshilfen bis hin zu automatischen Lichtregelsystemen. Zur exakten Abgrenzung werden nachfolgend die wesentlichen Begriffe eingeführt und erläutert.

Grundlegend können Systeme unterschieden werden, die unmittelbar oder mittelbar an die Fahraufgabe gekoppelt sind. Donges und Braess [Don99, BD06] untergliedern die Aufgabe ein Fahrzeug zu führen in diesem Zusammenhang in die folgenden Teilaufgaben¹:

Navigation bezeichnet die Wahl der Fahrstrecke. Dabei führen bestimmte Ereignisse wie beispielsweise Baustellen oder Verkehrsstaus unter Umständen dazu, dass sich der Fahrer spontan für eine alternative Strecke entscheidet.

Bahnführung beschreibt die Aufgabe, das Fahrzeug sicher auf der Straße zu bewegen. Dies beinhaltet vor allem eine den äußeren Umständen angemessene Geschwindigkeit und die Einhaltung der Verkehrsregeln. Zudem sollen keine anderen Verkehrsteilnehmer durch das eigene Verhalten gefährdet werden.

Stabilität bezeichnet alle Aktionen, mit denen der Fahrer das Fahrgeschehen unmittelbar beeinflusst, beispielsweise die Betätigung von Lenkung, Gas oder Bremse.

Ein wesentliches Merkmal der Einteilung der Fahrzeugführung in diese drei Ebenen ist, dass die für die Ausführung der jeweils möglichen Aktionen zur Verfügung stehende

¹Donges und Braess bezeichnen diese als Ebenen

Zeit monoton abnimmt. Während die Wahl der Fahrtroute beispielsweise im Wesentlichen ohne zeitliche Vorgaben durchgeführt werden kann, reduziert sich die maximal zur Verfügung stehende Zeit bei der Durchführung einer notwendigen Vollbremsung auf lediglich Bruchteile einer Sekunde. Abbildung 2.1 zeigt die typischen Zeithorizonte der drei Ebenen der Fahraufgabe [BD06]. *Fahraufgabenbezogene Systeme*, wie beispielswei-

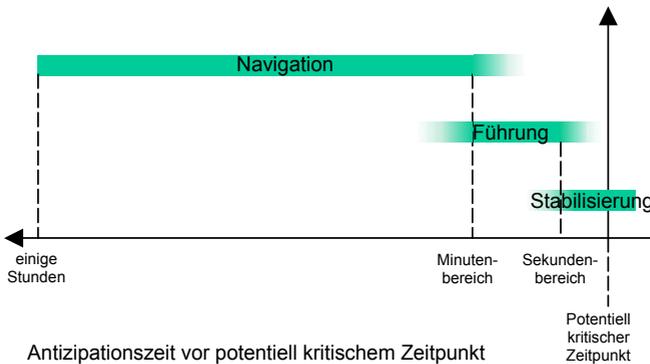


Abbildung 2.1: Typische Zeithorizonte der 3 Ebenen der Fahraufgabe nach Donges und Braess [BD06]

se das ABS oder Navigationssysteme, ermöglichen es dem Fahrer, das Fahrzeug effektiv, unfallfrei und im Sinne der lokal gültigen Straßenverkehrsordnung zu bewegen. Vielfach werden derartige Systeme auch als *Fahrerassistenzsysteme* bezeichnet [NR98]. Im Gegensatz dazu können unter *nicht fahraufgabenbezogenen Systemen* diejenigen zusammengefasst werden, die nicht mit der Fahraufgabe korreliert sind. In diese Klasse fallen zum einen Fahrzeugdiagnosesysteme, die den aktuellen Zustand des Fahrzeugs messen und anzeigen, beispielsweise den Öl- oder Kilometerstand. Zum anderen enthält diese Klasse auch alle Systeme, die die Wirtschaftlichkeit oder Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs steigern, beispielsweise moderne Motormanagementsysteme. Darüber hinaus lassen sich elektronische Fahrzeugsysteme dahingehend unterscheiden, ob sie *autonom* für den Fahrer erkennbare Aktionen ausführen, oder lediglich informativen Charakter besitzen, also *nicht autonom* agieren.

Im Sinne obiger Definition ist Fahrerassistenz dabei nicht notwendigerweise mit einem regelnden Eingriff des Systems in die Fahrdynamik des Fahrzeuges verbunden. Fahrerassistenz bezieht sich auch auf eine adäquate Rückmeldung bzw. Information des Fahrers, wie beispielsweise im Falle der *Park Distance Control* (PDC) zur Unterstützung des Fahrers beim Einpark-Vorgang. Darüber hinaus schließt Fahrerassistenz auch eine im Sinne des Fahrers gewünschte Navigation an den Zielort mit ein, also insbesondere Navigationssysteme, die adaptiv in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage die Route an den festgelegten Zielort dynamisch ändern.

Abbildung 2.2 zeigt eine weitere Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen [Don99]. *Informationssysteme (Information)* sind hierbei dahingehend charakterisiert, dass In-

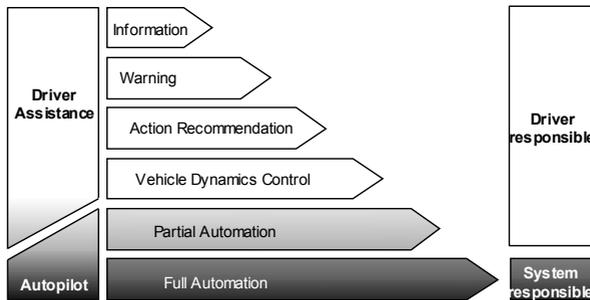


Abbildung 2.2: Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen nach [Don99]

formationen bezüglich der Fahrsituation, die dem Fahrer vom System zur Verfügung gestellt werden, dessen Wahrnehmungssicherheit erhöhen sollen. Die Interpretation dieser Information liegt dabei jedoch vollständig auf Seiten des Fahrers. Aufgrund der hieraus resultierenden kognitiven Beanspruchung des Fahrers kann nach Donges eine Unterstützung des Fahrers nur im Zeithorizont der Führungsaufgabe realisiert werden, also in einer Größenordnung von etwa drei Sekunden oder mehr. Nachsichtgeräte, die Anzeige der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Fahrzeug, oder auch Außentemperaturanzeigen sind typische Vertreter dieser Gruppe.

Über dies hinaus sollen sogenannte *Warnsysteme* (*Warning*) den Fahrer mittels spezifischer, zumeist visueller oder akustischer Hinweise auf akut erforderliche Eingriffe aufmerksam machen. Da auch dies eine kognitive Beanspruchung des Fahrers erfordert, liegt der Zeithorizont wiederum im Bereich der Führungsaufgabe. Typische Beispiele sind die Abstands- und Spurwechsel- oder Notbrems-Warnung, oder die Querverkehrsassistenz (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2). Die *intuitive Handlungswarnung* (*Action Recommendation*) soll durch eine einfache und unmissverständliche Handlungsempfehlung eine intuitiv richtige Reaktion des Fahrers bewirken, ohne diesen dabei kognitiv zu beanspruchen. Aus diesem Grund kann eine intuitive Handlungsempfehlung noch im Zeithorizont der Stabilisierungsaufgabe wirken. Als typische Vertreter nennt Donges beispielsweise das sogenannte aktive Gaspedal oder das aktive Bremspedal (siehe hierzu [DN96, PE03]).

Die sogenannte *Fahrdynamikregelung* (*Vehicle Dynamics Control*) stabilisiert das Fahrzeug selbsttätig in kritischen Situationen. Beispiele sind ABS, ESP oder DSC. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Fahrzeug in dieser Klasse bereits selbsttätig Eingriffe in die Fahrdynamik vornimmt. Auch wenn der Fahrer in diesem Fall keine Einflussmöglichkeiten auf die Wirkung des erfolgten Eingriffes hat, bleibt der Fahrer letztlich trotzdem in vollem Maße verantwortlich für das Fahrgeschehen. Diese Tatsache gilt auch für die *teilweise Automatisierung* (*Partial Automation*), bei dem das Assistenzsystem Teilfunktionen der Fahraufgabe auf der Führungsebene übernimmt, wie dies schon heute beispielsweise bei ACC der Fall ist. Im Unterschied zur *vollen Automatisierung* (*Full Automation*) bleibt die Aktivierungsentscheidung jedoch in der Hand des Fahrers, d.h. der Fahrer entscheidet, ob und zu welchem Zeitpunkt er das

2 Kooperative Fahrerassistenzsysteme

System nutzen möchte oder nicht. Bei der vollen Automatisierung greift das System auch ohne willentliche Aktivierung des Fahrers ein und führt (zeitlich begrenzte) Maßnahmen durch, beispielsweise wenn der Fahrer aufgrund von Sekundenschlaf momentan nicht in der Lage ist, seine Fahraufgabe voll zu erfüllen. Als Beispiel für ein sich bereits in der Entwicklung befindliches derartiges Assistenzsystem nennt Donges den autonomen Notbrems-Assistent [Bus05].

Die hier geschilderte Klassifizierung von Assistenzsystemen und die zeitliche Einordnung hinsichtlich ihrer Unterstützung bezüglich der Ebenen der Fahraufgabe kann dabei unabhängig von der technischen Umsetzung des Systems im Fahrzeug getroffen werden. Sie ist jedoch im Weiteren hinsichtlich konkreter Anforderungen verschiedener kommunikationsbasierter Telematiksysteme auch für diese Arbeit von Bedeutung. Abbildung 2.3 zeigt in diesem Zusammenhang exemplarisch die Zuordnung von ausgewählten Fahrerassistenzsystemen zum Grad der Fahrerunterstützung und den Ebenen der Fahraufgabe [EWGN00, Grü05]. Elektronische Fahrzeugsysteme zur Erhöhung der

Grad der Fahrerunterstützung	Navigationsebene	Führungsebene	Stabilisierungsebene
Information	Navigationssystem, Stau-Info	<i>Night Vision</i> , Adaptives Kurvenlicht	
Warnung		Verkehrszeichenerkennung, Aufmerksamkeitskontrolle, Spurwechselassistent	<i>Lane Departure Warning</i> (z. B. Lenkradvibration)
Korrigierender Eingriff			<i>Heading Control</i> (Lenkeingriff), Telematik-Steuerung, ACC, Fußgängererkennung
Übernahme der Fahraufgabe		Automatisches Fahren	Automatische Notbremse

Abbildung 2.3: Beispiele für die Einteilung von Fahrerassistenzsystemen [EWGN00, Grü05]

Sicherheit der Insassen stellen zweifelsfrei eine der wichtigsten Klassen elektronischer Systeme im Fahrzeug dar. Diese Sicherheitssysteme werden dabei oft unterschieden in *aktive* oder *passive* Sicherheitssysteme. Dabei spielt, wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, der Zeitpunkt der durchgeführten Aktion die entscheidende Rolle, genauer, ob die Aktion vor (pre-crash), während (crash) oder nach (post-crash) einem Unfall ausgeführt wird. Passive Systeme sollen im Falle eines Unfalls die Unfallfolgen für die sich im Fahrzeug befindenden Personen minimieren. Aktive Sicherheitssysteme, wie beispielsweise das Antiblockiersystem (ABS), die dynamische Stabilitätskontrolle (DSC - Dynamic Stability Control), das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) dienen dazu, Unfälle ganz zu vermeiden oder zumindest den Schweregrad eines Unfalls zu minimieren. Dabei agieren passive Systeme typischerweise erst im Falle eines Unfallgeschehens (crash), wohingegen aktive Systeme schon vor dem Unfall eingreifen (pre-crash) [Wil67, Sei05].

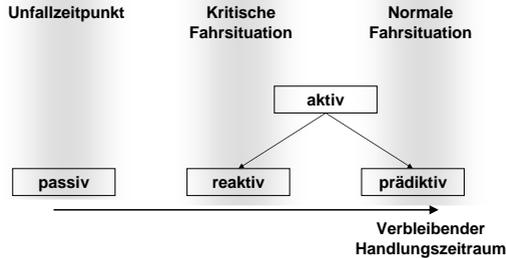


Abbildung 2.4: Klassifikation von Sicherheitsmaßnahmen in Fahrzeugen

Die am weitesten verbreiteten aktiven Sicherheitssysteme stabilisieren ein Fahrzeug in sogenannten Sondersituationen, d.h. sie unterstützen den Fahrer erst dann, wenn sich das Fahrzeug bereits in einer kritischen Fahr situation befindet, sind in diesem Sinne also *reaktiv*. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind ABS oder DSC. In modernen Fahrzeugen kommen aber auch immer mehr Systeme zum Einsatz, die es erlauben, das nahe Umfeld des Fahrzeuges zu analysieren. Dies ermöglicht eine vorausschauende Unterstützung des Fahrers, sobald in naher Zukunft möglicherweise ein kritischer Fahrzustand droht, jedoch noch bevor das Fahrzeug diesen Zustand erreicht. Beispiele für diese *prädiktiven* Assistenzsysteme sind die adaptive Abstandskontrolle (ACC - Automatic Cruise Control [Rob02]; auch Automatische Distanzregelung (ADR) oder DISTRONIC), die Bremsassistentz (BAS - Break Assistance) oder das PDC. Es ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren weitere prädiktive Assistenzsysteme verfügbar sein werden und die Fahrer beispielsweise auch beim Spurwechseln und Spurhalten unterstützen (siehe hierzu beispielsweise [PKTA05, Bis05, Robb, Mar02]).

Eine scharfe Zuordnung zwischen Sicherheits- und Komfortsystemen ist dabei allerdings nicht immer möglich. Beispielsweise kann eine automatische Abstandskontrolle durchaus auch als Komfortfunktion verstanden werden. Eine Unterscheidung erfolgt dabei oft auf Basis der Qualität der zugrunde liegenden Situationserfassung [Naa04] (siehe hierzu auch Abbildung 2.5)

Bisher beschränken sich Assistenz- und Informationssysteme in Fahrzeugen in der Regel auf Informationen, die mittels der eigenen im Fahrzeug verbauten Sensorik erfassbar sind. Im Falle fahrstabilisierender Systeme sind dies meist fahrdynamische Sensoren wie beispielsweise Längs - und Querschleunigung, Lenkwinkel, Gierraten oder Raddrehzahlen (siehe beispielsweise [Naa04]). Prädiktive Systeme hingegen bauen auf Sensorsysteme wie Radar, Lidar, Ultraschall oder Bilderkennungsverfahren auf, die in der Lage sind, das unmittelbare Umfeld des Fahrzeuges zu erkennen und zu interpretieren.

Externe Informationen gelangen bisher lediglich über allgemein empfangbare Radiosignale oder zelluläre Mobilfunksysteme in die Fahrzeuge. Insbesondere die effektive Routenwahl wird so durch externe Informationsquellen unterstützt, die das Fahrzeug mit (mehr oder minder) aktuellen Informationen über die momentane Verkehrslage entlang der geplanten Fahrtroute versorgen. In der Regel werden diese Informationen von

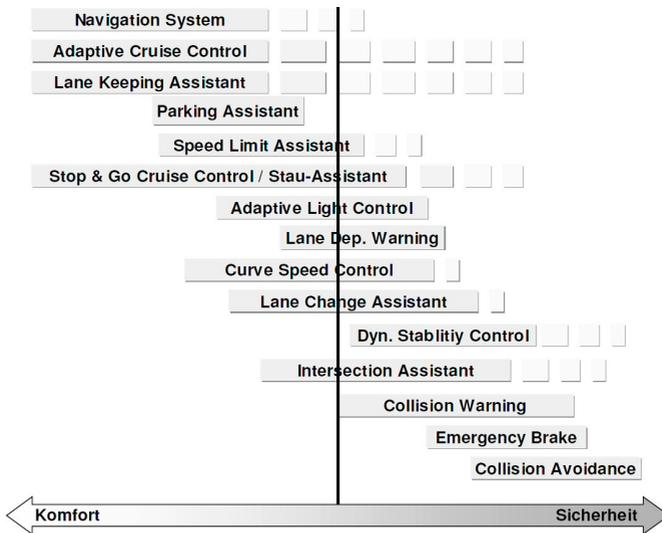


Abbildung 2.5: Einordnung von Assistenzfunktionen im Hinblick auf ihre Zugehörigkeit zu Sicherheits- und Komfortfunktionen nach Naab [Naa04]

Verkehrsdienstleistern oder öffentliche Einrichtungen zur Verfügung gestellt und über Radioprogramme (TMC / TPEG über RDS) oder Mobiltelefonnetze an die Fahrzeuge übermittelt. So ermöglicht beispielsweise das *Radio Data System* (RDS) [KM98] die Übermittlung von Verkehrsnachrichten im *Traffic Message Channel* (TMC) [Wike]. Mit TPEG [Unia, TPE] wurde 2002 darüber hinaus eine erweiterte und generischere Spezifikation von Verkehrshinweisen im Zusammenhang mit der Einführung der digitalen Radiobroadcasts (Digital Audio Broadcast - DAB [Wika]) geschaffen. Die Datenerhebung ist dabei üblicherweise von der Datenübermittlung entkoppelt. Diese geschieht dabei entweder manuell, wobei Verkehrsteilnehmer per Mobiltelefon den aktuellen Verkehrszustand an einen Verkehrsdienstleister melden, oder autonom auf Basis von Messvorrichtungen in der Straßeninfrastruktur (beispielsweise Induktionsschleifen). Derartige Systeme, bei denen Daten aus externen Quellen an die Fahrzeuge übermittelt werden, werden speziell im automobilen Umfeld oft unter dem Schlagwort der (*Verkehrs-*) *Telematik* zusammengefasst. Dabei zeichnet sich ein Telematiksystem generell durch die Symbiose zwischen Kommunikation und Informatik aus. Speziell im Bereich der Verkehrstelematik ergeben sich durch die Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umwelt neue „Potenziale, um Mobilität in ihren vielfältigen Ausprägungen für die Wirtschaft wie für den Einzelnen dauerhaft, effizient und möglichst umweltschonend zu gestalten“ [Bun]. Anwendungsbeispiele sind temporäre Seitenstreifenfreigaben, die Umleitung von Verkehrsströmen auf alternative Routen (Netzbeeinflussung) oder die adaptive Regelung des Zusammenflusses an Autobahn-Zufahrten (Knotenbeeinflussung). Abbildung 2.6 verdeutlicht in diesem Zusammenhang den typischen Informationsfluss der sich

aktuell im Einsatz befindlichen Telematiksysteme.

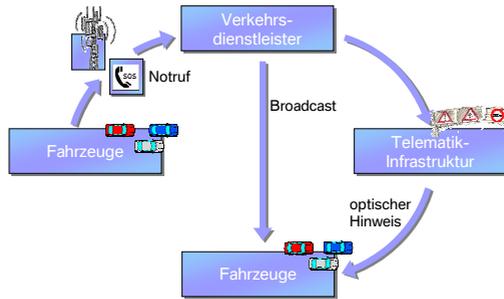


Abbildung 2.6: Klassischer Informationsfluss aktueller Telematiksysteme

Fahrerassistenzsysteme werden ergänzt durch sogenannte Fahrerinformationssysteme, wie sie beispielsweise in [KSB02] beschrieben sind. Dort werden unter der Kategorie Fahrerinformation diejenigen Anwendungen im Fahrzeug zusammengefasst, die den Fahrer mit für die Fahraufgabe relevanten oder von ihm explizit angeforderten Informationen versorgen, dabei aber nicht in die Fahrdynamik des Fahrzeugs eingreifen. Auf Basis dieser Definitionen ist die Menge der Fahrerinformationssysteme und Fahrerassistenzsysteme offensichtlich nicht disjunkt, d.h. bestimmte Anwendungen können sowohl als Fahrerinformationssystem in obigem Sinne und gleichzeitig auch als Assistenzsystem aufgefasst werden. Die Schnittmenge besteht dabei genau aus denjenigen Anwendungen, die nicht regelnd in die Fahrdynamik eingreifen, aber dennoch konkret fahraufgabenbezogen sind. Mißverständlicherweise bezeichnen Donges und Braess in [BD06] dies gerade als Warn- bzw. Informationssystem. Fahrerinformationssysteme ergänzen letztlich Assistenzsysteme dahingehend, dass sie dem Fahrer Informationen zur Verfügung stellen, die nichts mit der eigentlichen Fahraufgabe oder Routenfindung zu tun haben. Beispiele hierfür sind lokale Hotel- oder Veranstaltungsinformationen [KSB02, Kos05b]. Konsequenterweise existieren im Fahrzeug keine Systeme, die regelnd in das Fahrgeschehen eingreifen, ohne mit der Fahraufgabe in Beziehung zu stehen.

Zur Steigerung der Aktualität von Verkehrsmeldungen werden seit Ende des letzten Jahrhunderts auch die Fahrzeuge selbst als Informationsquellen verwendet. Der Begriff *Floating Car Data* (FCD, siehe beispielsweise [Wikb]) beschreibt genau diesen Sachverhalt, bei dem die Fahrzeuge selbst als mobile Sensoren dienen. Die Sensoren *schwimmen* sozusagen im Verkehr mit. Die mit einem Positionierungssystem wie GPS oder Galileo ausgestatteten Fahrzeuge melden dabei autonom die benötigte Zeit, die das Fahrzeug für die Passage eines definierten Streckenabschnittes benötigt, sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit an einen zentralen Telematikedienstleister². Die so erhaltenen Daten werden dort auf ihre Plausibilität hin ausgewertet und überprüft und anschließend zumeist über Radiokanäle den Fahrzeugen zurück übermittelt. Abbildung 2.7 zeigt nochmals schematisch die prinzipielle Funktionsweise. Die Qualität

²Beispielsweise T-Systems Traffic [T-S], Airsage [Air] oder BMW Assist [BMW]



Abbildung 2.7: Prinzipielles Funktionsprinzip des infrastrukturbasierten *Floating Car Data*-Systems (Quelle: BMW Group)

und Aktualität von Verkehrsmeldungen kann so deutlich gesteigert werden. Entgegen der eigentlichen begrifflichen Bedeutung, dass nämlich die Fahrzeuge selbst autonom die Datenerhebung durchführen, wird unter einem FCD-System meist die oben geschilderte gesamte Prozesskette verstanden, angefangen von der Datenerhebung im Fahrzeug, über die Verarbeitung beim Telematikdienstleister, bis hin zur Rückübermittlung an die Fahrzeuge. Unter dem Begriff *Extended Floating Car Data - XFCD*³ [Wikib] sollen in Zukunft auch fahrsicherheitsrelevante Informationen, wie beispielsweise Starkregen oder Straßenglätte erhoben werden. Wiederum beschreibt dabei die Terminologie lediglich die Datenerhebung, üblicherweise wird aber wie bei FCD die ganze Prozesskette mit dem Begriff assoziiert, also auch die Übermittlung an einen Telematikdienstleister.

Aus diesem Grund soll im Folgenden eine andere Terminologie verwendet werden, nämlich die *kooperativen Assistenz- und Informationssysteme*. Kooperative Systeme basieren auf der Zusammenarbeit von zwei oder mehreren, eigenständigen Systemen. In diesem Zusammenhang definieren Murphey und Pardalos [MP02] ein kooperatives System als

eine Mehrzahl dynamischer Entitäten, welche Informationen, Aufgaben und Randbedingungen untereinander teilen, um hierdurch ein gemeinsames nicht notwendigerweise singuläres Ziel zu erreichen.

Borghoff und Schlichter [BS00] grenzen den Begriff unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Kommunikation weiter folgendermaßen ein:

Kooperation bezieht sich auf diejenigen Kommunikationsaspekte, die nötig sind, um gemeinsame Ziele auszuhandeln und sich darauf zu verständigen.

³auch als Enhanced Floating Car Data - EFCD bezeichnet

Kooperative Fahrerassistenzsysteme werden demzufolge dadurch charakterisiert, dass die für den Fahrer oder das Fahrzeug relevanten Informationen von den Fahrzeugen autonom erhoben und zwischen ihnen ausgetauscht werden. In Abbildung 2.8 wird der daraus resultierende veränderte und erweiterte Informationsfluss veranschaulicht.

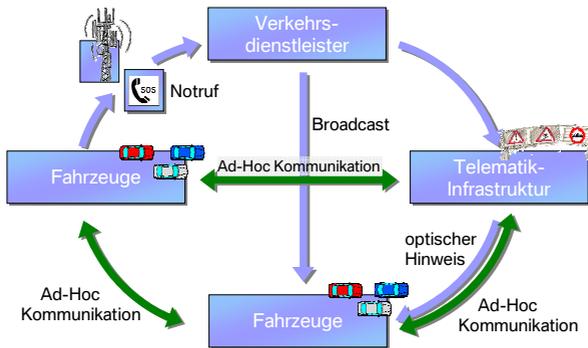


Abbildung 2.8: Erweiterung des Informationsfluss durch direkte Kommunikation und Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern

Eine wesentliche Voraussetzung für den effektiven und flächendeckenden Einsatz der beschriebenen Anwendungen bzw. Anwendungsklassen ist das effektive Verfügbarmachen der benötigten Informationen, also derjenigen Informationen, die den Zustand der Fahrzeuge in ihrer jeweiligen Fahr-situation bzw. im aktuellen Fahrkontext beschreiben. Zur genauen Abgrenzung der verwendeten Terminologie soll diese an dieser Stelle nochmals verdeutlicht werden.

In dieser Arbeit werden die Begriffe *Kontext*, *Situation* und *Beobachtung* (in Anlehnung an die Überlegungen in [Kos05b]) wie folgt verwendet: Im Zusammenhang mit Kontextsensitivität wird der Begriff Kontext zumeist im Sinne der von Dey et. al [DAS01] geprägten Bedeutung verwendet, nämlich als

jede für die Interaktion zwischen einem Nutzer und einer Anwendung relevante Information, die dazu benutzt werden kann, die Situation einer Entität zu charakterisieren. Entitäten sind dabei Personen, Orte oder Gegenstände, einschließlich dem Nutzer und der Anwendung.

Zur besseren Abgrenzung zum Begriff Situation (siehe Definition 4) soll im Folgenden jedoch die Definition von Derowski [Der06] verwendet werden:

Definition 1 (Kontext) Kontext ist jede Information, die den Zustand und die Umgebung, sei sie räumlich, zeitlich oder sozial, einer Entität, sowie die Entität selbst beschreibt oder spezifiziert.

Im Gegensatz zu Dey [Dey00] und Strang [Str03] ist der Begriff des Kontextes damit nicht eingeschränkt auf die funktionsrelevante Korrelation mit einer bestimmten

Funktionalität oder Aufgabe. Der Begriff des Zustands sei dabei aufbauend auf den Überlegungen von Schwickert und Fischer [SF96] analog zu Strang [Str03] gebraucht.

Definition 2 (Zustand) Der Zustand einer Entität wird beschrieben durch eine Menge von Zustandsvariablen. Jeder Zustand ist gegeben durch eine Belegung der Zustandsvariablen mit konkreten Werten. Der Zustandsraum ist gegeben durch die Menge aller Zustandsvariablen.

Eine Entität kann dabei, analog zur Definition von Dey, wiederum entweder eine Person, ein Ort oder ein Gegenstand sein. Beispiele für Kontext sind der Ort einer bestimmten Person oder die Temperatur an einem bestimmten Ort. An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein Ort je nach Betrachtungsweise als Entität oder Kontextinformation zu einer Entität aufgefasst werden kann. Dieser Umstand wird in Abschnitt 3.1 noch genauer erläutert werden. In Anlehnung an [Str03] kann beispielsweise der Zustandsraum einer Entität Fahrzeug wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Zustand}(\text{Fahrzeug}_{v_i}) = \left(\begin{array}{l} ZV_{\text{Zeit}} \\ ZV_{\text{Position}} \\ ZV_{\text{Richtung}} \\ ZV_{\text{Geschwindigkeit}} \\ ZV_{\text{Gewicht}} \\ \dots \end{array} \begin{array}{l} = 08.03.2007, 9 : 45 : 00 \\ = 48^\circ 9', 11^\circ 35' \\ = 37^\circ 18' \\ = 51,48 \text{ km/h} \\ = 1867,67 \text{ kg} \\ = \dots \end{array} \right)$$

Offensichtlich können verschiedene Ausprägungen einer Zustandsvariable existieren. So kann beispielsweise die Fahrzeugposition wie oben anhand einer Koordinate in Längen- und Breitengrad erfolgen. Jedoch kann die selbe Position auch in anderen Koordinatensystemen beschrieben werden, oder in der Anwendungsdomäne von Fahrzeugen beispielsweise durch Angabe der relativen Distanz zum Ursprungspunkt eines definierten Straßensegmentes (A8, Km 178,4). Strang führt deshalb im Zusammenhang mit Zustandsräumen ferner den Begriff des *Aspektes* und der Skala wie folgt ein [Str03].

Definition 3 (Aspekt) Ein Aspekt ist eine Dimension des Zustandsraums mit zugehöriger Beschreibung des semantischen Typs.

Dabei kann der gleiche Aspekt wie eben beschrieben in unterschiedlichen Metriken mit entsprechend korrespondierenden Wertebereichen quantifiziert werden, wobei typischerweise eindeutige fehlerfreie Abbildungsvorschriften zwischen den Skalen eines Aspektes existieren.

Kontext wird weiterhin unterschieden in *niederwertigen Kontext* und *höherwertigen Kontext* [Dey00]. Der Begriff niederwertiger Kontext bezieht sich dabei auf Kontextinformationen, die von einer Entität mittels Sensoren direkt gemessen werden können. Demgegenüber beschreibt der Begriff höherwertiger Kontext diejenigen zusätzlichen Kontextinformationen, die sich aus den direkt gemessenen Informationen mittelbar oder unmittelbar ableiten bzw. schlussfolgern lassen. Eine *Beobachtung* beschreibt in diesem Zusammenhang die von einer Entität mittels seiner eigenen Sensorik direkt gemessene (also unmittelbar beobachtete) Ausprägung eines Teils seines Kontextes. Beispielsweise ist der Ort eines Fahrzeugs, den das Fahrzeug mittels eines Positionierungsverfahrens selbst bestimmt hat, eine Beobachtung dieses Fahrzeugs. Beobachtungen

beruhen also ausschließlich auf niederwertigen Kontextinformationen. Genauer gesagt sind sie eine Teilmenge davon, nämlich genau diejenigen, die selbst direkt gemessen werden konnten.

Im Zusammenhang mit der Unterteilung in niederwertigen oder höherwertigen Kontext muss ferner berücksichtigt werden, dass die von Sensoren oder Sensorsystemen bereitgestellten Messwerte nicht notwendiger Weise standardisiert und daher in der Regel nicht allgemein verständlich sind. Letzteres bedingt, dass es nicht ausreicht, Kontext lediglich in niederwertigen und höherwertigen Kontext zu unterteilen. Vielmehr muss etwas feiner unterschieden werden zwischen:

Rohsensorinformationen. Rohsensorinformationen beschreiben die von einem bestimmten Sensor generierten Daten ohne jede weitere Vorverarbeitung. Beispielsweise messen sogenannte Regensensoren in Fahrzeugen nicht direkt die Regenintensität, sondern den Reflektionsgrad des Lichtes auf der Frontscheibe (vgl. beispielsweise [Roba]). Unterschiedliche Sensoren können dabei bei gleichem Feuchtigkeitszustand der Scheibe in Abhängigkeit des konkreten Messverfahrens unterschiedliche Ergebnisse liefern, die nicht kanonisch einheitlich interpretierbar sind. Rohsensorinformationen werden im Zusammenhang mit kontextadaptiven Systemen beispielsweise bei Strang [Str03] auch als *primäre Kontextinformationen* bezeichnet.

Abstrahierte Sensorinformationen. Abstrahierte Sensorinformationen bilden die Rohsensorinformationen auf einen standardisierten Wertebereich ab, beispielsweise auf die aktuelle Niederschlagsmenge in Liter pro Quadratmeter.

Aggregierte Informationen. Aggregierte Informationen fassen eine Reihe von unterschiedlichen Beobachtungen zu einer aggregierten Information zusammen. So kann beispielsweise eine Vielzahl an Beobachtungen des Geschwindigkeitsverlaufs unterschiedlicher Fahrzeuge zusammengefasst werden. Das Aggregat enthält dabei die Durchschnittsgeschwindigkeit und Varianz der einzelnen Fahrzeugbeobachtungen.

Abgeleitete Informationen. Abgeleitete Informationen sind alle Informationen, die mittels Schließmechanismen automatisch aus den vorhandenen niederwertigen Informationen abgeleitet werden können.

Rohsensorinformationen und abstrahierte Informationen gehören dabei zur Klasse des niederwertigen Kontextes, da sie lediglich eine einzelne Beobachtung repräsentieren. Im Gegensatz dazu werden aggregierte und abgeleitete Informationen durch Verrechnung verschiedener Informationen erzeugt. Es entsteht damit eine neue Information, weshalb diese Informationen zur Klasse der höherwertigen Kontextinformationen zu zählen sind. Abbildung 2.9 visualisiert diesen Zusammenhang nochmals graphisch. In diesem Zusammenhang führt Strang in [Str03] weiterhin den Begriff der *sekundären Kontextinformationen* ein, die im Gegensatz zur primären Kontextinformationen bereits Vorverarbeitungsschritte durchlaufen haben. Somit stellen sowohl abstrahierte, als auch aggregierte und abgeleitete Kontextinformationen sekundäre Informationen dar.

Eng mit dem Begriff des Kontextes verwandt ist auch der Begriff der Situation, welcher in vielen Fällen sogar gleichbedeutend verwendet wird. Die Trennung zwischen

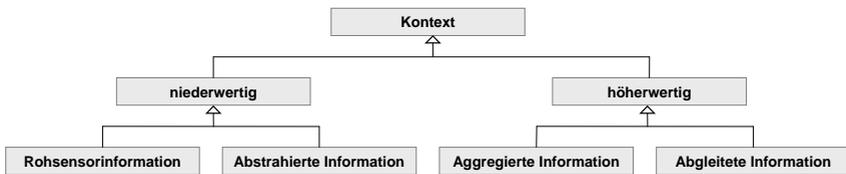


Abbildung 2.9: Verfeinerte Klassifizierung niederwertigen und höherwertigen Kontextes

Situation und Kontext ist jedoch für die folgenden Betrachtungen von Bedeutung und soll daher kurz dargestellt werden. Strang definiert in [Str03] eine Situation als die Menge der funktionsrelevanzfreien Kontextinformationen. Aufgrund der obigen Definition von Kontext, die bereits eine Aufhebung der Bindung von Kontext an eine bestimmte Aufgabe vollzogen hat, ist die Strangsche Semantik von Situation damit gleichbedeutend zu der dieser Arbeit zugrunde liegenden Auffassung von Kontext. Kosch [Kos05b] spezifiziert eine Situation demgegenüber in stärkerer Anlehnung an den herkömmlichen lexikalischen Sprachgebrauch (siehe beispielsweise [RB99]) als *augenblicklichen Zustand*. Die Charakterisierung einer Situation beschränkt sich dabei auf einen spezifischen, klar definierten Zeitpunkt. Im Gegensatz dazu beinhaltet Kontext auch historische Informationen einer Entität. Eine Situation beschreibt dabei eine spezifische Ausprägung bestimmter Umweltparameter. Weiterhin muss nach Kosch eine Situation im Gegensatz zu Kontext, der sich immer auf eine bestimmte Entität bezieht, nicht zwingend an eine Entität gebunden sein, sondern kann auch losgelöst von bestimmten Objekten und Subjekten eintreten. Jedoch ist von einer Situation üblicherweise mindestens eine Entität betroffen, in der Art, dass sie sich die in der beschriebenen Situation befindet. Die Einschränkung des Situationsbegriffs auf einen fixen Zeitpunkt ist jedoch insgesamt betrachtet so nicht gerechtfertigt. Die Aussage, dass sich zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Entität in einer bestimmten Menge von Situationen befindet ist zwar zutreffend, jedoch kann eine bestimmte Situation über einen bestimmten Zeitraum existent sein. Aus diesen Gründen soll im Folgenden der Begriff der Situation wie folgt verwandt werden.

Definition 4 (Situation) Eine Situation ist die charakteristische Ausprägung einer zur Abgrenzung dieser Situation nötigen Menge des Kontextes einer oder mehrerer Entitäten in einem bestimmten Zeitraum.

Der Zustand dieser Entitäten muss sich also in einem vorgegebenen Wertebereich bewegen. Eine Situation, bzw. im Speziellen eine *Fahrsituation*, welche die Situation eines bestimmten Fahrzeugs hinsichtlich seiner Umgebung beschreibt, wird also bestimmt durch eine spezifische Menge von konkreten Umweltbedingungen, genauer, durch eine spezifische Ausprägung situationsrelevanter Kontextaspekte. Ein Beispiel hierfür ist ein Stau, der genau dadurch charakterisiert ist, dass eine Menge von Fahrzeugen in einem bestimmten Bereich über einen bestimmten Zeitraum gar nicht oder nur sehr langsam fahren kann. Ein anderes Beispiel ist starker Regen, der durch die Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit pro Fläche charakterisiert wird. Dabei kann die Situation starker Regen entweder auf ein geografisches Ausbreitungsgebiet bezogen werden, oder wiederum

direkt auf die Menge der davon betroffenen Entitäten, also denjenigen Fahrzeugen, die sich in diesem Ausbreitungsgebiet befinden (siehe hierzu auch die weiterführenden Betrachtungen in Abschnitt 3.1). An dieser Stelle sei angemerkt, dass nach obigen Definitionen eine Situation auch als eine höherwertige, also abgeleitete, Kontextinformation betrachtet werden kann, sofern sie lediglich auf eine Entität bezogen wird.

Konkrete Situationen sind durch die Ausprägungen der aktuellen Kontextaspekte der relevanten Entitäten charakterisiert und haben typischerweise temporäre Abhängigkeiten und eine begrenzte Gültigkeitsdauer. Situationen müssen nicht wechselseitig semantisch disjunkt zueinander sein, sondern können sich in ihrer Semantik, sowie in den Ausprägungen der sie charakterisierenden Kontextaspekte überschneiden. Einer Situation kann zu jedem Zeitpunkt der Gültigkeitsdauer mindestens eine Entität zugeordnet werden, für die diese Situation zu diesem Zeitpunkt gilt. Fahr Situationen, die einen regelnden bzw. stabilisierenden Eingriff des Fahrzeugs erfordern, werden im Zusammenhang mit Assistenzsystemen in der Regel auch als *Sondersituationen* bezeichnet.

In direktem Zusammenhang mit den Begriffen Kontext und Situation stehen auch die der *kontextabhängigen* oder *situationsbezogenen* Systeme. Die üblicherweise verwendete Interpretation der Begriffe (siehe beispielsweise [Str03, Kos05b]) spezifiziert dabei ein *kontextsensitives System* dahingehend, dass die konkrete Wirkweise einer Anwendung über die Zeit in Abhängigkeit der aktuellen Kenngrößen der relevanten Kontextinformationen veränderlich ist – sich also durch die Interpretation von Kontextinformationen permanent an die gegebenen Rahmenbedingungen anpasst. Dabei spricht man im Speziellen genau dann von einem kontextsensitiven System, wenn entweder die Ausführung, oder die Initialisierung einer Anwendung oder eines Dienstes diesbezüglich veränderlich ist. In gleicher Weise wird ein situationsbezogenes System durch dessen Anpassung an die aktuelle Situation charakterisiert, wobei die Situation als solche wie erwähnt wiederum lediglich durch eine spezielle Ausprägung bestimmter Kontextaspekte gekennzeichnet ist. Insofern unterscheiden sich die beiden Begriffe praktisch nicht. Aus theoretischer Sicht stellen die situationsbezogenen Systeme jedoch eine Untermenge der kontextabhängigen Systeme dar, da bei letzteren die zeitliche Veränderlichkeit durch einzelne Parameter bedingt werden kann. Die Adaption ist also feiner aufgelöst. Da die Festlegung der Ausprägungen einer bestimmten Situation, sowie die Anzahl der theoretisch möglichen Spezifikationen beliebig ist, kann jeder Wechsel der Zustandsgröße eines Kontextaspektes jedoch auch als Übergang in eine andere Situation modelliert werden. Dies hat zur Konsequenz, dass jedes kontextabhängige System auch als situationsbezogenes System modelliert werden kann (und umgekehrt). Beide Methodiken sind folglich gleich mächtig. Im praktischen Einsatz wird jedoch versucht werden, die Zahl der möglichen unterschiedlichen Zustände so gering wie möglich zu halten und die zeitliche Veränderlichkeit durch den Einsatz von Filtern zu reduzieren, um so die resultierende Komplexität der Anwendungslogik zu minimieren. Vor diesem Hintergrund bieten im Hinblick auf die praktische Umsetzbarkeit derartiger adaptiver Anwendungen die situationsbezogenen Systeme deutliche Vorteile, wobei die Unterscheidung unter pragmatischen Gesichtspunkten wie erwähnt von untergeordnetem Interesse ist, und deshalb in der Regel beide Begriffe zumeist semantisch gleichbedeutend verwendet werden. Die Unterscheidung ist in Kapitel 3.1 jedoch noch von Bedeutung.

2.2 Zukünftige kooperative Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeug

Im Folgenden sollen nun ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige wesentliche mögliche Anwendungsfelder kooperativer Telematiksysteme vorgestellt und deren spezifische Anforderungen und Charakteristika diskutiert werden.

Die Möglichkeit, Informationen zwischen Fahrzeugen untereinander, bzw. zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur (beispielsweise Ampeln) auszutauschen, ermöglicht eine Vielzahl neuer Anwendungen im Fahrzeug. Aus der Vielzahl an möglichen kooperativen Anwendungen resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Telematiksysteme. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Quantität, Qualität und Verbreitung der notwendigen Kontextinformationen. Aus diesem Grund soll, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, eine exemplarische Auswahl an möglichen kooperativen Anwendungen im Folgenden kurz beschrieben und erläutert werden. Im Speziellen werden aktuell in dem vom BMBF⁴ geförderten Forschungsprojekt Network-On-Wheels⁵, sowie im von einigen europäischen Fahrzeugherstellern initiierten Konsortium Car-to-Car Communication Consortium⁶ die folgenden kooperativen Telematikanwendungen diskutiert.

2.2.1 Fahraufgabenbezogene Anwendungen

In der Klasse der fahraufgabenbezogenen Anwendungen ergeben sich eine Vielzahl an neuen Funktionalitäten, deren Fokus darauf liegt, das Fahren insgesamt sicherer zu gestalten.

Lokale Gefahrenwarnung (Local Danger Warning) Der Fokus der sogenannten lokalen Gefahrenwarnung liegt darin, beobachtete kritische Verkehrs- und Straßenzustände anderer Fahrzeuge zur Verfügung zu stellen. Solche kritischen Zustände liegen dann vor, wenn entweder die Sichtverhältnisse gering sind (eingeschränkte Sicht), die Fahrbahnbeschaffenheit schlecht ist (eingeschränkte Fahrbahnhaftung bzw. Reibwert) oder sich ein Hindernis auf der Fahrbahn befindet (Fahrbahnhindernis). Die lokale Gefahrenwarnung wird oft weiter unterteilt in die Anwendungsgebiete *Straßenzustandswarnung (Vehicle-Based Road Condition Warning)* und *Sichtweitenwarnung (Visibility Enhancer)*. Als Ergänzung zur Straßenzustandswarnung wird oftmals zusätzlich die sogenannte *Straßencharakteristikmeldung (Road Feature Notification)* unterschieden. Der Unterschied zwischen beiden Anwendungen ist, dass die Straßenzustandswarnung lediglich temporär gültige Umweltbedingungen beschreibt, die mit einem bestimmten Streckenabschnitt oder einer bestimmten Position verknüpft sind, beispielsweise Rollsplit oder Glätteis. Im Gegensatz dazu beschreiben Straßencharakteristikmeldungen nur solche straßenbezogenen Eigenschaften, die längerfristig vorherrschen. Beispiele hierfür sind Spurrillen, Kurvenradien oder -Überhöhungen oder maximale Durchfahrts Höhen von Brücken und Unterführungen. Diese Straßencharakteristika können idealerweise unmittelbar mit einer digitalen Straßenkarte verknüpft werden. Zur Realisierung

⁴www.bmbf.de

⁵www.network-on-wheels.de

⁶www.car-2-car.org

dieser Anwendungen ist neben der Fahrzeugposition typischerweise die Auswertung der lokalen Sensorik im Fahrzeug von Bedeutung.

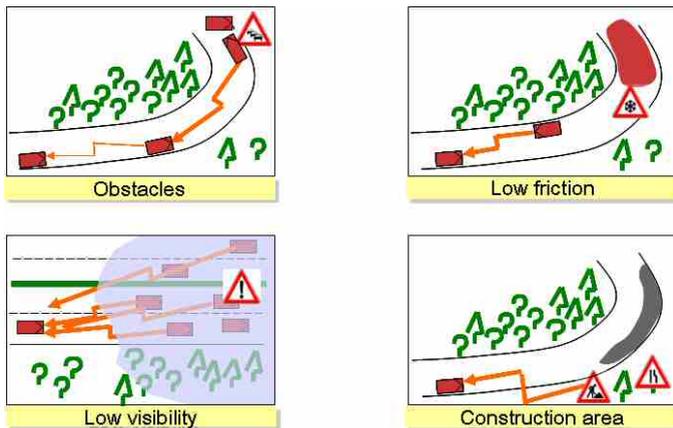


Abbildung 2.10: Anwendungsfelder der lokalen Gefahrenwarnung [PRe06b]

Sondersignalfahrzeug-Annäherung (Approaching Emergency Vehicle)

Die Sondersignalfahrzeugannäherung versorgt die Fahrer gezielt mit Informationen darüber, wo sich aktuell ein Einsatzfahrzeug mit Sondersignal in der Nähe befindet und in welche Richtung es sich weiter bewegen wird. Einsatzfahrzeuge werden so zum einen weniger häufig übersehen, zum anderen kann durch ein frühzeitiges Handeln der vorausfahrenden Fahrzeuge die Strecke schneller geräumt und so die Anfahrt zum Einsatzort verkürzt werden. Einsatzfahrzeuge verbreiten hierzu fortwährend ihre aktuelle Position, Geschwindigkeit und Fahrrichtung.

Unfall-Warnung (Post-Crash Warning) Falls ein Fahrzeug selbst in einen Unfall verwickelt ist, so kann es dies in der Regel autonom feststellen und diese Information wiederum anderen Fahrzeugen in der Umgebung mitteilen. Die Kenntnis über einen Unfall auf der weiteren Fahrstrecke kann das Risiko von Folgeunfällen signifikant senken. Unfälle des eigenen Fahrzeugs können über Längs- und Querschleunigungssensoren relativ sicher erkannt werden, wobei die Zuverlässigkeit abhängig ist vom Schweregrad des Unfalls. Ein weiteres relativ sicheres Indiz ist die Auslösung von Airbags, da diese unmittelbar auf speziellen Sensoren zur Erkennung eines Unfallgeschehens basiert.

Geisterfahrer-Warnung (Wrong Way Driver Warning) Eine digitale Karte und ein hinreichend genaues Positionierungssystem vorausgesetzt, können Fahrzeuge automatisch erkennen, wenn sie sich aktuell auf der falschen Seite einer Autobahn befinden. Auch diese Erkenntnis kann wiederum unmittelbar anderen betroffenen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung gestellt werden und das Risiko von Folgeunfällen deutlich

senken. Die automatische Detektion eines Geisterfahrers, dessen Fahrzeug nicht über ein entsprechendes System verfügt, durch die anderen Verkehrsteilnehmer, ist demgegenüber über herkömmliche Fahrzeugsysteme nur bedingt möglich.

Kooperative Kollisionswarnung (Cooperative Collision Warning) Zwei Fahrzeuge, die sich im unmittelbaren weiteren Fahrverlauf gefährlich nahe kommen, können dies durch Bekanntgabe ihrer jeweiligen Positionen erkennen und direkt (autonom regelnd) oder indirekt (Information der Fahrer) in das weitere Fahrgeschehen eingreifen. Die kooperative Kollisionswarnung stellt streng genommen eine Anwendungsdomäne dar, die oftmals noch weiter unterteilt wird. Sie beinhaltet zum einen die sog. *Auffahr-Warnung* (*Cooperative Forward Collision Warning*), welche eine Ergänzung zu sensorgestützten Abstandswarnsystemen wie beispielsweise ACC darstellt und dafür Sorge tragen soll, den Sicherheitsabstand zum voraus fahrenden Fahrzeug nicht zu unterschreiten. Zum anderen beinhaltet diese Anwendungsdomäne auch Hilfestellungen beim Wechsel der Fahrspur (*Spurwechsel-Warnung - Lane Change Warning*), welche wiederum auf der sogenannten *Todwinkel-Warnung* (*Blind Spot Warning*) aufbaut, und zudem speziell bei Autobahnauffahrten damit einhergehend auch die sogenannte *Einfädel-Warnung* (*Highway Merge Assistant*). Eng verwandt mit der Auffahr-Warnung ist auch die *kooperative Adaptive Geschwindigkeitsregelung* (*Cooperative Adaptive Cruise Control*), wobei sich letztere dadurch unterscheidet, dass ein regelnder Eingriff ins Fahrzeug vorgenommen wird. Zur Realisierung kooperativer Kollisionswarnsysteme sind in der Regel die aktuellen Positionen, Fahrrichtungen und Geschwindigkeiten der betroffenen Fahrzeuge notwendig. Aufgrund des hohen Unfallrisikos wird zur Verbesserung der Sicherheit speziell an Kreuzungen oftmals auch die Anwendung der *Kooperativen Kreuzungsassistenz* (*Intersection Collision Warning*) extra benannt. Da in Kreuzungssituationen viele Fahrzeuge aufeinander treffen, ihre Fahrtziele und Abbiegewünsche nur teilweise bekannt sind, und typischerweise weitere Einflussfaktoren wie wechselnde Lichtsignalgeber oder Fußgänger vorhanden sind, stellt die Realisierung der kooperativen Kollisionswarnung in Kreuzungsszenarien eine besondere Herausforderung dar. Eine weitere oft verwendete Unterscheidungsmöglichkeit benennt sogenannte *Abbiege-Assistenten* (*Turn Assistance*), und hier insbesondere die *Linksabbiege-Assistenz* (*Left Turn Assistance*)⁷. Die Anwendung der Linksabbiege-Assistenz versorgt den Fahrer mit Informationen bezüglich des zu kreuzenden Verkehrs, speziell des Gegenverkehrs.

Warnung vor Rotlichtüberschreitung (Traffic Signal Violation Warning)

Im Zusammenhang mit Kreuzungsszenarien kann dem Fahrer auch eine bevorstehende Rotlichtüberschreitung angezeigt werden, damit dieser das Fahrzeug noch rechtzeitig vor der Halteline zum Halten bringen kann. Ein derartiges System kann auf Basis einer Kommunikationsmöglichkeit mit dem entsprechenden Lichtsignalgeber relativ einfach realisiert werden. Das Fahrzeugsystem nutzt dazu die von der Lichtsignalsteuerung bereitgestellten aktuellen Schaltzustände der vorhandenen Lichtsignalgeber, deren Richtungszuständigkeiten, sowie die Position der in Frage kommenden Haltelinien. Dies kann in Abhängigkeit der Kreuzungskomplexität relativ aufwändig sein, vor allem, wenn an einer Kreuzung viele Straßen zusammenlaufen und es spezielle Si-

⁷In Ländern mit Linksfahrgebot entsprechend die Rechtsabbiege-Assistenz

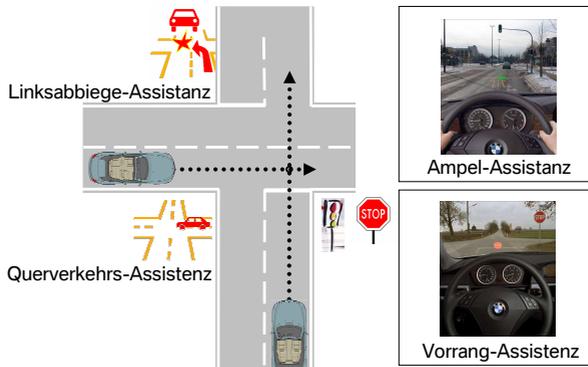


Abbildung 2.11: Querverkehr- und Kreuzungsassistenten (Quelle F. Klanner, BMW Group Forschung und Technik)

gnalgeber für bestimmte Abbiegerichtungen gibt. Das Fahrzeug kann so auf Basis der aktuellen Position und geschätzten Fahrtroute eine mögliche Rotlichtüberschreitung erkennen. Werden zusätzlich von anderen Fahrzeugen gezielt Reibwertschätzungen an den entsprechenden Positionen vor den Haltelinie übermittelt, kann der ein optimaler Zeitpunkt der Fahrerinformation berechnet werden. Sehr ähnlich zur Warnung vor Rotlichtüberschreitung ist die *Warnung vor Stoppschildüberschreitung (Stop Sign Violation Warning)*. Die Realisierung ist jedoch insgesamt einfacher, da keine Zustände der Signalgeber übermittelt werden können. Es ist lediglich Kenntnis über die Existenz des betreffenden Stoppschildes nötig, welche auch aus digitalem Kartenmaterial gewonnen werden kann. Um eventuellen Problemen mit veraltetem Kartenmaterial entgegen zu wirken, ist jedoch auch eine kommunikationsgestützte Variante denkbar, bei der das Schild periodisch über seine Existenz und genaue Position informiert. Die Fahrerinformation kann dann analog zur Rotlichtüberschreitung realisiert werden. Eine weitere Ergänzung dazu stellt die *Warnung vor Vorfahrtsmissachtung (Right of Way Violation Warning)* dar. Das Fahrzeug kann hier zusätzlich prüfen, ob sich aktuell ein vorfahrtberechtigtes Fahrzeug nähert. Diese Anwendung stellt also letztlich eine Verfeinerung der kooperativen Kollisionswarnung dar.

Notbrems-Warnung (Emergency Electronic Brake Lights) Bei starker Verzögerung des eigenen Fahrzeugs kann in einfacher Weise eine entsprechende Warnung erzeugt werden. Damit soll das Risiko von Auffahrunfällen minimiert werden, die daraus resultieren, dass die Bremswirkung des vorausfahrenden Fahrzeugs unterschätzt wird, oder das bremsende Fahrzeug durch ein anderes verdeckt wird und so nicht rechtzeitig gesehen werden kann. Diese Anwendung ist daher stark verwandt mit der Auffahr-Warnung. Ähnlich wie kooperative Kollisionswarnsysteme basiert die Notbrems-Warnung hauptsächlich auf der Kenntnis der aktuellen Fahrzeugpositionen, sowie der Stärke der erreichten Verzögerung.

Autonome Fahrzeugverfolgung (Cooperative Vehicle-Highway Automation System - Platoon) Die sogenannte autonome Fahrzeugverfolgung ermöglicht es, dem vorausfahrenden Fahrzeug exakt zu folgen. Geschwindigkeits- und Richtungsregelung werden vom Fahrzeug automatisch vorgenommen, so dass der Fahrer vollständig von der Fahraufgabe befreit ist. Ein zuverlässiges Kommunikationssystem zwischen den betroffenen Fahrzeugen vorausgesetzt, kann dies durch permanente Übertragung der aktuellen Position, Geschwindigkeit und Richtung des vorausfahrenden Fahrzeugs realisiert werden.

Kooperative Blendreduzierung (Cooperative Glare Reduction) Der Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen ermöglicht auch die autonome Regelung der Leuchtweite. Sofern der aktuelle Straßenverlauf bekannt ist, beispielsweise mittels einer digitalen Straßenkarte, kann auf Grundlage der aktuellen Fahrzeugpositionen auch die Leuchtweite von Fahrzeugen autonom so geregelt werden, dass es zu keinen Blendeffekten der Fahrer durch die Scheinwerfer entgegenkommender oder nachfolgender Fahrzeuge kommt. In einer Basisversion kann gegebenenfalls das Fernlicht automatisch aktiviert und deaktiviert werden. Adaptive Lichtregelsysteme, wie sie beispielsweise schon heute in einigen Fahrzeugen verfügbar sind, können zudem dafür verwendet werden, den Straßenverlauf gemeinschaftlich optimal auszuleuchten. Letzteres wird manchmal auch als *Kooperative Lichtregulierung (Adaptive Headlamp Aiming)* bezeichnet.

Kooperative Verkehrsinformationen (Cooperative Traffic Information) Fahrzeuge sind ideal dazu geeignet, die aktuelle Verkehrssituation selbsttätig zu erkennen. Nötig ist hierzu in erster Linie die aktuelle Position bzw. der gerade befahrene Streckenabschnitt, sowie Kenntnis über die dort üblicherweise gefahrene oder maximal zulässige Geschwindigkeit. Ermittelt wird die Verkehrslage üblicherweise auf Basis der durchschnittlichen Geschwindigkeit in einem bestimmten Streckenabschnitt, sowie die zur Befahrung benötigte Zeit. Durch die permanente autonome Erhebung des Verkehrsgeschehens durch die Fahrzeuge selbst, ergibt sich ein wesentlich genaueres Bild bezüglich des aktuellen und in Zukunft zu erwartenden Verkehrsgeschehens. Auf telefonische Meldungen betroffener Fahrer, sowie spezielle bauliche Maßnahmen zur autonomen Verkehrserfassung an wichtigen Punkten kann so im Prinzip verzichtet werden. Ein derartiges kooperatives Verkehrserfassungssystem ist dem zu Folge aktueller und - ein entsprechendes Kommunikationssystem vorausgesetzt - langfristig deutlich billiger als die bisher zum Einsatz kommenden Systeme. Das zuvor geschilderte Floating Car Data ist wie beschrieben eine Umsetzung dieses Konzeptes über zelluläre Mobilfunknetze. Zur Abgrenzung bezüglich der infrastrukturbasierten Variante wird dies im Fall einer ad-hoc Vernetzung der Fahrzeuge oft auch als *Selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem* oder *Decentralized Floating Car Data* bezeichnet. *SOTIS (Self-Organizing Traffic Information System)* [WER⁺03] beschreibt in diesem Zusammenhang ein derartiges System, bei dem die entsprechenden Informationen hinsichtlich der aktuellen Verkehrssituation über ein mobiles Ad-hoc Netzwerk direkt zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden.

Erweiterte Adaptive Navigation - Enhanced Route Guidance and Navigation Im Zusammenhang mit aktuellen Verkehrsinformationen kann auch die

Routenentscheidung signifikant verbessert werden. Anders als bei schon existierenden verkehrsadaptiven Navigationssystemen kann durch Kooperation der Fahrzeuge die Gesamtleistung des Verkehrsnetzes weiter verbessert werden. Im Speziellen können negative Effekte ausgeglichen werden, die daraus resultieren, dass sich zu viele Fahrzeuge für dieselbe Umleitungsrouten entscheiden. Dies kann unter Umständen auch zu einer Überlastung der gewählten neuen Route führen, die mitunter schwerer wiegt, als die Verkehrsbehinderung auf der ursprünglich geplanten Route. Dieser kontraproduktive Effekt adaptiver Navigationssysteme kann generell auf zwei Arten begrenzt werden. Zum einen durch spieltheoretische Konzepte, die die wahrscheinlichen Entscheidungen der anderen Verkehrsteilnehmer miteinbeziehen. Die eigene Entscheidung kann so entsprechend angepasst werden. Unter dieser Sichtweise gleicht die adaptive Navigation letztlich einem Spiel, bei dem jeder Beteiligte unabhängig versucht, die für ihn beste Routenentscheidung zu treffen. Wesentlich sinnvoller erscheint demgegenüber jedoch eine Optimierung des Gesamtverkehrsdurchsatzes insgesamt. Die Kooperation zwischen Fahrzeugen ermöglicht die gezielte Abstimmung der Routenentscheidungen aller betroffener Fahrzeuge, in Abhängigkeit ihres jeweiligen Fahrtzieles. Auf diese Weise kann eine optimale Routenwahl für alle Fahrzeuge getroffen werden, in der Art, dass die geschätzte akkumulierte Gesamtreisedauer aller Verkehrsteilnehmer minimiert wird. Es ist offensichtlich, dass unter Umständen manche Verkehrsteilnehmer im Vergleich zu nicht abgestimmten Verfahren eine etwas schlechtere Routenzuweisung bekommen. Unter Berücksichtigung einer möglichen Überlastsituation ist die Entscheidung jedoch trotzdem sinnvoller. Es muss allerdings sichergestellt werden, dass nicht einzelne Verkehrsteilnehmer zugunsten Anderer dauerhaft einseitig schlechter gestellt werden.

Adaptive Verkehrsbeeinflussung (Intelligent Traffic Flow Control) Ein weiteres Anwendungsgebiet im Zusammenhang mit aktuellen Verkehrsinformationen stellen adaptive Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung dar. Dies beinhaltet innerstädtisch zum einen die adaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen in Abhängigkeit des aktuellen Verkehrsgeschehens. Je mehr Kenntnis eine Ampel beispielsweise über die Anzahl der Fahrzeuge hat, die sich ihr aus unterschiedlichen Richtungen nähern, desto effizienter können die einzelnen Ampelphasen geschaltet werden. Kennt die Ampel zusätzlich noch die lokalen Fahrziele, so kann gerade in komplexen Kreuzungsszenarien der effektive Durchsatz signifikant erhöht werden. Eine Vernetzung der Lichtsignalanlagen würde zudem eine Optimierung des Gesamtverkehrsflusses in einem größeren Bereich ermöglichen. Darüber hinaus eröffnet es die Kommunikation mit der Lichtsignalanlage auch in einfacher Weise, privilegierten Verkehrsteilnehmern Vorrang zu gewähren. Dies gilt in erster Linie für Einsatzfahrzeuge mit Sondersignal (*Sondersignalfahrzeug-Vorrang - Signal Preemption*), aber auch beispielsweise für Fahrzeuge des öffentlichen Nahverkehrs (siehe beispielsweise [The]). Auf der anderen Seite kann eine adaptive Verkehrsbeeinflussung auch auf Autobahnen zum Einsatz kommen, wobei hier in erster Linie die Vermeidung von Staus im Vordergrund steht, bzw. deren Verkürzung und schnelle Auflösung. Um Staus erst gar nicht entstehen zu lassen, kann zum einen der Zufluss zum Stau begrenzt werden, indem der nachfolgende Verkehr frühzeitig abgebremst wird. Zum anderen kann zusätzlich der Zufluss zur Autobahn selbst begrenzt werden, wie dies in beispielsweise den USA an einigen Highways praktiziert wird (man spricht in diesem Zusammenhang meist von (highway) *ramp metering* - siehe beispielsweise [Wid]). Ersteres ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn dies tatsächlich zu einer

Reduktion der Anzahl an Fahrzeugen pro Zeiteinheit führt, was im Speziellen dann gilt, wenn der Abstand trotz der geringeren Geschwindigkeit nicht verringert wird [VV]. Zum anderen kann auch die Stauauflösung beschleunigt werden, in dem Fahrer dazu angehalten werden, zügig und mit zunächst geringem Abstand anzufahren. Alle Maßnahmen können durch direkte Kooperation auch unabhängig von variablen Verkehrszeichenanlagen an den Autobahnen realisiert werden. Die gezielte Anzeige im Fahrzeug kann zudem helfen, dass bei Stauauflösung Fahrer zügiger den betroffenen Bereich verlassen [VV].

Kooperative Motorsteuerung (Adaptive Drivetrain Management) Überdies hinaus lässt sich mit genauer Kenntnis des weiteren Verkehrsaufkommens, sowie der Streckencharakteristik (beispielsweise enge Kurven) und den aktuell gültigen Geschwindigkeitsbegrenzungen die Motorelektronik vorausschauend steuern und anpassen. Ziel ist es, durch schonende und vorausschauende Fahrweise den Spritverbrauch und Schadstoffausstoß zu minimieren.

Verkehrszeichen-Assistenz (In-Vehicle Signage) Ähnlich der Warnung vor Stoppschildüberschreitung, liegt auch bei der Verkehrszeichenanzeige der Fokus darauf, dem Fahrer Informationen über die lokal vorherrschende Verkehrsregelung zur Verfügung stellen zu können. Die wesentliche Funktionalität kann wiederum über digitales Kartenmaterial gewonnen werden, wobei das Problem der notwendigen Aktualität der Kartengrundlage bestehen bleibt. Zudem finden gerade in Deutschland auf Autobahnen variable Verkehrszeichenanlagen immer weiter Verbreitung, die den Verkehr in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage dynamisch steuern. Solche variablen Anlagen verändern dynamisch ihren Zustand und sind daher nicht über digitales Kartenmaterial darstellbar. Wiederum kann dieser Nachteil durch Kommunikation zwischen den entsprechenden variablen Verkehrszeichenanlagen und den Fahrzeugen ausgeglichen werden, indem den Fahrzeugen die aktuell gültigen Anzeigen mitgeteilt werden.

Baustellen-Warnung (Work Zone Warning) Baustellen auf Autobahnen stellen trotz umfangreicher Absicherungsmaßnahmen ein hohes Unfallrisiko dar. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass den Fahrern zwar die Existenz einer Baustelle im Vorfeld lange angekündigt wird, nicht jedoch die konkrete Ausprägung. Oftmals variieren die Spurbreiten und Fahrbahnbeschaffenheiten auch innerhalb des Verlaufs einer Baustelle. Die Kommunikation des genauen Baustellenverlaufs und wichtiger Besonderheiten an die Fahrzeuge kann so das Risiko von Unfällen im Baustellenbereich vermindern.

2.2.2 Nicht fahraufgabenbezogene Anwendungen

Auch wenn die Kooperation von Fahrzeugen hauptsächlich Mehrwert im Hinblick auf fahraufgabenbezogene Anwendungen bietet, ermöglicht die Vernetzung von Fahrzeugen weitere Anwendungsfelder, zumeist jedoch in Verbindung mit Infrastrukturknoten.

Positionsbasierte Fahrerinformation (Point of Interest Notification)

Unabhängig vom aktuellen Fahrgeschehen kann der Fahrer auf relevante Informationen an bestimmten Orten hingewiesen werden. Dies betrifft beispielsweise sich in der Nähe befindende Tank- und Rastanlagen sowie deren Leistungsangebot, Sehenswürdigkeiten,

oder spezielle Veranstaltungen. Abhängig von der Gültigkeitsdauer und der Anzahl der möglichen Interessenten dieser Information gilt wiederum, dass sie entweder in digitalen Karten gespeichert werden kann (lange Gültigkeitsdauer, viele potentielle Interessenten) oder gezielt lokal dem Fahrzeugsystem kommuniziert werden. Das Fahrzeugsystem bewertet dann anhand seiner aktuellen Position und des Ortes der beschriebenen Informationen, sowie persönlichen Interessen der Fahrzeuginsassen, ob und in welcher Weise diese Information dem Fahrer angezeigt wird.

Positionsverfeinerung (GPS Correction) Basierend auf der Technik von *Differential GPS* kann durch die exakte Vermessung von Infrastruktursystemen, wie beispielsweise Ampeln oder Verkehrsschildern, die Genauigkeit der Positionsbestimmung in den Fahrzeugen erheblich verbessert werden. Als ergänzender Seiteneffekt beispielsweise zu Ampeln und Schildern, die mit den Fahrzeugen kommunizieren, lässt sich diese Verfeinerung praktisch kostenneutral realisieren. Nötig ist lediglich die einmalige exakte Vermessung. Falls ein Fahrzeug auf diese Weise eine Verbesserung seiner Positionsgenauigkeit erzielen kann, so lässt sich diese Verbesserung unter Umständen auch von Fahrzeug zu Fahrzeug weitertragen, da durch Messung der Signallaufzeiten und -Richtung zwischen zwei Fahrzeugen die relativen Positionen bestimmt werden können.

Mobiles Bezahlen (Drive-through Payment) Durch drahtlose Anbindung an eine Infrastruktureinheit lassen sich prinzipiell beliebige Dienst realisieren, die ein mobiles Bezahlen ermöglichen, ohne dabei das Fahrzeug verlassen zu müssen. Anwendungsmöglichkeiten bieten sich hierfür vor allem an Tankstellen und Parkhäusern. Eines der wesentlichen Anwendungsszenarien ist zudem die Mauterhebung auf kostenpflichtigen Straßen. Dieses Anwendungsgebiet wird unter dem Stichwort *Free-Flow Tolling* oft getrennt von anderen mobilen Bezahlssystemen im automobilen Bereich betrachtet, wobei konzeptionell keine Unterschiede bestehen. Der einzige (technische) Unterschied besteht darin, dass bei der Mauterhebung in der Regel in kurzer Zeit relativ viele Fahrzeuge die Mautstelle passieren und dabei relativ hohe Geschwindigkeiten gefahren werden.

Nachrichtenaustausch (Instant Messaging) Unabhängig von ihrem eigentlichen Inhalt können mittels Kommunikation beliebige Nachrichten oder Datenpakete zwischen Fahrzeugen ausgetauscht werden. Ein möglicher Anwendungsfall dabei ist, dass sich eine Gruppe von Fahrzeuginsassen während der Fahrt über mehrere Fahrzeuge hinweg unterhält, sei es akustisch beispielsweise mittels Voice over IP (VoIP) (siehe beispielsweise [VI]) oder über einzelne schriftliche Nachrichten. Zudem können auch Dateien zwischen Fahrzeugen ausgetauscht werden, beispielsweise Musik oder Routenbeschreibungen. Fahrzeuge verhalten sich in diesem Falle wie mobile Peers in einem klassischen Peer-to-Peer Netzwerk.

Abbildung 2.12 zeigt nochmals im Überblick die im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Klassifizierung und eine exemplarische Zuordnung ausgewählter Anwendungen.

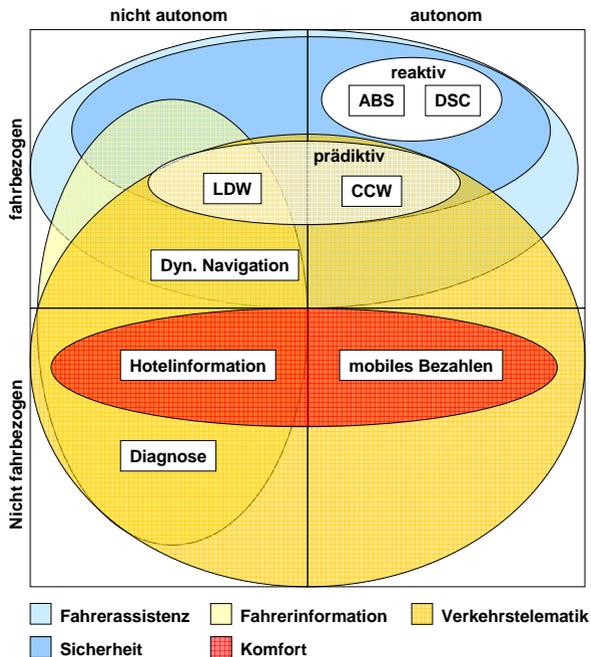


Abbildung 2.12: Überblick über elektronische Systeme in Fahrzeugen

2.3 Klassifikation von kooperativen Fahrerassistenzsystemen

Nach einer allgemeinen Einordnung elektronischer Systeme im Fahrzeug, sowie potentieller kooperativer Anwendungsfelder, soll die Gruppe der kooperativen Fahrerassistenzsysteme wie in [DKS05] beschrieben im Folgenden anhand unterschiedlicher Charakteristiken genauer klassifiziert werden.

Wie im vorausgegangenen Abschnitt deutlich wurde, basieren die meisten möglichen Anwendungsfelder zukünftiger Telematikdienste darauf, die Fahrsituation der beteiligten Fahrzeuge möglichst exakt zu kennen. Für die Entwicklung derartiger Anwendungen spielen daher insbesondere folgende Eigenschaften eine wesentliche Rolle:

- Der Bedarf an (höherwertigen) Kontextinformationen
- Die Methodik der Situationserkennung
- Der Einfluss auf das Fahrgeschehen

2.3.1 Informationsbedarf

Im Hinblick auf den notwendigen Bedarf an höherwertigen Kontextinformationen lassen sich nach Naab [Naa04, Naa98] im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen die vier Informationsklassen *Objekte*, *Fahrbahn*, *Fahrzeug/Ego* sowie *Fahrer* unterscheiden. Objekte werden dabei insbesondere durch ihre Art, Aufenthaltsort, Absichten und die gegenseitigen relativen Positionen und Bewegungen beschrieben. Im Hinblick auf die Fahrbahn spielt insbesondere deren Geometrie, Zustand, Art, Verkehrsregelung und Sichtweite eine entscheidende Rolle. Das eigene Fahrzeug (Ego) beschreibt den eigenen Zustand, Bewegung, Ort, Leistung und Grenzen. Der Fahrer kann letztlich auch wiederum durch dessen Zustand, Leistung, Grenzen sowie hinsichtlich seiner Absichten näher beschrieben werden. Abbildung 2.13 zeigt in diesem Zusammenhang nochmals den Bedarf an höherwertigen Kontextinformationen ausgewählter individueller Assistenzsysteme.

System		Längs		Quer	Parken	Sicherheit							
		ACC	Stop&GO	NavSpeed	TLC	Headingcontrol	Spurwechselass.	Parkleihen-Info	Einpark-Assistent	Abstandsverm.	Abstandserreg. BA	AdA	Briefwechseltriffl
Ego	Zustand	●	●			●	●		△	●	●	●	●
	Bewegung	●	●	●	●	●	●	●	●	●	■	●	●
Objekte	vorn fern	●								●	●	●	●
	vorn nah		■			△				■	●	■	■
	hinten					●						●	
	seitlich					■	●	■					
	Geschwindigkeit	●	●			●				●	●	■	●
	Querposition	●	■			●				●	●	■	■
	Größe		■						△	●	■		
	Ort	●	■			●				■	■	●	■
	Art		△						△			●	△
	Absicht	△	△			△				△		●	●
Straße	Verkehrszeichen		●			△							■
	Fahrspur	△	△	●	■	●			△	△	■	●	
	Markierungen				●	●							●
	Typ	△	△	●		△	△						
	Parklücke					●	■						
	Kreuzung			△	△	△							●
Fahrer	Zustand			△	△	△	△			●	●	△	△
	Absicht	●	●	△	●	●	●	●		●	●	●	●

Abbildung 2.13: Bedarf an höherwertigen Kontextinformationen ausgewählter individueller Assistenzsysteme nach Naab [Naa04]

Im Hinblick auf die spezielle Anwendungsdomäne der kooperativen Fahrerassistenz lässt sich der Informationsbedarf der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen aktiven Sicherheitsanwendungen zur Kollisionsvermeidung, also insbesondere die Halte-, Spurwechsel-, sowie die Quer- und Längsverkehrsassistenz, im Wesentlichen auf ein wechselseitiges Ortsbewusstsein verallgemeinern, bei dem den Fahrzeugen die aktuelle Position der sich in der Nähe befindenden Fahrzeuge, sowie u.U. deren Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und Beschleunigung bekannt gemacht werden müssen. Diese Systeme beziehen sich also im Wesentlichen auf die Informationsklasse der Objekte. Demgegenüber sind für das Anwendungsfeld der prädiktiven Gefahrenwarnung zudem insbesondere fahrbahnbezogene Informationen von Bedeutung. Dieser wesentliche Unterschied ist für die notwendige Verteilungsstrategie der Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen von entscheidender Bedeutung (eine ausführliche Analyse hierzu ist Kapitel 6 beschrieben). Für fahrsicherheitsbezogene Anwendungen werden dabei aktuell zumeist nicht auf dem Internetprotokoll IPv6 aufsetzende Lösungen diskutiert. Abbildung 2.14 zeigt im Überblick nochmals die unterschiedlichen Anwendungsfelder kooperativer Telematiksysteme.

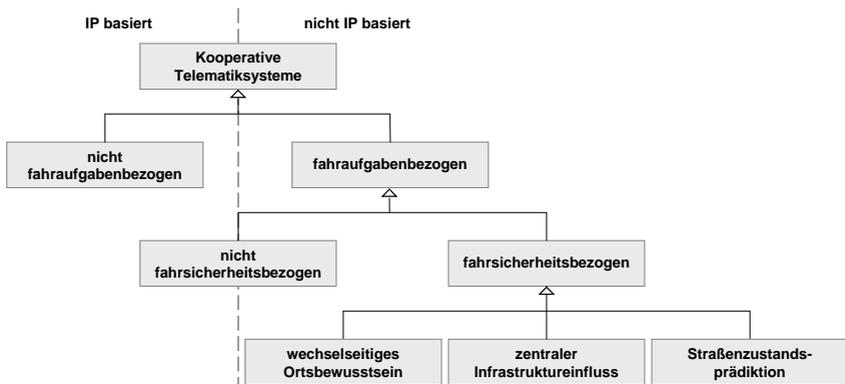


Abbildung 2.14: Überblick Klassifikation kooperativer Telematikanwendungen im Fahrzeug

2.3.2 Situationserkennung

Die in Abschnitt 2.2 beschriebenen fahraufgabenbezogenen Anwendungsfelder basieren typischerweise darauf, dass die beteiligten Fahrzeuge eine bestimmte Situation autonom erkennen können. Die Art und Weise, wie eine bestimmte Situation von den Fahrzeugen erkannt werden kann, hängt jedoch wesentlich von der betreffenden Situation ab, bzw. dem Verlauf der sie beschreibenden charakteristischen Ausprägungen der beteiligten Entitäten. Dabei müssen die folgenden wesentlichen Merkmale unterschieden werden.

Autonome Datenerhebung

Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl an spezialisierten Sensoren ausgestattet, die den Zustand des Fahrzeugs permanent überwachen bzw. dessen Umgebung messen. Manche Situationen lassen sich mit speziell dafür vorgesehenen Sensoren unmittelbar messen. Dabei können typischerweise genau jene Situationen direkt gemessen werden, deren Charakteristikum sich auf nur eine Entität bezieht. Auf der anderen Seite können jedoch manche Situationen mit der üblicherweise in Fahrzeugen vorhandenen Sensorik von einem einzelnen Fahrzeug nicht unmittelbar oder nur unzureichend genau erkannt werden. Durch die Kooperation von einer Gruppe von Fahrzeugen kann die Erkennung jedoch oftmals deutlich verbessert werden. Zur Detektion eines Unfalls, an dem man selbst beteiligt ist, reicht beispielsweise die lokale Sensorik des betroffenen Fahrzeugs. Auf der anderen Seite kann die Detektion eines Stauendes am Besten dadurch erreicht werden, dass die Fahrverläufe aller derjenigen Fahrzeuge ausgewertet werden, die sich gerade dem Stauende nähern bzw. sich vor kurzem genähert haben und inzwischen den Stau erreicht haben. Typischerweise führt dies jeweils zu einer signifikanten Geschwindigkeitsreduktion, möglicherweise bis hin zum Stillstand. Über die Auswertung vieler Fahrzeuge kann so die aktuelle Position des Stauendes sehr genau bestimmt werden. Ein anderes Beispiel ist die kooperative Kollisionswarnung, bei der betroffene Fahrzeuge gemeinschaftlich erkennen, dass sie sich möglicherweise auf einem Kollisionskurs befinden. Die Situationserkennung kann folglich hinsichtlich des zugrunde liegenden Kooperationsgrades unterschieden werden in

Individuelle Detektion Ein einzelnes Fahrzeug kann die entsprechende Situation ohne das Mitwirken von anderen Verkehrsteilnehmern oder Infrastrukturunterstützung erkennen. Beispiele sind die Unfall-Warnung und in Teilen die Lokale Gefahrenwarnung (eine mögliche Inferenzmethodik zur automatischen Detektion von potentiellen Gefahrenstellen wird in Kapitel 5 noch näher erläutert).

Kooperative Detektion Die entsprechende Situation kann ausschließlich oder signifikant besser detektiert werden, indem eine Menge von Fahrzeugen auf Basis gegenseitig ausgetauschter Beobachtungen gemeinschaftlich zur Situationserkennung beitragen. Beispiele sind die kooperative Blendreduzierung oder Verkehrsinformation. Gerade diese Anwendungsfälle erfordern in der Regel einen stetigen und daher vergleichsweise hohen Kommunikationsaufwand zwischen sich in der Nähe befindenden Fahrzeugen. Eine spontane ad-hoc Vernetzung der Fahrzeuge bietet im Speziellen in diesen Anwendungsfeldern einen Vorteil gegenüber zellulären Kommunikationssystemen wie UMTS oder GSM.

Infrastrukturgestützte Detektion Die entsprechende Situation kann durch den Einsatz von Infrastrukturmaßnahmen signifikant verbessert werden. Beispiele sind die Warnung vor Rotlicht überschreitung oder die kommunikationsgestützte Verkehrszeichenanzeige.

Unter dem Blickwinkel der vorhandenen Sensorik lassen sich weiterhin hinsichtlich der Datengrundlage die folgenden drei Arten der autonomen Datenerhebung im Fahrzeug unterscheiden.

On-Board Sensorik Die Situation kann mit Hilfe geeigneter Sensorik im Fahrzeug unmittelbar gemessen oder sicher abgeleitet werden. Beispiele sind wiederum die Unfall- oder Notbrems-Warnung.

Fahrdynamik Die Situation kann mit Hilfe der im Fahrzeug vorhandenen Sensoren zur Unterstützung der Fahrdynamik näherungsweise abgeleitet werden. Beispielsweise können mit Hilfe von Längs- und Querbeschleunigungssensoren, sowie durch Auswertung der einzelnen Raddrehzahlen Rückschlüsse auf die mögliche Existenz von Aquaplaning gezogen werden. Weitere Beispiele sind die Staudewarnung oder Seitenwinderkennung. Typischerweise können durch die Auswertung der Fahrdynamikeigenschaften insbesondere kritische Fahrsituationen erkannt werden.

Positionstrajektorien Manche Situationen können auch dadurch erkannt werden, dass die Positionstrajektorien einer Menge von Fahrzeugen ausgewertet werden. Beispielsweise ist die Tatsache, dass in einem bestimmten Zeitraum kein Fahrzeug eine bestimmte Position im Straßenverlauf überquert, sondern knapp daran vorbei fährt, obwohl diese Position üblicherweise durchquert werden kann, ein Indiz dafür, dass an dieser Stelle temporär ein Hindernis existiert (siehe beispielsweise [SL06]). Über Positionstrajektorien kann zudem auch ohne digitale Karte ermittelt werden, ob eine bestimmte Situation für das eigene Fahrzeug relevant ist. (Ein entsprechender Lösungsansatz hierzu wurde im Kontext des Forschungsprojektes PREVENT / WillWarn erarbeitet [PRE06b, PRE06d].)

Relative gegenseitige Lage Insbesondere Anwendungen zur Kollisionsvermeidung lassen sich durch eine wechselseitige Ortstransparenz abbilden. Die Anwendungen benötigen dabei lediglich den aktuellen Aufenthaltsort der sich in der Nähe befindenden Fahrzeuge, sowie gegebenenfalls deren Fahrtrichtung und Geschwindigkeit.

Situationsdynamik

Umweltbedingungen verändern sich fortlaufend, und damit einhergehend auch die Kontextaspekte von Entitäten. Auch spezifische Situationen können aus diesem Grund in ihrer konkreten Ausprägung fortlaufenden Änderungen unterworfen sein. Ein Stau kann beispielsweise über die Zeit länger werden oder sich auflösen. Je nach Anwendungsgebiet werden kooperative Fahrzeugsysteme von der Art und Weise beeinflusst, wie sich Situationen über die Zeit hin verändern können, genauer, die sie beschreibenden charakteristischen Kontextaspekte. Dabei ist festzustellen, dass sich Situationen insbesondere in drei wesentlichen Dimensionen über die Zeit ändern können, nämlich *Position*, *räumlicher Ausprägung* und *Intensität*, wobei die Intensität im allgemeinen Fall eine Funktion über der räumlichen Ausprägung ist. Der Ort kann prinzipiell auch über das Konzept der räumlichen Ausprägung abgebildet werden, sofern die Spezifikation der räumliche Ausprägung auf Basis des globalen Modellraumes definiert ist (siehe hierzu auch die Erläuterungen in Abschnitt 3.1). Während sich beispielsweise ein Ölfleck auf der Straße im Wesentlichen über die Zeit nicht ändert, bis er irgendwann beseitigt wird, ändert sich ein Nebelfeld in allen drei Dimensionen über die Zeit. Die Art und Dynamik dieser Änderung hat letztlich wesentlichen Einfluss auf die Prädiktionsgenauigkeit

des Kontextaspektes. Die Art der zeitlichen Veränderlichkeit spielt dabei in allen drei beschriebenen Dimensionen eine wichtige Rolle und lässt sich untergliedern in (siehe Abbildung 2.15)

- statisch - es findet keine Änderung in dieser Dimension über die Zeit statt. Ein Beispiel ist die Position einer Brückenbaustelle.
- stetig - es findet eine stetige und gegebenenfalls vorhersagbare Veränderung statt, d.h. die Funktion der zeitlichen Veränderung ist stetig. Ein Beispiel ist die Ausdehnung eines Regengebietes.
- chaotisch - es findet keine stetige Veränderung statt. Stattdessen kann sich die konkrete Ausprägung der jeweiligen Dimension sprunghaft, also nicht stetig ändern. Ein Beispiel ist eine plötzliche Notbremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs.

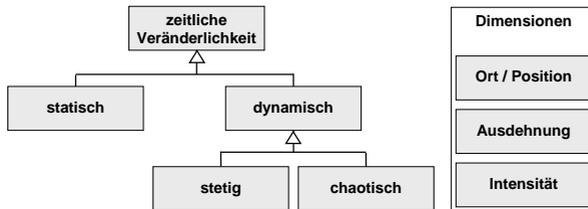


Abbildung 2.15: Qualität der Situationsdynamik

Abbildung 2.16 veranschaulicht die Dynamik von ausgewählten Situationen unter Berücksichtigung der Größenordnung der situationstypischen Zeitstabilität. Die zuverlässige Prädiktion eines Kontextaspektes verkompliziert sich dabei in der Regel von statischen, über sich stetig verändernde und daher begrenzt vorhersagbare, bis hin zu sich chaotisch über die Zeit verändernden Aspekten.

Objektivität

Nicht alle Situationen sind von den Fahrzeugen in objektiver Weise detektierbar. Eine objektive Detektion liegt genau dann vor, wenn die Situationserkennung unabhängig von individuellen Eigenschaften des Fahrzeugs und der Fahrweise des Fahrers ist. Folglich muss unterschieden werden, ob eine Situation abhängig ist von der konkreten Fahrzeugkonfiguration und Fahrweise.

Fahrzeugkonfiguration Jedes Fahrzeugmodell besitzt eine Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften, wie beispielsweise die Gewichtsverteilung, die Antriebsleistung oder die Bereifung. Auch einzelne Fahrzeuge der gleichen Baureihe verhalten sich individuell verschieden, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Reifenwahl oder Beladung. Dies hat entscheidenden Einfluss auf die Detektierbarkeit

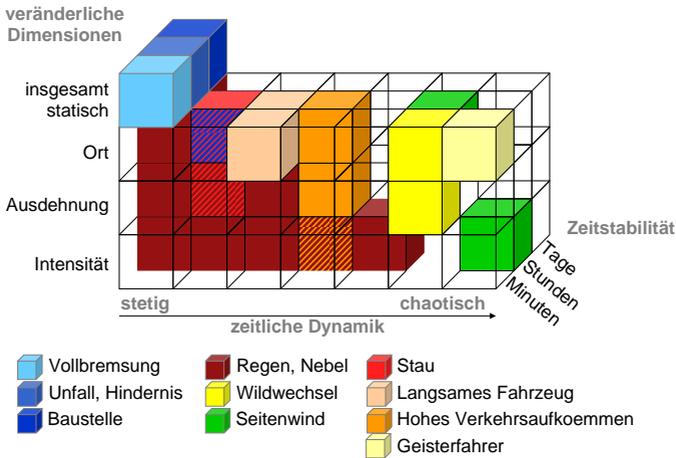


Abbildung 2.16: Quantität der Dynamik ausgewählter Situationen

von Situationen. Im speziellen betrifft dies Situationen, die aus den Fahrdynamikensensoren der Fahrzeuge abgeleitet werden (siehe Abschnitt 2.3.2). Beispielsweise haben Typ und Zustand der Reifen eines Fahrzeugs erheblichen Einfluss, ob auf nasser Fahrbahn tatsächlich Aquaplaning auftritt oder nicht. Das Auftreten von Aquaplaning und damit einher gehend auch die autonome Detektion potentieller Aquaplaninggefahr, wie sie beispielsweise im Anwendungsfeld der lokalen Gefahrenwarnung von Nöten ist, ist daher hochgradig abhängig von den jeweiligen Konfigurationen der betroffenen Fahrzeuge. Hingegen ist die Detektierbarkeit eines Hindernisses auf der Fahrbahn im Wesentlichen unabhängig von der individuellen Fahrzeugkonfiguration. Es muss daher unterschieden werden zwischen einer

- konfigurationsunabhängigen (objektiven) und einer
- konfigurationsabhängigen (subjektiven) Situationserkennung.

Fahrweise Ähnliches wie für die Fahrzeugkonfiguration gilt auch für die individuelle Fahrweise eines Fahrers, wobei wiederum in erster Linie Situationen betroffen sind, die aus der Fahrdynamik der Fahrzeuge abgeleitet werden. In vielen Fällen hat beispielsweise die Geschwindigkeit entscheidenden Einfluss auf das Auftreten von kritischen Situationen und damit auch auf die Detektierbarkeit, beispielsweise wiederum bei der Erkennung von Aquaplaning, dessen Auftreten bei gleicher Fahrzeugkonfiguration bei niedrigen Geschwindigkeiten unwahrscheinlicher ist. Dies ist im Zusammenhang mit den beschriebenen Anwendungen besonders dann problematisch, wenn eine Detektion erst dann geschehen kann, wenn sich ein Fahrzeug in einer kritischen Situation befindet. Ziel ist es aber eben, genau

diese kritischen Situationen im Vorfeld zu vermeiden. Wenn also konsequenter Weise bei weiterhin bestehendem Gefährdungspotential die nachfolgenden Fahrzeuge ihre Fahrweise so anpassen, dass sie gerade nicht in eine kritische Fahrsituation kommen, das Gefährdungspotential aber nur dann erkannt werden kann, so kann in der Folge die Situation nicht weiter detektiert und daher weder bestätigt noch widerlegt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass auch nicht mehr erkannt werden kann, ob das Gefährdungspotential weiterhin besteht, oder sich in der Zwischenzeit aufgelöst hat bzw. beseitigt wurde. Daraus folgt, dass zur Detektion bestimmter fahrrelevanter Kontextaspekte bei einer gewissen Zahl an Fahrzeugen (abhängig von der Art und Intensität der zeitlichen Dynamik, sowie der Qualität der Beobachtungen) in einem bestimmten Zeitraum ein kritischer Fahrzustand eintreten muss. Aus Sicht der präventiven Vermeidung von Sondersituationen kann man daher in diesen Fällen von einem sogenannten *Prädiktionsparadoxon* sprechen, da sich die kooperative prädiktive Situationsanalyse und die resultierenden Handlungsempfehlungen und -entscheidungen gegenseitig konterkarieren. Aus Sicht des daraus resultierenden möglichen Zugewinns an Verkehrssicherheit kann zudem von einem *Opfer-Phänomen* gesprochen werden, da sich in diesen Fällen in Ermangelung weiterer hinreichender Sensorik eine gewisse Zahl an Fahrzeugen (Opfer) nicht vermeiden lässt, die nicht rechtzeitig und hinreichend zuverlässig vorab informiert werden konnten. Aus diesem Grund wird im Folgenden unterschieden zwischen

- Deterministischer Situationserkennung, die unabhängig von der aktuellen Fahrweise und Geschwindigkeit des Fahrer ist und
- Nicht-Deterministischer Situationserkennung, bei der die Fahrweise entscheidenden Einfluss auf die Detektierbarkeit hat.

Eine objektive Ableitung der Fahrsituation ist daher entsprechend obiger Terminologie deterministisch und konfigurationsunabhängig.

2.3.3 Einfluss auf das Fahrgeschehen

Der Einfluss, den eine bestimmte Anwendung auf das Fahrzeug bzw. den Fahrer hat, hat Auswirkungen auf die an das System zu stellenden Anforderungen und den Systementwurf, vor allem im Hinblick auf Sicherheitsmaßnahmen und tolerierbare Latenzzeiten. Es lassen sich diesbezüglich in Anlehnung an die Überlegungen aus [DN96] insbesondere die folgenden Klassen von Einflussmöglichkeiten unterscheiden.

Autonomer Regelungseingriff Wie bei klassischen Fahrerassistenzsystemen wie beispielsweise ABS greift das System selbsttätig regelnd in das Fahrgeschehen ein. Hierbei wird zudem manchmal weiterhin zwischen autonomem *agieren* und *intervenieren* unterschieden (vgl. beispielsweise [DhB⁺06]). Beispiele für autonomes agieren sind die kooperative adaptive Geschwindigkeitsregelung oder die autonome Fahrzeugverfolgung. Demgegenüber stellen beispielsweise ABS oder DSC intervenierende, also fahrtabilisierende Regelungseingriffe dar.

Fahrerintervention Die vom System erkannte Situation erfordert einen unmittelbaren Eingriff des Fahrers, um einen Unfall zu vermeiden. Typischer Vertreter dieser Klasse ist die kooperative Kollisionswarnung.

Fahrer aufmerksamkeit Die vom System erkannte Situation stellt ein Gefährdungspotential dar, das eine besondere Aufmerksamkeit des Fahrers erfordert und gegebenenfalls eine Anpassung der aktuellen Fahrweise. Ein typisches Beispiel für diese Klasse ist die lokale Gefahrenwarnung.

Fahrerinformation Der Fahrer wird über bestimmte Ereignisse informiert, wobei keine unmittelbare Reaktion erforderlich ist. Typischer Vertreter dieser Klasse sind aktuelle Verkehrsinformationen.

Der Einfluss auf das Fahrgeschehen hat dabei im Speziellen Auswirkungen auf die notwendige Sicherheit und Qualität der prädizierten Kontextaspekte. Zudem ergeben sich aus den unterschiedlichen Antizipationszeiten (vergleiche Abschnitt 2.1), also der dem System oder Fahrer zur Verfügung stehenden Zeit vor dem Ausführen einer Handlung, spezifische Anforderungen hinsichtlich des gegenseitigen Austauschs von Beobachtungen sowie zur Inferenz der Ausprägung der zugrunde liegenden fahrrelevanten Kontextaspekte. Die Tabelle in Abbildung 2.17 fasst die Eigenschaften der wesentlichen Telematikanwendungen aus dem vorhergehenden Abschnitt zusammen.

2.4 Anforderungen und Systemeigenschaften

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Anwendungen und Dienste basieren in wesentlichen Teilen darauf, dass lokal in den betroffenen Fahrzeugen ein umfassendes Kontextwissen zur Verfügung steht, das sowohl den eigenen historischen und aktuellen Fahrkontext beinhaltet (Ego), als auch den von entfernten anderen Fahrzeugen (Objekten), der Fahrbahn, sowie weiterer externer Informationsquellen. Einer der entscheidenden Faktoren bei der Umsetzung dieser Anwendung ist daher die effektive und effiziente Bereitstellung eben jener Kontextinformationen in den Fahrzeugen. Dies beinhaltet offensichtlich vor allem die Fragestellungen der autonomen Datenerhebung ohne Einbezug des Fahrers, sowie die Verbreitung der individuell verfügbaren Informationen zwischen den Fahrzeugen. Bei genauerer Betrachtung der speziellen Anwendungsfelder ergeben sich jedoch vor dem Hintergrund der spezifischen Anforderungen im Automobilbereich bezüglich dieser beiden zentralen Fragestellungen weitere systeminhärente Problemfelder.

Obwohl die Funktions- und Wirkungsweise vieler der zuvor erläuterten kooperativen Telematikanwendungen schon vor einigen Jahren prinzipiell beschrieben wurde (vergleiche beispielsweise [Kos04b, Int02, IST04, IV]), existiert noch immer keine umfassende Lösung eines solchen Systems. Bisher wurden lediglich einzelne Problemfelder des Gesamtsystems hinreichend genau evaluiert. Bei genauerer Betrachtung wird jedoch offensichtlich, dass die einzelnen Teilaspekte, angefangenen bei der Detektion von Ereignissen und der Analyse der Fahrersituation, bis hin zu adäquaten Bedienkonzepten, eng miteinander verwoben sind. Dabei lässt sich letztlich feststellen, dass die Umsetzung des Gesamtsystems mehr ist als die Summe der Einzellösungen der Teilaspekte. Aus diesem Grund sollen hier nochmals die wesentlichen Anforderungen und Abhängigkeiten derartiger Systeme unter dem Blickpunkt der Umsetzbarkeit im Fahrzeug herausgearbeitet werden. Der Fokus der folgenden Betrachtung liegt dabei exemplarisch auf dem Anwendungsgebiet der lokalen Gefahrenwarnung, da diese alle wesentlichen Problemfelder umfasst. Im Speziellen müssen die folgenden Teilproblemfelder in einer gesamtheitlichen Sichtweise betrachtet und gelöst werden:

1. Individuelle Situationsanalyse
2. Kooperative Situationsanalyse
3. Wissensmanagement
4. Informationsverbreitung
5. Benutzerschnittstelle
6. Sicherheit und Datenschutz
7. Persönliche Relevanz

Dabei weisen die unterschiedlichen Gefährdungspotentiale hinsichtlich dieser Teilprobleme analog zur Klassifikation in Abschnitt 2.3 unterschiedliche spezifische Anforderungen auf. Im Folgenden sollen nun die einzelnen Teilproblemfelder im Detail vorgestellt und deren wesentliche Anforderungen und Abhängigkeiten aufgezeigt werden. Eine weiterführende Analyse hierzu findet sich in [SA06, AS06, Adl06].

2.4.1 Individuelle Situationsanalyse

Moderne Fahrzeuge können durch die Vielzahl an Sensoren auf die eigene momentane Fahr situation schließen. Hierfür existieren spezielle Sensoren oder Sensorgruppen, die gezielt eine spezielle Aufgabe hinsichtlich der Stabilisierung der Fahreigenschaften in kritischen Situationen ermöglichen, beispielsweise auf Basis aktueller Längs- und Querschleunigungswerte, Schlupf, Vortrieb, Gierrate oder Raddrehzahlen. Die Auswertung dieser Eingangsgrößen beschränkt sich in der Regel aktuell auf die zur Stabilisierung des Fahrzeugs nötigen Regelsysteme. Die bereits vorhandenen Sensorwerte können über reine Regelungssysteme hinaus jedoch auch dazu verwendet werden, höherwertigen Kontext abzuleiten, beispielsweise, ob ein Fahrzeug gerade über einen Ölflack gefahren ist (vergleiche das Szenario in Abbildung 1.3). Während dieser abgeleitete Kontext bisher für die individuellen Assistenzsysteme eines Fahrzeugs im Wesentlichen nicht von Bedeutung ist, spielt er bei der gezielten vorausschauenden Information der Fahrer vor gefährlichen Situationen eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Je detaillierter der Fahrer über den Streckenabschnitt informiert ist, den er in naher Zukunft befahren wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er rechtzeitig und angemessen auf die entsprechende Situation reagiert. Anders als bei klassischen Regelsystemen hängt dabei eine zuverlässige Ableitung dieses Kontextes von einer Vielzahl an unterschiedlichen Parametern ab. Das Auftreten von Aquaplaning ist z.B. wahrscheinlicher, falls an der entsprechenden Position in der Vergangenheit eine ausreichend große Niederschlagsmenge pro Zeit gefallen ist. Dies erfordert jedoch historisches Wissen über eine geographische Region.

Auf der anderen Seite unterliegt der Mechanismus des Schließens bei weitem nicht den strengen Echtzeitanforderungen von klassischen Regelsystemen, da die abgeleiteten Einschätzungen ohnehin als vorausschauende Informationen für die anderen Verkehrsteilnehmer bestimmt sind und sich diese noch entfernt vom Ort des konkreten Gefahrenpotentials befinden. Dies ermöglicht den Einsatz von entsprechend angepassten Schlussfolgerungsmechanismen, deren Komplexität einen *vertretbar* erhöhten Rechenaufwand und damit auch eine größere vertretbare Latenzzeit bedeutet. Wie groß die maximal vertretbare Latenzzeit ist, ist dabei situationsabhängig. Im Speziellen ist sie abhängig vom Einfluss auf das Fahrgeschehen der umliegenden Fahrzeuge, was wiederum in erster Linie abhängig ist von deren Distanz zum Ort des Gefahrenpotentials, sowie dessen Typ. Sofern kein unmittelbares Eingreifen der Fahrer dieser Fahrzeuge notwendig ist (dies entspricht also der Klasse der Aufmerksamkeit und Information), liegt die Größenordnung der vertretbaren Latenzzeit bei einigen Sekunden, was selbst für sehr komplexe Schließverfahren in der Regel ausreichend sein sollte. Dabei hat die Güte der bereits vorhandenen Sensoren bzw. die Ableitung eines höherwertigeren Kontexts spürbaren Einfluss auf die Anforderungen an die nötige Übertragungskapazität und den weiteren Evaluierungsprozess. Je mehr Kontextinformationen von einem Fahrzeug selbständig erkannt werden können und je genauer diese und die daraus abgeleiteten Informationen sind, desto weniger Kommunikationsaufwand ist nötig. Verfügt beispielsweise ein Fahrzeug über einen Sensor, der direkt die Wassertiefe unter den Reifen messen kann, so reicht es aus, diese Information an die anderen Fahrzeuge weiter zu geben. Da die Wassertiefe der bestimmende Faktor beim Auftreten von Aquaplaning ist, können die empfangenden Fahrzeuge aufgrund dieser Information entscheiden, ob diese Wassertiefe bei ihrer aktuell gefahrenen Geschwindigkeit (und dem aktuellen Reifentyp und Profil) ein Gefährdungspotential darstellt. Kann ein Fahrzeug jedoch

lediglich aufgrund verschiedener fahrdynamischer Sensoren schließen, dass es sich unter Umständen gerade in einer Aquaplaningsituation befindet, so muss den anderen Fahrzeugen neben der Tatsache des Auftretens von Aquaplaning auch die momentan gefahrene Geschwindigkeit und im Idealfall die eigenen Fahrzeugkonfiguration mitgeteilt werden.

Dieses Beispiel macht zudem deutlich, dass also auch die Objektivität der Detektion entscheidenden Einfluss auf die zu übertragende Datenmenge hat. Im Speziellen bleibt festzuhalten, dass abhängig von der spezifischen Charakteristik des zu detektierenden Ereignisses bzw. der Fahrsituation eine Detektion durch unterschiedliche grundlegende Mechanismen erreicht werden kann und unterschiedlich komplex im Hinblick auf die Ableitungsproblematik ist. Es ist also speziell im Hinblick auf die Systemzuverlässigkeit von wesentlicher Bedeutung, ob eine deterministische und fahrzeugkonfigurationsunabhängige Situationserkennung möglich ist.

2.4.2 Kooperative Situationsanalyse

Es ist typisch, dass innerhalb relativ kurzer Zeit eine große Anzahl an Fahrzeugen die gleiche oder eine ähnliche Situation durchfahren. Dies ermöglicht weitergehende Verfahren zur Analyse der aktuellen Fahrsituation auf Basis existierender Sensorik, speziell im Hinblick auf Situationen, die in dieser Weise von einem einzelnen Fahrzeug nicht in ausreichender Zuverlässigkeit erkannt werden können, oder sich durch die Kooperation in ihrer Komplexität deutlich reduzieren lassen.

Stau bzw. Stauenden lassen sich einfach und zuverlässig aus der Veränderung der Position und Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge errechnen, sofern eine ausreichende Dichte an ausgestatteten Fahrzeugen vorliegt. Ein anderes Beispiel ist das kooperative Erkennen von Hindernissen auf der Basis einer Analyse der Fahrdynamik mehrerer Fahrzeuge [SL06]. Kernidee dabei ist, dass Hindernisse, die überraschend auftreten, häufig zu einem Ausweichmanöver eines oder mehrerer Fahrzeuge führen. Dabei kann ein Ausweichmanöver aufgrund hierfür typischer Kurvenverläufe der Quer- und Längsbeschleunigungen erkannt werden. Allerdings bietet die Existenz eines Ausweichmanövers noch kein ausreichendes Indiz dafür, dass an der entsprechenden Stelle tatsächlich ein persistentes verkehrsgefährdendes Hindernis existiert. Ausweichmanöver können auch durch Ereignisse ausgelöst werden, die lediglich kurz existieren und im Weiteren kein Gefährdungspotential mehr besitzen (zum Beispiel Wildwechsel oder eine unachtsam geöffnete Autotür). Eine anschließende gezielte Auswertung der Fahrcharakteristiken der nachfolgenden Fahrzeuge liefert jedoch wertvolle weitere Hinweise bezüglich der potentiellen Existenz eines Hindernisses. Plötzliches Bremsen, Lenkbewegungen oder die Tatsache, dass im Folgenden eine Stelle der Fahrbahn von keinem Fahrzeug mehr befahren wird, erhöhen die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Hindernis auf der Fahrbahn existiert. Im Umkehrschluss lösen Fahrzeuge, die an der entsprechenden Stelle keinerlei atypische Fahreigenschaften feststellen können, die Vermutung wieder auf. Generell lässt sich feststellen, dass sich die individuelle Situationseinschätzung durch den gezielten Austausch individuellen Wissens signifikant steigern lässt.

Wie einleitend bereits erwähnt, ist eines der Kernziele neuer Assistenzsysteme in Fahrzeugen eine möglichst exakte Vorhersage der zukünftigen Fahrsituation. Das im Fahrzeug bereits vorhandene Wissen muss aus den folgenden Gründen permanent neu ausgewertet werden. Dies bedeutet im Speziellen:

- Informationen bezüglich einer ungewöhnlichen und potentiell bedrohlichen Situation, deren Zuverlässigkeit einen entsprechenden Hinweis an den Fahrer rechtfertigt, müssen rechtzeitig im Vorfeld extrahiert werden.
- Informationen, die für andere am System teilnehmende Fahrzeuge für deren weiteren Analyseprozess von Bedeutung sind, müssen gezielt kommuniziert und verteilt werden.

Dabei kommt erschwerend hinzu, dass (im Gegensatz zu lokalen Regelsystemen) die benötigten Daten zumeist lückenhaft sind und die Zeitintervalle zwischen einzelnen Beobachtungen oft relativ groß sind. Hinzu kommen Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Fahrzeugposition. Gerade sich bewegende oder dynamisch ändernde Gefahren, wie beispielsweise Wetterbedingungen oder Stauenden, stellen besondere Anforderungen an die räumlich-zeitlichen Schließ- bzw. Prädiktionsverfahren. Dabei müssen lediglich diejenigen Informationen ausgewertet werden, die sich in der unmittelbaren Umgebung des Fahrzeugs befinden, bzw. auf den Streckensegmenten, die potentiell in Kürze befahren werden. Dabei stellt sich die Frage nach dem Umfang des konkret auszuwertenden lokalen Umfeldes. Es erscheint wenig sinnvoll, hierfür eine statisch festgelegte Distanz der Voraussicht festzulegen, da sinnvolle Zeitintervalle der Warnung stark von der tatsächlichen Situation abhängen. Ein flexibler Ansatz, der spezielle Situationen in Abhängigkeit des Fahrkontextes extrahiert, unterstützt eine gezielte Benachrichtigung des Fahrers, abgestimmt auf die individuellen Bedürfnisse in einer bestimmten Fahrsituation.

2.4.3 Wissensverwaltung

Neben dem domänenspezifischen Wissen hinsichtlich der Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen verschiedener Kontextaspekte müssen insbesondere sowohl die eigenen, als auch von anderen Fahrzeugen verbreitete Beobachtungen im Fahrzeug in adäquater Weise verwaltet werden. Dabei muss die Informationsverwaltung hinsichtlich Speicherbedarf und Zugriffskomplexität auf die speziellen Bedürfnisse der Fahrzeug-IT abgestimmt sein. Die mittel- und langfristige Speicherung von Rohsensordaten ist aufgrund des damit verbundenen Datenaufkommens hinsichtlich Speicherkomplexität unrealistisch. Dies bedeutet jedoch wiederum, dass für eine eventuell später durchzuführende Auswertung von Beobachtungen keine konkreten Messwerte mehr zur Verfügung stehen, bzw. diese später nicht mehr ausgetauscht werden können.

Offensichtlich ist jedoch ohnehin nicht jede Information so wichtig, als dass sie über einen bestimmten Zeitraum gespeichert oder verteilt werden müsste. Beispielsweise ist die Information, dass sich das Fahrzeug momentan auf einer trockenen Fahrbahn befindet, zumeist nur von geringem Interesse. Weiß das Fahrzeug jedoch, dass es kurz zuvor in dieser Region noch stark geregnet hat, so ist die Information von deutlich größerem Interesse. Konsequenter Weise hängt die Entscheidung, ob eine Beobachtung gespeichert werden soll, und falls ja, für wie lange, vom aktuellen Kontext ab, in dem sich das Fahrzeug momentan befindet. Die Berechnungsvorschrift zum Speichern von Kontextinformationen ist also selbst wiederum kontextadaptiv. Prinzipiell kann angenommen werden, dass eine Information im Speziellen dann von Bedeutung ist, wenn sie

- ein Gefährdungspotential beschreibt, das vorher in dieser Form nicht bekannt war, oder
- ein bekanntes Gefährdungspotential signifikant bestärkt, bestätigt oder widerlegt.

Dabei variiert das beschriebene Gefährdungspotential hinsichtlich seiner Ausdehnung und Form. Dies beeinflusst wiederum die notwendigen Strukturierungsmechanismen des Kontextinformationsspeichers bzw. der Wissensbasis. Es lassen sich dabei drei grundlegende Klassen räumlicher Ausdehnung unterscheiden, nämlich:

- Punkte (punktuelle Regionen), beispielsweise Unfälle
- Regionen mit linearer Ausdehnung entlang von Straßenabschnitten, beispielsweise Staus oder Baustellen
- Regionen mit flächiger Ausdehnung, beispielsweise Wetterbedingungen

Eine dreidimensionale Beschreibung von Gefährdungspotentialen ist dabei nicht notwendig, da Höheninformationen in der Regel für Fahrerassistenzsysteme keinen wesentlichen Mehrwert darstellen. Daraus ergeben sich wiederum drei klassische Repräsentationsformen, nämlich

- Punkte (0-dimensional), typischerweise repräsentiert als WGS-84 Koordinaten, teilweise unter Miteinbeziehung weiterer Konkretisierungen.
- Linien (1-dimensional), repräsentiert beispielsweise durch konkrete Streckenabschnitte oder relative Bezugssysteme dazu. (Für eine exakte eindeutige Beschreibung des Aufenthaltsortes eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Straße, Fahrtrichtung- und/oder Spur sind aufgrund der zu geringen Genauigkeit aktueller Positionierungsverfahren zur Sicherung der Interoperabilität zwischen verschiedenen Fahrzeugen weitere Spezifikationen notwendig. Im *Agora-C Consortium* wurde daher eine übergreifende universelle Methodik zur Beschreibung des Aufenthaltsortes mobiler Knoten (Location Referencing) definiert, welche unterschiedliche Strategien in einheitlicher Weise zusammenfasst (für weiterführende Informationen sei auf [AGO03] verwiesen).
- Polygone (2-dimensional), repräsentiert beispielsweise durch Rechtecke, Polygone oder konvexe Hüllen.

Diese Beschreibungen müssen schließlich so effizient wie möglich im Fahrzeug verwaltet werden. Neben der Speicherkomplexität spielen dabei vor allem die konkreten Zugriffszeiten auf die verwendete Wissensbasis eine entscheidende Rolle. Im Speziellen sind das:

- Das Einfügen von bisher unbekanntem Beobachtungen bzw. Gefährdungspotentialen
- Das Auffinden von bereits bekannten Beobachtungen bzw. Gefährdungspotentialen

- Die Aktualisierung von Gefährdungspotentialen (Ausdehnung, Intensität), sofern sich die Situation geändert hat
- Das Löschen von Gefährdungspotentialen, sofern keine Gefahr mehr besteht
- Das Zusammenführen von Beobachtungen, die sich auf das gleiche Gefährdungspotential beziehen
- Die hierarchische Aggregation unterschiedlicher Beobachtungen zu einer übergeordneten Gefahren Darstellung
- Die Extraktion derjenigen Gefährdungspotentiale, denen sich das Fahrzeug unmittelbar nähert
- Die Ableitung höherwertiger Kontextinformation und Integration dieser in die Wissensbasis

Die gespeicherten Informationen beschränken sich aufgrund des lokalen Charakters des Systems zumeist auf eine relativ kleine Region um die aktuelle Fahrzeugposition. Dies ermöglicht optimierte Zugriffsalgorithmen, vor allem zum schnellen Einfügen und Auffinden von Beobachtungen auf Basis der eigenen Fahrzeugposition. Darüber hinaus muss auch ein effizientes Ableiten von nicht direkt beobachtbaren Gefährdungspotentialen gewährleistet sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn sowohl Beobachtungen, als auch davon abgeleitetes Wissen mit Unsicherheit behaftet sind.

Bei genauerer Betrachtung der Merkmale von Kontextinformationen, wie sie von Fuchs in [Fuc04] beschrieben sind, ergeben sich für Speicherung und Wiederabrufbarkeit der bekannten Kontextinformationen im Speziellen zusätzlich folgende Anforderungen (siehe hierzu auch [Vol06]):

- Kontextinformationen beziehen sich jeweils auf genau eine Entität. Kontextadaptive Anwendungen können ihre Aktionen jedoch auf Basis des Kontextes verschiedener Entitäten treffen. Daraus resultiert, dass sich die Menge der für kontextadaptive Anwendungen relevanten Kontextinformationen überlappen können. Es bedeutet ferner, dass gegebenenfalls verschiedene Anwendungen den Kontext derjenigen Entitäten zur Verfügung stellen, die für eine kontextsensitive Anwendung von Bedeutung sind. Da semantisch gleiche Informationen von verschiedenen Anwendungen unterschiedlich benannt und dargestellt sein können, ist es zur Gewährleistung von Interoperabilität von Anwendungen auf einem gemeinsamen Daten- bzw. Kontextmodell notwendig, Mechanismen vorzuhalten, mit denen eine semantische Äquivalenz von Kontextinformationen ausgedrückt und diese ineinander überführt werden können. Aufgrund der Möglichkeit verschiedener Repräsentationen müssen ferner Transformationsvorschriften vorgehalten werden, die es erlauben, beispielsweise die Verwendung verschiedener Maßeinheiten zu kompensieren.
- Die konkrete Ausprägung einer Kontextinformation ist im zeitlichen Verlauf im Rahmen des zulässigen Wertebereiches ständigen Schwankungen unterlegen. Beobachtungen müssen aus diesem Grund mit einer Zeitangabe versehen werden.

Um Beobachtungen miteinander zu verrechnen, die von Systemen mit unabhängigen Zeitsystemen erzeugt werden, müssen diese Zeitsysteme korreliert werden, wobei die notwendige Genauigkeit der Korrelation von der spezifischen Verrechnungsvorschrift abhängig ist. Im Gegensatz zum zeitlich veränderlichen Kontextwissen ist das Domänenwissen hingegen statisch. Das Domänenwissen beschreibt dabei die in einer Anwendungsdomäne statisch gegebenen Sachverhalte und Zusammenhänge. Es wird daher keine spezifizierende Zeitangabe benötigt.

- Fahrzeuge verfügen über eine Vielzahl an Sensoren, die in kurzer Zeit eine große Menge von Rohsensordaten liefern. Typischer Weise müssen solche Rohsensordaten nicht per se persistent gespeichert werden, sondern lediglich dann, wenn sie für eine kontextadaptive Anwendung konkret von Bedeutung sind. Es reicht folglich aus, lediglich abstrahierte, aggregierte oder abgeleitete Informationen abzulegen. Rohsensordaten müssen aus diesem Grund daher zuerst über geeignete Filtermechanismen vorverarbeitet und zumindest abstrahiert werden, bevor sie in das Wissensmodell des Fahrzeugs eingefügt werden.
- Die Interpretation von Kontextinformationen für weitere Berechnungen erfordert weitere charakterisierende Meta-Informationen. Im Speziellen muss die Güte der vorliegenden Information bekannt sein, also insbesondere Zuverlässigkeit, Auflösung und Genauigkeit. Diese sogenannten "Quality of Context"-Parameter [BKS03] müssen zusammen mit dem Wert der Kontextinformation verwaltet werden.

In Verbindung mit der Speicherung von Beobachtungen müssen aus bereits genannten Gründen zudem folgende Merkmale (Meta-Informationen) berücksichtigt werden:

Ortsbezug. Alle Beobachtungen sind wie beschrieben ortsbezogen. Der Beobachtungsort muss daher mit verwaltet werden.

Gültigkeitsbereich. Jedem beobachteten Ereignis muss ein Bereich zugeordnet werden, in dem es gültig ist. Die Angabe des Gültigkeitsbereichs ist notwendig, um abstrahierte oder abgeleitete Beobachtungen aggregieren zu können. Vor der Zusammenfassung zweier Beobachtungen muss eine Überschneidung ihrer Gültigkeitsbereiche festgestellt werden. Beispielsweise kann man von einem zusammenhängenden Regengebiet ausgehen, wenn zwei Beobachtungen vorliegen, deren Ortsangaben lediglich um etwa 500 Meter auseinanderliegen. Handelt es sich bei den Beobachtungen dagegen um einen Unfall, und die Ortsangaben differieren um 500 Meter, wäre davon auszugehen, dass zwei Unfallereignisse stattgefunden haben. Eine Zusammenfassung zu einem Ereignis darf also nicht erfolgen.

Zeitbezug. Da alle Beobachtungen dynamisch und somit zeitbezogen sind, muss die jeweilige Zeit, zu der die Beobachtung registriert wurde, mit abgespeichert werden. Auf Basis dieses Zeitstempels kann die Aktualität einer Beobachtung beurteilt werden.

Gültigkeitsdauer. Aufgrund der zeitlichen Dynamik muss jeder Beobachtung eine Gültigkeitsdauer zugeordnet werden, in Abhängigkeit des beobachteten Kontextaspektes. Sowohl die Angabe des Gültigkeitsbereichs, als auch die der Gültigkeitsdauer, ist Voraussetzung für eine Zusammenfassung von abstrahierten oder abgeleiteten Beobachtungen zu aggregierten Beobachtungen.

Bewegung. Unterschieden werden muss zudem zwischen statischen und dynamischen Ereignissen. Eine Autopanne wäre beispielsweise ein statisches Ereignis, ein Stauende, dessen Ort sich immer wieder verändern kann, dagegen ein dynamisches Ereignis. Dynamische Ereignisse stellen somit höhere Anforderungen an das zu entwickelnde Modell.

Zuverlässigkeit. Kooperative Telematikanwendungen basieren auf Beobachtungen von anderen Fahrzeugen. Hierbei besteht die Gefahr, dass fehlerhafte Informationen in die eigene Modellinstanz integriert werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit empfangender Beobachtungen abschätzen zu können.

Aus der speziellen Anwendungsdomäne ergeben sich des Weiteren folgende Anforderungen an die Datenhaltung und das Wissensmanagement:

Ortsangabe. Um eine Beobachtung exakt lokalisieren zu können, werden zur Ortsbestimmung GPSKoordinaten, sowie häufig Straßename und die Fahrtrichtung des Fahrzeugs verwendet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Genauigkeit der GPS-Koordinaten in Abhängigkeit des Beobachtungskontextes variiert.

Räumlicher Einflussbereich. Kontextaspekte können ausgehend vom Beobachtungsort auf der entsprechenden Straße unterschiedliche räumliche Einflussbereiche aufweisen. Insbesondere kann der räumliche Einflussbereich lediglich eine Fahrtrichtung (1), beide Fahrtrichtungen (2) oder ein übergeordnetes von der Straßentopologie und-geometrie unabhängiges Gebiet (3) umfassen (siehe Abbildung 2.18).

Kausalitätskette. Zudem müssen Kausalitätsketten unterstützt werden, welche beim Eintreten eines Ereignisses die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines kausal abhängigen (Folge-) Ereignisses beeinflussen.

Priorisierung. Den gespeicherten Beobachtungen müssen dynamisch Prioritäten zugeordnet werden können, um einerseits dem Fahrer situativ (z.B. beim Überholen) nur die wichtigsten Beobachtungen anzuzeigen. Liegt außerdem andererseits eine größere Anzahl an Beobachtungen vor, wird anhand der Priorisierung entschieden, welche Beobachtungen übertragen werden sollen.

Ortsbezogener Zugriff auf Beobachtungen. Um auf die benötigten Beobachtungen effizient zugreifen zu können, bietet sich aufgrund des inhärenten Ortsbezuges eine ortskorrelierte Verwaltung der bekannten Beobachtungen an.

Komplexität des Modells. Die Komplexität des Modells muss so gering wie möglich gehalten werden, weil eine Instanz des Modells im Fahrzeug von einer Anwendung genutzt wird, die auf einem eingebetteten System läuft, welches nur über

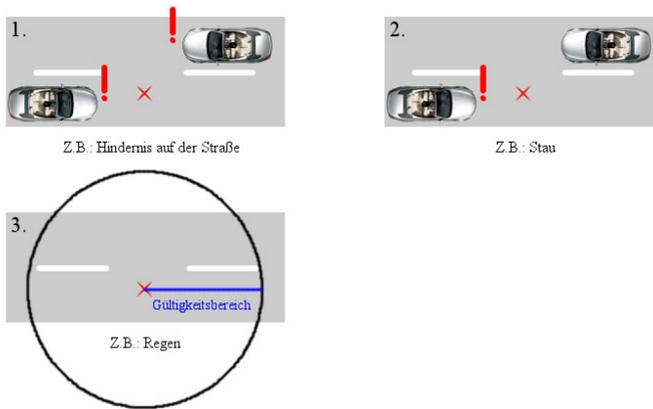


Abbildung 2.18: Räumliche Einflussbereiche von Kontextaspekten.

geringe Rechen- und Speicherressourcen verfügt. Die Komplexität kann hierbei in Zeit-, Speicher- und Übertragungskomplexität eingeteilt werden.

Unsicherheit. Das Wissensmodell muss die Repräsentation und Verwaltung unsicheren Wissens, sowie die Integration entsprechender Schließverfahren ermöglichen.

2.4.4 Informationsverbreitung

Da der Funkkanal von einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen genutzt wird, muss durch eine Priorisierungsstrategie sichergestellt werden, dass zeitkritische Nachrichten bevorzugt Zugriff auf den Funkkanal bekommen. Dies ist nötig, um die entsprechenden Latenzzeiten so gering wie möglich zu halten. Überdies hinaus ist auch zwischen sicherheitskritischen Nachrichten eine feingranulare Priorisierungsstrategie nötig. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die konkrete Dringlichkeit selbst ein und derselben Information abhängig vom aktuellen Kontext der Fahrzeuge ist. Daher muss die Priorisierungsstrategie nicht nur verschiedene Anwendungsklassen, sondern auch den Kontext der Fahrzeuge mit berücksichtigen.

Die Situation, in der sich die Fahrzeuge befinden, ist ständigen Änderungen unterworfen. Dies gilt in gleicher Weise für die Existenz von sicherheitsrelevanten Wetterbedingungen, Verkehrssituationen oder Fahrbahnbeschaffenheiten. Die Ausbreitungsstrategie muss sich deshalb schnell an die sich fortlaufend ändernden Rahmenbedingungen adaptieren können. Dies beinhaltet im Besonderen auch die Möglichkeit, das Verbreitungsgebiet und die Lebenszeit von Nachrichten permanent an den aktuellen Kontext anzupassen und veraltete Nachrichten durch entsprechend aktuellere zu ersetzen.

Des Weiteren ist es wichtig, die Bandbreite optimal zu nutzen, denn die verfügbare Kanalkapazität ist begrenzt und muss fair unter einer Reihe von Applikationen

aufgeteilt werden. Sie sollte daher in jeder Situation so gut wie möglich genutzt werden. Andererseits lässt sich jedoch die Zuverlässigkeit von Anwendungen wie der lokalen Gefahrenwarnung, deren Schlussfolgerungen und Vorhersagen im Allgemeinen auf unsicherem Wissen basieren, durch das Vorhandensein einer Vielzahl an Kontextinformationen merklich erhöhen. Die Informationsverbreitung muss zudem der hohen Netzwerkdynamik Rechnung tragen, welche durch die hohe Mobilität der Fahrzeuge bedingt wird. Generell tauschen die Fahrzeuge Wissen in Form von Nachrichten untereinander aus. Diese beinhalten dabei genau diejenigen Kontextinformationen, die potentiell auch für die anderen Fahrzeuge in der Region von Bedeutung sind. Prinzipiell können hierfür verschiedene grundlegende Technologien eingesetzt werden, um Informationen zwischen Fahrzeugen auszutauschen. Im Speziellen sind dies

- Zelluläre Systeme wie beispielsweise GSM oder UMTS. Zentraler Vorteil zellulärer Systeme ist die flächendeckende Verfügbarkeit, sowie die einfache und schnelle Verbreitung von Informationen in größeren geografischen Gebieten. Nachteile sind die anfallenden operativen Kosten, sowie die relativ großen Latenzzeiten bei der Kommunikation zwischen Fahrzeugen mit geringem räumlichen Abstand.
- Spontane Netzwerke, bei denen sich die beteiligten Entitäten selbsttätig untereinander vernetzen und so direkt miteinander kommunizieren (Ad-hoc Netze). Hierbei fallen keine operativen Kosten an. Zudem sind die Latenzzeiten für den unmittelbaren Nachrichtenaustausch relativ kurz. Soll jedoch eine größere Distanz überbrückt werden, so benötigt dies vergleichsweise viel Zeit oder ist unter Umständen gar nicht möglich, da die entsprechende Nachricht zwischen den beteiligten Entitäten jeweils schrittweise weitergeleitet werden muss (multi-hopping).
- Spontane Netzwerke unter Einbezug von Infrastrukturknoten, welche den zentralen Nachteil spontaner Netzwerke ausgleichen können. Infrastrukturknoten können dabei einen gegebenenfalls vorhandenen Mangel an weiterleitenden Entitäten ausgleichen und so die resultierende Latenzzeit bei Kommunikation über deutlich größere Entfernung verringern. Auf der anderen Seite fallen offensichtlich Kosten für die Bereitstellung dieser Infrastrukturknoten an.

Offensichtlich können für die Informationsverbreitung auch kombiniert alle verfügbaren Kommunikationstechnologien eingesetzt werden, um jeweils die individuellen Nachteile auszugleichen. Für die in dieser Arbeit betrachteten kommunikationsbasierten kooperativen Fahrerassistenzsysteme können zelluläre Systeme jedoch nur sehr bedingt eingesetzt werden. Dies liegt zum einen an den inhärenten operativen Kosten, die die zugrunde liegenden Geschäftsmodelle verkomplizieren. Dies gilt vor allem für Anwendungen, die über die Zeit ein vergleichsweise hohes Datenaufkommen produzieren, wie beispielsweise die Kollisionsvermeidung, oder auch die fortlaufende Übermittlung der Schaltzustände eines Ampelsystems. Zudem müssen wie oben erwähnt fahrsicherheitsrelevante Informationen mit äußerst geringer Latenzzeit übertragen werden. Dies ist wiederum beispielsweise bei der Kollisionsvermeidung von großer Bedeutung. Auf der anderen Seite nehmen die Latenzzeitanforderungen mit zunehmendem Abstand zum Ort der Nachrichtenerzeugung überproportional ab (siehe die möglichen Zeithorizonte zur Erfüllung der Fahraufgabe in Abschnitt 2.1). Das heißt, dass die vergleichsweise

großen Latenzzeiten bei der schrittweisen Weiterleitung in Ad-hoc-Netzen vernachlässigbar sind. Aus diesen Gründen stehen spontane automobiler Ad-hoc Netzwerke im Fokus dieser Arbeit. Im Folgenden sollen daher nun die wesentlichen Anforderungen an die Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzwerken im Detail vorgestellt werden, die sich aus den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Anwendungsgebieten, insbesondere der lokalen Gefahrenwarnung, ergeben.

Skalierbarkeit Eines der Kernprobleme der ad-hoc Vernetzung mobiler Knoten ist die Sicherstellung einer ausreichenden Skalierbarkeit. Die Konnektivität der Fahrzeuge in automobilen Ad-hoc Netzen ist verkehrsbedingt großen Schwankungen unterlegen. Dies hat entscheidenden Einfluss auf die möglichen Ausbreitungsstrategien und damit auch auf die Skalierbarkeit des Netzwerkes. Grundlegend muss dabei zwischen den folgenden zwei Extremen unterschieden werden:

- Falls nur wenige Fahrzeuge in einer Region mit einem entsprechenden System ausgestattet sind, ist eine schnelle Weiterleitung von Nachrichten aufgrund der geringen Konnektivität nur bedingt möglich. Trotzdem soll weitgehend sichergestellt werden, dass eine kritische Information in der Region, in der diese Information wichtig ist, erhalten bleibt. Dies bedingt, dass Fahrzeuge die entsprechende Nachricht speichern und physisch weiter tragen, bis sie einen geeigneten Kommunikationspartner finden, der die Nachricht aufnimmt und wiederum weiter trägt. Die Ausbreitungsstrategie muss diesem so genannten *physical store and forward* Rechnung tragen. Abbildung 2.19 zeigt schematisch nochmals dieses Funktionsprinzip [PRE06b] Fahrzeug *a* beobachtet an Position *A* ein Gefährdungspotential und kommuniziert dies an Fahrzeug *b* (1), welches sich gerade in Kommunikationsreichweite befindet. Fahrzeug *b* detektiert in der Folge ebenfalls das Gefahrenpotential. Es ist jedoch kein weiteres Fahrzeug aktuell in Kommunikationsreichweite. Fahrzeug *b* speichert die Beobachtungen jedoch zwischen, trifft im weiteren Fahrverlauf auf Fahrzeug *c* und kommuniziert diesem beide Beobachtungen (2). *c* speichert die Nachrichten wiederum selbst, obwohl die Fahrtroute von *c* selbst nicht an dem beschriebenen Gefahrenpotential vorbei führt. *c* leitet die Nachricht weiter an *d* (3), welches diese wiederum an *e* weiterleitet (4). Obwohl weder *c* noch *d* das Gefahrenpotential selbst erreichen, und obwohl die Fahrzeugdichte nicht ausreicht, um die Beobachtungen direkt in einem größeren Gebiet zu verbreiten, erreicht die Nachricht jedoch rechtzeitig Fahrzeug *e*. Kosch konnte in diesem Zusammenhang [Kos05b] weiterhin zeigen, dass sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug eine Nachricht eines anderen Fahrzeugs erhält einerseits von der Mindestkommunikationsdistanz der Fahrzeuge, also der Entfernung, über die eine Nachricht von einem oder mehreren Fahrzeugen verbreitet werden muss, abhängt, und andererseits von der mittleren Fahrzeugdichte. Unter Berücksichtigung einer erforderlichen Mindestwahrscheinlichkeit ergeben sich so wiederum Rückschlüsse auf die erforderliche Größe des Verbreitungsgebietes.
- In Szenarien mit hoher Verkehrsdichte wird eine große Anzahl an Fahrzeugen um den Kanalzugriff konkurrieren. Gleichzeitig steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass viele Fahrzeuge in kurzer Folge Nachrichten generieren. Die Wahrscheinlichkeit ist dabei groß, dass aufgrund der wiederum großen Anzahl an Fahrzeugen,

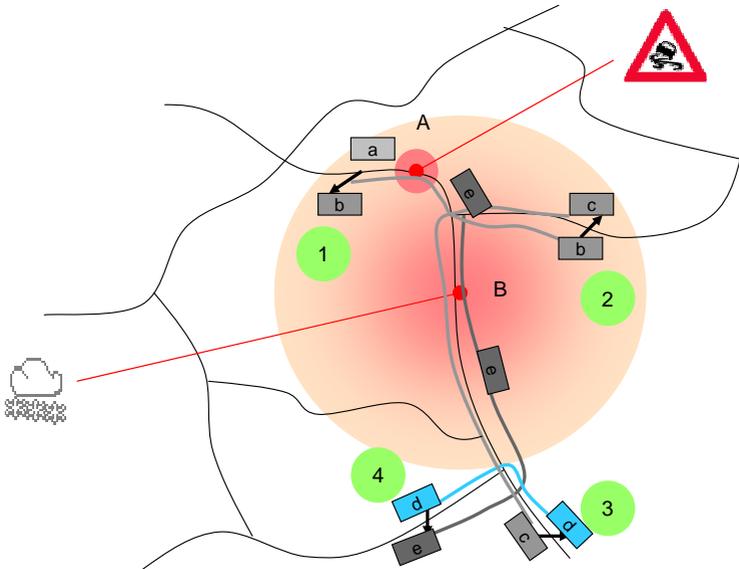


Abbildung 2.19: Prinzip des Physical Store and Forward [PRe06b]

die diese Nachrichten weiterleiten sollen (multi-hop), die zur Verfügung stehende Kanalkapazität schnell erschöpft ist. Die Verbreitungsstrategie muss dem durch eine gezielte Koordination der Netzwerkknoten entgegenwirken.

Offensichtlich erfordert letzteres Szenario eine Vielzahl an ausgestatteten und am System teilnehmenden Fahrzeugen. Es ist daher anzunehmen, dass während der Einführungsphase ausschließlich Szenarien mit geringer Knotendichte auftreten werden, die eine physische Zwischenspeicherung der Nachrichten erforderlich machen. Im Umkehrschluss kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die lokale Netzwerkdichte bei ausreichender Zahl an ausgestatteten Fahrzeugen gleichverteilt hoch ist. Vielmehr ist sie zudem offensichtlich von der aktuellen lokalen Verkehrsdichte abhängig. Es muss also beispielsweise Nachts oder in ländlichen Gebieten mit geringer Verkehrsdichte davon ausgegangen werden, dass trotz einer insgesamt über die Fahrzeugpopulation hohen Penetrationsrate des Systems lokal eine geringe Dichte an ausgestatteten Fahrzeugen vorherrschen kann. Im Speziellen muss festgehalten werden, dass sich die Netzwerkdichte, in der sich ein Fahrzeug aktuell befindet, von einem Moment auf den anderen sprunghaft ändern kann, beispielsweise wenn eine belebte Hauptstraße verlassen wird. Eine isolierte Fokussierung auf eines der beiden Kernszenarien ist daher nicht möglich. Vielmehr muss vor diesem Hintergrund die Informationsverbreitungsstrategie jederzeit alle möglichen Netzwerkdichten, sowie deren sprunghafte Änderung gleichermaßen

unterstützen. Wu und Riley [WFR04] konnten in diesem Zusammenhang in einem integrativen Ansatz, welcher sowohl die individuellen Fahrzeugbewegungen als auch den Weiterleitungsprozess von Nachrichten zwischen den Fahrzeugen in gleicher Weise berücksichtigt, analytisch zeigen, dass neben der Fahrzeugdichte auch die mittlere Fahrzeug- und Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen einen entscheidenden Einfluss auf die Verbreitung von Informationen in automobilen Ad-hoc Netzen hat.

Verkompliziert wird dieses Phänomen dabei von den insgesamt langen Lebenszyklen von Fahrzeugen, die sich in der Regel bei zwanzig Jahren und mehr bewegen. Verglichen mit den in der Kommunikations- und Informationstechnik üblichen Lebenszyklen von lediglich wenigen Jahren ergibt sich damit eine Verkomplizierung der oben geschilderten Problemstellung, da einerseits mit zunehmender Anzahl an ausgestatteten Fahrzeugen die Netzlast, und andererseits mit im Laufe der Zeit die Zahl der verfügbaren Anwendungen und damit letztlich auch die Diversifikation der Anforderungen an das Kommunikationssystem steigen. Anders als im Bereich der Informationstechnik, in der typischerweise frühzeitig neue verbesserte Systeme zur Verfügung stehen, die oft nicht oder nur bedingt abwärtskompatibel sind, wäre es im Bereich der Fahrzeugtechnik mit erheblichen Zusatzkosten verbunden, das initial verbreitete Kommunikationssystem auszutauschen. Es ist anzunehmen, dass sich die Gesamtarchitektur der Fahrzeug-IT-Systeme (und der Fahrzeuge insgesamt) in absehbarer Zeit nicht grundlegend wandeln werden und daher keine einfache Aktualisierung von verbauten Komponenten erlauben. Ein Wechsel auf eine andere Kanalfrequenz würde beispielsweise in der Regel den Austausch der fest im Fahrzeug verbauten Antennen erforderlich machen. Daher muss das initial ausgelieferte Kommunikationssystem hinreichend gut skalieren, wobei aus oben genannten Gründen die speziellen Rahmenbedingungen kooperativer Anwendungen im Fahrzeug ein erweitertes Verständnis des Begriffs *Skalierbarkeit* erfordern.

Im Rahmen der üblichen Kommunikationssysteme zwischen IT-Komponenten versteht man unter dem Begriff der Skalierbarkeit üblicherweise, dass das System bei zunehmender Anzahl der Teilnehmer, der Zugriffe, oder bei steigender räumlicher Ausdehnung die zugesicherten Übertragungsraten zwischen den Netzteilnehmern erhalten bleiben [Neu94]. Nach Neuman [Neu94] umfasst Skalierbarkeit dabei drei Faktoren, nämlich

- die Anzahl der Nutzer und Objekte, die Teil des Systems sind,
- die maximale räumliche Distanz der am weitesten entfernten Teilnehmer, sowie
- die Anzahl an Organisationen, die organisatorisch am System teilnehmen bzw. das System oder Teile davon verwalten.

Im Zusammenhang mit automobilen ad-hoc Netzwerken kommt insbesondere den beiden erstgenannten Faktoren eine besondere Bedeutung zu. Im Hinblick auf die große räumliche Ausdehnung dieser Netze beschränkt sich die Skalierbarkeit hierbei nicht auf die reine Zunahme an Nutzern und Objekten. Vielmehr muss auch aufgrund der möglicherweise sehr geringen Zahl an Nutzern eine ausreichende Zuverlässigkeit des Systems bei geringer Konnektivität gewährleistet werden (eine ausführliche Beschreibung hierzu findet sich in Kapitel 6, sowie in [KSE⁺06])

Priorisierung Da der Funkkanal in gleicher Weise von einer Vielzahl an unterschiedlichen Applikationen genutzt werden soll, muss sichergestellt werden, dass zeitkritische Nachrichten bevorzugt Zugriff auf den Funkkanal bekommen. Dies ist nötig, um die entsprechenden Latenzzeiten so gering wie möglich zu halten. Überdies hinaus ist auch zwischen sicherheitskritischen Nachrichten eine feingranulare Priorisierungsstrategie nötig. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die konkrete Dringlichkeit selbst ein und derselben Information abhängig vom aktuellen Kontext der Fahrzeuge ist. Daher muss die Priorisierungsstrategie nicht nur verschiedene Anwendungsklassen, sondern auch den Kontext der Fahrzeuge mit berücksichtigen.

Situationsadaptivität Die Situation, in der sich die Fahrzeuge befinden, ist ständigen Änderungen unterworfen. Dies gilt in gleicher Weise für die Existenz von sicherheitsrelevanten Wettberbedingungen, Verkehrssituationen oder Fahrbahnbeschaffenheiten. Die Ausbreitungsstrategie muss sich deshalb schnell an die sich fortlaufend ändernden Rahmenbedingungen adaptieren können. Dies beinhaltet im Besonderen auch die Möglichkeit, das Verbreitungsgebiet und die Lebenszeit von Nachrichten permanent an den aktuellen Kontext anzupassen und veraltete Nachrichten durch entsprechend aktuellere zu ersetzen.

Bandbreitennutzung Die verfügbare Kanalkapazität ist begrenzt und muss fair unter einer Reihe von Applikationen aufgeteilt werden. Sie sollte daher in jeder Situation so gut wie möglich genutzt werden. Andererseits lässt sich jedoch die Zuverlässigkeit von Applikationen wie der lokalen Gefahrenwarnung, deren Schlussfolgerungen und Vorhersagen im Allgemeinen auf unsicherem Wissen basieren, durch das Vorhandensein einer Vielzahl an Kontextinformationen merklich erhöhen. Dies bedeutet, dass die u.U. noch verfügbare Bandbreite systematisch bis zu einem gewissen Grad ausgenutzt werden können sollte. Sobald die Kapazitätsgrenze des Kanals erreicht ist, muss jedoch weiterhin sichergestellt werden, dass Nachrichten, die nur einen relativ geringen erwarteten Nutzen für andere Fahrzeuge haben, die Übertragungschancen und Latenzzeiten anderer (momentan wichtigerer) Nachrichten nicht merklich negativ beeinflussen.

Netzwerkdynamik Das Netzwerk muss der hohen Mobilität der Fahrzeuge Rechnung tragen. Das Übertragungsfenster von zwei sich entgegenkommenden Fahrzeugen bewegt sich gerade auf Autobahnen oftmals nur im Bereich von wenigen Sekunden. Es ist daher wahrscheinlich, dass nicht alle Nachrichten in dieser Zeit korrekt übertragen werden können. Aus diesem Grund sollte das Kommunikationssystem die Möglichkeit bieten, eine sinnvolle Reihenfolge der Nachrichten festzulegen, die übertragen werden sollen (siehe hierzu die ausführlichen Erläuterungen in Kapitel 6).

Einen besonderen Einfluss auf das Gesamtsystem hat auch der Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung und des Versandes. Offensichtlich erzeugen Fahrzeuge neue Warnnachrichten, sobald sie einen kritischen und für andere Verkehrsteilnehmer gefährlichen Fahrzustand erkannt haben. Um eine schnelle Adaption an die sich permanent ändernden Umstände zu gewährleisten, müssen im Umkehrschluss jedoch auch Nachrichten erzeugt werden, die belegen, dass eine zuvor von anderen Fahrzeugen gemeldete Situation in dieser Form nicht mehr festgestellt werden konnte (Revocation-Message). Schwierig wird es immer genau dann, wenn die zuvor gemeldete kritische Situation zwar nicht in der gleichen Art und Weise beobachtet werden konnte, die zur Erkennung

notwendigen Rahmenfaktoren jedoch unterschiedlich waren. In diesen Fällen kann eine Hypothese weder eindeutig bekräftigt, noch widerlegt werden. Um jedoch trotzdem alle nachfolgenden Fahrzeuge bestmöglich bei ihrer Vorhersage zu unterstützen, wäre vielmehr eine differenzierte Aussage sinnvoll, welche die beobachtete Situation im Detail beschreibt und zudem die Rahmenbedingungen aufzeigt, die zu diesen Beobachtungen führten.

Als Veranschaulichung dieses Phänomens soll wiederum das Beispiel einer möglichen Aquaplaninggefahr dienen. Ob das Phänomen Aquaplaning bei einem Fahrzeug auftritt oder nicht, hängt nicht nur von der momentanen Fahrbahnbeschaffenheit und der sich darauf befindenden Wassermenge und dessen Tiefe ab, sondern auch vom Geschwindigkeitsverlauf, dem Gewicht, dem Reifentyp und -zustand und der auf den Zentimeter exakten Position. Die Detektionsmöglichkeit ist also abhängig von der aktuellen Fahrzeugkonfiguration und dem Fahrzustand. Die Tatsache, dass ein Fahrzeug an einer bestimmten Stelle, anders als zuvor gemeldet, kein Aquaplaning beobachten kann, ist also noch kein hinreichendes Indiz dafür, dass diese Stelle kein Gefährdungspotenzial für andere Verkehrsteilnehmer (mehr) besitzt. Prinzipiell lässt sich jedoch festhalten, dass ein Fahrzeug immer genau dann eine Nachricht erzeugen und versenden sollte, wenn die darin enthaltenen Informationen einen signifikanten Informationsgewinn bei den anderen mit dem System ausgestatteten Fahrzeugen darstellen (siehe hierzu die Erläuterungen zur Objektivität der Situationserkennung in Abschnitt 2.3.2). Unter der Annahme, dass alle Fahrzeuge in einer bestimmten Region ähnlichen Kontext beobachten und austauschen, und sich aus diesem Grund die individuellen Erwartungshaltungen hinsichtlich eines bestimmten Ereignisses nicht grundlegend unterscheiden, entspricht der Informationsgewinn, den die Kommunikationspartner aus einer Beobachtung wahrscheinlich ziehen können, im Wesentlichen dem eigenen Erkenntnisgewinn. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass eine neue Nachricht immer genau dann erzeugt und verteilt werden sollte, wenn sich die eigene Erwartung signifikant von der tatsächlichen Beobachtung unterscheidet. Bei Gefahrenquellen, die abhängig von der eigenen Fahrzeugkonfiguration sind, sollten zudem entscheidende Parameter mit übertragen werden. Entspricht die Beobachtung im Wesentlichen dem Erwartungswert, minimiert sich damit der eigentliche Nutzen der Nachricht.

Zusammenfassend ergeben sich also die folgenden wesentlichen Anforderungen an die Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen.

- Eine optimale Ausnutzung der verfügbaren Kanalkapazität.
- Eine Kanalnutzung nach solidarisch fairen Kriterien.
- Eine feingranulare Priorisierungsmöglichkeit einzelner Nachrichten.

Abbildung 2.20 fasst zudem in Bezug auf die in Abschnitt 2.3 eingeführte Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf den Einfluss eines kooperativen Assistenzsystems auf das Fahrgeschehen typische charakteristische Eigenschaften zusammen.

2.4.5 Benutzerschnittstelle

Gefahren in der näheren Umgebung des Fahrers müssen dem Fahrer mitgeteilt werden. Dabei muss selbstverständlich überprüft werden, ob die Gefahr überhaupt auch

	Einfluss auf das Fahrgeschehen		
	Intervention	Aufmerksamkeit	Navigation / Information
Kontextaspekte	Fahrzeugzustand Gegenseitiges Ortsbewusstsein	Straßen- und Wetterbedingungen	Verkehrssituation
Informationserzeugung	Zyklisch (Adaptiv)	Ereignisgesteuert	Zyklisch (Adaptiv)
Vorherrschendes Kommunikationsmuster	Single-Hop Broadcast	Multi-Hop Broadcast	Multi-Hop Broadcast / Aggregation
Latenzzeitanforderungen			
Verbreitungsgebiet			
Räumliches Einflussgebiet			

Abbildung 2.20: Typische charakteristische Eigenschaften verschiedener kooperativer Fahrerassistenzklassen

für den Fahrer relevant ist. Eine Möglichkeit wäre der Abgleich mit der einprogrammierten Route des Navigationssystems. Zusätzlich ist es ausschlaggebend, ob sich die Gefahr auf der gleichen Straßenseite wie das Fahrzeug befindet. Bei der Warnung muss sichergestellt werden, dass der Fahrer nicht überfordert oder vom Straßengeschehen abgelenkt wird.

Folglich sollte auch die Benutzerschnittstelle zum Fahrer kontextadaptiv handeln und den Fahrer entsprechend der aktuellen Fahrsituation informieren. Hierbei spielen Zeitpunkt und Art der Mitteilung die größte Rolle. Hat das System mehrere Gefahren gespeichert, dann muss es entscheiden, welche dem Fahrer zuerst mitgeteilt wird. Hier ist ebenfalls ein relevanzbasiertes Vorgehen sinnvoll. So würde eine weiter entfernte aber sehr gefährliche Situation eher angezeigt werden als eine näher gelegene, jedoch weniger gefährliche. Für die Art der Mitteilung gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Visuell (z.B. über ein Head-Up-Display)
- Akustisch (z.B. über die Lautsprecher)
- Haptisch (z.B. über das Lenkrad)

Abbildung 2.21 zeigt exemplarisch eine mögliche visuelle Benutzerschnittstelle zur Information des Fahrers hinsichtlich verminderter Traktion auf der Fahrtroute durch Einblendung eines Gefahrensymbols im Navigationssystem [Kos04b]. Entscheidenden Einfluss im Hinblick auf eine effektive und zielgerichtete Fahrerinformation haben dabei

- die Sicherheit hinsichtlich der Richtigkeit der Existenz des symbolisierten Ereignisses bzw. des fahrsicherheitsrelevanten Kontextaspektes,
- der Einfluss auf das Fahrgeschehen (siehe Abschnitt 2.3.3), sowie
- die Auswirkungen der durchzuführenden Aktion.



Abbildung 2.21: Exemplarische Benutzerschnittstelle [Kos04b]

Die Qualität der Benutzerinteraktion hängt also folglich auch mit der Qualität der zur Verfügung stehenden Kontextinformationen ab. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine optimale Information des Fahrers nur auf Basis einer umfassenden vorausgegangenen Bereitstellung der relevanten Kontextaspekte hinsichtlich der aktuellen und zukünftigen Fahrumgebung und des Fahrerszustands erfolgen kann, sowie einer Interpretation der Qualität der entsprechenden Beobachtungen. Eine weiterführende ergonomische Evaluation hinsichtlich optimaler Benutzerinteraktionsparadigmen würde über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gehen und wird daher nicht näher im Detail erläutert. Eine Übersicht und weiterführende Analyse über mögliche Fahrerinteraktions- und Warnparadigmen und deren Wirksamkeit unter Berücksichtigung kognitiver Aspekte findet sich beispielsweise in [Kim02, HWG93, Gre95, Inv96, HBJ03].

2.4.6 Datensicherheit und Datenschutz

Selbst wenn nicht aktiv in die Fahrdynamik des Fahrzeugs eingegriffen wird, muss die Vorhersage einer Situation möglichst fehlerfrei und genau sein, um auf eine breite Nutzerakzeptanz zu stoßen. Sie muss daher insbesondere sicher gegenüber gezielten Angriffen sein. Bei den im Fokus dieser Arbeit stehenden kooperativen Systemen basieren Entscheidungen im Wesentlichen auf Informationen, die von anderen Teilnehmern bereitgestellt werden. Aus diesem Grund müssen Mechanismen bereitgehalten werden, welche die Vertrauenswürdigkeit der verwerteten Informationen sicherstellen oder den Grad der Vertrauenswürdigkeit bei der weiteren Evaluierung mit einbeziehen.

Potentielle Angriffsszenarien sind hierbei insbesondere die böswillige Verbreitung falscher Beobachtungen oder die systematische Störung des gemeinsamen Kommunikationskanals. Ein weiteres Angriffsziel ist zudem die Manipulation der eigenen Sensorensysteme (um fehlerhafte Messwerte zu verbreiten) oder die Manipulation der System- oder Kommunikationsmodule [ABD⁺06, RPH06]. Ein mögliches Verfahren um derartige willentliche Manipulationen aufzudecken und gegebenenfalls zu korrigieren wird in [GGS04] beschrieben. Raya et al. beschreiben zudem in [RPH06, RH06] eine Architektur zur Authentifizierung der am Netzwerk teilnehmenden Fahrzeuge. Klassische Verfahren wie beispielsweise Zertifizierung oder Reputationssysteme [Mag04] erzeugen jedoch hohen administrativen Aufwand und Kosten. Zusätzlich bieten diese Verfahren keinen ausreichenden Schutz davor, dass dem Fahrzeug gezielt falsche Sensorwerte vorgegaukelt werden. Ein ergänzender Ansatz besteht darin, den konkreten Inhalt vor

dem Hintergrund des eigenen bereits vorhandenen Wissens auf seine Plausibilität zu überprüfen [Ost05]. Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass nur sehr wenige Angreifer vielen aufrichtig agierenden Teilnehmern gegenüberstehen. Es muss daher ausgeschlossen werden, dass sich ein Angreifer gleichzeitig als eine Vielzahl von anderen unterschiedlichen Fahrzeugen ausgeben kann und so ein in sich plausibles aber falsches Bild einer Situation vorgaukelt. Des Weiteren erhöht sich hierdurch die Komplexität der Schlussfolgerungsmechanismen. Dies beruht vor allem auf der dynamischen Natur vieler Gefährdungspotenziale. Eine von der bisherigen Einschätzung der Situation abweichende Beobachtung kann mit begründet sein dadurch, dass

- sich die Situation tatsächlich inzwischen geändert hat,
- ein Sensor eines Fahrzeugs falsche Messwerte liefert, oder
- ein Angriff vorliegt.

Ein diesbezüglich fehlertolerantes System muss aus diesem Grund zu einem Zeitpunkt unter Umständen verschiedene Situationseinschätzungen vorhalten, um auf Basis noch folgender zusätzlicher Erkenntnisse zwischen einer fehlerhaften oder verfälschten Information und einer Veränderung der Situation zu unterscheiden. Dies hat jedoch zur Folge, dass das Wissensmanagement signifikant schwieriger ist und höhere Anforderungen an die Datenhaltung und Schlussfolgerungsmechanismen stellt. Jedoch erhöhen Protokolle zur Sicherstellung des Informationsaustausches die Anforderungen an den Kommunikationskanal.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass Fahrzeuge keine Informationen verteilen, die Rückschlüsse auf Gewohnheiten oder den aktuellen Zustand des Fahrers zulassen. Insbesondere darf es nicht möglich sein, Bewegungsprofile einzelner Fahrer zu erstellen oder Verstöße gegen Straßenverkehrsregeln automatisiert aufzuzeichnen und zu ahnden. Sendet ein Fahrzeug z.B. periodisch seine aktuelle Geschwindigkeit, so darf dies nicht als Beweis einer eventuell vorliegenden Geschwindigkeitüberschreitung verwendet werden. Dem kann dadurch vorgebeugt werden, dass derartige Kontextinformationen nicht von den Fahrzeugen verbreitet werden. Allerdings beruhen viele kooperative Assistenzdienste unter anderem gerade auch auf einer genauen Kenntnis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten, -Positionen und Fahrtrichtungen der umgebenden Fahrzeuge. Die Beachtung von datenschutzrechtlichen Fragestellungen hat also unter Umständen signifikanten Einfluss auf die weiteren Analysemöglichkeiten.

Einen anderen Ansatz verfolgen Anonymisierungsstrategien, die zumeist auf dem Einsatz von Pseudonymen beruhen. Hierbei stellt sich allerdings die Frage nach einer geeigneten Pseudonymwechselstrategie. Zusätzlich kann die Übermittlung von fahrzeugspezifischen Sensorwerten gegebenenfalls Rückschlüsse auf die Identität eines Fahrzeugs ermöglichen, was den Wechsel eines Pseudonyms weiter erschweren würde. Für eine ausführlichere Risikoanalyse sei auf [Ost05, ODS07] verwiesen. Dinger und Hartenstein [DH06] zeigen außerdem auf, wie vermieden werden kann, dass sich ein Fahrzeug als ein anderes Fahrzeug ausgeben kann, bzw. vorgeben kann, zu beliebigen Zeitpunkten an beliebigen Orten zu sein (sogenannte *Sybil Attacks*).

Die vorangegangene Analyse hat gezeigt, dass die einzelnen Problemfelder stark miteinander verzahnt sind. Es ergibt sich analog zu klassischen Regelsystemen im Fahrzeug ein Regelkreis, der jedoch nicht auf ein individuelles Fahrzeug beschränkt ist,

2 Kooperative Fahrerassistenzsysteme

sondern über viele verschiedene Fahrzeuge hinweg wirksam ist. Abbildung 2.22 veranschaulicht den Ablauf der Verarbeitungsschritte nochmals grafisch. Interpretierte und ausgewertete Beobachtungen werden bei Bedarf und Möglichkeit kommuniziert und so verbreitet. Eigenes und so verbreitetes Wissen wird ganzheitlich wiederum ausgewertet und verifiziert. Darauf aufbauend kann die zukünftige Fahrsituation abgeschätzt und vorhergesagt werden. Die Vorhersage wird letztlich wiederum durch die eigene Beobachtung bestätigt oder widerlegt und wieder bei Bedarf kommuniziert. Dabei sind

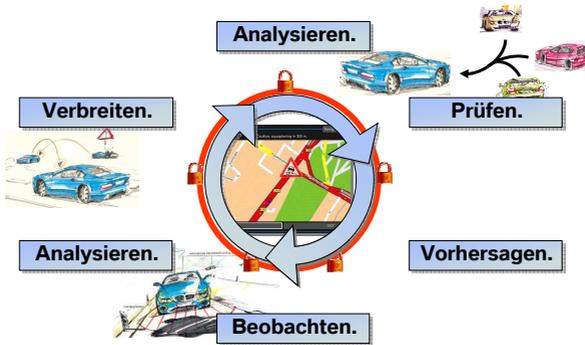


Abbildung 2.22: Erweitertes Regelkreislauf über verschiedene Fahrzeuge hinweg

insbesondere die Fragen der Wissensrepräsentation, Kommunikation und Datenanalyse von besonderer Bedeutung. Diese sollen daher im Folgenden, angefangen bei der Wissensrepräsentation, im Detail erläutert werden.

Kontextmanagement im Fahrzeug

Bisher wurden die vom Fahrzeug selbst beobachteten Kontextinformationen lediglich von internen Anwendungen benötigt. Dies gilt insbesondere für Fahrerassistenzsysteme, die in vielen Fällen mit dedizierten Sensoren unmittelbar gekoppelt sind. Die so gewonnenen Daten können proprietär gespeichert werden, ein standardisierter Zugriff ist offensichtlich nicht notwendig. Zudem sind die meisten Assistenzanwendungen im Fahrzeug dahingehend zustandslos, dass sie für ihre Funktion keine Kenntnis vergangener Beobachtungen benötigen. Eine (kooperative) prädiktive Fahrerassistenz erfordert es, dass Informationen hinsichtlich des Fahrkontextes für längere Zeit im Fahrzeug gespeichert werden müssen. Es ist also notwendig, sowohl die eigenen, als auch die von anderen Fahrzeugen verbreiteten Beobachtungen und höherwertigen Kontextinformationen im Fahrzeug so zu verwalten, dass ein schneller und zielgerichteter Zugriff darauf von diversen Anwendungen möglich ist.

Im Folgenden soll daher, aufbauend auf einem formalen methodischen Basismodell, eine generische ontologiebasierte Kontextwissensbasis vorgestellt werden, die es erlaubt, das im Fahrzeug vorhandene Kontextwissen entsprechend den vorgestellten Anforderungen zu verwalten.

3.1 Kontextbäume als Modellierungsgrundlage

Das in diesem Abschnitt beschriebene Modell soll im Weiteren als theoretische Grundlage für die erarbeiteten Lösungskonzepte dienen. Wesentliche Grundlage des Modells ist dabei die Unterscheidung in zwei Sichten - die *Deus-Sicht* und die *Individualsicht*. Die *Deus-Sicht* beschreibt dabei objektiv und allumfassend den relevanten Ausschnitt der realen Welt. Demgegenüber beschreibt die *Individualsicht* lediglich die einzelnen Einschätzungen der Entitäten über eben jenen Zustand der Welt. Wesentlich dabei ist, dass in der *Individualsicht* nur eine begrenzte Anzahl an Informationen zur Verfügung steht. Die *Deus-Sicht* ist offensichtlich technisch nicht realisierbar, sie ist jedoch für die Auswertung der in dieser Arbeit entwickelten Konzepte von entscheidender Bedeutung und soll deshalb im Folgenden dargestellt werden.

3.1.1 Die Deus-Sicht

Kontextabhängige oder situationsbezogene Systeme agieren in Abhängigkeit der aktuellen Ausprägung der sie umgebenden Umwelt und ihres eigenen Zustands. Die hierzu notwendigen Aspekte lassen sich unterscheiden in

- räumliche Aspekte, beispielsweise Temperatur, Luftdruck oder Niederschlagsmenge,
- Entitäten, beispielsweise Fahrzeuge, Personen oder Räume in Gebäuden,
- die Zustandsparameter bzw. Kontextaspekte dieser Entitäten, beispielsweise die räumliche Ausdehnung eines Zimmers oder der Ladezustand eines Handy-Akkus,
- Abhängigkeiten zwischen Entitäten, sowie
- Abhängigkeiten zwischen Zustandsparametern einer Entität und zwischen räumlichen Aspekten.

Im Folgenden bezeichne daher

- \mathcal{P} die Menge der räumlichen Aspekte,
- E die Menge der existierenden Entitäten, sowie
- K_{e_i} die Menge der die Entität e_i charakterisierenden Kontextaspekte.

Ferner bezeichne T den Gültigkeitszeitraum des Modells, wobei auf T eine lineare Ordnung definiert ist. Dem Deus-Modell liegt ein vierdimensionaler Modellraum \mathcal{R}^4 zugrunde, mit drei räumlichen und einer zeitlichen Dimension. Dabei sei \mathcal{R}^4 ein kanonischer Euklidischer Raum mit üblicher Abstands- und Winkelmetrik, d.h. für zwei beliebige Punkte $a = (a_1, a_2, a_3, t)$ und $b = (b_1, b_2, b_3, t)$ im Modell gilt

$$\text{dist}(a, b) = |a - b| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (a_i - b_i)^2}$$

Ein Ort o des Modellraums \mathcal{R}^4 bezeichne dabei im Folgenden ein Tupel $o = (o_1, o_2, o_3)$, also eine Gerade im Modellraum bzw. einen Punkt ohne Berücksichtigung des Zeitpunktes. Die Menge der Orte beschreibt einen Teilraum \mathcal{R}^3 des Modellraums \mathcal{R}^4 . Für jeden räumlichen Aspekt $p \in \mathcal{P}$ existiert eine Funktion $f_p(o, t) \rightarrow \mathcal{W}_p$ mit $t \in T$, die ihm für jeden Punkt des Raumes \mathcal{R}^4 einen konkreten Wert aus dem spezifischen Wertebereich \mathcal{W}_p von p zuweist. Gleiches gilt für alle Entitäten, wobei hier der Wertebereich binär eingeschränkt ist auf die Existenz bzw. Nichtexistenz der Entität am beschriebenen Ort, d.h. ob diese Entität zum beschriebenen Zeitpunkt diesen Ort überdeckt. Ferner wird jede Entität wie in Abschnitt 2.1 beschrieben durch ihren Kontext näher spezifiziert. Zudem ist jeder Entität e_i ein Gültigkeitszeitraum $T_{e_i} \subseteq T$ zugeordnet, welcher beschreibt, zu welchen Zeitpunkten diese Entität überhaupt existent ist. Für alle Zeitpunkte außerhalb dieses Gültigkeitszeitraumes existiert die Entität offensichtlich nicht. Es gilt also

$$\forall p \in \mathcal{P} : \exists f_p(o, t) \rightarrow \mathcal{W}_p$$

$$\forall e_i \in E : \exists K_{e_i} \wedge f_e(o, t) \rightarrow \{existent, nichtexistent\}$$

$$\forall t_i \in T \mid t_i \notin T_{e_i} : f_e(o, t) = nichtexistent$$

Dabei entspricht der Definitionsbereich von f_e und f_p der Menge von Orten \mathcal{R}^3 des Modellraums über dem Zeitintervall T , in dem der Modellraum definiert ist.

Im Einklang mit der Kontextdefinition nach Dey [Dey00] (siehe Abschnitt 2.1) können weiterhin auch Orte $o \in \mathcal{R}^3$ als Entitäten betrachtet werden. Auf Basis dieser Überlegung können virtuelle Orte (PoI - Point-of-Interest) definiert werden, wobei ein PoI genau einen Ort im Modellraum \mathcal{R}^4 beschreibt. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass jedem PoI in dessen Gültigkeitszeitraum (also dessen Definitionsbereich) ein Ort im Modellraum zugeordnet wird. Virtuelle Orte lassen sich weiter verallgemeinern zu Interessensgebieten (AoI - Areas of Interest), wobei ein AoI eine abgeschlossene und üblicher- aber nicht notwendigerweise zusammenhängende Fläche (also eine Menge von Orten) beschreibt. Auch Entitäten lassen sich weiter klassifizieren. Hierbei spielen insbesondere Personen eine wichtige Rolle, da deren charakterisierende Kontextaspekte sich typischerweise von denen von Objekten oder Dingen unterscheiden. Abbildung 3.1 zeigt daher mögliche Verfeinerungen der Klasse Entität. Als Konsequenz des Homo-

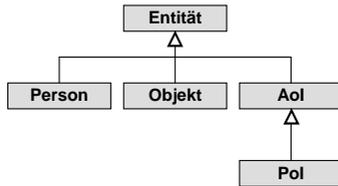


Abbildung 3.1: Spezialisierungshierarchie der Klasse der Entitäten

morphismus zwischen (virtuellen) Orten und Entitäten können auch die räumlichen Aspekte, die ja den Zustand an einem bestimmten Ort im Modellraum widerspiegeln, als Kontextaspekt bezüglich des dort definierten Interessensortes oder -gebietes aufgefasst werden. Die Mächtigkeit der beiden Darstellungen ist offensichtlich gleich, da jeder Ort des Modellraumes als PoI abgebildet werden kann, wobei dies zu einer unendlichen Menge von PoI führt. Da in der Praxis aber in der Regel nur endlich viele Orte von Interesse sind, lässt sich die Komplexität des Modells so deutlich reduzieren. Umgekehrt kann zudem auch der Ort und die räumliche Ausbreitung einer Entität als Kontextaspekt aufgefasst werden. Dies gilt im Speziellen auch für PoIs, d.h. der konkrete Ort des virtuellen Ortes lässt sich ebenfalls darstellen als den PoI charakterisierenden Kontextaspekt. Vor diesem Hintergrund lässt sich der Modellraumschnappschuss \mathcal{R}_t^3 bei unveränderter Mächtigkeit vereinfachen zu

$$\mathcal{R}_t^3 = \bigcup_{e_i \in E} K_{e_i},$$

also der Menge der existenten Entitäten, einschließlich der definierten virtuellen Interessensgebiete, sowie deren Kontext.

Bisher vernachlässigt wurde allerdings die Abbildung der Abhängigkeiten zwischen Entitäten bzw. zwischen den einzelnen Kontextaspekten, wobei letztere genau genommen nicht unmittelbar zur Kontextdarstellung notwendig sind. Sie werden aber zur Ableitung von höherwertigem Kontext, sowie zur Überprüfung der Plausibilität der eigenen Beobachtungen benötigt. Die Abhängigkeiten zwischen Entitäten sind jedoch zur umfassenden Darstellung des Kontextes einer Entität notwendig. So kann es beispielsweise entscheidend sein, zu wissen, ob sich ein Mobiltelefon zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem bestimmten Fahrzeug befindet, oder nicht. Generell gibt es eine Vielzahl an möglichen Abhängigkeiten zwischen Entitäten, wobei die folgenden in der Regel von vordergründigem Interesse sind:

- Die *Ist-Teil-Von-Beziehung* beschreibt hierarchische Abhängigkeiten von Entitäten. Beispielsweise ist ein Rad Teil eines Autos.
- Die *Bewegungskorrelation* verbindet Entitäten, deren Bewegungen im Modellraum miteinander korreliert sind, die sich also zusammen im gleichen lokalen dynamischen System bewegen. Beispielsweise bewegt sich ein Mobiltelefon, das sich in einem Fahrzeug befindet, zusammen mit diesem Fahrzeug im Modellraum. Im Speziellen bilden daher Ist-Teil-Beziehungen eine Untermenge der Bewegungsabhängigkeit.
- Die *Besitzt-Beziehung* spiegelt die aktuellen Besitzverhältnisse wieder, d.h. es werden ausschließlich Entitäten aus der Gruppe der Personen mit Entitäten aus der Gruppe Objekte korreliert. Besitzt-Beziehungen spielen insbesondere bei der weiteren Ableitung von Aktionen eine Rolle.
- Die *Beeinflusst-Zustand-Beziehung* beschreibt eine Korrelation von Zuständen zwischen Entitäten, wobei der Grad der Beeinflussung oft zusätzlich mit der räumlichen Anordnung der Entitäten im Modellraum zusammenhängt. Eine rote Ampel beeinflusst beispielsweise in der Regel den (künftigen) Zustand eines sich einer Kreuzung nähernden Fahrzeugs. Wie bei der Besitzt-Beziehung spielen derartige Zusammenhänge wiederum vor allem hinsichtlich der Ableitung von Aktionen eine Rolle.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die Beeinflusst-Zustand sowie die Ist-Teil-von Beziehung im Wesentlichen domänenspezifisch sind und daher statisches Wissen darstellen. Im Gegensatz dazu beschreiben die Besitzt-Beziehung und die Bewegungskorrelation dynamische Sachverhalte, wobei letztere üblicherweise eine höhere Dynamik aufweist. Die Bewegungsabhängigkeit bietet zudem eine Reihe von Möglichkeiten zur Bestimmung des aktuellen Aufenthaltsortes, speziell im Zusammenhang mit der Besitzt-Beziehung. Beispielsweise lässt sich der Aufenthaltsort einer Person über die Position seines Mobiltelefons ableiten, das diese gerade bei sich trägt (das also die gleiche Bewegungsabhängigkeit besitzt).

Zur besseren Verständlichkeit und Veranschaulichung soll im Folgenden die Zeit im Modellraum nicht weiter betrachtet werden. Das Modell wird stattdessen quasi statisch zu einem bestimmten Zeitpunkt, der Time-of-Interest (ToI) dargestellt. Im Zeitintervall T existiert also zu jedem Zeitpunkt $t \in T$ ein (initial) dreidimensionaler Modellraum-schnappschuss \mathcal{R}_t^3 , der den zum Zeitpunkt t gültigen realen Zustand der Welt beschreibt. Der Modellraum \mathcal{R}^4 bildet schließlich die Vereinigung aus einer unendlichen

Zahl an Modellraumschnappschüssen, wobei $\mathcal{R}^4 = \bigcup_{t \in T} \mathcal{R}_t^3$. Unter Berücksichtigung der Bewegungsabhängigkeit kann nun jeder Modellraumschnappschuss \mathcal{R}_t^3 weiterhin rekursiv so definiert werden, dass jede Entität e_i einen eigenen ihr zu- bzw. untergeordneten Modellraumschnappschuss R_{t,e_i}^3 aufspannt, wobei gilt $\mathcal{R}_t^3 = \bigcup_{e_i \in E} R_{t,e_i}$.

Der so von e_i aufgespannte Unterraum enthält alle diejenigen Entitäten, die sich zum Zeitpunkt t im gleichen Bewegungssystem befinden wie e_i . Diese abhängigen Entitäten, einschließlich deren Zustände, können weiterhin wiederum als Kontextaspekte von e_i aufgefasst werden. Auf Basis dieser rekursiven Definition wird eine Entität e_i letztlich durch die diese Entität unmittelbar beschreibenden Kontextaspekte K_{e_i} sowie die abhängigen Entitäten beschrieben. Eine Entität ist also zum Zeitpunkt t_i definiert durch:

$$e_{i,t} := (K_{e_i,t}, R_{t,e_i}^3)$$

Ein kontextadaptives System S_t zur Zeit t kann auf dieser Grundlage ebenfalls als virtuelle Entität modelliert werden, wobei S_t genau \mathcal{R}_t^3 aufspannt. Es entsteht so rekursiv eine Baumstruktur (*Kontextbaum*), die zusätzlich zum charakterisierten Kontext nun auch hierarchisch die Bewegungsabhängigkeit der Entitäten mit beinhaltet. Die Rekursion terminiert schließlich, wenn in einem Unterraum keine weitere Entität mehr existiert, wenn also der Kontext einer Entität nicht durch weitere Entitäten beschrieben wird. Diese Unterräume werden als atomare Unterräume bezeichnet. Damit gilt

$$S_t \rightarrow \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

Da jede Entität wiederum einen Unterraum aufspannt, gilt ferner

$$R_{e_i,t} \rightarrow \{e_j, e_{j+1}, \dots, e_{j+k}\}$$

Für atomare Unterräume gilt ferner

$$e_{i,t}^a := (K_{e_i,t}, \emptyset),$$

d.h. sie werden lediglich durch die unmittelbaren Kontextaspekte der atomaren Entität $e_{i,t}^a$ charakterisiert.

Da der Ort einer Entität als Kontextaspekt zu dieser Entität aufgefasst werden kann, können die Aufenthaltsorte von bewegungsabhängigen Entitäten relativ zueinander definiert werden. Ferner bleibt festzuhalten, dass das Wurzelement, also S_t offensichtlich keinen dedizierten Aufenthaltsort benötigt. In der Regel besitzen Entitäten eine räumliche Ausdehnung. In diesen Fällen kann die relative Position der Entitäten beispielsweise durch Korrelation ihrer Schwerpunkte eindeutig definiert werden, unabhängig von der konkreten Berechnungsvorschrift des jeweiligen Entitätenschwerpunktes. Im Speziellen befindet sich eine Entität genau dann im Bewegungssystem einer anderen Entität, wenn deren Schwerpunkt innerhalb der räumlichen Ausdehnung der das Bewegungssystem definierenden Entität liegt. Abbildung 3.2 zeigt grafisch die resultierende rekursive Baumstruktur eines abstrakten Modellraumschnappschusses \mathcal{R}_t^3 zum Zeitpunkt t

Der Wurzelknoten repräsentiert dabei den Modellraumschnappschuss \mathcal{R}_t^3 und die inneren Knoten die zum Zeitpunkt t existierenden Entitäten einschließlich PoIs bzw. AoIs. Innere Knoten der untersten Ebene repräsentieren weiterhin atomare Entitäten,

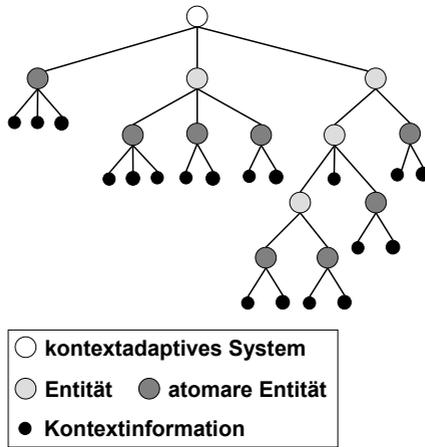


Abbildung 3.2: Bewegungskorrelierter Kontextbaum

in dem Sinne, dass sie nicht weiter durch andere Entitäten charakterisiert werden. Blattknoten stellen letztlich den Kontext dieser atomaren Entitäten dar. In gleicher Weise ist der Kontext der inneren Knoten durch die Menge der Kontexte aller Kindknoten charakterisiert. Abbildung 3.3 visualisiert das ortskorrelierte rekursive Aufspannen der Unterräume in einem zweidimensionalen Modellraumschnappschuss.

Dabei bleibt festzuhalten, dass in vielen Fällen charakterisierende Eigenschaften einer Entität prinzipiell sowohl als bewegungsabhängige Entität einschließlich deren Kontext beschrieben werden kann, als auch direkt als direkter Kontextaspekt. So kann beispielsweise der Tankinhalt eines Fahrzeugs als Kontext der Fahrzeugentität abgebildet werden. Es ist aber auch möglich, den Tank des Fahrzeugs als abhängige Entität zu modellieren, wobei der Tankinhalt dann als Kontext der Entität Tank abgebildet wird. Letzterer wird durch die rekursive Abhängigkeit jedoch auch zum Kontext der Entität Fahrzeug. Dies gilt jedoch nur bei statischen Beziehungen zwischen den Entitäten, also insbesondere bei Ist-Teil-Von Beziehungen. Vor diesem Hintergrund wird eine die Entität beschreibende Eigenschaft in der Regel genau dann als rekursiv abhängige Entität modelliert, wenn entweder die Bewegungskorrelation dynamisch wechselt, die relative räumliche Beziehung der beiden Entitäten von Bedeutung ist, oder weitere Eigenschaften der abhängigen Entität modelliert werden sollen. Ist beispielsweise lediglich der Tankinhalt von Interesse, so erscheint es sinnvoller, die Eigenschaft Tankinhalt unmittelbar als Kontext der Entität Fahrzeug aufzufassen. Wenn darüber hinaus beispielsweise auch noch das Fassungsvermögen, der Zustand und die Temperatur im Tank von Bedeutung sind, ist die rekursive Modellierung als Tank-Entität sinnvoller.

Die Repräsentation des Modellraums mittels der gerade beschriebenen Kontextbäume bietet durch die einfache formale Abbildung von Bewegungsabhängigkeiten bzw. Ist-Teil-Von-Beziehungen im Speziellen Vorteile, wenn eine Entität in ein neues Bewe-

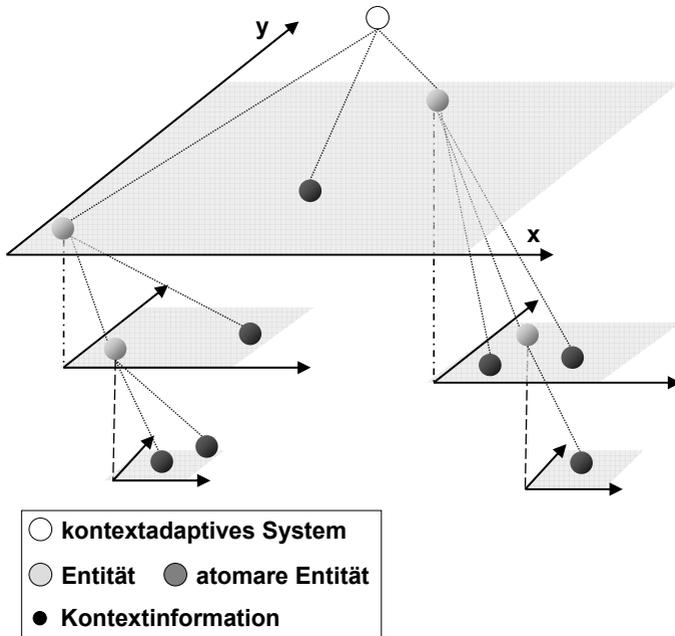


Abbildung 3.3: Ortskorreliertes rekursives Aufspannen der Unterräume eines Kontextbaums in einem zweidimensionalen Modellraumschnappschuss

gungssystem wechselt. Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise. Sobald beispielsweise eine Person von einem Fahrzeug in ein anderes wechselt, nimmt sie typischerweise ihre abhängigen Entitäten mit, beispielsweise ihren PDA oder ein Mobiltelefon. Zudem ist es möglich, die aktuelle Bewegungsdynamik eines Bewegungssystems auf Basis eines Bewegungsvektors als weiteren Kontextaspekt der sich bewegenden Entität abzubilden. Dabei gilt wiederum, dass sich bewegungsabhängige Entitäten rekursiv auf dieses Bewegungssystem beziehen lassen.

Analog zur Repräsentation des eben beschriebenen Kontextbaums lassen sich auch Besitz-Beziehungen als Baumstruktur abbilden. Dabei bildet wiederum der Modellraumschnappschuss \mathcal{R}_t^3 den Wurzelknoten. Die Menge der Kindknoten des Wurzelknotens bilden nun alle Entitäten der Unterkategorie Person. Jeder Person, also jedem Knoten der ersten Hierarchie-Stufe werden weiterhin genau diejenigen Entitäten der Unterkategorie Objekt zugeordnet, die diese Person zum Zeitpunkt t besitzt. Die von diesem Objekt in einer Ist-Teil-Von-Beziehung abhängigen weiteren Entitäten (Objekte) sind wiederum rekursiv implizit auch im Besitz dieser Person. Da jedes Objekt zu einem Zeitpunkt nur im Besitz einer Person sein kann, ergibt sich wiederum eine Baumstruktur ausgehend vom gleichen Wurzelknoten.

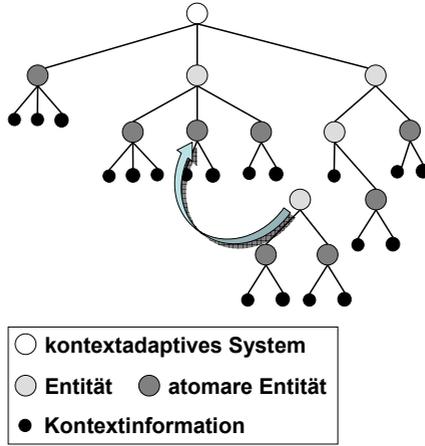


Abbildung 3.4: Wechsel der Bewegungskorrelation im Kontextbaum

Unter Berücksichtigung der Überlegungen aus Abschnitt 2.1 und in Anlehnung an die in [Kos05b] dargestellte Formalisierung bezeichne weiterhin im Folgenden \mathcal{S}_i eine spezifische Situation. Eine Situation $\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}$ aus einer Menge \mathcal{S} an definierten Situationen tritt genau dann ein, wenn alle für die Situation relevanten Kontextaspekte $K_{\mathcal{S}_i}$ der betroffenen Entitäten $E_{\mathcal{S}_i}$ bestimmte definierte Zustände aufweisen, wenn also die relevanten Kontextaspekte innerhalb eines für diese Situation charakterisierenden Wertebereiches $\mathcal{W}_k^{\mathcal{S}_i}$ liegen. Sei

$$K_{\mathcal{S}_i} = \bigcup_{e_i \in E_{\mathcal{S}_i}} K_{e_i},$$

so gilt

$$\forall k_{\mathcal{S}_i} \in K_{\mathcal{S}_i} : k_{\mathcal{S}_i} \in \mathcal{W}_k^{\mathcal{S}_i}.$$

Der konkrete Wert der zur Abgrenzung zu anderen Situationen nicht relevanten Parameter spielt dabei keine Rolle. Daher gilt obige Berechnungsvorschrift uneingeschränkt für alle Kontextaspekte. Offensichtlich gilt für alle nicht situationsrelevanten Aspekte dabei $\mathcal{W}_k^{\mathcal{S}_i} = \mathcal{W}_k$. Eine Situation beschreibt im Allgemeinen also den Zustand des Kontexts unterschiedlicher Entitäten. Offensichtlich kann unter Berücksichtigung universalen Wissens jeder Situation ein nicht notwendigerweise zusammenhängender Gültigkeitszeitraum $T_{\mathcal{S}_i} \in T$ zugeordnet werden, in dem die Situation gültig ist. $\mathcal{S}(t_i)$ bezeichne vor diesem Hintergrund weiterhin die Menge der zum Zeitpunkt $t_i \in T$ eingetretenen, also gültigen Situationen. Es gilt somit:

$$\mathcal{S}(t_i) = \{\mathcal{S}_i \mid t_i \in T_{\mathcal{S}_i}\}$$

Dabei ist es auch möglich, Situationen dynamisch in Bezug zu bestimmten Entitäten zu definieren. Beispielsweise kann eine Situation *keine Nachbarn* bezüglich einer Entität Fahrzeug definiert werden, wenn sich keine weiteren Fahrzeuge in gegenseitiger Kommunikationsreichweite befinden. Ein anderes Beispiel ist ein Stauende in einem bestimmten Interessensgebiet, welches sich dadurch definiert, dass eine gewisse Anzahl an Fahrzeugen ihre Geschwindigkeit signifikant verringern. Vor diesem Hintergrund bezeichne $\mathbb{S}_{e_i}(t_i)$ die Menge der Situationen \mathcal{S}_i , in denen sich die Entität e_i zum Zeitpunkt t_i befindet.

Situationszustände können als Zustandsräume aufgefasst werden. Diese bilden letztlich Subräume des Hyperraums, der von allen Kontextaspekten der existenten Entitäten aufgespannt wird. Eine Situation tritt genau dann ein, wenn die Parameterwerte einen spezifischen Punkt innerhalb des Subraumes beschreiben [Kos05b]. Vor dem Hintergrund der Existenz unscharfer Situationsbeschreibungen, wie beispielsweise *zähfließender Verkehr*, oder der eben geschilderten Situation eines Stauendes, können Situationen auch als Fuzzy-Mengen beschrieben werden [Kos05b, Zad65]. Situationen können somit auch lediglich zu einem bestimmten Grad eingetreten sein. Der *Grad des Eintretenseins* [Kos05b] der Situation $\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}$ kann folglich durch eine situationsspezifische Abbildung $deg_{\mathcal{S}_i} : K_{\mathcal{S}_i} \rightarrow [0, 1]$ über der Menge der Ausprägungen der Kontextaspekte beschrieben werden. Der Gültigkeitszeitraum T_i beschreibt dabei folglich alle Zeitpunkte, für die für den Grad des Eintretenseins gilt: $deg_{\mathcal{S}_i} > 0$.

Weiterhin muss zudem berücksichtigt werden, dass sich räumliche Aspekte und Kontextaspekte einer oder mehrerer Entitäten gegenseitig beeinflussen können, bzw. räumliche Parameter räumliche und zeitliche Wirkeinflüsse besitzen. Wenn an einem Ort beispielsweise die Temperatur $+20^\circ\text{C}$ beträgt, so wird die Temperatur in der unmittelbaren Umgebung nicht wesentlich davon abweichen. Die Temperatur an diesem Ort wird sich auch nicht sprunghaft ändern. Ähnliches gilt beispielsweise auch für Nebel- oder Regengebiete. Zudem hat beispielsweise die Temperatur an einem Ort auch Auswirkungen auf die relative Luftfeuchte.

Auch Kontextaspekte von Entitäten zeigen ein zeitliches Verhalten und beeinflussen sich gegenseitig. Der Ladezustand eines Mobiltelefons nimmt beispielsweise über die Zeit ab, sofern dieses eingeschaltet ist. Wird zudem über einen Zeitraum telefoniert, oder eine andere Funktion des Mobiltelefons benutzt, beschleunigt sich der Entladevorgang entsprechend des Energieverbrauchs. Im ausgeschalteten Zustand bleibt der Ladezustand des Akkus hingegen weitgehend konstant. Der Ladezustand hängt also vom Energieverbrauch über die Zeit ab, welcher wiederum vom Kontext der Entität Mobiltelefon abhängt. Wird ein Mobiltelefon von einem anderen aus angerufen, so beeinflusst offensichtlich das eine Mobiltelefon den Kontext des anderen. Ein anderes Beispiel ist Aquaplaning an einer spezifischen Stelle des Straßenverlaufs. Das Auftreten von Aquaplaning hat offensichtlich Auswirkungen auf das Fahrverhalten des betroffenen Fahrzeugs. Eine potentielle Aquaplaninggefahr bleibt üblicherweise auch über einen gewissen Zeitraum bestehen, in Abhängigkeit der weiteren Regenmenge an dieser Stelle. Dabei ist die Quantität dieser Auswirkungen jeweils abhängig von der spezifischen Kontextinformation bzw. des Umweltparameters. Folglich müssen diese für das Gesamtsystemverhalten wesentlichen Effekte in einem kontextabhängigen System berücksichtigt werden.

3.1.2 Individualsicht

Die Deus-Sicht beschreibt exakt den tatsächlichen Zustand der modellierten Welt über den Gültigkeitszeitraum unter Verwendung eines umfassenden Wissens und unter Ausschluss von Unsicherheit. Kontextadaptiven Systemen ist aber in der Praxis typischerweise lediglich ein kleiner Ausschnitt dieses Wissens bekannt. Zudem können viele notwendige Kontextaspekte nicht unmittelbar beobachtet bzw. gemessen werden (niederwertiger Kontext), sondern müssen aus bekannten Messungen abgeleitet werden (höherwertiger Kontext). Manche Ableitungen können dabei zweifelsfrei erzeugt werden, d.h. sie sind immer gültig, wenn eine spezifizierte Menge von bestimmten Beobachtungen vorliegt. So kann beispielsweise abgeleitet werden, dass Fahrzeuginsassen auf den Fondplätzen nicht mit der Fahraufgabe beauftragt sind. Eine eindeutige Ableitung ist jedoch gerade im Bereich der Erfassung des Fahrkontextes eines Fahrzeugs aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zumeist nicht möglich. In den meisten Fällen können lediglich Vermutungen über den Zustand einer bestimmten Eigenschaft einer Entität bzw. den aktuellen Wert eines Kontextaspektes ausgedrückt werden. So kann beispielsweise der Ermüdungszustand des Fahrers nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Es ist jedoch möglich, auf Basis verschiedener Beobachtungen, wie zum Beispiel der Liedschlagfrequenz oder der mittleren Reaktionszeiten, auf spezifische äußere Reizeinflüsse zu schließen (siehe beispielsweise [HHMK00]).

Zudem sind systembedingt auch alle Sensormesswerte mit einem Fehler behaftet, der in der Regel jedoch zumeist vernachlässigbar klein ist. Am Beispiel der Positionierung mittels GPS zeigt sich jedoch, dass auch niederwertige Kontextaspekte schon mit einem bedeutenden Fehler behaftet sein können. Je größer der zugrunde liegende Messfehler, desto größer ist jedoch in den meisten Fällen auch die resultierende Unsicherheit der davon abgeleiteten Kontextaspekte. In obigem Beispiel wäre die Einschätzung der Fahrermüdigkeit beispielsweise mit einer größeren Unsicherheit behaftet, wenn die Liedschlagfrequenz selbst nur bedingt genau beobachtet werden kann.

Von Sensoren erzeugte Beobachtungen beschreiben also den tatsächlichen Zustand des beobachteten Aspektes im Allgemeinen nicht exakt, sondern letztlich lediglich eine Approximation dessen. Einem kontextadaptiven System sind zudem wie erwähnt üblicherweise nicht alle Beobachtungen bekannt. Aus diesen Gründen basieren alle Aktionen adaptiver Systeme letztlich lediglich auf einer individuellen Einschätzung von Umgebungsparametern bzw. Kontextaspekten (vgl hierzu auch [BKS03]).

Die Anzahl an im Fahrzeug verbauten und universell über verschiedene Fahrzeugbusse abgreifbaren Sensoren ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Moderne Fahrzeuge verfügen inzwischen über mehr als 70 Sensoren und über 100 Aktoren (vgl. beispielsweise [Kon01, Lin98]). Dabei werden üblicherweise verschiedene Sensortypen im Fahrzeug anhand des Einsatzzweckes unterschieden (siehe hierzu auch [Tau07]) - im Speziellen:

- Funktionelle Sensoren wie beispielsweise Beschleunigungs-, Drehzahl-, Geschwindigkeits-, oder Drehmomentsensoren. Diese übernehmen unterschiedliche Steuerung- und Regelungsaufgaben im Fahrzeug.
- Sicherheitssensoren wie beispielsweise Kontakt- oder Erschütterungssensoren. Diese dienen zur Unterstützung der Sicherheit des Fahrzeugs, beispielsweise vor Diebstahl.

- Überwachungssensoren wie beispielsweise Temperatur- oder Füllstandssensoren, welche zur Überwachung bestimmter Verbrauchs- und Verschleißgrößen dienen. Im Speziellen liefern sie dem Fahrer wichtige Informationen hinsichtlich des aktuellen Fahrzeugzustands.

Eine alternative Klassifizierung bezieht sich auf die Art der Datenerhebung durch den Sensor. Hier existieren insbesondere zwei grundlegende Paradigmen. Zum einen zyklische Sensoren wie beispielsweise Temperatur- oder Geschwindigkeitssensoren, die fortlaufend in bestimmten periodischen Zeitabständen einen neuen Messwert bereitstellen. Zum anderen ereignisgesteuerte Sensoren wie beispielsweise Kollisions- oder Airbag-sensoren. Diese erzeugen lediglich dann einen neuen Messwert, wenn ein bestimmtes Ereignis eingetreten ist. Auf Basis des im vorangegangenen Abschnitt spezifizierten Modellraums bedeutet dies, dass jedem Kontextaspekt eine individuelle und zeitlich veränderbare Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen werden muss, die den Grad des Dafürhaltens über dem Wertebereich abbildet (siehe hierzu auch Kosch [Kos05b]). Dies resultiert also aus der Tatsache, dass Kontextaspekte nicht exakt und zweifelsfrei gemessen werden können, da alle Messsysteme inhärent mit einem technisch bedingten Fehler behaftet sind. Der Fehler eines Messsystems besteht dabei üblicherweise aus einem systeminhärenten systematischen Fehler, der für jede Messung gleich ist, sowie einem zufälligen Fehler, der vom konkreten Messvorgang abhängt. Ziel ist es, beide Fehler zu minimieren. In Abhängigkeit des zu bestimmenden Aspektes kann jedoch nicht garantiert werden, dass der Messfehler vernachlässigbar klein bleibt. Für Kontextaspekte mit kontinuierlichem Wertebereich wie beispielsweise der Raumtemperatur eines Zimmers, kennzeichnen vielmehr vier spezifische Kenngrößen des Messsystems (Auflösung, Präzision, Richtigkeit, sowie Genauigkeit) die Qualität der Beobachtung (vergleiche beispielsweise [Sch97, Pro06]).

Dabei beschreibt die Auflösung die maximale Differenz zwischen zwei realen Parameterwerten, die zu einer Änderung des resultierenden Messwertes hin zum benachbarten Messwert führt. Dabei gilt, dass bei einer Auflösung größer 0 der ehemals unendliche kontinuierliche Wertebereich in, der Auflösung entsprechende, Intervalle diskretisiert wird. Die Präzision eines Messsystems beschreibt dabei die Übereinstimmung zwischen unabhängigen Messergebnissen unter unveränderten Bedingungen. Eine hohe Präzision liegt demzufolge vor, falls das Messsystem unter gleichen Bedingungen sehr ähnliche Ergebnisse liefert. Eine hohe Präzision ist dabei jedoch kein Garant dafür, dass das Messsystem richtige Ergebnisse liefert, in dem Sinne, dass sie die Realität genau widerspiegeln. Vielmehr führt im Speziellen der systematische Fehler eines Messsystems zur gleichen Abweichung unter konstanten Bedingungen. Dies bedeutet letztlich, dass ein Messsystem mit großem systemischem Fehler zwar präzise sein kann, aber nicht notwendiger Weise genau ist.

Die Richtigkeit (trueness, accuracy of the mean) beschreibt in diesem Zusammenhang den Grad der durchschnittlichen Übereinstimmung zwischen der realen Größe eines Aspektes, sowie den ermittelten Messwerten. Der Grad der Streuung eines Messsystems bleibt jedoch unberücksichtigt. Die Genauigkeit (accuracy) eines Messsystems gibt letztlich an, wie gut ein spezifisches Messergebnis mit dem real existenten Wert übereinstimmt. Ein Messsystem hat also genau dann eine hohe Genauigkeit, wenn es sowohl eine hohe Präzision hat, als auch richtig misst, wenn also eine kleine mittlere Abweichung und eine geringe Streuung der Messergebnisse garantiert werden kann. Abbildung 3.5 soll die Unterscheidung der Begriffe verdeutlichen.

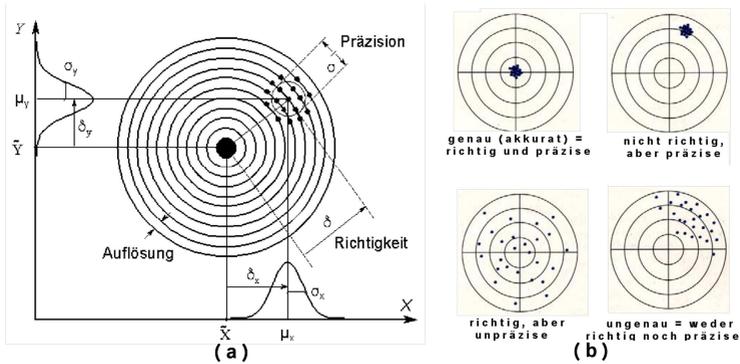


Abbildung 3.5: Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision nach [Sch97] (a) und [Pro06] (b)

Die Qualität einer Beobachtung lässt sich auf Basis dieser Überlegungen anhand der Genauigkeit des zugrunde liegenden Messsystems quantifizieren. Die durch Beobachtung mittels Sensoren der beobachtbaren Kontextaspekte resultierenden systeminternen Messgrößen, also die eigentlichen Beobachtungen, können daher letztlich als eine die Messungengenauigkeit ausdrückende Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem konkreten Messwert (siehe Abbildung 3.6) beschrieben werden. Der resultierende (eigentliche) Beobachtungswert bezieht sich dabei entsprechend auf genau denjenigen Messwert, der die höchste Wahrscheinlichkeit aufweist. Bezeichne daher im Folgenden in Anlehnung an die Terminologie von Kosch [Kos05b]

- $X^b \subseteq \mathcal{P} \cup \bigcup_{e_i \in E} K e_i$ die Menge der von Sensoren beobachtbaren Aspekte. Die in einem Fahrzeug vorhandene Teilmenge hieraus spezifiziert offensichtlich die individuellen Beobachtungsmöglichkeiten des Fahrzeugs. Golle et al. [GGS04] sprechen in diesem Zusammenhang auch von den *Capabilities* des Fahrzeugs.
- \bar{x}_j die Beobachtung des Kontextaspektes $x_j \in X^b$,
- $b_k^{x_j} \in B$ einen spezifischen Sensor aus der Menge der existierenden Sensoren B , welcher den Aspekt x_j beobachten kann.
- $P_{x_j}^{b_k}(\bar{x}_j, \zeta)$ die sensorspezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung des x_j beobachtenden Sensors b_k im Zustand ζ , welcher die aktuelle kontextabhängige Messgenauigkeit des Sensors und damit die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte bestimmt. Dies ist notwendig, da die Genauigkeit bestimmter Messsysteme wiederum abhängig vom aktuellen Kontext des Messsystems ist. Im Falle von GPS oder Galileo hängt die zu erwartende Genauigkeit einer Messung beispielsweise von der Anzahl der verfügbaren Satellitensignale ab.

- \hat{x}_j den Parameterwert der Beobachtung \bar{x}_j mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, also den eigentlichen Beobachtungswert.

So berechnet sich die Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j} \in [0, 1]$, dass der beobachtete Wert \hat{x}_j nicht weiter als eine definierte Distanz $\Delta\delta$ vom realen Parameterwert abweicht, dass also der reale Wert innerhalb eines Konfidenzintervalls $2 \cdot \Delta\delta$ um den beobachteten Wert liegt und somit gilt $|\hat{x}_j - x_j| < \Delta\delta$, unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_{x_j}^{b_k}$ für Sensor b_j durch:

$$p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j} = \int_{\hat{x}_j - \Delta\delta}^{\hat{x}_j + \Delta\delta} P_{x_j}^{b_k}(\bar{x}_j, \zeta) d\bar{x}_j$$

Abbildung 3.6 zeigt die resultierende Wahrscheinlichkeit nochmals grafisch, wobei die Ordinate die Wahrscheinlichkeit repräsentiert, dass der beobachtete Parameterwert mit dem realen Parameterwert übereinstimmt.

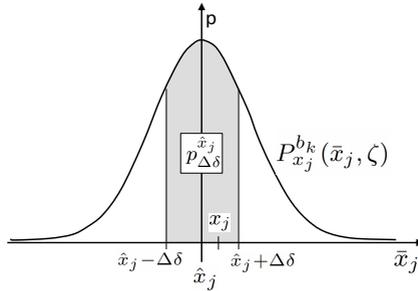


Abbildung 3.6: Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$, dass der reale Wert x_j maximal $\Delta\delta$ vom beobachteten Wert \hat{x}_j abweicht.

Wichtig an dieser Stelle ist, dass eine Beobachtung zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort von einem Sensor durchgeführt wurde. Unter Berücksichtigung der Verallgemeinerung, dass sich eine Beobachtung zudem auf einen längeren Zeitraum und ein ausgedehntes Gebiet beziehen kann, bedeutet dies, dass mit einer Beobachtung immer ein Beobachtungszeitraum $T_B \subseteq T$ und ein Beobachtungsgebiet $A_B \subseteq \mathcal{R}^3$ assoziiert ist. Eine Beobachtung kann damit letztlich als ein den eigentlichen Beobachtungswert charakterisierender 3-Tupel dargestellt werden mit

$$\bar{x}_j := \left(P_{x_j}^{b_k}(\bar{x}_j, \zeta), A_B, T_B \right)$$

Statt der charakteristischen Wahrscheinlichkeitsverteilung wird jedoch zumeist der wahrscheinlichste beobachtete Parameterwert \hat{x}_j in Verbindung mit dessen Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$ verwendet. Dies führt folglich zu einem 4-Tupel der Art

$$\bar{x}_j := \left(\hat{x}_j, p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}, A_B, T_B \right)$$

Sofern sich eine Beobachtung auf einen Beobachtungszeitraum bzw. ein Beobachtungsgebiet bezieht, und nicht lediglich auf einen einzelnen Ort und Zeitpunkt, so bezieht sich die gegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechend auf die mittlere Abweichung zwischen der beobachteten und der realen Messgröße im gesamten Beobachtungsgebiet über den Beobachtungszeitraum.

Es gilt, dass die Qualität der Beobachtung offensichtlich genau dann besser ist, wenn das Konfidenzintervall bei gleicher erreichter Wahrscheinlichkeit kleiner ist, bzw. umgekehrt, wenn bei fester Größe des Konfidenzintervalls die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die reale Größe des Kontextaspektes innerhalb des Intervalls liegt, größer ist. Dies bedeutet, dass sich die Qualität der Beobachtung quantitativ anhand der Größe des Konfidenzintervalls bzw. anhand der Varianz der Wahrscheinlichkeitsverteilung bezüglich der Abweichung zwischen Deus- und Individualsicht bestimmen lässt. Obige Überlegungen gelten offensichtlich auch, wenn die Beobachtung nicht durch einen einzelnen Sensor b_k erfolgt, sondern durch eine Fusion der Beobachtungen einer Menge $B^k \subseteq B$ an Sensoren. Durch den gemeinsamen Einsatz verschiedener unabhängiger Systeme lässt sich zudem die Genauigkeit der Beobachtung erhöhen. In Anlehnung an die Überlegungen von Strang [Str03] kann ein Sensor also auch als Funktion $f_{B^k}^{x_j}$ verstanden werden, der die Beobachtungen der Sensoren der Menge B^k zu einer gültigen Beobachtung eines Aspektes x_j zusammenführt. Damit liefert die Funktion

$$f_{B^k}^{x_j}(b_{k_1}^{x_l} \in B^k, \dots, b_{k_n}^{x_m} \in B^k) = P_{x_j}^{B^k}(\bar{x}_j, \zeta), n = |B^k|$$

eine durch die Fusion der n Sensoren aus B^k charakterisierte spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_{x_j}^{B^k}(\bar{x}_j, \zeta)$ der Beobachtung \bar{x}_j des Kontextaspektes x_j . Es gilt weiterhin, dass die konkrete spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung von der konkreten aktuellen Ausprägung und Qualität der Beobachtungen der zugrunde liegenden individuellen Aspekte abhängt. Ist eine für die Fusion bedeutende Beobachtung nicht vorhanden, so kann deren statistische a-priori Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet werden. Ist auch diese nicht bekannt, so kann eine Gleichverteilung über dem Wertebereich angenommen werden. Mit zunehmendem Alter einer Beobachtung nimmt deren Qualität und damit deren Aussagekraft jedoch ab, da sich die realen Größen des Aspektes wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben über die Zeit ändern. Dies bedeutet, dass der Grad der Unsicherheit nicht nur vom beobachteten Wert und dem beobachtenden Sensorsystem, sondern zudem auch vom Alter der Beobachtung abhängt. Letzteres ist dabei jedoch nicht mit dem beobachtenden Sensor korreliert, sondern mit der Größe der zeitlichen Veränderlichkeit des Aspektes. Bei gleich bleibenden Grenzen des Konfidenzintervalls um die Beobachtung nimmt demzufolge die Wahrscheinlichkeit, dass sich die reale Größe des Aspektes noch innerhalb dieses Intervalls befindet, mit zunehmendem Alter der Beobachtung ab. Vor dem Hintergrund räumlicher Wirkeinflüsse bestimmter Aspekte wie beispielsweise der Temperatur, können zudem Aussagen über den Wert eines Aspektes abseits des eigentlichen Beobachtungsortes getroffen werden. Die Außentemperatur, die an einer bestimmten Stelle mit einem Temperatursensor beobachtet wurde, wird auch in einigen hundert Metern Entfernung nicht deutlich abweichen. Daher kann auch für entfernte Orte eine Abschätzung bezüglich dieses Aspektes erfolgen. Analog zur zeitlichen Veränderlichkeit erhöht sich dabei bei gleicher Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der spezifischen räumlichen Charakteristik des Aspektes das zugesicherte Konfidenzintervall.

Aufbauend auf diesen Überlegungen kann nun das Wissen einer Entität bzw. einer Anwendung über den Zustand der sie umgebenden Kontextaspekte ausgedrückt werden. In Anlehnung an die von Strohbach et al. [SKGK04] im Zusammenhang mit kooperativen Entscheidungssystemen vorgestellte Unterscheidung zwischen Fakten und Regeln in einer Wissensbasis, sowie den Überlegungen aus Abschnitt 2.4.3, besteht das Wissen, das eine Anwendung über den Zustand der Welt besitzt aus

- statischem Domänenwissen (Domain knowledge) bezüglich der Anwendungsgebiete (Regeln und Wirkzusammenhänge),
- Beobachtungen anderer Fahrzeuge (Observational knowledge - Fakten),
- sowie den daraus ableitbaren Schlussfolgerungen (Inferred knowledge - inferiertes Wissen).

Bezeichne deshalb

- $\Omega_{a_k}(t_i)$ das Wissen einer Anwendung $a_k \in A$ zum Zeitpunkt $t_i \in T$,
- \mathcal{D}_{a_k} das anwendungsspezifische statische Domänenwissen der Anwendung einschließlich der in dieser Anwendungsdomäne gültigen Inferenzvorschriften,
- $\bar{X}_{a_k}(t_i)$ die Menge der der Anwendung a_k zum Zeitpunkt t_i zur Verfügung stehenden Beobachtungen \bar{x} , sowie
- $\tilde{X}_{a_k}(t_i)$ die aus den Beobachtungen $\bar{X}_{a_k}(t_i)$ mittels der vorhandenen Inferenzregeln abgeleiteten Kontextinformationen.

Somit ergibt sich für $\Omega_{a_k}(t_i)$

$$\Omega_{a_k}(t_i) = \mathcal{D}_{a_k} \cup \bar{X}_{a_k}(t_i) \cup \tilde{X}_{a_k}(t_i)$$

Dabei gilt für die mittels Inferenzverfahren aus Beobachtungen abgeleiteten höherwertigen Kontextaspekte $\tilde{x}_j \in \tilde{X}_{a_k}$ ein entsprechendes Qualitätsmaß wie für Beobachtungen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der abgeleiteten Kontextaspekte hängt dabei neben der Sicherheit der Inferenzverfahren selbst jedoch auch davon ab, wie viele Beobachtungen für die Inferenzberechnung zur Verfügung stehen, und welche Qualität wiederum diesen Beobachtungen zugrunde liegt. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Beobachtung in einem bereits vergangenen Zeitraum oder in einem anderen Gebiet erstellt wurde. Liegen einer Schlussfolgerung bezüglich eines Aspekts zu einem anderen Zeitpunkt oder einem anderen Ort Beobachtungen von nicht identischen Zeitpunkten vor, oder befindet sich der Ort des schlussgefolgerten Aspekts nicht innerhalb des Beobachtungsgebietes eines der beteiligten Sensoren, müssen also zudem räumliche und zeitliche Einflüsse und Wirkfaktoren mit berücksichtigt werden. Damit ergibt sich für die mittels Inferenzverfahren aus Beobachtungen abgeleiteten höherwertigen Kontextaspekte letztlich eine von der oben definierten Sensorfusion verallgemeinerte Berechnungsvorschrift, bei der statt einer Reihe an spezifischen Sensoren beliebige Teile des existenten Wissens als Grundlage dienen können. Es gilt somit analog:

$$inf_{\tilde{x}_j}^{\tilde{x}_j}(\omega_1 \in \Omega_{a_k}, \dots, \omega_n \in \Omega_{a_k}) = P_{\tilde{x}_j}^{inf}(\tilde{x}_j, \zeta),$$

wobei $inf_i^{\tilde{x}_j}$ eine spezifische Inferenzvorschrift zur Deduktion des Kontextaspektes x_j bezeichnet, sowie $P_{\tilde{x}_j}^{inf_i}(\tilde{x}_j, \zeta)$ die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausprägung des Kontextaspektes und $\{\omega_1, \dots, \omega_n\} \in \Omega$ eine Teilmenge der bereits bekannten Kontextinformationen darstellt. Unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Diversität der zugrunde liegenden Beobachtungen und vorausgegangener Schlussfolgerungen gilt wiederum analog

$$\tilde{x}_j := \left(P_{\tilde{x}_j}^{inf_i}(\tilde{x}_j, \zeta), A_B, T_B \right),$$

bzw.

$$\tilde{x}_j := \left(\hat{x}_j, p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}, A_B, T_B \right),$$

wobei \hat{x}_j die wahrscheinlichste Ausprägung des deduzierten Aspektes x_j darstellt. Der mit dem Inferenzergebnis assoziierte Gültigkeitszeitraum T_B sowie das Gültigkeitsgebiet A_B ist hierbei abhängig von der angewandten Inferenzmethodik.

In Kapitel 5 wird in diesem Zusammenhang im Detail eine Inferenzmethodik vorgestellt, welche auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen unter Berücksichtigung spezifischer räumlicher und zeitlicher Einflussfaktoren einen probabilistischen Rückschluss für einen beliebigen Ort im Modellraum ermöglicht. Weiterhin lässt sich ähnlich wie dies für Beobachtungen von Kontextaspekten und abgeleitete Kontextinformationen der Fall ist, auch Unsicherheit über das Eintreten einer Situation S_i abbilden. Dabei bezeichne $P_{S_i}(deg(S_i), t_i)$ die Wahrscheinlichkeitsverteilung, dass die Situation S_i zum Zeitpunkt t_i mit Grad $deg(S_i)$ eingetreten ist. Es kann jedoch nicht mehr zweifelsfrei bewertet werden, ob eine Situation nun eingetreten ist, und falls ja, zu welchem Grad. Hierzu kann jedoch ein Schwellenwertverfahren angewandt werden. Eine Situation wird dann als eingetreten angenommen, wenn die Wahrscheinlichkeit in einem Intervall $\Delta\delta$ um den Grad des Eintretenseins größer ist als der Schwellenwert γ , wenn also gilt

$$p_{\Delta\delta}^{deg(S_i)} = \int_{deg(S_i) - \Delta\delta/2}^{deg(S_i) + \Delta\delta/2} P_{S_i}(deg(S_i), t_i) ddeg(S_i) > \gamma$$

Analog zur Beschreibung im vorigen Abschnitt gilt für die Gültigkeitsdauer T_{S_i} einer Situation S_i :

$$\forall t_j \in T : P_{S_i}(deg(S_i), t_j) > \gamma$$

Mit dieser Vorschrift lässt sich nun auch die Menge $\tilde{S}_{e_i}(t_i)$ der Situationen verallgemeinern, in der sich die Entität e_i vermutlich zum Zeitpunkt t_i befindet. Da vor diesem Hintergrund auch die Zugehörigkeit einer Entität zu einem übergeordneten Bewegungssystem nicht zweifelsfrei festgestellt werden kann (siehe Abschnitt 3.1.1), gilt die Zuweisung eines Unsicherheitsgrades auch hierfür. Das heißt, die Kanten des Kontextbaums existieren nur zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Es ergibt sich jedoch dadurch die Möglichkeit, dass für eine Entität mehrere Bewegungssystemkorrelationen möglich sind, wobei die Summe der Wahrscheinlichkeiten dieser Bewegungssystemkorrelationen eins ist. Dies führt wiederum dazu, dass die Abbildung der Bewegungssystemkorrelationen ihre Baumstruktur verliert und in einem allgemeinen Graphen übergeht.

Auf Basis des aktuellen Wissens einer Entität bzw. Anwendung kann diese Anwendung nun Aktionen durchführen, um ihr Ziel oder eines ihrer Ziele oder Teilziele zu erreichen. Ein Ziel einer Anwendung kann auf Basis der obigen Überlegungen definiert werden als ein *Wunschzustand des Deus-Modells zum (zukünftigen) Zeitpunkt t_j* . Aktionen oder Aktionsfolgen leiten sich von diesen Zielen ab und beschreiben aktive Veränderungen des Ist-Zustands bestimmter Umweltparameter und Kontextaspekte des Deus-Modells durch entsprechende Aktoren. Dabei gilt ähnlich wie zuvor, dass die Wirkung einer Aktion, also die tatsächliche Veränderung eines Aspektes nach Ausführen der Aktion über die Zeit nicht notwendigerweise sicher bekannt ist. Es müssen also auch hier Unsicherheitsfaktoren mit betrachtet werden. Daher kann insbesondere in einem dynamischen System im Allgemeinen keine eindeutige und sicher optimale Folge von Aktionen berechnet werden, um ein Ziel zu erreichen. Stattdessen sollte die Aktionsfolge durchgeführt werden, die die höchste Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung besitzt. Ist eine vollständige Zielerreichung nicht möglich, so gelten wiederum ähnliche Betrachtungen wie für den Grad des Eingetretenseins einer Situation. Durch stetige Beobachtung der Wirkung der durchgeführten Aktion und Anpassung der weiteren Aktionsfolge entsteht typischerweise ein Regelkreis, jedoch kann nicht vorausgesetzt werden, dass jede Wirkung einer Aktion wiederum unmittelbar beobachtbar ist. Eine ausführlichere Analyse von Entscheidungsverfahren ist nicht Ziel dieser Arbeit. Es sei hier auf die entsprechende Literatur verwiesen, insbesondere auf Entscheidungsverfahren im Bereich der künstlichen Intelligenz (siehe beispielsweise [RN03]).

Die Ableitung von Aktionsfolgen ist jedoch insofern auch für diese Arbeit von Bedeutung, als dass die Handlungsplanung mit der Qualität des aktuell vorhandenen Wissens korreliert ist. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der möglichen Diskrepanz zwischen realem, aber im Rechensystem nicht sicher abbildbarem Weltzustand (Deus-Modell) und der individuellen Weltansicht. Dies betrifft beispielsweise insbesondere die Entscheidung des Systems hinsichtlich einer regelnden Intervention oder der Warnung des Fahrers vor einem kritischen Fahrzustand (mit dem übergeordneten Ziel der Vermeidung eines kritischen Fahrzustands). Sinnvolle, effektive und wirksame Fahrerassistenz kann daher nur auf Basis einer Quantifizierung der Qualität des vorhandenen Kontextwissens im Fahrzeug erfolgen.

Bei der Quantifizierung der Wissensqualität muss jedoch beachtet werden, dass einzelne Aspekte unterschiedliche Bedeutung für die Handlungsentscheidungen unterschiedlicher Anwendungen besitzen. Die Bedeutung eines Aspektes für die Handlungsentscheidung einer Anwendung ist darüber hinaus abhängig von der aktuellen Situation, in der sich die die Anwendungen beherbergende Entität aktuell befindet, sowie von den spezifischen Handlungszielen der Anwendung. So ist das Wissen über einen Stau in Hamburg für eine verkehrsadaptive Routenführung eines Fahrzeugs in München offensichtlich vergleichsweise unwichtig, da es keine Auswirkungen auf die Handlungsalternativen der Anwendung hat. Die Qualität des Wissens dieser Anwendung leidet also beispielsweise nicht unter einer nicht vorhandenen oder falschen Einschätzung bezüglich des Verkehrsgeschehens an geografisch weit entfernten Orten. Ein weiteres Beispiel betrifft Fahrbahnhindernisse auf Autobahnen, welche typischerweise nur eine Fahrtrichtung betreffen. Im Gegensatz dazu stehen beispielsweise Sichtbehinderungen aufgrund starken Nebels. Letzteres ist für beide Fahrtrichtungen gleichermaßen relevant und daher in Fahrzeugen beider Richtungen ähnlich stark gewichtet. Der Nutzen ist auch dann Null, wenn die Nachricht so spät empfangen wird, dass keine reagierenden

Handlungen mehr durchgeführt werden können. Befindet sich ein empfangendes Fahrzeug beispielsweise bereits unmittelbar vor einer kritischen Fahrsituation, oder hat es diese sogar bereits erreicht, ist der Nutzen einer diesbezüglichen Information Null.

Gleiches gilt für eine Stauinformation auf der weiteren Autobahnroute, wenn die letzte Abfahrtsmöglichkeit vor dem Stau bereits passiert wurde, oder, wenn der korrelierte Ort vergleichsweise nahe ist, das Fahrzeug jedoch in absehbarer Zeit diesen Ort nicht passieren wird. Aspekte, deren Kenntnis nicht zu einer Änderung der eigenen Handlungsentscheidungen führt, haben für die Quantifizierung der Wissensqualität einer Anwendung ebenfalls kein Gewicht. Vor diesem Hintergrund spielt auch die wahrscheinliche Fahrtroute, der Fahrtzweck, sowie die vorhandene Flexibilität hinsichtlich der Auswahl der möglichen Handlungsalternativen eine entscheidende Rolle (siehe [Kos05b]). Dabei müssen unter Umständen auch spezifische Eigenschaften der Fahrzeugentitäten berücksichtigt werden. Schweren Lastkraftwagen ist es in machen Situationen beispielsweise aufgrund verkehrsrechtlicher Beschränkungen hinsichtlich der Fahrzeugcharakteristik nicht möglich, eine alternative Umleitungsrouten zu benutzen, um einen Stau zu umfahren. Die Flexibilität ist also dahingehend eingeschränkt.

Daraus resultiert, dass die Qualität des Wissens einer Anwendung als gewichtete Abweichung zwischen realem (Deus-Sicht) und vermutetem (Individualsicht) Weltzustand verstanden werden muss. In Abhängigkeit der Situationen, in der sich die die Anwendungen beherbergende Entität aktuell befindet, und vor dem Hintergrund der Bedeutung dieser Aspekte im Hinblick auf mögliche alternative Handlungsentscheidungen, hat die jeweilige Abweichung bestimmter Aspekte stärkeren Einfluss auf die Qualität des Wissens als andere. Unter Berücksichtigung von Unsicherheitsaspekten entspricht dabei der vermutete Zustand eines Aspekts an einem Ort offensichtlich wiederum genau demjenigen Parameterwert \hat{x}_j mit der höchsten Eintretenswahrscheinlichkeit. Bezeichnen daher

- $\|\Omega_{a_i}(t)\|$ die Qualität des Wissens einer Anwendung a_i zum Zeitpunkt t und
- $a_i^{k_j}(\zeta)$ einen spezifischen Gewichtungsfaktor in Abhängigkeit des aktuellen Zustands ζ der Anwendung a_i in Bezug auf den Kontextaspekt k_j des Modellraumschnappschusses \mathcal{R}_t^3 .

Dann gilt:

$$\|\Omega_{a_i}(t)\| = \frac{\sum_{k_j \in \mathcal{R}_t^3} a_i^{k_j}(\zeta) \cdot |\hat{x}_j - x_j|}{\sum_{k_j \in \mathcal{R}_t^3} a_i^{k_j}(\zeta)}.$$

Dabei gilt es es zu beachten, dass der Modellraumschnappschuss alle Kontextaspekte aller Entitäten einschließlich aller Interessensorte enthält. Aus der impliziten Einbindung der (letztlich unbeschränkten) Menge von Interessensorten resultiert jedoch eine hohe Berechnungskomplexität. Unter Berücksichtigung des oben dargestellten Situationskonzeptes kann die Bemessung der Qualität des Wissens aber vereinfacht werden. Eine Abweichung des vermuteten zum realen Weltzustand ergibt sich dann, wenn sich eine Entität zu einem Zeitpunkt nicht in der vermuteten Situation befindet, wobei wiederum eine individuelle situationsabhängige Gewichtung vorgenommen werden muss. Die Vereinfachung basiert dabei auf der Annahme, dass Entscheidungen von Entitäten üblicherweise auf Basis der Einschätzung des eigenen Zustands, sowie einer begrenzten

Zahl korrelierter Entitäten getroffen werden. Die Abweichung des vermuteten Wertes von Kontextaspekten, die nicht mit diesen Entitäten korreliert sind, können daher in der Regel vernachlässigt werden. Anders ausgedrückt ist die spezifische Gewichtung a_{S_i} dieser Aspekte in der Berechnungsvorschrift für die Wissensqualität 0. Falls sich eine Entität zu einem Zeitpunkt t in der Situation S_i befindet, dies aber gegenteilig vermutet wird, ergibt sich eine Abweichung der vermuteten zur realen Welt. Offensichtlich gilt dies auch entsprechend umgekehrt. Damit gilt für die Qualität des Wissens einer Anwendung zum Zeitpunkt t :

$$\|\Omega_{a_i}(t)\| = \frac{1}{\omega} \cdot \sum_{e_i \in E} \sum_{S_i \in \mathcal{S}(t)} \begin{cases} a_{S_i}, & \text{falls } (S_i \in \mathbb{S}_{e_i}(t) \wedge S_i \in \tilde{\mathbb{S}}_{e_i}(t)) \\ & \vee (S_i \notin \mathbb{S}_{e_i}(t) \wedge S_i \notin \tilde{\mathbb{S}}_{e_i}(t)) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

mit

$$\omega = \sum_{e_i \in E} \sum_{S_i \in \mathcal{S}(t)} a_{S_i}$$

3.2 Beschreibung und Auswertung von Kontextinformationen

In diesem Abschnitt soll nun eine generische Möglichkeit zur Verwaltung des für kooperative Assistenzsysteme notwendigen Kontextwissens in Fahrzeugen dargestellt werden. Ziel soll dabei eine möglichst nahtlose Integration von Fahrzeugen in eine übergeordnete und generische Kontextwertschöpfungskette (siehe [HKLR03]) sein, die nicht auf die Domäne Automobil beschränkt bleibt. Hintergrund hierbei ist, dass durch die Vernetzung der Fahrzeuge mit ihrer Umwelt diese neben der Rolle als Kontexterzeuger (mittels der fahrzeuginternen Sensorsysteme) nun auch zu generischen Kontextverbrauchern und Kontextbereitstellern werden. Daher sollten Fahrzeuge über eine möglichst generische aber explizite Repräsentation ihres Kontextwissens verfügen. Insbesondere gilt, dass einerseits Telematikanwendungen von externen Kontextinformationen (wie beispielsweise der aktuellen Verfügbarkeit von Parkplätzen) profitieren. Auf der anderen Seite ermöglicht eine generische Wissensrepräsentation, die abgestimmt ist auf die im Bereich von kontextsensitiven Systemen üblichen Paradigmen, auch externen, nicht fahrzeugbezogenen Anwendungen oder Systemen die einfache unmittelbare Nutzung der von den Fahrzeugen generierten Informationen. Beispielsweise könnte die Vorhersage der aktuellen Ankunftszeit eines Busses an einer bestimmten Haltestelle durch die Kenntnis der aktuellen Verkehrslage, welche von anderen Fahrzeugen erfasst und bereitgestellt werden kann, deutlich verbessert werden.

Ein generisches und im Zusammenhang mit kontextsensitiven Diensten vielfach verwendetes Kontextmodell vereinfacht also in erheblichem Maße die Integration von Fahrzeugen in eine übergreifende Kontextwertschöpfungskette und damit einhergehend die Entwicklung neuer kontextsensitiver Dienste.

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, sowohl statisches Domänenwissen, als auch dynamisches Kontextwissen, also Beobachtungen und daraus abgeleitete höherwertige Kontextinformationen, in einer Entität zu verwalten. Strang und Linnhoff klassifizieren dabei in [SL04] grundlegend die folgenden Ansätze zur Kontextmodellierung:

- Schlüssel-Wert-Paare (KeyValue Models)
- Auszeichnungssprachen (Markup Scheme Models)
- Graphen (Graphical Models)
- Objektmodelle (Object Oriented Models)
- Logik-Kalküle (Logic Based Models), sowie
- Ontologien (Ontology Based Models)

Strang und Linnhoff [SL04] zeigen weiter, dass eine sogenannte ontologiebasierte Modellierung von Kontextwissen sowohl im Hinblick auf eine partielle Auswertbarkeit und eine verteilte Datenerhebung, als auch vor dem Hintergrund unsicherer und unvollständiger Informationen gegenüber den anderen Ansätzen entscheidende Vorteile bietet. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein ontologiebasiertes Modell zur Verwaltung der Fahrzeugkontextinformationen entwickelt, dessen wesentliche Charakteristiken und Eigenschaften im Folgenden dargestellt werden (siehe auch [Vol06, Tau07, Adl06, AS06]).

3.2.1 Ontologien

Die ursprünglich philosophische Bedeutung des Begriffs der Ontologie beinhaltet eine umfassende Klassifikation der Dinge (Entitäten), einschließlich aller Arten der Zusammenhänge zwischen diesen [Smi03]. Dieser Gedanke wird auch bei der Definition der Ontologie in der Informatik typischerweise aufgegriffen. Insbesondere umfasst eine Ontologie eine explizite semantische Spezifikation der Gegenstände (Dinge, Klassen) der zu modellierenden Welt, sowie deren konkrete Eigenschaften (Attribute) und Beziehungen. Gruber [Gru] definiert eine Ontologie beispielsweise als eine explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung. Swartout [SPKR96] spezifiziert den Begriff der Ontologie konkreter als eine hierarchisch gegliederte Menge von Ausdrücken einer Anwendungsdomäne.

3.2.2 Basisontologien

Es kann jedoch festgestellt werden, dass viele Konzepte der realen Welt unabhängig von der konkreten Anwendungsdomäne in gleicher Weise gültig sind. Sogenannte Basisontologien (auch Meta-Ontologien) wie beispielsweise die *Minimalist Upper Ontology (GIST)* [GIS] die *Standard Upper Ontology (SUO)* [suo], die *Suggested Upper Merged Ontology (SUMO)* [sum] oder das *OpenCyc-Projekt* [Ope] versuchen daher, anwendungsdomänenübergreifende Konzepte generisch zu spezifizieren. Dies gilt insbesondere beispielsweise für die Eigenschaften und Zusammenhänge von

- Ereignissen,
- Aktionen, sowie
- Raum und Zeit.

Grundlage dieser Basisontologien bildet entsprechend der Definition von Swartout eine sukzessive hierarchische Verfeinerung und Spezialisierung eines generischen Basiselements, welches zumeist als *Thing* bezeichnet wird. Leider unterscheiden sich aufgrund der immensen Vielfalt der zu modellierenden konkreten Domänenontologien auch diese entwickelten Basisontologien schon in der ersten Spezialisierungshierarchie (siehe Abbildung 3.7). Die syntaktische Umsetzung von Ontologien im Rechensystem basiert

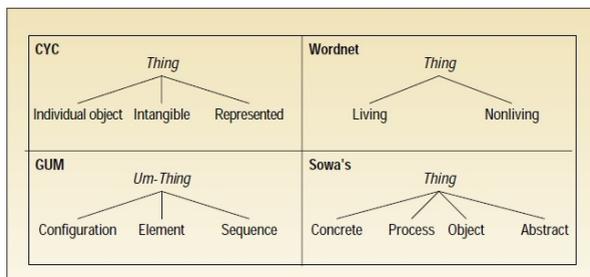


Abbildung 3.7: Konzeptualisierung von Ontologien nach [CJB99]

dabei zumeist auf Wissensrepräsentationssprachen, insbesondere der *resource description framework (RDF)* bzw. der *ontology web language (OWL)* [Mv04].

3.2.3 Spezialisierte Ontologien

Ausgehend von einer solchen allgemeinen Basisontologie können nun konkrete domänenspezifische Verfeinerungen bzw. Spezialisierungen entwickelt werden. Durch eine gemeinsame grundlegende Basisontologie bleiben hierbei die verschiedenen spezialisierten Domänenontologien jedoch zueinander interoperabel. Chandrasekaran et al. [CJB99] klassifizieren hierbei die spezialisierten Ontologien genauer in Bereichsontologien (Domain Ontologies), Aufgabenontologien (Task Ontologies), sowie Anwendungsontologien (Application Ontologies). Erstere konzeptionieren dabei domänenspezifische Begriffe und Eigenschaften, wie beispielsweise die Domäne der Linguistik [DOL] oder der Automobilindustrie insgesamt. Aufgabenontologien beschreiben hingegen eine Konzeption für spezielle Aufgaben oder Aufgabenbereiche, unabhängig von der speziellen Domäne, also beispielsweise Handel, Dienstleistungen oder (Automobil)-Produktion. Anwendungsontologien beschreiben letztlich das spezifische Vokabular einer speziellen Anwendung. Das von Fuchs entwickelte sogenannte *Kontext-MetaModell (CMM)* [HKBF05, Fuc04] (siehe Abbildung 3.8) beschreibt in diesem Zusammenhang eine Aufgabenontologie mit speziellem Fokus hinsichtlich der Funktionalität kontextsensitiver Anwendungen. Das CMM basiert dabei syntaktisch auf der ontology web language und beinhaltet die folgenden wesentlichen Konstrukte:

Entität (Entity Class) Die Klasse Entität ermöglicht die Spezifikation und Korrelation von individuellen Entitäten wie beispielsweise Personen, Orten, oder Ereignissen.

Datentyp (Datatype Class) Datentypen wie beispielsweise eine Temperaturangabe entsprechen in der Terminologie aus Abschnitt 2.1 Aspekten.

Eigenschaft (Property class) Eigenschaften bilden die Zusammenhänge zwischen einer Entität (Subjekt) und einer anderen Entität oder einem Datentyp (Objekt) ab und stellen damit insbesondere die Kernbeziehung von Kontextinformationen (Datentypen) zu Entitäten her.

Datenwert (Datavalue class) Ein Datentyp setzt sich aus einem oder mehreren Datenwerten zusammen. Diese sind wiederum einerseits mit einfachen Datentypen (Literalen) und andererseits mit einer Qualitätsklasse korreliert. Literale spezifizieren letztlich Skalen (siehe Abschnitt 2.1). Es können so komplexe Datenstrukturen, die aus mehreren Literalen bestehen abgebildet werden.

Qualität (Quality class) Die Qualität erlaubt die explizite Spezifikation verschiedener Qualitätsaspekte, wie sie beispielsweise in [BKS03] beschrieben sind. Eine Qualitätsbeschreibung ist immer mit einer Eigenschaft korreliert, und besteht wiederum aus einer Menge von Datenwerten.

Transformation Eine Transformation erlaubt schließlich über definierte Regeln die wechselseitige Wandlung zwischen verschiedenen Datenstrukturen. Eine Datenstruktur kann dabei wiederum entweder eine Qualitätsklasse oder ein Datentyp sein.

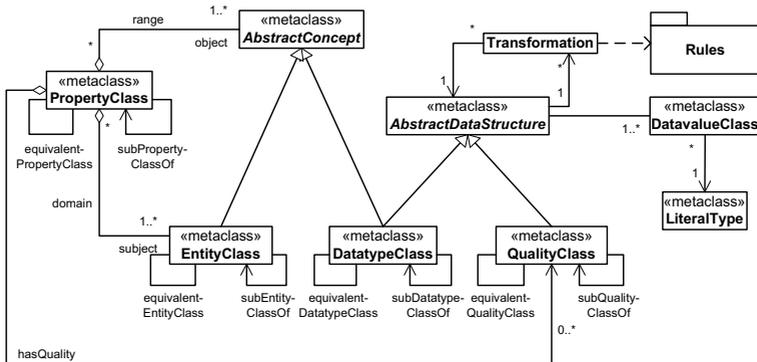


Abbildung 3.8: Das Kontext-Meta-Modell nach Fuchs [Fuc04, HKBF05]

Darüber hinaus können zwischen Entitäten auch Spezialisierungs- oder Äquivalenzbeziehungen erzeugt werden.

3.3 VCM: Ein Fahrzeugkontextmodell auf Basis des Context-Meta-Models

In diesem Abschnitt soll nun ein Modell zur Verwaltung von Kontextinformationen in Fahrzeugen dargestellt werden, das sogenannte *Vehicle Context Model (VCM)*. Das VCM bildet dabei aufgrund der in [Fuc04] dargelegten Vorteile im Wesentlichen eine konkrete Modellinstanz des im vorangegangenen Abschnitt skizzierten Context-Meta-Modells von Fuchs, mit OWL als syntaktische Beschreibungssprache zur Wissensrepräsentation. Dabei spielten insbesondere die klare Strukturierung des CMMs, also auch die Möglichkeit zur expliziten Beschreibung semantischer Äquivalenz über Domänengrenzen hinweg eine entscheidende Rolle. Die konkrete dynamische Instanziierung des VCM bildet schließlich das Wissen des Fahrzeug hinsichtlich der verfügbaren Beobachtungen, sowie der abgeleiteten höherwertigen Kontextinformationen ab (siehe Abbildung 3.9).

Meta-Modell-Schicht	CMM / OWL
Modell-Schicht	VCM
Instanzschicht	Fahrzeug Wissensbasis

Abbildung 3.9: Modellschichtung

3.3.1 Elemente und Struktur des Fahrzeugkontextmodells

Die wesentlichen Entitäten, die im Zusammenhang mit kooperativen und prädictiven Telematikanwendungen von Bedeutung sind, sind offensichtlich die Fahrzeuge selbst, sowie Interessensorte- bzw. Gebiete. Wie in Abschnitt 3.1.2 und 2.4 ausführlich dargelegt, basieren diese Anwendungen in besonderem Maße auf individuellen, verteilt beobachteten Kontextinformationen. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, Beobachtungen und deren Implikationen ins Zentrum der Wissensrepräsentation zu stellen und Beobachtungen direkt als Reifikation der zugehörigen Entität zu betrachten. Daraus ergeben sich die folgenden drei Kernelemente des Fahrzeugkontextmodells als Instanz der Klasse der Entitäten des CMMs (siehe Abbildung 3.10):

Beobachtung Die Instanzen der Klasse *Beobachtung* repräsentieren konkrete Beobachtungen von Sensorsystemen und abgeleitete höherwertige Kontextaspekte. Wie in Abschnitt 3.1.2 aufgezeigt, beinhaltet eine Beobachtung neben dem konkreten Beobachtungswert insbesondere Angaben hinsichtlich des Ortes und des Zeitpunktes der Beobachtung, sowie Qualitätsbeschreibungen wie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Beobachtung.

Aggregat Über ein Aggregat können einzelne Beobachtungen, welche sich auf dasselbe Ereignis bzw. den selben Sachverhalt beziehen, zusammengefasst werden. Aggregate bestehen folglich aus einer Menge gleichartiger Beobachtungen.

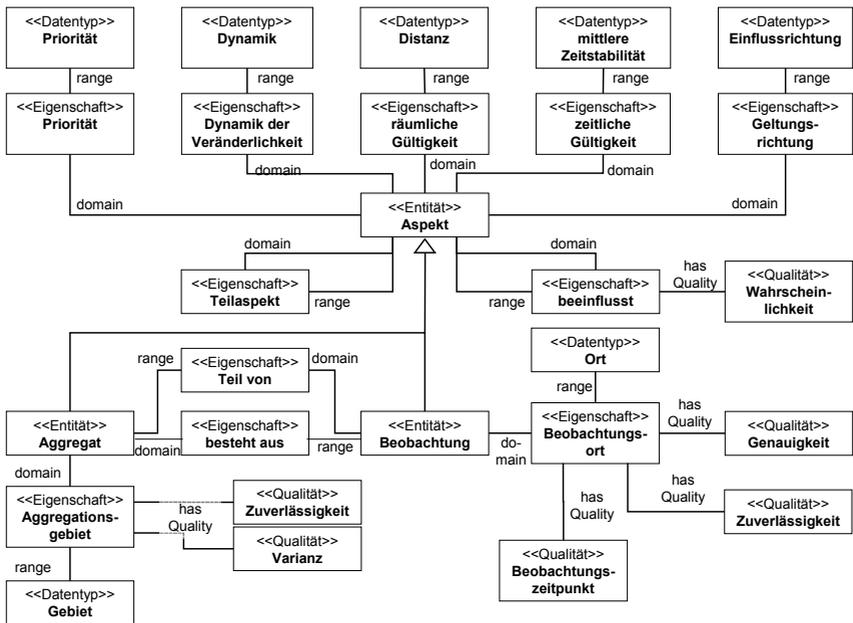


Abbildung 3.10: Schematischer Überblick über das Fahrzeugkontextmodell

Aspekt Die Klasse Aspekt generalisiert die zuvor genannten Entitätenklassen und ermöglicht die Abbildung des statischen Domänenwissen mit den gleichen Mitteln, wie dies für die eigentlichen dynamischen Beobachtungen der Fall ist. Insbesondere ermöglicht die Klasse der Aspekte dabei die Abbildung kausaler Korrelationen zwischen unterschiedlichen Aspekten, wie beispielsweise den Einfluss von *Regen* auf die Eintretenswahrscheinlichkeit von *Aquaplaning*. Zudem können Aspekte mit weiteren beschreibenden Eigenschaften korreliert werden, beispielsweise der Häufigkeit des Auftretens oder der durchschnittlichen Gültigkeitsdauer.

Im Folgenden werden diese drei Kernelemente näher beschrieben.

Aspekt

Die Klasse Aspekt erlaubt es, das statische Domänenwissen über die einzelnen Kontextaspekte abzubilden. Anwendungen auf Basis des VCM erhalten auf diese Weise aus der Wissensbasis neben dem dynamischen Kontextinformationen auch Wissen über die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Aspekten, deren Eigenschaften und Charakteristiken, und wie sie diese Verarbeiten können.

Aufgrund der Generalisierung von Beobachtungen und Aggregaten gelten die zugehörigen statischen Eigenschaften in gleicher Weise für deren jeweilige Instanzen und müssen somit lediglich einmal instanziiert werden. Aspekte weisen aus diesem Grund zwei (logische) Typen von Eigenschaften auf. Zum einen sind dies statische Eigenschaften des Aspektes, insbesondere:

- die Priorität hinsichtlich des Einflusses auf das Fahrgeschehen in Bezug auf kooperative Assistenzsysteme (Eine ausführlichere Beschreibung der Notwendigkeit findet sich in Kapitel 6).
- die typische Dynamik der Veränderung des Aspektes über die Zeit (siehe Abschnitt 2.3.2).
- der räumliche und zeitliche Wirk- bzw. Gültigkeitsbereich des Aspektes, sowie
- die von diesem Aspekt im Hinblick auf prädiktive Assistenzsysteme betroffene Geltungsrichtung (siehe Abbildung 2.18 aus Abschnitt 2.4.3).

Zum anderen können auch Beziehungen zwischen Aspekten über Eigenschaften abgebildet werden, insbesondere:

- Hierarchische Generalisierungen von Aspekten (*subAssertionTypeOf*), wie beispielsweise *Stau*, *stockender-* oder *zähfließender Verkehr*.
- Kausalitätsketten (*causes*), welche die kausalen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Aspekten spezifizieren. Kausalitätsketten bilden die wechselseitige Beeinflussung des Zustands von Aspekten ab (siehe Abschnitt 3.1). Diese sind zusammen mit den Qualitätskorrelationen des *Grades des Dafürhaltens*, sowie der *Zuverlässigkeit* und der *Genauigkeit* insbesondere bei der Ableitung des aktuellen und zukünftigen Fahrkontextes von Bedeutung (eine ausführlichere Beschreibung hierzu findet sich in Kapitel 5). Über derartige

Wirkbeschreibungen lassen sich zudem in gleicher Weise auch Bewegungskorrelationen oder Ist-Teil-von-Beziehungen zwischen Entitäten abbilden, wie sie in Abschnitt 3.1 vorgestellt wurden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Kontext-Meta-Modell keine unmittelbaren Beziehungen zwischen Entitäten vorsieht, sondern diese über Eigenschaftskorrelationen abgebildet werden müssen, was zu einer komplexen Datenstruktur auf Instanzebene führt. Da im Fahrzeugkontextmodell jedoch im Wesentlichen die Beziehungen zwischen Entitäten auf statische Beziehungen zwischen Aspekten beschränkt sind (dem Domänenwissen), deren Zahl im Vergleich zu konkreten Beobachtungen dieser Aspekte vernachlässigbar klein ist, wirkt sich dies vor dem Hintergrund der vorgestellten beobachtungszentrischen Instanzierung des CMMs nur geringfügig negativ aus. Auf eine Aufweichung der klaren Strukturiertheit des CMMs zugunsten einer besseren Performanz wurde daher verzichtet.

Beobachtungen

Die Entität Beobachtung beschreibt eine konkrete Beobachtung eines Aspektes an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt, bzw. in der Verallgemeinerung auch aus Beobachtungen abgeleitete höherwertige Kontextinformationen. Eine neue Instanz der Klasse Beobachtung ergibt sich folglich entweder durch Analyse der Rohsensordaten des eigenen Fahrzeugs, durch Empfang einer entsprechenden Nachricht von anderen Fahrzeugen, oder durch Ableitung kausal korrelierter Kontextinformationen. Im Speziellen können die folgenden Eigenschaften mit einer konkreten Beobachtung korreliert werden (siehe Abbildung 3.11):

- Der Ort und Zeitpunkt der Beobachtung. Entsprechend der Überlegungen zur eindeutigen und interoperablen Positionsangabe von Fahrzeugen (siehe beispielsweise [AGO03]) kann dabei neben der Angabe des Längen- und Breitengrades zudem auch die aktuelle Fahrtrichtung (siehe Abbildung 3.12), sowie eine eindeutige Straßenidentifikation und eine relative Distanz zu einem definierten Wegpunkt auf dieser Straße als Positionsangabe spezifiziert werden.
- Die Zuverlässigkeit der bzw. das Vertrauen in die Beobachtung.
- Die Genauigkeit der Beobachtung.
- Der Grad des Dafürhaltens hinsichtlich der Richtigkeit der Beobachtung.
- Die Aggregatangehörigkeit der Beobachtung (*Teil von*).

Aggregat

Mittels der Klasse Aggregat können Beobachtungen zusammengefasst werden (siehe Abbildung 3.13). Die Beobachtungen werden dabei wiederum über eine Eigenschaft (*besteht aus*) mit einem Aggregat verbunden. Diese Eigenschaft stellt letztlich die Umkehrrelation der *Teil von* Eigenschaften der Beobachtungen dar. Wie für Beobachtungen existieren auch für Aggregate weitere Eigenschaften, insbesondere ein dem Aggregat zugewiesener Ort (*Beobachtungsort*). Dabei können dem Ort des Aggregats

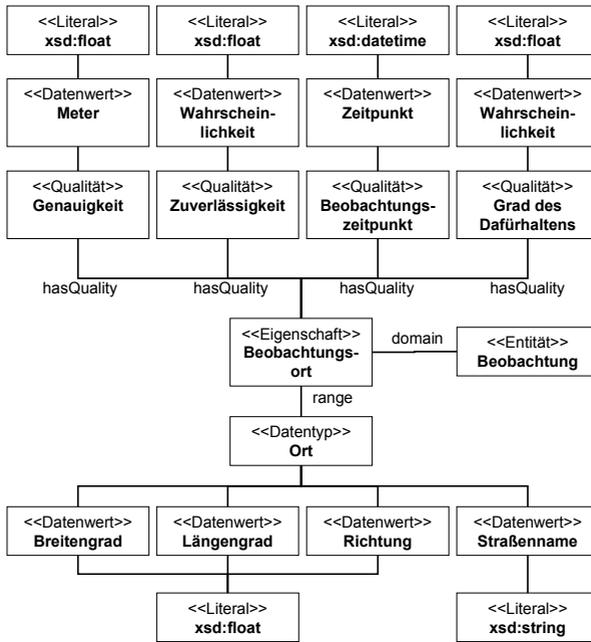


Abbildung 3.11: Eigenschaften der Klasse Beobachtung

wiederum Qualitätseigenschaften wie beispielsweise die aggregierte Zuverlässigkeit zugeordnet werden. Bei diesem sogenannten *Matching* zwischen Beobachtungen muss überprüft werden,

- ob sich beide Beobachtungen auf den gleichen Aspekt beziehen,
- ob die Distanz der assoziierten Beobachtungsorte „klein genug“ ist, wobei sich die konkrete Größe hierbei wiederum anhand der typischen zeitlichen Dynamik hinsichtlich des geografischen Ortes bemisst, sowie
- ob die Beobachtungen den gleichen Geltungsbereich aufweisen.

Die Datentyp-Klasse *Gebiet* spezifiziert weiterhin das Gebiet, das einer Aggregation zugeordnet wird. Typischerweise entspricht dieses einer zusammenfassenden Verallgemeinerung der enthaltenen Beobachtungsorte, einschließlich gegebenenfalls der Fahrtrichtungsangaben, falls dies erforderlich ist. Daraus ergeben sich für statische Aspekte ohne geografische Wirkeinflüsse wie beispielsweise Unfälle die folgenden wesentlichen Datenwerte:



Abbildung 3.12: Mögliche Skala der Fahrtrichtungsangabe

- Der kleinste und größte enthaltene Breitengrad,
- Der kleinste und größte enthaltene Längengrad,
- Die kleinste und größte Fahrtrichtungsangabe, sowie
- Eine eindeutige Straßenbezeichnung.

Dabei muss bei jedem Hinzufügen oder Entfernen einer Beobachtung zu einem Aggregat das Aggregationsgebiet unter Beachtung der jeweiligen Qualitätsmerkmale falls notwendig angepasst werden. Die Angabe der Fahrtrichtung spielt dabei vor dem Hintergrund des Zusammenführens von Beobachtungen eine Rolle, die lediglich für eine Fahrtrichtung gültig sind. So können beispielsweise zwei Unfälle, die sich auf zwei getrennten Richtungsfahrspuren auf einer Autobahn an nahezu der gleichen Position ereignet haben, nicht zusammengefasst werden, da sie aufgrund der expliziten Fahrspurtrennung unabhängige Ereignisse mit unabhängigen Wirkeinflüssen darstellen. Weisen Aspekte räumliche Wirkeinflüssen auf, wie beispielsweise Wetterbedingungen, kann eine Menge von Punkten bestimmt werden, die die konvexe Hülle der enthaltenen Beobachtungen bilden.

3.3.2 Ortskorrelierte Verwaltung von Kontextinformationen im Fahrzeug

Die Zielhierarchie aus Abschnitt 1.1 sowie die in Abschnitt 2.4.5 beschriebenen Anforderungen hinsichtlich einer adäquaten und effektiven Benutzerschnittstelle machen deutlich, dass kooperative Fahrerassistenz- und Informationssysteme vorrangig auf stark ortsbezogene Kontextinformationen angewiesen sind. Mit abnehmender Distanz zum Ort einer potentiellen Gefahrenquelle geht wie beschrieben eine Zunahme der Dringlichkeit der Handlungsaktion einher. Daraus resultiert, dass zum Einfügen in und insbesondere dem wieder Auffinden von Kontextinformationen aus der Wissensbasis, welche vergleichsweise weit entfernt vom aktuellen Aufenthaltsort des Fahrzeugs sind, auch

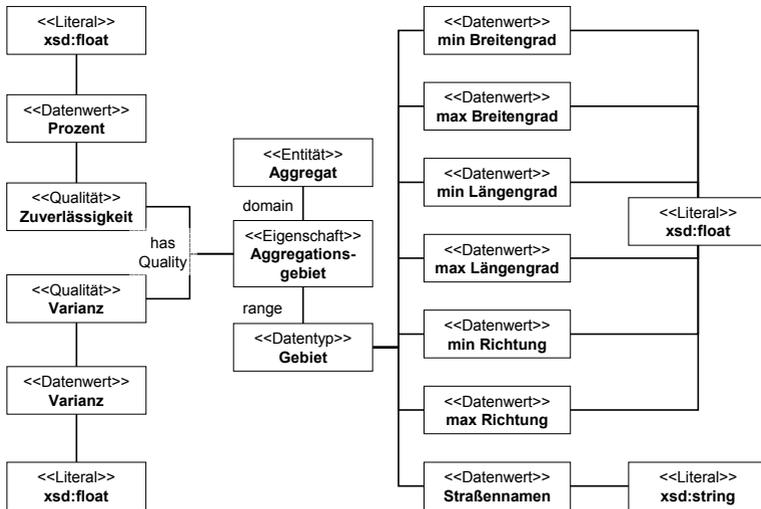


Abbildung 3.13: Eigenschaften der Klasse Aggregat

vergleichsweise viel Zeit zur Verfügung steht. Umgekehrt gilt offensichtlich, dass Beobachtungen, die sich auf Orte in der unmittelbaren Nähe des Fahrzeugs befinden, unter Umständen kritische Informationen hinsichtlich der Handlungsentscheidung der Anwendung darstellen und daher schnell zugreifbar sein müssen. Die tolerierbare Latenzzeit beim Zugriff auf eine Kontextinformation der Wissensbasis steigt demzufolge mit zunehmender Distanz zum mit ihr assoziierten Ort. Aus diesem Grund liegt es nahe, die im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Beobachtungen und Kontextinformationen unmittelbar ortsbezogen zu verwalten. Im Folgenden sollen kurz zwei prinzipiell mögliche Vorgehensweisen der ortsbezogenen Verwaltung von Kontextinformationen in Fahrzeugen dargestellt und evaluiert werden, nämlich eine Verknüpfung der Kontextinformationen mit einer digitalen Straßenkarte, sowie der Verwaltung auf Basis eines sogenannten *Quad Trees*.

Verknüpfung mit einer digitalen Straßenkarte

Digitale Straßenkarten gliedern die gespeicherten Straßen in einzelne Streckenabschnitte, wobei jeder gespeicherte Streckenabschnitt eindeutig referenzierbar ist. Diese Streckenabschnitte sind in Kombination mit Navigationssystemen üblicherweise mit den entsprechenden geografischen Koordinaten, dem Straßennamen, dem Straßentyp sowie einer Abschätzung der durchschnittlichen Fahrtdauer zum durchqueren des Streckenabschnitts belegt. Aktuelle Erweiterungen sollen es jedoch in Zukunft ermöglichen, Streckenabschnitte mit weiterführenden Informationen anzureichern, wie beispielsweise Kurvenradien, Fahrspuren oder Verkehrszeichen (siehe beispielsweise [PRE06c]). Es

ist angedacht, dass über die Navigation hinaus diese Informationen auch für andere Anwendungen des Fahrzeugs zugänglich sind. Aus Performanzgründen gilt dies jedoch nur für einen kleinen Ausschnitt des Karten- und Informationsmaterials in einem sogenannten elektronischen *GeoHorizont*. Der *GeoHorizont* stellt dabei einen Baum mit den Routenmöglichkeiten der nahen Umgebung dar, wobei die einzelnen Äste den Streckenabschnitten entsprechen, die in naher Zukunft vom Fahrzeug befahren werden können. Jedem Ast ist dabei ein Wahrscheinlichkeitswert zugeordnet, der angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Streckenabschnitt tatsächlich befahren werden wird. Nach Durchfahren des aktuellen Streckenabschnitts wird der Baum entsprechend fortlaufend aktualisiert.

Der so in [PRe06c] angedachte *GeoHorizont* kommt dabei den Anforderungen nach einer ortsbezogenen Verwaltung von Kontextinformationen im Fahrzeug bereits recht nahe. Es ist jedoch erforderlich, dynamisch beliebige Daten mit Streckenabschnitten zu verknüpfen. Die von den eigenen Sensoren abgeleiteten Beobachtungen beziehen sich dabei offensichtlich immer auf den aktuellen Streckenabschnitt. Auch wenn dies aufgrund des starken lokalen Charakters der meisten kooperativen Anwendungen auf viele von anderen Fahrzeugen empfangenen Beobachtungen zutrifft, müssen auch über den räumlich stark begrenzten *GeoHorizont* hinaus Beobachtungen dynamisch gespeichert werden. Insbesondere gilt dies für Beobachtungen von Streckenabschnitten, die zwar räumlich sehr nahe sind, jedoch nicht in naher Zukunft befahren werden, beispielsweise die Gegenrichtung auf Autobahnen, oder weil der Beobachtungsort bereits passiert wurde. Es ist also nicht ausreichend, lediglich den so angedachten elektronischen *GeoHorizont* vor dem Fahrzeug dynamisch mit Kontextinformationen attributieren zu können.

Als mögliche Lösung, welche sowohl den erweiterten Zugriffsbedingungen als auch den strikten Performanzanforderungen genügt, bietet sich daher ein modifizierter *GeoHorizont* an, welcher ein deutlich erweitertes Gebiet abdeckt, jedoch mit einer distanzabhängigen Abstufung der verwendeten Auflösung. Kernidee dabei ist, dass räumlich nahe gelegene Streckenabschnitte feingranular (auf Basis der tatsächlich definierten Streckenabschnitte) dargestellt werden. Mit zunehmender Distanz werden zunehmend mehr Streckenabschnitte samt den resultierenden Unterbäumen zu einem logischen Streckenabschnitt zusammengefasst. Weit entfernte Straßen werden demzufolge nur sehr grob und näherungsweise beschrieben. Abbildung 3.14 zeigt exemplarisch diese distanzbezogene Anpassung der Auflösung sowie den zugehörigen modifizierten *GeoHorizont*. Eine derartige Kontextverwaltung auf Basis eines kartenbezogenen modifizierten *GeoHorizonts* ermöglicht dabei einen schnellen und zielgerichteten Zugriff auf Beobachtungen und Kontextinformationen, die sich in den Streckenabschnitten vor der aktuellen Fahrzeugposition befinden. Es können so insbesondere alle prädiktiven Assistentenanwendungen optimal unterstützt werden, welche üblicherweise auch die höchsten Anforderungen hinsichtlich der tolerablen Latenzzeit stellen. Dies gilt allerdings nur, falls sich der entsprechende Kontextaspekt lediglich auf eine bestimmte Straße oder Fahrtrichtung bezieht. Ist das nicht der Fall, so müssen zudem auch alle räumlich umliegenden Streckenabschnitte hinsichtlich der Existenz entsprechender Beobachtungen abgefragt werden. Dies macht sich insbesondere bei Aspekten mit geografischer Ausbreitung oder Wirkeinflüssen bemerkbar, wie beispielsweise schlechten Wetterbedingungen. Zudem müssen Ortskoordinaten auf den richtigen Streckenabschnitt abgebildet werden. Zum einen erfordert dies zusätzlichen Rechenaufwand. Zum anderen

3.3 VCM: Ein Fahrzeugkontextmodell auf Basis des Context-Meta-Models

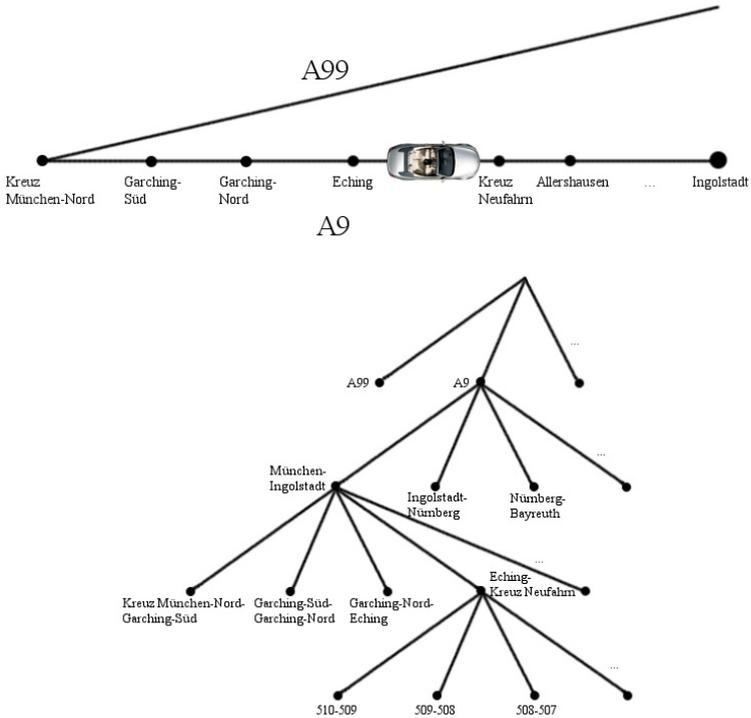


Abbildung 3.14: Distanzbezogene Anpassung der Auflösung von Streckenabschnitten und zugehöriger modifizierter GeoHorizont

Verbesserung insofern ausgenutzt werden, dass die regionale Auflösung, also die Baumtiefe, mit zunehmender Distanz zur Fahrzeugposition hin abnimmt. Daraus resultiert, dass mit Blattknoten, deren assoziiertes Gebiet nahe an der aktuellen Fahrzeugposition liegt, nur vergleichsweise wenige Beobachtungen verknüpft sind und diese so gezielt abgerufen werden können. An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich aufgrund des lokalen Charakters ohnehin üblicherweise eine Häufung von Beobachtungen in unmittelbarer Nähe der aktuellen Fahrzeugposition zeigt. Durch die Fahrzeugbewegung wird offensichtlich eine fortlaufende Umorganisation des Baumes notwendig. Diese bezieht sich jedoch lediglich auf jeweils einen Teilbaum, der das Gebiet vor dem Fahrzeug überdeckt, und der daher einmalig weiter verfeinert werden muss.

Eine digitale Karte zur ortsbezogenen Verwaltung ist somit nicht notwendig. Aufgrund der räumlichen Strukturierung lassen sich insbesondere auch Aspekte mit räumlicher Ausdehnung und Geltungsrichtung effizient im Baum abbilden. Eine Abbildung der Ortskoordinate auf einen bestimmten Streckenabschnitt ist nicht nötig. Daraus resultiert jedoch andererseits, dass Beobachtungen von Aspekten, die sich nur auf eine bestimmte Geltungsrichtung beziehen, nicht anhand der primären Datenstruktur unterschieden werden können. Dies macht in diesen Fällen eine nachträgliche Verifikation der aus dem Quadtree extrahierten Beobachtungen notwendig.

Unter Berücksichtigung der eben geschilderten Vor- und Nachteile eines kartenbasierten Verfahrens gegenüber einer generischen Verwaltung der Kontextinformationen mit einem Quadtree erscheint letzterer unter pragmatischen Gesichtspunkten insgesamt besser geeignet, insbesondere, da kein digitales Kartenmaterial notwendig ist. Quadrees sind also universaler einsetzbar. Eine kartenbasierte Lösung kann zwar besser in das Gesamtdatenkonzept der Fahrzeuge eingeflochten werden, jedoch bedingt dies andererseits eine Vielzahl an weiterführenden Abhängigkeiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das vorgestellte Fahrzeugkontextmodell hinsichtlich der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Anforderungen ein valides Konzept zur Repräsentation von Kontextinformationen in Fahrzeugen darstellt. Insbesondere gilt:

- Das VCM basiert auf einer expliziten ontologiebasierten Modellierung. Es trägt somit dem erweiterten Rollenbild der Fahrzeuge Rechnung, die aufgrund der Kommunikationsmöglichkeiten und der autonomen Datenerhebung nicht mehr nur (eigene) Kontextinformationen verarbeiten, sondern diese auch erzeugen und bereitstellen. Insbesondere die konkrete Instanziierung des Kontext-Meta-Modells ermöglicht so eine umfassende und domänenübergreifende Integration der Fahrzeuge in die Kontextwertschöpfungskette.
- Die inhärent mit Beobachtungen assoziierten Meta-Informationen, insbesondere der Beobachtungsort, -Zeitpunkt, sowie die Beobachtungsqualität kann in einfacher Weise abgebildet werden.
- Domänenspezifisches Wissen hinsichtlich der kausalen Abhängigkeiten und Wirkzusammenhänge ist in gleicher Weise wie das dynamische Instanzwissen explizit repräsentiert. Insbesondere kann so das Anwendungswissen dynamisch zur Laufzeit erweitert bzw. verbessert und zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden.
- Zudem ermöglicht die explizite Repräsentation der kausalen Abhängigkeiten eine fortlaufende individuelle Anpassung während der Laufzeit. Für individuell

beeinflusste Abhängigkeiten, wie beispielsweise die bevorzugte Scheibenwischer-einstellung in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge, ergibt sich so eine stetige Verbesserung der Inferenzqualität.

- Durch die ortsbezogene Datenstrukturierung ist das typischerweise stark lokal bezogene Wissen kooperativer Telematiksysteme effizient zugreifbar.

Automobile Ad-hoc Netze

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Grundlagen und Hintergründe sowie eine formale Modellierung automobiler Ad-hoc Netze in Grundzügen dargestellt, sofern sie für diese Arbeit von Bedeutung sind.

4.1 Historische Entwicklung automobiler Ad-hoc Netze

Während der letzten Jahre rückte die spontane Vernetzung von Fahrzeugen, im Zusammenhang mit Telematikanwendungen oft auch als *dedicated short range communication (DSRC)* bezeichnet, zunehmend ins Blickfeld des Interesses der Fahrzeugindustrie, mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Schwerpunkten, insbesondere aber zur Realisierung unfallvermeidender Maßnahmen [Kos05b, GF97, MTT00, ORSN98, TL97, XHSv02, AG97]. Aufgrund des großen Potenzials, das die anvisierten kommunikationsgestützten Anwendungen (siehe Abschnitt 2.2) hinsichtlich der Steigerung der Verkehrssicherheit und -effizienz versprechen, wurden international eine Reihe großer Forschungsvorhaben und Standardisierungsgremien initiiert, sowie Konsortien und gegründet, mit dem Ziel einer standardisierten und interoperablen Vernetzung von Verkehrsteilnehmern und der Verkehrsinfrastruktur. Die wesentlichen Akteure und Gruppen hierbei sind (vergleiche hierzu beispielsweise auch [Mie06, See06])

- das *Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC)* [Car06],
- das *Vehicle Safety Communications Consortium (VSC)* [Veh06]
- die Arbeitsgruppe *Technical Committee 278 - Road Transport and Traffic Telematics* des Europäischen Komitees für Normung (CEN) [CEN]
- das *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* [ETS],
- die Arbeitsgruppe *Technical Committee 204 - Intelligent Transportation Systems* der ISO [ISO], insbesondere die Arbeitsgruppe 16 *CALM (Continuous Communications for Vehicles)* [CAL],

- die *American Society for Testing and Materials (ASTM)* [AST]
- die *Society of Automotive Engineers (SAE)* [Soc06]
- die IEEE Arbeitsgruppen IEEE 1609.1 (Anwendungen) [IEE05b], *1609.2* (Security) [IEE05c], *1609.3* (Netzwerk) [IEE05d], *1609.4* (Mehrkanalunterstützung) [IEE05e] und *IEEE 802.11p* (Kanalzugriff und physikalische Sicht) [IEE04]

Die wesentlichen Anwendungsmöglichkeiten, sowie die notwendigen technologischen Grundlagen hinsichtlich des Kommunikationssystems wurden und werden zudem in folgenden Forschungsprojekten untersucht:

- *Prometheus* [Bra95]
- *Inter-vehicle Hazard Warning (IVHW)* [Che02]
- *Invent VLA* (Verkehrsleistungsassistent) [IV]
- *FleetNet* [Fl06]
- *CarTalk 2000* [IST04]
- *Vehicle Infrastructure Integration (VII)* [VII]
- *Aktiv* [Akt]
- *Network-on-Wheels (NoW)* [NoW]
- *PReVENT - Intersafe* [PR06a]
- *PReVENT - Willwarn* [PR06b]
- *Safespot* [Saf]
- *COMeSafety* [COM]
- *Cicas-V* [CV]
- *Cooperative Systems for Intelligent Road Safety (COOPERS)* [COO]
- *Cooperative Vehicle-Infrastructure System (CVIS)* [CVI]

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen dabei nochmals die Verflechtung der einzelnen Institutionen, sowie einen Überblick über die jeweils beteiligten Institutionen und Firmen.

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen (kurzreichweitigen) Kommunikationstechnologien (mit einer Kommunikationsreichweite zwischen 100m und ca. 1000m), die sich prinzipiell dazu eignen, autonom generierte Fahrzeugdaten zwischen Fahrzeugen auszutauschen. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass Funktechnologien im Frequenzbereich um 950 MHz [Che02], UTRA-TDD [ERW⁺03] im Bereich von 2Ghz, sowie WLAN Technologien (IEEE 802.11) sowohl im Bereich um 2,4 GHz [MAF⁺98,

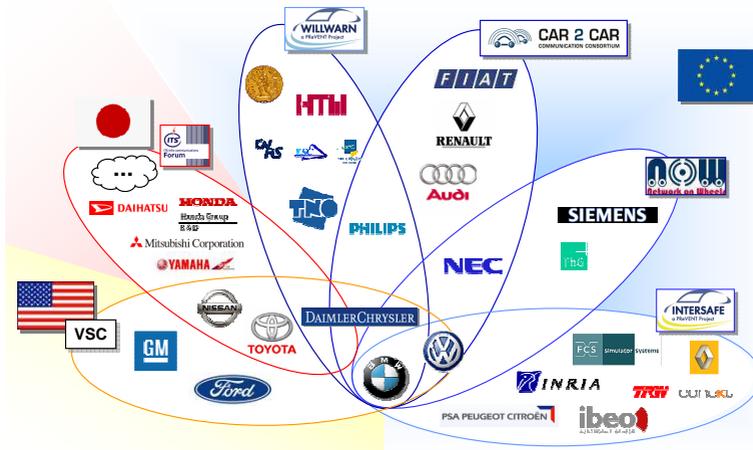


Abbildung 4.1: Überblick über Forschungsaktivitäten und beteiligte Partner (Auszug, Stand Juni 2005)

KS01] (IEEE 802.11 b/g) als auch im Bereich um 5,9 GHz (IEEE 802.11 a/p) [IEE99b, IEE04] im Wesentlichen für den Einsatz in hoch mobilen Automobilen Ad-hoc Netzen geeignet sind [BMW03]. Insbesondere auf letzterer Variante liegt seit einigen Jahren der Schwerpunkt der Betrachtungen, nicht zuletzt durch die Standardisierungsbestrebungen der IEEE. Hintergrund dieser Entscheidung ist neben technischen Leistungsgesichtspunkten vor allem die vergleichsweise hohe Datenrate, die breite Marktdurchdringung und die daraus resultierende preisgünstige Verfügbarkeit der Kommunikationshardware. Auch eine Harmonisierung des Frequenzspektrums um 5,9 GHz ist zumindest für die beiden Märkte Europa und Nordamerika wahrscheinlich (siehe Abbildung 4.3).

4.2 Das Problem der Markteinführung

Die in Abschnitt 2.2 beschriebenen kooperativen Fahrerassistenzanwendungen basieren auf der Möglichkeit Informationen zwischen Fahrzeugen austauschen zu können. Aufgrund der begrenzten Übertragungsreichweite des drahtlosen Kommunikationssystems, erfordert eine großflächige Abdeckung eine Vielzahl an Kommunikationsteilnehmern oder Infrastrukturknoten. Insbesondere im Falle kooperativer Fahrerassistenzsysteme auf Basis eines kurzreichweitigen Ad-hoc Kommunikationssystems, ist eine Vielzahl an Kooperationspartnern nötig, um eine akzeptable Dienstgüte zu ermöglichen. Von möglichen negativen Auswirkungen aufgrund einer durch eine große Anzahl an Fahrzeugen bedingte Netzwerküberlastung abgesehen, gilt, dass die Dienstgüte kooperativer Telematiksysteme mit zunehmender Anzahl an teilnehmenden Fahrzeugen oder Infrastrukturknoten steigt, da sich einerseits die mittlere Konnektivität erhöht, und

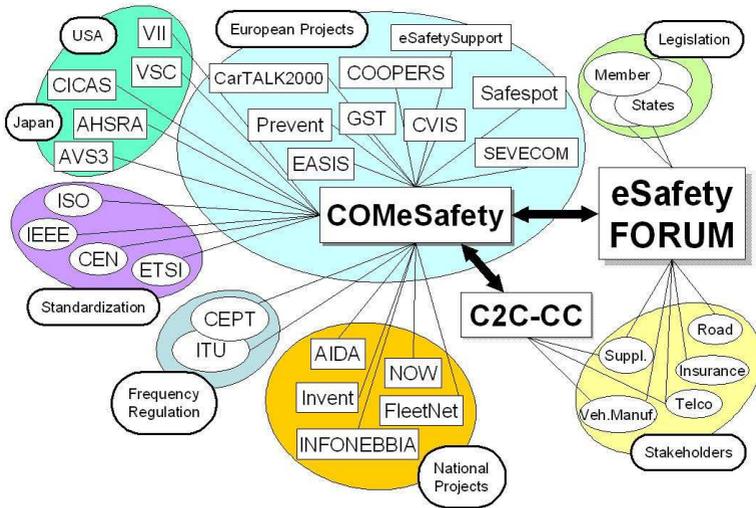


Abbildung 4.2: Überblick über das Zusammenwirken der Institutionen und Forschungsprojekte ([Mie06])

andererseits zudem auch eine größere Menge von aktuellen Fahrkontextinformationen autonom von den Fahrzeugen erfasst werden kann. Damit einhergehend steigt mit zunehmender Anzahl an ausgestatteten Fahrzeugen auch der Anwendungsnutzen für den Kunden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bestimmte Anwendungen einen minimalen Grad an jeweiliger Ausstattungsrate (Fahrzeuge vs. Infrastruktur) benötigen, um überhaupt sinnvoll eingesetzt werden zu können (siehe Abbildung 4.4). So benötigen Kreuzungs- oder Ampelassistent-Anwendungen offensichtlich die Interaktion mit einem mit einer Ampel korrelierten Infrastrukturknoten.

Insbesondere Anwendungen, die ein wechselseitiges Ortsbewusstsein zur Vermeidung von Unfällen mit anderen Fahrzeugen benötigen, garantieren offensichtlich nur dann eine zuverlässige Funktionsweise in den allermeisten Situationen, wenn auch nahezu alle Fahrzeuge mit dem jeweiligen System ausgestattet sind. Wie in Abschnitt 2.4 aufgezeigt, gilt dies auch für prädiktive Systeme mit größerer Antizipationszeit wie beispielsweise der lokalen Gefahrenwarnung, um sicherzustellen, dass bereits bekannte und wichtige fahraufgabenbezogene Kontextinformationen nicht aufgrund mangelnder Konnektivität wieder verloren gehen. Kosch beschreibt in diesem Zusammenhang in [Kos05a] auch ein sogenanntes *Phasenübergangsphänomen* (siehe Abbildung 4.5) in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte.

Gerade das Ziel der Erreichung einer hohen Ausstattungsrate der Fahrzeuge mit kooperativen Assistenzsystemen ist dabei jedoch vor dem Hintergrund des kooperativen Charakters kritisch, da viele der Anwendungen für die ersten Kunden keinen unmittelbaren Mehrwert darstellen, und daher auch initial kein Kaufanreiz besteht.

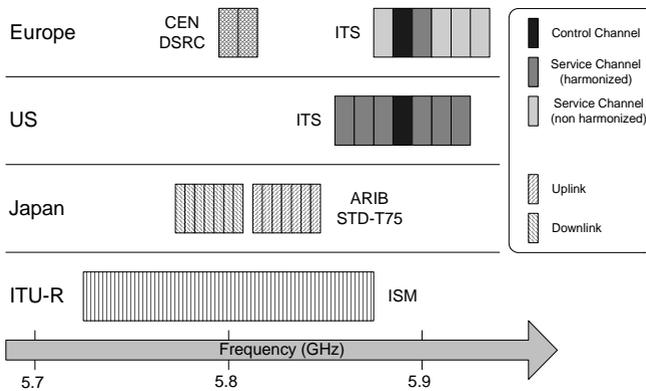


Abbildung 4.3: Überblick über den Stand der internationalen Frequenzvergabe [PRE07]

Daraus folgt, dass die Systeme im Zuge einer schnellen Markteinführung in kurzer Zeit eine vergleichsweise weite Verbreitung finden müssen. Dem steht jedoch der lange Produktlebenszyklus der Fahrzeuge entgegen [MMP⁺05]. Abbildung 4.6 verdeutlicht in diesem Zusammenhang die benötigte Zeit, um eine bestimmte Rate an Fahrzeugen insgesamt zu erreichen, falls nur Neuwagen (bzw. bestimmte Neuwagen) mit kooperativen Assistenzsystemen ausgeliefert werden. Als Konsequenz daraus ergeben sich folgende Möglichkeiten der Markteinführung:

- Die Systeme werden kostenfrei in alle Neufahrzeuge integriert. Sobald eine ausreichende Ausstattungsrate erreicht wird, werden sukzessive die entsprechenden Systeme gegen Entgelt freigeschaltet.
- Es gibt gesetzliche Bestimmungen, die den Einsatz derartiger Systeme vorschreiben.
- Kooperative Telematikanwendungen, insbesondere die grundlegende Kommunikationstechnik, kann in einfacher Weise bei bestehenden Altfahrzeugen nachgerüstet werden.
- Nicht-kooperative Anwendungen, oder infrastrukturbasierte Anwendungen, die einen unmittelbaren Mehrwert für die ersten Nutzer darstellen, basieren auf der gleichen Basistechnologie. Sobald eine ausreichende Ausstattungsrate hierdurch erreicht wird, können wiederum auch sukzessive die entsprechenden kooperativen Anwendungen integriert werden.

Die ersten beiden Strategien erscheinen dabei kaum realisierbar. Die beiden letztgenannten Strategien sind jedoch erfolversprechend. Daraus resultiert jedoch weiterhin, dass das Kommunikationssystem eine Vielzahl an unterschiedlichsten Anwendungen

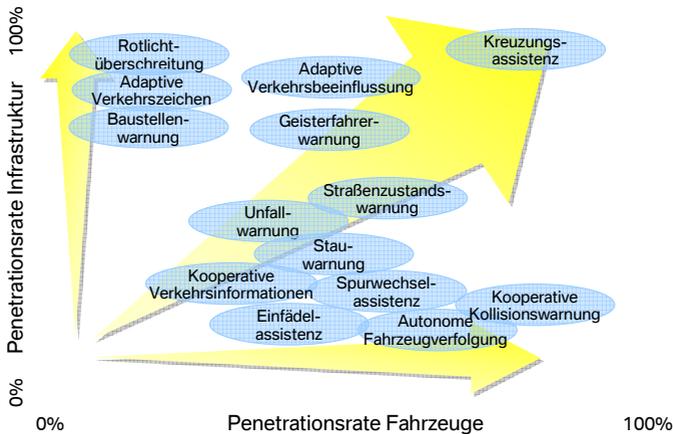


Abbildung 4.4: Notwendige Penetrationsrate für kooperative Assistenzanwendungen

unterstützen muss, auch wenn es vordergründig im Hinblick auf kooperative Anwendungen konzipiert sein muss (siehe Abschnitt 2.4). Dies resultiert aus den Bestrebungen hinsichtlich eines dedizierten Frequenzspektrums für fahrsicherheits- oder verkehrseffizienzbezogene Anwendungen, da letztlich nur diese ein eigenes Frequenzspektrum rechtfertigen. Überdies hinaus heißt dies jedoch auch, dass fahrbezogene Anwendungen, falls notwendig, einseitig bei der Netzwerkzuteilung bevorzugt werden müssen (eine ausführlichere Beschreibung hierzu findet sich in Kapitel 6).

4.3 Modellierung automobilier Ad-hoc Netze

Kosch charakterisiert in [Kos05b] ein automobiles Ad-hoc Netz hinsichtlich zweier aufeinander aufbauender Merkmale. Einerseits beschreibt das sogenannte Netzmodell die topologische Eigenschaft des Netzes. Das Netzmodell spezifiziert dabei, veränderlich über die Zeit, welches Fahrzeug aktuell mit welchem Fahrzeug potenziell kommunizieren kann. Darauf aufbauend beschreibt das Kommunikationsmodell, wie die einzelnen Netzwerkknoten Nachrichten versenden, empfangen und weiterleiten. Dabei spezifiziert Kosch für das Netzmodell drei beeinflussende Parameter:

- die Kommunikationsreichweite r
- den Datendurchsatz Θ , sowie
- den Abschirmungskoeffizienten ξ .

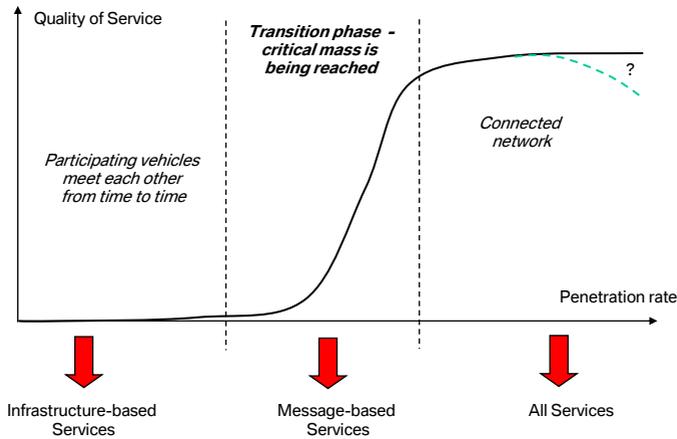


Abbildung 4.5: Phasenübergangsphänomen nach Kosch [Kos05a]

Zwei Netzwerkknoten können genau dann kommunizieren, wenn ihre Euklidische Distanz kleiner gleich der Kommunikationsreichweite r ist, wobei vereinfachend symmetrische und konstante Kommunikationsreichweiten angenommen werden. Das Kommunikationsmedium ermöglicht einen maximalen gemeinsamen Datendurchsatz von allen sich in gegenseitiger Kommunikationsreichweite befindenden Fahrzeugen von Θ Bit pro Sekunde, welcher vereinfachend ebenfalls als konstant angenommen wird. Mittels des Abschirmungskoeffizienten ξ werden die möglichen Kommunikationspartner weiterhin dahingehend eingeschränkt, dass speziell in innerstädtischen Szenarien Gebäude das Kommunikationssignal abschirmen.

Offensichtlich ändert sich aufgrund der Bewegungen der Netzwerkknoten die Netzwerktopologie fortwährend. Die daraus resultierende Abbildung der möglichen Kommunikationsbeziehungen beschreibt einen zeitvariierenden Graphen. Die Kantenmenge $E(t)$ des Graphen spezifiziert dabei die dynamischen Kommunikationsbeziehungen der Fahrzeuge $V(t)$ zum Zeitpunkt t . Das bedeutet, dass Kanten zwischen zwei Netzwerkknoten jeweils eine zeitliche Gültigkeit besitzen. Unter der Annahme symmetrischer Kommunikationsbeziehungen resultiert daraus ein ungerichteter Graph mit Knotenmenge $V(t)$, welche der Anzahl der Netzteilnehmer zum Zeitpunkt t entspricht, und der Menge von temporären Kanten $E(t)$. Eine temporäre Kante zwischen zwei Knoten besteht genau dann, wenn über ein beliebiges aber nicht leeres Zeitintervall $[t_i, t_j] \subseteq T$ der Netzwerklebensdauer T eine Kommunikation zwischen diesen beiden Knoten möglich ist. Im Gegensatz zu Kempe et al. [KKK00], die den Kanten Kommunikationszeitpunkte zuordnen, beschreibt Kosch aus diesem Grund über die Netzwerklebensdauer T Kantengültigkeitsdauern wie folgt. Eine Kante $e_{i,j}^{t_s, t_f} \in E$ zwischen den Knoten v_i und v_j besitzt einen Startzeitpunkt $t_s \in T$, sowie einen Endzeitpunkt $t_f \in T$, wobei auf dem linearen kontinuierlichen Ordnungsmaß von T gilt $t_s < t_f$. Es ergibt sich somit

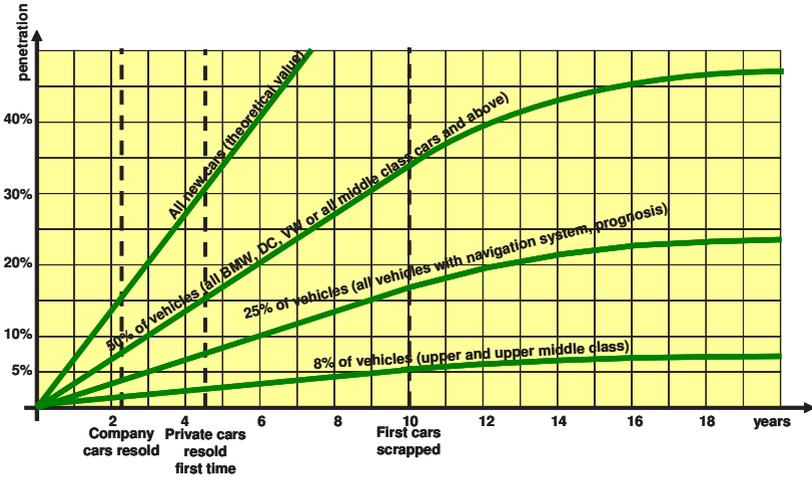


Abbildung 4.6: Entwicklung der Ausstattungsrate an Fahrzeugen entsprechend des Grades der Ausstattung an Neufahrzeugen ([MMP⁺05])

für jede temporär im Netzwerk existente Kante zwischen den Netzwerkknoten v_i und v_j in deren Gültigkeitszeitraum $[t_s, t_f] \in T$ ein diese Kante eindeutig beschreibendes 4-Tupel $e_{i,j}^{t_s,t_f} := (v_i, v_j, t_{s(i,j)}, t_{f(i,j)}) \in E$.

Unter der Annahme, dass die einzelnen Weiterleitungsprozesse von Nachrichten zwischen den Fahrzeugen zeitlos sind, existiert nun genau dann ein *zeitrespektierender Weg* von einem Knoten v_i zu einem Knoten v_j , wenn auf dem linear geordneten Weg $W := (v_i \prec v_{i+1} \prec \dots \prec v_j)$ für jedes Knotenpaar (v_{i+l}, v_{i+l+1}) mit $l = 0, \dots, |W| - 1$, mindestens eine Kante existiert, für die gilt, dass ihr Startzeitpunkt kleiner oder gleich dem Endzeitpunkt der Vorgängerkante und ihr Endzeitpunkt größer oder gleich dem Startzeitpunkt der Vorgängerkante ist. Wenn also gilt:

$$\begin{aligned} \forall (v_{i+l}, v_{i+l+1}) \in V \times V & \quad , l = 0, \dots, |W| - 1 : \\ \exists (v_{i+l}, v_{i+l+1}, t_{s(i+l,i+l+1)}, t_{f(i+l,i+l+1)}) \in E & \quad , l = 0, \dots, |W| - 1 : \\ t_{s_{i+l+1}} \leq t_{f_{i+l}} \wedge t_{s_{i+l}} \leq t_{f_{i+l+1}} & \end{aligned}$$

Fahrzeuge haben jedoch die Möglichkeit, Nachrichten zwischenspeichern und bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt den Verbreitungsprozess fortzuführen (store and forward). Vor diesem Hintergrund zeigt Kosch [Kos05b] weiterhin, dass hierdurch temporäre Lücken im Verbreitungsprozess wirkungsvoll überbrückt werden können. Ein zeitrespektierender Weg lässt sich so nach Kosch verallgemeinern zu einer *zeitrespektierende Kantenstaffel*. Im Vergleich zum zeitrespektierenden Weg sind die Gültigkeitsdauern der betroffenen Kanten nun weniger stark eingeschränkt. Offensichtlich existiert auch dann ein Weiterleitungspfad $W := (v_i \prec v_{i+1} \prec \dots \prec v_j)$, wenn zwischen den

Wegpunkten mindestens jeweils eine Kante existiert, deren Endzeitpunkt größer oder gleich dem Startzeitpunkt der Vorgängerkante ist. Wenn also gilt:

$$\begin{aligned} \forall (v_{i+l}, v_{i+l+1}) \in V \times V & , l = 0, \dots, |W| - 1 : \\ \exists (v_{i+l}, v_{i+l+1}, t_{s(i+l, i+l+1)}, t_{f(i+l, i+l+1)}) \in E & , l = 0, \dots, |W| - 1 : \\ t_{s_{i+l+1}} \leq t_{f_{i+l}} \end{aligned}$$

Anders ausgedrückt erreicht also eine von Knoten v_i zum Zeitpunkt t_i ausgesendete Nachricht höchstens alle diejenigen Knoten v_j , für die eine entsprechende zeitrespektierende Kantenstaffel $zKS_{(v_i, v_j); (t_k, t_l)}$ existiert mit $t_{f(i, i+1)} \geq t_i$ und $t_k = t_{s(i, i+1)}$, sowie $t_l = t_{f(j-1, j)}$. Kosch beschreibt darauf aufbauend die sogenannte Menge $C_{i,t}$ der *t-erreichbaren* Knoten von v_i als die Menge derjenigen Netzwerkknoten, für die mindestens eine derartige Kantenstaffel innerhalb der Zeitspanne $t = [t_i, t_k] \subseteq T$ existiert, also:

$$C_{i,t} = \left\{ v_j \mid \exists zKS_{(v_i, v_j); (t_i, t_k)} \right\}$$

Unter realen Netzwerkbedingungen beschreibt $C_{i,t}$ letztlich eine obere Schranke für die t-erreichbare Menge von Netzwerkknoten. In realen Szenarien wird eine Nachricht lediglich eine Teilmenge der Knoten tatsächlich erreichen. Zum Einen sind die Weiterleitungsprozesse nicht zeitlos. Zum anderen unterstellt obige Abschätzung einerseits, dass keines der ausgesendeten Nachrichtenpakete verloren geht, und andererseits Nachrichten in beliebiger Zahl zu beliebigen Zeitpunkten zwischen den Netzwerkknoten übertragen werden können. Eine limitierte Kapazität des Übertragungskanal, sowie Effekte des Medienzugriffs werden also bisher nicht berücksichtigt.

Wie in Abschnitt 3.1 soll zur Vereinfachung der folgenden Betrachtungen ein statischer Schnappschuss zu einem festen Zeitpunkt t_o als Basismodell eingesetzt werden. Dieser topologische Schnappschuss stellt wiederum einen ungerichteten Graphen mit Knotenmenge $V(t_0)$ dar, welche der Anzahl der Netzteilnehmer entspricht, und der Kantenmenge $E(t_0)$. Es existiert genau dann eine Kante zwischen zwei Knoten, wenn eine Kommunikation zwischen diesen beiden Knoten zum Zeitpunkt t_0 potenziell möglich ist. Sei wiederum

- $dist(v_i, v_j)(t_0)$ der Euklidische Abstand zwischen den Netzwerkknoten v_i und v_j mit $\{v_i, v_j\} \in V$, sowie
- $LOS_\xi(v_i, v_j, t_o)$ die vom Abschirmungsfaktor ξ abhängige weitere Einschränkung der Kommunikationsbeziehungen aufgrund von Abschattungen, falls keine direkte Sichtverbindung (Line-of-Sight) zwischen den Netzwerkknoten existiert.

So ergibt sich die Kantenmenge $E(t_0)$ zum Zeitpunkt des Schnappschusses t_o durch [Kos05b]

$$E(t_0) = \{(i, j) \mid dist(v_i, v_j)(t_0) \leq r \wedge LOS_\xi(v_i, v_j, t_0)\}$$

Bezeichne weiterhin

- θ_i die Datenrate, die Fahrzeug v_i aktuell für Broadcast-Übermittlungen belegt,
- $NB(v_i) = \{v_j \mid (v_i, v_j) \in E\}$ die Menge der Knoten, die aktuell eine mögliche Kommunikationsbeziehung zu v_i besitzen und

- θ_{ij} die Datenrate der Unicast-Kommunikationsbeziehung des Fahrzeugs v_i mit dem Fahrzeug v_j aus seiner Nachbarschaft, wobei gilt $v_j \in NB(v_i)$.

Fahrzeuge in einer Nachbarschaft teilen sich den genutzten Kommunikationskanal Θ . Damit ergibt sich für die Kapazität jeder Kante, also jeder möglichen Kommunikationsbeziehung die Abschätzung [Kos05b]

$$\theta_i + \sum_{v_j \in NB(v_i)} \left(\theta_{ij} + \theta_j + \sum_{v_k \in NB(v_j)} \theta_{jk} \right) \leq \Theta$$

Diese Abschätzung ist jedoch noch zu optimistisch, da der Effekt der sogenannten Hidden Nodes (siehe beispielsweise [Wikc]) vernachlässigt ist. Das Hidden Node Problem wird zusätzlich verstärkt vor dem Hintergrund, dass die Interferenz des übertragenen Nachrichtensignals weiter reicht, als die effektive Kommunikationsreichweite. Das heißt, ein Nachrichtensignal, dessen Signal-Rausch-Verhältnis aufgrund seiner Distanz zum Sender bereits zu gering ist und daher nicht mehr dekodiert werden kann, interferiert trotzdem noch über eine größere Distanz mit anderen Nachrichtensignalen. Zudem muss angenommen werden, dass aufgrund baulicher Unterschiede der Fahrzeuge und unterschiedlicher Umweltbedingungen die Kommunikationsbeziehungen nicht symmetrisch sind. Sei daher der topologische Schnappschuss zum Zeitpunkt t_0 ein gerichteter Graph, mit Knotenmenge V und der Menge der gerichteten Kanten \vec{E} . Entsprechend sei

- $N\acute{B}(v_i) = \{v_j | (v_i, v_j) \in \vec{E}\}$ die Menge der Knoten, die Nachrichten des Fahrzeugs v_i empfangen können und
- $IN(v_i)$ die Menge der Fahrzeuge, die durch eine Übertragung von v_i insofern gestört werden, dass sie zeitgleich keine anderen Nachrichten empfangen können.

Dabei gilt offensichtlich $N\acute{B}(v_i) \subseteq IN(v_i)$. Umgekehrt bezeichne

$$I\acute{N}(v_i) = \{v_k | v_i \in IN(v_k)\}$$

die Menge der Knoten, die bei gleichzeitiger Übertragung den Empfang in Knoten v_i stören. Damit ergibt sich als verfeinerte Abschätzung für die gemeinsam verfügbare Kapazität des Nachrichtenkanals

$$\theta_i + \sum_{v_j \in N\acute{B}(v_i)} (\theta_{ij} + \theta_j) + \sum_{v_k \in I\acute{N}(v_i) \cup IN(v_j)} (\theta_k + \sum_{v_l \in N\acute{B}(v_k)} \theta_{kl}) \leq \Theta$$

Die Kapazität, die einem Netzwerkknoten v_i letztlich zur Verfügung steht, teilt sich auf in

- seine eigene Broadcast-Datenrate,
- die eigene Datenrate für Unicast Anwendungen mit seinen Nachbarn (innerhalb seiner Kommunikationsreichweite),

- die Datenraten (Broadcast und Unicast) der Knoten, die v_i bei gleichzeitiger Übertragung stören, und
- die Datenraten (Broadcast und Unicast) der Knoten, die bei gleichzeitiger Übertragung diejenigen Knoten stören, mit denen v_i aktuell kommuniziert oder kommunizieren könnte.

Unter der Annahme, dass in automobilen Ad-hoc Netzen aufgrund der anvisierten Anwendungen lokal begrenzte Broadcast-Kommunikation das vorherrschende Kommunikationsparadigma ist (siehe auch Abschnitt 2.4 und Kapitel 6), so lässt sich obige Ungleichung vereinfachen zu

$$\theta_i + \sum_{v_k \in I\dot{N}(v_i)} \theta_k \leq \Theta$$

Unter Berücksichtigung der Netzwerkdynamik und damit verbundenen Konnektivitätsschwankungen ergibt sich daraus weiterhin die über den spezifischen Zeitraum Δt genauer betrachtete Kanalkapazität $\Theta(\Delta t)$

$$\theta_i(\Delta t) + \sum_{v_k \in I\dot{N}(v_i)} \theta_k(\Delta t) \leq \Theta(\Delta t),$$

wobei aufgrund der hohen Netzwerkdynamik in automobilen Ad-hoc Netzen gelten muss $\Delta t \rightarrow \epsilon$. Dabei ist die effektiv erreichbare Datenrate real weiterhin aufgrund der nicht optimalen Medienzugriffsstrategien deutlich geringer. Für die Verbreitung von Kontextinformationen ist vor dem Hintergrund des Ausbreitungsverhaltens der Broadcast-Nachrichten zudem eine genauere Abschätzung der effektiv vorhandenen Datenrate der einzelnen Fahrzeuge von Bedeutung. Gupta und Kumar [GK00], sowie Li et al. [LBD⁺01] untersuchen die Fragestellung der effektiven Kapazität von drahtlosen Ad-hoc Netzen im Allgemeinen, sowie der effektiven selbst benutzbaren Kapazität, die ein teilnehmender Knoten zur Verfügung hat im Speziellen, weiter im Detail. Neben den auftretenden Interferenzen zwischen den Netzwerkknoten und dem Koordinierungsprozess der Knoten beim Medienzugriff, limitiert die Ausbreitung einer von einem Knoten initiierten Nachricht während des Weiterleitungsprozesses von einem Knoten zum nächsten weiter die verbleibende freie Kanalkapazität für zusätzliche Nachrichten. Hierbei spielt weiterhin die Netzwerkgröße, bzw. die Ausbreitungscharakteristik eine entscheidende Rolle.

Die effektive Singlehop-Kapazität (total one-hop capacity) C hängt dabei zudem von der räumlichen Verteilung der Knoten ab. Unter der Annahme einer symmetrischen und konstanten Kommunikationsreichweite r der n Netzwerkteilnehmer und einer Gleichverteilung der Knotendichte δ über das abgedeckte Netzwerkareal A , hängt A unmittelbar von der Anzahl der Netzwerkteilnehmer ab. Es ergibt sich $A = \frac{n}{\delta}$. Damit ergibt sich für die effektive Singlehop-Kapazität ebenfalls eine proportionale Abhängigkeit $\Theta = k \cdot A = k \cdot \frac{n}{\delta}$, wobei der konstante Faktor k ein Maß für den durchschnittlichen Kapazitätsverlust darstellt, beispielsweise infolge des Medienzugriffsschemas. Unter der Annahme, dass jeder Knoten Nachrichtenpakete mit einer Rate von λ aussendet, und einer durchschnittlicher Distanz L einer Unicast-Nachricht zum Zielgebiet, ergeben sich

unter Berücksichtigung der durchschnittlichen maximalen Kommunikationsreichweite r mindestens $\frac{L}{r}$ an der Weiterleitung der Nachricht beteiligte Netzwerkknoten. Weiterhin ergibt sich damit für die effektive Singlehop-Kapazität

$$\Theta < n\delta \frac{L}{r}$$

und somit unter Berücksichtigung der zuvor erfolgten Gleichung $\Theta = k\frac{n}{\delta}$ für die zu erwartende Kapazität λ jedes Knotens

$$\lambda > \frac{kr}{\delta} \frac{1}{L} = \frac{\Theta/n}{L/r}.$$

Offensichtlich vermindert sich also die effektive Knotenkapazität mit zunehmender durchschnittlicher Länge der Kommunikationspfade. Li et al. konnten ferner zeigen, dass unter der Annahme eines zufälligen Kommunikationsmusters der Netzwerkknoten für die Knotenkapazität eine obere Schranke von $\lambda = O(1/\sqrt{n})$ gilt [LBD⁺01]. Die Überlegungen basieren dabei auf einer optimalen und redundanzfreien Weiterleitungsstrategie auf dem Netzwerkpfad und unterstellen zudem eine vergleichsweise hohe Knotendichte, so dass die Anzahl der weiterleitenden Knoten näherungsweise $\frac{L}{r}$ ist. Diese Annahme eines zufälligen Kommunikationsmusters ist für automobiler Ad-hoc Netze jedoch nur bedingt gerechtfertigt, da insbesondere fahrsicherheitsbezogene Telematikanwendungen im Wesentlichen ein Broadcast-basiertes, asynchrones und verbindungsloses Kommunikationsmuster mit situationsbedingten Lastspitzen aufweisen (siehe Abschnitt 2.4). Die Kommunikation in automobilen Ad-hoc Netzen ist im Wesentlichen ereignisbasiert, d.h. es ergeben sich lokale Kommunikationslastspitzen, beispielsweise wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig ein Stauende detektieren und dies verbreiten, oder sich zwei Fahrzeuge auf einem möglichen Kollisionskurs befinden. Daher ist auch die Annahme einer gleich verteilten durchschnittlichen Senderate in automobilen Ad-hoc Netzwerken im Allgemeinen nicht gerechtfertigt. Zudem ist auch die Größe des Gebietes, in dem Nachrichten verbreitet werden sollen situationsabhängig. Daher ist in der Regel auch die Größe des Weiterleitungsgebietes nicht gleich verteilt. Darüber hinaus sind die Netzwerkknoten in automobilen Ad-hoc Netzen entlang von Straßen, und daher wiederum nicht gleich, verteilt. Im Speziellen bleibt diesbezüglich festzuhalten, dass im Bereich von Kreuzungen die Fahrzeugdichte in der Regel merklich erhöht ist. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der hier dargelegten durchschnittlichen Knotenkapazität für die weiteren Betrachtungen leider nur bedingt geeignet. Es macht jedoch deutlich, dass die effektiv verfügbare Bandbreite in Ad-hoc Netzen insgesamt äußerst begrenzt ist und es zudem eine starke Korrelation hinsichtlich der Anzahl der Teilnehmer, sowie der Ausprägung des Netzwerkes gibt.

4.4 Physikalische Schicht und Medienzugriff

Die physikalischen Übertragungsschicht (PHY) und das Kanalzugriffsverfahren (MAC) müssen den vergleichsweise schnellen Fahrzeugbewegungen Rechnung tragen, sowie der unter Umständen großen Zahl an Fahrzeugen, welche sich in gegenseitiger Kommunikationsreichweite befinden. Es ist daher erforderlich, die resultierenden Kanalzugriffszeiten so gering wie möglich zu halten. Um eben dieses mit speziellem Fokus hinsichtlich

der Anforderungen in automobilen Ad-hoc Netzen zu gewährleisten, formte sich in den USA 2003 die Arbeitsgruppe *WAVE* (*Wireless Access in Vehicular Environments*), die 2004 in die IEEE 802.11 Arbeitsgruppen unter der Bezeichnung IEEE 802.11p angegliedert wurde. Der von dieser Gruppe erarbeitete Standardisierungsvorschlag basiert im Wesentlichen auf den beiden existierenden Standards IEEE 802.11a (PHY) [IEE99b] und e (MAC) [IEE05a]. Um die Toleranz gegenüber Multipfad-Ausbreitungseffekten zu minimieren wird das von der amerikanischen Regulierungsbehörde exklusiv zur Verfügung gestellte Frequenzspektrum von 75 MHz im Bereich zwischen 5,860 bis 5,930 GHz in sieben logische Kanäle à 10 MHz unterteilt. Unter der Annahme lediglich eines Sende- und Empfangsdecoders macht dies ein Frequenz-Sprungschema nötig, bei dem zyklisch auf einen dedizierten (Kontroll-) Kanal (Control-Channel) gesprungen werden muss. Der Kontrollkanal dient in erster Linie zum Versenden von Dienstankündigungen (Service Announcements) auf den anderen Kanälen. Es ist jedoch auch vorgesehen, auf diesem Kanal dringende fahrsicherheitskritische Nachrichten zu verschicken, die für praktisch alle teilnehmenden Fahrzeuge von Interesse sind.

Im Folgenden sollen kurz die wesentlichen Merkmale der Medienzugriffsschicht von IEEE 802.11 vorgestellt werden, soweit diese für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit von Bedeutung sind. Für eine umfassende Beschreibung der 802.11 Medienzugriffsstrategien sei auf die entsprechenden Standards verwiesen ([IEE99a, IEE99b, IEE04, IEE05a]). Grundlage der IEEE 802.11 Kanalzugriffsstrategie und der folgenden Überlegungen ist es, dass ein Kanalzugriff nur dann erfolgen kann, wenn aktuell kein anderer Netzwerkteilnehmer den Kanal belegt (auch als Carrier Sense Multiple Access - CSMA bezeichnet). Nach beendeter Übertragung muss ausgeschlossen werden, dass mehr als ein Netzwerkteilnehmer zeitgleich schreibend auf den Kanal zugreift. Eine Möglichkeit dies zu erreichen, ist, nach Ende einer vorangegangenen Übertragung eine (zufällige) Zeit vor einer weiteren Übertragung eines Netzwerkteilnehmers zu warten. Die hierzu definierte sogenannte *Distributed Coordination Function (DCF)* des 802.11 Standards [IEE99a] soll im Folgenden kurz vereinfacht dargestellt werden. Die Netzwerkknoten lauschen fortwährend, ob der Kommunikationskanal aktuell belegt ist (Carrier Sense). Ist dies über einen festgelegten Zeitraum (dem sogenannten *Distributed Coordination Function Interframe Space - DIFS*) nicht der Fall, so kann die Nachricht unmittelbar übertragen werden. Ist der Kanal belegt, wartet der Knoten bis zum Ende der aktuellen Übertragung und anschließend zusätzlich bis zum Ablauf des DIFS. Anschließend wählt sich der Knoten zufällig eine zusätzliche Wartezeit. Dieser sogenannte Wartezeitähler (Back-off Timer) wird dabei zufällig aus einem vorgegebenen Intervall zwischen 0 und dem sogenannten *Wettbewerbsfenster (Contention Window) CW* gewählt. Sowohl Wettbewerbsfenster und Wartezeitähler bemessen sich dabei anhand einer für alle Netzwerkteilnehmer fest definierten sogenannten *slot time*, welche laut Standard bei 16 μs liegt. Der zufällig initiierte Wartezeitähler wird anschließend solange dekrementiert, solange der Kommunikationskanal frei ist. Erreicht der Zähler den Wert Null, so darf auf den Kanal zugegriffen werden. Je kleiner dabei die Wahrscheinlichkeit ist, dass zwei Netzwerkteilnehmern gleich lange Wartezeiten zugewiesen werden, desto kleiner ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als ein Netzwerkknoten zur gleichen Zeit schreibend auf den Kommunikationskanal zugreift und es in Folge dessen zu einer Paketkollision kommt.

Greift während der Wartezeit ein anderer Netzwerkknoten auf den Kommunikationskanal zu, so wird der Dekrementierungsprozess während der Übertragung dieser

Nachricht unterbrochen, und nach dem Ende der Übertragung wieder aufgenommen. Kommt ein Netzwerkknoten also nicht an die Reihe, so steigt aufgrund der Weiterverwendung des aktuellen Zählerstandes seine Chance auf einen erfolgreichen Kanalzugriff in jeder Runde. Auf der anderen Seite ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Netzwerkknoten zwei Nachrichten in unmittelbarer Folge übertragen kann vergleichsweise gering, da nach einer erfolgreichen Übertragung der Wartezähler wieder neu initialisiert wird.

Sowohl der Interframe Space, also auch das Wettbewerbsfenster ermöglichen bei IEEE 802.11 einen differenzierenden Zugriff auf den Kommunikationskanal. Dabei wird eine Variation des interframe spaces üblicherweise zur Priorisierung von Netzwerkmanagementnachrichten (beispielsweise für Empfangsbestätigungen) eingesetzt. Demgegenüber beruht eine Differenzierung des Kanalzugriffs für Nutzdaten zumeist auf der individuellen Anpassung des Wettbewerbsfensters. Ein kleineres Wettbewerbsfenster führt dabei offensichtlich im Durchschnitt (jedoch nicht notwendigerweise) zu (zufällig gewählten) kleineren Wartezählern und in Folge zu kürzeren Wartezeiten. Dabei wird die Größe des Wettbewerbsfensters (CW) mit einem minimalen Wert (CW_{min}) initialisiert, und bei jedem erfolglosen Übertragungsversuch bis zu einer maximalen Größe (CW_{max}) um einen festgelegten Faktor (persistence factor PF) vergrößert. Nach jeder erfolgreichen Übertragung setzt das Fahrzeug, das die Nachricht übertragen hat, sein Wettbewerbsfenster auf den minimalen Wert zurück. Diese Vorgehensweise erlaubt eine kontinuierliche Anpassung an die aktuelle Netzlast und so eine grobe, aber einfache Kontrolle der Kollisionswahrscheinlichkeit von Paketen beim Nachrichtenzugriff. Allerdings ist eine explizite Empfangsbestätigung im Falle eines Broadcasts, wie er im automobilen Anwendungsszenario überwiegend auftritt, nicht realisierbar. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 verbildlichen nochmals exemplarisch den Wettbewerb um den Medienzugriff. In Abbildung 4.8 konkurrieren dabei drei Netzwerkknoten um den Zugriff

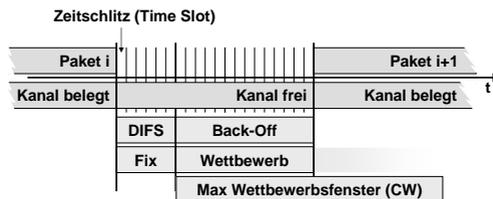


Abbildung 4.7: Vereinfachtes Medienzugriffsschema von IEEE 802.11

auf den gemeinsam genutzten Kanal. Die ausgefüllten Zeitboxen repräsentieren dabei den Dekrementierungsprozess des Wartezählers. Demgegenüber repräsentieren die gestrichelten Zeitlinien die verbleibende Wartezeit, falls zwischenzeitlich ein anderer Netzwerkteilnehmer auf den Kanal zugreifen durfte. Die verbleibende Wartezeit wird übertragen und fortgesetzt, sobald der Kanal nach Ende dieser Übertragung wieder für die Zeitspanne DIFS als frei erkannt wurde.

Die WLAN Standards IEEE 802.11 a/b/g/ ([IEE99a, IEE99b, IEE04]) sehen keine Differenzierung der zu übertragenden Nachrichten vor, d.h. die Abarbeitung der Nachrichten in der Sendewarteschlange der Knoten geschieht entsprechend der zeitlichen Reihenfolge des Einfügens in die Schlange (FIFO - first in first out). Demgegenüber

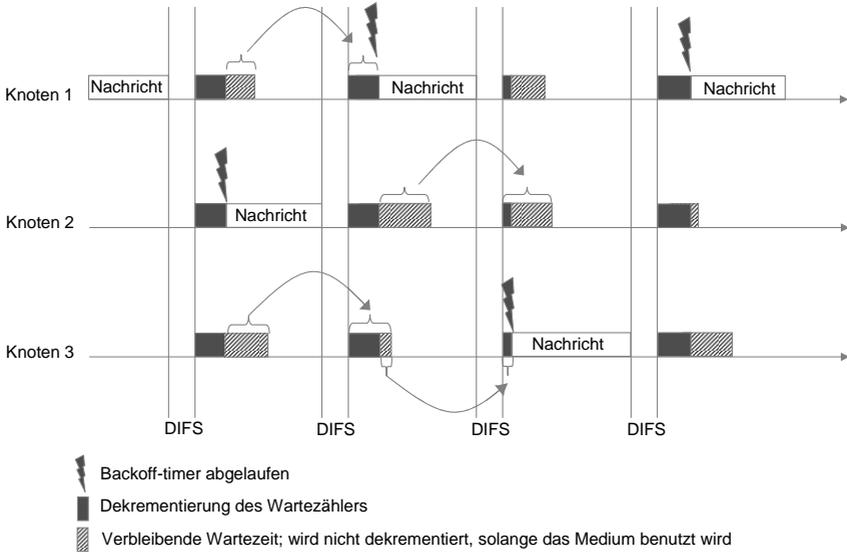


Abbildung 4.8: Exemplarischer Verlauf der Koordination des Kanalzugriffs von drei Knoten

sieht der Standard IEEE 802.11 e ([IEE05a]) eine explizite Priorisierung auf Basis der *Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF)*¹ vor. Diese wird durch acht konkurrierenden Warteschlangen mit unterschiedlicher Priorität realisiert. Entsprechend ihrer Priorität werden Nachrichten in eine dieser Warteschlangen eingereiht. Anschließend wird zur Übertragung eine Schlange ausgewählt, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Schlange ausgewählt wird, mit der ihr zugeordneten Priorität korreliert. Aus der ausgewählten Schlange wird schließlich wiederum entsprechend des FIFO-Prinzips diejenige Nachricht ausgewählt, die schon am längsten in der Schlange verweilt. Das resultierende Zugriffsverhalten bei 802.11 e kann vor diesem Hintergrund folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Es besteht ein interner Wettbewerb (*internal contention*) zwischen den Nachrichtenwarteschlangen und damit letztlich zwischen den Nachrichten um den Übertragungskanal.
- Zur internen Differenzierung wird neben dem DIFS ein weiteres Verzögerungsparadigma eingeführt, der sogenannte *Arbitration Interframe Space (AIFS)*. Warteschlangen mit höherer Priorität (Access Category - AC) werden dabei kürzere AIFS-Zeiten zugewiesen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass sie den internen Wettbewerb gewinnen.

¹Auch Enhanced Distributed Channel Access - ECDA genannt.

- Der Ablauf des internen Wettbewerbs entspricht im Wesentlichen dem des externen Wettbewerbs (also der Kanalzuteilung) von IEEE 802.11 a/b/g.
- Tritt während des internen Wettbewerbs eine (virtuelle) Kollision auf, so gewinnt die Nachricht der höher priorien Warteschlange.

Abbildung 4.9 veranschaulicht nochmals das eben dargestellte Vorgehen. Der aktuell

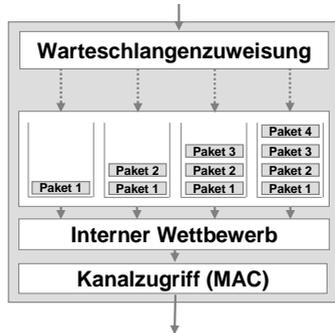


Abbildung 4.9: Interne Nachrichtendifferenzierung bei IEEE 802.11 e [IEE05a]

erarbeitete Standard IEEE 802.11p sieht ebenfalls eine Priorisierung von Nachrichten auf Basis von EDCF vor. Da jedoch eine logische Unterscheidung zwischen dem Netzwerkverkehr auf dem Kontrollkanal und den restlichen Dienstkanälen vorgenommen wurde, existieren bei 802.11p zwei voneinander unabhängige Gruppen von jeweils vier Warteschlangen - je eine Gruppe für den Kontrollkanal und die Dienstkanäle (siehe Abbildung 4.10). Die Nachrichten werden dabei anhand ihrer Anwendungsklasse in eine dieser Warteschlangen eingereiht und somit beim Kanalzugriff statistisch priorisiert.

4.5 Routing und Informationsverbreitung

In den letzten Jahren wurden eine Vielzahl an Ansätzen vorgestellt und verfeinert, um Nachrichten

- zwischen (hoch) mobilen Knoten auszutauschen,
- in ein bestimmtes Zielgebiet zu routen, oder
- in einem bestimmten Gebiet zu diffundieren.

Dabei stehen zumeist die folgenden, teilweise konkurrierenden Ziele im Fokus der Betrachtungen:

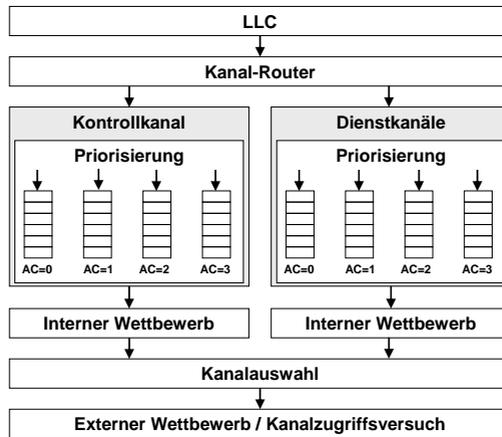


Abbildung 4.10: Aktuelle Warteschlangenarchitektur von IEEE 802.11p (nach [IEE04])

- Verhinderung eines sogenannten *Broadcast Storms* [TNCS99], also des unkontrollierten kettenreaktionsartigen Anschwellens der Zahl an Nachrichtenwiederholungen, durch gezielte Organisation und Minimierung der zur Verbreitung notwendigen Anzahl an Übertragungen.
- Reduktion der durch den Weiterleitungsprozess von Nachrichten entstehenden Latenzzeit.
- Sicherung der Verbreitung im Sinne eines zuverlässigen Nachrichtenübertragungsprozesses.
- Das Erzeugen, sowie das Aufrechterhalten einer Unicast-Route zwischen zwei mobilen Netzwerkknoten.

In diesem Abschnitt sollen nun die wesentlichen bisher erarbeiteten Konzepte, sowohl aus dem Bereich der mobilen Ad-hoc Netze, insbesondere jedoch aus der speziellen Anwendungsdomäne Automobil, im Hinblick auf die in Abschnitt 2.4 erarbeiteten Anforderungen untersucht und bewertet werden. Zudem werden die Vor- und Nachteile, sowie interessante Teilaspekte der Verfahren aufgezeigt, soweit diese für die Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen von Bedeutung sind (siehe hierzu auch [Adl06, Sch06, AS06, SA06])

4.5.1 Routing Verfahren

In Anlehnung an die Problemstellungen in allgemeinen mobilen Ad-hoc Netzen (Mobile ad hoc networks - MANET) wurden in der Frühphase der Betrachtungen von auto-

mobilen Ad-hoc Netzen hauptsächlich Verfahren diskutiert, die eine Punkt-zu-Punkt-Kommunikation (Unicast) zwischen zwei Netzwerkknoten ermöglichen. Im Zusammenhang mit dem Auffinden, dem Bereitstellen und der Aufrechterhaltung einer stabilen Punkt-zu-Punkt-Kommunikationsroute über mehrere weiterleitende Netzwerkknoten hinweg (Multi-Hop) besteht der wesentliche Unterschied automobiler zu mobilen Ad-hoc Netzen in der signifikant höheren Bewegungsgeschwindigkeit der Netzwerkknoten. Auf der anderen Seite lässt sich das Bewegungsmuster von Fahrzeugen verhältnismäßig gut beschreiben, was wiederum eine relativ exakte und zuverlässige kurzfristige Vorhersage der Netzwerkgeometrie und damit auch der Netzwerktopologie ermöglicht. Aus diesem Grund wurden eine Reihe von Routingmechanismen für automobiler Ad-hoc Netze vorgestellt, die speziell im Hinblick auf die sich schnell verändernde Netzwerktopologie hin optimiert sind. Für die Verteilung von Kontextinformationen für Fahrerassistenz und -informationssysteme, wie sie im Fokus dieser Arbeit steht, sind Punkt-zu-Punkt-Kommunikationsprotokolle jedoch nur sehr bedingt geeignet, da der ausgetauschte Kontext für nahezu alle Fahrzeuge in einem bestimmten Gebiet von Interesse ist. Um eine schnelle Markteinführung zu ermöglichen, muss das zugrunde liegende Kommunikationssystem jedoch auch eine Fülle von möglichen Unicast-Anwendungen unterstützen, beispielsweise die Kommunikation mit Internetzugangsknoten (Access-Points). Zudem enthalten einige bestehende Routingverfahren zum Teil Ansätze, die sich auch für die flächige Verteilung von Kontextinformationen eignen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die wesentlichen Punkt-zu-Punkt Routingverfahren für automobiler Ad-hoc Netze kurz vorgestellt werden.

Hinsichtlich der Effizienz von Unicast Routing-Protokollen existiert dabei bereits eine Reihe von Analysen in der Literatur ([BMJ⁺98, RT99]), teilweise auch mit speziellem Fokus hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bzw. Adaptierbarkeit im automobilen Umfeld (vergleiche beispielsweise [LHT⁺03, FM02, Loc03]). Dabei lassen sich grundlegend drei Arten von Unicast Routing-Protokollen unterscheiden:

Proaktive Protokolle, auch als tabellenzentrische Protokolle bezeichnet (table-driven routing protocols), zeichnen sich dadurch aus, dass sie Routeninformationen bezüglich eines verfügbaren Netzwerkpfades erstellen und pflegen. Da zukünftige Routen- bzw. Verbindungswünsche im Vorfeld nicht bekannt sind, müssen alle verfügbaren Routen vorgehalten werden. Die notwendigen Informationen darüber, an welchen Knoten eine Nachricht, die für einen bestimmten Adressaten bestimmt ist, weitergegeben werden muss, werden dabei in einer entsprechenden Tabelle in jedem Netzwerkknoten abgelegt. Der entscheidende Nachteil proaktiver Protokolle ist der enorme Aufwand, diese Informationen aktuell zu halten. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich die Topologie des Netzwerks oft und schnell ändert. Proaktive Routingprotokolle sind aus diesem Grund gerade im Hinblick auf die sich schnell bewegenden Knoten automobiler Ad-hoc Netze letztlich ungeeignet.

Reaktive Routingprotokolle, auch als on-demand Routingprotokolle bezeichnet, verwalten demgegenüber lediglich diejenigen Routen zwischen Netzwerkknoten, die im Moment von diesen Knoten auch benutzt werden. Dies reduziert einerseits den für die Verwaltung der Routen notwendigen zusätzlichen Datenverkehr. Sie sind daher im Gegensatz zu proaktiven Protokollen für hochdynamische Netze deutlich besser geeignet. Andererseits muss bei einem Verbindungswunsch die

Route erst initialisiert werden. Dies geschieht über die Aussendung sogenannter Route-Request Nachrichten, die vom Adressaten erwidert werden (siehe beispielsweise Dynamic Source Routing [JM96]). Bei einem Verbindungswunsch überprüft der Absender seinen lokalen Routenspeicher dahingehend, ob mit den gewünschten Adressaten bereits eine Verbindung besteht oder vor kurzem bestand. Ist dies nicht der Fall, flutet der Absender das Netzwerk mit einer Route-Request Nachricht, wobei der Weg jeder Nachricht durch das Netzwerk lokal in den weiterleitenden Knoten zwischengespeichert wird. Antwortet der Adressat mit einer sog. Route-Response-Nachricht, läuft diese genau auf dem zwischengespeicherten Weg zurück, welcher letztlich die gewählte Route darstellt. Bei einem Verbindungsabbruch wird an der Abbruchstelle wiederum ein neuer Route-Request initiiert. Dieses Vorgehen vergrößert aber die Latenzzeit beim Verbindungsaufbau. Aufgrund der hohen Bewegungsdynamik der Fahrzeuge in automobilen Ad-hoc Netzen wird das Auffinden solcher Routen, sowie deren Aufrechterhaltung jedoch auch hier sehr komplex. Ähnlich verfährt auch das *Ad hoc on demand distance vector routing (AODV)* [Per97], wobei die Anzahl der weiterleitenden Knoten in der Route-Request-Nachricht minimiert wird. Zu AODV existieren eine Reihe von Anpassungen an die speziellen Netzwerkcharakteristiken im automobilen Umfeld ([KSA02, SK02, Ai02, KSB02, KV98b]), speziell unter Miteinbezug örtlicher Informationen und Fahrzeugbewegungsmuster, die vor allem die Routenpflege verfeinern und die Wahrscheinlichkeit einer Routenunterbrechung bzw. die notwendige Zeit zur Wiederherstellung minimieren.

Das sogenannte *Cluster-based location routing (CBLR)* [SES03] verfeinert klassische reaktive Routingverfahren, basierend auf Ortsinformationen der mobilen Knoten und daraus resultierenden sogenannten Fahrzeug-Clustern. In jedem Fahrzeugcluster existiert dabei ein Verantwortlicher (Cluster-Head), welcher die Adressen und Positionsangaben der beteiligten Fahrzeuge in einer Tabelle (Cluster-Table) verwaltet. Möchte ein Fahrzeug eine Verbindung zu einem anderen Fahrzeug herstellen, sendet es einen entsprechenden Wunsch an den Clusterverantwortlichen. Existiert der Adressat nicht in der Clustertabelle (ist er also nicht im selben Cluster), so wird wie üblich ein Route-Request initiiert. Der Routenaufbau läuft also immer über die Clusterverantwortlichen, was eine weitere Reduktion des erforderlichen organisatorischen Netzwerkverkehrs zur Folge hat. Dennoch ist der organisatorische Zusatzaufwand im Zusammenhang mit automobilen Ad-hoc Netzen zu groß. Wiederum vor dem Hintergrund der hohen Netzwerkdynamik, gerade aufgrund entgegenkommender Fahrzeuge, gilt dies vor allem für die Pflege der Clustertabellen und die Verwaltung der Zuständigkeiten der Cluster-Heads.

Positionsbasierte Routingprotokolle, auch *Geocasts* genannt, wie sie beispielsweise in [GSB04] oder [MWH01] beschrieben sind, wurden entwickelt, um eine Nachricht in ein bestimmtes Zielgebiet zu übermitteln. Dabei zeichnen sich positionsbasierte Routingprotokolle typischerweise dahingehend aus, dass die Entscheidung der Weiterleitung auf der relativen Position der potenziell weiterleitenden Knoten zueinander und zum Zielgebiet basiert. Dabei muss offensichtlich die relative Beziehung der mobilen Knoten zueinander wechselseitig bekannt sein. Dies kann

beispielsweise über zyklische Positionsbenachrichtigungen geschehen (sog. beacons). Im Falle einer Unicast-Kommunikation muss jedoch vorher der geografische Aufenthaltsort des Adressaten ermittelt werden, beispielsweise über einen gesonderten Dienst, der die Aufenthaltsorte verwaltet. Positionsbasierte Routingverfahren eignen sich aber insbesondere auch für unidirektionale Multicast-Kommunikation mit einer Menge von adressierten Knoten im Zielgebiet, weshalb sie für die Verbreitung von Kontextinformationen in Betracht zu ziehen sind. Die Position des Zielgebietes ist dabei im Nachrichtenkopf enthalten. Jeder potenziell weiterleitende Netzwerkknoten entscheidet auf Basis dieser Zielgebietsposition, sowie seiner eigenen Position und der Position seiner Nachbarknoten, die sich gerade innerhalb seiner Kommunikationsreichweite befinden, an welchen Nachbarknoten die Nachricht weitergeleitet wird. Dabei wird zumeist derjenige Knoten als nächster weiterleitender Knoten ausgewählt, welcher sich in Richtung der Zielposition befindet und am meisten Distanz hin zum Zielgebiet überbrückt (wie dies beispielsweise beim *Greedy Perimeter Stateless Routing (GPRS)* [BK00] der Fall ist).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch *CarNet/Grid* [MJK⁺00], wobei hier die Ermittlung des Zielgebietes einer Nachricht durch einen sogenannten Grid Location Service erfolgt. Auf der grundlegenden Basis des Einbezugs der Positionen der mobilen Netzwerkknoten wurden einige weitere Optimierungen hinsichtlich der speziellen Eigenschaften in automobilen Ad-Hoc Netzen vorgestellt. Das sogenannte *Greedy Perimeter Coordinator Routing (GPRC)* [LMFH05b] zieht in die Entscheidung der Nachrichtenweiterleitung beispielsweise mit ein, dass Fahrzeuge in Kreuzungspositionen üblicherweise höhere Konnektivität besitzen. Es befinden sich also in der Regel vergleichsweise viele Fahrzeuge in ihrem unmittelbaren Empfangsradius. Daher sind Fahrzeuge in Kreuzungen zum Weiterleiten einer Nachricht besonders prädestiniert. Bedingung für eine derartige Entscheidungsfindung ist jedoch das Vorhandensein einer digitalen Karte, sowie die Kenntnis der unmittelbaren Nachbarn, was wiederum zusätzlichen Signalisierungsaufwand bedeutet. Zudem müssen die aktuellen Nachbarn in einer sogenannten Nachbarschaftstabelle verwaltet werden.

Der Aufbau und die Aufrechterhaltung einer expliziten Route ist bei dieser Vorgehensweise nicht notwendig. Daher eignet es sich insbesondere in Umgebungen, bei der sich die Netzwerktopologie schnell ändert. Das Routingverfahren adaptiert sich auch implizit permanent an sich wechselnde Netztopologien. Positionsbasierte Routingansätze bilden daher systembedingt gute Voraussetzung für den Einsatz im automobilen Umfeld [FHV⁺03]. Insbesondere eignen sie sich dazu, eine Vielzahl an Fahrzeugen in einem bestimmten Zielgebiet zu adressieren.

Wie GPRS und GPRC nutzt auch das von Füller et al. [FWK⁺03] vorgestellte *Contention Based Forwarding (CBF)* geografisches Wissen über das Zielgebiet und die eigene Fahrzeugposition. Im Gegensatz zu GPRS und GPRC ist jedoch kein unmittelbares Nachbarschaftswissen notwendig. Auf zusätzlichen Signalisierungsaufwand und die explizite Verwaltung der unmittelbaren Nachbarschaften der Fahrzeuge mittels Nachbarschaftstabellen kann daher verzichtet werden. Die Entscheidungsgrundlage, welcher Netzwerkknoten letztlich eine Nachricht in Richtung Zielgebiet weiterleitet, beruht lediglich auf der Distanz, die ein wei-

terleitendes Fahrzeug in Richtung Zielgebiet überbrückt. Es wird also derjenige Knoten zur Nachrichtenweiterleitung ausgewählt, der die Distanz zum Zielgebiet am meisten verkürzt. Entscheidender Punkt ist hierbei jedoch, dass diese Entscheidung in jedem Fahrzeug unabhängig und autonom von anderen Fahrzeugen oder zusätzlichem Umgebungswissen getroffen werden kann.

Das CBF zugrunde liegende Protokoll besteht dabei wiederkehrend aus drei Phasen. Das nachrichtenerzeugende Fahrzeug sendet zu Beginn in einem Broadcast die entsprechende Nachricht einschließlich der geografischen Beschreibung des Zielgebietes und seiner eigenen Position an alle Fahrzeuge, die sich gerade innerhalb des Empfangsradius befinden. Alle Fahrzeuge, die diese Nachricht empfangen, treten nun untereinander in Wettbewerb (Contention) um die Weiterleitung. Als Gewinner soll nun dasjenige Fahrzeug ermittelt werden, das sich am nächsten zum Zielgebiet befindet. Um dies zu erreichen, wird initial jedes Fahrzeug, das die Nachricht empfangen hat, als potenziell weiterleitender Netzwerkknoten betrachtet. Entscheidend ist nun, dass die Nachricht von den Knoten nicht unmittelbar weitergeleitet wird. Stattdessen wartet jeder Knoten in Abhängigkeit seiner Entfernung zum Zielgebiet mit der Weiterleitung in der Art, dass Knoten, die sich am entferntesten zum Zielgebiet befinden, am längsten warten. Umgekehrt ist die Wartezeit derjenigen Knoten, die sich näher am Zielgebiet befinden, vergleichsweise kürzer. Derjenige Knoten, der sich am nächsten zum Zielgebiet befindet, und daher die größte Distanz dorthin überbrückt, wird so die Nachricht als erstes weiterleiten. Dies geschieht wiederum in einem Broadcast. Alle Fahrzeuge, die die Nachricht nun erneut empfangen, wissen nun implizit, dass sich ein anderer Netzwerkknoten näher am Zielgebiet befunden hat und daher besser als Weiterleiter geeignet war. Sie werden auf diese Weise unterdrückt und leiten die Nachricht nicht nochmals weiter.

Die Anpassung der Wartezeit hat offensichtlich entscheidenden Einfluss auf die Wirkweise des Verfahrens. Das Maß stellt dabei der Fortschritt P der Nachricht in Richtung des Zielgebiets dar, genauer

$$P(f, z, n) = \max \left\{ 0, \frac{\text{dist}(f, z) - \text{dist}(n, z)}{r_{\text{radio}}} \right\} \in [0, 1],$$

wobei f die Position des letzten weiterleitenden Netzwerkknotens bezeichnet, z die Zielposition, r_{radio} die durchschnittliche Kommunikationsreichweite und n die eigene aktuelle Position des potenziellen Weiterleiters. Da die Distanz zwischen Sender und Empfänger offensichtlich kleiner ist als die maximale Kommunikationsreichweite des Senders ist der resultierende Wert kleiner 1. Negative Entfernungen charakterisieren Knoten, die sich weiter vom Zielgebiet entfernt befinden als der Sender. Sie scheiden damit für den Weiterleitungsprozess aus. f und z sind dabei im Nachrichtenkopf als Meta-Informationen enthalten. Die Funktion dist berechnet die Euklidische Distanz zwischen den Positionen. Die resultierende Wartezeit t_W ergibt sich bei CBF ausgehend vom Nachrichtenfortschritt letztlich linear abfallend mit abnehmender Distanz zum Zielgebiet, also

$$t_W(P) = t_{W_{\text{max}}} \cdot (1 - P),$$

mit der maximalen Wartezeit $t_{W_{max}}$. Der Knoten, dessen Wartezeit am geringsten ist, leitet die Nachricht folglich als erster weiter. Alle anderen Knoten werden daraufhin unterdrückt und löschen ihre Wartezeähler.

Bei Verwendung von vergleichsweise kleinen Intervallgrenzen, also einem kleinen $t_{W_{max}}$, steigt aufgrund der geringeren Wartezeitdifferenzierung die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als nur ein Fahrzeug die Nachricht weiterleitet. Dies führt zu einer redundanten Nutzung der verfügbaren Kanalkapazität. Damit zusammenhängend steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Nachrichten auf der Luftschnittstelle, sofern zufällige Medienzugriffsmechanismen wie beispielsweise CSMA/CA eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.4). Ein vergleichsweise langes Warteintervall verlängert jedoch andererseits spürbar die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Nachricht und damit die Nachrichtenlatenz. In diesem Zusammenhang ist zudem von Bedeutung, dass die Kommunikationsreichweite der Fahrzeuge in Abhängigkeit atmosphärischer Einflüsse, Sichtverdeckungen, sowie von baulich bedingten individuellen Charakteristiken einzelner Fahrzeuge, starken Schwankungen unterlegen ist. Fahrzeuge mit großer Bauhöhe ermöglichen beispielsweise in der Regel größere Kommunikationsreichweiten.

Hinsichtlich der Adaption der Wartezeit bei CBF ergeben sich hieraus für die Berechnung von $t_W(P)$ die folgenden Probleme: Unter Berücksichtigung der individuell stark unterschiedlichen Kommunikationsreichweiten unterschiedlicher Fahrzeugmodelle erscheint eine individuelle Anpassung von r_{radio} ratsam. Dies führt jedoch zu dem Effekt, dass sich für zwei Fahrzeuge, die nahezu den gleichen Abstand zum Zielgebiet besitzen, offensichtlich genau für dasjenige Fahrzeug die kürzere Wartezeit ergibt, welches eine geringere Kommunikationsreichweite besitzt. Dieses Fahrzeug würde demzufolge die Nachricht weiterleiten. Entsprechend würde das andere Fahrzeug unterdrückt, obwohl dies jedoch potenziell mehr Distanz zum Zielgebiet hätte überbrücken können. Eine individuelle Anpassung von r_{radio} verzerrt also die eigentliche Grundidee des Verfahrens und erschwert eine zuverlässige Abschätzung des globalen Systemverhaltens. Zudem ist die Bestimmung von r_{radio} für jedes Fahrzeugmodell aufwendig und daher kostenintensiv.

Darüber hinaus schwankt die aktuelle Kommunikationsreichweite wie bereits erwähnt in Abhängigkeit der aktuellen Fahrzeugsituation weiterhin erheblich. Die Festlegung einer eindeutigen Maxzahl gestaltet sich daher systembedingt äußerst schwierig. Gleiches gilt für den Fall, dass r_{radio} für alle am Netzwerk teilnehmenden Fahrzeuge gleich gewählt wird. Das oben geschilderte Phänomen der gezielten kontraproduktiven Unterdrückung des Fahrzeugs mit der potenziell höheren Kommunikationsreichweite bei ähnlichem Abstand zum Zielgebiet wird hierdurch zwar vermieden. Es erfolgt jedoch auch keine explizite Bevorzugung dieses Fahrzeugs. Dies wäre jedoch, der Grundidee des Verfahrens folgend, wünschenswert. Schwerer wiegt aber das Problem der sinnvollen Festlegung von r_{radio} . Nach obiger Berechnungsvorschrift muss r_{radio} so gewählt werden, dass außerhalb der so festgeschriebenen Kommunikationsreichweite definitiv kein Fahrzeug die ausgesendete Nachricht mehr empfangen kann. Wäre dies der Fall, ergäbe sich für $t_W(P)$ ein negativer Wert. Dies führt jedoch dazu, dass unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen, ein deutlich zu großer

Wert für r_{radio} gewählt werden müsste. Dies führt aufgrund der daraus resultierenden vergleichsweise großen Werte für $t_W(P)$ weiterhin dazu, dass einerseits die Nachrichtenverbreitung durch die längeren Wartezeiten unnötiger Weise stärker verzögert wird. Andererseits verschlankt sich aufgrund der linearen Adaption dadurch auch die resultierende Verteilung von $t_W(P)$ über den möglichen Wertebereich, da kurze Wartezeiten deutlich seltener werden. Bei nicht kollisionsfreien Medienzugriffsverfahren wie beispielsweise bei CSMA kann dies letztlich auch dazu führen, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit von Nachrichtenpaketen beim Medienzugriff steigt. Negativen Werten von $t_W(P)$ kann unter Verwendung einer adaptierten Berechnungsvorschrift entgegengewirkt werden, beispielsweise durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$t_W(P) = \max \{0, t_{W,max}(1 - P)\}$$

Hierdurch kann einerseits ein verhältnismäßig großer Wert für r_{radio} vermieden werden. Andererseits ergibt sich jedoch das Problem, dass alle Fahrzeuge, die außerhalb der festgeschriebenen Kommunikationsreichweite sind, das gleiche Warteintervall besitzen. Dies führt wiederum wie bereits beschrieben zu Problemen bei der Koordination des Kanalzugriffs. Eine nicht-lineare Adaption (wie sie im Zusammenhang mit einer nutzenoptimierenden Verbreitungsstrategie in Kapitel 6 dargestellt wird) scheint vor diesem Hintergrund besser geeignet.

Eine Evaluierung von CBF in innerstädtischen Szenarien wurde im Rahmen des Projekts FleetNet erarbeitet [FW⁺04], bei dem auch eine explizite direkte Adressierung von speziellen Straßenabschnitten prinzipiell angerissen wird. Auch wenn CBF ursprünglich als Unicast oder Geocast - Protokoll entwickelt wurde, so eignet es sich, von den eben geschilderten Problemen abgesehen, prinzipiell auch zur zielgerichteten Verbreitung von Kontextinformationen. Durch entsprechende Anpassung der Berechnungsvorschrift des Nachrichtenfortschrittes kann auch eine Ausbreitung der Informationen im Umkreis des Nachrichteninitiators ermöglicht werden. Dies kann beispielsweise auf Basis des Distanzgewinns zum letzten Sender erfolgen, oder auf Basis der von den potenziell weiterleitenden Knoten zusätzlich überdeckten Empfangsfläche, wobei hierbei wiederum Fahrzeuge in speziell prädestinierten Positionen wie beispielsweise Kreuzungen explizit berücksichtigt werden können. Zusätzlich kann die Unterdrücken der Knoten dahingehend modifiziert werden, dass beispielsweise Fahrzeuge, die sich in entgegengesetzten Richtungen vom Sender befinden, sich nicht wechselseitig unterdrücken.

Ein Problem positionsbasierter Routingmechanismen ist jedoch, dass Nachrichten das Zielgebiet nicht erreichen, falls das Nachrichtenpaket in eine lokale Sackgasse geleitet wird. Dies ist im Speziellen zumeist dann der Fall, wenn die Penetrationsrate der mobilen Knoten gering ist. Auch wenn sich aus diesem Grund das Verfahren nicht unmittelbar zur Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-Hoc Netzen eignet, stellt es interessante Ansätze zur gezielten Priorisierung von Nachrichten und weiterleitenden Netzwerkknoten dar. Wesentliche Grundelemente, insbesondere die empfängerzentrische Entscheidung über das weitere Vorgehen bei der Weiterleitung, werden daher in Kapitel 6 nochmals aufgegriffen werden.

Die bisher beschriebenen Ansätze betrachten bisher lediglich die Verbreitung einer isolierten Nachricht im Netzwerk. Sie tragen daher nicht der Anforderung Rechnung, dass Nachrichten in Abhängigkeit der konkreten Situation explizit priorisiert werden müssen. Zudem stellt keines der Verfahren Mechanismen bereit, eine Nachricht innerhalb eines bestimmten Gebiets auch bei geringer Netzwerkdichte und damit einhergehend häufigen Verbindungsunterbrechungen durch gezielte Wiederholungen aufrecht zu erhalten.

4.5.2 Broadcast Verfahren

Da es für Informationen bezüglich der aktuellen Fahrsituation eine Vielzahl an potenziell interessierten Adressaten gibt, scheinen auf den ersten Blick Broadcast-Verfahren zur Bereitstellung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen besser geeignet als klassische Unicast Routingverfahren. In mobilen Ad-hoc Netzen steht keine Infrastruktur zur Verfügung, mit denen größere Distanzen überbrückt und gleichzeitig viele Netzwerkteilnehmer erreicht werden können. Daher müssen Informationen, die an viele oder alle Teilnehmer eines Netzes übermittelt werden sollen, ausgehend vom Nachrichtenerzeuger über die Netzwerkknotten sukzessive weiter verbreitet werden (Multi-Hop). Kernproblem von Broadcasts in mobilen Ad-hoc Netzen ist daher, während der Verbreitungsphase mit der verfügbaren Bandbreite so Betriebsmittel schonend als möglich umzugehen und dabei gleichzeitig eine zuverlässige Nachrichtenverbreitung zu gewährleisten. Dabei ist in klassischen mobilen Ad-hoc Netzen die zur Übertragung von Nachrichten notwendige Energie ebenfalls ein knappes Betriebsmittel, welches optimal genutzt werden sollte. In der Domäne von Sensornetzen rückt zumeist ausschließlich der nötige Energieverbrauch in den Vordergrund.

Aus diesem Grund existieren im Umfeld mobiler Ad-hoc Netze zwei Optimierungsstrategien, einerseits hinsichtlich minimaler Kanalnutzung und andererseits hinsichtlich minimalen Energieverbrauchs. Letzteres spielt bei automobilen Ad-hoc Netzen insgesamt eine untergeordnete Rolle, da ausreichend Energie zur Verfügung steht. Vorrangiges Ziel ist folglich eine minimale Belastung der Luftschnittstelle. Dies kann prinzipiell auf drei unterschiedliche Art und Weisen erreicht werden. Zum einen kann die Sendeleistung ständig adaptiert werden, in der Art, dass möglichst wenig Interferenz zwischen den Netzteilnehmern auftritt. Zum anderen kann die Zahl der zur Verbreitung notwendigen Weiterleitungsvorgänge minimiert werden. Beide Ansätze sind im Wesentlichen konkurrierend, da eine aufgrund einer geringeren Sendeleistung reduzierte Empfängerzahl die Zahl der notwendigen Nachrichtenwiederholungen erhöht. Zuletzt kann zudem versucht werden, den Kanalzugriff dahingehend zu optimieren, dass der effektive Kanaldurchsatz möglichst nahe am theoretischen Optimum bleibt.

Einfaches Fluten des Netzwerkes [LK01], also die indifferente Weiterleitung einer Nachricht durch jeden Netzwerkknotten unmittelbar nach deren Empfang, führt offensichtlich vor allem in dichten Netzwerken mit einer großen Anzahl an Nachbarn in sehr kurzer Zeit zu einer großen Zahl an redundanten Wiederholungen, und in Folge zu einer punktuell sehr hohen Netzlast (*Broadcast Storm Problem*[TNCS99]). Zusätzlich zur hohen Zahl an unnötigen Nachrichtenwiederholungen ergibt sich gerade bei CSMA-basierten Medienzugriffsverfahren durch die große Zahl an Kanalzugriffen und damit zusammenhängend einer größeren Wahrscheinlichkeit an Paketkollisionen unmittelbar eine weitere Reduktion des Kanaldurchsatzes [TNCS99]. Zudem erhöht jede

redundante Wiederholung insgesamt die Wartezeit vor dem Kanalzugriff. Reines Fluten sieht darüber hinaus keine Möglichkeit vor, eine Nachrichtenzustellung auch bei nicht durchgängig vernetzten Szenarien zu gewährleisten.

Aus diesem Grunde wurden in den letzten Jahren im Zusammenhang mit mobilen Ad-hoc Netzen eine Reihe von Optimierungsstrategien entwickelt, die sich in die folgenden Klassen einteilen lassen [TNC99]:

Probabilistisch. Jeder Netzwerkknoten leitet eine Nachricht nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit weiter. Die Zahl der Wiederholungen sinkt hierdurch in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit. Gleiches gilt aus diesem Grund auch für die Zuverlässigkeit der Nachrichtenzustellung.

Zählerbasiert. Netzwerkknoten leiten nur dann eine Nachricht weiter, wenn sie ein und dieselbe Nachricht selbst nicht schon zu oft erhalten haben.

Distanzbasiert. Netzwerkknoten leiten nur dann eine Nachricht weiter, wenn sie eine Mindestdistanz vom Sender entfernt sind. Auch dies senkt offensichtlich die Zahl der redundanten Wiederholungen. In dünn bevölkerten Netzen kann dies jedoch unter Umständen dazu führen, dass sich die Nachricht nicht vollständig verbreiten kann. Sofern keine gleichzeitige Anpassung der Sendeleistung vorgenommen wird, kann ein ähnliches Verhalten auch durch Berücksichtigung der empfangenen Signalstärke erreicht werden. Dabei leiten Knoten eine Nachricht nur dann weiter, wenn die empfangene Signalstärke des Senders unter einem bestimmten Schwellwert liegt.

Positionsbasiert. Die Entscheidung über eine Weiterleitung basiert auf der durch eine Übertragung zusätzlich überdeckten Verbreitungsfläche. Dabei leiten nur diejenigen Netzwerkknoten eine Nachricht weiter, deren zusätzliche Fläche einen bestimmten Schwellwert überschreitet.

Clusterbasiert. Hierbei bilden die Netzwerkknoten Cluster. Ein von den Teilnehmern eines Clusters bestimmter Knoten übernimmt die Aufgabe der Nachrichtenweiterleitung.

Im folgenden sollen einige optimierte Broadcast-Verfahren genauer vorgestellt werden. Im Zusammenhang mit probabilistischen Protokollen (siehe beispielsweise [LHH02]), enthält *Autonomous Gossiping* [DQA04] einen für die Informationsverbreitung in automobilen Ad-hoc Netzen interessanten Aspekt. Kernidee des Verfahrens ist, dass die Netzwerkknoten ihren Nachbarn profilbasiert mitteilen, an welcher Art Informationen sie momentan interessiert sind. Die Netzwerkknoten können sich auf Basis der verteilten individuellen Profile gezielt diejenigen Informationen zuspüren, an denen aktuell Interesse besteht. Der Ansatz ähnelt damit dem von Buchholz et al. vorgestellten Verfahren zur profilbasierten Verbreitung von Kontextinformationen in mobilen Ad-hoc Netzen [BHT04]. Diese Vorgehensweise ist insbesondere dann von Vorteil, wenn eine große Zahl an unterschiedlichen Interessensgebieten existiert. Die Informationsweitergabe kann so zielgerichtet optimiert werden. Im Rahmen der Verteilung von Informationen bezüglich des aktuellen Fahrkontextes in automobilen Ad-hoc Netzen muss diesbezüglich jedoch bedacht werden, dass sich die Interessensgebiete der beteiligten Fahrzeuge stark überschneiden. Anders ausgedrückt sind für Fahrzeuge im Wesentlichen die gleichen

Sachverhalte von Interesse. Zusätzlich berücksichtigt der Ansatz die Notwendigkeit einer differenzierten Priorisierung unterschiedlicher Informationsartefakte nicht. Darüber hinaus erschwert die öffentliche Verbreitung persönlicher Interessensprofile den Schutz der Privatsphäre der Nutzer.

Eine weitere interessante Optimierung probabilistischer Broadcast-Verfahren beschreiben Scott und Yasinsac [SY04]. Wiederum verbreiten Netzwerkknoten eine Nachricht mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, wobei diese Wahrscheinlichkeit dynamisch an die aktuelle Netzlast angepasst wird. Bei aktuell hohem Datenaufkommen auf dem Kommunikationskanal vermindert sich entsprechend die Weiterleitungswahrscheinlichkeit und reduziert damit in der Folge die Netzlast. Hinsichtlich der aktuellen Netzlast ist das Verfahren also explizit situationsadaptiv.

Anders als wahrscheinlichkeitsbasierte Optimierungsstrategien einfacher Broadcast-Verfahren, reduzieren positionsbasierte Verfahren die erforderliche Zahl an redundanten Nachrichten durch Berücksichtigung der aktuellen Positionen der mobilen Netzwerkknoten. Positions-basierte Verfahren ermöglichen so eine vergleichsweise schnelle Anpassung an sich verändernde Netzwerktopologien. Sie eignen sich daher prinzipiell gut für den Einsatz in automobilen Ad-hoc Netzen. Der in [SFL01] beschriebene *location-aided broadcast* minimiert beispielsweise die Anzahl redundanter Nachrichtenwiederholungen unter Berücksichtigung des Zugewinns des Verbreitungsgebietes. Ähnlich wie beim Contention-Based Forwarding basiert das Verfahren auf einer impliziten Koordination der empfangenen Knoten mittels einer positionsbasierten individuellen Wartezeit vor der Nachrichtenweiterleitung. Zum einen leiten Netzwerkknoten eine Nachricht nur dann weiter, wenn das Verbreitungsgebiet der Nachricht dadurch erhöht wird. Falls dies der Fall ist, so richtet sich die individuelle Wartezeit nach der Größenordnung des Flächenzugewinns. Für diejenigen Netzwerkknoten, die das aktuelle Verbreitungsgebiet am deutlichsten vergrößern, ergeben sich entsprechend wiederum die kürzesten Wartezeiten.

4.5.3 Informationsverbreitung

Über die gerade beschriebenen Verfahren zu Routing und Broadcasting hinaus wurde in den letzten Jahren zudem eine Vielzahl von Ansätzen erarbeitet, die sich speziell mit der lokalen Ausbreitung von Informationen in automobilen Ad-hoc Netzen beschäftigen. Sofern nicht schon in den vorherigen Abschnitten vorgestellt, sollen die wesentlichen Verfahren im Folgenden beschrieben werden. Dabei existieren neben generischen Ansätzen, die die Ausbreitung unabhängig vom Nachrichteninhalte untersuchen, auch eine Reihe von Verfahren mit dediziertem Fokus auf spezialisierte Anwendungsdomänen.

Das *Urban Multi-hop Broadcast Protocol (UMB)* [KEzz04] stellt einen generischen Ansatz zur Informationsverbreitung auf Basis von IEEE 802.11 (WLAN) speziell im Hinblick auf innerstädtische Szenarien dar. Wiederum werden auf Basis von Nachbarschaftswissen diejenigen Fahrzeuge zur Nachrichtenweiterleitung herangezogen, die sich aktuell am weitesten von Sender entfernt befinden (directional broadcast). Der Koordinationsprozess erfolgt dabei nicht implizit über individuelle distanzabhängige Wartezeiten, sondern wird explizit über ein Handschlagprotokoll zwischen den Netzwerkknoten koordiniert. Zur Verringerung der Kollisionswahrscheinlichkeit von Nachrichtepaketen beim Medienzugriff wird zudem der Kanalzugriff über Sendewunschanzeigen signalisiert. Dies führt letztlich zu einer Abmilderung des Hidden Terminal Problems. Zur

Erhöhung der Zuverlässigkeit werden darüber hinaus spezielle Empfangsbestätigungen verschickt. Analog zu den Überlegungen, dass Fahrzeuge in Kreuzungspositionen aufgrund geringerer Sichtverdeckungen zur Weiterleitung besonders prädestiniert sind, schlägt UMB zudem vor, Infrastrukturknoten an Kreuzungen für die Nachrichtenverbreitung mit einzubeziehen. Einerseits bietet das Verfahren speziell im Hinblick der Reduktion von Paketkollisionen beim Medienzugriff Vorteile. Andererseits erhöht das hierzu notwendige Koordinationsverfahren zwischen den Fahrzeugen die Nachrichtenlaufzeiten, was insbesondere in kritischen Fahrsituationen von entscheidendem Nachteil ist.

Das in [XSJ03] vorgestellte Verfahren *Vehicle-to-vehicle location-based broadcast (LBB)* beschäftigt sich speziell mit der Verbreitung von Gefahrenmeldungen in Autobahnscenarien. Nachrichten werden bei der Erzeugung Nachrichtenlebensdauern zugeordnet, während dieser die Nachrichten gültig sind und verbreitet werden. Die Verbreitung beschränkt sich anders als bei den bisher vorgestellten Verfahren nicht auf die einmalige Propagation einer Nachricht durch das aktuell verbundene Netzwerk. Um eine ausreichende und effektive Verbreitung während der angegebenen Nachrichtenlebensdauer zu gewährleisten, wiederholen alle Netzwerkknoten, die die Nachricht bereits erhalten haben, die Nachricht in zufälligen Zeitabständen. LBB widmet sich also dem Problem der Nachrichtenwiederholstrategie, die speziell in gering vermaschten Netzen erforderlich ist. Ein zufälliger Wiederholzeitpunkt, wie er in LBB vorgeschlagen wird, stellt einen einfachen und einfach zu implementierenden Ansatz dar, jedoch trägt er den spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Situationen nicht Rechnung. Gleiches gilt für die statische Festlegung einer Nachrichtenlebensdauer zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung. Vor dem Hintergrund sich in der Regel kaum vorhersagbar verändernder Umweltparameter ist jedoch eine Festlegung der Nachrichtenlebensdauer zu diesem Zeitpunkt lediglich ein einfacher, jedoch nicht effizienter Ansatz.

Eine Verfeinerung (obwohl schon drei Jahre zuvor publiziert) bietet hier der in [BH00] beschriebene *Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks*. Kernidee des diesbezüglich auf dem *Location Based Multicast (LBM)* [KV98c] aufbauenden Verfahrens ist, dass Nachrichten genau dann wiederholt werden sollten, wenn sich ein bisher unbekanntes Fahrzeug innerhalb der Kommunikationsreichweite befindet. Hierfür muss eine erweiterte Nachbarschaftstabelle in jedem Fahrzeug verwaltet werden, welche es nicht nur erlaubt, die Identifikationen der aktuellen Nachbarn zu verwalten. Stattdessen muss über einen gewissen Zeitraum zusätzlich historisches Wissen über die Nachbarschaft vorgehalten werden. Es müssen auch diejenigen Fahrzeuge weiterhin in der Nachbarschaftstabelle gespeichert bleiben, die in diesem Zeitraum innerhalb der Kommunikationsreichweite eines Fahrzeugs waren. Idealerweise wird zu jedem der bekannten Fahrzeugidentifikatoren also zusätzlich eine Liste derjenigen Nachrichtenidentifikatoren gespeichert, die an dieses Fahrzeug bisher geschickt wurden. Wenn ein Fahrzeug eine Nachricht empfängt, und sich noch weitere Fahrzeuge in der Nachbarschaftstabelle befinden, so wird ähnlich wie bei Contention Based Forwarding in Abhängigkeit des Abstandes der Fahrzeuge eine individuelle Wartezeit für die Weiterleitung bestimmt. Verfügt das Fahrzeug aktuell jedoch über keine weiteren Nachbarn mehr, so wird die Nachricht von diesem Fahrzeug generell nicht mehr weitergeleitet, bis ein zusätzlicher Nachbar in Kommunikationsreichweite kommt. Durch die Auswertung expliziten Nachbarschaftswissens können so in der Regel unnötige Wiederholungen vermieden und Kanalkapazität eingespart werden. Andererseits verursacht

wiederum die Notwendigkeit, dieses Nachbarschaftswissen ständig aktuell zu halten, im Gegensatz zu LBB und CBF zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Zudem erschwert der notwendige Einsatz von Fahrzeugidentifikationen den Schutz der Privatsphäre der Nutzer, bzw. gegebenenfalls den Wechsel von Pseudonymen.

Der in [MFE03] vorgestellte *Stored Geocast* beschreibt neben einer infrastrukturbasierten Variante auch zwei Verfahren zur Informationsverbreitung, die keine Infrastrukturunterstützung benötigen und deshalb hier im Vordergrund stehen sollen. Der *Stored Geocast* ist eine Erweiterung des ursprünglich in [KV98a, KV98c] vorgestellten *Geocasts*, um eine Nachricht an alle Knoten innerhalb eines zuvor definierten geografischen Gebietes zu verbreiten, der sogenannten *Multicast Region*. Die sich in dieser Region befindenden Netzwerkteilnehmer werden entsprechend dieser Terminologie als *Multicast Group* bezeichnet. Dabei steht beim *Stored Geocast* die Nachrichtenverbreitung in dünnvermaschten Netzen im Vordergrund. Nachrichten werden hierzu wiederum von den Netzwerkknoten zwischengespeichert und physisch mitbewegt. Um dieses *Store-and-Forward* zu realisieren (siehe Abschnitt 2.4) sieht der *Stored Geocast* einerseits vor, explizit ein Fahrzeug über einen lokalen Abstimmungsprozess zwischen den Fahrzeugen mit der Aufgabe zu versehen, die Nachricht zu speichern und periodisch wieder auszusenden. Andererseits werden unter Verwendung von Nachbarschaftswissen gezielt Nachrichten an diejenigen Fahrzeuge übermittelt, die während der Verbreitungsphase zusätzlich die *Multicast Region* betreten. Der *Stored Geocast* ist hauptsächlich fokussiert auf die Fragestellung des *Store and Forward* in dünnvermaschten Netzen. Die eingesetzten statischen Nachrichtenwiederholintervalle tragen jedoch der hohen Netzwerkdynamik nur bedingt Rechnung. Zudem erhöht die Einschränkung der Nachrichtenwiederholung auf ein verantwortliches Fahrzeug (oder eventuell auch mehrere) das Risiko, dass eine Nachricht verloren gehen kann.

Einen ähnlichen Fokus hat auch der von Wu et al. [WFGH04] vorgestellte *Mobility-centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks (MDDV)*. Nachrichten werden hierbei entlang einer vordefinierten Trajektorie auf den Straßenabschnitten weitergeleitet. Zudem sieht *MDDV* eine Reduzierung redundanter Übertragungen unter Berücksichtigung weiteren Kontextwissens vor, wie beispielsweise der aktuellen Netzwerkdichte bzw. Wissen hinsichtlich des bereits erfolgten Verbreitungsprozesses. Ähnlich dem *Autonomous Gossiping* [DQA04] sieht auch *MDDV* vor, eine Nachrichtenübertragung nur dann vorzunehmen, falls der potenzielle Kommunikationspartner Interesse signalisiert. Dazu wird optional ein der Übertragung vorgestellter Handschlag durchgeführt. Wiederum wird jedoch lediglich der Weiterleitungsprozess einer isolierten Nachricht in einem zuvor statisch festgelegten Verbreitungsgebiet betrachtet.

Das *Bidirectional perimeter-based propagation protocol (BiPP)* [SGM04] stellt die Fragestellung in den Vordergrund, wie eine Nachricht über den notwendigen Zeitraum in einem festgelegten Verbreitungsgebiet trotz Konnektivitätslücken und Fahrzeugbewegungen aufrecht erhalten werden kann. Speziell fahrsicherheitsrelevante Informationen stehen dabei besonders im Fokus der Betrachtungen. Ziel ist es, Fahrzeuge vor Eintreten in einen bei Nachrichtenerzeugung definierten Bereich (*Safety Radius*) mit der entsprechenden Nachricht zu versorgen, wobei eine Nachrichtenübertragung nur innerhalb eines ebenfalls bei Nachrichtenerzeugung definierten (größeren) Bereichs erfolgt (*Operating Radius*). Der *Operating Radius* entspricht dabei im Wesentlichen der Mul-

ticast Region² des Stored Geocast. Die Nachrichtenübertragung in diesem Bereich wird durch die Vergabe von sogenannten *Perimeter Token* koordiniert. Diejenigen Fahrzeuge, die aktuell ein solches Token besitzen, übertragen periodisch die Nachricht. Offensichtlich ist der Vergabeprozess der Token ausschlaggebend für das Verhalten der Nachrichtenverbreitung. In [SGM04] ist hierzu lediglich der einfache Fall entlang einer Straße beschrieben, wobei jeweils genau die beiden Fahrzeuge ein Token besitzen, die sich entlang des Straßenverlaufes in entgegengesetzter Richtung am weitesten vom Ursprung entfernt befinden. Das Token wird so sukzessive in beide Richtungen des Straßenverlaufs vom Ursprung wegbewegt. Entgegen der Auffassung der Autoren, dass das Verfahren analog für beliebige Straßengeometrien sicherstellt, dass alle Fahrzeuge innerhalb der konvexen Hülle der Menge von Token die Nachricht erhalten haben, garantiert das Verfahren unter Berücksichtigung von Kreuzungssituationen und Konnektivitätslücken keineswegs eine umfassende Nachrichtenzustellung. Zudem erfordert das Verfahren wiederum eine statische Definition des Verbreitungsgebietes zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung und zusätzlichen Kommunikationsaufwand zur koordinierten Weitergabe des Tokens.

Message dissemination among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication [BSH00] schlägt einen Ansatz zur Informationsverbreitung in automobilen Ad-hoc Netzen vor, aufbauend auf dem Medienzugriffsverfahren von 802.11 [IEE99a] und dem in [KV98a] beschriebenen Location Based Multicast. Analog der Terminologie des Stored Geocast basiert das Verfahren wiederum auf der Festlegung einer Multicast Region, in der eine Nachricht an die sich dort befindenden Fahrzeuge zugestellt werden soll. Ähnlich dem Safety Radius aus BiPP beschreibt ein sogenanntes Relevanzgebiet (Zone of Relevance) wiederum zudem das Gebiet, in dem der Nachrichteninhalte für den Fahrer potenziell von Interesse ist. Fahrzeuge, die sich innerhalb dieses Gebietes befinden informieren den Fahrer über den Nachrichteninhalte. Zur Reduktion des Kommunikationsaufwandes wird ähnlich dem in CBF vorgeschlagenem Ansatz der Medienzugriff adaptiert. Die Ausbreitung wird zusätzlich durch eine maximale Anzahl an Weiterleitungsvorgängen limitiert (Maximal Hop Count). Entscheidender Nachteil ist wieder die statische Festlegung von Kommunikations- und Interessengebieten, sowie die statische Begrenzung der Weiterleitungsvorgänge, die der Netzwerk- und Situationsdynamik in automobilen Ad-hoc Netzen nicht gerecht wird.

Kernidee des in [AH05] vorgestellten *Adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication* ist die Reduktion der erforderlichen redundanten Nachrichtenübertragungen auf Basis einer adaptiven individuellen Weiterleitungswahrscheinlichkeit. Diese basiert auf der Anzahl der möglichen erfolgreichen Nachrichtenübermittlung innerhalb eines definierten Gebietes um eine spezifische Gefahrenstelle, wobei hierzu auf topologisches Nachbarschaftswissen der Nachbarn zurückgegriffen wird. Einerseits kann so die Anzahl der erforderlichen Übertragungen deutlich reduziert werden, andererseits ist zur ständigen Aktualisierung des Nachbarschaftswissens wiederum zusätzlicher Kommunikationsaufwand erforderlich. Entscheidend ist jedoch, dass wiederum lediglich isolierte Nachrichten betrachtet werden und keine gezielte Priorisierung verschiedener Nachrichten möglich ist.

Optimized dissemination of alarm messages in vehicular ad hoc networks (ODAM) [Ben04] basiert auf der expliziten Einschränkung der Weiterleitungsaufgabe fahrrele-

²Oft auch als *Dissemination Area* oder *Target Area* bezeichnet.

vanter Nachrichten auf eine spezielle Gruppe von Fahrzeugen. Nachrichten werden wiederum nur innerhalb eines festgelegten Gebiets übertragen, welches hier als Risikozone (Risk zone) bezeichnet wird. Das Verfahren fokussiert dabei die Verbreitung von fahrsicherheitskritischen Meldungen wie beispielsweise Notbremswarnungen. Nachrichten werden auf Basis des Contention Based Forwarding weitergeleitet. Der Nachrichteneinitiator wiederholt zudem in Abhängigkeit der Gefahrenklasse, der Sendereichweite und des maximalen Bremsweges die entsprechende Nachricht. Dies erhöht einerseits die Präsenz einer Nachricht innerhalb der Risikozone, setzt aber andererseits voraus, dass sich der Nachrichteneinitiator lange genug in der Risikozone aufhält. Der Ansatz ist daher zu eingeschränkt auf spezielle Anwendungsfelder, beispielsweise ein defektes Fahrzeug auf dem Pannestreifen. Großflächige Ereignisse wie wetterbedingte Behinderungen oder Informationen mit einem größeren Interessensgebiet wie beispielsweise Straßenzustandsinformationen lassen sich nicht effizient abbilden.

Auto-sensing and distribution of traffic information in vehicular ad hoc networks [TPAD04] beschreibt ein Verfahren zur Informationsverbreitung von Verkehrsinformationen. Kernidee ist die Überlegung, dass Verkehrsinformationen im lokalen Umfeld ihrer Erzeugung für andere Fahrzeuge am relevantesten sind und dass eine entsprechende Nachricht folglich genau an diejenigen Fahrzeuge übermittelt werden soll, die sich auf dieses lokale Umfeld zubewegen. Die Fahrzeuge werden in lokalen Clustern organisiert, die Nachrichtenausbreitung innerhalb des Clusters erfolgt im Wesentlichen in Anlehnung an das im Rahmen von Sensornetzwerken vorgestellte *Direct Diffusion* [IGE00]. Das erforderliche Nachbarschaftswissen wird wiederum mittels periodischer Beacons fortwährend aktualisiert. Analog zu [IGE00] versenden Fahrzeuge dabei Aufgabenbeschreibungen an ihre Nachbarn. Diese sammeln daraufhin die zur Beantwortung der Aufgabe nötigen Informationen und übermitteln sie zurück zum Anfragsteller. Zur Informationsverbreitung werden aufbauend auf der eben skizzierten Überlegung jedoch lediglich diejenigen Fahrzeuge herangezogen, die sich auf das Gebiet zubewegen, in dem die Information potenziell von Interesse ist. Dies reduziert einerseits die erforderliche Kommunikationsbandbreite. Andererseits verlangsamt es aber den Ausbreitungsprozess, da beispielsweise der Gegenverkehr nicht mit in den Verbreitungsprozess einbezogen wird. Zudem verringert sich so die Wahrscheinlichkeit, dass auch in dünnvermaschten Netzen die Nachricht ausreichend weit verbreitet wird und ausreichend lange zirkuliert.

Auch das im Rahmen des FleetNet Projektes [FHB01] entwickelte *Self-organizing Traffic Information System (SOTIS)* [WER⁺03] wurde konzipiert zur Erfassung und Verteilung von hochaktuellen Verkehrsinformationen. Die hierzu notwendigen Informationen wie beispielsweise die aktuelle Position und Geschwindigkeit eines Fahrzeugs werden von diesen per Broadcast kommuniziert. Das vorgestellte Verfahren beschreibt dabei vor allem die Anwendungssicht. Fahrzeuge vergleichen hierbei den Inhalt empfangener Nachrichten mit den bereits lokal vorhandenen Informationen und aktualisieren und ergänzen so fortlaufend den eigenen Datenbestand, wobei dieser mit digitalem Kartenmaterial geografisch verbunden ist. Eine spezifische Adressierung von Netzwerkknoten basiert auf den in FleetNet beschriebenen Überlegungen [LHT⁺03], wobei die aktuelle Position des Adressaten gegebenenfalls über einen Location Lookup Service abgefragt werden kann. SOTIS beschreibt darüber hinaus auch die Verbreitung von Informationen innerhalb eines zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung festgelegten Verbreitungsgebietes mittels *Geo-Broadcast*. Dabei läuft die Verbreitung in zwei Phasen

ab. In der ersten Phase wird die Information in das festgelegte Zielgebiet weitergeleitet (line forwarding). Dies entspricht also im Wesentlichen einem geografischen Routing, wie es im vorvorhergehenden Abschnitt vorgestellt wurde. In der zweiten Phase wird die Nachricht innerhalb dieses Zielgebietes an die sich dort befindenden Fahrzeuge verteilt (area forwarding), was im Wesentlichen den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Broadcast-Mechanismen entspricht. Die Zielgebiete können dabei unterschiedliche geometrische Formen besitzen, also beispielsweise rechteckig, kreis- oder trapezförmig sein.

Das in [WER05] vorgestellte *Segment-oriented data abstraction and dissemination (SODAD)* beleuchtet aufbauend auf den Betrachtungen in SOTIS [WER⁺03] zudem die skalierbare Informationsverbreitung in hochmobilen Fahrzeugnetzen. Dabei wird die individuelle Nachrichtenübertragungsrates jedes Fahrzeugs adaptiv an die aktuelle Ausprägung zweier grundlegender Umgebungsvariablen angepasst. Sogenannte *Provocations* reduzieren die Zeitspanne, bis eine neue Übertragung stattfinden kann. Sogenannte *Mollifications* erhöhen demgegenüber diese Zeitspanne. Die Tabelle in Abbildung 4.11 zeigt die exemplarisch die Intention hinter einigen Provocations und Mollifications. Die

Examples for Provocations

Event	Intention
Reception of information being out-of-date	Transmitting vehicle needs updated information
Reception of packet with significantly different new information	Favor propagation of changes
Reception of information from vehicle with large distance	Favor large hops in propagation
Indication (e.g. by lower layers) of excessive bandwidth	Decrease delay of information propagation

Examples for Mollifications

Event	Intention
Reception of similar/more up-to-date information from nearby	Avoid redundant transmissions
Indication that number of received reports exceeds threshold	Limit maximum used bandwidth

Abbildung 4.11: Beispiele für die Intention hinter einigen Provocations und Mollifications nach [WER05]

dynamische Anpassung der Übertragungsintervalle verringert dabei die Netzlast und trägt so dazu bei, das Netzwerk nicht übermäßig stark zu belasten. SODAD vereint dabei einige interessante Aspekte bei der Übertragung von verkehrsbezogenen Kontextinformationen, jedoch ist die anwendungszentrische Adaption nicht generisch auf beliebige Kontextinformationen übertragbar.

In *Utility-based packet forwarding and congestion control (UBPFCC)* [WR05] beschreiben Wischhoff, Rohling und Ebner weiter ein Verfahren, bei dem die verfügbare Kanalkapazität zwischen den Netzteilnehmern anhand des mittleren Nutzens der Nachrichtenpakete jedes Teilnehmers aufgeteilt wird. Jedes Fahrzeug ermittelt hierzu anhand einer Nutzenfunktion den Nutzen der zu übertragenden Nachrichtenpakete. Netzteilnehmer bekommen jeweils in Abhängigkeit ihres mittleren Paketnutzens Kanalkapazität zugeteilt. Je höher dabei der mittlere Paketnutzen eines Teilnehmers ist, desto größer ist auch der ihm zur Verfügung gestellte Teil der gemeinsam genutzten Kanalkapazität. Reicht die vorhandene Kanalkapazität nicht aus, um alle Übertragungswünsche der Teilnehmer zu erfüllen, so werden Pakete mit geringem Nutzen verworfen.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren betrachten Wischhof et al. den Verbreitungsprozess nicht anhand einzelner isolierter Nachrichten, sondern verfolgen einen umfassenderen Ansatz, bei dem eine Vielzahl an Nachrichten pro Fahrzeug übertragen und koordiniert werden muss. Wischhof et al. beschränken ihre Betrachtung jedoch explizit auf die Verbreitung von Verkehrsinformationen. Die Zuteilung eines bestimmten Teils der gemeinsam genutzten Kanalkapazität ermöglicht es jedoch nicht, dringende fahrsicherheitsrelevante Informationen gezielt zu priorisieren, um so deren resultierenden Latenzzeiten zu minimieren. Zudem werden keine weiteren Angaben hinsichtlich einer generischen Berechnung des Paketz Nutzens für andere Anwendungsklassen beschrieben. Die Nutzenbewertung ist überdies hinaus statisch, d.h. sie trägt den sich ständig verändernden Umweltbedingungen nicht Rechnung. Das Verfahren stellt aber trotzdem einen sehr interessanten Ansatz dar, da sich die Auslastung des Kanals an einem Nutzenschema orientiert, also diejenigen Fahrzeuge mehr Kanalkapazität zugeteilt bekommen, die im Mittel der Allgemeinheit mehr Nutzen bringt.

Ähnlich wie UBPFCC weist auch *Utility-fair broadcast in vehicular ad hoc networks* [LMFH05a] den Netzwerknoten individuelle Datenraten zu, basierend auf dem durchschnittlichen Nutzen der zu übertragenden Nachrichtenpakete. Jedes Fahrzeug berechnet hierzu den Nutzen pro Byte jedes Paketes im Nachrichtenausgang, wobei sich die Bestimmung dieses Nutzens an dem erwarteten Nutzen für die unmittelbaren Nachbarn orientiert. Dasjenige Paket, das den größten Quotienten zwischen den über die Nachbarn akkumulierten Nutzenwert und der Paketgröße darstellt, bestimmt letztlich die Zuweisung der individuellen Datenrate für das Fahrzeug. Der Ansatz bildet aufgrund der expliziten Nutzenbewertung ähnlich wie UBPFCC eine gute Basis für die Verbreitung von Kontextinformationen in Ad-hoc Fahrzeugnetzen, birgt aber letztlich ähnliche Probleme.

Aufbauend auf einer expliziten Nutzenbewertung optimiert der von Kosch in [Kos05b] beschriebene situationsadaptive Kommunikationsmechanismus in automobilen Ad-hoc Netzen in einer wesentlich umfassenderen Betrachtung die Ausnutzung der verfügbaren Kanalkapazität. Auf Basis einer generischen Klassifizierung nach Schulz [Sch76], der als beeinflussende Faktoren für die individuelle Wertigkeit einer Information Nähe, Dynamik und individuelle Identifikation benennt, stellt Kosch im Zusammenhang mit der Informationsverbreitung in automobilen Ad-hoc Netzen zwei Dimensionen der Abhängigkeit des subjektiven Wertes eines Informationsartefaktes für einen Autofahrer heraus - die subjektiven individuellen persönlichen Interessen des Fahrers einerseits, und andererseits die Situation, in der sich dieser gerade befindet. Der Begriff des Nutzens beschreibt bei Kosch letztlich den Grad des Interesses an einer erhaltenen Information in einer spezifischen Situation. Er geht dabei über die oftmals verwandte Semantik des Nutzenbegriffs hinaus, der den Nutzen einer Information auf der Grundlage der durch die Information beeinflussten Handlungsentscheidung bewertet. Die spezielle Nutzenart bestimmt dabei folgerichtig das Kommunikationsparadigma. Individuelle und daher stark divergente Interessen der Fahrer führen dabei zu einem anfragebasierten Kommunikationsparadigma (pull). Eine proaktive Verbreitung von Informationen ist hier nicht sinnvoll, da der Großteil der kommunizierten Informationen nicht von allgemeinem Interesse ist. Diese stellen demgegenüber einen sozialen Nutzen dar. Ändert sich dieser Nutzen kaum oder nur langsam, favorisiert Kosch hierfür einen nachbarschaftsbasierten Austausch von Informationen, wobei im Gegensatz zu sich schnell verändernden Informationen keine aktive Verbreitung notwendig ist (Nachrichtenbasierte Kommuni-

kation), sondern Daten lediglich lokal ausgetauscht werden. Abbildung 4.12 veranschaulicht die Unterteilung nochmals grafisch [Kos05b]. Die hinsichtlich der effektiven und

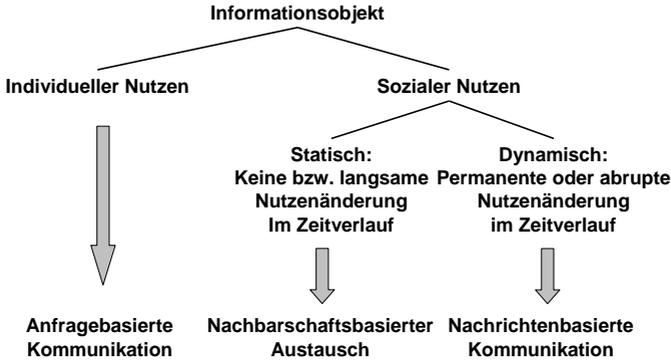


Abbildung 4.12: Kommunikationsarten in Abhängigkeit der Nutzeigenschaften nach Kosch [Kos05b]

aktiven Unterstützung der Fahraufgabe notwendigen Kontextinformationen sind jedoch von allgemeinem Interesse und ändern sich dynamisch. Aus diesem Grund soll die nachrichtenbasierte Kommunikation im Folgenden im Vordergrund stehen. Nach Kosch soll eine Nachricht genau dann erzeugt und anschließend versandt werden, wenn sich dadurch das Bild der Umwelt eines Fahrzeugs stark verändert hat. Unter der Annahme, dass sich die Einschätzung der Umwelt von sich in der Nähe befindenden Fahrzeugen nur geringfügig unterscheidet, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass durch Versand der Nachricht auch die Umweteinschätzung der empfangenen Fahrzeuge positiv beeinflusst wird und damit nützlich ist. Die Nachrichtenverbreitung basiert auf einem adaptiven Geocast ohne explizites Verbreitungsgebiet. Stattdessen wird eine Nachricht so lang weitergeleitet, bis die Fahrzeuge in der Nachbarschaft kein bzw. lediglich geringes Interesse an der Nachricht besitzen. Kosch klassifiziert zudem möglichen Nutzenfunktionen (siehe Abbildung 4.13). Dabei wird deutlich, dass mit der Fahraufgabe korrelierte Kon-

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

Abbildung 4.13: Informationsobjektkorrelation nach Kosch [Kos05b]

textinformationen eine situationsbezogene Nutzenbewertung erfordern. Leider wird in

[Kos05b] die Berechnung des situationsbezogenen Nutzens über die generische Abhängigkeit des Informationsalters und der Entfernung zum Informationsursprung hinaus sehr allgemein beschrieben. Es wird jedoch richtig dargelegt, dass eine Information, falls diese die Handlungsentscheidung beeinflusst, die adressierten Empfänger rechtzeitig erreichen muss. Die Rechtzeitigkeit bezieht sich dabei auf den letztmöglichen Entscheidungszeitpunkt zwischen den möglichen Handlungsalternativen. Andernfalls hat die Nachricht für den Empfänger keinen Nutzen mehr. Die Initiierung und Verbreitung einer Nachricht passt sich umfangreich und adaptiv an die aktuell vorherrschende Situation an. Ein explizites Verbreitungsgebiet ist nicht notwendig. Kosch sieht jedoch keine explizite Priorisierung von Nachrichten mit fahrsicherheitsrelevanten Kontextinformationen vor.

4.5.4 Zusammenfassung

Trotz einer ganzen Reihe von Veröffentlichungen im Zusammenhang mit Routing und Informationsverbreitung in mobilen und automobilen Ad-hoc Netzen existiert kein umfassender Ansatz, der die erarbeiteten Anforderungen aus Abschnitt 2.4 übergreifend erfüllt. Die bisher erarbeiteten Lösungsansätze basieren entweder auf anderen Annahmen und Prämissen des zugrunde liegenden Netzwerks, oder verfolgen im Hinblick auf andere potenzielle Anwendungen einen anderen Schwerpunkt. Vielfach wird zur Eingrenzung des Verbreitungsgebiets ein vom Sender zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung statisch festgelegtes Gebiet und oder eine statische Nachrichtenlebensdauer definiert. Zudem wurden zumeist lediglich isolierte Teilprobleme betrachtet, beispielsweise die systematische Reduzierung der redundanten Weiterleitungsaktionen während der Ausbreitungsphase in einem vermaschten Netz.

Die Anforderungsanalyse hat jedoch deutlich gemacht, dass eine isolierte Problembetrachtung vor dem Hintergrund der hohen Netzwerk- und Umgebungsdynamik, sowie dem konkreten Netzziel zur Steigerung der Verkehrssicherheit und -Effektivität (siehe Kapitel 6), im Hinblick auf eine optimale Nutzung der vorhandenen Kanalkapazität zu kurz greift. Unter Berücksichtigung der langen Lebenszyklen von Automobilen von mehr als 20 Jahren, erscheint gerade letzteres als überaus kritisch. Mittelfristig ist damit zu rechnen ist, dass die verfügbare Kanalkapazität nicht ausreichen wird, um den Kommunikationsbedarf aller Anwendungen ausreichend erfüllen zu können. Eine detaillierte Analyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl der Netzteilnehmer, deren Kapazitätsanforderungen, der durchschnittlichen Nachrichtenlänge und den resultierenden Paketverlusten in CSMA basierten Netzwerken zeigt beispielsweise, dass eine hohe Senderate vieler Teilnehmer nur mit sehr geringen Paketgrößen realisiert werden kann [Rei06b]. Eine explizite Koordination der Übertragungen muss daher dafür sorgen, dass in der Summe sowohl das übergeordnete Netzziel, als auch die individuellen Anforderungen aller Anwendung in jeder Situation bestmöglich erfüllt werden. Eine situationsadaptive nutzenbezogene Verbreitung, wie sie von Kosch [Kos05b] diskutiert wird, ist vor diesem Hintergrund zwingend erforderlich.

Nichtsdestotrotz enthalten die vorgestellten Ansätze eine Fülle von isolierten Optimierungsideen, die auch für die Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen sinnvoll erscheinen, und die es gilt, in einheitlicher Weise zu einem übergreifenden nutzenoptimierenden Verbreitungskonzept zusammenzuführen.

Der individuelle Nutzen eines Informationsartefaktes für eine bestimmte Anwendung

ist dabei jedoch abhängig von den spezifischen Anforderungen dieser Anwendung. Anders ausgedrückt ist zur Bewertung des individuellen Nutzens eine detaillierte Spezifikation der Anwendung notwendig - insbesondere in die Art und Weise, in der die empfangenen Informationen von der Anwendung verarbeitet werden. Für viele der in Abschnitt 2.2 beschriebenen kooperativen Assistenzanwendungen existieren aktuell jedoch noch keine hinreichend genauen Anwendungsbeschreibungen. Dies gilt speziell für die lokale Gefahrenwarnung, die insgesamt mit die größten Herausforderungen an die Verarbeitung der gemeinsam erhobenen Informationen bezüglich des Fahrkontextes stellt.

Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, auf Basis verteilter Beobachtungen einzelner Fahrzeuge, den zukünftigen individuellen Fahrkontext der Fahrzeuge näherungsweise abzuleiten. Die Qualität der Ableitung hängt dabei von dem zur Verfügung stehenden Informationsangebot ab und stellt so wiederum ein Maß für die nutzenoptimierende Verbreitung dieser Informationen zur Verfügung, wie sie im Anschluss in Kapitel 6 beschrieben wird.

4.6 Simulationsumgebung

Zur Simulation der generischen Nachrichtenübermittlung in automobilen Ad-hoc Netzen einerseits, und der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Anwendungsfelder andererseits, wurde bei der BMW Group Forschung und Technik ein Simulationsrahmenwerk entwickelt, das für die speziellen Betrachtungen dieser Arbeit sukzessive modifiziert und erweitert wurde. Das Rahmenwerk besteht aus den drei folgenden grundlegenden Komponenten:

- Ein Mobilitäts- bzw. Verkehrsgenerator, der die Fahrzeugbewegungen simuliert
- Ein Netzwerksimulator, der die Konnektivität, sowie die ad-hoc Nachrichtenübertragungen der simulierten Fahrzeuge simuliert
- Ein Anwendungsrahmenwerk, das es erlaubt, kommunikationsbasierte Anwendungen und Dienste zu erstellen und zu evaluieren

Die Einzelkomponenten sind dabei im Wesentlichen unabhängig voneinander. Es können daher verschiedene Produkte oder Implementierungen verwendet werden. Die Komponenten müssen jedoch festgeschriebene Schnittstellen unterstützen, die es ermöglichen, alle Komponenten miteinander zu koppeln, um so Wechselwirkungen zwischen Mobilitäts-, Kommunikations- und Anwendungsverhalten zu ermöglichen. Zur Berechnung der möglichen Nachrichtenübertragungen benötigt der Netzwerksimulator beispielsweise die vom Mobilitätsgenerator bereit gestellte Position der Fahrzeuge. Der Empfang einer Nachricht, beispielsweise bezüglich eines Staus im weiteren Straßenverlauf, hat darüber hinaus offensichtlich unter Umständen auch Auswirkungen auf die Fahrweise der einzelnen Fahrer. Daraus ergibt sich eine Rückkopplung aus der Simulation der Anwendung hin zum Mobilitätsgenerator. Die drei Komponenten sollten aus diesem Grund idealer Weise interaktiv in einer gemeinsamen Regelschleife gekoppelt sein (siehe Abbildung 4.14). Dies führt allerdings zu einer sehr komplexen Konfiguration der Simulationsumgebung, die hinsichtlich Berechenbarkeit nur für sehr wenige mobile Netzwerkknoten durchführbar ist. Da für viele Betrachtungen die Rückkopplung

des Fahrgeschehens oder die exakte Berechnung der Nachrichtenausbreitung nur sehr geringen Einfluss auf das untersuchte Phänomen hat, wurde zur simulativen Untersuchung einzelner Teilaspekte auf eine vollständige interaktive Kopplung zugunsten einer effektiv durchführbaren Berechnung verzichtet. Insbesondere wurde auf eine Rückkopplung der Anwendung auf das Mobilitätsverhalten der Fahrzeuge zumeist verzichtet und stattdessen vorberechnete Mobilitätsszenarien eingesetzt. Die charakteristischen Merk-



Abbildung 4.14: Integrative Kopplung der Simulationskomponenten

male der dieser Arbeit zugrunde liegenden Komponenten sollen im Folgenden kurz dargestellt werden (siehe hierzu auch [Vol06, Adl06, Sch06, Sch05, SDK⁺05, Ost05, ODS07, Tau07, Rei06a, RSS06, Sch07, Mer06, SES06])

4.6.1 Der Mobilitätsgenerator GenMobTrace

Der Mobilitätsgenerator GenMobTrace (Generator of Mobility Trace files) [Pei02] wurde im Rahmen einer Diplomarbeit bei der BMW Group Forschung und Technik entwickelt und seither sukzessive erweitert. GenMobTrace erlaubt es, die Größe des simulierten Szenarios, die Simulationsdauer, die Anzahl der Fahrzeuge, sowie fahrzeugspezifische Parameter wie beispielsweise Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegung der Autos individuell festzulegen. Die Fahrzeugpositionen werden auf einer zeitdiskreten Basis jede Sekunde anhand des Mobilitätsmodells nach Krauß [Kra98] berechnet. Die Fahrzeuge bewegen sich dabei entlang von logischen Straßenabschnitten einer digitalen Karte, welche als ERSI-Shapefile [ESR98] vorliegen muss. Das Straßennetz besteht dabei aus nicht näher unterschiedenen Kreuzungen (crossings), Straßen bzw. Verbindungen zwischen diesen (connections) mit eindeutiger Identifikation, sowie Straßenpunkten (streetpoints), welche die Straßen in Streckenabschnitte unterteilen und zudem die geometrische Krümmung einer Verbindung näherungsweise abbilden. Eine Verbindung besteht dabei immer vereinfachend aus jeweils einer Fahrspur pro Fahrtrichtung. Kern des Modells ist eine dem Verkehrsgeschehen angepasste Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeiten in der Art, dass zwischen den Fahrzeugen immer ein geschwindigkeitsabhängiger Mindestabstand eingehalten wird, so dass es unter Berücksichtigung des Bremsweges zu keinen Unfällen kommt. Eine explizite Vorrangregelung an Kreuzungen existiert nicht. Fahrzeuge überqueren stattdessen Kreuzungen (nach amerikanischem Vorbild) nach einer vorausgegangenen Verzögerung bis zum Stillstand in Reihenfolge des Ankommens. Zur Bestimmung des Fahrziels dient das sogenannte Random Waypoint Modell. Jedes Fahrzeug wählt sich hierbei initial einen beliebigen

Straßenpunkt als Ziel, welches im Anschluss auf der kürzesten Route angefahren wird. Die kürzeste Route entspricht dabei genau derjenigen Route mit der geringsten Summe der mit jedem Streckenabschnitt assoziierten Länge (siehe Abbildung 4.15). Die

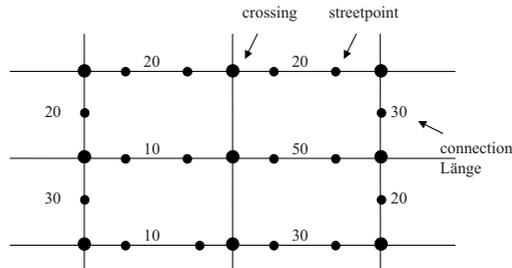


Abbildung 4.15: Kürzeste Routenwahl in GenMobTrace [Mer06]

Zielposition kann dabei entweder zufällig im simulierten Szenario gewählt werden, oder relativ zur aktuellen Position in zufälliger Richtung und Entfernung. Erreicht ein Fahrzeug das Ziel, sucht es sich analog ein neues Ziel auf der digitalen Karte. Um eine lose Kopplung zu den anderen Simulationskomponenten zu ermöglichen, werden die Fahrzeugpositionen sekundlich mit einem Zeitstempel in ein Bewegungs-Tracefile extrahiert und stehen so dem Netzwerksimulator und dem Anwendungsrahmenwerk in gleicher Weise zur Verfügung.

4.6.2 Network Simulator 2 (NS2)

Der *Network Simulator 2* (NS2) [Unib] ist ein weit verbreiteter und häufig eingesetzter Open Source Netzwerksimulator. Ursprünglich 1989 an der Universität von Kalifornien entwickelt, wurden im Laufe der Jahre eine Vielzahl an Netzwerkprotokollen von unterschiedlicher Seite hinzugefügt. Ende der 1990er Jahre wurde an der Carnegie Mellon Universität [Car05] eine Erweiterung vorgestellt, mit der auch drahtlose Kommunikationskanäle integriert werden können. Auf Basis dieser Erweiterung deckt der NS2 nun alle sieben ISO/OSI Schichten ab, einschließlich physikalischer Signalausbreitung und Kanalzugriffsverfahren. Hinsichtlich der Signalausbreitung findet neben dem sogenannten Freiraummodell, welches jede Art von Interferenz, Streuung oder Reflexionen von Signalen vernachlässigt, zumeist das an der Universität von South Carolina entwickelte sogenannte *Two Ray Ground Model* [Unic] Verwendung. Dieses berücksichtigt nicht nur den direkten Pfad vom Sender zum Empfänger, sondern zudem ebenfalls einen am Boden reflektierten Strahl.

Der NS2 arbeitet ereignisbasiert, wobei jeder Zugriff einer Schicht auf eine andere ein zeitlich korreliertes Ereignis darstellt. Auf diese Weise kann in allen Schichten ein beliebiges Verhalten abgebildet werden, welches durch die Integration sogenannter Agenten im Rechner realisiert werden kann. Die Bewegungen von Knoten werden ebenfalls als Ereignisse modelliert und in die zeitlich geordnete Ereigniswarteschlange aufgenommen. Bewegungen werden durch die Definition eines Zielortes und -Zeitpunktes bestimmt.

Der aktuelle Ort des Knotens kann dann zu jedem beliebigen Zeitpunkt durch Interpolation bestimmt werden, wobei eine gleichförmige Bewegung angenommen wird. Die vom Mobilitätsgenerator sekundlich erzeugten Fahrzeugpositionen können auf diese Weise direkt aus dem korrelierten Bewegungs-Tracefile in Ereignisse umgesetzt und so im NS2 verwendet werden. Gleiches gilt für eine interaktive Kopplung, wobei jede Sekunde für jeden mobilen Knoten eine neue Fahrzeugposition auf Basis des zugrunde liegenden Mobilitätsmodells vorausberechnet wird. Diese Position wird als neues Ereignis in die Ereignisliste mit einer Zeitverzögerung von einer Sekunde eingefügt.

4.6.3 Anwendungssimulator AppSim

Der Anwendungssimulator AppSim ist wie der Mobilitätsgenerator ebenfalls eine Eigenentwicklung der BMW Group Forschung und Technik [Ost05, Rei06a, Tau07, Sch07]. Er ist wie der NS2 ereignisbasiert. Die beiden wesentlichen Ereignisse sind dabei

- der Empfang einer Nachricht, sowie
- das Erreichen einer neuen Fahrzeugposition.

Ersteres wird dabei zumeist vom Netzwerksimulator ausgelöst, kann jedoch bei Bedarf auch direkt im AppSim behandelt werden. Letzteres wird durch den Mobilitätsgenerator bestimmt. Der Anwendungssimulator ermöglicht dabei neben einer einfachen Integration der Anwendungslogik verschiedener Schichten auch die Beeinflussung von Umweltzuständen und Fahrzeugeigenschaften. Entsprechend der Überlegungen aus Abschnitt 3.1 ermöglicht AppSim die Festlegung

- Spezifischer Umweltzustände bzw. Kontextaspekte (Deus-Sicht). Dies beinhaltet insbesondere die zeitliche und räumliche Spezifikation sowohl von statischen Gefahrenquellen, als auch von räumlich ausgedehnten Gefahrenquellen, die dynamisch über die Zeit ihre Ausbreitung, Lage und Intensität verändern (beispielsweise Nebel- oder Regenfelder).
- Spezifischer Beobachtungsmöglichkeiten (Capabilities) der Fahrzeuge. Hierdurch kann explizit festgelegt werden, welche Fahrzeuge welche Kontextaspekte mit welcher Qualität beobachten können (Individualsicht).

Abbildung 4.16 zeigt ein vereinfachtes Klassenmodell von AppSim. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in [Rei06a, Ost05] Abbildung 4.17 zeigt die statische Kopplung zwischen Mobilitätsgenerator GenMobTrace, Netzwerksimulator NS2 und Anwendungssimulator AppSim im Überblick, die den Simulationen in dieser Arbeit zugrunde liegen. In Abhängigkeit der speziellen Anforderungen unterschiedlicher Szenarien wurden für die in dieser Arbeit beschriebenen Simulation entweder AppSim und NS2 gekoppelt, oder jeweils nur eine der beiden Module eingesetzt. In letzterem Fall wurde die Funktionalität des jeweils nicht verwendeten Moduls heuristisch ergänzt, sofern sichergestellt werden konnte, dass dies auf die Qualität des Simulationsergebnisses keine signifikanten Auswirkungen hat.

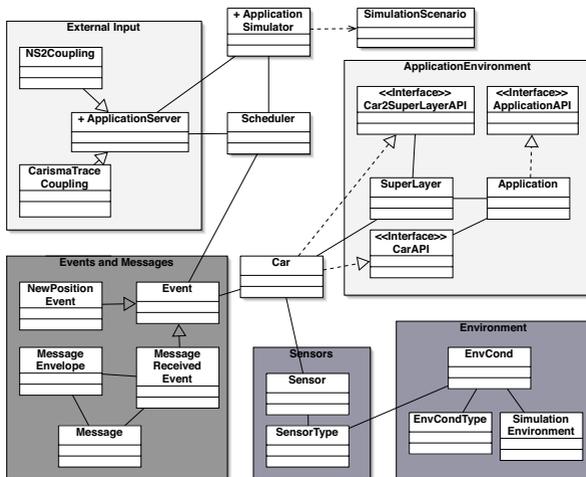


Abbildung 4.16: Vereinfachtes Klassenmodell des Anwendungssimulators AppSim

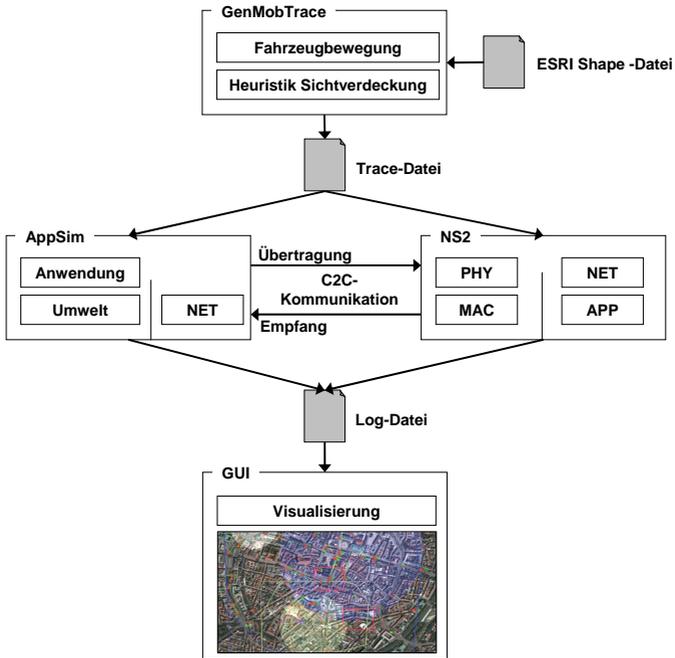


Abbildung 4.17: Überblick über die statische Kopplung zwischen Mobilitätsgenerator Gen-MobTrace, Netzwerksimulator NS2 und Anwendungssimulator AppSim

Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

In diesem Kapitel soll nun vorgestellt werden, wie höherwertige Kontextinformationen aus lokalen Beobachtungen abgeleitet werden können. Besonderes Augenmerk liegt dabei in der prädiktiven Abschätzung des zukünftigen Fahrkontextes bzw. der Fahrsituation auf Basis der vorhandenen Kontextinformationen entlang der wahrscheinlichen Fahrtroute, auf Basis von Beobachtungen anderer Fahrzeuge.

Dabei wird angenommen, dass die im Fahrzeug erzeugten Rohsensordaten durch entsprechende Filter oder (low-level) durch Sensordatenfusion geeignet vorverarbeitet werden und abstrahiert vorliegen. Die Ableitung bestimmter Fahrsituationen muss dabei als abschließender Teilprozess in einer komplexeren Prozesskette ausgehend von der Einzelauswertung der verfügbaren Sensoren verstanden werden, als deren Ergebnis auf Basis der verfügbaren diversitären Beobachtungen ein konsistentes Bild der Fahrumgebung resultiert [Naa04]. Dies gilt in gleicher Weise sowohl für individuelle, als auch für kooperative Situationsanalysen. Abbildung 5.1 zeigt den vollständigen Prozess der Situationserkennung nochmals im Überblick (gestrichelter Rahmen), welche letztlich als Basis für die Handlungsentscheidungen der einzelnen Assistenzfunktionen dient [Naa04]. Entsprechend der Überlegungen aus Kapitel 3.1.2 kann eine prädiktive Einschätzung aufgrund sensorisch bedingter Unsicherheiten und der inhärenten Dynamik des Umweltzustands lediglich näherungsweise erfolgen. Viele für eine weiterführende und vorausschauende Fahrerassistenz notwendige Kontextaspekte können in aktuellen Fahrzeugen nicht mit Sensorsystemen unmittelbar detektiert werden. Dies gilt insbesondere für diejenigen Aspekte, die nicht zur Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Situationen notwendig sind. Läuft das Fahrzeug beispielsweise Gefahr zu Schleudern, so muss die konkrete Ursache (beispielsweise eine einseitig verschmutzte Fahrbahn) für den Regeleingriff der Räder nicht bekannt sein. Soll der Fahrer jedoch gezielt im Vorfeld auf mögliche Besonderheiten und Gefahrenpotenziale der nahen Fahrsituation aufmerksam gemacht werden, so stellt diese Information bezüglich der spezifischen Gefahrenursache einen erheblichen Mehrwert für den Fahrer dar. Aus diesem

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

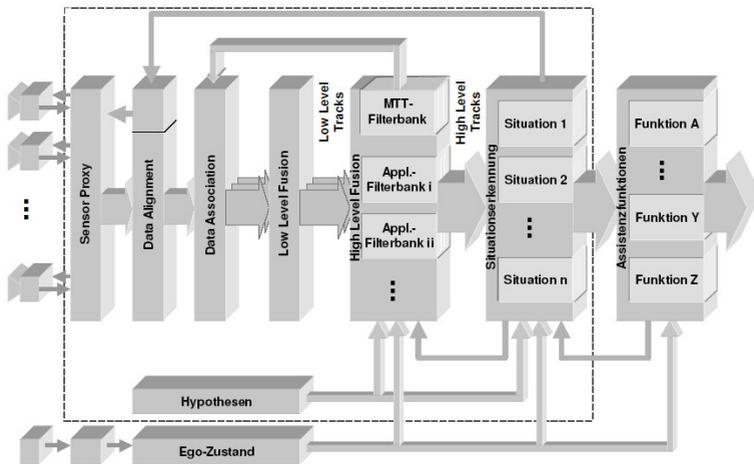


Abbildung 5.1: Modell einer modularen Sensordatenfusion im Fahrzeug [Naa04]

Grund ist es von großem Vorteil, im Falle des Auftretens einer kritischen Fahrsituation die möglichen Ursachen zu bestimmen und einzuschränken. Darüber hinaus können die meisten Fahrzeuge aktuell keine Fahrbeeinträchtigungen wie beispielsweise Hindernisse oder Stauenden automatisch erkennen.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge der existierenden Kontextaspekte in der Anwendungsdomäne und deren sensorielle Beobachtbarkeit existieren zudem in vielen Fällen keine sicheren quantitativen Zusammenhänge, obwohl sich viele physikalische Wechselwirkungen mathematisch exakt beschreiben lassen. Darüber hinaus sind oftmals nicht alle erforderlichen Messgrößen verfügbar. So kann zwar beispielsweise auf Basis von fahrdynamischen Größen wie Geschwindigkeit, Quer- und Längsbeschleunigung, Lenkwinkel und Drehmoment auf den aktuell gültigen subjektiven Reibwert des Fahrzeuges mit der Straße geschlossen werden. Eine objektive Quantifizierung sowie eine ursächliche Bestimmung eines möglichen geringen Wertes hängt jedoch von weiteren Aspekten ab, wie beispielsweise dem Typ und Zustand der Reifen, der Fahrzeugbelastung, oder historischem oder statistischem Wissen über die Wittersituation oder Fahrbahnbeschaffenheit.

Statistisches Wissen und heuristische Überlegungen ermöglichen eine Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Situation im Vorfeld, rechtzeitig bevor sich ein Fahrzeug in dieser Situation befindet. Eine vorausschauende Einschätzung der Fahrsituation ist wie einleitend beschrieben ein wesentlicher Hebel im Hinblick auf die Bestrebungen zur nachhaltigen Reduzierung der Unfallzahlen. Im Folgenden wird am Beispiel der lokalen Gefahrenwarnung (siehe Abschnitt 2.2.1) ein Verfahren vorgestellt, das es erlaubt, den zukünftigen Fahrkontext auf Basis verfügbarer lokaler Beobachtungen abzuschätzen. Die wesentlichen Annahmen seien zur Verdeutlichung und zum

besseren Verständnis an dieser Stelle nochmals im Überblick dargestellt:

- Fahrzeuge besitzen eine Reihe von Sensoren, die es ihnen erlauben, bestimmte Aspekte der Umwelt am aktuellen Aufenthaltsort, bzw. in der unmittelbaren Umgebung zu beobachten.
- Diese Beobachtungen sind vergleichsweise genau und vertrauenswürdig. Es existieren jedoch nicht für alle wesentlichen fahraufgabenbezogenen Kontextaspekte dedizierte Sensoren.
- Über ein (ad-hoc) Kommunikationssystem können diese Beobachtungen zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden.
- Eine vorausschauende Einschätzung der zukünftigen Fahrsituation über den Beobachtungshorizont der lokalen Sensoren hinaus kann lediglich auf externen Beobachtungen anderer Verkehrsteilnehmer oder stationärer Infrastruktursysteme beruhen.
- Aufgrund der örtlichen und zeitlichen Differenz zwischen einzelnen Beobachtungen und des individuellen Fahrzeugkontextes, sowie der inhärenten Dynamik der (Fahr-)Situationen, ist die Vorhersage des Fahrhorizonts in der Regel mit einer vergleichsweise großen Unsicherheit behaftet.
- Die Unsicherheit der Vorhersage hängt von der Anzahl, Qualität und der Quantität der verfügbaren externen Beobachtungen ab.

Bei niederwertigen Kontextinformationen, also jenen, die unmittelbar durch ein geeignetes Sensorsystem beobachtet werden können, beschränkt sich die Unsicherheit auf Messfehler und -Ungenauigkeiten. Werden von diesen niederwertigen Kontextinformationen höherwertige Kontextinformationen abgeleitet, so existiert in vielen Fällen keine sichere Deduktion. Sofern eine sichere Deduktion existiert, so können höherwertige Kontextinformationen über logische Inferenzverfahren, wie beispielsweise aussagen-, prädikaten-, beschreibungs- oder temporallogische Terme abgebildet werden (eine detaillierte Beschreibung und Analyse der verschiedenen Logikkonzepte im Hinblick auf deren Eignung in kontextsensitiven Systemen findet sich beispielsweise in [Kra06]). In der Regel erhöht sich beim Inferenzprozess aber die Unsicherheit bezüglich des Zutreffens der abgeleiteten Aussage bzw. Kontextinformation, da das Inferenzverfahren selbst keine Sicherheit über das Zutreffen der abgeleiteten Information gewährleistet. Statt auf einem immer gültigen und beweisbaren Zusammenhang basiert das Schließverfahren auf statistischem Wissen oder heuristischen Experteneinschätzungen über die Zusammenhänge und Abhängigkeiten einzelner Kontextaspekte der (modellierten) Welt. Solche probabilistischen Schließverfahren stellen wahrscheinliche Zusammenhänge zwischen einzelnen Kontextaspekten her, die üblicher- aber nicht notwendigerweise gültig sind. Auf Basis statistischer Vorkenntnisse dieser Zusammenhänge lässt sich dabei letztlich ein Grad der Überzeugtheit bestimmen, der angibt, wie groß die statistische Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustands eines Kontextaspekts ist. Probabilistische Schließverfahren sind insbesondere dann von Vorteil, wenn nicht alle voneinander abhängigen Kontextaspekte lokal bekannt sind.

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

Im Hinblick auf eine prädiktive Einschätzung der eigenen Fahrsituation ergibt sich ein weiterer Unsicherheitsfaktor durch die räumliche und zeitliche Verteilung der einer vorausschauenden Einschätzung der Fahrsituation zugrunde liegenden Beobachtungen. Zudem müssen individuelle räumliche und zeitliche Charakteristika wie Form, Ausdehnung, Intensität oder auch Bewegungsrichtung der Kontextaspekte mit berücksichtigt werden.

Probabilistische Netze (oder Bayessche Netze - siehe nächster Abschnitt) sind ein weit verbreiteter und ausführlich evaluierter Ansatz, Aussagen bei unsicherer Datengrundlage, fehlender Information und unsicherer aber statistisch bekannter Zusammenhänge aus bekanntem Wissen abzuleiten. Typische Anwendungsdomänen Bayesscher Netze sind medizinische Expertensysteme (siehe beispielsweise [LS88, HHN92, HN92, Hv02, Hv03]), autonome Robotersteuerungen (siehe beispielsweise [Rüd04, LBDM04, SLR95]), oder Wettervorhersagen (siehe beispielsweise [KKN01, CSG04]). Es existieren zudem jedoch auch viele Ansätze zur Sensordatenfusion ([ZJL02]), sowie zur Inferenz höherwertiger Kontextinformationen [GPZ04, DP04, Hv02, TLL05, KKP⁺03]. Angermann, Robertson und Strang [ARS05], Ranganathan et al. [RAMC04], sowie Krause [Kra06] beschreiben zudem Möglichkeiten, Vorteile, Eigenschaften und Anforderungen im Hinblick auf eine probabilistische Kontextinferenz auf Basis Bayesscher Netze. Krause beschreibt darüber hinaus eine Möglichkeit, unterschiedliche Verfahren zur Deduktion höherwertiger Kontextaspekte in einem einheitlichen Rahmenwerk zu vereinen [Kra06, KLPS07]. Bayessche Netze erscheinen daher als geeignete Methodik, den zukünftigen Fahrkontext abzuschätzen. Der Prädiktionsprozess besteht dabei aus drei grundlegenden Phasen:

1. Die lokale Deduktion von Kontextaspekten, die nicht von einem speziellen Sensorsystem direkt beobachtet werden können. Dies betrifft beispielsweise die Detektion von Aquaplaning, welches auf Basis der aktuellen und vergangenen Niederschlagsmenge, sowie fahrdynamischer Parameter wie individuelle Raddrehzahlen rückgeschlossen werden kann.
2. Das Verfügbarmachen der lokalen Beobachtungen.
3. Die Prädiktion der zukünftigen Fahrsituation auf Basis der vorhandenen lokalen Beobachtungen und der inferierten Kontextaspekte.

Im Folgenden sollen daher die wesentlichen Grundlagen probabilistischen Schließens auf Basis Bayesscher Netze aufgezeigt werden, sowie die Einschränkungen und Probleme, die sich im Hinblick auf die konkreten Anforderungen und Eigenschaften bei der Ableitung höherwertiger Kontextaspekte auf Basis örtlich und zeitlich verteilter Fahrzeugbeobachtungen ergeben. Für eine ausführlichere Diskussion Bayesscher Netze sei an dieser Stelle auf die entsprechende Standardliteratur verwiesen, beispielsweise [KN03, Cha91, Jen01, Nea04, KM05]. Im Anschluss werden die einzelnen Phasen der Schlussfolgerung näher beschrieben. Die vorgestellte Kontextdeduktion basiert dabei auf Ergebnissen aus [Sch07, Rei06a, RSS06, SSS07].

5.1 Probabilistische Netze als Deduktionsgrundlage

Bayessche Netze (auch bezeichnet als *Bayesian Network* (BN), *Belief Network*, *Bayesian Belief Network* (BBN), *Probabilistic Networks* oder *Causal Networks*) beschrei-

ben einen Formalismus, unsicheres Wissen zu repräsentieren und auf diesem Wissen Schlussfolgerungen durchzuführen. Die Grundlage hierfür bilden der Satz von Bayes, sowie die explizite Abbildung von kausalen Abhängigkeiten zwischen Hypothesen.

5.1.1 Der Satz von Bayes und probabilistische Netze

Gegeben sei ein (Zufalls-) Experiment, mit einer Menge $\Omega = \{E_1, \dots, E_n\}$ an n (Elementar-) Ereignissen $E \in \Omega$. Dabei existiert für jedes Ereignis ein Wahrscheinlichkeitsmaß $P(E)$ mit $0 \leq P(E) \leq 1$ und es gilt $P(\Omega) = \sum_{j=1}^n P(E_j) = 1$

Auf Basis einer solchen rein formalen Definition von Wahrscheinlichkeit, wie sie in der Informatik typisch ist, bleibt die semantische Interpretation dieses Wahrscheinlichkeitsmaßes unspezifiziert. Neben der üblichen Interpretation als relative Auftretenshäufigkeiten der Ergebnisse eines wiederholten Experimentes, kann die Wahrscheinlichkeit auch als Grad des Dafürhaltens (bzw. auch Grad der Gewissheit, Grad der Überzeugtheit, Eintrittswahrscheinlichkeit oder Belief) bezüglich des Eintretens eines Ereignisses (Hypothese) aufgefasst werden, unter Berücksichtigung des gegebenen (Vor-) Wissens. Diese allgemeinere Deutung wird zumeist auch als *Degree-of-belief*-Interpretation bezeichnet und liegt der Bayesschen Theorie zugrunde [BSW06].

Zwei Ereignisse heißen voneinander unabhängig, wenn das Eintreten eines Ereignisses die Wahrscheinlichkeit des anderen Ereignisses nicht beeinflusst. Der Satz von Bayes formuliert demgegenüber den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeitsmaße von abhängigen Hypothesen. Im Zusammenhang mit der Deduktion höherwertiger Kontextaspekte repräsentiert eine Hypothese dabei die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines konkreten Zustands eines Kontextaspekts, also beispielsweise den Grad der Sichtbehinderung an einer bestimmten Straßenposition, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass der Aspekt K den Wert k_i annimmt, mit $P(K = k_i)$ oder kurz $P(k_i)$ bezeichnet sei. Entsprechend bezeichne $P(K)$ den Vektor aller möglichen Hypothesenzustandswahrscheinlichkeiten und es gilt offensichtlich wiederum $P(K) = 1$. $P(K)$ beschreibt also letztlich eine (üblicher- aber nicht notwendigerweise diskretisierte) Wahrscheinlichkeitsverteilung, die den Grad der Überzeugtheit widerspiegelt, dass sich ein Kontextaspekt in einem bestimmten Zustand befindet bzw. einen konkreten bestimmten Wert annimmt. Das Eintreten der Einzelhypothesen bezüglich eines Kontextaspekts schließt sich dabei wechselseitig aus, d.h. der Kontextaspekt kann sich (real) nur in einem bestimmten Zustand befinden. Bezeichne im Folgenden

- $P(E_1 \cap \dots \cap E_j)$ das Wahrscheinlichkeitsmaß dafür, dass alle j Ereignisse der Menge $\{E_1, \dots, E_j\} \subseteq \Omega$ eintreten und
- und $P(E_j|E_k)$ das Wahrscheinlichkeitsmaß dafür, dass das Ereignis E_j eintritt, unter der Bedingung, dass das Ereignis E_k eingetreten ist (E_k *bedingt* also E_j).

So gilt

$$P(E_1 \cap \dots \cap E_j) = P(E_1) \cdot P(E_2|E_1) \cdot P(E_3|E_1 \cap E_2) \cdot \dots \cdot P(E_n|E_1 \cap \dots \cap E_{n-1}).$$

Unter der Annahme von n sich gegenseitig ausschließenden Hypothesen E_1, \dots, E_n (wie im Falle der Repräsentation von Kontextaspekten gegeben) und einem abhängigen Ereignis B mit $\sum_{k=1}^n P(E_k) = 1$ gilt ferner

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

- (Totale Wahrscheinlichkeit) $P(B) = \sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot P(\hat{x}_j|E_i)$, und
- (Bayes-Formel) $P(E_i|B) = \frac{P(E_i) \cdot P(B|E_i)}{\sum_{k=1}^n P(E_k) \cdot P(B|E_k)}$

In Bezug auf die Fusion von Beobachtungen gilt dabei, in Übereinstimmung mit den Überlegungen aus Abschnitt 3.1.2, und unter der Annahme von n sich gegenseitig ausschließenden Hypothesen E_1, \dots, E_n bezüglich des Zustands eines beobachtbaren Kontextaspekts x_j , dass jedes Element dieser Menge als Ergebnis einer Beobachtung \bar{x}_j eines Sensors $b_l^{x_j}$ aufgefasst werden kann, mit dem (wahrscheinlichsten) Beobachtungswert \hat{x}_j . Es gilt [Die06]:

- $P(\hat{x}_j) = \sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot P(\hat{x}_j|E_i)$, und
- $P(E_i|\hat{x}_j) = \frac{P(E_i) \cdot P(\hat{x}_j|E_i)}{\sum_{k=1}^n P(E_k) \cdot P(\hat{x}_j|E_k)}$

Bezeichne $\hat{x}_j^{b_l}$ den wahrscheinlichsten Beobachtungswert des Kontextaspekts x_j durch den Sensor $b_l^{x_j}$, so gilt für mehrere Beobachtungen auf Basis unterschiedlicher Sensoren in der Verallgemeinerung weiter [Die06]:

$$P(E_i | \bigcap_{x_j \in X^b} \bigcap_{b_l^{x_j} \in B} \hat{x}_j^{b_l}) = \frac{P(E_i) \cdot P(\bigcap_{x_j \in X^b} \bigcap_{b_l^{x_j} \in B} \hat{x}_j^{b_l} | E_i)}{\sum_{k=1}^n P(E_k) \cdot P(\bigcap_{x_j \in X^b} \bigcap_{b_l^{x_j} \in B} \hat{x}_j^{b_l} | E_k)}$$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Hypothese unter der Bedingung fester eingetretener Beobachtungswerte auf Basis der verfügbaren Sensoren lässt sich also zurückführen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der entsprechenden Sensorbeobachtungen unter der Bedingung des Eintretenseins der Hypothese. Letzteres kann in der Regel auf Basis von Realversuchen statistisch abgeleitet oder unter Umständen auch von Experten direkt ermittelt werden. Unter Kenntnis der kausalen Unabhängigkeiten zwischen den Ereignissen kann diese Gleichung vereinfacht werden. Dabei gilt für zwei unabhängige Hypothesen $E_1, E_2 \in \Omega$:

- $P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2)$, d.h. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eines von beiden Ereignissen eintritt (oder beide), entspricht der Summe der Wahrscheinlichkeitsmaße beider Ereignisse,
- $P(E_1 \cap E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2)$,
- $P(E_1|E_2) = P(E_1)$ bzw. $P(E_2|E_1) = P(E_2)$.
- In der Verallgemeinerung gilt weiter $P(E_1, \dots, E_n) = P(E_1) \cdot \dots \cdot P(E_n)$

Die grundlegende Struktur eines Bayesschen Netzes bildet nun ein azyklischer gerichteter Graph, welcher die kausalen Abhängigkeiten zwischen den Hypothesen explizit darstellt und durch die so implizit gegebenen Unabhängigkeiten die weitere Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wesentlich vereinfacht. Die Knoten des Graphen stellen dabei die Wahrscheinlichkeit des Eintretens bzw. Zutreffens bestimmter Hypothesen

dar. Ein Knoten des Bayesschen Netzes fasst dabei wie beschrieben die j sich wechselseitigen ausschließenden Einzelhypothesen k_1, \dots, k_j des Kontextaspekts K zusammen. Sofern keine weiterführende Aussage (konkrete Beobachtung, Evidenz) über die einzelnen Hypothesen vorliegt, so wird eine a-priori Wahrscheinlichkeitsverteilung über K angenommen.

Die Kanten des Graphen beschreiben die (kausalen) Abhängigkeiten zwischen diesen Hypothesen, wobei die Kanten von Antezedenz zu Konsequenz gerichtet sind. Das Eintreten einer bestimmten Hypothese verändert folglich die Eintrittswahrscheinlichkeit der so kausal abhängigen Hypothesen. Zur Abbildung der Quantität dieser Abhängigkeiten ist jedem Knoten eine sogenannte *Abhängigkeitstabelle* (*Conditional Probability Table* - *CPT*) zugeordnet. Diese beschreibt die bedingten Abhängigkeiten der Hypothesen in der Art, dass für jede Kombination der möglichen Zustände der Elternknoten, also derjenigen Knoten, die die Hypothese kausal beeinflussen, ein Tabelleneintrag mit der resultierenden Eintrittswahrscheinlichkeit für die Hypothese existiert. Für jeden Knoten K mit den Antezedenz-Knoten B_1, B_2, \dots, B_j existiert also eine Abhängigkeitstabelle mit $P(K|B_1, \dots, B_n)$ mit insgesamt $\sum_{i=1}^n |B_i| + |K|$ Einträgen, wobei $|B_i|$ und $|K|$ die Anzahl der Hypothesen (also der möglichen Zustände des Kontextaspekts) der kausal beeinflussenden Elternknoten B_i , sowie des Kontextaspekts K bezeichnen. Besitzt ein Kontextaspekt K keine kausal beeinflussenden Aspekte, reduziert sich diese Tabelle auf den Vektor der möglichen Hypothesenzustandswahrscheinlichkeiten $P(K)$. Die explizite Repräsentation der kausalen Abhängigkeiten von Hypothesen in Graphenform in Verbindung mit dem Satz von Bayes ergibt dabei folgende Vorteile:

- Oft ist lediglich der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung bekannt. Der Satz von Bayes erlaubt jedoch das „Umdrehen“ der bedingten Wahrscheinlichkeit, also auch den Rückschluss auf die Ursache(n) einer beobachteten Wirkung. Dies ist insbesondere für die autonome Inferenz höherwertiger Kontextinformationen von Vorteil, da die zur Verfügung stehenden Sensorsysteme in vielen Fällen lediglich die Wirkung einer Situation erkennen können, wenn beispielsweise aufgrund von Aquaplaning charakteristische Radkräfte beobachtet werden können.
- Die explizite Kausalitätsmodellierung vereinfacht die Berechnung der Hypothesenzustandswahrscheinlichkeiten signifikant, da kausal unabhängige Hypothesen nicht berücksichtigt werden müssen.

Ziel eines Bayesschen Netzes ist es, für jeden abgebildeten Kontextaspekt K des Netzes die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(K)$ zu berechnen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Hypothese k_i des Knotens K hängt also ab von der kausalen Unterstützung der Hypothese durch die Elternknoten einerseits, sowie andererseits durch die sogenannte diagnostische Unterstützung der Hypothese durch die von ihr kausal beeinflussten Kindknoten. Aus diesen beiden Kriterien berechnet sich entsprechend obiger Regeln die aktuelle Eintrittswahrscheinlichkeit (Belief) der Hypothese k_i . Dies ist dabei einerseits einmalig bei Initiierung des Netzes für alle inneren Knoten durchzuführen, ausgehend von den a-priori-Eintrittswahrscheinlichkeiten der unabhängigen Hypothesen. Eine Aktualisierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ist genau dann notwendig, wenn sich aufgrund einer Beobachtung (Evidenz) der Grad

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

des Dafürhaltens einer Hypothese ändert. Dies bewirkt eine sukzessive Neuberechnung der jeweils kausal und diagnostisch abhängigen Hypothesen. Zur effizienten sogenannten Propagation von Evidenzen bzw. Beobachtungen durch das Bayessche Netz unter Berücksichtigung der jeweiligen kausalen Abhängigkeiten existieren eine Reihe von Algorithmen und Optimierungen, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann. Eine nähere Beschreibung findet sich beispielsweise in [Jen01, Kja95, ACP87, LS88, Kja90, HD96]

5.1.2 Dynamische Bayessche Netze

Dynamische Bayessche Netze (DBN - Dynamic Bayesian Networks) [DGH92, Wit02, Kja95] erweitern die eben dargestellte grundlegende Struktur probabilistischer Netze dahingehend, dass auch zeitliche Abhängigkeiten zwischen Hypothesen mit abgebildet werden können. Dabei ist es möglich, Wahrscheinlichkeitsverteilungen über einer theoretisch beliebig großen Menge von Zufallsvariablen zu definieren. So ist es beispielsweise möglich, die Abhängigkeiten einer Menge von Variablen über alle Zeitschritte eines zeitdiskreten Systems abzubilden [Mur02]. Der prinzipielle Aufbau eines DBN ist exemplarisch in Abbildung 5.2 dargestellt. Bezeichne im Folgenden BN eine konkrete

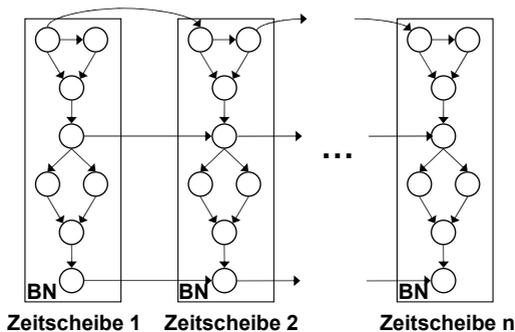


Abbildung 5.2: Graphisches Modell eines einfachen dynamischen Bayesschen Netzes nach [Kja95]

Ausprägung eines oben beschriebenen Bayesschen Netzes. Ein dynamisches Bayessches Netz wird dabei als 2-Tupel $(BN, BN \rightarrow)$ definiert, wobei $BN \rightarrow$ ein Netz aus zwei miteinander korrelierten Kopien (Zeitscheiben) des Netzes BN darstellt (2TBN - Two-slice temporal bayesian network). $BN \rightarrow$ spezifiziert dabei die temporalen Abhängigkeiten zwischen einzelnen (nicht notwendigerweise allen) Kontextaspekten. Durch n -maliges Ausrollen des Bayesschen Netzes BN ausgehend von den initialen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Kontextaspekte ergibt sich so unter Berücksichtigung der in $BN \rightarrow$ spezifizierten kausalen Übergangswahrscheinlichkeiten von einer Zeitscheibe zur nächsten ein Bayessches Netz mit n zeitlich kausal korrelierten Zeitscheiben. In einem kontinuierlichen Ausrollprozess können dabei unter bestimmten Bedingungen ältere Zeitscheiben wieder verworfen werden [Kja95, Bra00, Mur02].

Im Hinblick auf eine prädiktive Bestimmung des zukünftigen Fahrkontextes auf Basis verteilter Fahrzeugbeobachtungen, können mit Hilfe dynamischer Bayesscher Netze unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik eines Kontextaspekts zeitliche Wirkzusammenhänge und -inflüsse modelliert werden. So wird beispielsweise die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es an einem bestimmten Streckenabschnitt stark regnet, in großem Maße durch vorangegangene Beobachtungen an diesem Streckenabschnitt beeinflusst. Ein entsprechendes Bayessches Netz, welches es ermöglicht, die aktuelle Regenintensität abzuschätzen (siehe Abschnitt 5.2.2) kann somit mit fortschreitender Zeit beliebig geklärt und zeitlich mit der Vorgängerzeitscheibe verbunden werden. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit der Vorgängerzeitscheibe beeinflusst ebenso wie andere Aspekte im weiteren die angenommene Niederschlagswahrscheinlichkeit.

5.1.3 Objektorientierte Bayessche Netze

Koller und Pfeffer stellen in [KP97] eine objekt-orientierte Erweiterung klassischer Bayesscher Netze vor (*objekt-orientierte Bayessche Netze - Object Oriented Bayesian Networks - OOBN*). Grundidee hierbei ist - ähnlich dem Paradigma der objekt-orientierten Programmierung - einzelne Teilnetze in einem Objekt zu kapseln. Diese können so auf generische Art und Weise beliebig wiederverwendet und flexibel zu einem Gesamtnetz zusammengesetzt werden. Zudem ergibt sich aus der möglichen Kapselung eine Transparenz vor der konkreten Implementierung, was wiederum eine Modellierung der Netze auf einem höheren Abstraktionsgrad ermöglicht [KP97]. Eine mögliche generische (top-down) Methodik zur Modellierung von objekt-orientierten Bayesschen Netzen findet sich beispielsweise in [BW00].

Zur Propagation von Evidenzen müssen objekt-orientierte Bayessche Netze entweder in ein klassisches BN, oder wahlweise in ein sogenanntes *Multiply Sectioned Bayesian Network* überführt werden, für das ebenfalls spezielle Propagationsverfahren bekannt sind, beispielsweise [XJ99]. Eine unmittelbare effiziente Propagation von Evidenzen in objekt-orientierten Bayesschen Netzen existiert hingegen (noch) nicht. Der Vorteil von OOBN liegt demzufolge im Wesentlichen in der einfacheren Modellierungsmöglichkeit.

5.1.4 Eigenschaften und Einschränkungen Bayesscher Netze in der Anwendungsdomäne kooperativer Telematiksysteme

In diesem Abschnitt sollen nun die wesentlichen Eigenschaften und Einschränkungen Bayesscher Netze, sowie deren Erweiterungen, im Hinblick auf die Anwendungsdomäne der kooperativen Telematiksysteme kurz dargestellt werden, sofern sie für diese Arbeit von Bedeutung sind.

Aufgrund der inhärenten Unsicherheit, welche sich durch das Fehlen von konkreten Beobachtungen und der Dynamik der Situation ergeben, bietet der Einsatz von Bayesschen Netzen zur Deduktion nicht beobachtbarer Kontextaspekte die oben beschriebenen Vorteile. Unter Beachtung aller Einflussfaktoren und Wechselwirkungen ergeben sich jedoch folgende Eigenschaften und Einschränkungen:

- Bayessche Netze bilden keine räumlichen Eigenschaften ab. Jedoch weisen nahezu alle verkehrs- und fahrsicherheitsbezogenen Kontextaspekte einen starken

Ortsbezug auf. Soll der Grad des Eintretens für eine bestimmte Hypothese, beispielsweise die Existenz eines Hindernisses auf einem bestimmten Streckenabschnitt ermittelt werden, so bedingt dies, dass für alle möglichen Orte, an denen diese Hypothese zutreffen kann, ein eigenes entsprechendes Netz initialisiert und aktualisiert werden muss.

- Aus diesem Grund existiert in der Regel eine vergleichsweise große Menge von gleichen Teilnetzen, beispielsweise je eines pro Streckenabschnitt. Ein Einsatz von objekt-orientierten Bayesschen Netzen erscheint vor diesem Hintergrund sinnvoll, da diese eine einfache Instanziierung der Teilnetze erlauben. Aufgrund der großen zeitlichen Dynamik ist eine explizite Transformation des resultierenden Netzes, um Evidenzen zu propagieren, jedoch nicht möglich.
- Mittels dynamischer Bayesscher Netze können prinzipiell sowohl zeitliche, als auch räumliche Wirkeinflüsse abgebildet werden (siehe die weiterführenden Überlegungen hierzu in Abschnitt 5.3.2). Mit jeder zusätzlichen Zeitscheibe steigt die Rechenkomplexität jedoch stark an. In Verbindung mit einer gegebenenfalls zusätzlichen räumlichen Entfaltung ist die resultierende Komplexität eines solchen Netzes jedoch zu groß, um in den eingebetteten Fahrzeugsystemen eingesetzt werden zu können.

Im Folgenden soll daher vorgestellt werden, wie auf Basis Bayesscher Netze eine effiziente und in eingebetteten Fahrzeugsystemen realisierbare Abbildung der räumlich zeitlichen Einflussfaktoren verteilter Beobachtungen erreicht werden kann. Hierzu sollen zuvor die wesentlichen kausalen Zusammenhänge der Fahrsituation sowie die hierzu zugrunde gelegten Modellierungsparadigmen dargelegt werden.

5.2 Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie sich die statistischen Zusammenhänge verschiedener Beobachtungen mit Hilfe Bayesscher Netze darstellen lassen.

5.2.1 Modellierung Bayesscher Netze zur Ableitung lokaler höherwertiger Kontextaspekte

Als zugrunde liegende Methodik zur Modellierung Bayesscher Netze dienen in dieser Arbeit die Überlegungen von Korb und Nicholson [KN03], welche die weit verbreiteten Mechanismen des *Software Engineering* auf Bayessche Netze übertragen (*Knowledge Engineering with Bayesian Networks (KEBN)*), um so den gesamten Lebenszyklus des resultierenden wissensbasierten Systems vollständig abbilden zu können. Die Modellierung beinhaltet dabei die drei folgenden wesentlichen Schritte:

1. Eine qualitative Bestimmung der (kausalen) Zusammenhänge zwischen den durch Zufallsvariablen repräsentierten Hypothesen, die für die Anwendungsdomäne

5.2 Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen

von Bedeutung sind. Durch die explizite Verbindung kausal abhängiger Hypothesen ergibt sich wie beschrieben ein gerichteter azyklischer Graph. Die Struktur des Graphen repräsentiert dabei die qualitativen Zusammenhänge und damit implizit auch die kausalen Unabhängigkeiten der Hypothesen.

2. Eine probabilistische Bestimmung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Hypothesen in Abhängigkeit ihrer Vorgängerknoten.
3. Eine quantitative Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Hypothesen (*Joint Probability Distribution*) des Graphen unter Beachtung der aktuellen Wahrscheinlichkeitsverteilung der jeweiligen Vorgängerknoten.

Darüber hinaus ergeben sich hinsichtlich der Modellierung in der konkreten Anwendungsdomäne folgende weiterführende Fragestellungen:

- Zum einen muss bestimmt werden, in wie weit alle erforderlichen Hypothesen hinsichtlich potentiell fahrbezogener Kontextaspekte sowie deren Wechselwirkungen in einem großen kausalen Netz gemeinsam abgebildet werden müssen, bzw. kausal voneinander unabhängig sind. Anders ausgedrückt stellt sich die Frage, ob für jede bedeutende Hypothese ein eigenes Netz modelliert werden kann, um die resultierende Netzgröße und damit die Komplexität der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten zu minimieren. Nachteil separierter Netze ist hierbei jedoch eine Redundanz derjenigen kausal abhängigen Teilnetze, die mehrere Hypothesen beeinflussen.
- Um die Berechnungskomplexität klein zu halten, ist es wie beschrieben sinnvoll kontinuierliche Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu diskretisieren. Dies wirft die Frage nach individuell sinnvollen Diskretisierungsintervallen auf. Diese sollten sich an den möglichen unterschiedlichen Auswirkungen auf die Handlungsentscheidungen des Fahrers orientieren. Eine Diskretisierung der Niederschlagsmenge mit einer Auflösung von 1 Liter pro Quadratmeter erscheint beispielsweise nicht notwendig, da sich geringfügig schwankende Niederschlagsmengen nicht auf das Fahrverhalten auswirken. Stattdessen erscheint eine grobe diskrete Einteilung in wenige Bereiche wie *kein Niederschlag*, *geringer Niederschlag*, *mäßiger Niederschlag* und *starker Niederschlag* als ausreichend.

5.2.2 Die wesentlichen kausalen Zusammenhänge der Fahrsituation

Im Folgenden sollen ohne Anspruch auf Vollständigkeit die wesentlichen kausalen Abhängigkeiten exemplarisch auf Basis Bayesscher Netze modelliert werden. In Anlehnung an die drei im PREVENT / WillWarn [PRE06b] charakterisierten Gefahrenpotenziale *reduced friction*, *reduced visibility* und *obstacle* sollen drei Kernszenarien näher beschrieben werden, nämlich

- Starkregen
- Aquaplaning
- Nebel

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

Dabei stellen die ersten beiden Szenarien Teilprobleme der Erkennung einer verminderten Traktion des Fahrzeugs (reduced friction) dar, und letzteres ein Teilproblem der verminderten Sicht (reduced visibility). Alle Gefahrenpotenziale sollen dem Fahrer letztlich rechtzeitig vor Erreichen bekannt gemacht werden. Der Einfluss auf das Fahrgeschehen besteht demzufolge entsprechend der in Abschnitt 2.3.3 eingeführten Klassifikation in einer gezielten Beeinflussung der Aufmerksamkeit des Fahrers.

Starkregen

Es existiert aktuell kein Sensorsystem, das unmittelbar die aktuelle Niederschlagsmenge an der Fahrzeugposition bestimmen kann. Zwar sind sog. *Regensensoren* zur automatischen Steuerung der Scheibenwischanlage inzwischen weit verbreitet, gemessen wird jedoch nicht direkt die Niederschlagsmenge, sondern die Feuchtigkeit auf der Oberfläche eines kleinen Bereichs der Frontscheibe. Diese hängt neben der tatsächlichen Niederschlagsmenge auch von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit ab, sowie von weiteren Aspekten wie hohen Luftfeuchtigkeitswerten in Nebelbänken. Für die Steuerung der Scheibenwischanlage ist dies sinnvoll, da das resultierende Verhalten unabhängig von der Art des Niederschlags bzw. der Ursache der Nässe der Frontscheibe (Regen, Schnee, Hagel, Nebel oder Scheibenreinigungsanlage) ist und sich einzig an der Feuchtigkeit der Scheibe bemisst. Für eine zielgerichtete vorausschauende Fahrerinformation ist eine Unterscheidung der Ursachen jedoch von Bedeutung. Eine sichere Unterscheidung der einzelnen Niederschlagsarten ist jedoch auf Basis der üblichen Sensorik nicht möglich. Jedoch ergeben sich auf Basis weiterer möglicher Beobachtungen wie beispielsweise der Temperatur in vielen Fällen deutliche statistische Evidenzen für die einzelnen Hypothesen. Verfügt das Fahrzeug über keinen Regensensor, so ist auch auf Basis der aktuellen manuellen Steuerung der Wischanlage eine probabilistische Aussage hinsichtlich der wahrscheinlichen Niederschlagsmenge möglich. Die Aussagekraft der Schlussfolgerung verringert sich jedoch. Abbildung 5.3 zeigt die Graphenstruktur des resultierenden Bayessches Netzes.

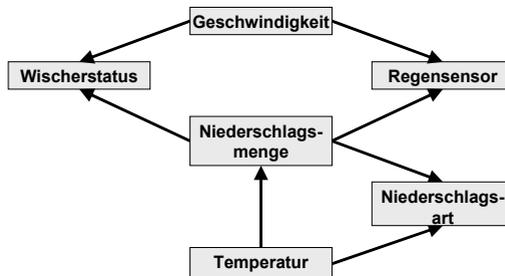


Abbildung 5.3: Qualitativen kausalen Zusammenhänge zur Detektion von (starkem) Regen

Dabei hat die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit Einfluss auf die Niederschlagsmenge auf der Frontscheibe pro festgelegtem Zeitintervall, und damit wiederum auf die automatische oder manuelle Steuerung der Scheibenwischanlage und - falls vorhanden - die

5.2 Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen

konkrete Beobachtung eines Regensensors. Die Außentemperatur hat zudem entscheidenden Einfluss auf die mögliche Niederschlagsart. Der Einfluss ist jedoch beispielsweise in einem Übergangsbereich zwischen Regen und Schnee nicht immer eindeutig sicher bestimmbar, weshalb keine sichere logische Deduktion möglich ist. Gleiches gilt für die Bestimmung der Regenmenge lediglich auf Basis der manuellen Steuerung der Wischanlage, da sich diese individuell und subjektiv unterscheidet. Die hier vorgestellte Detektionsmöglichkeit von Regen ohne speziellen Regensensor ist daher hinsichtlich der Klassifikation aus Abschnitt 2.3.2 zwar fahrzeugkonfigurationsunabhängig, jedoch nicht-deterministisch, da individuelle Eigenschaften des Fahrers das Resultat der Schlussfolgerung beeinflussen. Ist ein Regensensor verfügbar, so führt die Berücksichtigung der Fahrzeuggeschwindigkeit jedoch in diesem Sinne zu einem deterministischen Detektionsverhalten.

Eine weitere Verbesserung der Inferenzergebnisse ist durch die Hinzunahme externer Datenquellen zu erwarten, wie diese beispielsweise von Wetter- oder Telematikdienstleistern angeboten werden. Dies kann strukturell durch einfache Hinzunahme entsprechender Hypothesen erfolgen. Abbildung 5.4 zeigt dies exemplarisch. Wesentlichen Einfluss auf die Regenmenge, die pro Zeiteinheit auf die Windschutzscheibe trifft, hat zudem das von den voraus fahrenden Fahrzeugen aufgewirbelte Spritzwasser [Hub01]. Daraus resultiert, dass auch Kenntnisse über die Beschaffenheit der Fahrbahn, die Regenmenge der nahen Vergangenheit, sowie der Typ des Fahrzeugs und die Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug die Ergebnisqualität deutlich verbessern. Sofern vorhanden, kann dies wiederum in das Bayessche Netz mit einbezogen werden. An dieser Stelle sei daher darauf hingewiesen, dass die isolierte Betrachtung der Scheibenwischersteuerung, unabhängig davon ob diese manuell oder automatisch vorgenommen wird, letztlich für die Sichtbehinderung ein besseres Maß darstellt als für die tatsächliche Niederschlagsintensität.

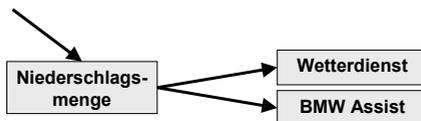


Abbildung 5.4: Integration externer Datenquellen

Wie beschrieben müssen auf Basis der qualitativen Struktur auch die bedingten probabilistischen Abhängigkeiten der Hypothesen beschrieben werden. Dies bedingt aus Komplexitätsgründen eine Diskretisierung der kontinuierlichen Wertebereiche der erforderlichen abhängigen Kontextaspekte. Eine sinnvolle Diskretisierung ergibt sich dabei aus der Analyse der jeweiligen Auswirkungen der einzelnen Hypothesen untereinander, sowie auf das Fahrgeschehen. Eine validierbare Bestimmung der Quantität der bedingten Abhängigkeiten erfordert hingegen eine belastbare Kenntnis der statistischen Zusammenhänge und daher eine ausreichend große Anzahl an repräsentativen Vergleichsmessungen unter Realbedingungen. Unter der Annahme, dass ein solcher Datensatz vorliegt, können die bedingten Wahrscheinlichkeiten auf Basis unterschiedlicher Verfahren automatisch berechnet werden (siehe beispielsweise [Rei06a, Sch07, SG91, CBL97, HTF01, MK96]). Aus technischen Gründen war dies im Rahmen dieser Arbeit

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

jedoch leider nicht möglich. Abbildung 5.5 zeigt daher ohne Einschränkung der Verallgemeinerbarkeit exemplarisch mögliche quantitative Zusammenhänge auf, wobei die spezifischen Werte nicht empirisch validiert sind.

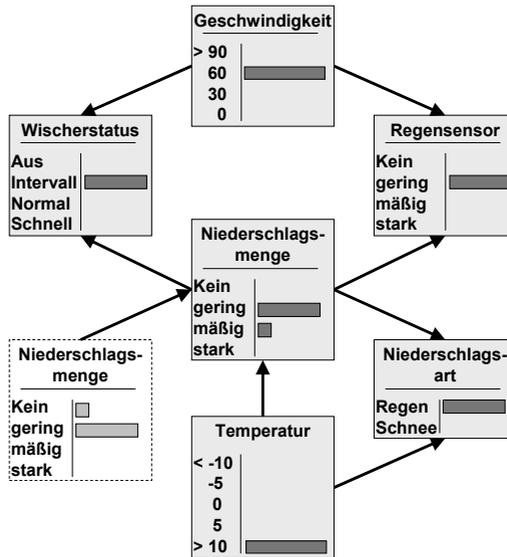


Abbildung 5.5: Vereinfachte quantitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Starkregen

Die Niederschlagsintensität ändert sich entsprechend der eingeführten Terminologie aus Abschnitt 2.3.2 stetig. Aus diesem Grund hat zu den bisher genannten Einflussfaktoren auch der Zustand der Aspekte aus der jüngsten Vergangenheit Einfluss auf die Inferenz der Niederschlagsmenge. Regnet es beispielsweise seit längerer Zeit, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Regen plötzlich aufhört, vergleichsweise gering. Wahrscheinlicher ist eine kontinuierliche Abnahme der Niederschlagsintensität über die Zeit. Wissen über die nahe Vergangenheit beeinflusst also auch die aktuelle Einschätzung. Dies wird in Abbildung 5.5 durch den gestrichelten Niederschlagsknoten repräsentiert. Dieses Verhalten lässt sich wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben in einfacher Weise über diskrete kausale Zeitscheiben im Sinne dynamischer Bayesscher Netze abbilden. Statt einer initialen a-priori Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt dem Schließprozess für die erforderlichen Hypothesen bereits eine gegebenenfalls angepasste Verteilung auf Basis zeitlich zurück liegender Beobachtungen vor. Wie in Abschnitt 5.1.4, erhöht eine derartige zeitliche Entfaltung jedoch die resultierende Netzkomplexität deutlich.

Bayessche Netze bilden die tatsächlichen realen kausalen Abhängigkeiten zwischen den Hypothesen ab. Dies ist für die meisten Anwendungsdomänen notwendig und sinnvoll, da zumeist sowohl jede der Hypothesen potentiell von Interesse ist, als auch für

5.2 Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen

jede Hypothese möglicherweise Evidenz für einen bestimmten Zustand existiert. Im Falle der Deduktion fahrbezogener Aspekte des Fahrzeugkontextes aus im Fahrzeug vorhandenen Sensorsystemen kann das Bayessche Netz jedoch zugunsten einer besseren Performanz auf einen nicht notwendigerweise vollständigen bipartiten Graphen reduziert werden. Dabei werden die Hypothesen, welche mögliche Gefahrenpotenziale repräsentieren, direkt mit den Hypothesen aller beeinflussenden Sensoren verbunden. Diese Sensoren tragen sowohl Evidenzen hinsichtlich der Ursachen, als auch hinsichtlich der Auswirkungen bei. Während beispielsweise ein Regensensor Hinweise auf die Ursache verminderteter Traktion liefert, signalisieren die Raddrehzahlsensoren eine unmittelbare Auswirkung. Aus diesem Grund bildet das resultierende bipartite Bayessche Netz keine realen kausalen Abhängigkeiten ab. Werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten jedoch automatisch aus einem großen realen Testdatensatz auf Basis dieser vorgegebenen Struktur erzeugt, so ändert sich die Aussagekraft der Inferenz gegenüber dem auf Basis realer kausaler Abhängigkeiten strukturierten Netzes nicht. Abbildung 5.6 zeigt exemplarisch die generische Struktur eines solchen bipartiten Bayesschen Netzes, das nicht die realen kausalen Abhängigkeiten abbildet, sondern jeden relevanten Kontextaspekt in direkter Abhängigkeit der beeinflussenden Sensoren.

Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung spielt dabei die Einflussrichtung technisch keine Rolle auf das Ergebnis des Rückschlusses. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich die Propagation von Evidenzen in Abhängigkeit der Einflussrichtung unterschiedlich verhält. Evidenzen liegen ausschließlich für die sensorisch unmittelbar beobachtbaren Kontextaspekte vor. Im Falle einer Beeinflussung von Seiten der Sensorik hin zu den nicht direkt beobachtbaren relevanten Kontextaspekten ergibt sich eine einfache einschichtige (eigentlich kausale) Propagation der Evidenzen. Da keine Evidenz an den nicht-beobachtbaren Hypothesen anliegt, *d-separiert* dieser Knoten alle anderen. Diese sind in Folge aus Sicht des Schließprozesses unabhängig (für eine ausführlichere Betrachtung siehe beispielsweise [Nea04]). Aus anwendungstechnischer Sicht ergibt sich für jeden relevanten Kontextaspekt eine funktionale Abbildung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Zustands in Abhängigkeit des Zustands der beeinflussenden Sensoren. Unter der Annahme einer umgekehrten Richtung der Beeinflussung ändern sich auch die Wahrscheinlichkeiten der direkt sensorisch beobachtbaren Hypothesen, sofern aktuell keine eigenen Evidenzen vorliegen, da hier die nicht beeinflussenden Hypothesen nicht *d-separierend* wirken. Es ergeben sich strukturbedingt Abhängigkeiten zwischen den beobachtbaren Kontextaspekten, wobei deren konkrete Auswertung letztlich nicht notwendig wäre.

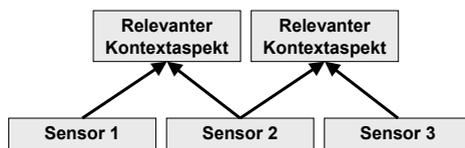


Abbildung 5.6: Bipartite Struktur technischer, nicht-kausaler Abhängigkeiten

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass die Rechenkomplexität der Propagation neuer Evidenz deutlich geringer ist, da weniger Propagationsschritte erforder-

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

derlich sind. Zudem wird es ermöglicht, die einzelnen relevanten Aspekte, die für die Unterstützung des Fahrers von Bedeutung sind, einzeln und unabhängig voneinander zu betrachten. Liegen beispielsweise keine Hinweise auf eine Sichtbeeinträchtigung vor, so ist es nicht notwendig, im Speicher ein entsprechendes Netz vorzuhalten oder fortlaufend neue Sensorevidenzen darin zu propagieren. Sofern gleichzeitig Hinweise auf verschiedene relevante Aspekte existieren, ergeben sich andererseits jedoch Redundanzen, falls jeder Aspekt unabhängig voneinander betrachtet wird. Dies resultiert daraus, dass die Aspekte zumeist von vielen Sensoren beeinflusst werden und sich die Mengen der beeinflussenden Sensoren daher relativ stark überschneiden. Dies gilt insbesondere immer dann, wenn sowohl Ursache als auch Wirkung einen relevanten Aspekt darstellen, wie dies beispielsweise bei Starkregen und Aquaplaning der Fall ist. In Abschnitt 5.5.2 wird in diesem Zusammenhang noch aufgezeigt werden, wie situationsabhängig einzelnen Aspekte in einem gemeinschaftlichen Netz zusammengefügt werden können, um diese Redundanzen zu minimieren.

Zudem werden aufgrund der vielen beeinflussenden Hypothesen die resultierenden Abhängigkeitstabellen der bedingten Wahrscheinlichkeiten sehr groß, da diese wie beschrieben jede Kombinationsmöglichkeit von allen beeinflussenden Einzelhypothesen abbilden müssen. Ein weiterer Nachteil dieser technisch pragmatischen Vorgehensweise ist, dass alle Abhängigkeitsverteilungen aller relevanten Kontextaspekte neu berechnet werden müssen, sobald in der Menge der beeinflussenden Sensoren eine Veränderung auftritt. In diesem Fall müsste erneut ein umfangreicher realer Testdatenbestand erzeugt werden, um die statistischen Abhängigkeiten wiederum automatisch daraus ableiten zu können. Dies gilt insbesondere dann, wenn zusätzlich externe Datenquellen wie Wetter- oder Telematikdienste mit eingebunden sind oder werden sollen. Während sich die im Fahrzeug verbauten Sensoren während des Lebenszyklus eines Fahrzeugs nicht ändern, ist dies für externe Dienste aufgrund des langen Einsatzzeitraums hingegen wahrscheinlich.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Vorgehensweise in vielen Anwendungsdomänen nicht möglich ist, da keine vollständige übergeordnete Datenbasis hierfür existiert bzw. erstellt werden kann. Im Bereich medizinischer Expertensysteme existieren beispielsweise lediglich Studien über bestimmte spezifische Zusammenhänge und Wechselwirkungen. Die gegebenen Ab- und Unabhängigkeiten müssen daher in diesen Fällen weiter explizit modelliert werden.

Eine weitere anwendungsdomänenspezifische Strukturierung ermöglicht eine zusätzliche Reduzierung der Netzkomplexität für Kontextaspekte mit stetiger dynamischer Änderung hinweg über die Zeit. Statt die historische Beeinflussung über Zeitscheiben in einem dynamischen Bayesschen Netz abzubilden, ist es auch möglich, den Einfluss der Veränderung in einem bestimmten Zeitintervall direkt über eine zusätzliche beeinflussende Hypothese abzubilden. Diese Hypothesen repräsentieren nicht den Zustand eines beobachtbaren Kontextaspekts direkt, sondern dessen relevante zeitliche Entwicklung, oder anders ausgedrückt die erste Ableitung der Zeitreihenentwicklung der Sensorbeobachtungen. So kann beispielsweise in einfacher Weise die Hypothese hinsichtlich eines Stauendes unterstützt werden, sofern sich die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs deutlich reduziert.

Nebel

Zur Detektion von Nebel existieren in aktuellen Fahrzeugen wiederum keine dediziert Sensoren. Anders als für die Niederschlagsmenge existiert zudem kein System, das einen vergleichsweise starken Rückschluss darauf zulässt. In Analogie zum Regensensor wäre zur Detektion von Nebel ein Sensor zur Erkennung der Sichtweite wünschenswert. Jedoch gibt es auch für die Detektion von Nebel unterschiedliche Hinweise und Indizien, die sensorisch erfassbar sind und die das Auftreten von Nebel wahrscheinlicher machen. Der stärkste Hinweis ist in vielen Fällen die manuelle Aktivierung der Nebelschlussleuchte. Im Gegensatz zu Nebelscheinwerfern, welche ebenfalls einen Hinweis auf das Auftreten von Nebel liefern, wird die Nebelschlussleuchte in den meisten Fällen in etwa vorschriftsmäßig von den Fahrern eingesetzt, nämlich (in Deutschland) bei Sichtweiten unter 50m und außerhalb geschlossener Ortschaften. Nebelscheinwerfer werden hingegen regional unterschiedlich von einigen Fahrern auch sichtweitenunabhängig eingesetzt. Die Nebelneigung und damit auch eine Sichtweitereinschränkung ließe sich auch auf Basis der aktuellen Luftfeuchtigkeit und Temperatur abschätzen, jedoch verfügen die wenigsten Fahrzeuge über ein entsprechendes Hygrometer. Auch die Aktivierung des Abblendlichtes unter Tags liefert weitere Hinweise auf eine mögliche Sichteinschränkung, sofern nicht gesetzlich ohnehin vorgeschrieben. Sofern verfügbar, kann die Nebelhypothese zudem auf Basis der Jahreszeit, Wetterdaten, Wettervorhersage oder örtlicher Nebelneigung verfeinert werden. Aufgrund der subjektiven Handhabung der vorhandenen Lichtanlagen des Fahrzeugs profitiert die Nebelerkennung im Speziellen von einer Individualisierung der Abhängigkeiten.

Geignete Rückkopplungsmechanismen vorausgesetzt, können diese Abhängigkeiten sukzessive während der Laufzeit des Fahrzeugs auf die jeweiligen Eigenschaften der Fahrer angepasst und so die Aussagekraft des Rückschlusses erhöht werden. Eine weitere Möglichkeit der Individualisierung stellt die Integration einer weiteren Hypothese dar, welche den Einfluss verschiedener Fahrertypen mit berücksichtigt. Dies setzt allerdings die Existenz einer hierfür gültigen Charakterisierung der Fahrer voraus. Ein weiteres hilfreiches Indiz ist zudem die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit in Verbindung mit Kenntnis über die an dieser Stelle üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeiten, da bei Nebel die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Sichtweite in der Regel angepasst wird. Hierfür ist weiterhin Kenntnis über die aktuell gültige Geschwindigkeitsbeschränkung notwendig, sowie gegebenenfalls der Straßentyp und wiederum die individuelle Fahrweise des Fahrers. Auch in diesem Punkt kann also eine Individualisierung des Netzes die Ergebnisqualität verbessern. Auch wenn viele dieser beeinflussenden Aspekte nicht bekannt sind, so ist zumindest bei vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten eine Sichtbehinderung unwahrscheinlich. Die vorgestellte Nebelerkennung ist also wieder im Sinne der Klassifikation aus Abschnitt 2.3.2 fahrzeugkonfigurationsunabhängig und aufgrund der subjektiven Beeinflussung durch den Fahrer nicht-deterministisch.

In Abbildung 5.7 sind die wesentlichen qualitativen Abhängigkeiten nochmals graphisch dargestellt. Die Quantifizierung der bedingten Abhängigkeiten kann wiederum auf Basis eines umfangreichen realen Testdatenbestandes erfolgen, welche, wie beschrieben, idealer Weise später individuell verfeinert werden. Ebenso wie die Detektion für Starkregen kann auch die Hypothese bezüglich der Nebelwahrscheinlichkeit technisch als nicht kausales bipartites Netz dargestellt und der zeitliche Einfluss aufgrund der stetigen Veränderlichkeit auf Basis diskreter Zeitscheiben abgebildet werden. Auch hierbei

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

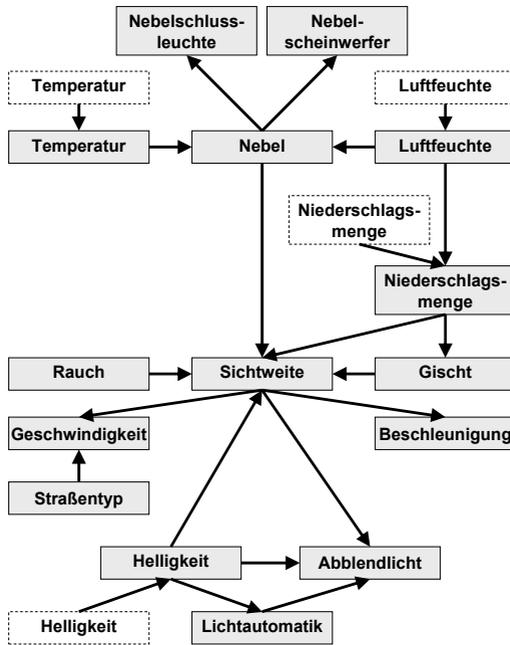


Abbildung 5.7: Qualitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Sichtbehinderung aufgrund von Nebel

ist eine spätere individuelle Anpassung zur Laufzeit möglich.

Abbildung 5.8 zeigt nochmals eine bipartite technische Strukturierung eines Bayesischen Netzes zur Inferenz von Nebel, das zudem implizit eine zeitlich dynamische Integration der Veränderung der Fahrzeuggeschwindigkeit mit einschließt.

Aquaplaning

Aquaplaning ist aktuell von keinem dediziertes Sensorsystem im Fahrzeug direkt beobachtbar. Fahrzeuge, mit elektronischen Fahrdynamikstabilisatoren (DSC/ESP/ASC/TC/ASR/ABS) verfügen über Raddrehzahlsensoren und Beschleunigungsmesser, welche zusammen mit der Aktivierung der regelnden Stabilitätsprogramme Hinweise auf ein mögliches Aufschwimmen der Räder bieten. Diese greifen jedoch auch in vielen anderen Fahrsituationen regelnd ein, weshalb weitere Beobachtungen notwendig sind, um die ursächliche Hypothese des Auftretens von Aquaplaning besser eingrenzen zu können. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das Wasser unter dem Reifen nicht mehr vollständig verdrängt werden kann. Andererseits wird die Geschwindigkeit wiederum von den aktuellen Sichtbedingungen beeinflusst. Im Gegen-

5.2 Individuelle Inferenz der Fahrsituationen mittels probabilistischer Netze auf Basis eigener Beobachtungen

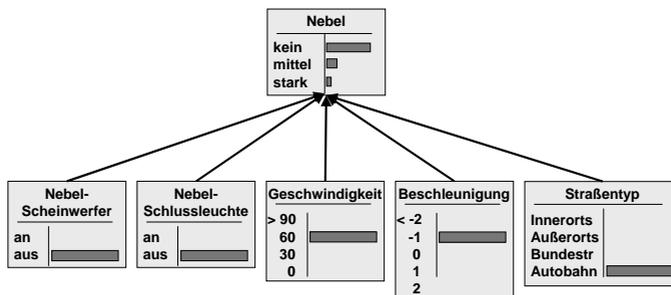


Abbildung 5.8: Bipartite technische Strukturierung eines Bayesschen Netzes zur Inferenz von Nebel

satz zu den zuvor vorgestellten Aspekten Starkregen und Nebel, die jeweils inhärent auch zu einer Sichteinschränkung führen, beeinflussen sich die Hypothesen Aquaplaning und Sichtweite nicht. Jedoch beeinflusst die aktuelle Niederschlagsmenge, sowie die Niederschlagsmenge in der nahen Vergangenheit sehr wohl die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Aquaplaning. Gleiches gilt für die Temperatur, welche einen wichtigen Unterscheidungsfaktor im Hinblick auf einen ebenso nahezu totalen Haftungsverlust der Räder aufgrund von Eisglätte darstellt. Reibwertverminderungen aufgrund von Fahrbahnverschmutzungen oder Laub führen hingegen nicht zu einem vollständigen Haftungsverlust, was wiederum zur Unterscheidung zwischen diesen Ursachen herangeführt werden kann. Abbildung 5.9 zeigt die wesentlichen kausalen Zusammenhänge im Überblick.

Die eindeutige Erkennung wird jedoch dadurch erschwert, dass der Rückschluss auf einer erkennbaren Beeinträchtigung der Fahrstabilität beruht. Auch unter der Annahme gleichbleibender Umweltparameter wie beispielsweise der Wassertiefe auf der Fahrbahn, variiert die resultierende spezifische Beeinträchtigung der betroffenen Fahrzeuge stark. Grund hierfür sind sensorisch nicht beobachtbare oder dem System nicht bekannte Aspekte der konkreten Fahrzeugkonfiguration, wie beispielsweise der Reifentyp bzw. -zustand. Darüber hinaus hat auch die Beladung und Gewichtsverteilung des Fahrzeugs sowie die Antriebsart (Front-, Heck-, Allradantrieb) Auswirkungen auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges. Die vorgestellte Schließmöglichkeit hinsichtlich der Existenz von Aquaplaning ist aufgrund der notwendigen fahrdynamischen Destabilisation des Fahrzeuges im Sinne der Klassifizierung aus Abschnitt 2.3.2 sowohl fahrzeugkonfigurationsabhängig als auch nicht-deterministisch. Im Hinblick auf eine frühzeitige kooperative Situationseinschätzung erschwert dies die Überprüfbarkeit vorausgegangener Beobachtungen. Gleiches gilt für die Erstellung hinreichend umfangreicher realer Testdaten zur automatischen Bestimmung der probabilistischen Abhängigkeiten. Tritt eine fahrdynamische Destabilisation eines Fahrzeuges auf, ist zwar eine qualifizierende Evaluierung hinsichtlich der möglichen Ursachen möglich. Ist dies nicht der Fall, so kann daraus im Umkehrschluss jedoch nicht zwingend auf die Nichtexistenz eines möglichen Gefahrenpotenzials geschlossen werden. Anders ausgedrückt: die gleichen Umweltbedingungen führen zu individuell spezifischen Auswirkungen auf die

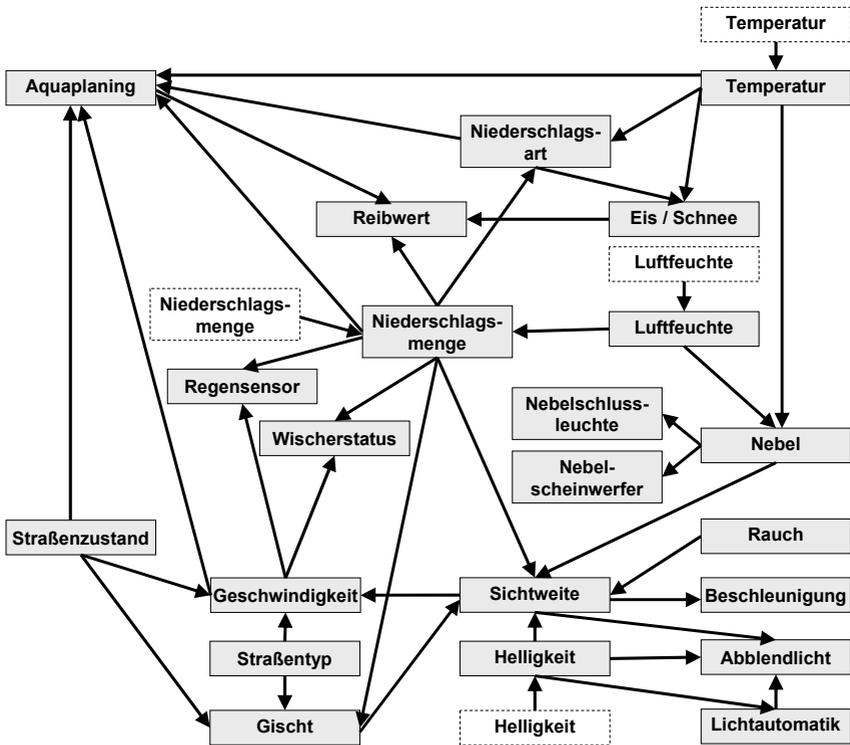


Abbildung 5.9: Qualitative kausale Zusammenhänge zur Detektion von Aquaplaning

Fahrstabilität der Fahrzeuge, was eine Validierung der Beobachtungen erschwert.

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Inferenzmethodik ermöglicht bisher lediglich individuelle und lokale Rückschlüsse der eigenen Fahrsituation. Ihre Gültigkeit beschränkt sich auf den Ort und den Zeitpunkt der Detektion, sowie gegebenenfalls auf die Konfiguration des beobachtenden Fahrzeugs. Ziel ist es, darauf aufbauend mögliche kritische Situationen zu erkennen und anderen Fahrzeugen verfügbar zu machen. Aufgrund der fortlaufenden dynamischen Veränderung der diese Situationen bestimmenden Kontextaspekte über die Zeit reicht eine einmalige Beobachtung offensichtlich

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

nicht aus. Vielmehr müssen fortlaufend relevante Beobachtungen ausgetauscht werden, um bekannte Gefährdungspotentiale hinsichtlich ihrer weiteren Gültigkeit validieren oder gegebenenfalls falsifizieren zu können. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass bestimmte Gefahrenpotenziale wie beispielsweise Fahrbahnhindernisse von einzelnen Fahrzeugen individuell nicht mit ausreichender Sicherheit festgestellt werden können. Mehrere ähnliche unabhängige und sich daher gegenseitig in ihrer Hypothese stützende Beobachtungen erhöhen jedoch die resultierende Eintrittswahrscheinlichkeit. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Beobachtungen zum einen tatsächlich unabhängig voneinander sind. Zum anderen kann ein systematischer Fehler aufgrund falscher Schließalgorithmen nur dann ausgeschlossen werden, falls für den Rückschluss eine andere Datenbasis vorliegt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich ähnliche Hypothesen nicht gegenseitig stützen, falls dem Rückschluss die gleiche Datenbasis zu Grunde liegt. Daraus folgt unmittelbar, dass es nicht zielführend ist, eigene Rückschlüsse anderen Fahrzeugen zu übertragen. Stattdessen werden nur unabhängige Beobachtungen anderen Fahrzeugen zugänglich gemacht und bei der prädiktiven Kontextinferenz berücksichtigt.

Prinzipiell lassen sich dabei wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben zwei Klassen von Gefahrenpotenzialen unterscheiden, nämlich statische Gefahrenquellen einerseits, die ihre Position, Ausdehnung und Intensität während ihrer Existenz über die Zeit hinweg nicht ändern, wie dies beispielsweise bei Aquaplaning der Fall ist, und dynamische Gefahrenpotenziale andererseits. Wichtigste Vertreter dynamischer Gefahrenpotenziale sind dabei wetterbedingte Verkehrsgefährdungen beispielsweise aufgrund von Nebel oder Starkregen. Im Hinblick auf eine belastbare und stabile Vorhersage der Fahrsituation muss daher berücksichtigt werden, dass sich sowohl die aktuelle Fahrzeugposition, als auch insbesondere die Intensität, Ausdehnung und Position möglicher Gefahrenstellen dynamisch über die Zeit ändern kann.

Zudem müssen mögliche räumliche und zeitliche Wechselwirkungen zwischen einzelnen verteilten Beobachtungen berücksichtigt werden. Liegen beispielsweise Beobachtungen hinsichtlich Starkregen an einer bestimmten Position vor, so ist es auch wahrscheinlich, dass es in der nahen Umgebung stark regnet. Zudem erhöht eine entsprechende Beobachtung auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Aquaplaning in der Umgebung. Ein anderes Beispiel ist eine Unfallmeldung, welche die Wahrscheinlichkeit für eine anschließend auftretende Verkehrsbehinderung im Vorfeld der Unfallstelle erhöht. Auch scheinbar statische Ereignisse haben also letztlich in der Anwendungsdomäne räumliche Einflussfaktoren. Ähnliches gilt für den zeitlichen Einfluss von Beobachtungen, welche in Abhängigkeit der charakteristischen Dynamik des Kontextaspekts über die Zeit hinweg an Aussagekraft verliert.

Im Folgenden wird daher ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, räumliche und zeitliche Wechselwirkungen und kausale Einflussfaktoren in einheitlicher Weise zur Vorhersage statischer und dynamischer Gefahrenpotenziale zu berücksichtigen. Zuvor soll jedoch die prinzipielle Vorhersagestrategie bei der Auswertung der dem Fahrzeug bekannten Beobachtungen vorgestellt werden.

5.3.1 Vorhersagestrategie des Fahrkontextes

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist es das Ziel, den Fahrer zum richtigen Zeitpunkt mit der richtigen (Kontext-) Information zu versorgen. Informationen, die für den Fahrer

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

keine Relevanz besitzen, müssen folglich nicht zwingend in guter Qualität vorliegen. Eine prädiktive Inferenz der zukünftigen Fahrsituation bedingt also keine kontinuierliche Auswertung aller der Anwendung zur Verfügung stehenden Beobachtungen. Die Notwendigkeit richtet sich vielmehr nach den individuellen Informationsstrategien der entsprechenden Anwendung. Anders ausgedrückt müssen die jeweiligen Kontextaspekte lediglich dann prognostiziert werden, wenn es die Fahrerinformationsstrategie der Anwendung erfordert. So haben beispielsweise Analysen zum optimalen Warnzeitpunkt vor möglichen Gefahrenstellen ergeben, dass eine zu frühe Information nahezu wirkungslos ist, da sie vom Fahrer schnell wieder vergessen wird (siehe beispielsweise [NRR⁺02]). Eine zu späte Warnung wirkt sich andererseits nachteilig auf das Fahrgeschehen aus.

Generell lässt sich feststellen, dass Kontextinformationen, die eine unmittelbare Aktion des Systems bzw. des Fahrers auslösen sollen, wie beispielsweise schlechte Wetterbedingungen, Unfallstellen oder ähnliches, in der Regel lediglich einige Sekunden vor Eintreten der Situation bekannt sein müssen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die aktuelle Ausprägung dieser Aspekte lediglich für Positionen präzisiert werden muss, die das Fahrzeug in wenigen Sekunden erreichen wird. Der notwendige Vorhersagehorizont beschränkt sich daher in diesen Fällen auf einige wenige hundert Meter vor der aktuellen Fahrzeugposition, abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit. Dabei müssen jedoch mögliche unterschiedliche Fahrtrouten berücksichtigt werden. Die Anzahl der möglichen Fahrtrouten und damit die Anzahl der notwendigen Prädiktionsorte sind aber aufgrund des kurzen Vorhersagehorizonts sehr begrenzt.

Eine weitergreifende Vorhersage ist typischerweise lediglich für eine verkehrsadaptive Navigation nötig, da in diesem Fall der Zeitpunkt der resultierenden Handlungsentscheidung unter Umständen sehr früh sein kann, um rechtzeitig auf eine entsprechend bessere Route ausweichen zu können. Eine verkehrsadaptive Navigation erfordert aber andererseits, dass das Fahrtziel und die Fahrtroute bekannt ist. Hierdurch können wiederum die notwendigen Prädiktionsorte stark eingeschränkt werden.

Es ist daher ausreichend, Kontextaspekte lediglich dann auszuwerten, wenn

- eine oder mehrere Beobachtungen dieses Kontextaspektes, oder Beobachtungen von kausal abhängigen Aspekten, auf den aktuell möglichen Fahrtrouten in der Nähe des aktuellen Aufenthaltsortes existieren, oder
- eine oder mehrere Beobachtungen dieses Kontextaspektes, oder Beobachtungen von kausal abhängigen Aspekten, in der Umgebung der aktuell möglichen Fahrtrouten existieren und diese eine räumliche Ausdehnung aufweisen. Dies betrifft typischerweise kritische Wetterbedingungen wie Starkregen oder Nebel. In diesem Fall ist es zweckmäßig, die Auswertung für frei gewählte Orte auf den möglichen Fahrtrouten in der Nähe der aktuellen Fahrzeugposition zu wählen. Da nicht zu erwarten ist, dass sich in der unmittelbaren Umgebung des präzierten Ortes die Ausprägung dieser Kontextaspekte signifikant ändert, ist es ausreichend, diese Prädiktion in regelmäßigen Abständen mit entsprechend angepassten Prädiktionsorten zyklisch zu wiederholen. Eine kontinuierliche Berechnung für alle möglichen Orte auf den Fahrtrouten ist also nicht notwendig. Verfügt das Fahrzeug über keine digitale Karte kann als Ausweichstrategie auch eine Extrapolation der Fahrzeugposition auf Basis der aktuellen Geschwindigkeit und Fahrtrichtung dienen.

5.3.2 Abbildung räumlicher Zusammenhänge in Bayesschen Netze

Relative räumliche kausale Zusammenhänge können nicht per se mit Bayesschen Netzen abgebildet werden. Jede Hypothese des Netzes bezieht sich letztlich auf eine feste Position und einen fix definierten Zeitpunkt im Modellraum. Eine kontinuierliche lückenlose Abdeckung des Modellraums durch Einzelhypothesen hinsichtlich der relevanten Kontextaspekte führt zu einer unendlichen Anzahl an Hypothesen und ist daher in dieser Weise nicht möglich. Allerdings ist dies in der Praxis auch nicht notwendig. Entscheidend für die Wirksamkeit der prädiktiven Situationseinschätzung ist wie beschrieben lediglich der Bereich in dem sich das Fahrzeug in (naher) Zukunft aufhalten wird. Statt des gesamten Modellraums muss also nur ein räumlich und zeitlich begrenzter, diskret aufgelöster, und daher finiter Ausschnitt des Modellraums betrachtet werden. Zudem ist keine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung erforderlich. Eine diskrete Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmten Zeitpunkten an bestimmten Orten im Verlauf der wahrscheinlichen zukünftigen Fahrtrouten ist aus pragmatischen Gesichtspunkten ausreichend. Die Auswertung der relevanten Hypothesen kann folglich im Hinblick auf wenige diskrete Positionen auf den möglichen zukünftigen Fahrtrouten erfolgen.

Wie eben beschrieben müssen für bestimmte Orte auf den wahrscheinlichen Fahrtrouten räumlich abhängige Hypothesen auch dann ausgewertet werden, wenn im räumlichen (und zeitlichen) Wirkungsbereich dieser Hypothesen entsprechende Beobachtungen desselben oder kausal korrelierter Kontextaspekte bekannt sind. Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft die mögliche räumliche Beeinflussung von Beobachtungen auf die Hypothese an einem ausgewählten Ort auf der eigenen möglichen Fahrtroute, für die selbst keine weitere Beobachtung vorliegt. Auf der wahrscheinlichen Fahrtroute des abgebildeten

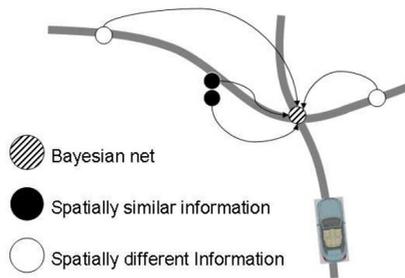


Abbildung 5.10: Räumlicher Einfluss von Beobachtungen

Fahrzeugs (im Beispiel geradeaus Richtung Norden) existieren keine vorangegangenen Beobachtungen anderer Fahrzeuge. Jedoch liegen dem Fahrzeug vier Beobachtungen hinsichtlich einer Sichteinschränkung aufgrund starken Nebels vor, die alle auf anderen Straßenabschnitten beobachtet wurden. Aufgrund der möglichen räumlichen Ausdehnung ist es trotzdem wahrscheinlicher, dass auch auf der eigenen Route eine Sichteinschränkung zu erwarten ist, die dem Fahrer im Vorfeld signalisiert werden sollte. Der konkrete Einfluss hängt dabei von der relativen räumlichen und zeitlichen Lage der

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

Beobachtungen zueinander ab. Dabei repräsentiert der schraffierte Kreis im Beispiel den vom Fahrzeug gewählten Auswertort der Hypothese hinsichtlich des Grades der Sichteinschränkung.

Eine enge zeitliche Korrelation angenommen, erhöhen die beiden weiß dargestellten Beobachtungen die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Sichteinschränkung auf der Fahrtroute deutlich mehr, als die beiden schwarz dargestellten. Erstere deuten aufgrund ihrer gegenseitigen Lage im Vergleich zur eigenen Fahrtroute eher darauf hin, dass auch auf der Fahrtroute Nebel herrscht. Letztere hingegen enthalten mehr Unsicherheit über das Auftreten der Sichtbehinderung. Insbesondere erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Sichteinschränkung lediglich auf das Areal links des Fahrzeugs beschränkt. Zwar erhöht sich offensichtlich die Eintrittswahrscheinlichkeit auf der eigenen Fahrtroute aufgrund der räumlichen Nähe noch immer, im Vergleich mit den weiß markierten Beobachtungen fällt dieser Effekt jedoch geringer aus.

Die unterschiedliche Einflussnahme aufgrund unterschiedlicher Distanz und Lage erfordert eine weitere Strukturierung des Bayesschen Netzes. Eine mögliche weitere räumlich korrelierte Strukturierung des Netzes, die es ermöglicht, auch die relative räumliche Lage von Beobachtungen und Hypothesen mit zu berücksichtigen, ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Dabei werden diskretisierte Beobachtungen aus unterschiedli-

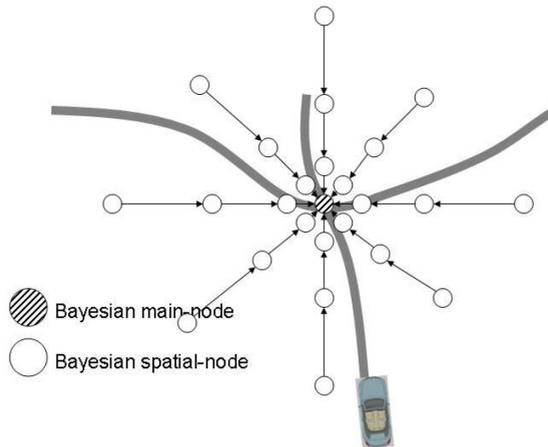


Abbildung 5.11: Räumliche Strukturierung eines Bayesschen Netzes zur Modellierung räumlichen Einflusses zwischen Beobachtungen und Hypothesen

chen Richtungen und mit unterschiedlicher Entfernung einer vorgegebenen Hypothese mit dedizierten relativen Orten assoziiert. Im Beispiel werden acht Einflussrichtungen angenommen, sowie drei unterschiedliche Einflussdistanzen. Existierende Beobachtungen anderer Fahrzeuge werden anhand ihrer geographischen Position einem der resultierenden 24 kreisförmig angeordneten Hypothesenorte zugeordnet. Auf diese Weise kann näherungsweise der Einfluss der relativen Lage und Distanz von entfernten Hypothesen

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

mittels Bayesscher Netze abgebildet werden. Nachteilig wirkt sich hingegen die signifikant höhere Komplexität des resultierenden Bayesschen Netzes aus, das entsprechend um Faktor 24 an Größe zunimmt. Zusammen mit der aufgrund zeitlicher Wirkzusammenhänge notwendigen zusätzlichen zeitlichen Entfaltung sind die resultierenden Netze aufgrund ihrer Größe praktisch nicht mehr einsetzbar, da sich die Komplexität nochmals um den Faktor der eingesetzten Zeitscheiben vergrößert (siehe Abbildung 5.12). Räumliche Einflussfaktoren, insbesondere die relative Distanz oder Lage zweier Beob-

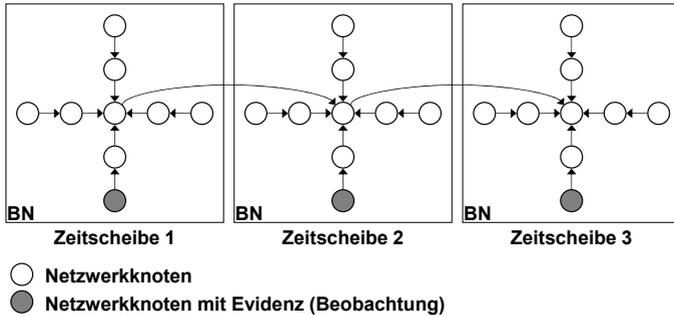


Abbildung 5.12: Zeitliche Entfaltung Bayesscher Netze

achtungen sowie die Form und Bewegung eines Gefahrenpotenzials, können mit Hilfe Bayesscher Netze also nur unzureichend abgebildet werden. Gerade räumliche Einflüsse sind zudem wie im Beispiel von Nebel gegenseitiger Natur, das heißt zwei räumlich und zeitlich nahe zusammenliegende Nebelbeobachtungen stützen sich gegenseitig in ihrer Hypothese. Bayessche Netze bilden jedoch lediglich einen gerichteten einseitigen kausalen Zusammenhang ab. Eine gegenseitige Beeinflussung würde unmittelbar zu einem unerlaubten Zyklus führen (siehe Abbildung 5.13). Um dies zu vermeiden kann

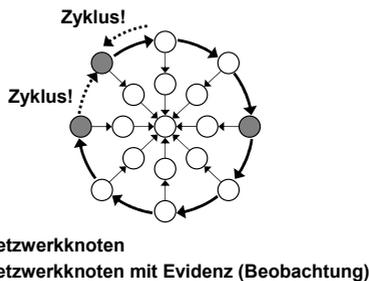


Abbildung 5.13: Zyklusbildung bei Abbildung eines gegenseitigen räumlichen Einflusses zwischen Beobachtungen und Hypothesen

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

dieses Kontextaspekts am eigenen Aufenthaltsort mit einbezogen. Diese Beobachtungen haben einen räumlichen und zeitlichen Einfluss auf das angrenzende Gebiet. Der konkrete Einfluss variiert dabei entsprechend der spezifischen Charakteristika des Kontextaspekts und bemisst sich neben der räumlichen und zeitlichen Distanz zudem auf Basis der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Vertrauens in die Richtigkeit der Beobachtung. Entscheidend für den räumlichen und zeitlichen Einfluss ist dabei nicht die beobachtete *Intensität* des Kontextaspekts, sondern vielmehr die Qualität der Beobachtung. Eine Beobachtung, die aktuell 4 Liter Regen pro Quadratmeter pro Stunde, mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 80% zusichert, sollte demzufolge beispielsweise stärker in das interpolierte Schließergebnis eingehen als eine Beobachtung, deren Beobachtungsort in etwa gleich weit entfernt ist, jedoch lediglich mit 10%iger Eintrittswahrscheinlichkeit zusichert, dass dort aktuell 1 Liter Niederschlag pro Quadratmeter pro Stunde auftritt.

Dabei wirkt das *Vertrauen* in eine Beobachtung als zusätzlicher Hebel. Das Vertrauen spiegelt unter anderem die Anzahl und Qualität der einer Beobachtung zugrunde liegenden Sensorsysteme wider. Ein weiterer Faktor, der das Vertrauen in die Beobachtungen anderer Fahrzeuge beeinflusst, kann zudem deren Reputation sein (eine weiterführende Beschreibung des Einsatzes von Reputationsverfahren in automobilen Ad-hoc Netzen findet sich beispielsweise in [Mag04]). So ist es beispielsweise möglich, Beobachtungen unterschiedlicher Fahrzeugklassen oder -hersteller, oder externer Informationsanbieter, unterschiedliches Gewicht im Schließverfahren zu gewähren. Bereits extern verifizierte Informationen können so privilegiert in den Schließprozess mit einbezogen werden. Beispielsweise besitzen manuell von autorisierten Einsatzkräften verbreitete Beobachtungen in der Regel uneingeschränktes Vertrauen.

Aus diesem Grund ist es nicht möglich, eine einfache Interpolation zwischen den jeweils nächstgelegenen Beobachtungsorten durchzuführen. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass an einem Ort widersprüchliche Aussagen hinsichtlich eines Kontextaspektes existieren, welche zwar gleiches Vertrauen und gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen, jedoch eine unterschiedliche Ausprägung. Dies führt zu vergleichsweise steilen Flanken, die das Interpolationsergebnis bei widersprüchlichen Beobachtungen einseitig negativ beeinflussen. Statt einer klassischen Interpolation soll daher, ähnlich der sogenannten *Multi Attribute Utility Theory* (MAUT) [KM02, Kra03] eine gewichtete Durchschnittssumme sowohl zur Berechnung der erwarteten Ausprägung eines Kontextaspektes an einer beliebigen Position im Modellraum, als auch der zu erwartenden resultierenden Eintrittswahrscheinlichkeit dienen.

Bezeichne daher wiederum wie in Abschnitt 3.1.2

- \bar{X}_j die Menge der verfügbaren Beobachtungen des Kontextaspektes x_j ,
- $\bar{x}_j^i \in \bar{X}_j$ eine Beobachtung des Kontextaspektes $x_j \in X^b$,
- \hat{x}_j^i den Parameterwert der Beobachtung \bar{x}_j^i mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit, sowie
- $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j^i}$ die Eintrittswahrscheinlichkeit der wahrscheinlichsten Ausprägung \hat{x}_j^i von x_j auf Basis der Beobachtung \bar{x}_j^i .

Bezeichne ferner

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

- $rel(\bar{x}_j^i)$ das Vertrauen in die Richtigkeit einer Beobachtung,
- $dist_A^{x_j} : \mathbb{R}^+ \rightarrow [0, 1]$ die aspektspezifische Abbildung des Einflusses der räumlichen Distanz auf die Aussagekraft der Beobachtung,
- $dist_T^{x_j} : \mathbb{R}^+ \rightarrow [0, 1]$ die aspektspezifische Abbildung des Einflusses des Beobachtungsalters (zeitliche Distanz) auf die Aussagekraft der Beobachtung,
- $\Delta pos(\bar{x}_j^i)$ die (logische) räumliche Distanz des Beobachtungsortes von \bar{x}_j^i zum Auswertort,
- $\Delta time(\bar{x}_j^i)$ das Alter der Beobachtung \bar{x}_j^i ,
- $inf(\bar{x}_j^i)$ die konsolidierte Aussagekraft einer Beobachtung, sowie
- \hat{x}_j die erwartete wahrscheinlichste Ausprägung des interpolierten Kontextaspektes x_j .

Die erwartete wahrscheinlichste Ausprägung \hat{x}_j des interpolierten Kontextaspektes x_j an einem beliebigen Ort *PoI* des Modellraums berechnet sich entsprechend dieser Überlegungen, sowie unter Berücksichtigung der Vorüberlegungen aus Abschnitt 3.1.2, durch das normalisierte gewichtete Produkt der konsolidierten Aussagekraft aller verfügbaren Beobachtungen $\bar{x}_j^i \in \bar{X}_j$. Es gilt somit:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{\sum_{\bar{x}_j^i \in \bar{X}_j} inf(\bar{x}_j^i)} \cdot \sum_{\bar{x}_j^i \in \bar{X}_j} inf(\bar{x}_j^i) \cdot \hat{x}_j^i, \text{ mit}$$

$$inf(\bar{x}_j^i) = rel(\bar{x}_j^i) \cdot p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j^i} \cdot dist_A^{x_j}(\Delta pos(\bar{x}_j^i)) \cdot dist_T^{x_j}(\Delta time(\bar{x}_j^i)).$$

Dabei können sowohl Beobachtungen statischer als auch dynamischer Kontextaspekte in gleicher einheitlicher Weise miteinander verrechnet werden. Bei statischen Kontextaspekten, wie beispielsweise einer gemeldeten und später von anderen Fahrzeugen bestätigten Unfallstelle, kann angenommen werden, dass keine räumliche Distanz vorliegt. Eine entsprechende Vorverarbeitung der Beobachtungsorte, die aufgrund von Messungenauigkeiten etwas voneinander abweichen, wird durch die gewichtete Mittelwertbildung automatisch ausgeglichen. Es muss jedoch weiterhin sicher gestellt werden, dass keine eigentlich unabhängigen Ereignisse wie beispielsweise zwei unterschiedliche Unfallstellen miteinander verrechnet werden. Gleiches gilt für sich bewegende Kontextaspekte wie beispielsweise sich sehr langsam bewegende Fahrzeuge auf Autobahnen (z.B. Schwerttransporter). Hier unterstützt die zusätzliche zeitliche Gewichtung die Bewegungstendenz, wobei ohne gezielte Vorverarbeitung die resultierende wahrscheinlichste Position immer etwas hinter der tatsächlichen Position nachläuft, da ältere Beobachtungen zu einer geringen verfälschenden Ausmittlung des aktuellsten Beobachtungsorts führen. Diejenigen Beobachtungen, deren Einfluss beispielsweise aufgrund einer zu großen räumlichen Distanz unter praktischen Gesichtspunkten keinen Einfluss auf das

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

Ergebnis haben, können dabei unberücksichtigt bleiben. Die beiden Gewichtungsfunktionen $dist_A^{x_j}$ und $dist_T^{x_j}$ spezifizieren den kontextaspektspezifischen räumlichen und zeitlichen Einfluss.

Dieser kann prinzipiell einen beliebigen, jedoch üblicherweise stetigen, Funktionsverlauf aufweisen. In den in Abschnitt 5.6 beschriebenen Simulationen haben sich sowohl lineare als auch sigmoidale Funktionstypen als vielversprechend erwiesen, wie diese beispielsweise auch im Zusammenhang mit der Betrachtung der Entwicklung des Informationsnutzens von Kosch [Kos04a] bereits beschrieben wurden (siehe hierzu auch die Erläuterungen hinsichtlich der Nutzendifferenzierung in Abschnitt 6.3.2). Dabei sei angemerkt, dass die räumliche Distanz nicht zwingend der Euklidischen Distanz im Modellraum entspricht. Vielmehr kann die räumliche Distanz auch auf Basis einer logischen Geometrie berechnet werden, die beispielsweise verschiedene Fahrspuren oder bauliche Maßnahmen zur Fahrtrichtungstrennung mit berücksichtigt. Ein Unfall auf einer Autobahn hat beispielsweise keine unmittelbaren Auswirkungen auf den Gegenverkehr. Die logische räumliche Distanz lässt sich hier auf Basis der minimalen Fahrtstrecke bis zur Unfallstelle bemessen. Für Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn, oder Fahrzeuge, die die Unfallstelle bereits passiert haben, entspricht diese Distanz der Distanz bis zur nächsten Umkehrmöglichkeit und zurück. Sie ist daher deutlich größer als die Euklidische Distanz. Bei wetterbedingten Kontextaspekten wie Starkregen gilt dies offensichtlich nicht. Da die mögliche räumliche Ausdehnung unabhängig vom Straßenverlauf ist, bemisst sich die räumliche Wirkung folglich anhand der Euklidischen Distanz.

Schwieriger gestaltet sich indes die weitere Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$ dieser wahrscheinlichsten Ausprägung \hat{x}_j . Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich unabhängige ähnliche Beobachtungen gegenseitig stützen. Umgekehrt sinkt jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeit, falls sich widersprechende Beobachtungen vorliegen. Zur Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit muss daher auf gleicher Basis zudem auch ein Maß für die Widersprüchlichkeit der Beobachtungen mit berücksichtigt werden. Je größer dabei die Widersprüchlichkeit der Beobachtungen ausfällt, desto geringer ist die resultierende Eintrittswahrscheinlichkeit des interpolierten Kontextaspektes. Eine naheliegende Metrik aus der Statistik ist in diesem Zusammenhang die Varianz, welche die Streuung einer Zufallsvariable quantifiziert. Dies ist in sehr ähnlicher Form für die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit übertragbar, wobei dem Erwartungswert in diesem Falle offensichtlich genau \hat{x}_j entspricht. Auch hier gilt, dass die Aussagekraft einer Beobachtung mit zunehmender Distanz und zunehmendem Alter geringer wird. Daher muss auch eine mögliche Abweichung alter und weit entfernter Beobachtungen entsprechend abgeschwächt in das Varianzmaß einbezogen werden.

Die maßgebliche Varianz hängt dabei neben der Streuung der Beobachtungen auch von der Anzahl der unabhängigen Beobachtungen und dem höchsten Vertrauen in eine Einzelbeobachtung ab. Je mehr Beobachtungen vorliegen, desto wahrscheinlicher liegt die reale Ausprägung tatsächlich zwischen den vorliegenden Beobachtungswerten. In ähnlicher Weise erhöht sich die Aussagekraft auch in Abhängigkeit der maximalen Aussagekraft einer der zugrunde liegenden Beobachtungen. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird die Varianz in Abhängigkeit dieser beiden Faktoren konsolidiert. Bezeichne

- $|\bar{X}_j|$ die Anzahl der verfügbaren Beobachtungen des Kontextaspektes x_j ,
- $inf_{\bar{X}_j}^{max}$ die maximale konsolidierte Aussagekraft einer Beobachtung \bar{x}_j^i des Kon-

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

textaspektes x_j ,

- $\sigma_{\bar{X}_j}^2$ die gewichtete Varianz der $|\bar{X}_j|$ Beobachtungen des Kontextaspektes x_j , sowie
- $con^{x_j} : \mathbb{N}^+ \times [0; 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$ eine aspektsspezifische Konsolidierung der Varianz auf Basis der Anzahl der Beobachtungen, sowie der maximalen konsolidierten Aussagekraft der Beobachtungen. Typischerweise weist eine derartige Konsolidierung die Form $con^{x_j}(|\bar{X}_j|, inf_{\bar{X}_j}^{max}) = \frac{a}{|\bar{X}_j|} \cdot \left(\frac{b}{inf_{\bar{X}_j}^{max}} - b \right)$ auf. Die Parameter a und b charakterisieren dabei die aspektsspezifische asymptotische Näherung in Abhängigkeit der Anzahl an Beobachtungen (a) sowie der maximalen konsolidierten Aussagekraft (b). Abbildung 5.15 zeigt einen exemplarischen Kurvenverlauf der Varianzkonsolidierung. Da die Anzahl der Beobachtungen ganzzahlig ist, ergibt sich in dieser Dimension implizit ein diskreter Charakter. Unter der Annahme einer weiteren angemessenen Diskretisierung der zweiten Dimension kann die Funktion im Hinblick auf die Ressourcenbeschränkung eingebetteter Fahrzeugsysteme über einfache Tabellenabgleiche erfolgen. Die Zahl der Tabellen entspricht dabei der maximal zu erwartenden bzw. maximal hilfreichen Zahl der Beobachtungen.

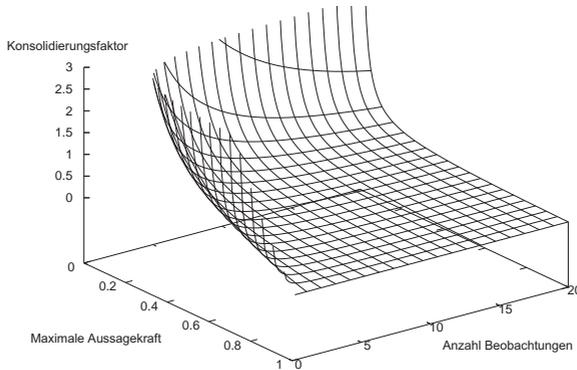


Abbildung 5.15: Aspektsspezifische Konsolidierung der Varianz auf Basis der Anzahl der Beobachtungen, sowie der maximalen konsolidierten Aussagekraft der Beobachtungen

Dann gilt:

$$\sigma_{\bar{X}_j}^2 = con^{x_j} \left(|\bar{X}_j|, inf_{\bar{X}_j}^{max} \right) \cdot \left(\sum_{\bar{x}_j^i \in \bar{X}_j} \left(\hat{x}_j^i - \hat{\bar{x}}_j^i \right)^2 \cdot inf(\bar{x}_j^i) \right).$$

5.3 Kooperative Inferenz der Fahrsituationen auf Basis räumlich und zeitlich verteilter Beobachtungen

Unter der Annahme einer Normalverteilung fehlerhafter Beobachtungen ergibt sich auf Basis der Beobachtungsvarianz schließlich ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit der gemittelten erwarteten Ausprägung des Kontextaspektes. Analog der in Abschnitt 3.1.2 erläuterten Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$ dafür, dass der beobachtete Wert \hat{x}_j nicht weiter als eine definierte Distanz $\Delta\delta$ vom realen Parameterwert abweicht, ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit $p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j}$ des gewichteten Mittelwerts \hat{x}_j :

$$p_{\Delta\delta}^{\hat{x}_j} = \int_{\hat{x}_j - \Delta\delta}^{\hat{x}_j + \Delta\delta} N(\hat{x}_j, \sigma_{\hat{X}_j}^2) = \int_{\hat{x}_j - \Delta\delta}^{\hat{x}_j + \Delta\delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_{\hat{X}_j}^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - \hat{x}_j}{\sqrt{\sigma_{\hat{X}_j}^2}}\right)^2} dx.$$

Je größer die Varianz der Beobachtungen ist, desto größer ist bei gleicher Wahrscheinlichkeit das Konfidenzintervall $2 \cdot \Delta\delta$ und desto geringer ist in Folge auch die resultierende Aussagekraft des gewichteten Mittelwerts. Die Eintrittswahrscheinlichkeit gilt in gleicher Weise auch für Kontextaspekte mit diskretem oder binären Wertebereich. Unter der Annahme einer linearen Ordnung der diskreten Zustandswerte und einer bijektiven Abbildung in eine finite Teilmenge der natürlichen Zahlen gilt, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Zustands dem Integral über dem Intervall zwischen zwei Zuständen entspricht, d.h. $\Delta\delta = 0,5$. An den Intervallgrenzen des Wertebereiches der bijektiven Abbildung gilt das Integral von $-\infty$ bzw. bis ∞ . Abbildung 5.16 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch am Beispiel einer vierstufigen Diskretisierung der Regenintensität (0=kein Regen, 1=wenig Regen, 2=mittelstarker Regen, 3=starker Regen).

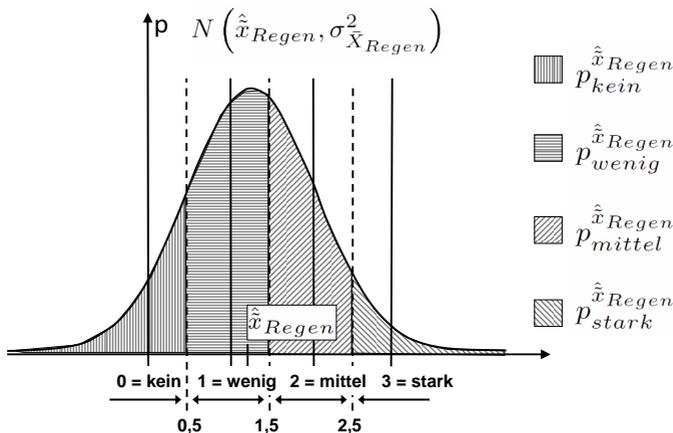


Abbildung 5.16: Eintrittswahrscheinlichkeit von Regen auf Basis einer vierstufigen Diskretisierung der Regenintensität

Die Repräsentation als sogenanntes *Wahrscheinlichkeitsgebirge* bietet im Hinblick

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

auf die inhärente Situationsdynamik den Vorteil, dass sie sich automatisch und nahtlos an beobachtete Veränderungen anpassen kann. Erhält ein Fahrzeug neue Beobachtungen, so wird ein neuer *Stützpunkt* des Wahrscheinlichkeitsgebirges eingefügt. Stützpunkte können entsprechend auch wieder entfernt werden, wenn beispielsweise aufgrund des Alters kein oder ein nur sehr geringes Vertrauen in die Richtigkeit der Beobachtung existiert. Existieren viele, räumlich nahe gelegene, ähnliche und sich daher verstärkende Beobachtungen zu einem Kontextaspekt, so können diese zusammengefasst werden, um die Rechenkomplexität weiter zu reduzieren. Das Resultat der Zusammenfassung entspricht dabei dem Durchschnitt an Intensität, Wahrscheinlichkeit und Vertrauen in die Beobachtung. Um eine Untergewichtung der Menge von Beobachtungen bei der gewichteten Interpolation zu vermeiden, muss jedoch hierbei die Anzahl der zusammengefassten Beobachtungen bei der Summenbildung mit berücksichtigt werden. Die Größe des Gebietes, in dem ähnliche Beobachtungen zusammengefasst werden können, kann dabei wiederum mit zunehmender Distanz zur aktuellen Fahrzeugposition vergrößert werden. Die durchschnittsbildende Zusammenfassung vermindert jedoch die Genauigkeit des Interpolationsergebnisses. Es gilt andererseits, dass mit zunehmender Entfernung zur Fahrzeugposition die notwendige Genauigkeit der Situationsinferenz abnimmt. Auf Basis der in Abschnitt 3 vorgestellten möglichen generischen Datenhaltung, welche diese Eigenschaft bereits bei der lokalen Speicherung der verteilten Beobachtungen berücksichtigt, ergibt sich implizit eine dynamische räumliche Strukturierung zum Zusammenfassen ähnlicher Beobachtungen.

5.3.4 Wechselwirkungen von Kontextaspekten

Für jeden Kontextaspekt (zu dem in der Vergangenheit bereits Beobachtungen von anderen Fahrzeugen bekannt sind) existiert ein solches Wahrscheinlichkeitsgebirge. Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich dabei auf einen bestimmten Kontextaspekt. Genau genommen spannt sich je ein Wahrscheinlichkeitsgebirge pro relevantem Kontextaspekt über dem Modellraum auf. Zudem existiert eine Reihe von Wechselwirkungen und kausalen Abhängigkeiten auch zwischen den einzelnen Kontextaspekten. Beispielsweise ist das Auftreten einer Aquaplaningefahr wie beschrieben dann wahrscheinlicher, wenn zuvor eine große Niederschlagsmenge aufgetreten ist.

Die Qualität der Vorhersage kann verbessert werden, wenn auch die kausalen Abhängigkeiten mit berücksichtigt werden. Eine derartige Quervalidierung kann dadurch realisiert werden, dass sich der eben beschriebenen interpolierten Abschätzung der einzelnen Kontextaspekte eine kausale Konsolidierung auf Basis der bekannten Abhängigkeiten zwischen den Kontextaspekten anschließt, wie diese in Abschnitt 5.2.2 exemplarisch vorgestellt wurden. Auf diese Weise können auch sich widersprechende Vorhersagen aufgedeckt werden, was letztlich jedoch zu einer Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit der sich widersprechenden Aspekte führt. Die Hypothesen werden in diesem Fall also (wie gefordert) weniger aussagekräftig.

Durch die gewichteten Interpolationen lässt sich für jeden beliebigen Ort für jeden Kontextaspekt jeweils eine Eintrittswahrscheinlichkeit für die wahrscheinlichste Ausprägung ableiten. Darauf aufbauend lässt sich für einen spezifischen Ort (*PoI*) mit Hilfe der üblichen Bayesschen Netze, wie diese bereits in Abschnitt 5.2 vorgestellt wurden, eine kausale Konsolidierung durchführen (siehe Abbildung 5.17). Falls vorhanden, können dabei neben den Abschätzungen der aktuellen Ausprägung zudem weitere

5.4 Repräsentation kausaler Abhängigkeiten in OWL-DL

Offensichtlich muss das Wissen hinsichtlich der kausalen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Beobachtungen und Kontextaspekten im Fahrzeug verfügbar sein. Idealerweise wird dieses Domänenwissen in gleicher Weise wie das dynamische Instanzwissen, also insbesondere wie die bekannten Beobachtungen, verwaltet und gespeichert. Das hierzu in Abschnitt 3.3 vorgestellte Fahrzeugkontextmodell ist wie beschrieben ontologiebasiert, wobei die verwalteten Beobachtungen mit Hilfe von OWL-DL syntaktisch im Rechner repräsentiert werden.

Im Zusammenhang mit der ontologiebasierten Verwaltung von Expertenwissen haben beispielsweise Helsper und van der Gaag aufgezeigt, auf welche Weise Domänen- und Expertenwissen mit Hilfe von Bayesschen Netzen kodiert und als Ontologie abgebildet werden kann [Hv03], und wie ontologiebasiertes Wissen andererseits genutzt werden kann, um hieraus wiederum die Struktur Bayesscher Netze herzuleiten [Hv02]. Jedoch zielt die dort vorgestellte Methodik darauf ab, auf Basis der verwendeten Ontologie architekturelle Fehler in Bayesschen Netzen aufzudecken und darauf aufbauend ein verbessertes Netz zu erzeugen.

In der dieser Arbeit zugrunde liegenden Anwendungsdomäne erscheint es aufgrund der begrenzten Betriebsmittel in eingebetteten Fahrzeugsystemen sinnvoller, das bekannte Domänenwissen hinsichtlich der kausalen Abhängigkeiten direkt im ontologiebasierten Fahrzeugkontextmodell zu verwalten. Ausgehend von einem oder mehreren strukturell fehlerfreien Bayesschen Netzen sollen daher insbesondere

- die kausalen Abhängigkeiten zwischen Beobachtungen und Kontextaspekten direkt im Fahrzeugkontextmodell abgebildet, sowie daraus
- bei Bedarf situationsadaptiv dynamisch die aktuell notwendigen Bayesschen Netze instanziiert werden.

Die so erzeugten Bayesschen Netze sollten im Hinblick auf die begrenzten Ressourcen zudem so wenig Knoten (Hypothesen) und Kanten wie möglich enthalten.

Im Folgenden soll aufbauend auf den Überlegungen aus Abschnitt 3.3 dargestellt werden, wie das notwendige spezielle Domänenwissen hinsichtlich der Abhängigkeiten fahraufgabenbezogener Kontextaspekte auf Basis des Fahrzeugkontextmodells abgebildet und situationsadaptiv dynamisch instanziiert werden kann. Das dargestellte Verfahren stützt sich dabei auf Ergebnisse aus [Tau07].

Zur Veranschaulichung der folgenden Beschreibung soll exemplarisch das in Abbildung 5.18 dargestellte stark vereinfachte Bayessche Netz zur Detektion verminderter Fahrbahntraktion (Reduced Friction) dienen, welches lediglich die beeinflussenden Hypothesen Regen und Eis berücksichtigt. Abbildung 5.19 zeigt zudem die hierzu umgesetzte OWL-DL Datenstruktur. Für jeden Knoten des Bayesschen Netzes wird ein Objekt vom Typ `CPT` instanziiert. Dieses `CPT`-Objekt enthält dabei folgende Einträge:

- Eine Identifikation hinsichtlich des beschriebenen Ereignis- bzw. Kontextaspekts (`hasEventType`).
- Eine Liste der möglichen Zustände (bzw. Zustandsobjekte `CPTState`) des Kontextaspekts, also eine explizite Spezifikation der Einzelhypothesen bezüglich

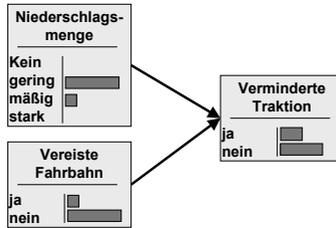


Abbildung 5.18: Exemplarisches (vereinfachtes) Bayessches Netz zur Detektion vermindertener Fahrbahntraktion

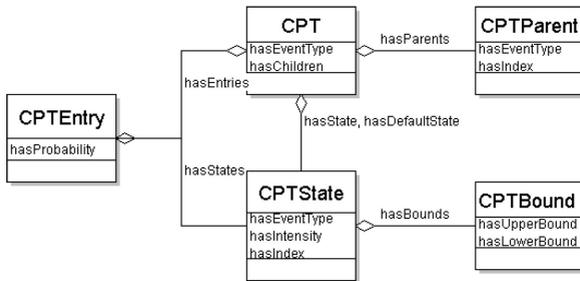


Abbildung 5.19: Repräsentation Bayesscher Netze in OWL-DL

des möglichen Eintretens (`hasStates`). Diese Zustandsobjekte sind definiert durch den zugehörigen Typ sowie einer eindeutigen Indexnummer des Zustands. Im Falle einer Diskretisierung eines eigentlich kontinuierlichen Wertebereichs wird über sogenannte `CPTBounds`-Objekte eine Unter- und Oberschranke des Intervalls bestimmt, welches diesen Zustand eindeutig spezifiziert (siehe Abbildung 5.22).

- Einen Verweis auf den a-priori wahrscheinlichsten Zustand (`hasDefaultState`).
- Je eine Liste mit Verweisen auf die Kind- bzw. Elternknoten (`hasChildren` bzw. `hasParent`). Die so assoziierten Elternknoten (`CPTParent`) sind definiert durch ihren Ereignistyp und den zugehörigen Index des jeweiligen Knotens (siehe Abbildung 5.23). Um später eine fehlerfreie Rekonstruktion des Netzes zu ermöglichen, muss die Indexposition in der Datenstruktur abgelegt werden. Der Index spezifiziert dabei eine willkürliche aber feste Reihenfolge der Elternknoten.
- Eine Liste aller Einträge der zugehörigen Abhängigkeitstabelle (`CPTEntry`), wobei jeder Eintrag genau eine Zelle in der mit dem Knoten assoziierten Ab-

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

```
1 <CPT rdf:ID="CPT_Ice">
2   <hasEventType rdf:resource="#EventType_Ice" />
3   <hasStates rdf:resource="#CPTState_Ice_1" />
4   <hasStates rdf:resource="#CPTState_Ice_0" />
5   <hasEntry rdf:resource="#CPTEntry_Ice_1" />
6   <hasEntry rdf:resource="#CPTEntry_Ice_0" />
7   <hasDefaultState rdf:resource="#CPTState_Ice_1" />
8   <hasChildren rdf:resource="#EventType_ReducedFriction" />
9 </CPT>
```

Abbildung 5.20: Beispiel der Kodierung eines CPT-Objektes in OWL-DL

hängigkeitstabelle beschreibt (siehe Abbildung 5.21). Der Zustand bzw. das Zustandsobjekt `CPTState` eines Knotens wird dabei durch die Zustände der Elternknoten beeinflusst. Über diese Zustandsobjekte kann wiederum der Index des Eintrags in der Abhängigkeitstabelle eindeutig abgebildet werden. Das `CPTEntry`-Objekt enthält zudem den mit dem Index der Abhängigkeitstabelle korrelierten Wahrscheinlichkeitswert.

```
1 <CPTEntry rdf:ID="CPTEntry_Rain_1">
2   <hasStates rdf:resource="#CPTState_Rain_1" />
3   <hasProbability>
4     <Probability rdf:ID="Probability_Rain_0">
5       <percentage rdf:datatype="xsd:float">0.1</percentage>
6     </Probability>
7   </hasProbability>
8 </CPTEntry>
```

Abbildung 5.21: Beispiel der Kodierung eines CPTEntry-Objektes in OWL-DL

Ein gegebenes Bayessches Netz kann dabei durch Iteration über alle Knoten nach OWL-DL konvertiert und so in das Fahrzeugkontextmodell eingebunden werden.

5.5 Ein Overlay-Bayesnetz über dem VCM

Auf Basis der expliziten Repräsentation der kausalen Abhängigkeiten im Fahrzeugkontextmodell kann dynamisch für einen bestimmten *PoI* des Modellraums ein knotenminimales Bayessches Netz erzeugt werden, welches nur Hypothesen bereits bekannter Beobachtungen enthält.

5.5.1 Generierung der Netzstruktur und Initialisierung der Einträge der bedingten Wahrscheinlichkeiten

Das Bayessche Netz wird hierbei durch eine rekursive Instanziierung der bezüglich des auszuwertenden Kontextaspekts gespeicherten CPT Eltern- und Kindknoten erzeugt.

```

1 <CPTState rdf:ID="CPTState_Rain_1">
2   <hasEventType>
3     <EventType rdf:ID="EventType_Rain">
4       <eventType rdf:datatype=
5         "xsd:string">Rain</eventType>
6     </EventType>
7   </hasEventType>
8   <hasIndex>
9     <CPTIndex
10      rdf:ID="CPTStateIndex_Rain_1">
11        <index rdf:datatype=
12          "xsd:int">1</index>
13      </CPTIndex>
14    </hasIndex>
15  <hasIntensity>
16    <Intensity
17      rdf:ID="CPTIntensity_Rain_1">
18      <intensity rdf:datatype=
19        "xsd:float">50</intensity>
20    </Intensity>
21  </hasIntensity>
22  <hasBounds>
23    <CPTBounds
24      rdf:ID="CPTBounds_Rain_0">
25        <upperBound rdf:datatype=
26          "xsd:float">60</upperBound>
27      </CPTBounds>
28    <CPTBounds
29      rdf:ID="CPTBounds_Rain_1">
30        <lowerBound rdf:datatype=
31          "xsd:float">40</lowerBound>
32      </CPTBounds>
33    </hasBounds>
34 </CPTState>

```

Abbildung 5.22: Beispiel der Kodierung eines CPTState-Objektes in OWL-DL

```

1 <CPTParent rdf:ID="CPTParent_Aquaplaning_Rain">
2   <hasIndex>
3     <CPTIndex rdf:ID="CPTParentIndex_Aquaplaning_Rain">
4       <index rdf:datatype="xsd:int">1</index>
5     </CPTIndex>
6   </hasIndex>
7   <hasEventType rdf:resource="#EventType_Rain"/>
8 </CPTParent>

```

Abbildung 5.23: Kodierung eines Bayesschen Netzes in OWL-DL: CPTParent

Um im Hinblick auf die Propagation von Evidenzen einen effizienten Zugriff auf die Einträge der Abhängigkeitstabellen zu ermöglichen, müssen die mittels OWL-DL im Fahrzeugkontextmodell als einzelne CPTEntry -Objekte gespeicherten Tabelleneinträge in eine geeignete Form überführt werden.

Hierzu werden die Tabelleneinträge initial sukzessive ausgelesen und in ein multidimensionales Feld (multidimensional array) überführt. Das resultierende Feld einer Abhängigkeitstabelle mit n Elternknoten weist dabei $n + 1$ Dimensionen auf. Dieser $n + 1$ dimensionale Hyperkubus kann dabei linearisiert werden (siehe Abbildung 5.24). Bezeichne

- $D = (d_1, \dots, d_n)$ die Dimension des n -dimensionalen Hyperkubus
- $x = (x_1, \dots, x_n)$ eine spezifische Zelle des Hyperkubus, sowie
- $I(x)$ den Index der Zelle x in der Linearisierung.

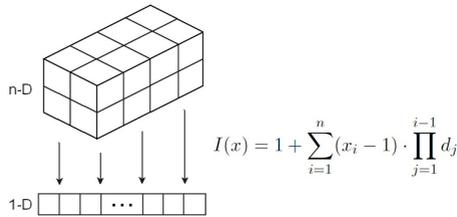


Abbildung 5.24: Linearisierung eines n-dimensionalen Hyperkubus

Dann gilt:

$$I(x) = 1 + \sum_{i=1}^n (x_i - 1) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} d_j$$

5.5.2 Situationsabhängige Instanziierung von Teilnetzen

Zur Reduktion der Komplexität sollen die resultierende Bayesschen Netze möglichst klein gehalten werden und nur eine geringe Konnektivität aufweisen. Dies kann in der dieser Arbeit zugrunde liegenden Anwendungsdomäne dadurch erreicht werden, dass nur diejenigen Teile des Netzes bzw. Knoten instanziiert werden, für die relevante Beobachtungen (anderer Fahrzeuge) im Fahrzeugkontextmodell existieren. Für alle Elternknoten, für die bisher keine Beobachtungen vorliegen, wird vereinfachend die Hypothese mit der a-priori höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen. Erhält ein Fahrzeug Beobachtungen weiterer Kontextaspekte, so können diese auf Basis des vorgestellten Verfahrens jederzeit zusätzlich instanziiert werden.

5.6 Bewertung

Die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise zur kooperativen Prädiktion des Fahrkontextes wurde auf Basis der in Abschnitt 4.6 vorgestellten Simulationsumgebung simulativ ausgewertet. Hierzu wurden 100 Fahrzeuge mit einer maximalen Kommunikationsreichweite von 400m in einem 8km² großen Innenstadtszenario simuliert, über das zufällig einzelne Regengebiete hinwegziehen. Überlagerungen dieser Gebiete führen zu einer additiven Intensivierung der angenommenen Regenintensität. Bei mindestens drei überlagerten Regengebieten wird starker Regen angenommen.

Abbildung 5.25 zeigt in einem Beispiel exemplarisch vier Schnappschüsse eines Teils des Simulationsgebietes, in dem die beiden Fahrzeuge 5 und 45 speziell gekennzeichnet sind. Die drei im Szenario vorhandenen Regengebiete sind durch Ellipsen symbolisiert. Sobald auf Basis der individuellen Inferenz der Fahrsituation der Grad des Dafürhaltens hinsichtlich der Existenz von starkem Regen hinreichend groß ist (als Schwellwert hierfür wurde 80% Sicherheit angenommen), übermittelt das Fahrzeug die zugehörige Beobachtung. Die drei Regengebiete verschwinden im Laufe der Simulation zum Zeitschritt 80, 90 und 110. Abbildung 5.26 zeigt die Entwicklung des Grades des Dafür-

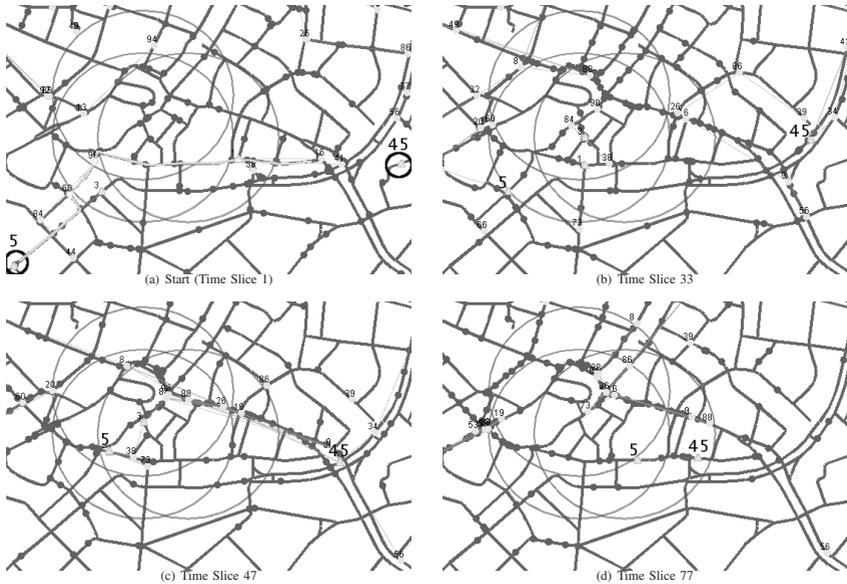


Abbildung 5.25: Exemplarische Schnappschüsse eines Teils des Simulationsgebietes

haltens für starken Regen auf Basis individueller Inferenz in Fahrzeug 5 am jeweiligen Aufenthaltsort des Fahrzeugs. Zu den Zeitschritten 33 (siehe Abbildung 5.25(b)), 39 (5.26(c)) und 44 (5.26(d)) erreicht das Fahrzeug sukzessive die einzelnen Regengebiete. Zum Zeitpunkt 47 übersteigt der Grad des Dafürhaltens für starken Regen schließlich den Schwellenwert und Fahrzeug 5 beginnt diese Beobachtung zu übertragen, was aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht graphisch mit dargestellt wurde. Abbildung 5.26 zeigt dabei deutlich den zeitlichen Charakter der probabilistischen Modellierung, bei der der Grad des Dafürhaltens für die Hypothese bei Anhalten der Evidenz des Regensensors und der Scheibenwischer stetig zunimmt. Das gleiche Prinzip gilt nach Verschwinden des Regengebietes (im Zeitschritt 80) auch umgekehrt.

Abbildung 5.27 zeigt demgegenüber die Entwicklung des Grades des Dafürhaltens für starken Regen in Fahrzeug 45, jedoch für eine entfernte Position auf der weiteren Fahrtroute. Die Vorhersage stützt sich dabei auf die von den anderen Fahrzeugen empfangenen, sowie die eigenen Beobachtungen. Bis zu Zeitschritt 40 lagen dem Fahrzeug dabei keine Beobachtungen von anderen Fahrzeugen vor. Aufgrund der additiven Unsicherheit, die sich aus der Distanz zwischen dem Fahrzeug und dem prädierten Hypothesenort ergibt, ergibt sich im gezeigten Beispiel eine Restwahrscheinlichkeit von 20% dafür, dass es am vorhergesagten Ort stark regnet, auch wenn keine Evidenz hierfür bekannt ist. Fahrzeug 45 fährt dabei zwischen Zeitschritt 40 und 70 knapp am Gebiet mit starkem Regen vorbei, ehe es sich wieder davon entfernt.

5 Ein Verfahren zur Deduktion und Prädiktion fahraufgabenbezogener Kontextinformationen

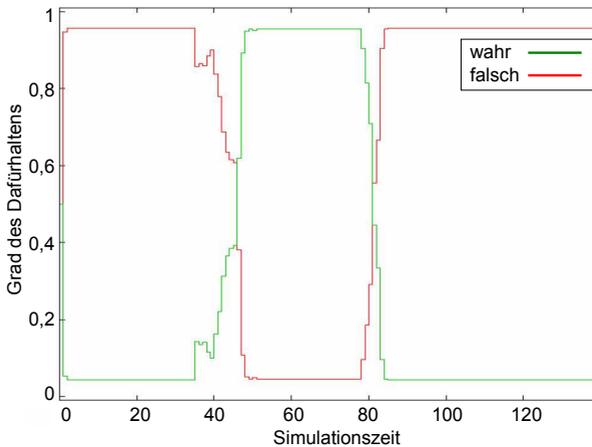


Abbildung 5.26: Entwicklung des Grades des Dafürhaltens für starken Regen in Fahrzeug 5 auf Basis individueller Inferenz

Abbildung 5.28 stellt zudem in einem weiteren Simulationsdurchlauf mit verfeinerter Simulation der Regenintensität (zwischen 0 und 100) die vorgestellte zweistufige Prädiktion (Interpolation und Quervalidierung) und die tatsächliche Ausprägung des Kontextaspekts Regen an einer entfernten Position gegenüber. Die Prädiktion basiert dabei auf einer vierstufigen gleichverteilten Diskretisierung der Regenintensität und entspricht der wahrscheinlichsten Hypothese. In weiteren Simulationsdurchläufen wurde die Anzahl der verfügbaren Sensoren in den Fahrzeugen schrittweise reduziert und so die möglichen individuellen Beobachtungen und daraus resultierend auch das Vertrauen in die individuelle Inferenz verringert. Eine hinreichend große Zahl an partizipierenden Fahrzeugen vorausgesetzt, bleibt davon die Qualität der Vorhersage jedoch nahezu unberührt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Vertrauen in die individuellen Hypothesen bei der interpolierten Vorhersage entsprechend berücksichtigt wird. Als Konsequenz gehen Beobachtungen von besser ausgestatteten Fahrzeugen mit höherem Gewicht in die Prädiktion ein und ermöglichen weiterhin eine gute Vorhersagequalität. Die nachgelagerte Quervalidierung stützt zudem die Qualität der Vorhersage. So konnte des Weiteren simulativ gezeigt werden, dass auch dann eine richtige Vorhersage hinsichtlich einer Aquaplaningefahr möglich ist, wenn keine direkten Aquaplaningevidenzen, sondern lediglich Starkregenevidenzen vorliegen.

Die Qualität der Vorhersage vermindert sich jedoch, wie erwartet, mit zunehmender Situationsdynamik und geringerer Fahrzeugdichte. Dieser Effekt wird insbesondere durch die gezielte Verbreitung falscher Vorhersagen verstärkt. Eine weiterführende Analyse gezielter Angriffe und den Auswirkungen verschiedener Mehrheitsentscheidungen auf die Qualität der Vorhersage ist in [Ost05, ODS07] beschrieben.

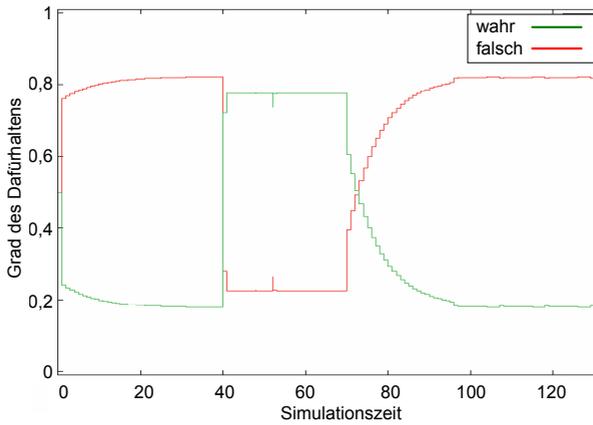


Abbildung 5.27: Entwicklung des Grades des Dafürhaltens für starken Regen in Fahrzeug 45 auf Basis kooperativer Prädiktion an einer entfernten Position

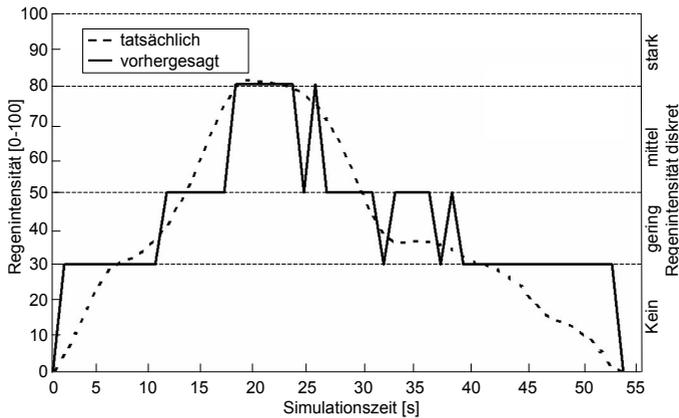


Abbildung 5.28: Vergleich zwischen Prädiktion und tatsächlicher Ausprägung des Kontexts Regen an einer entfernten Position

Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Das folgende Kapitel beschreibt ein nutzenoptimierendes Rahmenwerk zur Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen. Das erarbeitete Rahmenwerk trägt dabei den in Abschnitt 2.4 beschriebenen speziellen Anforderungen der Anwendungsdomäne (2.2) Rechnung. Es ermöglicht zudem eine generische Integration verschiedener Optimierungsstrategien der in Abschnitt 4.5 beschriebenen existierenden Arbeiten. Es nutzt dabei Ergebnisse aus [SAE06, AEK⁺06, AESS06, ESKS06, SSEE06, KSE⁺06, Sch06, Adl06].

Zentrales Paradigma ist die globale Maximierung des Anwendungsnutzens. Zur exakten Einordnung werden einleitend nochmals die zugrunde liegenden Annahmen und Paradigmen herausgestellt. Im Anschluss wird das Paradigma der Netzwerknutzenoptimierung im Allgemeinen, sowie speziell im Hinblick auf die besonderen Rahmenbedingungen automobiler Ad-hoc Netze und dessen mögliche Umsetzung als Rahmenwerk beschrieben. Das vorgestellte Rahmenwerk wird schließlich simulativ evaluiert.

6.1 Annahmen und Paradigmen

Existenz eines Ad-hoc Kommunikationssystems Die nachfolgenden Überlegungen basieren auf der Annahme, dass Fahrzeugentitäten mittels eines Kommunikationskanals auf Basis (der physikalischen Ebene von) IEEE 802.11 lokales Wissen und Beobachtungen austauschen können. Die hierzu zur Verfügung stehende Kanalkapazität ist jedoch begrenzt. Die folgenden Überlegungen beziehen sich dabei auf einen logischen Kommunikationskanal. Der Ansatz lässt sich jedoch für mehrere (nicht notwendigerweise gleichartige) Kommunikationskanäle verallgemeinern.

Existenz eines übergeordneten Netzziels Die spontane Vernetzung von Fahrzeugen ermöglicht eine Fülle neuer Anwendungen aus unterschiedlichen Bereichen, von

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Fahrerinformationssystemen über Unterhaltung, Wartung, bis hin zur Steigerung der Verkehrssicherheit, wobei die fahraufgabenbezogenen Assistenzsysteme einen besonderen Stellenwert besitzen. Neben Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrseffizienz gilt dies in besonderem Maße für die Anwendungsklasse der kooperativen aktiven Sicherheitssysteme (siehe hierzu die Beispiele aus Abschnitt 2.2). Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Bestrebungen hinsichtlich eines eigenen, von der Regulierungsbehörde zum Zwecke der Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit zur Verfügung gestellten Frequenzspektrums für automobile Ad-Hoc Kommunikation (siehe Abschnitt 4.4). Kommerziell orientierte oder proprietäre Mehrwertdienste, die nicht von übergeordnetem allgemeinnützigem Interesse sind, rechtfertigen letztlich keinen dedizierten Frequenzbereich. Letztgenannte Dienste stellen zwar zweifelsohne eine sinnvolle und hinsichtlich einer erfolgreichen Markteinführung notwendige Bereicherung der möglichen Anwendungsszenarien dar (siehe Abschnitt 4), sind aber letztlich gegenüber erstgenannten fahraufgabenbezogenen Anwendungen aus politischen Gründen unterprivilegiert.

Altruismus und Solidarische Fairness Die hinsichtlich des übergeordneten Netzziels privilegierten Anwendungen sind in der Regel kooperativ, d.h. sie beruhen auf dem gezielten Zusammenwirken der beteiligten Fahrzeuge. Das wesentliche Wirkprinzip ist dabei wie in Abschnitt 2.2 dargestellt der zeitnahe Austausch fahraufgabenbezogener Kontextinformationen. Fahrzeuge, die eine lokale Beobachtung bezüglich ihres aktuellen Fahrkontextes an andere Fahrzeuge übermitteln, können aus diesem primär uneigennützigem Handeln keinen eigenen Vorteil ziehen. Gleiches gilt für Fahrzeuge, die im Rahmen des weiteren Informationsverteilungsprozesses eine empfangende Nachricht weiterleiten. Nutznießer sind lediglich diejenigen Fahrzeuge, die die versandten Kontextinformationen empfangen. Als unmittelbare Folge daraus ergibt sich ein übergeordneter altruistischer Gesamtcharakter des automobilen Ad-hoc Netzes. Erst unter der Voraussetzung, dass sich die überwiegende Anzahl der am System partizipierenden Fahrzeuge solidarisch fair verhält, also bereit ist, primär uneigennützig Informationen für andere Teilnehmer bereitzustellen und weiterzuleiten, ergibt sich letztlich ein sekundärer gemeinschaftlicher Nutzen für alle Fahrzeuge. Das Prinzip dieser solidarischen Fairness schließt ein, dass die zur Verfügung stehende und gemeinsam benutzte Kanalkapazität von allen teilnehmenden Fahrzeugen unter Berücksichtigung des übergeordneten Netzziels verwendet wird. Dies ist vor dem Hintergrund der Mitbenutzung des Kommunikationssystems durch nicht fahraufgabenkorrelierte Anwendungen von Bedeutung, da diese üblicherweise keinen altruistischen Charakter aufweisen. Die solidarische Fairness bedingt hier, dass solche Anwendungen die Funktionsfähigkeit fahraufgabenbezogener Anwendungen nicht in egoistischer Weise negativ beeinflussen oder behindern.

Optimierung des globalen Anwendungsnutzens Klassische Ansätze zur Informationsverbreitung basieren zumeist auf der Reduktion der mittleren anwendungsspezifischen Netzlast. Ziel hierbei ist den Kommunikationsbedarf, und damit einhergehend die Anzahl der notwendigen Nachrichtenübertragungen, isoliert für jede Anwendung im Schnitt zu verringern. Im Gegensatz hierzu ist das Ziel des im Folgenden vorgestellten Verfahrens zur Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen, die Nutzung der vorhandenen Kanalkapazität insgesamt über alle Anwendun-

gen zu optimieren. Dies ermöglicht, dass die Fahrzeuge so viel relevante Kontextinformationen wie möglich versenden und empfangen können, um damit ihre Analyse der aktuellen und zukünftigen Fahrsituation bestmöglich zu unterstützen. Diese Vorgehensweise entspricht letztlich dem Paradigma der globalen Netzwerknutzenoptimierung, wie sie in diesem Kapitel vorgestellt werden soll. Der wesentliche Vorteil dieser Strategie besteht darin, dass nicht für jede Anwendung für sich genommen ein vertretbarer Kompromiss zwischen notwendigem Kommunikationsaufwand und Anwendungsfunktionalität gefunden werden muss. Für die dieser Arbeit zugrunde liegenden Anwendungen würde dies beispielsweise bedeuten, dass eine Querverkehrsassistenz im Kreuzungsbereich in einem festgelegten Zeitintervall eine Aktualisierung der eigenen Fahrzeugposition übermittelt. Das Intervall wird dabei so gewählt, dass in einer ausreichend großen Zahl an Fällen die gewünschte Funktionsweise in der gewünschten Dienstgüte sichergestellt ist. Jedoch zeigt die Anwendung unter Umständen in wenigen seltenen Ausnahmefällen kein optimales Ergebnis, da hierzu ein kleineres Aktualisierungsintervall notwendig ist. Auf der anderen Seite kann unter Umständen eine zu häufige und in der aktuellen Situation nicht notwendige Aktualisierung der Fahrzeugposition andere kritische Anwendungen negativ beeinflussen. Um den Kommunikationskanal nicht in scheinbar unnötigerweise zu belasten, muss letztlich ein Kompromiss hinsichtlich der Kosten und des Nutzens der möglichen Aktualisierungsintervalle gefunden werden. Demgegenüber führt eine späte explizite Nutzenbewertung zur Laufzeit automatisch zu einer situationskorrelierten Abstimmung der Kanalnutzung zwischen allen existierenden Anwendungen.

Selbstorganisation Entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 2.4 soll der Kontextverbreitungsprozess selbstorganisierend sein. Es sollen also keine zentrale Infrastruktur oder spezielle Knoten benötigt werden, die diesen Prozess koordinieren.

Qualitativ ähnliches Anwendungsverhalten Die im Folgenden vorgeschlagene Methodik zur Nutzenbewertung basiert auf der Annahme, dass die in den Fahrzeugen aktiven kooperierenden Komponenten ein qualitativ ähnliches Anwendungsverhalten zeigen, d.h. ein und dieselbe Information in ähnlicher Weise verarbeiten. Zudem wird angenommen, dass sich Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe zumeist auch in einer ähnlichen Fahrsituation befinden. Dies ermöglicht eine senderseitige Abschätzung des Nutzens einer Information für die unmittelbar empfangenden Fahrzeuge.

Freie Verfügbarkeit des Kommunikationskanals Der Kommunikationskanal steht den Fahrzeugen frei zur Verfügung, ohne dass weitere operative Kosten anfallen. Die verfügbare Kapazität kann daher im Wesentlichen voll ausgeschöpft werden. Sofern aktuell noch Kanalkapazität verfügbar ist, kann diese von den Netzwerkeilnehmern verwendet werden. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Unterstützung von prädiktiven Assistenzsystemen von Bedeutung, da deren Vorhersagequalität umso größer ist, je mehr Kontextinformationen ihnen hierzu zur Verfügung stehen. Diese Anwendungen profitieren also von einer freien Kanalkapazität, die es erlaubt, weitere Kontextinformationen zu verbreiten. Es muss jedoch beachtet werden, dass eine hohe Auslastung des Kommunikationskanals nicht zu einer Steigerung der Kollisionswahrscheinlichkeit der Nachrichtenpakete und in Folge dessen zu einer Reduktion des Netto Datendurchsatzes führt. Ist dies der Fall, so sollte die Kommunikationslast idealerweise

so begrenzt werden, dass ein maximaler Datendurchsatz des Netzwerks erreicht werden kann.

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

Im folgenden Abschnitt wird das Problem der optimalen Nutzung der verfügbaren Übertragungskapazität hinsichtlich des globalen aggregierten Netzwerknutzens (*Network Utility Maximization* - NUM) in klassischen Netzwerken und darauf aufbauend in automobilen Ad-hoc Netzen beschrieben.

6.2.1 Das Netzwerknutzenoptimierungsproblem in statischen Netzen

Das Problem der Netzwerknutzenoptimierung in drahtgebunden Netzen wird üblicherweise wie folgt beschrieben [FC05, KMT98, LA02, GNB01]:

Gegeben sei ein statisches Kommunikationssystem mit einer Menge J an Kommunikationsbeziehungen zwischen den Netzwerkknoten. Θ_j beschreibe die individuelle Kapazität der Kommunikationsbeziehung $j \in J$. Sei ferner eine Route $r \subseteq J$ mit $r \in R$ und $r \neq \emptyset$ eine nicht-leere Teilmenge von J , wobei R die Menge aller möglichen Routen über J beschreibt. Hinsichtlich der Konnektivität zwischen zwei Netzwerkknoten gelte weiterhin $A_{jr} = 1$, falls $j \in r$, d.h. falls die Kommunikationsbeziehung j in der Route r enthalten ist. Andernfalls gelte $A_{jr} = 0$. Die in jeder Route enthaltenen Kommunikationsbeziehungen lassen sich mit einer binären $J \times R$ dimensional Matrix A^{JR} darstellen, wobei die Matrixelemente A_{jr} die jeweilige Enthaltensein-Beziehung abbildet. Ferner bezeichne θ_r die Datenrate, die eine mit der Route r korrelierte Anwendung auf dieser Route benötigt bzw. belegt. Der Nutzen für diese Anwendung errechnet sich nun anhand einer anwendungsspezifischen Nutzenfunktion $U_r(\theta_r)$ über der aktuell entlang der Route maximal erreichten Datenrate, wobei die Wahl der spezifischen Nutzenfunktion $U_r(\theta_r)$ vom Anwendungszweck abhängig ist. In vielen Fällen kann eine direkte proportionale Abhängigkeit zwischen Datenrate und Anwendungsnutzen festgestellt werden, beispielsweise bei der Übertragung von großen Datenmengen wie Videos. Offensichtlich ist für unabhängige Anwendungen der vom Netzwerk geleistete Nutzen additiv. Somit ergibt sich für den aggregierten Netznutzen \hat{U} über die bedienten Datenraten aller Anwendungen (aller von den Anwendungen benutzten Routen)

$$\hat{U} = \sum_{r \in R} U_r(\theta_r).$$

Bezeichne weiterhin $\vec{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ den Vektor der mit den Routen assoziierten Datenraten und $\vec{\Theta} = (\Theta_1, \dots, \Theta_j)$ die Kapazität der Kommunikationsbeziehungen, sowie $\vec{U} = (U_1(\theta_1), \dots, U_r(\theta_r))$ den Vektor aller (anwendungsspezifischen) Nutzenbewertungsfunktionen auf den assoziierten Routen. Vor diesem Hintergrund und unter Beachtung der individuellen Kapazitätsbeschränkungen der einzelnen Kommunikationsbeziehungen Θ_j entlang der Routen formuliert sich das Netzwerknutzenoptimierungs-

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

problem für ein statisches Kommunikationssystem wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{System}(U, A, C) : \\ & \text{maximiere} \quad \sum_{r \in R} U_r(\theta_r) \\ & \text{unter Beachtung} \quad A\vec{\theta} \leq \vec{\Theta} \\ & \text{und} \quad \vec{\theta} \geq 0 \end{aligned}$$

Für statische Netze und unter Kenntnis aller Nutzenfunktionen U_r ergibt sich so ein mathematisch prinzipiell lösbares Optimierungsproblem. Kelly et al. zeigen in [Kel97, KMT98] darüber hinaus für streng konkave Nutzenfunktionen dezentrale Näherungen, die keine Kenntnis der konkreten spezifischen Nutzenfunktionen der Anwendungen benötigen. Fazel und Chiang [FC05] weiten die Betrachtungen auch auf differenzierbare sigmoidale Nutzenfunktionen aus. La et al. [LA02] verwenden zudem lokale Rückkopplungseffekte des Netzwerks zur weiteren Steigerung des effektiv erreichbaren Anwendungsnutzens.

6.2.2 Das Netzwerknutzenoptimierungsproblem in automobilen Ad-hoc Netzen

Die systeminhärenten Unterschiede klassischer drahtgebundener Netze und automobiler Ad-hoc Netze machen es erforderlich, das Netzwerknutzenoptimierungsproblem an die spezifischen Charakteristiken der Anwendungsdomäne anzupassen. Die wesentlichen Unterschiede hierbei sind:

- *Konnektivitätsdynamik.* Die Konnektivität in automobilen Ad-hoc Netzen ist typischerweise sehr dynamisch und unter Umständen schnellen Schwankungen unterlegen. Eine Kommunikationsverbindung zwischen zwei Netzwerkteilnehmern ist unter Umständen nur wenige Sekunden gegeben. Zudem existiert aufgrund der drahtlosen Kommunikation im Unterschied zu drahtgebundenen Netzen keine individuelle Verbindungskapazität zwischen zwei Teilnehmern. Stattdessen teilen sich alle Netzwerkknoten, die sich gerade innerhalb der gemeinsamen Kommunikationsreichweite befinden, gemeinsam den Nachrichtenkanal.
- *Unterschiedliche Übertragungsmuster.* Aufgrund der primär zu unterstützenden Anwendungsklassen, die im Wesentlichen eine Übertragung einzelner Kontextinformationen erfordern (siehe 2.2), werden in der Regel in automobilen Ad-hoc Netzen keine größeren zusammenhängenden Datenmengen wie beispielsweise Video- oder Audiodateien übertragen. Daraus resultiert ein signifikant unterschiedliches vorherrschendes Übertragungsmuster. Statt kontinuierlicher Nachrichtenströme, die nahezu gleich über die Netzwerkknoten verteilt sind, treten in automobilen Ad-hoc Netzen vergleichsweise kurze, zumeist lokal begrenzte Übertragungsspitzen (*bursts*) auf. Diese resultieren vor allem daraus, dass kritische Fahrsituationen oft zur gleichen Zeit eine Menge von Fahrzeugen betreffen, und daher deren Kommunikationsbedarf in etwa zur gleichen Zeit auftritt und gedeckt werden muss. Eine auf der individuellen Senderate basierende Nutzenberechnung ist daher nicht zielführend. Stattdessen muss die Berechnung des individuellen Nutzens auf Basis einzelner Nachrichtenpakete bzw. -inhalte in Verbindung mit der jeweiligen Nachrichtengröße erfolgen.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

- *Empfängerbasierte Nutzenbewertung.* Die anvisierten Anwendungen in automobilen Ad-hoc Netzen sind fast ausschließlich kooperativ und basieren auf der Auswertung verteilter Kontextinformationen. Aufgrund des daraus resultierenden altruistischen Charakters ergibt sich für das die Information aussendende Fahrzeug kein Nutzen. Stattdessen nützt die Information ausschließlich (jedoch nicht notwendigerweise) den die Nachricht empfangenden Netzteilnehmern. Eine Nutzenbewertung kann daher einerseits lediglich empfängerbasiert erfolgen. Eine solche Nutzenbewertung ist jedoch andererseits nur vor der tatsächlichen Übertragung einer Nachricht sinnvoll ist, da sonst die zur Übertragung notwendige Bandbreite ungeprüft belegt werden würde. Daher kann eine Nutzenoptimierung in automobilen Ad-hoc Netzen letztlich nur durch eine näherungsweise Vorabschätzung des potentiellen Empfängernutzens durch den Sender realisiert werden.
- *Große Variation in den Nutzenfunktionen.* In unmittelbarem Zusammenhang mit dem strombasierten Übertragungsmuster klassischer Netzwerkdienste steht auch, dass die eingesetzten Nutzenfunktionen eine zumeist konkave Charakteristik aufweisen. So beschränkt sich beispielsweise [KMT98] auf die Optimierung konkaver Nutzenfunktionen. Zwar sind in [LA02] und [FC05] darüber hinaus auch Lösungsansätze für das Problem der Nutzenoptimierung für nicht-konkave stetige Funktionen beschrieben. Die Anwendungen in automobilen Ad-hoc Netzen weisen jedoch zumeist eine nicht-stetige Nutzencharakteristik auf. Der Nutzen ergibt sich typischerweise vor dem Hintergrund der aktuellen Situation, in der sich ein Fahrzeug gerade befindet. Die Fahrsituation kann sich jedoch sprunghaft ändern. Der Nutzen muss daher vor dem Hintergrund des aktuell vorhandenen Kontextwissens erfolgen. Zudem muss berücksichtigt werden, dass insbesondere fahraufgabenbezogene Kontextinformationen nur dann für ein anderes Fahrzeug einen Nutzen darstellen, wenn dieses Fahrzeug im weiteren Verlauf den mit der Kontextinformation assoziierten Ort erreicht. Passiert es diese Stelle nicht, oder hat es sie unter Umständen schon passiert, so ist der Nutzen null. Unter Berücksichtigung dieser Charakteristik ist demzufolge die Nutzenbewertung der empfangenen Nachrichten, und hierbei speziell der empfangenen Kontextinformationen, wiederum kontextabhängig und damit im Allgemeinen nicht über eine stetige Funktion abbildbar.
- *Dediziertes Netzziel.* Die Einführung und Etablierung automobiler Ad-hoc Netze verfolgt ein dediziertes Ziel, nämlich die Fahraufgabe der Fahrzeugführer aktiv zu unterstützen und so aktiv zur Steigerung der Verkehrssicherheit beizutragen. Eine Optimierung der Netzwerknutzung hinsichtlich des globalen Netzwerknutzens muss daher speziell im Hinblick auf dieses Netzziel betrachtet werden. Dies gilt im speziellen für die Aufsummierung der individuellen Nutzenbewertungen der beteiligten Fahrzeuge, bei der aktive Sicherheitsanwendungen mit stärkerem Gewicht in die Summe mit eingehen müssen.
- *Eine feingranulare und situationsabhängige Priorisierung.* Das Ad-hoc Netzwerk muss gleichzeitig von einer Vielzahl an Anwendungen benutzt werden, welche unter Umständen deutlich voneinander abweichende Nutzenfunktionen

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

aufweisen können. Zwar sehen beispielsweise auch La et al. [LA02] vor, spezifischen Anwendungen einen priorisierten Zugang zum Netzwerk zu gewähren. Dieser basiert aber konsequenterweise auf der Zuweisung einer vergleichsweise größeren individuellen Übertragungsrate. Kommunikationsgestützte aktive Sicherheitsanwendungen im Straßenverkehr benötigen jedoch darüber hinaus eine zielgerichtete und situationsabhängige Priorisierung einzelner Kanalzugriffe, um sicher zu stellen, dass fahrsicherheitskritische Informationen mit minimaler Latenzzeit übertragen werden können. Dabei ist der Grad des Beitrags einer Nachricht zur Fahrsicherheit der Verkehrsteilnehmer abhängig von der Situation der beteiligten Fahrzeuge.

Aus diesen Gründen ist es erforderlich, das Problem der Netzwerknutzenoptimierung an die spezifischen Eigenschaften automobiler Ad-hoc Netze anzupassen. Offensichtlich unverändert ist das eigentliche Ziel, die vorhandenen Netzwerkressourcen nutzenoptimal zu verwenden. Kosch [Kos05b] definiert in diesem Zusammenhang den situationsbedingten Nutzenwert $U_{a_k}(S_i, \mathcal{K}_j)$ einer Informationskategorie \mathcal{K}_j ¹ in einer Situation S_i zum Zeitpunkt t_i als das Maximum der Nutzenfaktoren über alle zu diesem Zeitpunkt für eine Anwendung a_k einer Entität gültigen Situationen. Unter Berücksichtigung des Grades des Eintretens und der Unsicherheit gilt somit für den Nutzen für eine Anwendung a_k zum Zeitpunkt t_i :

$$U_{a_k}(\mathcal{K}_j, t_i) = \max(U_{a_k}(S_i, \mathcal{K}_j) \cdot \text{deg}(S_i, t_i) \cdot p(S_i, t_i)), \forall S_i \in S(t_i).$$

Diese Definition ist jedoch nicht ausreichend, da sich der Nutzen einer Information zu einem Zeitpunkt nicht lediglich an der Zugehörigkeit einer Entität bzw. einer Anwendung zu einer Situation bemisst, sondern auch vor dem Hintergrund des bereits vorhandenen Wissens. Ein kurzes Beispiel soll dies verdeutlichen. Der Nutzen einer Nachricht, dass sich im weiteren Straßenverlauf ein Stau befindet, hängt nicht ausschließlich davon ab, ob sich das Fahrzeug momentan auf dieser Straße befindet und vom Stau betroffen ist. Der Nutzen hängt zudem davon ab, ob das empfangende Fahrzeug bereits Informationen über diesen Stau erhalten hat. War der Stau ohnehin bereits bekannt, so ist der zusätzliche Nutzen einer weiteren Nachricht offensichtlich gering. Genauer gesagt bezieht sich der Nutzen einer empfangenen Kontextinformation also darauf, wie sehr diese Kontextinformation die individuelle Handlungsentscheidungen beeinflusst (vergleiche [Kos05b]). Demnach lässt sich der Nutzen einer Information quantitativ dadurch bestimmen, dass bestimmte Ziele besser erreicht werden können. Eine zielorientierte Quantifizierung des Anwendungsnutzens muss also letztlich in Korrelation zu den anwendungsspezifischen Zielen stehen.

Die Handlungsentscheidungen der dieser Arbeit zugrunde liegenden kooperativen Fahrerassistenzsysteme bestehen offensichtlich darin, dem Fahrer zu einem Zeitpunkt eine gewisse Menge der vorhandenen Informationen bezüglich des aktuellen oder zukünftigen Fahrgeschehens in geeigneter Weise zu präsentieren, bzw. darauf aufbauend selbst regelnd in das Fahrgeschehen einzugreifen. Dies geschieht letztlich, um das übergeordnete Ziel zu erreichen, Unfälle zu vermeiden oder die Verkehrseffizienz zu steigern.

¹Im Falle situationsbezogener Anwendungen entspricht dabei die Menge der Informationskategorien der Menge der Kontextaspekte, wie sie in dieser Arbeit beschrieben sind.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Der Nutzen einer fahraufgabenbezogenen Kontextinformation kann daher prinzipiell auf Basis der folgenden Metriken quantifiziert werden (für eine genauere Analyse der Wirksamkeit von Verkehrsmeldungen unter Berücksichtigung psychologischer und kognitiver Aspekte sei beispielsweise auf [SSR⁺04, Kim02] verwiesen).

- Reduzierung der Zahl der Straßenverkehrsunfälle
- Reduzierung der verkehrsbedingten Umweltverschmutzung
- Kürzere individuelle Reisezeiten

Abbildung 6.1 zeigt eine Gegenüberstellung der in Abschnitt 1.1 vorgestellten Zielhierarchie und möglichen Metriken der Nutzenquantifizierung kooperativer Fahrerassistenzsysteme.

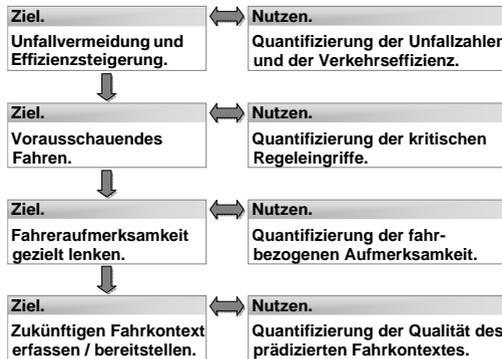


Abbildung 6.1: Mögliche Metriken zur Nutzenquantifizierung kooperativer Fahrerassistenzsysteme auf Basis der verkehrssicherheitsbezogenen Zielhierarchie

Die drei erstgenannten Ziele der Zielhierarchie werden dabei durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Die Entwicklung der Zahl der Verkehrsunfälle hängt beispielsweise neben einer vorausschauenden Fahrweise auch in hohem Maße von der Verkehrsdichte, baulichen Maßnahmen oder der Verbesserung der Fahrstabilität der Fahrzeuge ab. Eine isolierte Quantifizierung des Nutzens einzelner Aspekte ist daher nur schwer umsetzbar. Die prinzipiell erreichbare Qualität einer prädiktiven Fahrerassistenz kann jedoch unmittelbar korreliert werden mit der Qualität der Einschätzung der lokalen und entfernten Kontextaspekte bzw. der vorherrschenden Fahrsituationen. Aus diesem Grund soll letzteres im Rahmen dieser Arbeit als Maß zur Nutzenbewertung fahraufgabenbezogener Kontextinformationen verwendet werden. Bezeichne daher aufbauend auf den Überlegungen aus Abschnitt 3.1.2

- \bar{X}_{p,t_i} die Menge der Beobachtungen \bar{x} , die in der zum Zeitpunkt t_i empfangenen Nachricht p enthalten sind, sowie
- $\|\Omega_{a_k}(t_i)\|$ die Qualität des Wissens einer Anwendung a_k zum Zeitpunkt t_i

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

Der Nutzen $U_{a_k}(\bar{X}_{p,t_i}, \Omega_{a_k}(t_i))$ einer zum Zeitpunkt t_i empfangenen Nachricht p entspricht also der hierdurch erwirkten Veränderung der Wissensqualität der Anwendung a_k . Es gilt somit:

$$U_{a_k}(\bar{X}_{p,t_i}, \Omega_{a_k}(t_i)) = \sum_{\bar{x}_j \in \bar{X}_{p,t_i}} U_{a_k}(\bar{x}_j, \Omega_{a_k}(t_i)) = \|\Omega_{a_k}(t_{i-1}) \cup \bar{X}_{p,t_i}\| - \|\Omega_{a_k}(t_{i-1})\|$$

In Anlehnung an die klassische Definition der Informationsentropie nach Shannon [Sha48] kann das Maß der Veränderung der Wissensqualität kooperativer Telematikanwendungen auch als Entropiemaß hinsichtlich des semantischen Informationsgehaltes von \bar{X}_p verstanden werden. An die Stelle der Wahrscheinlichkeit, mit der das i -te Zeichen des Alphabets auftritt, tritt hier die zum Zeitpunkt t_i gültige Einschätzung hinsichtlich der Aspekte des Weltzustandes bzw. der Existenz und Nichtexistenz von Situationen (siehe Abschnitt 3.1.2). Eine so definierte *semantische Entropie* ist dabei jedoch vorzeichenlos und spiegelt nicht die tatsächliche Güte der Information wider. Offensichtlich können jedoch fehlerhafte Informationen, die die existierende Einschätzung bezüglich des Umweltzustands an einem Ort zu einem Zeitpunkt dahin gehend ändern, dass sich die Differenz des erwarteten Zustands zum tatsächlichen Zustand vergrößert, zu einem negativen Nutzenwert führen - sie sind also kontraproduktiv.

Einer Verschlechterung der Wissensqualität, insbesondere falls diese mutwillig durch die Verbreitung fehlerhafter Beobachtungen durch Angreifer herbeigeführt werden soll, kann durch geeignete Plausibilisierungstechniken vorgebeugt werden. Unter der Annahme, dass lediglich vergleichsweise wenige Angreifer am System teilnehmen, können fehlerhafte Beobachtungen implizit durch die Menge richtiger Beobachtungen ausgeglichen werden (eine weiterführende Analyse hierzu auf Basis von Mehrheitsentscheidungen findet sich in [ODS07]). Eine derartige Nutzenberechnung gilt in verallgemeinerter Form nicht nur für kooperative Anwendungen, die mit der Fahraufgabe korreliert sind, sondern für alle Fahrerinformationssysteme, auch wenn diese nicht auf altruistischer kooperativer Informationsbereitstellung basieren. Im Speziellen sind auch solche Anwendungen berücksichtigt, die die individuellen Informationsbedürfnisse der Fahrer bedienen (vergleiche hierzu wiederum [Kos05b]). Auch hierfür können hinsichtlich der anwendungsspezifischen Qualitätsbewertung des vorhandenen Wissens Gewichte für einzelne Kontextaspekte definiert werden.

Hinsichtlich des verfügbaren Wissens einer Anwendung müssen zusätzlich zu den bisherigen Überlegungen auch Einschränkungen hinsichtlich der verfügbaren Speicherressourcen der Entitäten berücksichtigt werden. Insbesondere in eingebetteten Systemen, wie sie in der automobilen Anwendungsdomäne vorherrschen, können nicht alle eigenen und von anderen Fahrzeugen empfangenen Beobachtungen dauerhaft gespeichert werden. Neben dem Übertragungskanal muss daher auch der lokal in den Fahrzeugen verfügbare Speicher optimal verwendet werden. Eine optimale Speicherbenutzung kann dabei in ähnlicher Weise wie eben beschrieben auf Basis des Nutzens einzelner Beobachtungen quantifiziert werden. Dabei kann festgehalten werden, dass das Wissen $\Omega_{a_k}(t_i)$ der Anwendung a_k zusätzlich zum statischen Domänenwissen genau diejenigen Beobachtungen und inferierten Kontextinformationen enthält, die auf Grund von Speicherplatzrestriktionen in der Zwischenzeit nicht wieder verworfen werden mussten.

Bezeichne daher wie in Abschnitt 3.1.2 eingeführt wiederum

- $\Omega_{a_k}(t_i)$ das Wissen einer Anwendung $a_k \in A$ zum Zeitpunkt $t_i \in T$,

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

- \mathcal{D}_{a_k} das anwendungsspezifische statische Domänenwissen der Anwendung einschließlich der in dieser Anwendungsdomäne gültigen Inferenzvorschriften,
- $\bar{X}_{a_k}(t_i)$ die Menge der Beobachtungen \bar{x} , die der Anwendung a_k zum Zeitpunkt t_i zur Verfügung stehen, sowie
- $\tilde{X}_{a_k}(t_i)$ die aus den Beobachtungen $\bar{X}_{a_k}(t_i)$ mittels der vorhandenen Inferenzregeln abgeleiteten Kontextinformationen.

Bezeichne ferner

- $\dot{X}_{a_k}(t_i)$ die Menge der bis zum Zeitpunkt t_i erzeugten, empfangenen und inferierten Kontextinformationen, sowie
- $\ddot{X}_{a_k}(t_i)$ die Menge der bis zum Zeitpunkt t_i wieder gelöschten Kontextinformationen.

Damit gilt für die zum Zeitpunkt t_i der Anwendung a_k effektiv zur Verfügung stehenden Kontextinformationen unter Berücksichtigung von lokalen Speicherrestriktionen

$$\bar{X}_{a_k}(t_i) \cup \tilde{X}_{a_k}(t_i) \equiv \dot{X}_{a_k}(t_i) \setminus \ddot{X}_{a_k}(t_i)$$

und somit für das effektive Wissen einer Anwendung zum Zeitpunkt t_i

$$\Omega_{a_k}(t_i) = \mathcal{D}_{a_k} \cup \left(\dot{X}_{a_k}(t_i) \setminus \ddot{X}_{a_k}(t_i) \right).$$

Unter der Annahme ausschließlich entfernungsbezogener und monoton fallender Nutzenfunktionen von statischen ortsbasierten Informationen formuliert Kosch in [Kos05b] in diesem Zusammenhang ein mathematisch generisch lösbares Optimierungsproblem, das gewährleistet, dass die begrenzten Speicherressourcen der Fahrzeuge nutzenoptimal ausgelastet werden. Bei der nutzenoptimalen Speicherung von Kontextinformationen müssen zwei weiterführende Faktoren berücksichtigt werden. Zum einen bricht in vielen Szenarien in automobilen Ad-hoc Netzen der Nutzen einer Information für die eigenen Handlungsmöglichkeiten mit dem Passieren des mit der Information korrelierten Gebietes (nicht stetig) auf Null ein. Die Information hat nun keinen Nutzen mehr für das Fahrzeug, da es diese Stelle in der Regel in naher Zukunft nicht wieder passiert. Zum anderen muss jedoch auch der altruistische Charakter kooperativer Systeme berücksichtigt werden. Offensichtlich müssen Informationen für andere Fahrzeuge auch dann noch verfügbar gehalten werden, wenn die Informationen für die eigenen Aktionen selbst keinen Nutzen mehr besitzen. Bisher wurde dies stillschweigend vorausgesetzt, soll jedoch an dieser Stelle nochmals betont werden, da sich aufgrund dieser Tatsache die Fragestellung verkompliziert, wann eine Kontextinformation aus der Wissensbasis wieder entfernt werden kann. Letztlich bedarf es hierfür einer sinnvollen Abschätzung, ob diese Kontextinformation in Zukunft noch Nutzen für andere Verkehrsteilnehmer darstellen kann und wie groß dieser Nutzen voraussichtlich sein wird.

Aufbauend auf der Nutzenquantifizierung einer empfangenen Nachricht berechnet sich der kumulierte Anwendungsnutzen \dot{U}_{a_k} einer Anwendung a_k , den die Anwendung durch Partizipation am Netzwerk über die Zeit erhält, durch

$$\dot{U}_{a_k}(t) = \int_0^t U_{a_k}(\bar{X}_{p,t_i}, \Omega_{a_k}(t)) dt.$$

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

Bezeichne weiterhin

- V die Menge der Fahrzeuge (also der Menge der Netzwerkknoten) und
- A_i die Menge der Anwendungen des Fahrzeuges v_i .

Die zu maximierende Größe des globalen aggregierten Netznutzens \hat{U} entspricht letztlich der Summe der kumulierten Nutzen aller Anwendungen, die in den Fahrzeugen vorhanden sind. Es ergibt sich somit

$$\hat{U}(t) = \sum_{v_i \in V} \sum_{a_k \in A_i} \hat{U}_{a_k}(t) = \sum_{v_i \in V} \sum_{a_k \in A_i} \int_0^t U_{a_k}(\bar{X}_{p,t}, \Omega_{a_k}(t)) dt$$

Diesen aggregierten globalen Anwendungsnutzen gilt es im Netzwerk zu maximieren. Unter Berücksichtigung der Überlegungen aus Abschnitt 4.3 muss hinsichtlich einer nutzenmaximierenden Verwendung des Netzwerks zudem die Einschränkung bezüglich der Kapazität der Kommunikationsbeziehungen zwischen den Netzwerkknoten differenziert betrachtet werden. Wie bereits erwähnt, ermöglichen temporäre zeitrespektierende Kantenstaffeln die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, für die zum Zeitpunkt der Nachrichteninitiierung keine direkte Route vom Sender zum Empfänger existiert. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbare Kapazität des Kommunikationsmediums teilt sich wie in Abschnitt 4.3 dargelegt auf eine Vielzahl von Fahrzeugen auf. Bezeichne daher wiederum

- θ_i die Datenrate, die Fahrzeug v_i aktuell für Broadcast-Übermittlungen belegt,
- $\Theta_j(\Delta t)$ die gemeinsam benutzte Kanalkapazität im Zeitraum Δt , sowie
- $IN(v_i) = \{v_k | v_i \in IN(v_k)\}$ die Menge der Knoten, die bei gleichzeitiger Übertragung den Empfang in Knoten v_i stören.

In einem Zeitraum Δt des temporären Graphen mit $\Delta t \rightarrow \epsilon$ existiert eine Menge von Kommunikationsbeziehungen J zwischen Fahrzeugen, mit gemeinsam benutzter Kapazität $\Theta_j(\Delta t)$, mit

$$\Theta_j(\Delta t) \geq \theta_i(\Delta t) + \sum_{v_k \in IN(v_i)} \theta_k(\Delta t).$$

Während des Zeitraums Δt übertragen bestimmte Fahrzeuge Nachrichten. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit existiert zum Zeitpunkt t_0 , also der Initialisierung des Netzwerkes, eine Menge von möglichen gleichzeitigen Übertragungen von Fahrzeugen, die sich nicht gegenseitig stören. Es existiert also eine Menge von unabhängigen Fahrzeugmengen, so dass in jeder Fahrzeugmenge genau ein Fahrzeug zum Zeitpunkt t_0 das Kommunikationsmedium belegen kann, ohne dass dies zu wechselseitigen Übertragungsinterferenzen führt.

Unter Berücksichtigung einer optimalen Medienzugriffsstrategie, die zu keinen Kollisionen beim Medienzugriff führt, wird daraus offensichtlich eine Menge von Fahrzeugen ausgewählt, die zum Zeitpunkt t_0 tatsächlich die Übertragung einer Nachricht starten.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Der Auswahlprozess zum Zeitpunkt t_i beeinflusst dabei im Weiteren die möglichen Mengen an Übertragungen zum Zeitpunkt t_{i+1} . Bezeichne hierbei P_{t_i} die Menge der zum Zeitpunkt t_i initiierten Übertragungen, so ergibt sich auf einer linearen temporären Ordnung eine Menge von jeweils abhängigen Kanalbelegungstrajektorien der Fahrzeuge $P_{t_0} \prec P_{t_1} \prec \dots \prec P_{t_T}$. Es gilt, dass ausgehend von der Netzwerkinitialisierung eine Menge von möglichen Nachrichtemengen existiert, die bis zum Zeitpunkt t_i versendet und durch den Weiterleitungsprozess zwischen den Fahrzeugen entlang der zeitrespektierenden Kantenstaffeln empfangen wurden. Diese empfangenen Nachrichten können weiterhin bezüglich der in ihnen enthaltenen Beobachtungen bzw. Kontextinformationen hinsichtlich ihres individuellen Anwendungsnutzens zum Zeitpunkt des Empfangs bewertet werden. Daraus folgt, dass zum Zeitpunkt t_i offensichtlich aus mindestens einer dieser Nachrichtemengen ein maximaler (aggregierter) Anwendungsnutzen resultiert. Es existiert also mindestens eine optimale Sequenz an Übertragungen, die zu einem optimalen aggregierten Netznutzen führt. Das Problem der Netzwerknutzenoptimierung kann somit in automobilen Ad-hoc Netzwerken dahingehend aufgefasst werden, eine optimale Sequenz an Sendeereignissen vor dem Hintergrund der aktuellen Umweltbedingungen zu finden.

Die Berechnung einer nutzenmaximierenden fahrzeugübergreifenden Nachrichtensequenz impliziert dabei zwei grundlegende Fragestellungen. Zum einen werden anwendungsspezifische kontextadaptive Vorschriften zur Berechnung des individuellen Nutzens der empfangenen Nachrichten benötigt. Zum anderen soll eine nutzenoptimale Übertragungsreihenfolge der Nachrichten gefunden werden. Letzteres besteht selbst wiederum aus zwei voneinander unabhängigen Fragestellungen. Da die eigentliche Nutzenbewertung erst auf Seiten des Nachrichtenempfängers durchgeführt werden kann, muss zum einen für jedes Fahrzeug genau diejenige Nachricht bestimmt werden, die potentiell im Weiteren für die Empfänger den größten aggregierten Nutzen aufweist. Dieser interne Auswahlprozess wird im Folgenden als *fahrzeugzentrische Nachrichtendifferenzierung* bezeichnet. Zum anderen muss die Nachrichtenübertragung der einzelnen Fahrzeuge so koordiniert werden, dass dasjenige Fahrzeug Zugriff auf den Kommunikationskanal bekommt, welches aktuell die Nachricht mit der größten aggregierten Nutzenerwartung hat. Dieser Prozess wird im Folgenden als *fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung* bezeichnet.

Sei daher wiederum V die Menge der am System teilnehmenden Fahrzeuge und A_i die Menge der in Fahrzeug $v_i \in V$ vorhandenen Anwendungen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt t_i besitzt jedes Fahrzeug v_i ohne Einschränkung der Allgemeinheit eine Menge $P_{v_i}^{t_i}$ an zu übertragenden Nachrichtepaketeten. Gelte im Folgenden $|P_{v_i}^{t_i}| = k \geq 2$, d.h. ein Fahrzeug v_i besitzt zum Zeitpunkt t_i mindestens zwei zu übertragende Nachrichten. Unter der Annahme eines globalen Wissens hinsichtlich der existenten Nachrichtepakete und der individuellen Nutzenfunktionen, kann zu jedem Zeitpunkt t_i diejenige Nachricht p_{v_i} ermittelt werden, die den globalen aggregierten Netznutzen in der Folge am stärksten erhöht. Diese Nachricht stellt den größten kumulierten Nutzen dar. Dabei gilt:

$$p_{v_i} = \left\{ p \in P_{v_i}^{t_i} \mid \hat{U}(t) = \max \left(\sum_{v_i \in V} \sum_{a_k \in A_i} \int_{t_i}^t U_{a_k}(\bar{X}_{p,t}, \Omega_{a_k}(t)) dt \right) \right\}.$$

6.2 Network Utility Maximization: Das Problem der optimalen Netznutzung in automobilen Ad-hoc Netzen

Offensichtlich ist eine Berechnung des Nutzens ohne Begrenzung der temporären Extrapolation nicht durchführbar. Unter der validen Annahme, dass der Nutzen eines Informationsartefakts aufgrund der Veränderlichkeit der Umweltbedingungen und des damit einhergehenden Informationsverlustes einer Nachricht über die Zeit gegen Null geht, also nur begrenzte Zeit überhaupt einen Nutzen für andere Netzwerkteilnehmer darstellt (siehe hierzu auch die Überlegungen in Kapitel 5), ist eine näherungsweise kurzfristige Extrapolation jedoch hinreichend und daher abschätzbar.

Offensichtlich ist eine generische mathematische Lösung des Problems auf Grund der umweltbedingten dynamischen Wirkfaktoren, die typischerweise nicht allgemein bekannt sind, und der darin begründeten nur bedingt vorhersagbaren Zeitvarianz der Nutzenfunktionen für reale Szenarien nicht möglich. Unter Berücksichtigung der eben geschilderten Überlegung kann aber eine Steigerung des aggregierten globalen Netzwerknutzens durch eine heuristische Optimierung der übertragenen Nachrichtensequenz erreicht werden. Zur Verdeutlichung des Unterschiedes zwischen dem eigentlichen Nutzen, der den Fahrzeugen bei Empfang einer Kontextinformation entsteht, sowie der senderbasierten heuristischen Abschätzung dieses Nutzens soll dies im Folgenden auch begrifflich unterschieden werden. Im Folgenden soll der Begriff der *Relevanz* einer Nachricht für die (heuristische) Abschätzung des eigentlichen *Nutzens* stehen.

Bei der Berechnung einer optimalen Sendereihenfolge müssen neben der Relevanz auch die zur Übertragung anfallenden Kosten berücksichtigt werden. Die Übertragungskosten richten sich dabei nach den spezifischen Eigenschaften des Kommunikationssystems. So können neben operativen monetären Kosten zur Übertragung beispielsweise auch Fragen zum Energiebedarf entscheidend sein. Bei den dieser Arbeit zugrunde liegenden Betrachtungen in automobilen Ad-hoc Netzwerken fallen weder monetäre operative Kosten an, noch existieren Einschränkungen des zur Berechnung, Speicherung oder Übertragung von Nachrichten notwendigen Energieverbrauchs. Die Kosten beschränken sich in diesem speziellen Fall also auf die Länge der zu übertragenden Nachricht. Die Länge von Nachrichten wirkt sich dabei in zweierlei Hinsicht auf die Systemperformanz aus. Zum einen benötigt eine Übertragung einer längeren Nachricht mehr Zeit und belegt daher länger den Kommunikationskanal. Das bedeutet natürlich, dass die restliche verfügbare Bandbreite, die anderen Nachrichten für die Übertragung zur Verfügung steht, mit zunehmender Nachrichtenlänge abnimmt. In Abhängigkeit der verwendeten Datenhaltungsstrategien wirken sich große Nachrichten andererseits mehr oder minder deutlich auch negativ auf die maximal im Fahrzeug verwaltbare Zahl an Nachrichten aus. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die maximale Ausbreitung von Nachrichten entlang der zeitrespektierenden Kantentaffeln, da auf Grund von Speicherbegrenzungen Nachrichten verworfen werden müssen.

Im Folgenden soll deshalb ein integratives Rahmenwerk im Detail beschrieben werden, das auf Basis der obigen Überlegungen durch den Einsatz von generischen Heuristiken eine näherungsweise Optimierung des globalen aggregierten Netzwerknutzens erlaubt. Dabei basieren manche Heuristiken zum Teil auf bekannten Lösungsvorschlägen für Teilproblemstellungen, die in der Literatur (unter teilweise abweichenden Annahmen) bereits vorgeschlagen wurden (siehe Abschnitt 4.5).

6.3 Ein nutzenoptimierendes Kontextverbreitungskonzept

6.3.1 Fahrzeugzentrische Nachrichtendifferenzierung

Da sich ein spezifischer Anwendungsnutzen wie beschrieben auf Basis des verfügbaren Vorwissens bemisst, sowie individuelle Fahrzeuge unterschiedliche Anwendungen beherbergen, müssen zur Abschätzung der Übertragungsrelevanz im Einzelnen die folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- Die *Nachrichtenredundanz*, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass die potentiellen Empfänger die Nachricht bereits erhalten haben.
- Die *Anwendungsdurchdringung*, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass auf den potentiell empfangenden Fahrzeugen die zugehörige Anwendung läuft, dass also der Nachrichteninhalt überhaupt verwertet werden kann. Besitzt ein Fahrzeug die zugehörige Anwendung nicht, ist der Nutzen für dieses Fahrzeug offensichtlich Null. Der Durchdringungsgrad einer Anwendung kann dabei vergleichsweise einfach global anhand der Verkaufszahlen der jeweiligen Anwendung bestimmt werden, setzt jedoch die Möglichkeit voraus, dass sich diesbezüglich signifikante Änderungen während der Laufzeit der Fahrzeuge aktualisieren lassen. Die in Abschnitt 3.3 beschriebene mögliche fahrzeuginterne Wissensverwaltung ermöglicht dies.
- Die *Verbindungscharakteristik*, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass die gewünschten Empfänger die Nachricht fehlerfrei erhalten. Aufgrund der Signalausbreitungscharakteristik speziell im anvisierten Frequenzbereich um 5,9 GHz kann eine fehlerfreie Nachrichtenzustellung auch bei vergleichsweise kurzen Entfernungen nicht per se als selbstverständlich angesehen werden. Die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen fehlerfreien Empfangs eines Nachrichtenpakets nimmt in der Regel mit zunehmender Distanz zum Sender (quadratisch) ab (vergleiche beispielsweise [TMSEFH06, SHM⁺04, TMCSEH06, Pre05]). Die Verbindungscharakteristik ist dabei bis auf den Einfluss der Nachrichtenlänge für alle potentiell zu diesem Zeitpunkt zu übertragenden Nachrichten gleich. Sie ist jedoch im Hinblick auf eine fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung von Bedeutung, da beispielsweise Fahrzeugen in exponierter Position sinnvollerweise eine höhere Kanalzugriffswahrscheinlichkeit zugestanden werden kann (vergleiche beispielsweise [LHT⁺03, Loc03, Kos05b]).
- Die *Verbreitungscharakteristik*, welche den voraussichtlichen Nutzen einer Übertragung hinsichtlich des weiteren Verteilungsprozesses beschreibt. Dies trägt der Anforderung Rechnung, dass eine Nachricht unter Umständen im weiteren Verteilungsprozess noch für weitere Fahrzeuge von Interesse ist, und das unmittelbar empfangene Fahrzeug für den weiteren Verteilungsprozess eine wichtige Rolle einnimmt. Dies ist insbesondere in lediglich dünn vermaschten Bereichen des automobilen Ad-hoc Netzes von entscheidender Bedeutung, um sicher zu stellen, dass eine Nachricht nicht aufgrund eines Mangels an Kommunikationspartnern mit einem Fahrzeug aus dem Gefahrengebiet getragen wird und daher verloren geht.

Bezeichne daher wiederum

- $N\hat{B}(v_i)$ die Nachbarschaft des Fahrzeugs v_i , also diejenigen Fahrzeuge, die potentiell Nachrichten von v_i empfangen können und
- A_i die Anwendungen in Fahrzeug v_i ,
- \bar{X}_p die Menge der in Nachricht p enthaltenen Beobachtungen, sowie
- $U_{a_k}(\bar{x}_j, \Omega_{a_k})$ bezeichnet dabei wiederum den Nutzen einer Kontextinformation für Anwendung a_k vor dem Hintergrund des bereits vorhandenen Wissens und der aktuellen Situation.

Bezeichne ferner

- R_i^p die Relevanz einer Nachricht p eines Fahrzeuges v_i ,
- die Funktion $p_A : A_i \times V \rightarrow [0, 1]$ die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Fahrzeug die entsprechende Anwendung existiert,
- die Funktion $p_E : \bar{X} \times A_i \rightarrow [0, 1]$ die Wahrscheinlichkeit, dass eine spezifische Kontextinformation $\bar{x}_j \in \bar{X}$ der Anwendung a_k bereits bekannt ist, dass also gilt $\bar{x}_j \in \Omega_{a_k}$,
- $R_D(v_j)$ eine Abschätzung hinsichtlich der Eignung des Nachbarn v_j im weiteren Verteilungsprozess der Nachricht, und
- $p_R : N\hat{B}(v_i) \rightarrow [0, 1]$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug der Nachbarschaft von v_i die Nachricht fehlerfrei empfängt.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich theoretisch folgende Berechnungsvorschrift für die Relevanz R_i^p einer Nachricht p eines Fahrzeuges v_i :

$$R_i^p = \sum_{v_j \in N\hat{B}(v_i)} \sum_{a_k \in A_i} w_1^{a_k} \cdot \left(\sum_{\bar{x}_j \in \bar{X}_p} w_2^{a_k} \cdot U_{a_k}(\bar{x}_j, \Omega_{a_k}) \cdot (1 - p_E(\bar{x}_j, a_k)) \cdot p_A(a_k, v_j) \cdot p_R(v_j) + w_3^{a_k} \cdot R_D(v_j) \right)$$

Der Gewichtungsfaktor $w_1^{a_k}$ erlaubt dabei die Umsetzung des Prinzips der solidarischen Fairness, also eine Differenzierung der einzelnen Anwendungen im Hinblick auf deren *Bedeutung* hinsichtlich des dedizierten Netzzieles automobiler Ad-hoc Netze. Insbesondere können so fahrsicherheitsbezogene Anwendungen gegenüber anderen gezielt (politisch motiviert) überprivilegiert werden. Die Gewichtungsfaktoren $w_2^{a_k}$ und $w_3^{a_k}$ mit $w_2^{a_k} + w_3^{a_k} = 1$ beschreiben weiterhin eine anwendungs- und situationspezifische Verteilung zwischen dem unmittelbaren Nutzen einer Nachricht für die direkten Nachbarn des Fahrzeugs v_i , sowie dem mittelbaren Nutzen der Nachricht im weiteren Verbreitungsprozess entlang der zeitrespektierenden Kantenstaffeln. Bei der Verteilung spielt

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

insbesondere die aktuelle Netzwerkdicke eine Rolle, da in dünn vermaschten Netzwerken dem Zwischenspeichern der Nachrichten (physical store and forward) bei bestimmten Anwendungen eine entscheidende Bedeutung zukommt. Bei Anwendungen, die auf einem wechselseitigen Ortsbewusstsein basieren, spielt hingegen der weitere Verteilungsprozess nur eine untergeordnete Rolle.

Aufbauend auf der Relevanzabschätzung R_i^p kann nun für jedes am System teilnehmende Fahrzeug unter Beachtung der durch die Übertragung entstehenden Kosten wie beschrieben eine interne Reihenfolge der zu übertragenden Nachrichten bestimmt werden. Unter der Annahme eines frei verfügbaren Kommunikationskanals soll entsprechend die Übertragungsrelevanz T_i^p einer Nachricht p des Fahrzeugs v_i vereinfachend als der Quotient der Nachrichtenrelevanz R_i^p und der Nachrichtengröße $size(p)$ definiert werden:

$$T_i^p = \frac{R_i^p}{size(p)}$$

Um eine optimale Anpassung an die sich fortwährend ändernden Bedingungen zu ermöglichen, wird die Übertragungsrelevanz T_i^p jeder Nachricht in der Nachrichtenwarteschlange Q_i des Fahrzeugs v_i in einem kontinuierlichen Prozess fortwährend aktualisiert. Auf diese Weise wird zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Kontext des Fahrzeugs berücksichtigt. Die praktische Umsetzung der oben beschriebene Berechnungsvorschrift für R_i^p birgt dabei folgende Schwierigkeiten:

- Es ist nicht jedem Fahrzeug bekannt, welche Anwendungen in den benachbarten Fahrzeugen vorhanden bzw. aktiv sind. Diesbezügliche Informationen können zwar periodisch oder bei Bedarf zusätzlich kommuniziert werden (siehe [Kos05b]), was jedoch zusätzlichen Kommunikationsaufwand bedeutet.
- Die Berechnung sicherer Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich des fehlerfreien Empfangs und Vorkennnisstands erfordert fundierte Kenntnisse der lokalen Umgebungsbedingungen (beispielsweise hinsichtlich der Abschattung der Signalausbreitung aufgrund von Gebäuden oder Bäumen), die im Allgemeinen nicht bekannt sind. Eine entsprechende näherungsweise Abschätzung kann jedoch auf Basis einer einfachen Datengrundlage erfolgen, wie beispielsweise der relativen Position der Nachbarn und der aktuellen Netzlast.
- Die Berechnungsvorschrift ist vergleichsweise komplex. Der Einsatz in eingebetteten Systemen, wie sie im Fahrzeugumfeld eingesetzt werden, erfordert eine systemoptimierte Umsetzung bzw. den Einsatz leistungsfähigerer Plattformen.

Im folgenden Abschnitt wird daher auf Basis generischer Heuristiken eine vereinfachte Möglichkeit zur näherungsweisen Abschätzung der Nachrichtenrelevanz R_i^p bzw. der Übertragungsrelevanz T_i^p vorgestellt, die in den eingebetteten Fahrzeugsystemen eingesetzt werden kann.

Heuristische Nachrichtenrelevanzabschätzung

Die eben vorgestellten Faktoren können heuristisch näherungsweise bestimmt werden. Die Heuristiken basieren dabei auf dem lokal im Fahrzeug bereits vorhandenen Kontextwissen. Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte des lokalen Kontextes, die

für eine heuristische Bestimmung relevant sind, für die einzelnen Nutzenbewertungsfaktoren dargestellt.

Nachrichtenredundanz Ein wesentlicher Beitrag zur Steigerung des Nutzens kooperativer Anwendungen ist die Minimierung redundanter Übertragungen von Nachrichten oder Nachrichteninhalten. Aus Sicht einer spezifischen Fahrzeugentität ist eine Nachricht oder ein Nachrichteninhalte in diesem Zusammenhang genau dann redundant, wenn das Fahrzeug dieselbe Nachricht bzw. denselben Nachrichteninhalte bereits zuvor erhalten hat. Der zusätzliche Nutzen einer bereits zuvor über einen anderen Ausbreitungsweg erhaltenen Nachricht ist offensichtlich Null. Redundante Übertragungen von Nachrichten können durch eine vorausgehende Abstimmung vermieden oder minimiert werden, indem periodisch die Nachrichtenidentifikatoren der zuletzt erhaltenen Nachrichten versendet werden. Redundanz kann auch durch eine Vorabstimmung bezüglich der möglichen zu übertragenden Nachrichten erreicht werden, ähnlich einem Handshake einer Client-Server Interaktion (vergleiche [Kos05b]). Beide Vorgehensweisen bedingen jedoch zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Die hierdurch mögliche Reduktion der benutzten Kanalkapazität ist dabei abhängig von der durchschnittlichen Nachrichtenlänge. Werden kleine Nachrichten zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht, so wirkt sich der zusätzliche Mehraufwand unter Umständen sogar kontraproduktiv aus. Auf Basis der nachfolgenden Heuristiken kann jedoch auch der Sender näherungsweise abschätzen, ob die Fahrzeuge in Empfangsreichweite eine Nachricht bereits erhalten haben:

- Eine gerade neu erzeugte und noch nicht vom Nachrichtenerzeuger versandte Nachricht ist offensichtlich noch von keinem Fahrzeug empfangen worden. Jede vom Nachrichtenerzeuger initial übertragene Nachricht ist daher redundanzfrei.
- Im weiteren Verlauf der Nachrichtenverteilung spielt der Zeitpunkt der letzten Übertragung eine wesentliche Rolle. Wurde eine Nachricht in einer bestimmten Region erst kürzlich übertragen, so ist es wahrscheinlich, dass die meisten Fahrzeuge in dieser Region die Nachricht auch empfangen haben. Eine unmittelbar anschließende Wiederholung birgt daher ein hohes Redundanzrisiko bei vielen Empfängern.
- Eine große räumliche Distanz zwischen dem letzten übertragenden Fahrzeug und einer potentiellen Nachrichtenwiederholung erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass durch die Wiederholung viele zusätzliche Fahrzeuge erreicht werden, die die Nachricht bisher nicht erhalten haben. Es ergibt sich also eine Vergrößerung des Verbreitungsgebietes. Eine geringe räumliche Distanz birgt dementsprechend ein großes Redundanzrisiko, da sich potentiell nur wenige Fahrzeuge im Empfangsradius des wiederholenden Fahrzeugs befinden, die nicht schon zuvor ebenfalls die Nachricht empfangen haben².
- Zudem spielt auch die aktuelle Netzwerkdichte eine entscheidende Rolle. In dicht vermaschten Netzen kann sich eine Nachricht potentiell in kurzer Zeit vergleichsweise rasch verbreiten. Daher ist davon auszugehen, dass auch weitere vom Ursprungsort entfernte Fahrzeuge eine Nachricht bereits erhalten haben. Ist das

²Diese Überlegung ist zentraler Bestandteil des geografischen Routings, wie es beispielsweise im Contention-Based-Forwarding beschrieben ist [FWH⁺04]

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

automobile Ad-hoc Netz in einer Region gering vermascht, und muss eine Nachricht durch physischen Weitertransport im Fahrzeug verbreitet werden, so ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass weiter entfernte Fahrzeuge die Nachricht bereits auf anderem Wege erhalten haben. Hinsichtlich einer heuristischen Abschätzung der Nachrichtenredundanz besteht also eine Korrelation zwischen der aktuellen Netzwerkdicke und der Entfernung zum Nachrichtenursprungsort.

- Zudem kann auf Basis der Richtung, aus der ein Fahrzeug neu in die Nachbarschaft eines Fahrzeugs eintritt, eine weitere Minimierung der redundanten Nachrichtenübertragungen erfolgen. Dies hängt mit der wahrscheinlichen Ausbreitungsrichtung einer Nachricht zusammen. Unter der Annahme einer nutzentrischen Verbreitungsstrategie kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass sich eine Stauwarnung auf einer Autobahn aufgrund des vergleichsweise höheren Interesses der in gleicher Fahrtrichtung nachfolgenden Fahrzeuge typischerweise eben entlang dieses Autobahnabschnittes verbreitet.

Einige der eben beschriebenen Heuristiken wurden bereits von verschiedener Seite hinsichtlich der Optimierung einer einmaligen Diffundierung einer Nachricht durch ein vermaschtes Fahrzeug-Ad-hoc Netzwerk vorgeschlagen, um dem Broadcast-Strom-Problem [TNCS99] entgegen zu wirken. Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, nutzt beispielsweise das Contention-Based-Forwarding [FWK⁺03, FHW⁺04] die relative Distanz zum Übertragungsort zur gezielten Unterdrückung einer Nachrichtenwiederholung in unmittelbarer Nähe. Die beispielsweise auch in [CGG⁺06] proklamierte explizite und statische Unterdrückung von Fahrzeugen hinsichtlich des Nachrichtenwiederholprozesses, kann jedoch implizit und adaptiv durch die zusätzliche Berücksichtigung der Zeitdifferenz zur letzten Übertragung realisiert werden. Wird eine Nachricht von dem am weitesten vom letzten Übertragungsort entfernten Fahrzeug wiederholt, so empfangen diese Nachricht auch viele Fahrzeuge, die schon die ursprüngliche Übertragung bereits erhalten haben. Diese Fahrzeuge setzen bei nochmaligem Empfang die Relevanz der redundanten Übertragung dieser Nachricht aufgrund der Einflussnahme der Zeitdifferenz zur letzten Übertragung herab.

Dieses Vorgehen entspricht im Wesentlichen einer (temporären) Nachrichtenunterdrückung. Im Gegensatz zu den oben erwähnten existierenden Vorschlägen beschränkt sich eine explizite heuristische Nutzenbewertung jedoch nicht auf das Ausbreitungsmuster einer einzelnen isolierten Nachricht. Letztlich treten nicht die potentiell weiterleitenden Fahrzeuge in einen Wettbewerb um die Weiterleitung. Stattdessen treten alle Nachrichten der beteiligten Fahrzeuge untereinander in einen Wettbewerb um den Kommunikationskanal.

Anwendungsdurchdringung Empfängt ein Fahrzeug eine Nachricht, deren zugehörige Anwendung nicht im Fahrzeug aktiv ist, ist der Nutzen für dieses Fahrzeug Null. Ist dem sendenden Fahrzeug im Vorfeld der Übertragung bekannt, welche Anwendungen auf den Fahrzeugen innerhalb der Empfangsreichweite aktiv sind, so kann wiederum die Anzahl an überflüssigen Nachrichtenübertragungen reduziert werden. Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge über kein Wissen bezüglich des Ausstattungsgrades der sie umgebenden Fahrzeuge verfügen, kann auch die Kenntnis hinsichtlich einer globalen Anwendungsdurchdringung berücksichtigt werden. Die aktuelle Anwendungsdurchdringung kann global durch Analyse der entsprechenden Verkaufszahlen erfolgen.

Eine weitere Verfeinerung kann hierbei durch lokale Analysen erfolgen, bei denen auch die Ursprungsregion der Nutzer mit erfasst wird. Ist beispielsweise bekannt, dass sich eine Anwendung hauptsächlich im ländlichen oder städtischen Bereich etabliert hat, kann in Verbindung mit dem aktuellen Aufenthaltsort eines Fahrzeugs eine weitere Verfeinerung der Abschätzung der Anwendungsdurchdringung erfolgen.

Verbindungscharakteristik Unter der Annahme eines festgelegten Kommunikationssystems in einem bestimmten Frequenzbereich, mit festgelegter Signalkodierung und -modulation, wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug eine Nachricht fehlerfrei empfangen kann, maßgeblich von der relativen räumlichen Position zum Sender, sowie durch die aktuellen örtlichen Gegebenheiten bestimmt. Offensichtlich nimmt das Signal-Rausch-Verhältnis mit zunehmender Distanz zu, wodurch eine fehlerfreie Rekonstruktion des Ursprungssignals erschwert wird. Gerade im aktuell für automobiler Ad-hoc Netze diskutierten Frequenzbereich um 5,9 GHz verschlechtern auch Abschirmungseffekte durch andere Fahrzeuge, Häuser oder Bäume das Signal. Letztgenannte Faktoren sind nur bedingt im Fahrzeug bekannt oder abzubilden. Demgegenüber kann jedoch die relative Position der potentiellen Empfänger vergleichsweise einfach ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung einer digitalen Straßenkarte können zudem speziell prädestinierte Fahrzeugpositionen wie beispielsweise Kreuzungsmittelpunkte erkannt und genutzt werden.

Verbreitungscharakteristik Damit eine Nachricht auch in dünn vermaschten Netzen mit wenigen Kommunikationspartnern über die benötigte Zeit aufrecht erhalten werden kann und ausreichend zirkuliert, ist es nicht ausreichend, Nachrichten lediglich einmal durch das bestehende Ad-Hoc Netz zu diffundieren. Es ist vielmehr notwendig, Nachrichten von Zeit zu Zeit zu wiederholen. Existierende Ansätze wie beispielsweise [KV98a, KV00, MFE03] legen typischerweise zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung statisch ein Zielgebiet (target area) fest, in welchem die Nachricht verteilt werden soll. Um eine ausreichende Zustellrate auch in dünn vermaschten Netzen zu gewährleisten wird darüber hinaus üblicherweise ein Kommunikationsgebiet bzw. Verbreitungsgebiet festgelegt (communication area), in welchem die Fahrzeuge die Nachricht untereinander austauschen. Dabei ist das Verbreitungsgebiet größer oder gleich dem Zielgebiet. Ein statisches zeit- oder distanzabhängiges Wiederholintervall steht dabei jedoch im Widerspruch zu einer expliziten situationsbezogenen Nutzenoptimierung. Stattdessen muss sich auch der ideale Zeitpunkt einer Nachrichtenwiederholung am Nutzen bemessen, der durch eine wiederholte Übertragung der Nachricht entsteht. Bei aktuell hoher Netzwerkdichte muss eine Nachricht nach einer Diffusion durch das Netzwerk selten wiederholt werden, da sich durch die starke Vermaschung die Nachricht über ein größeres Gebiet hin ausbreiten kann, und daher viele Fahrzeuge die Nachricht bereits erhalten haben. Ein dünn vermaschtes Netz erfordert hingegen eine vergleichsweise häufige Wiederholung. Unter der Annahme einer nutzenkorrelierten Verbreitung und unter Berücksichtigung der Überlegungen aus Abschnitt 2.4 und Kapitel 5 hinsichtlich des Informationsbedarfs bestimmter Anwendungen, bemisst sich die Notwendigkeit der Weiterverbreitung einer Nachricht insbesondere anhand der Orts- und Zeitdifferenz zur lokal festgestellten letzten Übertragung und der Netzwerkdichte, wobei beide Aspekte wiederum korreliert sind. Statt eines zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung statisch festgelegten Verbreitungsgebietes erlaubt die nutzenzentrische heuristische Abschätz-

zung also eine stetige Anpassung an die sich fortlaufend verändernde Situation.

Potentieller Nutzen Der zu erwartende inhaltliche Nutzen einer Nachricht ist anwendungsspezifisch. Im Zusammenhang mit kooperativen fahraufgabenbezogenen Anwendungen existiert jedoch eine Reihe von Aspekten, die qualitativ in ähnlicher Weise anwendungsübergreifend auftreten. Unterschiede existieren dabei lediglich in der konkreten Parametrisierung. Allgemein lässt sich festhalten, dass der Nutzen einer empfangenen Kontextinformation Null ist, sofern die entsprechende Information für das empfangende Fahrzeug nicht von Bedeutung ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der mit der Kontextinformation korrelierte Ort bzw. das mit ihr korrelierte Gebiet nicht in absehbarer Zeit erreicht oder durchquert wird. Entsprechend der vorgestellten Nutzenquantifizierung, bei der der Nutzen als Veränderung der individuell situationsabhängig gewichteten Wissensqualität aufgefasst wird (vergleiche Abschnitte 3.1.2 und 6.2.2), erhalten die für eine Anwendung wenig wichtigen Aspekte ein geringes Gewicht. Folglich tragen diese Aspekte nur wenig zum aggregierten Nutzenwert bei.

Vor dem Hintergrund der dynamischen zeitlichen Veränderlichkeit der Umweltbedingungen und Fahrsituationen, spielen im Hinblick auf eine heuristische Abschätzung des potentiellen Empfängernutzens aufgrund der Alterung einer konkreten Beobachtung die folgenden Faktoren eine wesentliche Rolle:

- Die räumliche und zeitliche Distanz zu dem mit der Kontextinformation korrelierten Ort bzw. Gebiet. Die Aussagekraft eines beobachteten Aspekts wird mit zunehmendem Alter und Distanz zwischen korreliertem Ort und der individuellen Position wie beschrieben geringer. Dabei ist die konkrete Abschwächung abhängig von der dynamischen Charakteristik des Aspekts (siehe Abbildung 2.15 aus Abschnitt 2.3.2). Folgendes Beispiel soll die Anwendungsspezifität des zeitlichen und räumlichen Nutzenaspekts nochmals kurz verdeutlichen: Der Nutzen einer Warninformation hinsichtlich einer plötzlichen Notbremsung minimiert sich mit zunehmendem Alter vergleichsweise schnell, da die Situation nur kurze Zeit gültig ist und ein unmittelbares Eingreifen erfordert. Bereits eine mehrere Sekunden alte Beobachtung dieses Aspektes ist im Weiteren ohne Bedeutung. Gleiches gilt schon für eine geringe Distanz, da der Wirkbereich der Notbremsung auf die Fahrzeuge beschränkt ist, die unmittelbar auf das bremsende Fahrzeug folgen. Die Information nutzt lediglich denjenigen Fahrzeugen, die sich zum Zeitpunkt der Beobachtung in unmittelbarer Nähe des korrelierten Ortes befinden. Im Gegensatz dazu ist aufgrund der geringen Veränderungswahrscheinlichkeit der Situation eine Beobachtung bezüglich einer aufgetretenen Aquaplaninggefahr über einen längeren Zeitraum bis hin zu mehreren Stunden gültig. Bei der Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Distanz spielt zudem in Verbindung mit den räumlichen Wirkfaktoren eines Aspekts die Fahrtrichtung sowie der Straßentyp, bzw. die wahrscheinliche Route eines Fahrzeuges eine wesentliche Rolle. Das Phänomen der unterschiedlichen Nutzenquantifizierung einer Stau-Information im Vergleich zu einer Nebel-Information auf ein und demselben Autobahnabschnitt kann letztlich als eine signifikant unterschiedliche räumliche und zeitliche Distanz zum korrelierten Ort aufgefasst werden. Die *effektive* relative räumliche Distanz entspricht im Allgemeinen nicht dem Euklidischen Abstand zwischen korreliertem Beobachtungsort und der individuellen aktuellen Position der die Anwendung beherbergenden Entität (siehe Abschnitt 3.1), sondern der

bis zum korrelierten Ort des Aspekts tatsächlich zurückzulegenden Wegstrecke des Fahrzeugs. Dies gilt analog für die *effektive* zeitliche Distanz. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung und der damit einhergehenden räumlichen Wirkung eines sichtbehindernden Nebelfelds, die unabhängig von einer möglichen baulich bedingten Fahrtrichtungstrennung des Straßentyps ist, ist auch für entgegenkommende Fahrzeuge das Auftreten des auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn beobachteten Aspekts wahrscheinlich. Die effektive relative räumliche Distanz entspricht in diesem Falle also nahezu dem geografischen Euklidischen Abstand zwischen der Beobachtung und der aktuellen Position des Fahrzeugs. Die zeitliche Distanz entspricht analog der Zeitspanne zwischen dem korrelierten Beobachtungszeitpunkt und dem Zeitpunkt des wahrscheinlichen Erreichens des korrelierten Ortes oder Gebietes. Im Falle eines Staus auf der Gegenfahrbahn entspricht aufgrund der baulichen Trennung die minimale effektive Distanz zwischen aktueller Fahrzeugposition und Beobachtungsort der Wegstrecke zum nächsten Umkehrpunkt und zurück. Die Euklidische räumliche Distanz zum Beobachtungsort lässt sich wie der direkte Zeitunterschied zum Beobachtungszeitpunkt im Fahrzeug bestimmen. Die Berechnung der effektiven räumlichen und zeitlich Distanz erfordert jedoch das Vorhandensein einer digitalen Karte im Fahrzeug.

- Die Qualität der Beobachtung. Wie in Kapitel 5 deutlich wurde, ist die Aussagekraft von Beobachtungen mit deren Qualität korreliert. Die Qualität einer Beobachtung bemisst sich dabei anhand ihrer Genauigkeit und das in sie gelegte Vertrauen. Sofern diese Meta-Informationen mit den eigentlichen Beobachtungswerten übertragen werden, sind diese unmittelbar im empfangenen Fahrzeug ebenfalls vorhanden.

Wie beschrieben basieren alle Heuristiken auf im Fahrzeug typischerweise ohnehin vorhandenen Kontextinformationen. Diese lassen sich hierbei zu den drei folgenden Kategorien verallgemeinern.

- Der *Nachrichtenkontext* beschreibt Aspekte hinsichtlich Nachrichtenerzeugung und -übertragung. Diese können typischerweise direkt aus dem Nachrichtenkopf gewonnen werden. Eine (anwendungsspezifische) Interpretation des Nachrichteninhalts ist daher nicht notwendig. Hierunter zählen das Alter der Nachricht, der Zeitpunkt der letzten Übertragung, der Zeitpunkt des letzten Empfangs, sowie die Distanz zur letzten Übertragung. Der Nachrichtenkontext spielt daher insbesondere bei der heuristischen Abschätzung der Nachrichtenredundanz eine Rolle. Aufbauend auf diesen Informationen ließe sich auch eine grobe nutzenorientierte Einschätzung auf Basis einer vorgegebenen anwendungsspezifischen Standard-Nutzenbewertungsfunktion realisieren, die es ermöglicht, Nachrichten ohne anwendungsspezifische Interpretation weiterzuleiten.
- Der *Fahrzeugkontext* beschreibt demgegenüber Aspekte mit Bezug auf die am Kommunikationsnetzwerk teilnehmenden Fahrzeuge, bzw. das Kommunikationsnetzwerk selbst. Kenntnis über diese Aspekte erhalten die teilnehmenden Fahrzeuge einerseits implizit durch die Teilnahme am Netzwerk, und andererseits explizit über fahrzeuginterne Sensoren, die den Zustand des Fahrzeugs selbst

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

beobachten. Hierzu zählt insbesondere die aktuelle Dichte an ausgestatteten Fahrzeugen, die Anzahl an unmittelbaren Nachbarn, die Netzwerklast, sowie die Position, Geschwindigkeit, die Fahrtrichtung und gegebenenfalls die Fahrspur und die aktiven Anwendungen des eigenen und der benachbarten Fahrzeuge. Der Fahrzeugkontext spielt dabei bei der heuristischen Abschätzung der Verbindungs- und Verbreitungscharakteristik, sowie falls bekannt hinsichtlich der Anwendungsdurchdringung eine Rolle. In diesem Zusammenhang ist wiederum auch die aktuelle Flexibilität der Fahrzeugentität hinsichtlich ihrer Handlungsalternativen mit zu berücksichtigen.

- Der *Informationskontext* beschreibt schließlich Aspekte in Bezug auf die übermittelte Information selbst, sowie deren Auswirkungen auf die individuellen Handlungsalternativen unter Berücksichtigung des Vorkenntnisstands. Die Auswertung des Informationskontextes bedarf folglich der anwendungsspezifischen Interpretation des Nachrichteninhaltes. Der Informationskontext ist wie einleitend eingehend erläutert einer der wesentlichen Hebel für eine effektive Nutzenoptimierung des Netzwerks, da Nachrichten, die wahrscheinlich lediglich eine geringe aggregierte semantische Informationsentropie besitzen (siehe Abschnitt 3.1.2), nur einen geringen zusätzlichen Anwendungsnutzen besitzen und daher unterprivilegiert übertragen werden. Zum Informationskontext zählt neben der Informationsentropie selbst insbesondere wiederum die aktuelle effektive räumliche und zeitliche Distanz zum Ort der Beobachtung des Aspektes, der Fahrzweck, die Anwendungskategorie, die Qualität der Beobachtung, sowie das Vertrauen in diese Beobachtung. Der Fahrzweck beeinflusst dabei im Hinblick auf die Handlungsentscheidungen wie erwähnt die individuelle Gewichtung der semantischen Entropie-Quantifizierung. Bei einer Einkaufsfahrt erhalten aktuelle Parkinformationen beispielsweise ein höheres Gewicht als die aktuelle Verkehrssituation auf dem Weg zum Einkaufszentrum. Aufgrund des altruistischen Charakters müsste einem Fahrzeug hierbei jedoch der jeweilige Fahrzweck seiner Nachbarn bekannt sein. Dies bedingt entweder statisches Wissen über typische Fahrtzwecke in einer Region zu spezifischen Zeiten (beispielsweise Pendlerheimfahrten zur Stoßzeit versus Einkaufstouren am Vormittag im Industriegebiet), oder wiederum einen vorangehenden prophylaktischen Kontexttransfer zwischen den Fahrzeugen, wobei letzterer wiederum zusätzlichen Kommunikationsaufwand bedeutet. Der Einbezug einer spezifischen Anwendungskategorie trägt dem Erreichen des dedizierten Netzziels dahingehend Rechnung, dass beispielsweise fahrsicherheitsrelevante Informationen privilegiert behandelt werden (siehe hierzu auch die Überlegungen hinsichtlich einer schichtenübergreifenden Kommunikationsarchitektur in Abschnitt 6.4). Wie bereits dargelegt, spielt der Informationskontext insbesondere bei der heuristischen Abschätzung der Informationsentropie bzw. Nutzens eine Rolle.

Die Tabelle in Abbildung 6.2 zeigt die wesentlichen Kontextaspekte zur heuristischen Nutzenquantifizierung. Aufgrund der sehr ähnlichen Basischarakteristiken kooperativer fahrbezogener Anwendungen, insbesondere des Altruismus und der Ortskorrelation von Beobachtungen und deren Auswirkungen, ergeben sich für diese Anwendungsklassen sehr ähnliche Heuristiken zur Abschätzung des Anwendungsnutzens. Zudem können auch die heuristischen Näherungen der zu erwartenden Nachrichtenreduktion, Verbin-

Informationskontext	
Beispiel	Beschreibung
Erwartung	Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis wie beschrieben existiert
Distanz	Aktuelle Distanz zum gemessenen Ereignis
Interesse	Interesse, das andere Fahrzeuge an dieser Informationen haben könnten
Einfluss	Einfluss, den das beschriebene Ereignis auf den Fahrer bzw. das Fahrzeug hat

Nachrichtenkontext	
Beispiel	Beschreibung
Nachrichtentalter	Vergangene Zeit seit Erzeugung der Nachricht
Letzte Übertragung	Vergangene Zeit seit der letzten Übertragung der Nachricht
Letzter Empfang	Vergangene Zeit seit die Nachricht empfangen wurde
Sender-Distanz	Distanz zum letzten Versender der Nachricht
Anzahl Wiederholungen	Anzahl der redundanten Wiederholungen einer Nachricht
Redundanz	Wahrscheinlichkeit, dass benachbarte Fahrzeuge diese Information bereits besitzen

Fahrzeugkontext	
Beispiel	Beschreibung
Straßenposition	Besondere Straßenpositionen mit besserer Übertragungsreichweite (z.B. Kreuzung)
Fahrtrichtung	Fahrtrichtung des Fahrzeugs
Konnektivität	Aktuelle Konnektivität des VANETs
Sendegebiet	Gebiet, das eine Übertragung durch das Fahrzeug abdecken würde
Netzwerkdichte	Aktuelle Fahrzeugdichte ausgestatteter Fahrzeuge
Nachbarn	Anzahl und Position der unmittelbaren Nachbarn

Abbildung 6.2: Beispiele für Kontext zur Verwendung in der Relevanz-Funktion

dungscharakteristik und Verbreitungscharakteristik auf Basis sich qualitativ ähnlich verhaltender Kontextaspekte ermittelt werden.

Dies ermöglicht eine weitere Vereinfachung der notwendigen Berechnungsvorschrift im Zuge einer heuristischen Relevanzabschätzung, allerdings mit dem Nachteil einer Vergrößerung des Ergebnisses. Dies ist vor dem Hintergrund der geringen Rechenkapazitäten eingebetteter Systeme, wie sie im Fahrzeug typisch sind, von Bedeutung. Um eine optimale Adaption an die aktuelle Situation zu gewährleisten, muss des Weiteren die Übertragungsrelevanz der zu sendenden Nachrichten fortlaufend aktualisiert werden. Die Nachrichtenrelevanz R_i^p kann letztlich vereinfacht auch durch die gewichtete Aufsummierung der Ergebnisse einer Menge der eben beschriebenen Heuristiken erzielt werden, wobei die konkrete Parametrisierung und Gewichtung anwendungsspezifisch ist. Je nach Anwendung spielen also unterschiedliche Heuristiken auf unterschiedlichen Aspekten eine unterschiedliche Rolle. Beispielsweise spielt bei der Handlungsentscheidung eines Querverkehrsassistenten das Alter der Beobachtung und die Distanz zum korrelierten Ort eine wesentlich größere Rolle als der Fahrtzweck oder die aktuelle Netzwerkdichte, anders als beispielsweise bei einer Stauinformation. Bezeichne daher

- H die Menge der eingesetzten Heuristiken,
- $h_j(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) \in H$ eine spezifische Heuristik über n abhängigen Kontextaspek-

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

ten \bar{x} , sowie

- $w_{h_j}^{a_k}$ das anwendungsspezifische Gewicht der Heuristik h_j bei Anwendung a_k

so gilt vereinfachend:

$$R_i^p = \sum_{v_j \in N\hat{B}(v_i)} \sum_{a_k \in A_i} \left(\sum_{h_i \in H} w_{h_i}^{a_k} \cdot h(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) \right).$$

Wie beschrieben kann auch die wahrscheinliche Anzahl der benachbarten Fahrzeuge in die heuristische Abschätzung mit einbezogen werden, sofern diese nicht bekannt ist. Zudem kann angenommen werden, dass eine Nachricht nur für eine zugehörige Anwendung a_k einen Nutzen darstellt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich folgende weitere Vereinfachung der heuristischen Relevanzabschätzung einer mit der Anwendung a_k korrelierten Nachricht p

$$R_i^{p, a_k} = \sum_{h_j \in H} w_{h_j}^{a_k} \cdot h_j(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n),$$

wobei sich die Ausprägung der Gewichte und Heuristiken von der einer expliziten Nachbarschaftsbetrachtung unterschieden werden.

Die Nutzenbewertung muss notwendigerweise vor der Übertragung stattfinden. Eine exakte Vorhersage ist jedoch ohne exakte Kenntnis der aktuellen Zustände der umliegenden Fahrzeugentitäten nicht möglich. Zudem kann das weitere Verhalten der Entitäten nicht vorhergesagt werden. Daher kann vor dem Zeitpunkt der Übertragung ohnehin lediglich eine näherungsweise Abschätzung des potentiellen späteren Nutzens für die empfangenden Fahrzeuge erfolgen. Vor diesem Hintergrund ist die beschriebene heuristische Vorgehensweise zwar vereinfachend, führt jedoch nicht notwendigerweise zu schlechteren Vorhersagen als eine explizitere Abschätzung. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte eine Verbesserung der Vorhersage erreicht werden kann. Die heuristische Vorgehensweise erlaubt so letztlich einen optimalen Kompromiss zwischen der möglichen Berechnungskomplexität, die sich aufgrund der fahrzeugetypischen Rahmenbedingungen ergeben, und der erreichbaren Qualität der Nutzenvorhersage. Eine nutzenorientierte Nachrichtenverbreitung erfordert wie beschrieben eine explizite Priorisierung bestimmter Nachrichten in der *Nachrichtenwarteschlange* Q_i (auch *interface queue* oder *send buffer* genannt) eines Fahrzeugs v_i . Die Nachrichtenwarteschlange verwaltet dabei diejenigen Nachrichten, die übertragen werden sollen, aber bisher noch nicht übertragen werden konnten. Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, sehen die beiden Standards IEEE 802.11e und p hierfür eine statische Priorisierungsstrategie auf Basis von EDCF vor, mit folgenden Eigenschaften und Konsequenzen:

- Nachrichten mit höherer Priorität besitzen im Schnitt eine kürzere Verweildauer im System, da sie in höherpriorige Schlangen eingereiht werden und diese überprivilegiert beim Kanalzugriff berücksichtigt werden.

- In der Regel verhungern keine Nachrichten, da auch Nachrichten aus niederpriorigen Schlangen übertragen werden (jedoch mit geringerer Wahrscheinlichkeit), und zwar auch dann, falls noch Nachrichten höherer Priorität in höherpriorigen Schlangen enthalten sind.
- Nachrichten, die schon länger in einer der Warteschlangen auf den Kanalzugriff warten, haben im Schnitt eine höhere Auswahlwahrscheinlichkeit, als kürzlich eingereichte Nachrichten.
- Werden zwei Nachrichten in die gleiche Warteschlange eingereiht, so wird die zuerst eingefügte auch zuerst übertragen. Die Priorisierung findet daher letztlich nicht auf Basis einer flexiblen individuellen Nachrichtencharakteristik statt, sondern an Hand der Einteilung in eine vergleichsweise geringe Zahl an Vorzugsklassen. Eine spätere Aktualisierung ist nach dem Einfügen in eine Schlange nicht mehr möglich.

Dieses Vorgehen entspricht den üblichen Fairness- und Qualitätsanforderungen bidirektionaler Unicast Verbindungen. Aufgrund der in Kapitel 2.4 beschriebenen speziellen Netzwerk- und Anwendungscharakteristik entspricht das Vorgehen jedoch nicht vollständig den Anforderungen, die sich im Hinblick auf eine nutzendifferenzierende Kontextverbreitung in automobilen Ad-Hoc Netzwerken ergeben. In diesem Zusammenhang gilt insbesondere:

- Das Prinzip der solidarischen Fairness sieht vor, dass Nachrichten, die aktuell den größten Nutzen für die Allgemeinheit darstellen, gegenüber anderen Nachrichten priorisiert werden. Dies bedeutet letztlich auch, dass Nachrichten mit lediglich geringem zu erwartendem Nutzen verhungern können. Dies widerspricht dem sonst üblichen Vorgehen, dass mit zunehmender Verweilzeit in der Nachrichtenwarteschlange die Auswahlwahrscheinlichkeit steigt.
- Die notwendige Minimierung der Latenzzeiten aktuell fahrsicherheitskritischer Nachrichten macht es erforderlich, dass eine neue Nachricht überprivilegiert auf den Kanal zugreifen kann. Dies muss auch gelten, wenn andere Nachrichten mit einer vergleichsweise hohen Übertragungsrelevanz bereits in der Nachrichtenwarteschlange verweilen und auf eine Übertragungsmöglichkeit warten. Da sich die Fahrsituation diesbezüglich ereignisbasiert und daher schlagartig verändern kann, ist es erforderlich, dass die Reihenfolge der Elemente der Warteschlange jederzeit entsprechend der sich ändernden Umweltbedingungen modifiziert werden kann.
- Sofern die Kapazität der Warteschlange nicht ausreicht, um alle Übertragungswünsche aufzunehmen, wird üblicherweise so lange jeder neue Übertragungswunsch verworfen, bis eine bereits enthaltene Nachricht erfolgreich übertragen werden konnte, und folglich wieder ein Warteschlangenplatz frei wird. Dies widerspricht der Anforderung einer explizit nutzenbasierten Priorisierung von Übertragungswünschen. Insbesondere muss verhindert werden, dass fahrsicherheitskritische Nachrichten aufgrund eines aus einer hohen Grundlast des Netzwerks resultierenden Überlaufs der Nachrichtenwarteschlange verworfen oder verzögert werden.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Es ist daher zweckmäßig, das übliche Verhalten der Nachrichtenwarteschlange hinsichtlich der spezifischen Anforderungen in Fahrzeug Ad-hoc Netzen zu modifizieren. Der Einsatz einer *Vorrangwarteschlange* (*Priority Queue*) (siehe beispielsweise [Wikf]) entspricht besser den Anforderungen, als eine Menge von Warteschlangen, welche die Einfügereihenfolge erhaltenden. Die einer Nachricht zugewiesenen Prioritätswerte entsprechen dabei zweckmäßigerweise unmittelbar den modifizierten Wartezeiten vor einem Kanalzugriff (siehe hierzu die Erläuterungen im nächsten Abschnitt). Eine kürzere Wartezeit erhöht dabei die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Kanalzugriffs. Abbildung 6.3 stellt nochmals die übliche und modifizierte Vorgehensweise bei einem Überlauf der Warteschlange gegenüber. Eine der wesentlichen Herausforderungen, die

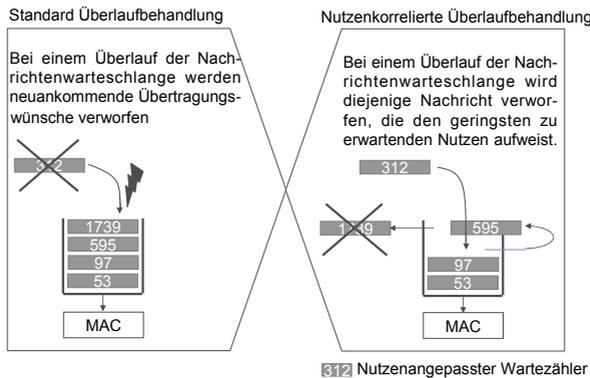


Abbildung 6.3: Vergleich der Vorgehensweisen bei Auftreten eines Warteschlangenüberlaufs [Sch06]

einer expliziten Nutzenbewertung zugrunde liegen, ist der hohe Berechnungsaufwand, der für eine fortlaufende Nutzenabschätzung einer Nachricht vor dem Hintergrund sich permanent ändernder Rahmenbedingungen notwendig ist. Grundslegend kann weiterhin zwischen zwei Varianten der Funktionalität der eingesetzten Nachrichtenwarteschlange unterschieden werden, je nachdem, ob eine Änderung der Nutzenabschätzung auch nach dem Einfügen in die Nachrichtenwarteschlange noch möglich ist oder nicht³. Letzteres erfordert jedoch erheblich höheren Aufwand, da auch für alle Nachrichten, die sich bereits in der Nachrichtenwarteschlange befinden, fortlaufend die Übertragungsrelevanz neu berechnet werden muss. Zusätzlich ergeben sich permanente Änderungen in der Reihenfolge der Nachrichten. Der wesentliche Vorteil liegt jedoch in der schnellen Anpassungsfähigkeit an sich wechselnde Bedingungen, insbesondere dann, wenn der Kommunikationskanal weitgehend ausgelastet ist und sich in Folge dessen eine große Anzahl an noch nicht übertragenen Nachrichten in der Warteschlange befindet.

Aufgrund des kooperativen Charakters der wesentlichen Anwendungsklassen kann es zudem vorkommen, dass durch den Empfang einer weiteren Nachricht die Übertragung

³Analog der Vorrangwarteschlangenterminologie entspricht dies der Frage, ob eine *change key*-Methode unterstützt wird.

einer sich bereits in der Nachrichtenwarteschlange befindenden eigenen Nachricht weitgehend überflüssig wird, da sie eine sehr ähnliche oder dieselbe Information enthält. Letzteres ist häufig der Fall, wenn Nachrichten in einem größeren Gebiet per Multi-hop verbreitet werden sollen. Füssler et al. [FWK⁺03] versuchen dies wie in Abschnitt 4.5 beschrieben in vereinfachter Form, bei der lediglich eine einzelne Nachricht betrachtet wird, durch eine gezielte Unterdrückung der umliegenden Netzwerkknoten zu verhindern. Unter der Annahme, dass in diesen Fahrzeugen bereits ein Reihe von anderen Nachrichten in der zugehörigen Nachrichtenwarteschlange auf ihre Übertragung warten, entspricht dieses Vorgehen letztlich einem Spezialfall der hier dargelegten Überlegungen, der jedoch situationsbedingte Veränderungen des Nutzens einer ausgetauschten Information nicht ausreichend widerspiegelt⁴.

6.3.2 Fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung

Eine explizite nutzenorientierte Nachrichtendifferenzierung erfordert es, gezielt dasjenige Fahrzeug als nächstes auf den Kanal zugreifen zu lassen, das die Nachricht mit dem größten zu erwartenden Anwendungsnutzen besitzt. Dies erfordert zum einen eine fahrzeugübergreifende Normalisierung des Übertragungsnutzens R^P . Unter der Annahme, dass auf allen Fahrzeugen die gleiche Berechnungsvorschrift zur Bestimmung des Übertragungsnutzens angewandt wird, ergibt sich implizit die erforderliche Normalisierung. Zum anderen muss der Kanalzugriff den unterschiedlichen Nutzenerwartungen Rechnung tragen. Neben den bereits im letzten Abschnitt kurz eingeführten Merkmalen von IEEE 802.11e existiert eine Reihe unterschiedlicher Ansätze und Vorschläge zur Realisierung einer gezielten Priorisierung bestimmter Knoten oder Nachrichten beim Kanalzugriff. Dabei können prinzipiell die vier folgenden unterschiedlichen Klassen von Basismechanismen unterschieden werden:

- Ratenbasierte Verfahren vs. paketbasierte Verfahren
- Implizite Koordination vs. explizite Koordination

Ratenbasierte Verfahren, wie beispielsweise in [WR05, LMFH05a, LA02] vorgeschlagen, weisen dabei den Knoten individuelle Senderaten zu. Während des zugewiesenen Übertragungsfensters können die Fahrzeuge jeweils beliebige Nachrichten übertragen. Ein neuer Auswahlprozess findet erst nach Ablauf des Übertragungsfensters statt. Demgegenüber ermöglichen paketbasierte Verfahren, wie beispielsweise in [IEE05a] dargestellt, eine individuelle Priorisierung einzelner Pakete. Nach erfolgter Nachrichtenübermittlung findet im Anschluss ein neuer Auswahlprozess statt.

Der Auswahlprozess des Fahrzeugs, welches als nächstes auf den Kommunikationskanal zugreifen darf, kann dabei entweder implizit oder explizit geschehen. Implizit meint in diesem Zusammenhang, dass im Vorfeld kein Abstimmungsprozess der sich in Empfangsreichweite befindenden Netzwerkteilnehmer stattfindet und daher keine zusätzlichen Informationen übertragen werden müssen ([IEE05a]). Eine explizite Koordinierung beinhaltet eben diese gegenseitige Vorabstimmung (siehe beispielsweise

⁴Letztlich entspricht die explizite Unterdrückung der Netzwerkteilnehmer der verallgemeinerten Auffassung, dass durch eine redundante Übertragung dieser Nachricht kein zusätzlicher Nutzen mehr entsteht.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

[LMFH05a]). Ratenbasierte Verfahren erfordern eine explizite Abstimmung, da die einem Netzwerkknoten zugeteilte Senderate auch den umliegenden Knoten bekannt sein muss, um Paketkollisionen beim Medienzugriff zu vermeiden. Ein ratenbasiertes Verfahren ist für den Austausch fahraufgabenbezogener Kontextinformationen aufgrund der geringen tolerierbaren Latenzzeiten für fahrsicherheitskritische Informationen nicht zielführend, da die zugewiesenen Übertragungsfenster typischerweise nicht unterbrechbar sind. Der Koordinierungsprozess beim Kanalzugriff zwischen den Fahrzeugen muss stattdessen paket- bzw. nachrichtenorientiert sein. Die maximale Latenzzeit einer Nachricht, die eine unmittelbar sicherheitskritische Beobachtung enthält, bemisst sich so lediglich an der maximal zulässigen Nachrichtenlänge (der gerade übertragenen Nachricht), und nicht an der maximalen Länge eines aktuell zugewiesenen Übertragungsfensters.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine optimale Kanalzugriffsstrategie nicht Ziel dieser Arbeit ist und den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde. Da eine nutzenbasierte Anpassung des Medienzugriffs für eine umfassende nutzenorientierte Bereitstellung fahrbezogener Kontextinformationen jedoch erforderlich ist, soll im Folgenden eine naheliegende, paketbasierte Nachrichtenpriorisierung auf Basis der üblichen Medienzugriffsstrategie von IEEE 802.11 erfolgen. Hinsichtlich Leistungsanalysen und der Optimierung des Nachrichtenzugriffs wurden in unterschiedlichen Zusammenhängen bereits zahlreiche Ansätze vorgestellt (siehe beispielsweise [FWK⁺03, FHW⁺04, RNT03, EO06, TMJH04, DC99, CPSM03, GDG⁺02, LAS03]). In [AC01, LB03, ZC03] werden zudem möglichen Ansatzpunkte im Zusammenhang einer expliziten Nachrichtenpriorisierung und deren typische Effekte auf die Netzwerkeistung beschrieben.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden automobilen Ad-hoc Netze werden mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einem Derivat des IEEE 802.11 Standards beruhen, in einem Frequenzbereich von ca. 5,8 - 5,9 GHz (vergleiche Abschnitt 4.4). Wie beschrieben sehen die aktuellen bzw. aktuell diskutierten Standards IEEE 802.11e und p lediglich eine statische Eingruppierung in unterschiedlich priorisierte Warteschlangen vor.

Eine naheliegende dynamische und nutzenbezogene Adaption dieses Kanalzugriffsschemas ist die Korrelation der Wartezeit mit dem zu erwartenden Nutzen einer Nachricht. Nachrichten mit einer hohen Nutzenerwartung werden demzufolge kurze Wartezeiten zugewiesen und hierdurch gegenüber Nachrichten mit geringerer Relevanz beim Kanalzugriff privilegiert. Dabei kann entweder das Wettbewerbsfenster in seiner Größe an Hand der Nutzenerwartung variiert werden, oder unmittelbar der Wartezeähler selbst. Zudem kann, falls einem anderen Fahrzeug zwischenzeitlich Zugriff auf den Kommunikationskanal gewährt wurde, der Wartezeähler entweder wie üblich ausgesetzt und im Anschluss weiter dekrementiert werden, oder nach jedem Übertragungsende neu initialisiert werden. Die ersten beiden Varianten entsprechen dabei der klassischen Auffassung von Fairness und ermöglichen auch Nachrichten mit einer vergleichsweise geringen Nutzenerwartung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den Zugriff auf das Medium, selbst wenn andere Fahrzeuge aktuell Nachrichten mit einer höheren Nutzenerwartung besitzen. Sie lassen sich vergleichsweise einfach umsetzen, da der Standardzugriff lediglich um die Anpassung des Wettbewerbsfensters verändert werden muss. Eine direkte Korrelation des Wartezeählers in Kombination mit einer Neuinitialisierung nach jedem Übertragungsvorgang entspricht jedoch am Besten den speziellen Anforderungen einer nutzenoptimalen Kontextverbreitung in automobilen Ad-hoc Netzen, da so zu jedem Zeitpunkt genau derjenigen Nachricht die kleinste korrelierte Wartezeit zugewiesen

wird, die vor dem Hintergrund der aktuellen Situation die größte Relevanz hat. Zufällige Einflüsse werden so ausgeschlossen. Zudem haben Nachrichten, die sich schon längere Zeit in der Warteschlange befinden entsprechend dem Prinzip der solidarischen Fairness keine höhere Übertragungswahrscheinlichkeit. Abbildung 6.4 zeigt nochmals die Möglichkeiten der nutzenorientierten Anpassung der individuellen Wartezeit eines Netzwerkknotens nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung. Die Abbildungen

		Wartezähler nach Unterbrechung...	
		...fortgesetzt (per-packet adaptation)	...neuinitialisiert (per-period adaptation)
Korrelation desWettbewerbs- fensters	...Wartezählers	Explizite Wartezeit	Solidarische Fairness
	...Wettbewerbsfensters	Klassische Fairness	Zufällige Wartezeit

Abbildung 6.4: Möglichkeiten der nutzenorientierten Anpassung der individuellen Wartezeit eines Netzwerkknotens nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung

6.5 und 6.6 zeigen dabei exemplarisch qualitativ den möglichen Einfluss einer expliziten Nutzenanpassung des Wettbewerbsfensters. Das Beispiel nimmt an, dass Knoten Nummer 3 Nachrichten mit einer hohen Nutzenerwartung besitzt, die übertragen werden sollen (beispielsweise lokale Gefahrenmeldungen hinsichtlich eines Stauendes, sowie eine Notbremsung des voraus fahrenden Fahrzeugs). Es sollte daher den Wettbewerb um den Kanalzugriff gewinnen, um auf den Kanal zugreifen zu können. Abbildung 6.5 zeigt das Verhalten, wenn die restliche Wartezeit eines unterlegenen Knotens nach Ende einer Übertragung fortgesetzt wird. In diesem Beispiel gewinnt Knoten 1 im Anschluss den Wettbewerb und kann auf den Kanal zugreifen. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 6.6 das Verhalten, falls nach jeder Übertragung der Wartezähler entsprechend der Nutzenerwartung neu initialisiert wird. In diesem Fall ist es dem Teilnehmer 3 möglich, unmittelbar in Folge auch die zweite dringende Nachricht zu übertragen. Eine einfache quantitative Anpassung des Wettbewerbsfensters oder des Wartezählers besteht in einer linearen Degression mit zunehmender Übertragungsrelevanz. Dies setzt aufgrund der Achsenschnittpunkte allerdings sowohl die Existenz eines maximalen Relevanzwerts, als auch einer maximalen Größe des Wettbewerbsfensters voraus. Dabei wird der maximal vorkommende Relevanzwert auf den minimal zulässigen Wert des Wettbewerbsfensters oder Wartezählers abgebildet. Eine Relevanz von Null (bzw. kleiner eines vorgegebenen Schwellwerts) wird entsprechend auf den maximal zulässigen Wert des Wettbewerbsfen-

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

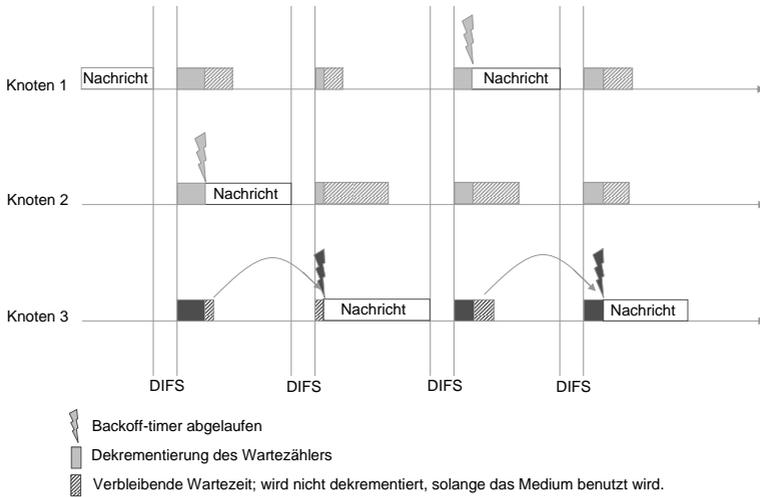


Abbildung 6.5: Einfluss einer expliziten Nutzenanpassung des Wettbewerbsfensters, bei Fortsetzung des Wartezählers nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung

sters oder Wartezählers abgebildet. Die Einführung eines Schwellwerts ermöglicht eine explizite Unterdrückung von Nachrichten, dessen erwarteter Nutzen so gering ist, dass sich eine Übertragung aus praktischen Gesichtspunkten nicht lohnt. Diese Nachrichten werden sinnvollerweise auch dann nicht übertragen, wenn kein anderes Fahrzeug in der Nachbarschaft eine wichtigere Nachricht in der Nachrichtenwarteschlange aufweist. Eine derartige explizite Unterdrückung, obwohl prinzipiell genügend Restkanalkapazität für eine Übertragung zur Verfügung stehen würde, ist vor dem Hintergrund des Hidden Node Problems sinnvoll. Da sich die Übertragungsrelevanz unter anderem auch an der Anzahl der potenziell interessierten Nachbarn bemisst, ist es schwierig, von Beginn an ein optimales Maß für den maximal zulässigen Wert der Übertragungsrelevanz zu finden. Das Problem kann jedoch dahingehend vereinfacht werden, dass Übertragungsrelevanz, die über einem üblicherweise hinreichend kritischen Wert liegen, weiterhin ein minimales Wettbewerbsfenster zugeordnet wird. Bezeichne im Folgenden

- BN mit $|BN| \geq 2$ eine beliebige Nachbarschaft an Fahrzeugen, die sich in gegenseitiger Kommunikationsreichweite befinden, sowie wiederum
- p_{v_i} die Nachricht in Fahrzeug $v_i \in BN$ mit der höchsten Übertragungsrelevanz, also diejenige Nachricht, die das Fahrzeug v_i nächstmöglich übertragen möchte.

So ergibt sich formal eine Anpassung des Wettbewerbsfensters bzw. des Wartezählers wie folgt: Die Nachricht p_{BN} , die in der Nachbarschaft übertragen werden soll, ist definiert als die Nachricht mit der höchsten Übertragungsrelevanz T_i^p unter den $|BN|$

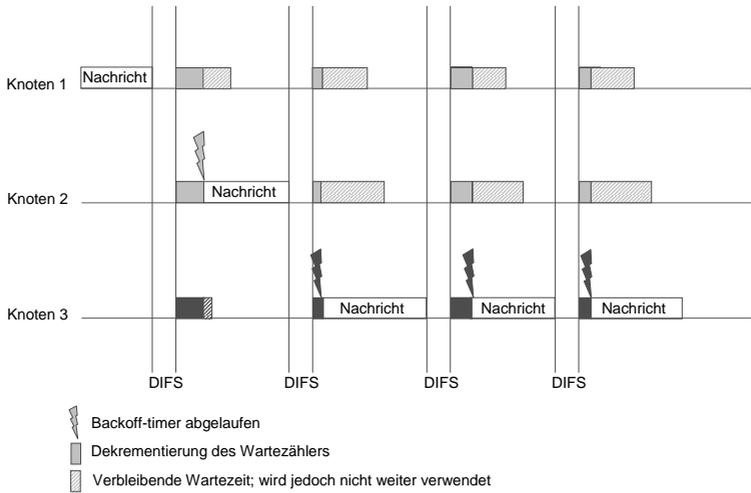


Abbildung 6.6: Einfluss einer expliziten Nutzenanpassung des Wettbewerbsfensters, bei Neuinitialisierung des Wartezählers nach Ende einer vorausgegangenen Übertragung

Nachrichten p_{v_i} der Fahrzeuge $v_i \in VN$ aus der Nachbarschaft. Es gilt folglich:

$$p_{BN} = \left\{ p \in \bigcup_{v_i \in |BN|} p_{v_i} \mid T_i^p(p) = \max_{v_i \in BN} (T_i^p(p_{v_i})) \right\}$$

Entsprechend der obigen Überlegungen ergibt sich für die direkte Anpassung des Wartezählers an die Übertragungsrelevanz BT_i für jedes Fahrzeug $v_i \in V$ die folgende allgemeine Berechnungsvorschrift

$$BT_i = \lfloor f_A(T_i^p(p_{v_i})) \rfloor.$$

Dabei bestimmt die Funktion $f_A : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{N}$ die konkrete Abbildungsvorschrift, die der größten Übertragungsrelevanz aller Nachrichten einer Nachrichtenwarteschlange eine Anzahl an zu wartenden Zeitschlitzten zuweist. Statt einer direkten Korrelation des Wartezählers kann auch eine relevanzbasierte Anpassung des Wettbewerbsfensters erfolgen. Der Wartezähler wird wie üblich anschließend zufällig aus dem angepassten Wertebereich des Wettbewerbsfensters bestimmt. Es gilt somit

$$CW_i = f_A(T_i^p(p_{v_i})),$$

$$BT_i = (\text{Rand} \bmod CW_i + 1)$$

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

wobei $Rand \in \mathbb{N}$ eine zufällig gewählte Wartezeit bezeichnet. Für die aufsummierte Wartezeit ergibt sich wie beschrieben die Summe der CSMA bedingten Rahmenkoordination (DIFS) und der errechneten Wartezeit, korreliert mit der vorgegebenen Dauer der Zeitschlitzte.

$$\text{Wartezeit} = (\text{DIFS} + BT_i) \cdot \text{SlotTime}$$

Für eine linear degressive Berechnung des Wartezeitlers BT_i des Fahrzeugs v_i ergibt sich die Anzahl der Zeitschlitzte demnach durch die Abbildung $f_{A_{lin}} : [S, T_i^p{}^{max}] \rightarrow [BT^{min}, BT^{max}]$ mit

$$f_{A_{lin}}(x) = \left[\frac{BT^{min} - BT^{max}}{T_i^p{}^{max} - S} \cdot (x - S) + BT^{max} \right]$$

$$BT_i = \left[\frac{BT^{min} - BT^{max}}{T_i^p{}^{max} - S} \cdot (T_i^p - S) + BT^{max} \right]$$

Die Konstante BT^{max} beschreibt dabei die maximal und BT^{min} den minimal zulässigen Wert des Wartezeitlers, $T_i^p{}^{max}$ den maximal erreichbaren Wert der Übertragungsrelevanz und S einen Relevanz-Schwellwert, unterhalb dessen keine Übertragung stattfindet. Letzterer dient wie beschrieben dazu, den Kommunikationskanal nicht unnötig zu belegen, falls keine wesentlichen Inhalte zur Übertragung anstehen. Wie gefordert

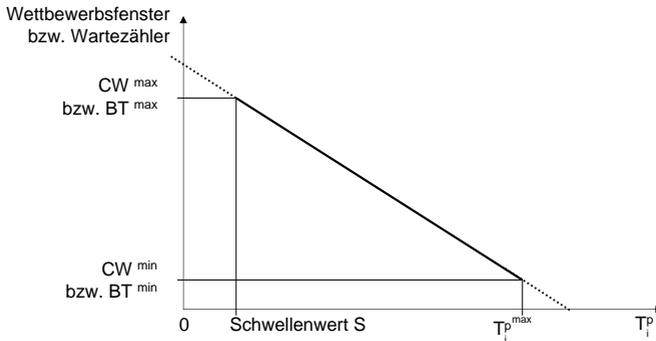


Abbildung 6.7: Lineare nutzenorientierte Adaption des Wettbewerbsfensters bzw. Wartezeitlers

ist der Wartezeitler umso kürzer, je höher die Relevanz ist. Offensichtlich geht zwar immer etwas Übertragungszeit durch den künstlich verzögerten Kanalzugriff verloren. Der Verlust ist jedoch umso geringer, je relevanter die Nachricht ist (siehe Abbildung 6.7). Entsprechendes gilt für eine mittelbare Anpassung des Wartezeitlers durch eine Adaption des Wettbewerbsfensters.

Die Adaption der Wartezeit auf Basis der Übertragungsrelevanz ist offensichtlich nicht auf eine lineare Degression beschränkt. Daher sollen im Folgenden kurz zwei alternative Kurventypen hinsichtlich der relevanzbasierten Wartezeitadaption diskutiert werden. Gegenüber einer linearen Korrelation $f_{A_{lin}}$ ergibt sich durch eine hyperboli-

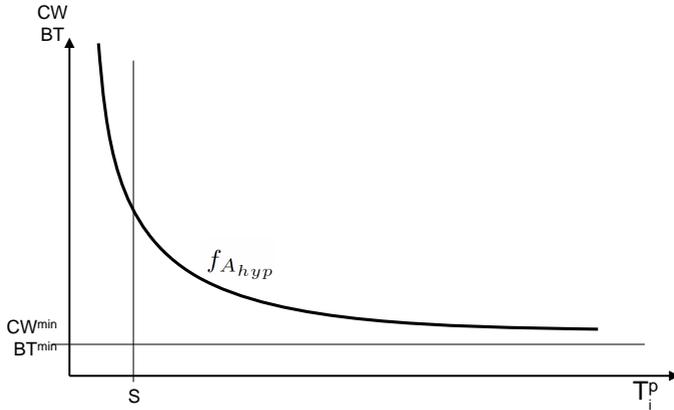


Abbildung 6.8: Hyperbolische Anpassung der Kanalzugriffswartezeit

sche Anpassung der Form $f_{A_{hyp}}(x) = a/(x + b)$ (siehe Abbildung 6.8) ein wesentlicher Vorteil, da es weder notwendig ist, einen maximalen Wertebereich für das Wettbewerbsfenster bzw. den Wartezeitähler, noch einen maximalen Wert für die Übertragungsrelevanz zu definieren. Einerseits nähert sich mit abnehmender Relevanz die Wartezeit asymptotisch gegen unendlich, begrenzt lediglich durch einen eventuellen Einsatz eines Schwellwerts S . Andererseits nähert sich der Wartezeitähler mit zunehmender Relevanz asymptotisch gegen die minimale Wartezeit BT^{min} . Ein wesentlicher Nachteil ergibt sich jedoch aus der Tatsache, dass mit zunehmender Übertragungsrelevanz auch die Veränderung des Wartezeitählers abnimmt, bzw. bei sehr geringer Relevanz sehr groß wird. Anders ausgedrückt ist der Limes der ersten Ableitung gegen unendlich Null, und gegen Null unendlich. Besitzen zwei oder mehr Fahrzeuge ähnlich hoch relevante Nachrichten, so unterscheidet sich die resultierende Wartezeit vor einem Kanalzugriff nur unwesentlich. Je größer die Differenz zwischen den errechneten Kanalzugriffswartezeiten der Netzwerkteilnehmer in einer Nachbarschaft ist, desto kleiner ist die resultierende Wahrscheinlichkeit, dass Paketkollisionen auftreten. Dagegen ergibt sich für Nachrichten mit lediglich geringer Relevanz eine ausgeprägte Differenzierung der resultierenden Wartezeit. Der Kurvenverlauf sollte daher vor allem im Bereich der aktuell existenten maximalen Übertragungsrelevanz der Teilnehmer eine hohe Steigung haben, bzw. sollte die Ableitung der Funktion dort den maximalen Wert erreichen.

Eine weitere Möglichkeit der Korrelation besteht in einer sigmoidalen Anpassung der Wartezeit, die in ähnlicher Form beispielsweise auch im Zusammenhang mit Aktivierungsfunktionen in neuronalen Netzen eingesetzt werden (siehe beispielsweise die

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Übersicht in [Sic06]). Zwar bedingt dies wiederum die Einführung einer maximalen Back-Off Zeit (oder eines maximalen Wettbewerbsfensters), ein wesentlicher Vorteil ergibt sich jedoch in der Möglichkeit einer gezielten lastabhängigen Beeinflussung der Kollisionswahrscheinlichkeit von Nachrichtenpaketen. Durch eine entsprechende Parametrisierung der möglichen Funktionsvorschriften ist es möglich, sowohl die Steilheit der Flanke als auch die Position der steilsten Flanke der aktuellen Netzlast anzupassen. Eine steilere Flanke bedeutet dabei wiederum in diesem Bereich eine geringere Kollisionswahrscheinlichkeit. Andererseits flacht der Kurvenverlauf in beiden Richtungen zu sehr wenig und hoch relevanten Nachrichten ab. Es bieten sich verschiedene Funktionstypen an, die ein derartiges sigmodales Verhalten aufweisen. In Anlehnung an [Sic06] sollen hier drei exemplarisch kurz angeschnitten werden. Zum einen die sog. *logistische Funktion* (auch *Fermi Funktion* genannt - siehe Abbildung 6.9)

$$f_{A_{log}}(x) = BT^{max} - \frac{(BT^{max} - BT^{min})}{1 + e^{-(a \cdot x - b)}}$$

Einen ähnlichen Kurvenverlauf zeigt auch die in Abbildung 6.10 exemplarisch darge-

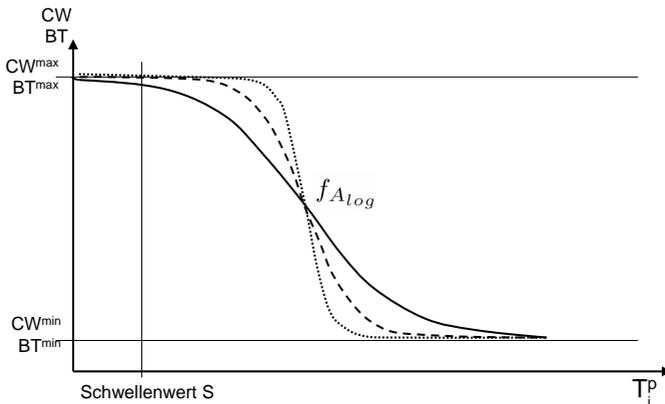


Abbildung 6.9: Parametrisierung der logistischen Anpassung des Wartezeitlers

stellte Anpassung der Wartezeit auf Basis des *Tangens Hyperbolicus*

$$f_{A_{tanh}}(x) = \frac{(BT^{max} - BT^{min})}{2} \cdot (1 - \tanh(a \cdot (x - b))) + BT^{min},$$

sowie die der sogenannten *schnellen Aktivierungsfunktion* [Sic06] angelehnte Funktion (siehe Abbildung 6.11)

$$f_{A_{fast}}(x) = \frac{(BT^{max} - BT^{min})}{2} \cdot \left(1 - \frac{a \cdot (x - b)}{1 + |a \cdot (x - b)|}\right) + BT^{min}.$$

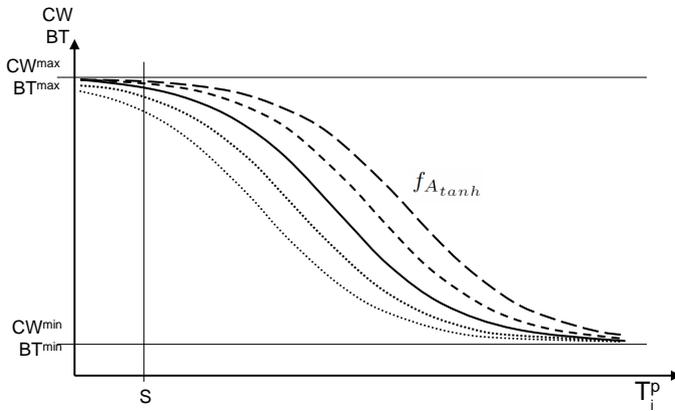


Abbildung 6.10: Sigmoidale Anpassung des Wartezeiters durch Parametrisierung des Tangens Hyperbolicus

Die Parameter a und b ermöglichen dabei jeweils eine Anpassung des spezifischen Kurvenverlaufs. Der Parameter b entspricht dabei dem Brennpunkt, bei dem die Flanke der Funktion am steilsten, d.h. die erste Ableitung betragsmäßig am größten ist. Dieser sollte wie bereits erwähnt im Bereich derjenigen Relevanzwerte liegen, die aktuell häufig vorkommen. Der Parameter a beeinflusst hingegen, wie schnell sich mit zunehmender Distanz zum Brennpunkt die Funktionsverläufe den Asymptoten BT^{max} bzw. BT^{min} nähern. Dadurch lässt sich letztlich die Ausgewogenheit der Wartezeiten beeinflussen. Offensichtlich ergibt sich sowohl für sehr große, als auch sehr kleine Übertragungsrelevanzwerte lediglich eine sehr geringe Differenzierung. Im Falle sehr kleiner Relevanzwerte ist dies ohnehin unproblematisch, da die entsprechenden Nachrichten in der Regel unterhalb des Schwellwerts liegen und gar nicht übertragen werden. Im Falle einer stattfindenden Nachrichtenübertragung ist eine Kollision zweier Nachrichten, die aufgrund zu geringer Differenzierung auftritt, unproblematisch, da beiden kollidierten Nachrichten nur ein geringer Nutzen beigemessen wurde. Im umgekehrten Fall ist dies dem gegenüber jedoch entscheidend. Gerade Nachrichten mit einer hohen Nutzenerwartung sind in der Regel auch vergleichsweise zeitkritisch, und sollten daher möglichst kollisionsfrei übertragen werden können. Dies kann mit entsprechender Variation des Parameters b erreicht werden. b kann entsprechend groß gewählt werden, so dass auch für hoch relevante Nachrichten noch ausreichend Wartezeitdifferenzierung gewährleistet werden kann.

Eine optimale Wahl der Kanalzugriffsstrategie bzw. deren Parametrisierung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Diese hängt stark von den zukünftig in den Fahrzeugen aktiven Anwendungen ab, der konkreten Nutzenabschätzung, und dem hierfür zur Verfügung stehenden Umweltwissen. Daher sollen an dieser Stelle lediglich die wesentlichen Metriken aufgegriffen werden, hinsichtlich derer eine optimale Zugriffsstrategie bemessen werden kann, und darauf aufbauend eine kurze Bewertung der vorgestellten

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

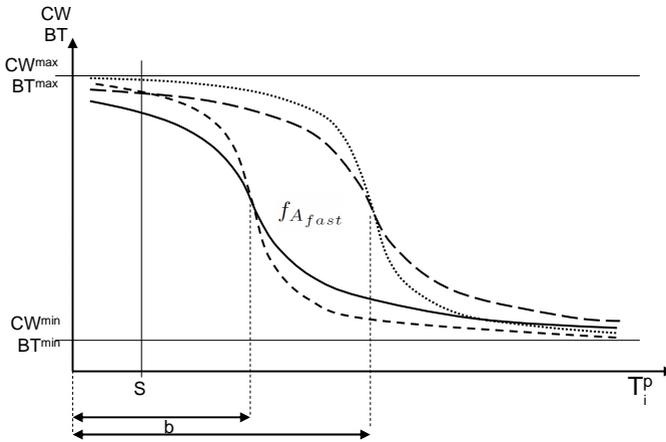


Abbildung 6.11: Sigmoidale Anpassung des Wartezählers durch Parametrisierung einer modifizierten schnellen Aktivierungsfunktion

Strategien erfolgen.

Durchsatz Der Netzdurchsatz hängt im Wesentlichen von der durchschnittlichen Anzahl von Paketverlusten und der mittleren Wartezeit vor einem Kanalzugriff ab. Eine optimale Kanalzugriffsstrategie muss daher sowohl versuchen, die Anzahl an Kollisionen, als auch die mittlere Wartezeit zu minimieren. Dies sind jedoch letztlich konkurrierende Ziele. Eine Verkürzung des Wettbewerbsfensters bzw. des Wartezählers verkürzt zwar einerseits auch die mittleren Wartezeiten. Andererseits steigt aber die Kollisionswahrscheinlichkeit, und umgekehrt. Dies gilt insbesondere dann, wenn viele Fahrzeuge am Netzwerk teilnehmen. Die Wartezeiten sollten daher in der Regel wenn möglich an die aktuelle Netzlast, sowie die Zahl an bekannten Nachbarn angepasst werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass durch eine Variation der minimalen und maximalen Wartezeit BT^{max} und BT^{min} bzw. des minimalen oder maximalen Wettbewerbsfensters CW^{max} bzw. CW^{min} eine gewisse Anpassung an die Netzwerklast auch zur Laufzeit möglich ist. Dies setzt jedoch eine kontinuierliche Abstimmung der beteiligten Fahrzeuge voraus. Eine Reduzierung der durchschnittlichen Wartezeit ermöglicht einen vergleichsweise hohen Durchsatz, falls nur wenige ausgestattete Fahrzeuge aktuell in einem Gebiet vorhanden sind. Andererseits vermindert eine längere durchschnittliche Wartezeit die Wahrscheinlichkeit für Paketkollisionen in Szenarien mit vielen ausgestatteten Fahrzeugen. Ironischerweise wird jedoch aufgrund des kooperativen Charakters der wesentlichen Anwendungen genau dann viel Durchsatz benötigt. Oder anders ausgedrückt: In Szenarien mit lediglich wenigen Fahrzeugen besteht (entgegen sonst üblicher Übertragungsmuster bei Uni-Cast Anwendungen) in der Regel kein Bedarf für einen möglichst hohen Datendurchsatz.

Explizite Priorisierung Wie bereits erwähnt, erfordern fahrsicherheitskritische Nachrichten eine explizite Priorisierung beim Kanalzugriff, um die aus der Übertragung resultierenden Latenzzeiten zu minimieren. Bei einer Anpassung des Wettbewerbsfensters wird dabei lediglich die Wahrscheinlichkeit eines schnellen Kanalzugriffs erhöht. Eine direkte Anpassung des Wartezeigers ermöglicht demgegenüber eine unmittelbare Anpassung.

Zusammenfassend lassen sich daher folgende Eigenschaften im Hinblick auf eine nutzenorientierte fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung festhalten:

- Eine direkte Adaption des Wartezeigers hat gegenüber einer Adaption des Wettbewerbsfensters den Vorteil, dass der Anforderung einer expliziten Nachrichtpriorisierung in sicherheitskritischen Situationen Rechnung getragen wird.
- Eine Anpassung des Wettbewerbsfensters hat gegenüber einer direkten Adaption des Wartezeigers den Vorteil, dass es auch dann nicht zu einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Paketkollisionen kommt, falls aufgrund der spezifischen Situation in vielen Fahrzeugen Nachrichten mit ähnlicher Relevanzbewertung erzeugt werden.
- Die Wahl des maximalen und minimalen Wettbewerbsfensters bzw. Wartezeigers hat sowohl entscheidenden Einfluss auf den erreichbaren Durchsatz, als auch auf die Wahrscheinlichkeit an Paketkollisionen. Ein kurzes Wettbewerbsfenster erhöht potentiell den Durchsatz, führt aber auch zu einer größeren Kollisionswahrscheinlichkeit.
- Die Einführung eines Schwellwerts verhindert, dass Nachrichten mit einer sehr geringen Übertragungsrelevanz übertragen werden, falls kein anderer Netzwerkverkehr vorhanden ist. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit von Paketkollisionen insbesondere vor dem Hintergrund der Hidden-Node Problematik. Zum anderen verkürzt es die Latenzzeiten der nächsten Nachrichten, da diese das Ende der Übertragung abwarten müssen.
- Die langen Produktlebenszyklen von Automobilen erfordern, dass ein einmal standardisierter Kanalzugriff aus Kompatibilitätsgründen im Wesentlichen unverändert bleibt. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass sowohl die Anzahl der Anwendungen, als auch die Anzahl der teilnehmenden Fahrzeuge rasch wächst. Unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Nutzenabschätzung, die beide Faktoren mit einbezieht, wird auch die maximal zu erwartende Nachrichtenrelevanz in Sondersituationen zunehmen. Daher erscheint eine statische Begrenzung der maximalen Übertragungsrelevanz negativ im Hinblick auf die weitere Skalierbarkeit des Systems.
- Eine lineare Adaption ist sehr einfach zu berechnen, setzt jedoch die Festlegung einer maximalen Übertragungsrelevanz voraus, die vor dem Hintergrund des langen Produktlebenszyklus und der eingeschränkten Skalierbarkeit problematisch erscheint.

- Eine sigmoidale Adaption hat den Vorteil, dass keine maximale Übertragungsrelevanz definiert werden muss, jedoch nimmt die Differenzierung der Wartezeit mit zunehmender Übertragungsrelevanz ab. An dieser Stelle sei angemerkt, dass dies nur dann im Hinblick auf eine zunehmende Kollisionswahrscheinlichkeit problematisch ist, falls unmittelbar der Wartezeähler adaptiert wird. Bei einer Anpassung des Wettbewerbsfensters tritt dieser Effekt nicht auf.
- Eine der schnellen Aktivierungsfunktion angelehnte Berechnungsvorschrift bietet die folgenden Vorteile. Zum einen werden keine rechenintensiven trigonometrischen oder exponentiellen Funktionen verwendet. Zudem muss keine maximale Übertragungsrelevanz definiert werden. Eine explizite vorgelagerte Normalisierung in einem bestimmten Wertebereich ist so nicht notwendig. Dies ermöglicht wiederum eine höhere Flexibilität bei der Bestimmung der Nachrichtenrelevanz. Darüber hinaus ist eine Anpassung der Parametrisierung auf Basis des vorhandenen Wissens hinsichtlich Netzwerkdicke und -last auch zur Laufzeit prinzipiell möglich. Eine geeignete zusätzliche Abstimmung zwischen den Fahrzeugen vorausgesetzt, kann auf diese Weise der Kanalzugriff an die sich unter Umständen schnell wechselnden Bedingungen angepasst werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf Sondersituationen wie beispielsweise Stauenden, die unter Umständen eine hohe Zahl an hochrelevanten Nachrichten in kurzer Zeit mit sich bringen können.

6.4 Eine schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur

Wie beschrieben wird ein automobiles Ad-Hoc Netzwerk, sobald es in einer großen Anzahl von Fahrzeugen zur Verfügung steht, die Grundlage für eine Vielzahl von unterschiedlichen Telematikanwendungen bilden. Die Anwendungsbereiche sind dabei nicht auf kooperative Fahrerassistenz oder -informationssysteme beschränkt. Es bieten sich vielmehr auch eine Reihe von bidirektionalen Client-Server oder Peer-2-Peer Diensten an, beispielsweise zur automatisierten Abwicklung elektronischer Bezahlvorgänge oder Unterhaltung der Fondpassagiere. Dabei stellen die verschiedenen Anwendungen auch unterschiedliche Anforderungen an das Kommunikationssystem. Vor dem Hintergrund des dedizierten Netzziels, wie es in Abschnitt 6.1 dargelegt wurde, muss jedoch jederzeit eine explizite Kontrolle darüber möglich sein, welche Anforderungen welcher Anwendung in einer bestimmten Situation tatsächlich erfüllt werden. Dies ist typischerweise eine Aufgabe der Netzwerkschicht. Wie in Abschnitt 6.3.1 jedoch ausführlich beschrieben, erfordert eine umfangreiche Nutzenabschätzung auch anwendungsspezifisches Wissen, das der Netzwerkschicht nicht zur Verfügung steht. Beispielsweise kann die Netzwerkschicht ohne Interpretation des Nachrichteninhalts nicht entscheiden, inwiefern eine Information hinsichtlich eines Gefahrenpotentials den Fahrzeugen bereits bekannt ist.

Aus diesem Grund ist es notwendig, auch anwendungsspezifisches Wissen in die Entscheidungen der Netzwerkschicht und der darunter liegenden Schichten mit einzubinden. Basierend auf den Überlegungen hinsichtlich einer nutzenzentrischen Nachrichtenverteilung aus dieser Arbeit, sowie den Vorarbeiten von Kosch [Kos05b], beschreiben Füssler und Torrent-Moreno et al. in [FTMT⁺05] und [MTM06] in diesem

Zusammenhang eine mögliche grundlegende Kommunikationsarchitektur im Fahrzeug. Die übliche Schichtung soll dabei nicht vollständig aufgegeben werden. Stattdessen soll es der Anwendungsschicht ermöglicht werden, je nach Erfordernissen bestimmte Schichten zu umgehen und direkt auf darunter liegende Schichten zuzugreifen. Abbildung 6.12 zeigt schematisch die resultierende Treppenstruktur der Schichtung. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass auch die Netzwerkschicht Zugriff auf die wesentlichen Kontextaspekte des Fahrzeugs hat, wie beispielsweise die aktuelle Netzwerkdicke, Fahrzeugposition oder Fahrtrichtung. Dies gilt insbesondere für den Fahrzeug- und den Nachrichtenkontext, der auch ohne Anwendungswissen ausgewertet werden kann⁵. Aufbauend auf dieser prinzipiellen offenen Schichtung werden die zwei grundlegenden

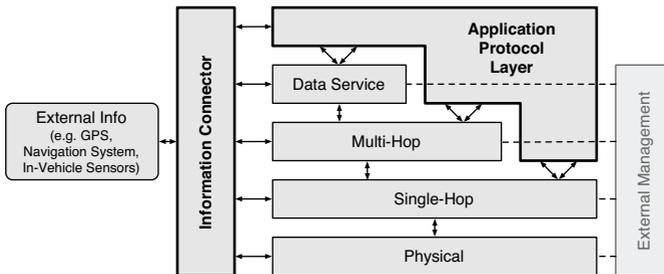


Abbildung 6.12: Schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur im Fahrzeug nach [FTMT⁺05]

konkurrierenden Ansätze bezüglich einer Informationsverbreitung in automobilen Ad-Hoc Netzwerken in veränderter Terminologie weiterhin aufgegriffen und sollen in einem hybriden Ansatz zusammengeführt werden. Dabei bezeichnet das sog. *Packet-Centric Forwarding* (PCF) die herkömmliche Vorgehensweise einer erzeugerdeterminierten Verbreitung, bei der der Nachrichtenerzeuger beispielsweise das Verbreitungsgebiet und die Lebensdauer der Nachricht festlegt. Der weitere Verbreitungsprozess geschieht dabei nach festen Regeln innerhalb der Netzwerkschicht, also ohne Interpretation des Nachrichteninhalts. Demgegenüber bezeichnet das sog. *Information-Centric Forwarding* (ICF) das zuvor beschriebene Prinzip der empfängerdeterminierten Verbreitung auf Basis einzelner single-hop Broadcasts, bei dem auch der Nachrichteninhalt in den Bewertungsprozess hinsichtlich der weiteren Verbreitung mit einbezogen wird (daher auch die Namensgebung). Hinsichtlich der Gestaltung einer einfachen Interaktionsschnittstelle zwischen Anwendung und Netzwerkschicht diskutieren Schnauffer et al. in [SFTE06] aufbauend auf [FTMT⁺05] den Einsatz Java basierter sog. *protocol elements*, die es der Anwendung ermöglichen sollen, das Verhalten des Netzwerks individuell zu beeinflussen. Dabei werden anwendungsspezifische Faktoren durch dedizierte Klassen instanziiert.

Die wesentlichen Motive für die parallele Beibehaltung klassischer Verbreitungsmethoden in einem hybriden Ansatz sind dabei nach [MTM06]:

⁵Füssler et al. [FTMT⁺05] sprechen in diesem Zusammenhang auch vom sog. *information connector*

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

- Die Existenz von Netzwerkknoten, die nicht über alle Anwendungen verfügen, und daher zum Teil keine inhaltliche Bewertung der Nachrichten vornehmen können.
- Die hohen Anforderungen fahrsicherheitskritischer Nachrichten hinsichtlich der tolerablen Latenzzeit. Eine anwendungsbezogene Interpretation der Daten kann demnach unter Umständen zu lange dauern und die Weiterleitung der Nachrichten in nicht tolerabler Weise verzögern. Aus diesem Grund wird bei Nachrichten sicherheitsbezogener Anwendungen die inhaltliche Bewertung umgangen.

Abbildung 6.13 zeigt dabei den vorgestellten möglichen Informationsfluss der Nachrichten in einem Fahrzeug nach [MTM06]. Beide Aspekte lassen sich jedoch mit der

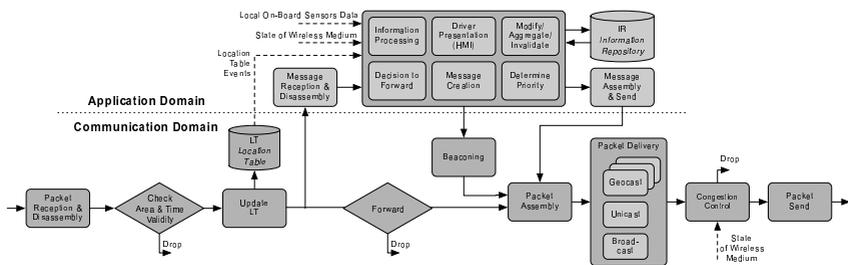


Abbildung 6.13: Informationsfluss im Fahrzeug nach [MTM06]

vorgestellten nutzenzentrischen Verbreitungsstrategie prinzipiell abbilden, bzw. im Hinblick auf kurze Übertragungslatenzen umsetzen, ohne in einem hybriden Vorgehen auch senderdeterminierte Aspekte zusätzlich mit berücksichtigen zu müssen. Dies soll im Folgenden erläutert werden.

Die hierzu vorgeschlagene integrierende und schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur besteht dabei aus folgendem vierstufigen Bewertungsprozess:

1. Einer inhaltlichen heuristischen Bewertung (hinsichtlich potenziellem altruistischen Nutzen) durch die Anwendung, wie dies beispielsweise für den Fall der lokalen Gefahrenwarnung in Kapitel 5 genauer beschrieben ist. Dies ermöglicht eine inhaltliche Nutzenabschätzung, welche die resultierende Netzlast nachhaltig senken kann, da Informationen mit geringem Neuigkeitsgrad nur bedingt übertragen werden.
2. Einer heuristischen Bewertung hinsichtlich der Nachrichtenredundanz, Anwendungsdurchdringung, sowie der Verbindungs- und Verbreitungscharakteristik. Da hierzu kein Anwendungswissen notwendig ist, kann dies auch erfolgen, wenn die korrespondierende Anwendung in einem Fahrzeug nicht vorhanden ist.
3. Einer anwendungsspezifischen Gewichtung. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass aufgrund des dedizierten Netzzieles bestimmte Anwendungen von den Fahrzeugherstellern als wichtiger erachtet werden als andere.

4. Einer anwendungsklassenspezifischen Gewichtung. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass sich die Nutzenentwicklung in Abhängigkeit der in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen nicht-inhaltsbezogenen Kontextaspekte für verschiedene Anwendungsklassen verallgemeinern lässt. Anwendungen in einer Anwendungsklasse haben also im Allgemeinen eine sehr ähnliche erwartete Nutzenentwicklung. Diese kann daher mit den gleichen Ausprägungen der eingesetzten Heuristiken abgeschätzt werden. Vor dem Hintergrund, dass hierfür wie erwähnt kein spezifisches Anwendungswissen erforderlich ist, ermöglicht dies auch dann eine sinnvolle Nutzenabschätzung, falls die korrespondierende Anwendung im Fahrzeug nicht vorhanden ist. Es ist lediglich Kenntnis über die Anwendungsklasse notwendig. Diese kann entweder ohne signifikanten zusätzlichen Aufwand in der Nachricht mit übertragen werden, oder aber über vorhandene Tabellen im Fahrzeug abgeglichen werden.

Letztlich hat also jede Anwendung die Möglichkeit festzulegen, wie viel potenziellen Informationsnutzen sie den ihr zugeordneten Nachrichteninhalten vor dem Hintergrund des verfügbaren Kontextwissens beimisst. Die inhaltliche Bewertung spielt dabei insbesondere initial bei der Erzeugung einer Nachricht eine entscheidende Rolle. Im weiteren Verteilungsprozess hat die Anwendung zudem die Möglichkeit, die Relevanz einer Nachricht zu vermindern, wenn aufgrund zusätzlicher Erkenntnisse der potenzielle Informationsnutzen dieser Nachricht abnimmt. Dies ist beispielsweise immer dann der Fall, wenn zu einer bereits übertragenen Beobachtung eine zeitlich neuere oder qualitativ höherwertige Beobachtung hinzukommt, die die ursprüngliche Hypothese stützt. Aufgrund der aktuelleren oder verlässlicheren Datenerhebung verliert die ältere Information an Informationsnutzen. Eine spätere Erhöhung der Relevanz ist jedoch unzumutbar. Dies würde bedeuten, dass nach der initialen Nachrichtenerzeugung zu einem späteren Zeitpunkt weniger Wissen zur Verfügung steht, als dies zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung der Fall war. Dies spielt bei der Betrachtung der Leistungsmerkmale der nutzenorientierten und inhaltsbezogenen Kontextverbreitung in automobilen Ad-hoc Netzwerken eine wesentliche Rolle und macht eine explizite Umgehung der Anwendungsschicht auch für fahrsicherheitskritische Nachrichten überflüssig. Nachrichten werden bei Empfang auch ohne erfolgte inhaltliche Evaluierung entsprechend ihrer heuristischen Bewertung hinsichtlich Redundanz, Anwendungsdurchdringung, Verbindungscharakteristik und Verbreitungscharakteristik in die Nachrichtenwarteschlange eingereiht. Das hierzu notwendige Kontextwissen steht auch der Netzwerkschicht zur Verfügung, die Zugriff auf die vorhandenen Aspekte in der Fahrzeugwissensbasis hat (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3).

Eine spätere inhaltliche Reduzierung des Informationsnutzens kann jederzeit erfolgen. Das bedeutet insbesondere für fahrsicherheitskritische Nachrichten, dass deren kommunikationsbedingte Latenzzeit, entgegen der Erwartung in [MTM06], nicht zusätzlich durch eine inhaltliche Nutzenbewertung erhöht wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Einfluss einer empfangenen Warnnachricht auf das Fahrgeschehen (siehe Abschnitt 2.3.3) von der Distanz des Empfängers zum Ort der Nachrichtenerzeugung abhängt. Das bedeutet, dass Nachrichten nur dann hoch fahrsicherheitskritische Informationen enthalten können, die einen unmittelbaren Eingriff in das Fahrgeschehen erfordern, wenn sich der Empfänger im unmittelbaren Umfeld der kritischen Beobachtung befindet. Da sich dies, abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit, im Bereich von wenigen hundert Metern abspielt, erfordern kritische Beobachtungen lediglich bei

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

der initialen Übertragung minimale Latenzzeiten. Diese erste Übertragung überbrückt bereits eine ausreichende Distanz. Der folgende Weiterleitungsprozess stellt daher geringere Anforderungen an die tolerierbare Latenzzeit. Auch vor diesem Hintergrund ist eine hybride Architektur im Hinblick auf eine explizite Umgehung einer rechenintensiven inhaltlichen Nutzenbewertung nicht notwendig. Zudem kann aus diesem Grund auch eine aus der heuristischen Relevanzabschätzung resultierende geringfügige Erhöhung der Latenzzeiten in Kauf genommen werden.

Abbildung 6.14 zeigt daher schematisch den vorgeschlagenen Informationsfluss im Fahrzeug auf Basis einer expliziten Nutzenbewertung. Die wesentlichen Komponenten bilden dabei die inhaltliche Nutzenbewertung durch die Anwendung, sowie ein übergeordneter und anwendungsübergreifender sog. *Scheduler*, der auf Basis der inhaltlichen Nutzenbewertung sowie der Anwendungs-kategorie die Reihenfolge der Nachrichten in der Vorrangwarteschlange bestimmt. Der Scheduler führt dabei eine inhaltliche Eva-

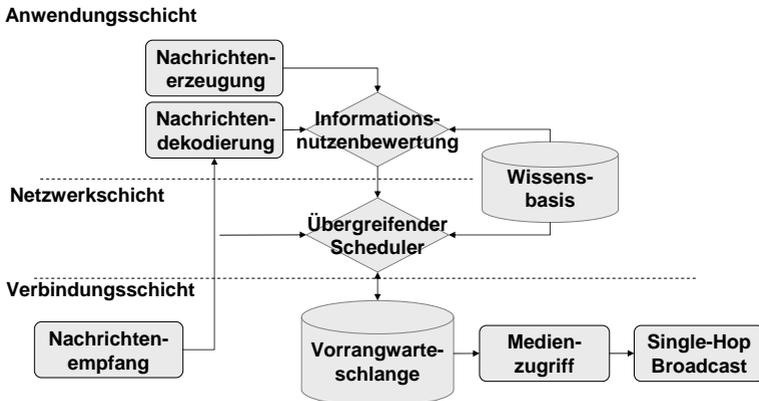


Abbildung 6.14: Rein relevanzbasierter Informationsfluss im Fahrzeug

luierung mit generischen anwendungsklassentypischen Ausbreitungsheuristiken zusammen. Dabei bildet er wie erwähnt eine gewichtete Summe aus gewichteter heuristischer Nachrichtenrelevanz einschließlich des Informationsnutzens (falls vorhanden), der Anwendungs-kategorie und der Anwendung selbst. Zudem ermöglicht er es der Anwendung, Nachrichten aus der Nachrichtenwarteschlange zu entfernen, wenn diese eine minimal sinnvolle Nutzenerwartung nicht mehr erfüllen.

Eine Anwendungskategorie bündelt alle diejenigen Anwendungen, deren Nutzenentwicklung sich ähnlich verhält. Dabei lassen sich grundlegend die folgenden unterschiedlichen Anwendungsklassen unterscheiden. Die hier vorgestellte Klassifikation basiert dabei auf den in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen möglichen Einflüssen auf das Fahr-geschehen.

Anwendungen mit potenzieller Handlungsnotwendigkeit (Action - Safety of Life)

Diese Klasse beinhaltet Anwendungen zur Kollisionsvermeidung wie beispielsweise die Querverkehrsassistenz oder die Notbremswarnung. Eine großflächige

Verbreitung ist nicht notwendig, weshalb die Nachrichtenrelevanz mit zunehmender Distanz und Zeit schnell abnimmt, bzw. nur bedingt überhaupt eine Nachrichtenweiterleitung erfolgt. Die Übertragung hat dabei aufgrund des unter Umständen höchst fahrsicherheitskritischen Charakters eine höhere Priorität als Anwendungen zu Erhöhung der Fahreraufmerksamkeit.

Anwendungen zur Erhöhung der Fahreraufmerksamkeit (Attention - Safety)

Diese Klasse beinhaltet beispielsweise die lokale Gefahrenwarnung. Beobachtungen sind dabei in einem etwas größeren Gebiet und über einen längeren Zeitraum von Interesse, um den Fahrer rechtzeitig über mögliche Gefahrenquellen zu informieren. Die Übertragung hat dabei aufgrund des fahrsicherheitskritischen Charakters eine höhere Priorität als Informationssysteme.

Fahraufgabenbezogene Fahrerinformation (Awareness) Diese Klasse beinhaltet beispielsweise hoch aktuelle Verkehrsinformationen. Diese sind über eine lange Zeit und in einem großen Gebiet von Interesse. Die Übertragung hat dabei aufgrund des fahraufgabenbezogenen Charakters eine höhere Priorität als nicht-fahraufgabenbezogene Fahrerinformationen.

Fahraufgabenbezogene Statusinformationen Diese Klasse beinhaltet beispielsweise die Übermittlung von Ampelzuständen. Die Ausbreitungsscharakteristik beschränkt sich dabei auf Single-hop Broadcasts, d.h. sie werden nicht weitergeleitet. Die Übertragung hat dabei aufgrund des fahraufgabenbezogenen Charakters eine ähnlich hohe Priorität wie die von fahraufgabenbezogenen Fahrerinformationen.

Nicht-fahraufgabenbezogene Fahrerinformation (Assistance) Diese Klasse beinhaltet beispielsweise Informationen über die aktuelle Parkplatzsituation, oder Bezirkepreise an Tankstellen in der Nähe. Diese sind über einen langen Zeitraum und in einem großen Gebiet von Interesse. Die Übertragung hat dabei aufgrund des kooperativen und altruistischen Charakters eine höhere Priorität als unspezifizierte beliebige andere Anwendungen.

Unspezifizierte Anwendungen In diese Klasse fallen alle weiteren Anwendungen, die das automobile Ad-hoc Netzwerk zu Kommunikationszwecken benutzen wollen. Diese sind nicht von den Fahrzeugherstellern zertifiziert und üblicherweise nicht altruistisch oder kooperativ. Stattdessen handelt es sich um herkömmliche Uni-Cast Client-Server oder Peer-to-Peer Anwendungen, wie beispielsweise Internet Zugriffe. Das Kommunikationsmuster unterscheidet sich dabei von dem kooperativer Telematikanwendungen. Statt einer reinen zielgerichteten Informationsausbreitung ist für die Kommunikation wie in klassischen Netzwerken das Finden, Aufbauen und Aufrechterhalten einer Route zwischen den Kommunikationspartnern von Bedeutung. Im Zusammenhang mit (automobilen) Ad-hoc Netzen wurde und wird diese Problemstellung vielfach ausführlich diskutiert (siehe beispielsweise [Per97, SK02, FM02, GWF03, JM96, BK00, KV98b, LHH02, LHT⁺03, RT99]). Falls eine inhaltliche Nutzenbewertung von der Anwendung unterstützt wird (was in der Regel nicht der Fall ist), so entspricht diese den in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen klassischen Nutzenoptimierungsfunktionen (siehe beispielsweise [FC05, LA02, Kel97]). Wird von der Anwendung keine explizite Bewertung

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

des Informationsnutzens durchgeführt, so werden die zugehörigen Nachrichtenpakete hierbei nach dem Prinzip des First-in-First out (FIFO) bewertet. Die Übertragung hat dabei aufgrund der für das System unbekanntem egoistischen Zielsetzung, die nicht in Bezug zum expliziten Netzziel der Fahrerunterstützung steht, offensichtlich den geringsten Gewichtungsfaktor aller Anwendungsklassen.

Die vorgeschlagene Architektur unterstützt auch eine klassische schichtenbezogene Kommunikation zwischen beliebigen Netzwerkteilnehmern. Dabei gilt, dass sich der Netzwerkverkehr der nicht fahrbezogenen Anwendungen in einheitlicher Weise auf Basis des vom globalen Scheduler ermittelten Nutzens in die Nachrichtenschlange einreihet. Nachrichten von höher eingestuftem Anwendungen oder Anwendungsklassen werden dabei allerdings nicht per se bevorzugt übertragen. Entscheidend ist vielmehr die insgesamt gültige Nutzenabschätzung. Eine Nachricht hinsichtlich einer potenziellen Aquaplaninggefahr wird beispielsweise nicht notwendigerweise vor einer Nachricht einer Chat-Anwendung übertragen. Existiert zu der berichteten Aquaplaninggefahr zum Beispiel eine Vielzahl an weiteren, qualitativ gleich- oder höherwertigen, Beobachtungen, so ergibt sich aus der zusätzlichen Informationen nur noch wenig Nutzen für die Fahrzeuge. Die Übertragung der Chat-Nachricht ist in dieser Situation insgesamt nützlicher und daher durchzuführen, auch wenn diese lediglich zwei Teilnehmer betrifft. Diese Vorgehensweise verspricht gegenüber den beispielsweise in [MTM06] vorgeschlagenen statischen Nachrichtendifferenzierungsparadigmen eine wesentlich günstigere Ausnutzung der Netzwerkressourcen in Situationen, in denen viele Fahrzeuge in kurzer Zeit ähnliche fahrrelevante Beobachtungen machen und untereinander austauschen. Damit skaliert das Konzept besser und ermöglicht auch bei hohen Fahrzeugdichten sowohl die explizite Priorisierung von sowohl sicherheitsrelevanten Nachrichten, als auch die parallele Unterstützung von nicht fahraufgabenbezogenen Anwendungen.

Zusammenfassend lassen sich folgende wesentliche Aspekte der vorgestellten nutzentrischen und schichtenübergreifenden Kommunikationsarchitektur festhalten, die in Abbildung 6.15 schematisch dargestellt ist:

- Verfügt ein Fahrzeug nicht über die zugehörige Anwendung, kann offensichtlich keine inhaltliche Bewertung hinsichtlich des potenziellen altruistischen Nutzens erfolgen. Ist die zugehörige Anwendungsklasse bekannt, kann aber trotzdem aufgrund der ähnlichen Relevanzentwicklung eine sinnvolle Abschätzung erfolgen. Da diese weiterhin auf beeinflussenden Aspekten des Nachrichten- und Fahrzeugkontextes beruhen, ermöglicht die Vorgehensweise trotzdem eine bessere Situationsadaptation als eine reine senderdeterminierte Ausbreitungsstrategie.
- Minimale Latenzzeiten sind nur dann notwendig, wenn sich das empfangene Fahrzeug in unmittelbarer Nähe der von einem anderen Fahrzeug beobachteten kritischen Situation befindet, und damit auch innerhalb der Kommunikationsreichweite des übertragenden Fahrzeugs. Im Hinblick auf den weiteren Ausbreitungsprozess ist eine geringfügige Verzögerung daher tolerabel. Da eine inhaltliche Bewertung die Nachrichtenrelevanz lediglich verringern kann, verlängert eine Bewertung des inhaltlichen Informationsnutzens durch die zugehörige Anwendung die resultierende Latenzzeit nicht. Eine explizite Umgehung der Anwendungsbewertung für bestimmte Anwendungen oder Anwendungsklassen ist daher nicht notwendig.

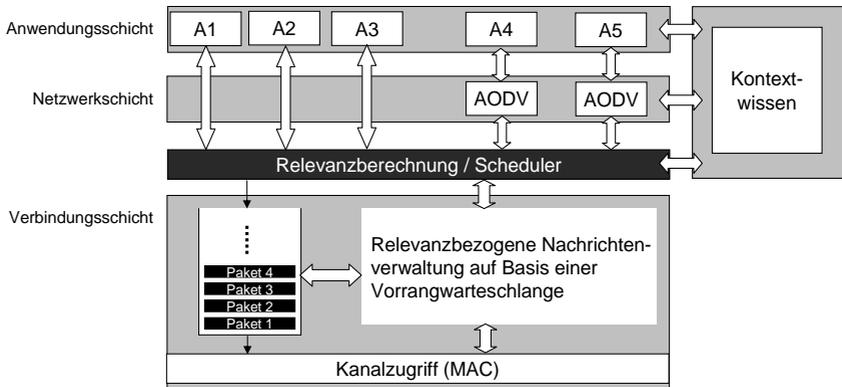


Abbildung 6.15: Schichtenübergreifende nutzentzentrische Kommunikationsarchitektur [Sch06]

- Eine Priorisierung der Übertragung basiert nicht statisch auf Anwendungen oder Anwendungsklassen. Vielmehr existiert eine übergreifende Differenzierung aller Einzelnachrichten auf Basis des erwarteten Nutzens.

6.5 Simulative Evaluation

Um eine weitergehende Analyse zu ermöglichen, wurde das vorgestellte empfangerdeterminierte und nutzenoptimierende Konzept zur Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen in unterschiedlichen Szenarien und mit unterschiedlichen Kommunikationsparametern simulativ evaluiert. Die Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden.

6.5.1 Überblick und Parametrisierung

Der zugrunde liegende Aufbau der verwendeten Simulationsumgebung entspricht dabei den Erläuterungen aus Abschnitt 4.6, wobei aus Gründen der Simulationsperformanz unterschiedliche Modulinstanzierungen und Kopplungsmuster angewandt wurden. Die exakte Simulationsparametrisierung und -modularisierung wird jeweils explizit angegeben. Den meisten simulierten Szenarien liegt folgende Parametrisierung zugrunde:

- Das Simulationsgebiet umfasst einen 8 km^2 großen Ausschnitt des Straßennetzes der Stadt München in Zentrumsnähe.
- Die Anzahl der simulierten und mit dem System ausgestatteten Fahrzeuge liegt bei 300 Fahrzeugen.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

- Die maximale Kommunikationsreichweite der Fahrzeuge beträgt 400 Meter, wobei aus Performanzgründen keine statistischen Empfangsmodelle wie beispielsweise [TMCEH06, TMSEFH06] beschrieben zur Anwendung kommen. Signalabschattung wird auf Basis einer angenäherten heuristischen Sichtlinienverdeckung entlang des Straßenverlaufes realisiert (siehe [Kos05b]).
- Die Simulationszeit beträgt 100 Sekunden.
- Für jedes Szenario wurden 50 unabhängige Simulationsdurchläufe durchgeführt, um eventuell auftretende singuläre Sondereffekte bestimmter Fahrzeugkonstellationen statistisch auszugleichen.
- Die maximale Anzahl der Nachrichten, die in der Nachrichtenwarteschlange aufgenommen werden kann ist auf 200 Nachrichten beschränkt.
- Aus Gründen der Performanz wurde eine un spezifizierte Hintergrundlast angenommen, welche die für die Fahrzeuge vorhandene effektiv nutzbare Kanalkapazität auf 0.1 Mbps bis 0.5 Mbps reduziert. Hierdurch kann das Systemverhalten bei hohen Netzwerklasten simuliert werden, ohne real in der Simulation diese Last explizit durch eine nicht handhabbare Zahl an Sendereignissen abbilden zu müssen.
- Aufgrund der höheren Zuverlässigkeit der existierenden Agenten des Netzwerk-simulators NS2 wurde als physikalische Übertragungsmethode die Umsetzung des IEEE 802.11b Standards verwendet. Durch die heuristische Begrenzung der Übertragung auf sichtsverdeckungsfreie Verbindungen und die Begrenzung der Kommunikationsreichweite auf maximal 400 Meter, entspricht dies jedoch weitgehend dem zu erwartenden Ausbreitungsverhalten in höheren Frequenzbändern.
- Die Sendeleistung wurde dabei in Anlehnung an zulässige Grenzwerte auf 100 mW begrenzt. Der Empfangsschwellwert (reception threshold), sowie der Kanalzugriffsschwellwert (carrier-sensing threshold) wurde so gewählt, dass ohne Sichtverdeckung in etwa eine Kommunikationsreichweite von 400 Meter erzielt wird. Dabei ergaben sich für den Empfangsschwellwert ein Wert von $3.9e^{-12}W$ und für den Kanalzugriffsschwellwert ein Wert von $1.559e^{-11}W$
- Der Signalausbreitungscharakteristik liegt ein sog. *Two Ray Ground Model* [Unic] zugrunde. Hierbei wird angenommen, dass das Funksignal neben einer direkten Kommunikationslinie auch durch den Boden reflektiert wird und so nochmals verzögert empfangen wird. Dabei wird eine Antennenhöhe von ca. 1,5 Metern über dem Boden und ein Antennengewinn von 1 dB angenommen.
- Die Fahrzeugbewegung werden auf Basis der Random Local Waypoint Strategie des CARISMA Mobilitätsgenerators bestimmt (siehe Abschnitt 4.6). Hierbei bewegen sich die Fahrzeuge nicht vollkommen zufällig entlang des Straßennetzes, sondern wählen sich zufällig einen Zielort aus, den sie anschließend auf dem kürzesten Weg ansteuern.

- Alle Nachrichten haben eine einheitliche feste Länge. Damit ist keine Normalisierung an Hand der spezifischen Nachrichtenlänge erforderlich. Als Grundlage des modifizierten Kanalzugriffsverfahrens aus Abschnitt 6.3.2 kann somit statt der Übertragungsrelevanz R_i^p unmittelbar die Nachrichtenrelevanz T_i^p der Nachricht p dienen (siehe Abschnitt 6.3.1).
- In jeder Nachricht wird lediglich eine Beobachtung übertragen. Somit ist der Nutzen einer Nachricht gleichzusetzen mit dem Nutzen der übertragenen Beobachtung.

Die verwendete kontextabhängige Nutzenabschätzung basiert dabei auf den in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Paradigmen und bezieht sich zumeist auf die Anwendungs-kategorie mit potenzieller Handlungsnotwendigkeit (siehe Abschnitt 6.4). Dabei werden aus Performanzgründen und strukturbedingten Restriktionen der Simulationsumgebung lediglich die folgenden linearen und unabhängigen heuristischen Bewertungen von sechs wichtigen Kontextaspekten verwendet:

- Die aktuelle räumliche und zeitliche Distanz zum Ort bzw. Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung (Distanz h_{di} in Metern bis max. 300 Meter, bzw. Nachrichtenalter h_{na} in Sekunden bis maximal 50 Sekunden), mit $h_{di}(x) = (300m - x)/300m$ und $h_{na}(x) = (50s - x)/50s$.
- Die vergangene Zeitdauer der letzten Übertragung (letzter Broadcast h_{lb} in Sekunden bis maximal 50 Sekunden), mit $h_{lb}(x) = x/50s$.
- Die vergangene Zeitdauer des letzten Empfanges h_{le} in Sekunden bis maximal 50 Sekunden, mit $h_{le}(x) = x/50s$.
- Eine spezielle ganzzahlige Anwendungsrelevanz h_{ar} im Intervall von 0 bis 10, wobei analog üblicher informatischer Vorgehensweise ein kleinerer Wert für eine höhere Relevanz steht. Daraus ergibt sich für $h_{ar}(x) = 10 - x$.

Zudem bezeichne der weitere Kontextaspekt h_{bk} eine diskrete inhaltliche Bewertung (Bekanntheitsgrad) im empfangenen Fahrzeug, die widerspiegelt, ob eine Nachricht bereits zuvor bekannt war ($h_{bk}(x) = 0$), oder nicht ($h_{bk}(x) = 1$). h_{bk} ist im Folgenden ebenfalls null, falls ein Fahrzeug den mit einer Beobachtung korrelierten Ort bereits passiert hat. Den heuristischen Abschätzungen liegt dabei ebenso wie der konkreten Parametrisierung, eine einfache Optimierung hinsichtlich der globalen Nutzenentwicklung in der speziellen Simulationsumgebung zugrunde. Diese ergab dabei folgende gewichtete Berechnungsvorschrift für die Nachrichtenrelevanz R_i^p

$$R_i^p = \frac{1}{7}(2 \cdot h_{di} + 2 \cdot h_{na} + h_{ar} + h_{le} + h_{lb})$$

Im sendenden Fahrzeug ist dies offensichtlich nicht bekannt. Wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, nimmt die Wahrscheinlichkeit p_E , dass also ein Fahrzeug eine Nachricht bereits erhalten hat, mit zunehmender Distanz (h_{di}) und zunehmendem Alter (h_{na}), sowie insbesondere einer erst kürzlichen Übertragung der Nachricht (h_{lb}) ab und ist

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

daher in der Berechnungsvorschrift mit berücksichtigt. Der tatsächliche Nutzen U_{a_k} bemisst sich dabei bei Empfang einer Nachricht analog näherungsweise durch

$$U_{a_k} = h_{bk} \cdot \frac{1}{6} (2 \cdot h_{di} + 2 \cdot h_{na} + h_{ar} + h_{le})$$

Die hier dargestellte Parametrisierung zielt dabei ausschließlich auf eine Steigerung des aggregierten globalen Netzwerknutzens der zugrunde liegenden Simulationsumgebung hin. Zwar enthalten die vorgestellten Heuristiken sowohl grundlegende Ergebnisse aus ersten realen Versuchsfahrten, als auch Elemente bereits publizierter Ergebnisse anderer Arbeiten. Weder die lineare Charakteristik noch die konkrete Parametrisierung der Heuristiken sind jedoch quantitativ allgemeingültig. Die Definition *optimaler* Heuristiken hängt dabei wie bereits erwähnt auch von den später real aktiven Anwendungen ab, sowie deren Kundenakzeptanz bzw. Bewertung (vergleiche beispielsweise [SSR⁺04, Sch06]). Dies ist jedoch nur durch umfangreiche reale Versuchsfahrten in Verbindung mit Kundenakzeptanzuntersuchungen möglich. Damit übersteigt die Definition optimaler Heuristiken den Fokus dieser Arbeit. Das qualitative Verhalten kann jedoch verallgemeinert werden. Eine Anpassung an die realen Gegebenheiten ist dabei in gleicher Weise möglich, wie die speziell an die vorliegende Simulationsumgebung und die simulierten Szenarien angepasste Ausprägung der Heuristiken.

Um die qualitative Leistungsfähigkeit der vorgestellten nutzenorientierten Kontextverbreitung zu evaluieren wurden eine Reihe von unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedlicher Zielsetzung auf Basis der in Abschnitt 6.4 vorgestellten schichtenübergreifenden Kommunikationsarchitektur durchgeführt. Die Zielsetzungen der simulativen Evaluation sind dabei im Einzelnen:

- Die Erörterung des grundlegenden qualitativen Verbesserungspotenzials hinsichtlich einer nutzenoptimalen Verwendung der verfügbaren Netzwerkressourcen in Abhängigkeit der vorgestellten Adaptionmöglichkeiten.
- Die Quantifizierung der Qualität der Nutzenabschätzung im Vergleich mit dem tatsächlich in den empfangenen Fahrzeugen auftretenden Nutzen.
- Die Darstellung der Abhängigkeit des Verbesserungspotenzials von der aktuellen Netzwerklast, welche wiederum mittelbar von der durchschnittlichen Dichte der ausgestatteten Fahrzeuge abhängt.
- Die Darstellung des Effekts einer kontinuierlichen Reevaluation der Nachrichten in der Nachrichtenwarteschlange, sowie einer kontinuierlichen Neubewertung der daraus resultierenden Übertragungsreihenfolge.
- Die Evaluierung des Einflusses unterschiedlicher Wettbewerbsfenster auf das Verbreitungsergebnis.
- Eine Bewertung der durchschnittlichen Anzahl an Nachrichten in den Nachrichtenwarteschlangen der Fahrzeuge.
- Die gegenüberstellende Darstellung des Einflusses einer Fortführung im Vergleich zu einer Neuinitialisierung des Wettbewerbsfensters nach Ende der vorangegangenen Übertragung, sowohl hinsichtlich der Entwicklung des globalen

aggregierten Netzwerknutzens, als auch hinsichtlich der durchschnittlichen Kanalauslastung.

6.5.2 Einfluss der fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung

Um das Verbesserungspotenzial hinsichtlich des globalen aggregierten Netzwerknutzens zu evaluieren, wurde die verfügbare Kanalkapazität auf 0,3 Mbps limitiert. Jedes Fahrzeug erzeugt zudem 10 neue Nachrichten pro Sekunde. Abbildung 6.16 zeigt die qualitative Verbesserung des globalen aggregierten Netzwerknutzens, falls wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, eine fahrzeuginterne nutzenbasierte Nachrichtendifferenzierung vorgenommen wird, d.h. jedes Fahrzeug die Reihenfolge der als nächstes zu übertragenden Nachricht auf Basis der Übertragungsrelevanz festlegt. Die Ordinate

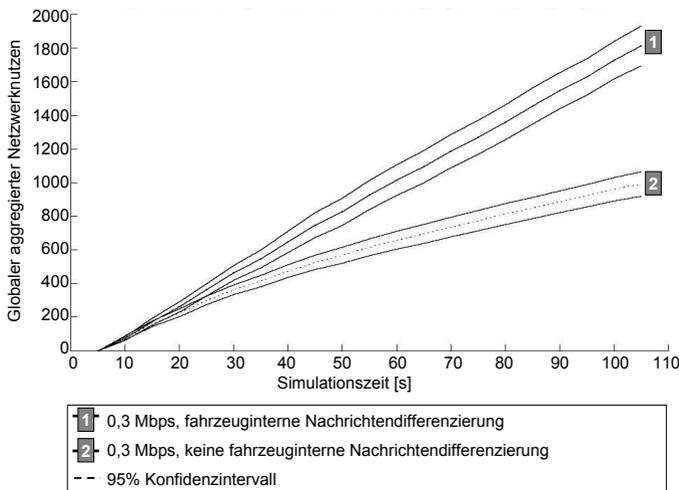


Abbildung 6.16: Qualitative Verbesserung des globalen aggregierten Netzwerknutzens aufgrund einer nutzenbasierten fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung.

zeigt dabei den aufsummierten Nutzen $\hat{U}(t)$ zum Simulationszeitpunkt t . Bei jedem Nachrichtenempfang in einem beliebigen Fahrzeug bewertet dieses anhand der oben beschriebenen Berechnungsvorschrift U_{a_k} hierzu den tatsächlichen Nutzen, welcher in einer globalen Summe wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben aufsummiert wird. Es ergibt sich offensichtlich ein skalarer Wert, der - wie bereits betont - simulationsspezifisch und daher in seiner konkreten Ausprägung nicht verallgemeinerbar ist. Der untere, gestrichelte Kurvenverlauf zeigt dabei die Entwicklung des Nutzens bei Anwendung einer nicht nutzenorientierten Verbreitungsstrategie. Die Fahrzeuge versuchen dabei die Nachrichten in der Reihenfolge ihres Eingangs in die jeweilige Nachrichtenwarteschlange (FIFO) zu übertragen. Demgegenüber zeigt der obere, durchgezogene Kurvenverlauf die Entwicklung des globalen Nutzens, falls die fahrzeuginterne Nachrichtendifferenzie-

rung auf Basis der beschriebenen Relevanzbewertung erfolgt. Die jeweils umgebenen durchgezogenen Linien bezeichnen dabei ein 95 prozentiges Konfidenzintervall 50 unabhängiger Simulationsdurchläufe.

6.5.3 Einzelbetrachtungen des Empfängernutzens

Eine Einzelbetrachtung des Empfängernutzens soll diese Effekte nochmals verdeutlichen. Abbildungen 6.17 und 6.18 zeigen in diesem Zusammenhang exemplarisch die Nutzenbewertung der einzelnen von den Fahrzeugen empfangenen Nachrichten zum Zeitpunkt des Empfangs, jeweils ohne und mit Verwendung der vorgestellten Nachrichtendifferenzierungsparadigmen. Hierzu wurden in je einem Simulationsdurchlauf auf Basis identischer Fahrzeugbewegungen von jedem Fahrzeug 30 neue Nachrichten pro Sekunde erzeugt und die verfügbare Kanalkapazität wiederum auf 0,3 Mbps begrenzt. Jedes Fahrzeug wertet bei Empfang einer Nachricht deren Nutzen an Hand der vorgestellten Nutzenbewertungsfunktion aus. Das Resultat wird zu diesem Zeitpunkt als Punkt in der Grafik auf Höhe des entsprechenden Nutzenwertes repräsentiert. Im Falle 1 (6.17) wurde eine einfache Weiterleitungsstrategie nach FIFO-Prinzip angewendet, im Falle 2 (6.18) die vorgestellte nutzenzentrische fahrzeuginterne Nachrichtendifferenzierung. Im Fall 1 zeigt sich, dass die Nutzenbewertungen zu Beginn insbesondere aufgrund des geringen Nachrichtenalters und der durchschnittlich geringen Distanz zum Ursprungsort als vergleichsweise folgerichtig hoch eingestuft wurde. Mit zunehmender Simulationsdauer und einer damit einhergehenden Verbreitung der Nachrichten sinken jedoch die Nutzenbewertungen im Durchschnitt rapide ab. Dies begründet sich dadurch, dass auch mit zunehmender Entfernung die Nachrichten weiterhin übertragen werden und damit Bandbreite konsumieren. Da jedoch fortlaufend neue Nachrichten erzeugt werden, werden offensichtlich weiterhin Nachrichten mit hohem Nutzen übertragen.

Demgegenüber zeigt sich im Fall 2 auch mit zunehmender Simulationsdauer ein Übergewicht an Übertragungen mit hohem Empfängernutzen. Übertragungen mit geringem Nutzen ergeben sich zum einen weiterhin dann, wenn der erwartete Nutzen aufgrund unterschiedlicher Bedingungen nicht dem tatsächlichen Nutzen des Fahrzeugs entspricht. Andererseits erlaubt das vorgestellte Konzept, falls genügend freie Kanalkapazität vorhanden ist, sinnvollerweise auch Übertragungen von Nachrichten mit lediglich geringer Nachrichtenrelevanz.

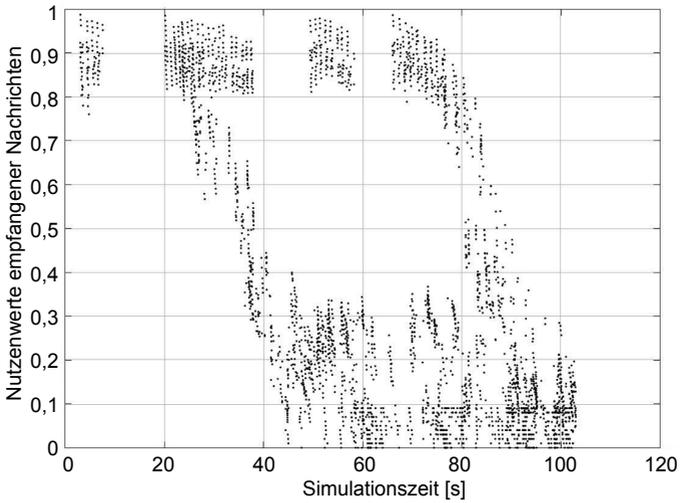


Abbildung 6.17: Nutzenhistorie ohne Anwendung einer nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung

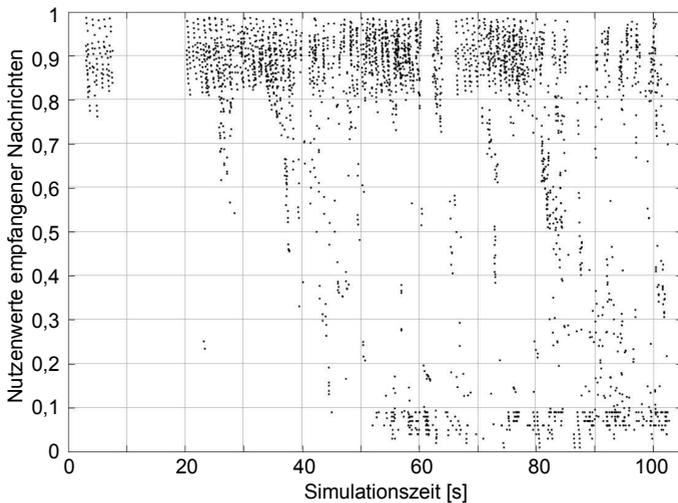


Abbildung 6.18: Nutzenhistorie bei Anwendung einer nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung

6.5.4 Einfluss unterschiedlicher Nachrichtendifferenzierungsparadigmen

Abbildung 6.19 zeigt die Ergebnisse eines Szenarios, bei dem jedes Fahrzeug 40 Nachrichten pro Sekunde neu erzeugt. Die Kurven 1 und 2 zeigen dabei die Entwicklung des

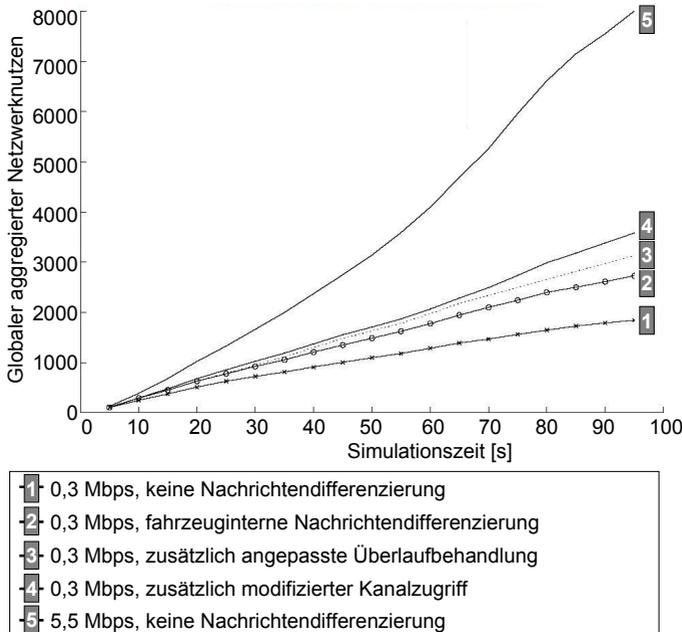


Abbildung 6.19: Überblick über die qualitativen Effekte unterschiedlicher Nachrichtendifferenzierungsparadigmen

globalen Nutzens, falls keine nutzenorientierte Nachrichtendifferenzierung angewendet wird (1) und die Nachrichtenwarteschlange auf Basis des FIFO Prinzips entleert wird. Kurve (2) zeigt die Entwicklung bei Anwendung einer fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung. Kurve 3 zeigt zudem die Nutzenentwicklung, falls auch die Überlaufbehandlung der Warteschlange wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben auf Basis einer Nutzenbewertung durchgeführt wird. Kurve 4 verdeutlicht ein weiteres Verbesserungspotenzial. Hierbei wurde neben einer fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung zusätzlich auch eine fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung auf Basis einer linearen nutzenorientierten Adaption der Wettbewerbsfenster des Mediengriffs realisiert. Als Ergebnis werden relevantere Nachrichten insgesamt beim Kanalzugriff überprivilegiert, was sich in einer zusätzlichen Verbesserung des globalen Nutzens widerspiegelt. Kurve 5 zeigt schließlich den in diesem Szenario erreichbaren maximalen globalen aggregier-

ten Nutzen. Hierbei wurde angenommen, dass nahezu alle Nachrichten verzögerungsfrei und ohne Paketverlust übertragen werden können, wozu eine Kanalkapazität von ca. 5.5 Mbps erforderlich war. Die Zuweisung höherer oder geringfügig geringerer Bandbreiten zeigten dabei die gleichen Resultate.

6.5.5 Einfluss einer kontinuierlichen fahrzeuginternen Relevanzreevaluierung

Eine Bewertung der Nachrichtenrelevanz kann nicht bloß zum Zeitpunkt der Einsortierung in die Nachrichtenwarteschlange erfolgen, also bei Erzeugung oder Empfang einer Nachricht. Stattdessen ist es aufgrund der sich kontinuierlich ändernden Umweltbedingungen, auch die Nachrichtenrelevanz der Nachrichten, die sich bereits in der Nachrichtenwarteschlange befinden und auf ihre Übertragung warten, kontinuierlich neu zu bewerten. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn sich aufgrund des Prinzips der solidarischen Fairness für bestimmte Nachrichten lange Aufenthaltsdauern in den Nachrichtenwarteschlangen ergeben. Wartet eine Staumeldung beispielsweise auf ihre Übertragung und empfängt das Fahrzeug zwischenzeitlich Evidenz hinsichtlich einer erfolgten Staauauflösung, hat die ursprüngliche Staumeldung nur noch geringen Nutzen. Die Nachrichtenrelevanz minimiert sich demzufolge durch den Empfang der neueren Nachricht. Ohne eine kontinuierliche Neubewertung der Nachrichtenrelevanz würde die Nachricht jedoch trotzdem auf Basis der ursprünglichen Einschätzung übertragen werden.

Den in Abbildung 6.20 dargestellten Ergebnissen liegt dabei folgendes Szenario zugrunde: Jedes Fahrzeug generiert pro Sekunde 40 neue Nachrichten bei einer verfügbaren Restkapazität des Kommunikationskanals von 0,1 Mbps. Aus der hohen relativen Netzlast resultieren mittelbar lange Nachrichtenwarteschlangen und in Folge längere Verweildauern der Nachrichten. Im simulierten Szenario wurde dabei nach jeder erfolgreichen Übertragung einer Nachricht eine Neubewertung der Nachrichtenrelevanz der noch in der Nachrichtenwarteschlange enthaltenen Nachrichten auf Basis der vorgestellten Relevanzfunktion durchgeführt. Abbildung 6.20 zeigt die Nutzenentwicklung mit zunehmender Simulationszeit

- ohne Nachrichtendifferenzierung und Übertragung nach FIFO-Prinzip (unterste Linie),
- mit einer einmaligen Nachrichtendifferenzierung zum Zeitpunkt des Einfügens in die Nachrichtenwarteschlange und Reihenfolge der Übertragung entsprechend der Übertragungsrelevanz (mittlere Linie), sowie
- mit einer kontinuierlichen Reevaluation der Nachrichtenrelevanz aller Nachrichten in der Nachrichtenwarteschlange (gestrichelte Linie).

Dabei repräsentieren die Konfidenzklammern wiederum ein 95 prozentiges Konfidenzintervall 50 unabhängiger Simulationsdurchläufe.

6.5.6 Einfluss des Wettbewerbsfensters

Die Umsetzung der fahrzeuginternen Relevanzbewertung in eine fahrzeugübergreifende nutzenbasierte Nachrichtendifferenzierung ist ein wesentlicher Bestandteil einer gesamt-

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

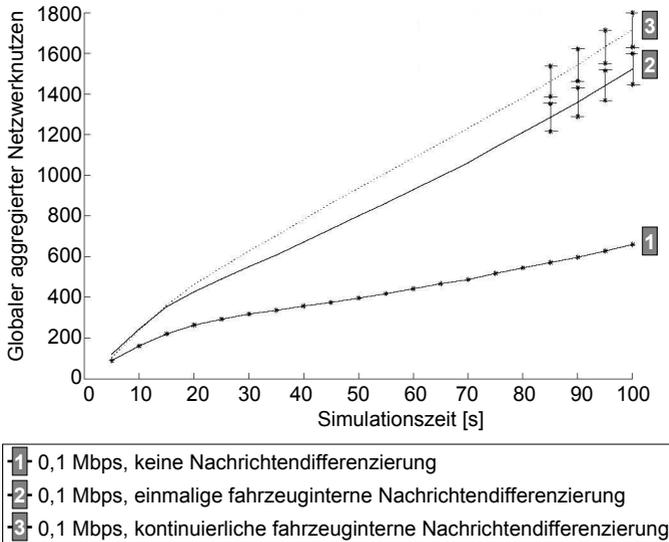


Abbildung 6.20: Einfluss einer kontinuierlichen fahrzeuginternen Reevaluation der Nachrichtenrelevanz

nutzenoptimierenden Bereitstellungsstrategie von Kontextinformationen und notwendig zur Umsetzung des in diesem Kapitel eingeführten Paradigmas der solidarischen Fairness. Eine Möglichkeit hierzu ist wie beschrieben eine relevanzbasierte Anpassung des Wettbewerbsfensters, welche eine Priorisierung relevanterer Nachrichten durch statistisch kürzere Kanalzugszeiten erlaubt. Das hierzu simulierte Szenario unterscheidet sich von den bisher vorgestellten Szenarien wie folgt:

- Es existieren lediglich zwei unterschiedliche Nachrichtentypen im Netzwerk, welche zu zwei unterschiedlichen Anwendungen gehören, wovon eine statisch höher gewichtet ist. Jede Nachricht wird unbegrenzt durch das Netzwerk geflutet (ohne Betrachtung der zuvor beschriebenen Optimierungen).
- Jedes Fahrzeug erzeugt jeweils eine neue Nachricht pro Anwendung pro Sekunde. Die verfügbare freie Bandbreite ist auf 0,1 Mbps begrenzt.
- Das Wettbewerbsfenster wird wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben auf Basis der Funktion $f_{A_{lin}}$ linear an die Nachrichtenrelevanz der relevantesten Nachricht einer Nachrichtenwarteschlange adaptiert. Dabei ergeben sich für Nachrichten der Anwendung 1 aufgrund der höheren Priorität kürzere Wettbewerbsfenster. Die Wettbewerbsfenster der Anwendung 2 werden analog vergrößert.
- Die Metrik bemisst sich nicht anhand der Nutzenentwicklung, sondern anhand

der Nachrichtenwiederholungen im Verteilungsprozess. Dabei soll höher prioren Nachrichten öfter Zugriff auf den Übertragungskanal gewährt werden, was sich in einer größeren Zahl an Nachrichtenwiederholungen widerspiegelt.

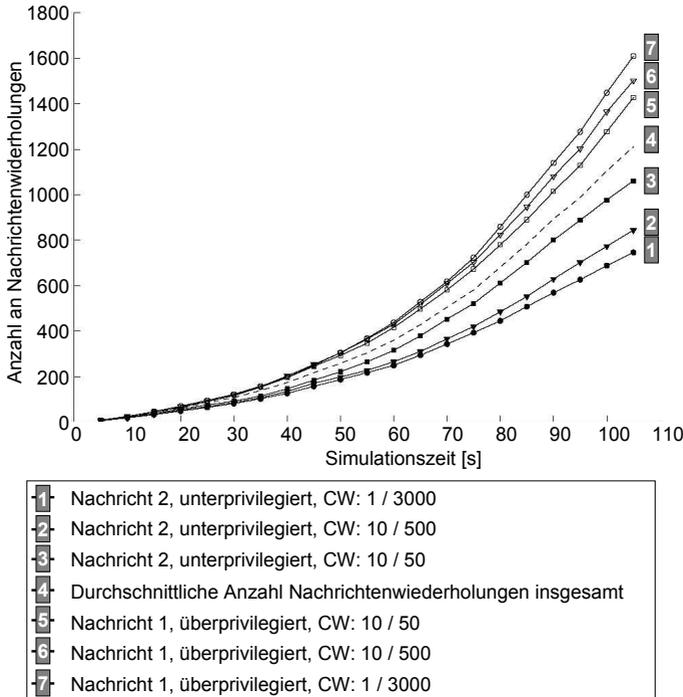


Abbildung 6.21: Einfluss der Wettbewerbsfensterwahl auf den Prozess der fahrzeugübergreifenden Nachrichtenpriorisierung

Abbildung 6.21 zeigt den Einfluss der Wahl des Wettbewerbsfensters auf den Prozess der fahrzeugübergreifenden Nachrichtenpriorisierung. Hierbei wurde das Verhältnis der Wettbewerbsfenster zwischen über- und unterprivilegierter Anwendung variiert. Im Fall A wurden Wettbewerbsfenster von 1 (Anwendung 1) und 3000 (Anwendung 2) zugewiesen. Im Fall B, Wettbewerbsfenster von 10 und 500, sowie im Falle C 10 und 50. Wie erwartet, verringert sich mit sinkender Differenz der Wettbewerbsfenster aufgrund der geringeren statistischen Wartezeitunterscheidung auch der Effekt der Nachrichtenpriorisierung, d.h. es wird auch vermehrt Nachrichten der unterprivilegierten Anwendungen der Zugriff auf den Kommunikationskanal gewährt. Die gestrichelte Linie zeigt zum Vergleich die Anzahl der Wiederholungen beider Nachrichten ohne Adaption der Wettbewerbsfenster.

6.5.7 Einfluss der Art der Wartezeitadaption

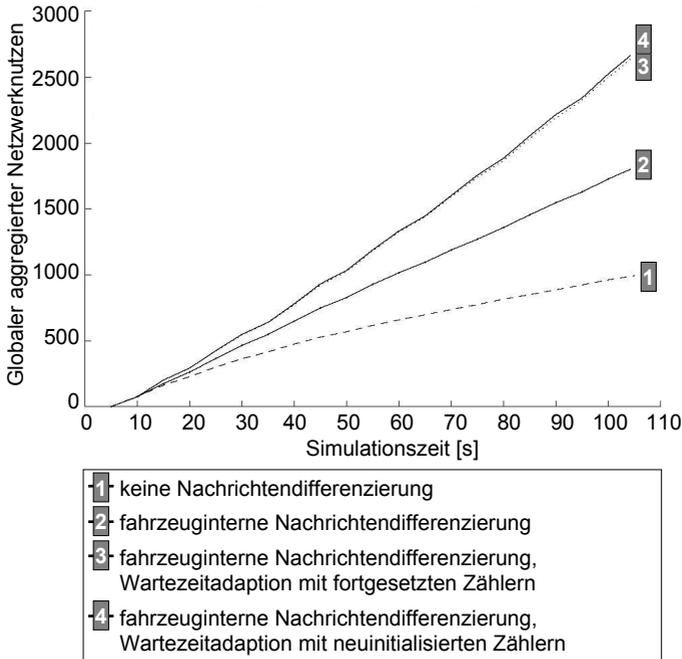


Abbildung 6.22: Einfluss der Art der Wartezeitadaption auf die Nutzenentwicklung (fortgesetzt vs neuinitialisiert)

Abbildung 6.22 zeigt den Einfluss der Art der Wartezeitadaption (fortgesetzt/per-packet adaptation gegenüber neuinitialisiert/per-period adaptation) auf die Entwicklung des globalen aggregierten Anwendungsnutzens. Jedes Fahrzeug erzeugt 10 neue Nachrichten pro Sekunde, bei einer effektiv verfügbaren Kanalkapazität von 0,3 Mbps. Die unteren beiden Kurven zeigen die Nutzenentwicklung ohne Anpassung der Kanalzugriffswartezeit, wobei die unterste (gestrichelte) Kurve nochmals die Nutzenentwicklung ohne jegliche Nachrichtendifferenzierung (FIFO-Prinzip) und die Kurve darüber die Entwicklung unter Einbezug einer fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung beschreibt. Die oberen beiden Kurven beschreiben demgegenüber die Nutzenentwicklung, falls durch die Anpassung der Wettbewerbsfenster auf Basis der Nachrichtenrelevanz auch eine fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung umgesetzt wird. Die oberste Kurve repräsentiert dabei die Entwicklung bei Neuinitialisierung des Wartezeitählers nach Ende jeder vorangegangenen Übertragung, die Kurve darunter analog bei Fortführung des Wartezeitählers. Die Wettbewerbsfenster wurden dabei linear auf Basis der

Berechnungsvorschrift $f_{A_{lin}}$ mit einem minimalen Wettbewerbsfenster CW^{min} von 31 und einem maximalen Wettbewerbsfenster CW^{max} von 1023 Zeitschlitzen realisiert.

Es zeigt sich, dass diese Parametrisierung dazu führt, dass die Kanalzugriffswartezeit durchschnittlich länger ist, als ohne Anpassung der Wettbewerbsfenster. Hierbei wird statisch ein Wettbewerbsfenster von lediglich 31 Zeitschlitzen verwendet. Dies hat offensichtlich zur Folge, dass insgesamt weniger Nachrichten übertragen werden können und in Folge die effektive Kanalauslastung sinkt. Trotz eines geringeren Durchsatzes zeigen beide adaptiven Verfahren hinsichtlich der Entwicklung des Gesamtnutzens eine Leistungssteigerung gegenüber nicht adaptierten Kanalzugriffswartezeiten, wobei trotz der schlechtesten Kanalauslastung eine fortlaufende Neuinitialisierung des Wartezählers zudem geringfügig besser abschneidet. Die geringfügige Steigerung der Nutzenentwicklung im Falle einer Neuinitialisierung gegenüber einer Fortsetzung des Wartezählers hängt dabei mit der Parametrisierung des simulierten Szenarios zusammen. Da vereinfachend angenommen wurde, dass in allen Fahrzeugen die gleiche (eine) Anwendung aktiv ist, und jedes Fahrzeug zudem das gleiche Kommunikationsmuster aufweist, ergeben sich in allen Fahrzeugen letztlich auch sehr ähnliche Übertragungsrelevanzen für die relevanteste (und daher als nächste zu übertragende) Nachricht. Die Effekte der Neuinitialisierung machen sich vor allem dann bemerkbar, wenn die Übertragungsrelevanzen der Nachrichten in den Fahrzeugen unterschiedlich sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn einem Fahrzeug eine Menge von hoch relevanten Kontextinformationen vorliegt. Diese Kontextinformationen können in diesem Fall ohne große Unterbrechungen von anderen Fahrzeugen am Stück übertragen werden.

Abbildung 6.23 zeigt die resultierende effektive Kanalauslastung auf Basis der Gesamtzahl an erfolgreich übertragenen Nachrichten in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaptation. Aufgrund der permanenten Neuinitialisierung der Wartezähler und der daraus resultierenden längsten durchschnittlichen Wartezeit vor einem Kanalzugriff zeigt dieses Verfahren hinsichtlich der effektiven Kanalauslastung die schlechteste Leistung. Eine optimale Kanalzugriffsstrategie ist nicht Ziel dieser Arbeit. Offensichtlich führt eine effektivere Anpassung der Kanalzugriffswartezeiten ohne Zuwachs der Latenzzeiten, und damit einhergehend ohne Reduzierung des effektiven Netzwerkdurchsatzes, zu einer weiteren Verbesserung der Nutzenentwicklung der vorgestellten Verfahren.

Abbildung 6.24 veranschaulicht die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wartezähler in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaptation, wobei jeweils die Zählergröße am Beginn des Wettbewerbs ausschlaggebend ist, also unmittelbar nach Ende des DIFS Intervalls. Im Falle einer Neuinitialisierung ergeben sich dabei im Durchschnitt längere Wartezähler. Sehr kurze Wartezeiten ergeben sich lediglich bei Fortführung des Zählers, was wiederum einen höheren Durchsatz zur Folge hat.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

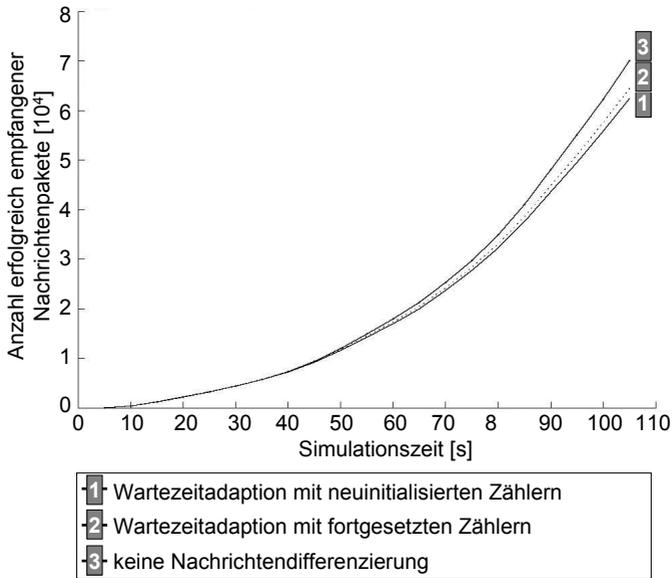


Abbildung 6.23: Effektive Kanalauslastung in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaption (fortgesetzt vs neuinitialisiert)

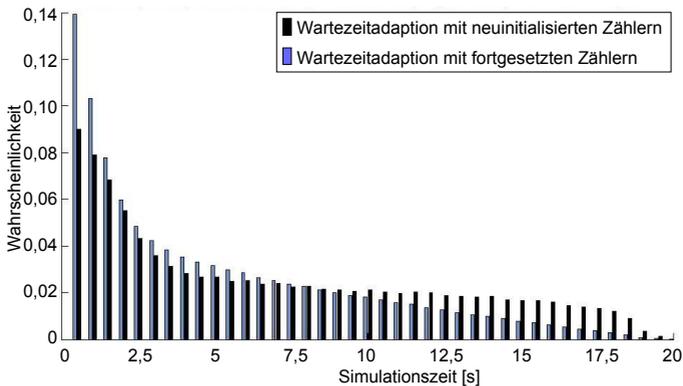


Abbildung 6.24: Dichtefunktion der resultierenden Back-Off Zähler in Abhängigkeit der Art der Wartezeitadaption (fortgesetzt versus neuinitialisiert)

6.5.8 Einfluss der verfügbaren Bandbreite

Bei der Entwicklung des globalen Nutzens spielt - wie in Abbildung 6.25 aufgezeigt wird - die verfügbare Kapazität des Kommunikationskanals eine wesentliche Rolle, wobei in diesem Szenario jedes Fahrzeug 10 neue Nachrichten pro Sekunde erzeugt. Je kleiner die verfügbare Kanalkapazität ist, desto positiver wirken sich die Maßnahmen der nutzenbasierten Nachrichtendifferenzierung aus. Falls nur wenig Kapazität verfügbar ist, bzw. das Netzwerk nahe an seiner maximalen Kapazitätsgrenze ausgelastet wird, ergeben sich offensichtlich lange Nachrichtenwarteschlangen. Eine Entleerung auf Basis des FIFO-Prinzips wirkt sich in diesen Fällen besonders negativ aus, da viele Nachrichten übertragen werden, obwohl diese aufgrund der durch die lange Wartezeit und der inzwischen veränderten Situation nur noch wenig zusätzlichen Nutzen darstellen. Bei kürzeren Nachrichtenwarteschlangen ist dieser Effekt weniger ausgeprägt, genauso wie der eines veränderten Kanalzugriffsverfahren. Die Kurven 1 bis 3 zeigen dabei die Nutzenentwicklung, falls lediglich 0,1 Mbps verfügbare Kapazität zur Verfügung steht. Kurve 1 zeigt die Entwicklung, falls keine Nachrichtendifferenzierung stattfindet, Kurve 2 die Entwicklung bei Anwendung einer fahrzeuginternen Nachrichtendifferenzierung. Kurve 3 zeigt die Entwicklung, falls zusätzlich eine nutzenzentrierte Überlaufbehandlung der Warteschlange erfolgt. Dabei ist die prozentuale Steigerung größer, als unter der Voraussetzung, dass 0,5 Mbps Kapazität verfügbar sind (Kurven 4, 5 und 6). Dies bestätigt die bereits beschriebene Eigenschaft, dass eine explizite nutzenbasierte Nachrichtendifferenzierung vor allem bei hoher Netzlast von Vorteil ist. Die Konfidenzklammern repräsentieren wiederum die 95%igen Konfidenzintervalle 50 unabhängiger Simulationsdurchläufe.

6.5.9 Einfluss der Verkehrsdichte

Im Zusammenhang mit der Verbreitung von Kontextinformationen spielt auch die aktuelle Verkehrsdichte der am System teilnehmenden Fahrzeuge eine wesentliche Rolle. Diese hat Einfluss auf die Konnektivität der Fahrzeuge und damit mittelbar auch auf den Verbreitungsprozess. Mit zunehmender Teilnehmerzahl steigt zudem auch mittelbar die durchschnittliche Netzlast an. Dies führt wie gesehen dazu, dass eine nutzenbasierte Nachrichtendifferenzierung mit steigender Ausstattungsrate wirkungsvoller wird. Abbildung 6.26 zeigt in diesem Zusammenhang den durchschnittlichen globalen aggregierten Anwendungsnutzen nach 100 Sekunden Simulationszeit in Abhängigkeit dreier verschiedener Verkehrsdichten im Simulationsgebiet. Wiederum wurden dabei von jedem Fahrzeug 30 neue Nachrichten pro Sekunde erzeugt und die restliche verfügbare Kanalkapazität auf 0,3 Mbps begrenzt. Die nutzenbasierte Nachrichtendifferenzierung wurde auf Basis einer kontinuierlichen fahrzeuginternen Reevaluation realisiert. Dabei zeigt sich, dass mit zunehmender Verkehrsdichte prozentual auch das Verbesserungspotenzial einer nutzenbasierten Nachrichtendifferenzierung steigt. Allerdings ist auch in Szenarien mit vergleichsweise geringer Dichte von lediglich 100 Fahrzeugen pro km^2 eine Nutzensteigerung erkennbar. Dies begründet sich vor allem darin, dass weiterhin auch Nachrichten mit geringem Nutzen übertragen werden, solange freie Netzwerkressourcen verfügbar sind. Bei einer statischen senderdeterminierten Verbreitung werden einige dieser Nachrichten unabhängig von der verfügbaren Kanalkapazität aufgrund der begrenzten Nachrichtenlebensdauer oder der begrenzten Verbreitungsgebiets vollständig verworfen.

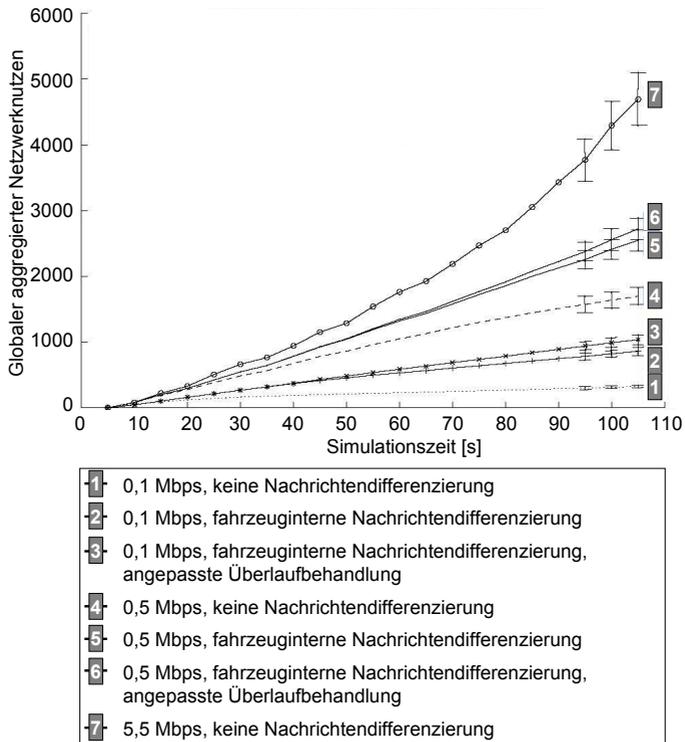


Abbildung 6.25: Nutzenentwicklung in Abhängigkeit der verfügbaren Bandbreite

6.5.10 Einfluss der Netzwerklast auf die Länge der Nachrichtenwarteschlange

Die aktuelle Netzwerklast hat Einfluss auf die durchschnittliche Anzahl an Nachrichten, die in der Nachrichtenwarteschlange auf ihre Übertragung warten. Dies hat wiederum Auswirkungen auf den Effekt einer kontinuierlichen Reevaluation der Relevanzberechnung aller Nachrichten der Warteschlange, welcher umso ausgeprägter ist, je länger die Nachrichtenwarteschlange ist. Abbildung 6.27 zeigt den Einfluss der Netzwerklast auf die Länge der Nachrichtenwarteschlange. Im zugrunde liegenden Szenario wurden während der ersten 30 Sekunden der Simulationsläufe von jedem Fahrzeug je etwa 30 Nachrichten pro Sekunde erzeugt. Diese wurden im Anschluss weiter im Netzwerk verbreitet. Wiederum wurden 50 unabhängige Simulationsdurchläufe für jede verfügbare Kanalkapazität von 0,1, 0,3 und 0,5 Mbps durchgeführt. Es zeigt sich wie erwartet, dass die durchschnittliche Warteschlangenlänge mit zunehmender Netzlast (und da-

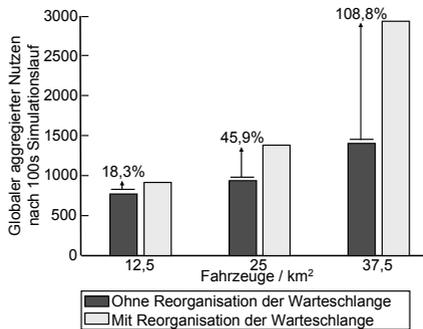


Abbildung 6.26: Mögliche Nutzenentwicklung in Abhängigkeit der Teilnehmerdichte

mit abnehmender freier Bandbreite) ebenfalls zunimmt, da den Fahrzeugen weniger oft der Kommunikationskanal zur Übertragung dieser Nachrichten zugeteilt wird. Die Stagnation beruht auf der Tatsache, dass keine weiteren Nachrichten im Szenario mehr generiert wurden. Daher reduziert sich die Netzwerklast lediglich auf die Verbreitung der bereits vorhandenen Nachrichten, welche wiederum von der Anzahl an Fahrzeugen abhängt und hier nicht variiert wurde.

6.5.11 Fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung auf Basis von IEEE 802.11e/p

Wie bereits in Abschnitt 6.3.1 beschrieben ermöglicht auch der IEEE Standard 802.11e [IEE05a] und darauf aufbauend IEEE 802.11p [IEE04] für die automobilen Anwendungsdomäne eine fahrzeugübergreifende Priorisierung des Kanalzugriffs. Diese Priorisierung erlaubt jedoch lediglich eine statische Einteilung der zu übertragenden Nachrichten in eine feste Anzahl an Prioritätsklassen. Sie entspricht damit nicht allen in Abschnitt 2.4 dargestellten Anforderungen an eine adaptive nutzenoptimierende Bereitstellung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen. Im Hinblick auf eine kostengünstige und schnelle Umsetzung im Fahrzeug, die keine Modifikation der in großen Stückzahlen für den Computermarkt verfügbaren Chipsätze erfordert, stellt der Standard jedoch eine interessante Alternative zur Umsetzung einer nutzenzentrischen fahrzeugübergreifenden Nachrichtendifferenzierung dar und soll deshalb an dieser Stelle hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit im Bezug auf die Entwicklung des globalen aggregierten Gesamtnutzens evaluiert werden.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Netzwerklasten und Parametrisierungen der Prioritätsklassen des Kontrollkanals von 802.11p wurden vergleichende Simulationen hinsichtlich der Nutzenentwicklung zwischen dem in Abschnitt 6.4 dargestellten schichtenübergreifenden Architekturansatz und IEEE 802.11p durchgeführt. Dabei erzeugten durchschnittlich 10 Fahrzeuge 3, 5 oder 10 neue Nachrichten pro Sekunde. Die verfügbare effektive Kanalkapazität wurde auf 0,3 Mbps reduziert. Wie aus Abbildung 6.28 ersichtlich wird, bleibt dabei die Entwicklung des aggregierten Gesamtnutzens bei

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

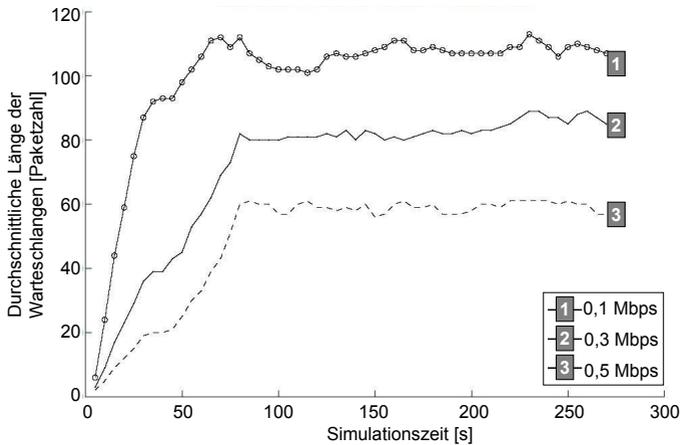


Abbildung 6.27: Einfluss der Netzwerklast auf die Länge der Nachrichtenwarteschlange

IEEE 802.11p (wie erwartet) hinter der schichtenübergreifenden Architektur zurück, welche eine umfassende nutzenzentrische Nachrichtendifferenzierung realisiert. Die linken Balken zeigen die Nutzenentwicklung bei Anwendung einer fahrzeuginternen kontinuierlichen Nachrichtendifferenzierung und schichtenübergreifenden Kommunikationsarchitektur im Vergleich zu einer nicht nutzenbasierten Verbreitung der Nachrichten auf Basis des FIFO Prinzips. Die rechten Balken stellen demgegenüber die prozentuale Verbesserung der Nutzenentwicklung unter Anwendung einer relevanzbasierten Zuweisung der Nachrichten in eine von vier eingesetzten Prioritätsklassen von IEEE 802.11p dar. Die Zuweisung der Nachrichten in die Warteschlangen erfolgt linear in gleichen Vierteln, begonnen von der maximalen Nachrichtenrelevanz in Prioritätsklasse 1. Der resultierende Effekt beschreibt letztlich eine Diskretisierung der Nutzenabschätzung in lediglich vier diskrete Werte, wobei lediglich zum Zeitpunkt des Einfügens eine Bewertung der Übertragungsrelevanz vorgenommen wird. Eine kontinuierliche Reevaluation und Umorganisation der Nachrichten in den Nachrichtenwarteschlangen findet nicht statt. Der obere rechte Balken zeigt den Effekt hinsichtlich der Nutzenentwicklung, falls zusätzlich eben jene kontinuierliche Reevaluation angewandt wird. Die Defizite des 802.11p Standards gegenüber den in den vorherigen Abschnitten dargestellten übergreifenden Möglichkeiten der Nachrichtendifferenzierung haben dabei die folgenden Ursachen:

- Der 802.11p Standard sieht keine Umorganisation der Nachrichten in den Nachrichtenwarteschlangen vor, sondern arbeitet wiederum nach dem FIFO - Prinzip. Während Nachrichten auf die Übertragung warten, ist es wahrscheinlich, dass sich die Rahmenbedingungen während der Wartezeit ändern. Zwischenzeitlich ist jedoch die Übertragung einer anderen Nachricht relevanter, als die derjenigen Nachricht, die die längste Wartezeit in der Schlange besitzt.

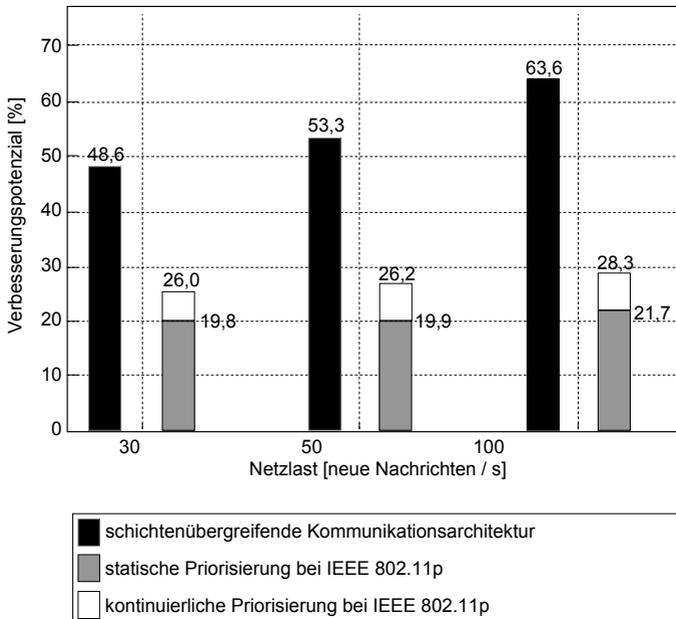


Abbildung 6.28: Nutzenentwicklung bei Anwendung von IEEE802.11e und einem schichtenübergreifenden Architekturansatz in Abhängigkeit der Netzwerklast

- Unter Berücksichtigung einer fortlaufenden Reevaluation zeigt sich eine bessere Nutzenentwicklung, die jedoch hinter der vorgestellten schichtenübergreifenden Kommunikationsarchitektur zurückbleibt. Ein Grund hierfür ist, dass der Standard keine Möglichkeit einer inhaltsbezogenen Abschätzung des potenziellen Nutzens vorsieht, d.h. anwendungsspezifisches Wissen hinsichtlich des Informationsnutzens kommt nicht zum Tragen.
- Die Nachrichtendifferenzierung ist in vier Werte diskretisiert. Dies bedeutet, dass alle Nachrichten mit korrespondierenden Übertragungsrelevanz gleich behandelt werden, was dazu führt, dass zwar in der Regel hoch relevante Nachrichten Zugriff auf den Kanal bekommen, aber nicht notwendigerweise die Nachricht mit der höchsten Relevanz. Dies wirkt sich negativ auf den aggregierten globalen Gesamtnutzen aus.
- Aus Gründen des üblichen Fairnessparadigmas ermöglicht das Kanalzugriffsschema von IEEE 802.11p in einem internen Wettbewerb auch Nachrichten aus unterprivilegierten Prioritätsklassen den Zugriff auf den Kommunikationskanal selbst dann, wenn gleichzeitig noch Nachrichten in einer höheren Prioritätsklasse vorhanden sind. Höher relevante Nachrichten weisen zwar eine höhere

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

Wahrscheinlichkeit auf, auf den Kanal zugreifen zu können und besitzen damit statistisch eine kürzere Verweilzeit im Kommunikationssystem. Es wird jedoch vermieden, dass bei einer hohen Netzwerklast weniger relevante Nachrichten vollständig verhungern. Das Prinzip der solidarischen Fairness sieht dies jedoch im Hinblick auf das Erreichen des dedizierten Netziels in automobilen Ad-hoc Netzen, falls notwendig, explizit vor. Unter der Annahme einer Gleichverteilung der Übertragungsrelevanzen der Nachrichten nimmt dabei die Länge der Nachrichtenwarteschlangen der vier Prioritätsklassen in IEEE 802.11p wie erwartet mit abnehmender Priorität aufgrund der längeren Verweildauer zu. Abbildung 6.29 zeigt in diesem Zusammenhang nochmals die Entwicklung der Länge der Warteschlangen der vier verwendeten Prioritätsklassen in IEEE 802.11p bei 30 neu erzeugten Nachrichten pro Sekunde.

- Der Wartezähler wird nach einer Unterbrechung fortgesetzt; mit den bereits besprochenen Effekten.

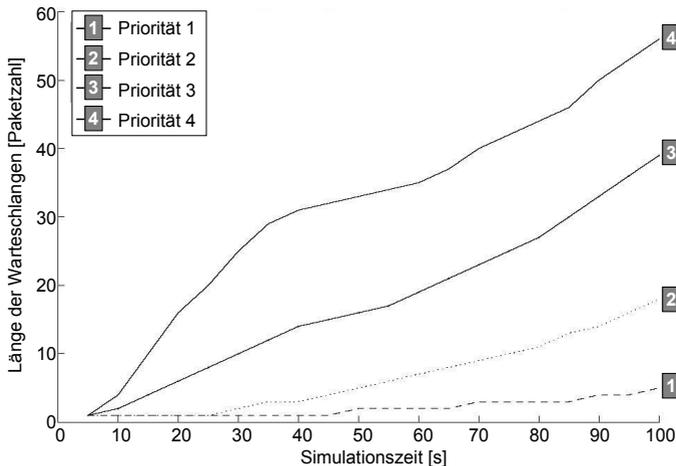


Abbildung 6.29: Entwicklung der Länge der Warteschlangen der vier verwendeten Prioritätsklassen des Kontrollkanals von IEEE 802.11p

Eine Möglichkeit die Performanz des IEEE 802.11e/p Standards im Hinblick auf die globale Nutzenentwicklung zu steigern, ist die Adaption des Auswahlprozesses, aus welcher Prioritätsklasse die als nächstes zu übertragende Nachricht entnommen werden soll. Eine deutlichere Übervorteilung der höheren Prioritätsklassen führt dabei zu einer expliziteren Unterdrückung von Nachrichten aus niedrigeren Prioritätsklassen und bildet damit die angestrebte strikte Nachrichtendifferenzierung besser ab. Dies kann zum einen durch die Anpassung der minimalen und maximalen Größen der jeder Prioritätsklasse zugeordneten Wettbewerbsfenster umgesetzt werden. Zum anderen bietet die

Parameter	Prioritätsklasse 1	Prioritätsklasse 2	Prioritätsklasse 3	Prioritätsklasse 4
AIFS	2	2	3	7
CW^{min}	7	15	31	31
CW^{max}	15	31	1023	1023

Tabelle 6.1: Übliche Parametrisierung des IEEE 802.11e Medienzugriffs (Parametrisierung 1)

Parameter	Prioritätsklasse 1	Prioritätsklasse 2	Prioritätsklasse 3	Prioritätsklasse 4
AIFS	2	2	4	8
CW^{min}	2	12	31	63
CW^{max}	5	25	1023	1023

Tabelle 6.2: Modifizierte Parametrisierung des IEEE 802.11e Medienzugriffs (Parametrisierung 2)

sogenannte *Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF)* von 802.11e durch die Einführung der sogenannten *Arbitration Interframe Spaces (AIFS)* einen zusätzlichen Stellhebel bei der Festlegung der Wartezeit. Das AIFS Intervall weist dabei den einzelnen Prioritätsklassen mit sinkender Priorität eine wachsende zusätzliche Wartezeit zu und privilegiert so höhere Prioritätsklassen beim Kanalzugriff (für eine ausführlichere Beschreibung der zugrunde liegenden Mechanismen sei wiederum auf den entsprechenden Standard verwiesen [IEE05a]).

Die Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen dabei die übliche Parametrisierung (1), bzw. eine modifizierte Parametrisierung (2), die den obigen Überlegungen Rechnung trägt. Abbildung 6.30 zeigt in die Effekte einer modifizierten Parametrisierung des Kanalzugriffs bei IEEE 802.11e, bei einer simulierten Last von 30 neuen Nachrichten pro Sekunde und einer effektiv verfügbaren Bandbreite von 0,3 Mbps. Die unterste Kurve beschreibt dabei die Nutzenentwicklung im Falle einer zufälligen Zuweisung einer Nachricht in eine der vier Prioritätsklassen, also keiner expliziten nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung. Die beiden darüber liegenden Kurven beschreiben demgegenüber die Nutzenentwicklung unter Ausnutzung der Prioritätsklassen wie zuvor beschrieben, wobei der obersten Kurve die Parametrisierung 2 zugrunde liegt. Diese zeigt wie erwartet eine bessere Performanz hinsichtlich der Entwicklung des aggregierten Gesamtnutzens. Die Konfidenzklammern bezeichnen wie zuvor ein 95 prozentiges Konfidenzintervall über 50 unabhängige Simulationdurchläufe.

6.5.12 Qualität der Nutzenabschätzung

Eine wesentliche Annahme im Hinblick auf eine nutzenorientierte Kontextverbreitung besteht darin, dass Fahrzeuge auf Basis ihres eigenen Kontextwissens eine sinnvolle Abschätzung des Informationsnutzens auch für andere Fahrzeuge ableiten können. Je nach Fahrtzweck, Fahrtziel und den aktiven Anwendungen der Fahrzeuge unterscheidet sich jedoch das individuelle Interesse der am System teilnehmenden Fahrzeuge (siehe hierzu auch [Kos05b]). Da vor der Übertragung einer Kontextinformation kein prophylaktischer Abgleich der Wissensbasen zwischen den Fahrzeugen erfolgt, ist eine perfekte Abschätzung des Informationsnutzens nicht möglich. Redundanzvermeidende Kontextaspekte, wie beispielsweise die räumliche und zeitliche Distanz zum Beobachtungsort und- Zeitpunkt, bzw. zum letzten Zeitpunkt der Übertragung, können dabei aber objektiv beurteilt werden. Abbildung 6.31 zeigt daher den Grad der Übereinstim-

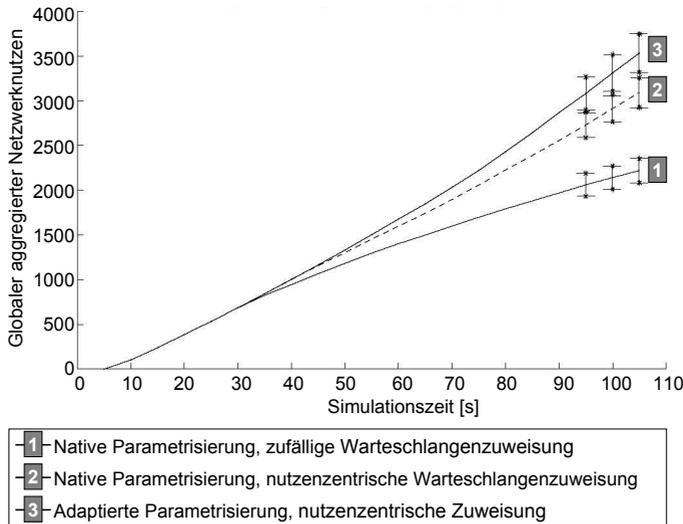


Abbildung 6.30: Effekt einer modifizierten Parametrisierung des Kanalzugriffs bei IEEE 802.11e

mung zwischen der geschätzten Nachrichtenrelevanz T_i^P und dem tatsächlichen Nutzen U_{a_k} der Nachricht im empfangenen Fahrzeug. Dabei wurden 30 neue Pakete pro Sekunde von den Fahrzeugen erzeugt, bei einer verfügbaren restlichen Bandbreite von 0,3 Mbps. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Grafik wurde auf eine exakte Darstellung der Differenz zwischen Nachrichtenrelevanz und Nutzen verzichtet. Stattdessen wurde eine Kategorisierung in 20 Differenzklassen von 1 bis 20 vorgenommen. Eine Differenz zwischen 0 und einschließlich 0,05 entspricht der Klasse 1, eine Differenz zwischen 0,05 und einschließlich 0,1 der Klasse 2 und so fort. Die maximale Abweichung, die sich auf Basis der oben eingefügten einfachen Berechnungsvorschriften für die Nachrichtenrelevanz und den Nutzen ergibt, ist dabei 1. Abbildung 6.31 zeigt, dass im simulierten Szenario die Abweichung in etwas mehr als 55 Prozent aller übertragenen Nachrichten kleiner als 0,05 ist. In nur ca. 10 Prozent der Nachrichten weicht die Nutzenerwartung um mehr als 0,1 ab. Dabei sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich die konkreten Zahlen auf dieses spezielle Szenario und die angewendeten Nutzen- und Relevanzfunktionen beziehen. Insbesondere ist auf allen Fahrzeugen die gleiche betrachtete Anwendung aktiv, und es erfolgt keine weitere Differenzierung hinsichtlich des Fahrtzweckes. Eine quantitative Verallgemeinerung ist daher für reale Szenarien mit dem hier vorgestellten Resultat nicht ohne weiteres möglich. Es ist jedoch ein notwendiges Maß zur Darstellung der Qualität der Abschätzung der Nachrichtenrelevanz. Aus Gründen der Vollständigkeit ist es deshalb an dieser Stelle im Hinblick auf die simulierten Szenarien dargestellt.

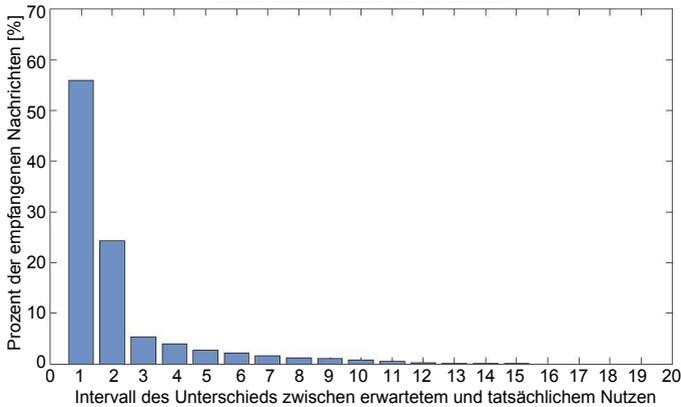


Abbildung 6.31: Durchschnittliche Abweichung zwischen der Relevanzabschätzung und tatsächlichem Empfängernutzen

6.5.13 Effekt auf die Nachrichtenlatenz in Kreuzungsszenarien

Entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 2.4 müssen auch die Auswirkungen des Kontextverbreitungskonzeptes hinsichtlich der Verbreitungs- und Kanalzugriffslatenzen untersucht werden. Sicherheitskritische Kontextinformationen müssen rechtzeitig in den Fahrzeugen vorhanden ist. Der Grad des Hinzugewinns an Fahrsicherheit hängt dabei im Wesentlichen von der Art der Information, deren Qualität, dem bisherigen Vorwissen, sowie der individuellen räumlichen und zeitlichen Distanz des Empfängers zum Ort des potenziellen Sicherheitsrisikos ab.

Um die Auswirkungen der vorgestellten nutzenbasierten Nachrichtendifferenzierung hinsichtlich der resultierenden Latenzzeiten zu evaluieren, wurde eine Querverkehrssistenz-Anwendung im unmittelbaren Kreuzungsbereich simuliert. Jede der vier aufeinander treffenden Fahrtrichtungen weisen 2 Fahrspuren auf. Es wurden insgesamt 200 ausgestatteten Fahrzeuge simuliert, die sich innerhalb wechselseitiger Kommunikationsreichweite befinden. In jedem Fahrzeug, das sich weniger als 150 Meter vom Kreuzungsmittelpunkt befindet, erzeugt die Anwendung jede Sekunde für die kreuzenden Verkehrsteilnehmer ein sogenanntes *Safety Beacon*, das entsprechend übertragen werden muss. Die Safety Beacons enthalten dabei die mit einem aktuellen Zeitstempel versehene aktuelle Position, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die empfangenden Fahrzeuge leiten diese Nachrichten nicht weiter, da sich hierbei kein zusätzlicher Nutzen für die anderen Verkehrsteilnehmer ergeben würde. Stattdessen werten sie die Informationen hinsichtlich der potenziellen Kollisionswahrscheinlichkeit aus und informieren - falls erforderlich - die entsprechenden Fahrer.

Offensichtlich nimmt dabei mit abnehmender Distanz zur Kreuzungsmittelpunkt die potenzielle Kollisionsgefahr und damit einhergehend auch der Grad des Informationsnutzens der Safety Beacons sowie die Dringlichkeit ihrer Übertragungen zu. Insbesondere spielt die Anzahl der querenden Fahrzeuge, sowie deren Distanz zum Kreuzungspunkt eine

Rolle. Die dem simulierten Szenario zugrunde liegende Bewertung der Nachrichtenrelevanz bemisst sich daher an der Anzahl der querenden Fahrzeuge, sowie der aktuellen räumlichen und zeitlichen Distanz zu diesen. Bezeichne daher

- $B\acute{N}^{quer}(v_i)$ die Menge der Fahrzeuge, die sich aktuell innerhalb der Kommunikationsreichweite von Fahrzeug v_i befinden und aus querender Richtung kommen (sich also potenziell auf Kollisionskurs befinden), und
- $dist(v_j)^{min}$ die minimale Euklidische Distanz eines Fahrzeugs $v_j \in B\acute{N}^{quer}(v_i)$ zu v_i , also die Distanz desjenigen querenden Fahrzeugs, das v_i aktuell am nächsten ist.

Es gilt:

$$U_{a_k} = \begin{cases} 0, & \text{falls } B\acute{N}^{quer}(v_i) = \emptyset \\ \frac{100m - dist(v_j)^{min}}{100m}, & \text{sonst} \end{cases}$$

Unter Verwendung des IEEE 802.11p Medienzugriffsverfahrens ergibt sich dabei eine Eingruppierung in vier diskrete Prioritätsklassen in Abhängigkeit der minimalen Nähe zum nächsten querenden Fahrzeug. Je näher sich zwei Fahrzeuge dabei sind, desto relevanter ist die Übertragung der Safety Beacons und desto niedriger ist die zugewiesene Prioritätsklasse. Abbildung 6.32 visualisiert die Verteilung der durchschnittlichen Übertragungslatenzenzeiten der Safety Beacons zweier Simulationsdurchläufe von je 10 Sekunden Dauer. In Abbildung 6.32 (b) ist dabei die räumliche Verteilung der durchschnittlichen Übertragungslatenzenzeiten im Kreuzungsbereich unter Verwendung einer räumlich motivierten Nachrichtendifferenzierung abgebildet. Es zeigt sich wie erwartet eine deutliche Verschiebung der Latenzenzeiten in Abhängigkeit der Distanz zum Kreuzungsmittelpunkt, d.h. Safety Beacons nahe des querenden Verkehrs haben aufgrund der Einordnung in höherwertige Prioritätsklassen eine höhere Chance auf den Kanalzugriff und in Folge eine kürzere mittlere Verweildauer in den Nachrichtenwarteschlangen. Demgegenüber ergibt sich ohne dedizierte Nachrichtendifferenzierungsstrategien nahezu eine Gleichverteilung der Übertragungslatenzenzeiten ohne Abhängigkeit der Entfernung zum Kreuzungspunkt (siehe Abbildung 6.32 (a))

6.5.14 Auswirkungen der impliziten Nachrichtenpriorisierung

Das vorgestellte Kontextverbreitungskonzept muss den ständig wechselnden Rahmenbedingungen Rechnung tragen und sich kontinuierlich an die veränderten Bedingungen anpassen. In diesem Zusammenhang spielt die implizite Priorisierung der Nachrichten im Hinblick auf die Kanalzugriffswahrscheinlichkeit eine entscheidende Rolle. Dies gilt nicht nur für die eben beschriebene Querverkehrsassistenz in Kreuzungsszenarien. Aus diesem Grund soll hier der gegenseitige Wettbewerb unterschiedlicher Nachrichten im Hinblick auf die Ausbreitung unterschiedlicher Gefahrenmeldungen in einem modifizierten Szenario mit größerer Simulationsdauer von 400s und in einem größeren Verbreitungsgebiet dargestellt werden. Die zugrunde liegende Nachrichtenrelevanzbewertung basiert dabei wiederum auf den zuvor beschriebenen Heuristiken, jedoch mit folgender veränderter linearer Parametrisierung:

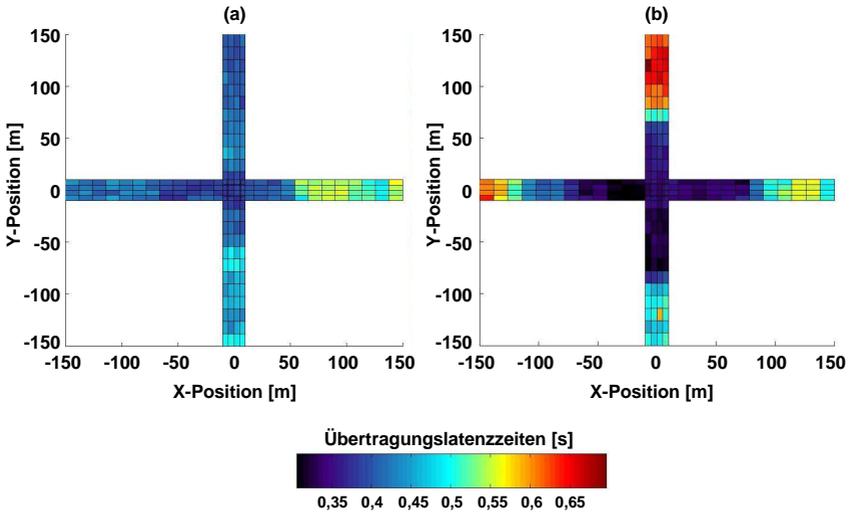


Abbildung 6.32: Durchschnittliche Übertragungslatenzen im Kreuzungsbereich ohne (a) und unter Verwendung einer räumlich motivierten Nachrichtendifferenzierung (b)

- einer prozentualen definierten Relevanz einer speziellen Gefahrenquelle (Gefahrenrelevanz) h_{gr} ,
- der vergangenen Zeitdauer seit der letzten Übertragung $h_{lb}(x) = x/400s$,
- der vergangenen Zeitdauer seit des letzten Empfangs $h_{le}(x) = x/400s$,
- dem Nachrichtenalter $h_{na}(x) = 1 - (x/400s)$, sowie
- der Euklidischen Distanz $dist(p, o)$ zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Ort o des Gefahrenpotenzials mit

$$h_{di}(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } dist(p, o) = 0 \\ \frac{1}{dist(p, o)}, & \text{sonst} \end{cases}$$

Wie in Abbildung 6.33 dargestellt, gewinnen Nachrichten der Gefahr 1, welche im simulierten Szenario eine überprivilegierte Gewichtung aufweisen, wie erwartet öfter den Wettbewerb um den Kanal und werden daher insgesamt auch öfter übertragen bzw. wiederholt.

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

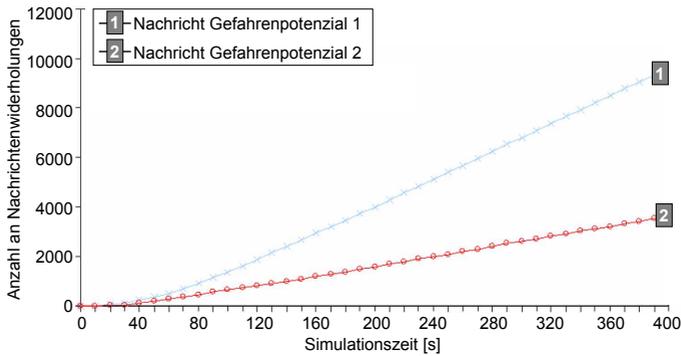


Abbildung 6.33: Auswirkungen einer nutzenbasierten Nachrichtenpriorisierung im Falle zweier unterschiedlich gewichteter Gefahrenmeldungen

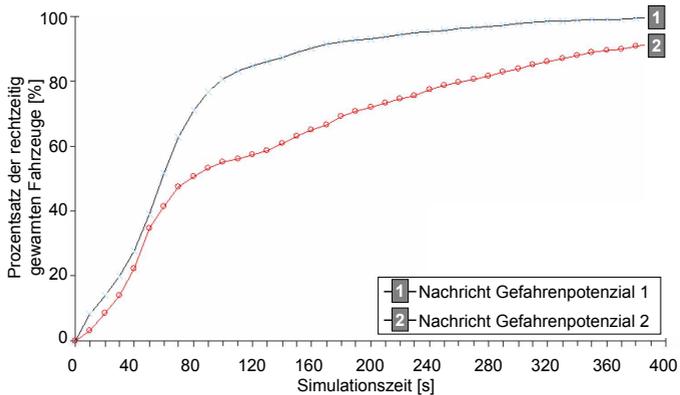


Abbildung 6.34: Anzahl der gewarnten Fahrzeuge im Falle zweier unterschiedlich gewichteter Gefahrenmeldungen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung

Abbildung 6.34 zeigt den prozentualen Anteil der Fahrzeuge, die die entsprechende Warnnachricht erhalten haben. Die aufgrund der Gefahrenart als dringlicher eingestufte Nachricht 1 erreicht dabei die betroffenen anderen Fahrzeuge deutlich schneller, d.h. die Übertragungslatenzzeiten sind kürzer. Damit einhergehend steigt der globale Nutzen, da die Kenntnis über die in Nachricht 1 transportierte Kontextinformation für die Allgemeinheit von größerer Bedeutung ist. Die Abbildungen 6.35 und 6.36 veranschaulichen die gleichen Überlegungen nochmals mit drei weiteren konkurrierenden Nachrichten weiterer Gefahrenklassen, wobei die spezifische Gefahrenrelevanz in diesem Szenario von Gefahr 5 (höchste Gefahrenklasse) zu Gefahr 1 (niedrigste Gefahrenklasse) hin abnimmt.

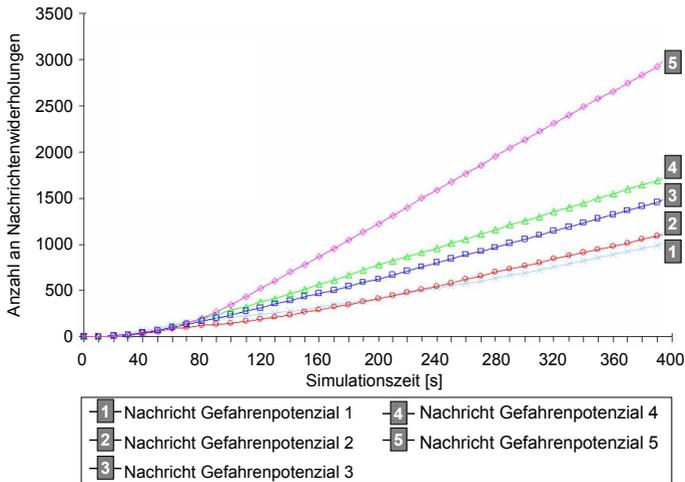


Abbildung 6.35: Auswirkungen einer nutzenbasierten Nachrichtenpriorisierung im Falle von fünf unterschiedlich gewichteten Gefahrenmeldungen

6.5.15 Implizites Verbreitungsgebiet

Die Einführung eines senderdeterminierten Verbreitungsgebietes, wie dies beispielsweise in [MFE03] postuliert wird, entspricht nicht vollständig den Anforderungen aus Abschnitt 2.4. Dem liegt die Tatsache zugrunde, dass sich die Nützlichkeit einer Beobachtung für andere Verkehrsteilnehmer aufgrund der sich fortlaufend ändernden Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung im Allgemeinen nur unzureichend abgeschätzt werden kann. Daraus resultiert vor allem für fahrsicherheitsrelevante Gefahrenmeldungen ein in den meisten Fällen zu groß definiertes Verbreitungsgebiet, damit sichergestellt werden kann, dass auch bei wechselnden Verkehrsdichten und schwankender Konnektivität des Netzwerks die Kontextinformationen alle potenziell betroffenen Fahrzeuge rechtzeitig erreichen. Aufgrund der begrenzten Kommuni-

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

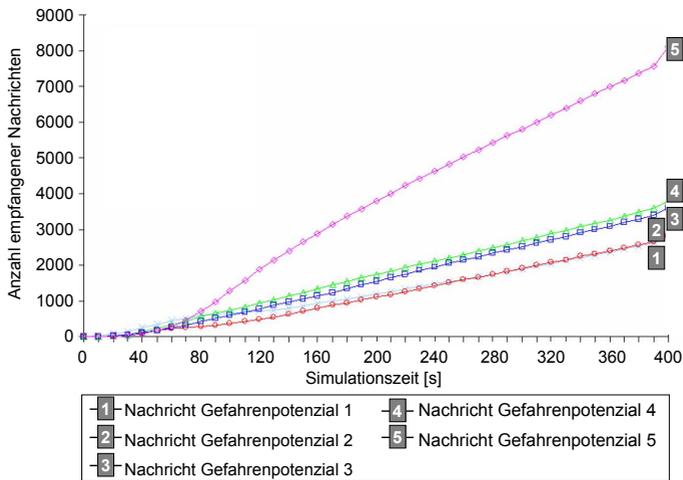


Abbildung 6.36: Anzahl der gewarnten Fahrzeuge im Falle von fünf unterschiedlich gewichteten Gefahrenmeldungen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung

kationsressourcen stehen jedoch alle zu übertragenden Nachrichten im Gegenseitigen Wettbewerb. Eine eigentlich unnötig große räumliche Verbreitung einer Kontextinformation vermindert daher die zur Übertragung weiterer Kontextinformationen effektiv verfügbare Bandbreite und senkt so insgesamt den Nutzen des Kommunikationsmediums.

Abbildung 6.37 visualisiert den Effekt der beschriebenen empfänger determinierten und nutzenzentrischen Nachrichtendifferenzierung im Hinblick auf das sich hierdurch implizit ergebende Verbreitungsgebiet aufgrund des inhärenten Wettbewerbs der Nachrichten. Die Abbildung zeigt das Simulationsgebiet aus der Vogelperspektive. Jeder Punkt in der Grafik entspricht einem Sendeereignis einer Nachricht, wobei jede Nachricht einer von zwei Gefahrenstellen zugeordnet ist. Beiden Gefahrenstellen ist dabei im simulierten Szenario die gleiche Gefahrenrelevanz zugeordnet. Die Nachrichtenverbreitung korreliert stark mit dem Ort der zugehörigen Gefahrenstelle. Wie beschrieben, nimmt mit steigender Distanz zur Gefahrenquelle die Relevanz der entsprechenden Nachrichten ab. Aufgrund des Wettbewerbs mit Nachrichten der konkurrierenden Gefahrenstelle nimmt folgerichtig mit steigender Annäherung zu dieser die Übertragungswahrscheinlichkeit ab. Wie aus Abbildung 6.38 ersichtlich wird, hängt der Wettbewerb dabei von der individuellen Gefahrenrelevanz ab. In diesem Beispiel wurde der Gefahrenstelle 2 eine höhere Relevanz zugewiesen, was sich in einer Privilegierung im Wettbewerb und damit in einem verhältnismäßig größeren Verbreitungsgebiet widerspiegelt.

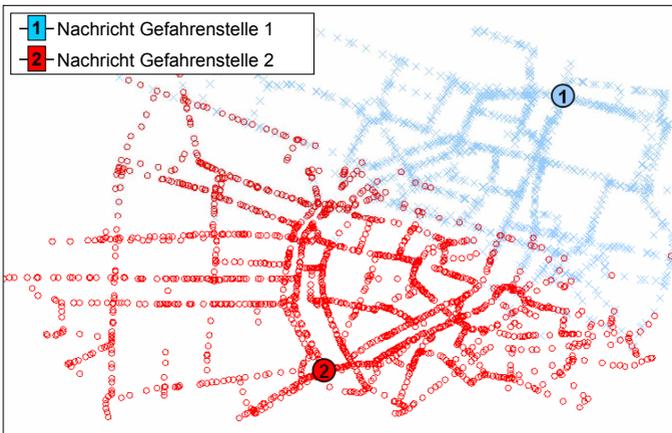


Abbildung 6.37: Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung

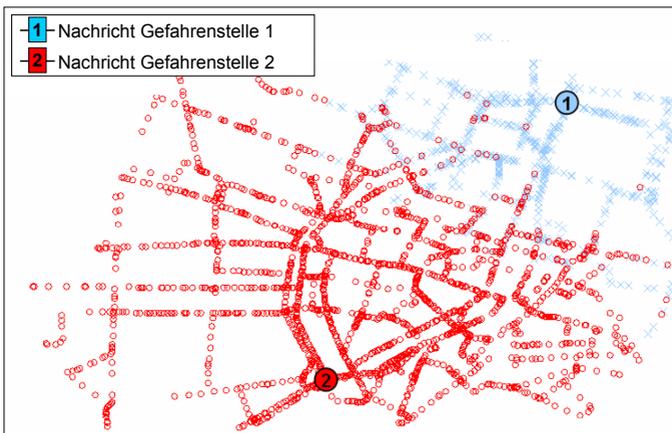


Abbildung 6.38: Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten und unterschiedlich gewichteten Gefahrenstellen und nutzenbasierter Nachrichtenpriorisierung

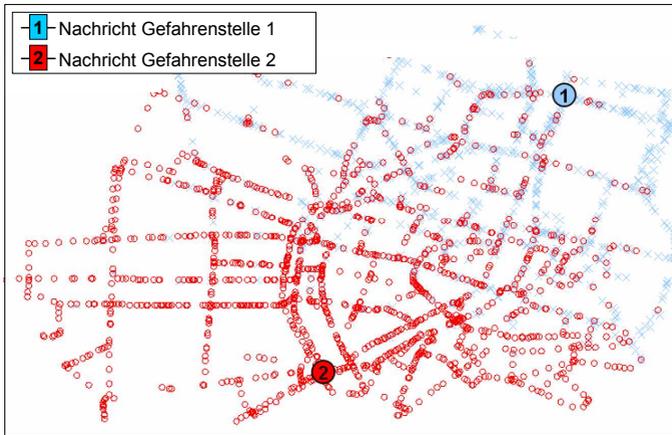


Abbildung 6.39: Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von zwei gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und verminderter verhältnismäßiger räumlicher Nutzenkorrelation

An dieser Stelle sei angemerkt, dass lediglich ein Wettbewerb zwischen zwei unterschiedlichen Nachrichtenarten simuliert wurde, weshalb diese insgesamt in Ermangelung eines weiterführenden Wettbewerbs im gesamten Simulationsgebiet verbreitet werden. Abbildung 6.39 zeigt hierzu das Verhalten, falls der räumliche Einflussfaktor der Euklidischen Distanz im Verhältnis mit den weiteren Kontextaspekten ein geringeres Gewicht aufweist. Da der Wettbewerb weniger stark von der räumlichen Nähe zur Gefahrenstelle abhängt, ergibt sich folgerichtig eine größere Überlappung der Ausbreitungsgebiete. Die spezifische Parametrisierung erlaubt also eine explizite Steuerung des Wettbewerbs und damit auch des implizit resultierenden Verbreitungsgebietes. Die Abbildungen 6.40 und 6.41 visualisieren das eben geschilderte Verhalten mit 5 konkurrierenden Gefahrenstellen, wobei sich wiederum ein ähnliches Verhalten ergibt.

6.5.16 Implizite Nachrichtenlebensdauer

Die eben dargestellten Überlegungen und Rückschlüsse hinsichtlich des Verbreitungsgebietes gelten in ähnlicher Weise auch für die individuelle Nachrichtenlebensdauer. Für eine senderdeterminierte Festlegung der Nachrichtenlebensdauer zum Zeitpunkt der Nachrichtenerzeugung gelten die gleichen Einschränkungen. Wie beschrieben ist es nicht ausreichend, eine Nachricht einmalig durch das Netzwerk zu fluten. Aufgrund eines möglichen Mangels an Konnektivität zwischen den Fahrzeugen muss diese ausreichend oft und lange wiederholt werden, wobei ein statisches Wiederholungsintervall nicht den Anforderungen nach einer fortlaufenden kontextabhängigen nutzenoptimalen Verwendung des Kommunikationskanals entspricht. In der vorgestellten Kontextverbreitungsstrategie werden Nachrichten, die Kontextinformationen enthalten nach einer erfolgreichen Übertragung nicht aus der Nachrichtenwarteschlange entfernt. Stattdessen bleiben sie mit verminderten Nachrichtenrelevanz in der Nachrichtenwarteschlange.

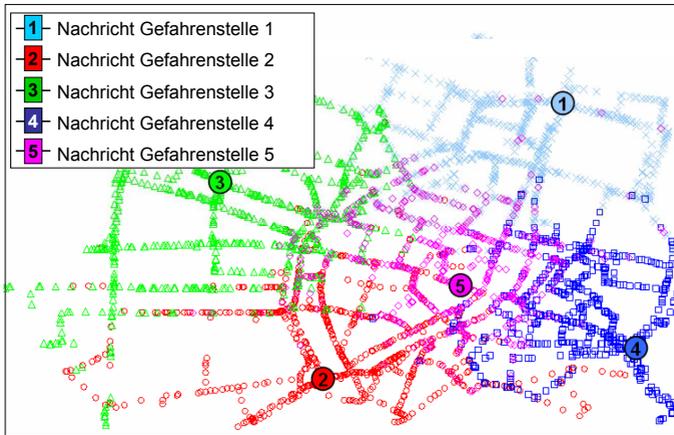


Abbildung 6.40: Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von fünf gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und räumlicher Nutzenkorrelation

ge, bis eine weitere Übertragung aus inhaltlicher Sicht keinen Nutzen mehr verspricht. Wesentlicher Stellhebel hierfür sind die Heuristiken zur Minimierung der Nachrichtenredundanz, wie beispielsweise der Zeitpunkt der letzten Übertragung. Daraus ergibt sich ein implizites und kontextadaptives Wiederholungsintervall in Abhängigkeit des aktuellen Wettbewerbs mit anderen Nachrichten.

Abbildung 6.42 zeigt ein Szenario mit einer Fahrzeugdichte von 200 Fahrzeugen über einem Simulationszeitraum von 400s. Während des Simulationszeitraums treten zu unterschiedlichen Zeitpunkten (0, 100 und 200 Sekunden) drei verschiedene Gefahrenquellen auf, die von den Fahrzeugen detektiert werden und die zugehörige Beobachtung verbreiten. Die Abbildung zeigt die Anzahl der zusätzlichen Übertragungen pro Zeiteinheit. Der gegenseitige Wettbewerb bedingt einen Rückgang der Anzahl der Neuübertragungen von Nachrichten bezüglich des ersten Gefahrenpotenzials, sobald diese in Konkurrenz zu einer weiteren Gefahrenquelle treten. Aufgrund des durchschnittlich höheren Nachrichtenalters und der damit verbundenen geringeren Nutzenerwartung verschiebt sich der Wettbewerb zugunsten von Nachrichten der zweiten Gefahrenquelle.

6.6 Bewertung und Zusammenfassung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde auf Basis einer Reihe von simulierten Szenarien das Verhalten der in diesem Kapitel beschriebenen empfängerdeterminierten und nutzenzentrischen Kontextverbreitungsstrategie eingehend aufgezeigt und analysiert, sowie die möglichen Strategien zur Umsetzung einer nutzenbezogenen Nachrichtendifferenzierung unabhängig voneinander bewertet.

An dieser Stelle sollen nochmals die wesentlichen Eigenschaften des vorgestellten

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

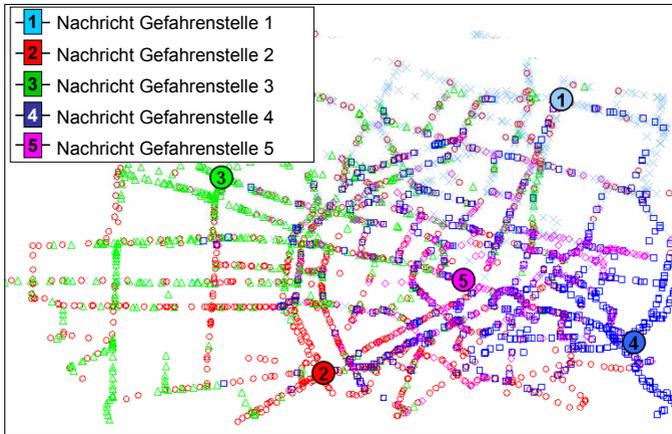


Abbildung 6.41: Implizites Verbreitungsgebiet im Falle von fünf gleichzeitig existenten Gefahrenstellen und verminderter verhältnismäßiger räumlicher Nutzenkorrelation

Konzeptes zusammengefasst und die Vor- und Nachteile gegenüber den bisher aus der Literatur bekannten Ansätzen herausgearbeitet werden. Die wesentlichen Eigenschaften sind dabei im Einzelnen:

Nutzenzentrische Kanalausnutzung Die verfügbare begrenzte Kanalkapazität wird im Hinblick auf das zugrunde liegende Netzziel so verwendet, dass sich für die am Netz teilnehmenden Fahrzeuge ein maximaler Anwendungsnutzen ergibt. Vor dem Hintergrund der Existenz kooperativer fahrsicherheitskritischer Anwendungen ist die Umsetzung der Netzwerknutzenmaximierung (network utility maximization - NUM) von zentraler Bedeutung.

Explizite Umsetzung des altruistischen Netzcharakters Kooperative und vorausschauende Fahrerassistenzsysteme basieren auf dem Austausch fahrbezogener Kontextinformationen. Ein tatsächlicher Anwendungsnutzen ergibt sich, wenn eine Anwendung Informationen erhält, die die eigene Handlungsentscheidung maßgeblich beeinflusst. Damit ergibt sich eine selbstlose Kommunikationsmaxime, bei der Fahrzeuge uneigennützig eigenes lokales Wissen anderen Fahrzeugen und Anwendungen zur Verfügung stellen. Die vorgestellte explizite Nutzenabschätzung für die anderen Fahrzeuge trägt dem Rechnung.

Anwendungszentrische Nutzenbewertung Da sich der Nutzen einer erhaltenen Kontextinformation ausschließlich im Zusammenhang mit dem bereits existierenden Vorwissen einer Anwendung, sowie der aktuellen Situation, Handlungsflexibilität und Fahrtzweck bemessen lässt, bedingt eine optimale Nutzenabschätzung auch eine inhaltliche Bewertung durch die Anwendung. Dies wird durch die vorgestellte schichtenübergreifende Kommunikationsarchitektur ermöglicht.

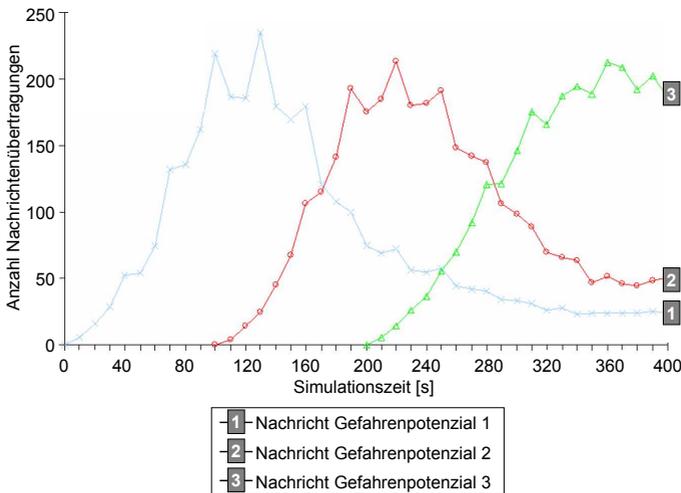


Abbildung 6.42: Implizite Nachrichtenlebensdauer im Falle von drei sequenziell auftretenden Gefahrenquellen und zeitlicher Nutzenkorrelation

Situativität Die externen Umweltbedingungen ändern sich fortwährend. Ein optimaler Verbreitungsprozess muss sich daher fortlaufend an die sich verändernden Rahmenbedingungen anpassen. Im Gegensatz zu der im Netzwerkbereich zumeist üblichen senderdeterminierten Festlegung der Kommunikationsstrategie, ermöglicht die beschriebene empfängerdeterminierte Nutzenbewertung jederzeit eine implizite Anpassung der weiteren Verbreitung einer Nachricht an die aktuelle Situation. Dies beinhaltet aufgrund des wechselseitigen Wettbewerbs um den Übertragungskanal zudem eine implizite Begrenzung des Verbreitungsgebietes und der Lebensdauer von Nachrichten, sowie ein implizites und situationsadaptives Nachrichtenwiederholungsintervall.

Skalierbarkeit Die aktuelle Fahrzeugdichte hat wesentlichen Einfluss auf die Konnektivität der Fahrzeuge, welche wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die einzusetzende Verbreitungsstrategie hat. Während bei geringer Konnektivität Nachrichten zwischengespeichert, physisch weitergetragen und wiederholt werden müssen, wirkt sich eine zu häufige redundante Wiederholung bei hoher Konnektivität spürbar negativ auf die verfügbare Kanalkapazität aus. Die Konnektivität kann sich dabei jedoch jederzeit schlagartig ändern (unter der Annahme einer ausreichenden Verbreitung des Systems). Die explizite nutzenzentrierte Nachrichtendifferenzierung der Fahrzeuge in Verbindung mit dem empfängerdeterminierten weiteren Bewertungsprozess ermöglicht dabei eine fortlaufende nahtlose Anpassung an sich verändernde Fahrzeugdichten und Konnektivitätsgrade. Die Relevanzbewertung stellt zudem eine Metrik dar, die es bei zu ho-

6 Nutzenoptimierende Verbreitung fahrrelevanter Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc Netzen

her Netzwerklast erlaubt, die Übertragung einzelner Nachrichten explizit zu beeinflussen. Kann aufgrund der Kapazitätsbeschränkungen nicht allen Übertragungswünschen entsprochen werden, so werden genau diejenigen Nachrichten explizit unterdrückt, die im Hinblick auf das übergeordnete Netzziel der Fahrerunterstützung einen weniger effektiven Beitrag leisten. Somit ermöglicht das vorgestellte Verfahren eine nachhaltige Skalierbarkeit des Systems - auch und gerade vor dem Hintergrund der vergleichsweise langen Lebenszyklen automobiler Systeme und der zu erwartenden Zunahme der an einem automobilen Ad-hoc Netzwerk teilnehmenden Fahrzeuge und Anwendungen.

Integrativität Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die einheitliche Integration beliebiger sinnvoller Heuristiken zur Abschätzung der Nachrichtenredundanz, Anwendungsdurchdringung, Verbindungscharakteristik, Verbreitungscharakteristik und des inhaltlichen Informationsnutzens. Daher können die verschiedenen in der Literatur bereits beschriebenen Optimierungsansätze, wie beispielsweise die Bevorzugung von Fahrzeugen an exponierten Orten wie Kreuzungen ([Kos05b]) hinsichtlich einer Informationsverbreitung in Ad-hoc Netzen unmittelbar berücksichtigt werden. Zudem ermöglicht Einführung einer anwendungsübergreifenden Konsolidierungsschicht, die die Nutzenbewertungen aller Anwendungen unter Berücksichtigung des Netzziels einheitlich zusammenführt, auch die nahtlose Integration beliebiger Kommunikationsprotokolle darüber liegender Schichten, wie beispielsweise eines individuellen Routendownloads über TCP/IP über AODV.

Netzwerkdynamik und explizite Nachrichtenvorriorisierung Aufgrund der hohen Mobilität der Fahrzeuge, bleibt in vielen Fällen lediglich einige wenige Sekunden Zeit, in denen zwei Fahrzeuge wechselseitig kommunizieren können. Sofern diese Zeit nicht ausreicht, um alle Nachrichten der Kommunikationspartner erfolgreich zu übertragen, stellt sich zwangsläufig die Frage nach einer geeigneten Sendereihenfolge. Der vorgestellte Ansatz bietet eben diese Möglichkeit in Abhängigkeit der Relevanz der zu übertragenden Nachrichten. Das vorgestellte Kanalzugriffsverfahren ermöglicht zudem ohne zusätzlichen Nachrichtenaufwand eine (solidarisch) faire Koordination zwischen den Fahrzeugen. Dies ist vor dem Hintergrund der Existenz fahrsicherheitskritischer Anwendungen von zentraler Bedeutung.

Der in diesem Kapitel vorgestellte Ansatz zur Verbreitung von Kontextinformationen erfüllt die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Anforderungen. Jedoch sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass mit der expliziten und kontinuierlichen Nutzenbewertung jeder zu übertragenden Nachricht eine signifikante und nicht zu unterschätzende Steigerung der notwendigen Rechenkomplexität einhergeht. Die Simulationen in Abschnitt 6.5 haben jedoch gezeigt, dass schon auf Basis einer sehr einfachen Nutzenheuristik und gegebenenfalls lediglich einmaliger initialer Nutzenbewertung eine spürbare Steigerung des globalen Nutzens erreicht werden kann. Eine effektive Optimierung der Nutzenbewertungsheuristiken hinsichtlich der resultierenden Berechnungskomplexität übersteigt den Rahmen dieser Arbeit. Eine Klassifizierung der Nachrichten in spezifische Anwendungsklassen mit gleicher Relevanzberechnungsvorschrift wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, erscheint als vielversprechende und wirksame Optimierungsmöglichkeit. Zudem bedingt die Nachrichtenauswahl keine vollständige Ordnung der Nachrichtenwarteschlange auf Basis der Übertragungsrelevanz. Stattdessen muss die

Nachricht mit der aktuell höchsten Übertragungsrelevanz bekannt sein. Verändert sich die Übertragungsrelevanz einer Menge von Nachrichten in der Warteschlange über die Zeit aufgrund der gleichen zugrunde liegenden Berechnungsvorschrift in gleicher Weise, so muss lediglich die Übertragungsrelevanz derjenigen Nachricht fortlaufend aktualisiert werden, die in dieser Gruppe (bzw. eben dieser Anwendungsklasse) die höchste Relevanz besitzt. Dieser Effekt wird zudem gestützt durch die Tatsache, dass von Seiten der Anwendung lediglich eine Minimierung des Nutzens möglich ist. Es müssen also nur die höchst relevanten Nachrichten aus jeder Anwendungsklasse fortwährend aktualisiert und miteinander verglichen werden. Damit reduziert sich die Abhängigkeit der Berechnungskomplexität in grober Abschätzung von der Anzahl der gepufferten Nachrichten auf die Anzahl der existenten Anwendungsklassen. Selbst eine suboptimale Nachrichtendifferenzierung auf Basis einfacher Heuristiken und möglicherweise Abstrichen der Aktualisierungsintervalle ist jedoch gegenüber keiner Nachrichtendifferenzierung vorzuziehen. Dies gilt insbesondere bei hoher Netzlast und für sicherheitskritische Anwendungen.

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Kernergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag

Die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen fahraufgabenbezogenen Kontextinformationen im Fahrzeug leistet einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz. Im Rahmen dieser Dissertation wurde aufgezeigt, wie Kontextinformationen unterschiedlicher Aspekte in Fahrzeugen erzeugt, verwaltet und über automobiler Ad-hoc Netze verbreitet werden können. Eine umfassende Analyse der automobilen Problemdomäne zeigte dabei auf, dass die einzelnen Problemfelder eng miteinander verzahnt sind. Aus diesem Grund ist es erforderlich, diese gemeinsam im Rahmen eines einheitlichen Gesamtlösungskonzepts zu betrachten. Die in dieser Arbeit vorgestellten und im Hinblick auf die reale Umsetzbarkeit miteinander korrelierten Lösungskonzepte umfassen dabei

- die domänenübergreifende Verwaltung von Kontextinformationen im Fahrzeug,
- eine Methodik zur Deduktion und Prädiktion des Fahrkontextes auf Basis verteilter Fahrzeugbeobachtungen, sowie
- einen integrativen Ansatz zur Maximierung des Netzwerknutzens automobiler Ad-hoc Netze.

Die Deduktion höherwertiger Kontextaspekte ist systeminhärent aufgrund der hohen Situationsdynamik mit Unsicherheit behaftet. Bayessche Netze stellen in diesem Zusammenhang ein weit verbreitetes und vielfach eingesetztes Paradigma zum Schließen auf unsicheren und unvollständigen Daten dar. Im Hinblick auf die Prädiktion der zukünftigen Fahrsituation auf Basis verteilter Beobachtungen von Fahrzeugen ist die Zuverlässigkeit und Aussagekraft dieser Beobachtungen abhängig von den relativen räumlichen und zeitlichen Abständen zwischen den Beobachtungen und der eigenen Fahrzeugposition. Räumliche Wirkzusammenhänge und Einflussfaktoren können mit Hilfe von Bayesschen Netzen jedoch nicht adäquat abgebildet werden. Aus diesem

Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein zweistufiges Inferenzverfahren vorgestellt, das die räumlichen und zeitlichen Wirkeinflüsse mittels funktional gewichteter Interpolation für beliebige Straßenpositionen abbilden kann. Eine Quervalidierung auf Basis der existenten kausalen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kontextaspekten ermöglicht schließlich eine nachgelagerte Verfeinerung der Ergebnisqualität. Detaillierte mikroskopische Simulationen unter Variation der zugrunde liegenden Einflussparameter zeigten, dass selbst bei wenigen teilnehmenden Fahrzeugen auf Basis des vorgestellten Verfahrens eine stabile und belastbare Vorhersage der Fahrsituation erzielt wird.

Auf Basis dieses kooperativen Schließens auf räumlich und zeitlich verteilten Informationen wurden Heuristiken hinsichtlich des spezifischen Anwendungsnutzens erarbeitet. Aufbauend auf einer umfassenden Diskussion des Paradigmas der Netzwerknutzenoptimierung in automobilen Ad-hoc Netzen wurde ein integratives Rahmenwerk erarbeitet, das eine Maximierung des globalen aggregierten Anwendungsnutzens der am Netzwerk teilnehmenden Fahrzeuge ermöglicht. Wesentliches Wirkprinzip hierbei ist die Berechnung einer optimalen Übertragungsreihenfolge der in den Fahrzeugen vorhandenen Nachrichten, unter Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugkontextes und der aktuellen Verkehrssituation. Entgegen bisherigen Ansätzen wird dabei nicht nur die effektive Diffusion einer isolierten Nachricht im Netzwerk betrachtet. Stattdessen ermöglicht das vorgestellte Verfahren eine nachrichten- und anwendungsübergreifende Optimierung auf Basis des Prinzips der solidarischen Fairness. Insbesondere wurde hierdurch eine Metrik eingeführt, welche es erlaubt, auch bei hoher Netzlast die in der jeweils spezifischen Situation wichtigen Nachrichten mit geringer Latenzzeit untereinander auszutauschen. Dies stellt einen wesentlichen Beitrag im Hinblick auf die nachhaltige Skalierbarkeit automobiler Ad-hoc Netze dar. Durch die generische Struktur können beliebige Heuristiken eingebunden werden, was eine weitere sukzessive Optimierung der Netzwerknutzung ermöglicht. Eine umfassende simulative Evaluation der Stellhebel im Vergleich mit statischen Geocast-Ansätzen konnte hierbei zeigen, dass sich der durchschnittliche Anwendungsnutzen durch das vorgestellte Verfahren insbesondere bei hoher Netzlast signifikant erhöht.

Durch die Vernetzung der Fahrzeuge mit ihrer Umwelt und die Integration in verschiedene drahtlose Netzwerke werden Fahrzeuge, neben ihrer Rolle als isolierte Kontexterzeuger mittels der fahrzeuginternen Sensorsysteme, in Zukunft auch zu generischen Kontextverbrauchern und Kontextbereitstellern. Um eine Interoperabilität der von Fahrzeugen erzeugten Kontextinformationen mit kontextsensitiven Diensten aus anderen Anwendungsdomänen zu ermöglichen, wurde daher in dieser Arbeit ein auf die Anwendungsdomäne zugeschnittenes Modell des generischen Context-Meta-Modells von Fuchs auf Basis der Ontology Web Language (OWL) instanziiert. Die wesentlichen Merkmale hierbei sind zum einen die effiziente Verwaltung der inhärent mit Kontextinformationen assoziierten Meta-Informationen wie Beobachtungsort, -Zeitpunkt, und Beobachtungsqualität. Zum anderen ermöglicht die Modellinstanz zudem, domänen-spezifisches Wissen hinsichtlich der kausalen Abhängigkeiten und Wirkzusammenhänge zwischen unterschiedlichen Kontextaspekten in gleicher Weise wie das dynamische Instanzwissen explizit abzubilden. Insbesondere kann so das Anwendungswissen dynamisch zur Laufzeit erweitert bzw. verbessert und zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden. Zudem ermöglicht die explizite Repräsentation der kausalen Abhängigkeiten

eine fortlaufende individuelle Anpassung während der Laufzeit. Darüber hinaus lassen sich die kausalen Abhängigkeiten nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ spezifizieren. Dies ermöglicht eine dynamische und situationsbezogene Instanziierung von Bayesschen (Teil-) Netzen, welche vor dem Hintergrund der begrenzten Betriebsmittel in eingebetteten Fahrzeugsystemen zu einer wesentlichen Reduktion der resultierenden Berechnungskomplexität führt. Eine räumliche Indexierung ermöglicht zudem einen effizienten Zugriff auf die stark ortskorrelierten Kontextinformationen.

7.2 Offene Fragen und Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemdomäne kooperativer Telematikanwendungen umfasst viele unterschiedliche Aspekte und Teilprobleme. Die vorliegende Arbeit beschreibt dabei viele Einzelaspekte und Lösungskonzepte aus unterschiedlichen Bereichen der Informatik und beschränkt sich aus diesem Grund auf die wesentlichen Kernbausteine, die zur Realisierung der anvisierten kooperativen Telematikanwendungen notwendig sind. Gerade die integrative Betrachtung der Netzwerknutzung vor dem Hintergrund der spezifischen kontextsensitiven Anwendungsfelder stellt ein neues Lösungsparadigma dar, welches naturgemäß eine Reihe weitergehender Fragestellungen aufwirft. Beispielhaft seien im Folgenden einige dieser Punkte aufgeführt:

- Die Erweiterung der heuristischen Abschätzung des Netzwerknutzens im Hinblick auf die Verfügbarkeit paralleler oder konkurrierender Kommunikationskanäle, wie dies beispielsweise im Standard IEEE 802.11p vorgesehen ist. Dies gilt auch für die Integration weiterer Funknetze. Als Konsequenz ergibt sich letztlich mit der situativen Kanalwahl eine weitere Dimension der Optimierung.
- Die Integration einer fortlaufenden Sendeleistungsanpassung, wie sie beispielsweise in [TMSH05] beschrieben ist. Auch dies führt vor dem Hintergrund einer situationsadaptiven optimalen Sendeleistung wiederum zu einer weiteren Dimension des Optimierungsproblems.
- Die weiterführende Analyse und Integration verschiedener Aggregationsmechanismen.
- Eine detaillierte Analyse verschiedener Nutzenbewertungsheuristiken im Hinblick auf die Entwicklung des aggregierten Gesamtnutzens.
- Die Reduktion der Berechnungskomplexität der heuristischen Nutzenbewertung, welche aufgrund der notwendigen fortlaufenden Neubewertung vergleichsweise hoch ist. Eine Klassifizierung in sich gleich verändernde Anwendungsklassen ist wie beschrieben in dieser Hinsicht vielversprechend.
- Eine detaillierte Spezifikation der Schnittstellen, um eine effiziente schichtenübergreifende Nutzenbewertung zu ermöglichen.
- Eine autonom lernende Individualisierung von kausalen Zusammenhängen zwischen Kontextaspekten.

- Eine detaillierte Bewertung der Plausibilität der empfangenen Fahrzeugbeobachtungen. Insbesondere ist zu klären, inwieweit konkurrierende Fahrzustandseinschätzungen auf Basis unterschiedlicher Beobachtungsmengen die Ergebnisqualität verbessert.
- Eine gegenüberstellende Analyse weiterer Inferenzverfahren, wie beispielsweise Neuronale- oder Dempster-Shafer-Netze, oder Fuzzy Mengen.
- Eine weitere Verfeinerung der Simulationsumgebung, beispielsweise durch verbesserte Kanalausbreitungsmodelle, wie sie unter anderem in [TMSEFH06] oder [SHM⁺04] vorgeschlagen werden. Für eine weiterführende Analyse der Vorhersage des Fahrkontextes ist zudem eine detaillierte Abbildung der Fahrzeugsensoren in der Simulation notwendig.
- Die Integration von Maßnahmen hinsichtlich Sicherheit und Datenschutz, sowie eine Analyse der hieraus möglicherweise resultierenden Konsequenzen im Hinblick auf die Nutzenbewertung und die Vorhersage des Fahrkontextes.
- Eine weiterführende Analyse der Interoperabilität mit anderen (kontextsensitiven) Anwendungsdomänen.

7.3 Schlussbemerkung

Der Austausch von Kontextinformationen zwischen Fahrzeugen bietet eine Fülle neuer Möglichkeiten, den Straßenverkehr sicherer und effizienter zu machen. Für viele der technischen Probleme existieren inzwischen vielversprechende Lösungsansätze, nicht zuletzt auch durch diese Arbeit. Eine Validierung und Quantifizierung des tatsächlichen effektiven Nutzens einzelner Lösungsansätze auf die Verkehrssicherheit ist jedoch aufgrund der Komplexität des Verkehrsgeschehens und der vielfältigen Handlungsmaximen der Fahrer schwierig. Die konkrete Wirksamkeit muss letztlich über eine umfassende Studie der aufgezeigten Anwendungen unter realen Bedingungen erfolgen, wie sie im Rahmen der von der Bundesregierung kürzlich auf den Weg gebrachten Initiative SIM-TD (Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland) in den nächsten Jahren durchgeführt werden soll. Wesentlicher Stellhebel ist dabei auch eine adäquate, situationsadaptive und auf die individuellen Bedürfnisse der Fahrer zugeschnittene Benutzerschnittstelle, die den Fahrern zum richtigen Zeitpunkt, und in geeigneter Weise die notwendigen Informationen präsentiert, ohne sie dabei kognitiv zu überfordern. Die Ausprägung der Interaktion zwischen Fahrzeug und Insassen, gepaart mit einem konsequenten Schutz der informationellen Selbstbestimmung der Fahrer und Fahrzeughalter, entscheidet maßgeblich über die resultierende Kundenakzeptanz und somit letztlich auch über den möglichen Erfolg kooperativer Telematiksysteme am Markt.

Das große Potenzial kooperierender Verkehrsteilnehmer ist letztlich der Garant dafür, dass die Vision des umfassend informierten Fahrzeugs und Fahrers ausreichende Kooperationsbereitschaft der beteiligten Unternehmen und Organisationen weckt, obwohl diese unterschiedliche Einzelinteressen und Geschäftsmodelle verfolgen.

Im Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit erscheint die Kooperation individueller Verkehrsteilnehmer letztlich insgesamt als eine in hohem Maße äußeren Einflussfaktoren

unterworfenen Aufgabe, in der womöglich die Technik die kleinste, die Individualisierung der Fahrumgebung eine wachsende, die Kooperationsbereitschaft der entwickelnden Unternehmen eine wesentliche, der Staat eine ermöglichende, und der Markt die entscheidende Rolle spielen wird.

Literaturverzeichnis

- [ABD⁺06] AIJAZ, A. ; BOCHOW, B. ; DÖTZER, F. ; FESTAG, A. ; GERLACH, M. ; KROH, R. ; LEINMÜLLER, T.: Attacks on Inter Vehicle Communication Systems - an Analysis. In: *Proceedings of 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006)*, 2006
- [AC01] AAD, I. ; CASTELLUCCIA, C.: Differentiation Mechanisms for IEEE 802.11. In: *Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Anchorage, Alaska, April 2001
- [ACP87] ARNBORG, S. ; CORNEIL, D. G. ; PROSKUROWSKI, A.: Complexity of finding embedding in a k-tree. In: *SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods* vol. 2 (1987), S. Seiten 277–284
- [Adl06] ADLER, Ch.: *Information Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2006
- [AEK⁺06] ADLER, Ch. ; EICHLER, S. ; KOSCH, T. ; SCHROTH, Ch. ; STRASSBERGER, M.: Strategies for adaptive information diffusion in vehicular ad-hoc networks. In: *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'06)*, 5 - 8 September, Valencia Spain, 2006
- [AESS06] ADLER, Ch. ; EIGNER, R. ; SCHROTH, Ch. ; STRASSBERGER, M.: Context-Adaptive Information Dissemination in VANETS - Maximizing the Global Benefit. In: *Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Communication Systems And Networks (CSN 2006)*, August 28-30, Palma de Mallorca, Spain, 2006
- [AG97] ASHER, H. J. ; GALLER, B. A.: Collision Warning in a Mix of Equipped and Unequipped Vehicles. In: *Proceedings of the Fourth World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Berlin, 1997

- [AGO03] AGORA CONSORTIUM ; WEVERS, Kees (Hrsg.): *Specification of the AGORA Location Referencing Method*. Deliverable 2.2, Version 1.0, 2003
- [AH05] ALSHAER, H. ; HORLAIT, E.: An Optimized Adaptive Broadcast Scheme for Inter-vehicle Communication. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2005-Spring)*. Stockholm, Sweden, May 2005, S. 2840– 2844
- [Ai02] AI, Li: *Entwurf und Implementierung einer Geocast-Erweiterung für das AODV Routing Protokoll*. Munich, Germany, Technische Universität München, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Diplomarbeit, April 2002
- [Air] AIRSAGE WEB SITE: *AirSage X-10*. <http://www.airsage.com/solutions/x10.htm>, . – last accessed: 10.01.2007
- [Akt] AKTIV: *Adaptive und kooperative Technologie für den Intelligenten Verkehr - Projekthomepage*. <http://www.aktiv-online.org/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [ARS05] *Kapitel Issues and Requirements for Bayesian Approaches in Context Aware Systems*. In: ANGERMANN, M. ; ROBERTSON, P. ; STRANG, Th.: *Location- and Context-Awareness*. Springer Berlin / Heidelberg, 2005
- [AS06] ADLER, Ch. ; STRASSBERGER, M.: Putting Together The Pieces - A Comprehensive View On Cooperative Local Danger Warning. In: *Proceedings the 13th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITS'06), October 8-12 2006, London, UK, 2006*
- [AST] ASTM: *American Society for Testing and Materials - Web Site*. <http://www.astm.org>, . – last accessed. 02.02.2007
- [BD06] BRAESS, H.-H. ; DONGES, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - konsumierbare oder echte Verbesserung? In: *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*, 2006
- [Ben04] BENSLIMANE, A.: Optimized Dissemination of Alarm Messages in Vehicular Ad-hoc Networks (VANET). In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference*. Toulouse, France, June 2004
- [BH00] BRIESEMEISTER, L. ; HOMMEL, G.: Role-based Multicast in Highly Mobile but Sparsely Connected Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, 2000, S. 45–50
- [BHT04] BUCHHOLZ, Th. ; HOCHSTATTER, I. ; TREU, G.: Profile-based Data Diffusion in Mobile Environments. In: *Proceedings of 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2004), Fort Lauderdale, USA, 2004*

- [Bis05] BISHOP, R.: Lateral Driver Assist: A Review of US Activities. In: *Proceedings of 12th ITS World Congress San Francisco, USA*, 2005
- [BK00] B.KARP ; KUNG, H. T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile computing and Networking (MobiCom '00)*. New York, NY, USA : ACM Press, 2000. – ISBN 1-58113-197-6, S. 243-254
- [BKS03] BUCHHOLZ, Th. ; KÜPPER, A. ; SCHIFFERS, M.: Quality of Context Information: What it is and why we need it. In: *Proceedings of 10th HP-OVUA Workshop, volume 2003*, 2003
- [BMJ⁺98] BROCH, J. ; MALTZ, D. A. ; JOHNSON, D. B. ; HU, Y.-Ch. ; JETCHEVA, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. In: *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98)*, 1998, S. 85-97
- [BMW] BMW GROUP: *BMW Assist Web Site*. <http://www.bmw-telematik.de>, . – last accessed: 10.01.2007
- [BMW03] BMW GROUP FORSCHUNG UND TECHNIK: Teilprojekt Verkehrsleistungsassistentz (VLA), Kommunikationsanforderungen und -strategie / BMW Forschung und Technik GmbH. 2003. – Forschungsbericht
- [Bra95] BRAESS, H.-H. ; PAUWELUSSEN, J.P. (Hrsg.) ; PACEJKA, H.B. (Hrsg.): *PROMETHEUS, Contribution to a Comprehensive Concept for Future Road Traffic*. Swets & Zeitlinger, Lisse, Niederlande, 1995
- [Bra00] BRANDHERM, B.: *Rollup-Verfahren für komplexe dynamische Bayessche Netze. Diplomarbeit*, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit, 2000
- [BS00] BORGHOFF, U. M. ; SCHLICHTER, J. H.: *Computer-Supported Cooperative Work*. Springer, Berlin, 2000
- [BSH00] BRIESEMEISTER, L. ; SCHÄFERS, L. ; HOMMEL, G.: Disseminating Messages among Highly Mobile Hosts based on Inter-Vehicle Communication. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000*. Piscataway, NJ, USA, October 2000, S. 522-527
- [BSW06] *Kapitel Fusion heterogener Informationsquellen*. In: BEYERER, J. ; SANDER, J. ; WERLING, S.: *Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik*. J. Beyerer, F. Puente León, K.-D. Sommer (Hrsg.), 2006, S. Seiten 223-239
- [Bun] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Telematik im Verkehr*. <http://www.bmvbs.de/Verkehr/Integrierte-Verkehrspolitik-,1414/Telematik.htm>, . – last accessed 08.01.2007

- [Bus05] BUSCH, S.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. In: *Fort-Ber. VDI Reihe 12*, NR. 588 (2005)
- [BW00] BANGSØ, O. ; WUILEMIN, P. H.: Top-down Construction and Repetitive Structures Representation in Bayesian Networks. In: *Proceedings of the Thirteenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference*, 2000, S. Seiten 282–286
- [CAL] CALM / ISO TC 204 WG 16: *Continuous Communications for Vehicles*. <http://www.calm.hu>, . – last accessed: 02.02.2007
- [Car05] CARNEGIE MELLON UNIVERSITY: *Rice Monarch Project Extensions to ns-2*. <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>, 2005
- [Car06] CAR2CAR COMMUNICATION CONSORTIUM: *Car2Car Communication Consortium Website*. <http://www.car-to-car.org>. <http://www.car-to-car.org>. Version:2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [CBL97] CHENG, J. ; BELL, D. A. ; LIU, W.: Learning Bayesian networks from data: an efficient approach based on information theory. In: *Proceedings of the sixth international conference on Information and knowledge management*, 1997
- [CEN] CEN TECHNICAL COMMITTEE 278: *Road Transport and Traffic Telematics - Official Website*. <http://www.nen.nl/cen278/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [CGG+06] CHIASSERINI, C. F. ; GAETA, R. ; GARETTO, M. ; GRIBAUDO, M. ; SERENO, M.: Efficient Broadcasting of Safety Messages in Multihop Vehicular Networks. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Performance Modeling, Evaluation, and Optimization of Parallel and Distributed Systems (PMEO-PDS 2006)*. Rhodes Island, Greece, April 2006
- [Cha91] CHARNIAK, E.: Bayesian Networks without Tears. In: *AI Magazine* 12 (1991), S. 50–63
- [Che02] CHEVREUIL, M.: IVHW: An Inter-vehicle Hazard Warning System Concept within the DEUFRAKO program. In: *Proceedings of the e-Safety Congress and Exhibition, Lyon, France*, 2002
- [CJB99] CHANDRASEKARAN, B. ; JOSEPHSON, John R. ; BENJAMINS, V. R.: What Are Ontologies, and Why Do We Need Them? In: *IEEE Intelligent Systems and Their Applications* 14(1):20–26 (1999)
- [COM] COMESAFETY: *Communications for eSafety*. <http://www.comesafety.org/>, . – last accessed: 02.02.2007

- [COO] COOPERS: *Cooperative Systems for Intelligent Road Safety*. <http://www.coopers-ip.eu/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [CPSM03] CHOI, S. ; PRADO, J. ; SHANKAR, S. ; MANGOLD, S.: IEEE 802.11e Contention-based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference of Communications (ICC)*, 2003
- [CSG04] *Kapitel Applications of Bayesian Networks in Meteorology*. In: CANO, R. ; SORDO, C. ; GUTIÉRREZ, J. M.: *Advances in Bayesian Networks*. Springer, 2004, S. Seiten 309–327
- [CV] CICAS-V: *Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems*. <http://www.its.dot.gov/cicas/index.htm>, . – last accessed: 02.02.2007
- [CVI] CVIS: *Cooperative Vehicle-Infrastructure System*. http://www.ertico.com/en/activities/efficiency__environment/cvis.htm, . – last accessed: 02.02.2007
- [DAS01] DEY, A. K. ; ABOWD, G. D. ; SALBER, D.: A Conceptual Framework and a Toolkit for Supporting the Rapid Prototyping of Context-Aware Applications. In: *Human-Computer Interaction 16* (2001)
- [DC99] DENG, J. ; CHANG, R.: A Priority Scheme for IEEE 802.11 DCF Access Model. In: *IEICE Transactions on Communications E82-B*, No. 1 (1999)
- [Der06] DEROWSKI, S.: *Dynamische Preisbildung bei der Vermittlung von kontextsensitiven Diensten im B2B Bereich*, Institut für Informatik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Diplomarbeit, 2006
- [Dey00] DEY, A. K.: *Providing Architectural Support for Building Context-Aware Applications*, Georgia Institute of Technology, Diss., 2000
- [DGH92] DAGUM, P. ; GALPER, A. ; HORVITZ, E.: Dynamic Network Models for Forecasting. In: *Proceedings of the eighth conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, San Francisco*, 1992
- [DH06] DINGER, J. ; HARTENSTEIN, H.: Defending the Sybil Attack in P2P Networks: Taxonomy, Challenges, and a Proposal for Self-Registration. In: *Proceedings of the First International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2006), Pages 756-763, Wien, Österreich*, 2006
- [DhB⁺06] *Kapitel Akquisition, Repräsentation und Nutzung von Wissen in der Fahrerassistenz*. In: DUCHOW, Ch. ; HUMMEL, B. ; BACHMANN, A. ; YANG, Z. ; STILLER, Ch.: *Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik*. J. Beyerer, F. Puente León, K.-D. Sommer (Hrsg.), 2006, S. Seiten 223–239

- [Die06] *Kapitel* Evidenztheorie - Ein vergleich zwischen Bayes- und Dempster-Shafer-Methoden. In: DIETMAYER, K.: *Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik*. J. Beyerer, F. Puente León, K.-D. Sommer (Hrsg.), 2006, S. Seiten 39–49
- [DKS05] DÖTZER, F. ; KOSCH, T. ; STRASSBERGER, M.: Classification for Traffic Related Inter-vehicle Messaging. In: *Proceedings of the 5th International Conference on ITS Telecommunications (ITS-T)*. Brest, France, June 2005
- [DN96] DONGES, E. ; NAAB, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *Automatisierungstechnik* 44 (1996), S. 226–236
- [DOL] DOLCE: *A Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering*. <http://www.loa-cnr.it/DOLCE.html>, . - last accessed 14.10.2006
- [Don99] DONGES, E.: A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic. In: *Vehicle System Dynamics* Bd. Volume 32. 1999, S. pp. 113–128
- [DP04] DING, Z. ; PENG, Y.: A Probabilistic Extension to Ontology Language OWL. In: *Proceedings of th 37th Hawaii International Conference on System Science*, 2004
- [DQA04] DATTA, A. ; QUARTERONI, S. ; ABERER, K.: Autonomous Gossiping: A Self-organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Semantics of a Networked World (IC-SNW'04)*. Paris, France, June 2004
- [EO06] ENGELSTAD, P. E. ; OSTERBO, O. N.: Queueing Delay Analysis of IEEE 802.11e EDCA. In: *Proceedings of Third Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS 2006)*. France, January 2006
- [ERW⁺03] EBNER, A. ; ROHLING, H. ; WISCHHOF, L. ; HALFMANN, R. ; LOTT, M.: Performance of UTRA TDD ad hoc and IEEE 802.11b in Vehicular Environments. In: *Proceedings of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '03 Spring)*, Jeju, Korea, April 22-25, 2003
- [ESKS06] EICHLER, S. ; SCHROTH, Ch. ; KOSCH, T. ; STRASSBERGER, M.: Strategies for Context-Adaptive Message Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM 2006)*, July 21, San Jose, U.S.A., 2006
- [ESR98] ESRI: ESRI Shapefile Technical Description - An ESRI White Paper / Environmental Systems Research Institute. 1998. – Forschungsbericht

- [ETS] ETSI: *European Telecommunications Standards Institute Website*. <http://www.etsi.org/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [EWGN00] EHMANN, D. ; WALLENTOWITZ, H. ; GELAU, Ch. ; NICKLISCH, F.: Zukünftige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. In: *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2000
- [FC05] FAZEL, M. ; CHIANG, M.: Network Utility Maximization With Non-concave Utilities Using Sum-of-Squares Method. In: *Proceedings of the IEEE Control and Decision Conference*, 2005
- [FHB01] FRANZ, W. ; HARTENSTEIN, H. ; BOCHOW, B.: Internet on the Road via Inter-Vehicle Communications. In: *Proceedings of the Workshop der Informatik 2001, Mobile Communications over Wireless LAN: Research and Applications, Gemeinsame Jahrestagung der GI und OCG*. Wien, Austria, September 2001, S. 577–584
- [FHV+03] FÜSSLER, H. ; HARTENSTEIN, H. ; VOLLMER, D. ; MAUVE, M. ; KÄSEMANN, M.: Location-Based Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *Mobile Computing and Communications Review (MC2R) 7* (2003), S. 47–49
- [FHW+04] FÜSSLER, H. ; HARTENSTEIN, H. ; WIDMER, J. ; MAUVE, M. ; EFFELSBERG, W.: Contention-Based Forwarding for Street Scenarios. In: *Proceedings of the 1st International Workshop in Intelligent Transportation (WIT 2004)*. Hamburg, Germany, March 2004, S. 155–160
- [Fle06] FLEETNET PROJECT: *The FleetNet Project Website*. <http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/>, 2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [FM02] FÜSSLER, H. ; MAUVE, M.: A Comparison of Routing Strategies for Vehicular Ad-Hoc Networks / Department of Computer Science, University of Mannheim. Mannheim, Germany, July 2002 (TR-02-003). – Technical Report
- [FTMT+05] FÜSSLER, H. ; TORRENT-MORENO, M. ; TRANSIER, M. ; FESTAG, A. ; HARTENSTEIN, H.: Thoughts on a Protocol Architecture for Vehicular Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2005)*. Hamburg, Germany, March 2005
- [Fuc04] FUCHS, F.: *A Modeling Technique for Context Information*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2004
- [FWK+03] FÜSSLER, H. ; WIDMER, J. ; KÄSEMANN, M. ; MAUVE, M. ; HARTENSTEIN, H.: Contention-Based Forwarding for Mobile Ad-Hoc Networks. In: *Elsevier's Ad Hoc Networks 1* (2003), November, Nr. 4, S. 351–369

- [GDG⁺02] GARG, P. ; DOSHI, R. ; GREENE, R. ; BAKER, M. ; MALEK, M. ; CHENG, X.: Using IEEE 802.11e MAC for QoS over Wireless / Computer Science Dept., Stanford University. 2002. – Forschungsbericht
- [GF97] GEHRING, O. ; FRITZ, H.: 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, 1997*
- [GGS04] GOLLE, Ph. ; GREENE, D. ; STADDON, J.: Detecting and Correcting Malicious Data in VANETs. In: *Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Vehicular ad hoc networks, Philadelphia, PA, USA, 2004*, S. Seiten 29–37
- [GIS] GIST: *The Minimalist Upper Ontology*. <http://www.gist-ont.com>,
- [GK00] GUPTA, P. ; KUMAR, P.R.: The Capacity of Wireless Networks. In: *IEEE Transactions on Information Theory* Vol. 46, NO. 2 (2000), S. Seiten 388–404
- [GNB01] GAO, X. ; NANDAGOPAL, T. ; BHARGHAVAN, V.: Achieving Application Level Fairness Through Utility-based Wireless Fair Scheduling. In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, 2001*
- [GPZ04] GU, T. ; PUNG, H. K. ; ZHANG, D. Q.: A Bayesian Approach for Dealing with Uncertain Contexts. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005)*, 2004. – ISBN 3–540–21835–1
- [Grü05] GRÜNDL, M.: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Regensburg, Germany, Universität Regensburg, Diss., 2005
- [Gre95] GREEN, P.: A Driver Interface for a Road Hazard Warning System: Development and Preliminary Evaluation. In: *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transportation Systems, 4, Seiten 1795–1800*, 1995
- [Gru] GRUBER, Th. R.: *A Translation Approach to Portable Ontology Specifications*. Knowledge Acquisition, 5(2):199–220, 1993
- [GSB04] *Kapitel* Position based Routing Algorithms for Ad Hoc Networks: A Taxonomy. In: GIORDANO, S. ; STOJMENOVIC, I. ; BLAZEVIC, L.: *Network Theory and Applications Series*. Bd. 14: *Ad Hoc Wireless Networking*. Ad Hoc Wireless Networking. Kluwer Academic Publishers, 2004, S. 103–136

- [GWF03] GERHARZ, M. ; WAAL, C. de ; FRANK, M.: A Practical View on Quality-of-Service Support in Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN)*, 2003, S. 185–196
- [HBJ03] HARDER, K. A. ; BLOOMFIELD, J. ; J. CHIHAK, B.: The Effectiveness of Auditory Side and Forward-Collision Warnings in Winter Driving Conditions, 2003-14 Final Report, MN/RC 2003-14 / Minnesota Department of Transportation. 2003. – Forschungsbericht
- [HD96] HUANG, C. ; DARWICHE, C.: Inference in belief networks: A procedural guide. In: *International Journal of Approximate Reasoning* vol. 15, no. 3 (1996), S. Seiten 225–263
- [HHMK00] HARTLEY, L. ; HORBERRY, T. ; MABBOTT, N. ; KRUEGER, G.: Review of fatigue detection and prediction technologies / National Road Transport Commission. 2000. – Forschungsbericht
- [HHN92] HECKERMAN, D. ; HORVITZ, E. ; NATHWANI, B.: Toward normative expert systems: Part I. The Pathfinder project. In: *Methods for Information in Medicine* 31:90–105 (1992)
- [HKBF05] HOCHSTATTER, I. ; KRAUSE, M. ; BERGER, M. ; FUCHS, F.: A Metamodel Approach to Context Information. In: *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, 2005
- [HKLR03] HEGERING, H.-G. ; KÜPPER, A. ; LINNHOF-POPIEN, C. ; REISER, H.: Management Challenges of Context-Aware Services in Ubiquitous Environments. In: *Self-Managing Distributed Systems; 14th IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management, DSOM 2003, Heidelberg, Germany, October 2003, Proceedings (LNCS 2867)*, pages 246-259, Springer, Heidelberg, Germany, 2003
- [HN92] HECKERMAN, D. ; NATHWANI, B.: Toward normative expert systems: Part II. Probability-based representations for efficient knowledge acquisition and inference. In: *Methods of Information in Medicine* 31:106–116 (1992)
- [HTF01] HASTIE, T. ; TIBSHIRANI, R. ; FRIEDMAN, J.: *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, 2001
- [Hub01] HUBER, W.: *Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen*, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, Diss., 2001
- [Hv02] HELSPER, E. M. ; VAN DER GAAG, L. C.: Building Bayesian Networks through Ontologies. In: *Proceedings of 15th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI*, 2002

- [Hv03] HELSPER, E. M. ; VAN DER GAAG, L. C.: Ontologies for Probabilistic Networks. Institute of information and computing sciences / Utrecht University. 2003. – Forschungsbericht
- [HWG93] HOEKSTRA, E. ; WILLIAMS, M. ; GREEN, P.: Development and Driver Understanding of Hazard Warning and Location Symbols for IVSAWA / University of Michigan, Transportation Research Institute. 1993. – Forschungsbericht
- [IEE99a] IEEE 802.11 WG: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications / IEEE. Version: August 1999. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>. 1999. – Forschungsbericht. – Last accessed: 10.04.2006
- [IEE99b] IEEE 802.11A WG: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band / IEEE. 1999. – Forschungsbericht
- [IEE04] IEEE 802.11P TGP: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Wireless Access in Vehicular Environments / IEEE. Version: September 2004. http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp_update.htm. 2004. – Forschungsbericht. – Last accessed: 10.04.2006
- [IEE05a] IEEE 802.11E WG: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), Draft Supplement to IEEE 802.11 Standard / IEEE. 2005. – Forschungsbericht
- [IEE05b] IEEE P1609.1: Standard for for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - WAVE Resource Manager, IEEE P1609.1/D12 / IEEE. 2005. – Forschungsbericht
- [IEE05c] IEEE P1609.2: Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages, IEEE P1609.2/D3 / IEEE. 2005. – Forschungsbericht
- [IEE05d] IEEE P1609.3: Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services, IEEE P1609.3/D18 / IEEE. 2005. – Forschungsbericht
- [IEE05e] IEEE P1609.4: Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Multi-Channel Operation, IEEE P1609.4/D07 / IEEE. 2005. – Forschungsbericht
- [IGE00] INTANAGONWIWAT, Ch. ; GOVINDAN, R. ; ESTRIN, D.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*. Boston, MA, USA, August 2000, S. 56–67

- [Int02] INTER VEHICLE HAZARD WARNING PROJEKTBSCHREIBUNG: *DEUFRAKO*, Web Site. http://www.deufrako.org/pdf/flyer_a.pdf, 2002
- [Inv96] INVEHICLE SAFETY ADVISORY AND WARNING SYSTEM (IVSAWS): *Volume II: Final Report*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-94-190, 1996
- [ISO] ISO TC 204: *Intelligent Transportation Systems*. <http://www.isotc204.com/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [IST04] IST CLUSTER OF THE 5TH FRAMEWORK PROGRAM OF THE EUROPEAN COMMISSION: *The CarTalk Project*. www.cartalk2000.net, 2001-2004. – last accessed: 02.02.2007
- [IV] INVENT VLA, Projektbeschreibung: *Bundesministerium für Bildung und Forschung*. <http://www.invent-online.de/downloads/VLHandout-D.pdf>, . – last accessed: 02.02.2007
- [Jen01] JENSEN, F. V.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, 2001
- [JM96] JOHNSON, D. B. ; MALTZ, D. A.: Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In: IMIELINSKI (Hrsg.) ; KORTH (Hrsg.): *Mobile Computing* Bd. 353. Boston, MA, USA : Kluwer Academic Publishers, 1996, S. 153–181
- [Kel97] KELLY, F.: Charging and rate control for elastic traffic. In: *European Transactions on Telecommunications, vol.8, no.1*, 1997, S. 33–37
- [KEzz04] KORKMAZ, G. ; EKICI, E. ; ÖZGÜNER, F. ; ÖZGÜNER, Ü.: Urban Multi-hop Broadcast Protocol for Inter-vehicle Communication Systems. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET '04)*. New York, NY, USA : ACM Press, 2004. – ISBN 1-58113-922-5, S. 76–85
- [Kim02] KIM, Y.-S.: *Effects of Driver, Vehicle, and Environment Characteristics on Collision Warning System Design*, Department of Science and Technology, Linköping Institute of Technology, Diplomarbeit, 2002
- [Kja90] KJAERULFF, U. B.: Graph triangulation - algorithms giving small total state space / University of Aalborg, Denmark. 1990. – Forschungsbericht
- [Kja95] KJAERULFF, U. B.: dHugin: A computational system for dynamic time-sliced Bayesian networks. In: *International Journal of Forecasting* 11 (1995), Seiten 89-111. citeseer.ist.psu.edu/kj95dhugin.html
- [KKK00] KEMPE, D. ; KLEINBERG, J. ; KUMAR, A.: Connectivity and Inference Problems for Temporal Networks. In: *Proceedings of the 32nd ACM Symposium on Theory of Computing (STOC), Portland (OR), USA, 2000*

- [KKN01] KENNETT, R. J. ; KORB, K. B. ; NICHOLSON, A. E.: Seabreeze Prediction Using Bayesian Networks: A Case Study. In: *Proceedings of the 5th Pacific-Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining - PAKDD 2001*, 2001
- [KKP+03] KORPIPÄÄ, P. ; KOSKINEN, M. ; PELTOLA, J. ; MÄKELÄ, S.-M. ; SEPPÄNEN, T.: Bayesian approach to sensor-based context awareness. In: *Personal Ubiquitous Computing 7* (2003), S. Seiten 113–124
- [KLPS07] KRAUSE, M. ; LINNHOF-POPIEN, C. ; STRASSBERGER, M.: Concurrent Inference of High Level Context Using Alternative Context Construction Trees. In: *To appear in Proceedings of 3rd International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS07)*, Athen, 2007, 07
- [KM98] KOPITZ, D. ; MARKS, B. ; 978-0890067444, ISBN: (Hrsg.): *RDS: The Radio Data System*. Artech House Publishers (November 1998), 1998
- [KM02] KEENEY, R. L. ; MEYER, R. F. ; RAIFFA, H. (Hrsg.): *Decisions with Multiple Objectives*. Cambridge University Press; New Ed edition, 2002
- [KM05] KJÆRULFA, U. B. ; MADSEN, A. L.: *Probabilistic Networks - An Introduction to Bayesian Networks and Influence Diagrams*. Aalborg University, 2005
- [KMT98] KELLY, F. P. ; MAULLOO, A. ; TAN, D.: Rate Control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. In: *Journal of Operations Research Society, Vol. 49, No. 3*, 1998, S. 237–252
- [KN03] KORB, K. B. ; NICHOLSON, A. E.: *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall/CRC, 2003
- [Kon01] KONSTANZ, Ch. ; 3-86522-021-5, ISBN: (Hrsg.): *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 2001
- [Kos04a] KOSCH, T.: Efficient Message Dissemination in Vehicle Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Nagoya, Japan, October 2004
- [Kos04b] KOSCH, T.: Local Danger Warning based on Vehicle Ad-hoc Networks: Prototype and Simulation. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*. Hamburg, Germany, March 2004
- [Kos05a] KOSCH, T.: Phase-Transition Phenomena with Respect to the Penetration Rate of DSRC Enabled Vehicles. In: *Proceedings of 12th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, San Francisco, USA, 2005

- [Kos05b] KOSCH, T.: *Situationsadaptive Kommunikation in Automobilen Ad-hoc Netzen*, Technische Universität München, Fakultät für Informatik, Diss., 2005
- [KP97] KOLLER, D. ; PFEFFER, A.: Object-oriented bayesian networks. In: *Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 1997, S. 302–313
- [Kra98] KRAUSS, S.: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Cologne, Germany, Mathematisches Institut, Universität zu Köln, Diss., April 1998. – 116 S.
- [Kra03] KRAY, Ch.: *Situated Interaction on Spatial Topics*, Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät I der Universität des Saarlandes, Diss., 2003
- [Kra06] KRAUSE, M.: *Kontextbereitstellung in offenen, ubiquitären Systemen*, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Diss., 2006
- [KS01] KOSCH, T. ; SCHWINGENSCHLÖGL, Ch.: Mobile Ad-Hoc Networking Test-bed for Vehicle-to-Vehicle Communication. In: *Proceedings of 5th International Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2001
- [KSA02] KOSCH, T. ; SCHWINGENSCHLÖGL, Ch. ; AI, L.: 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*. Singapore, September 2002
- [KSB02] KOSCH, T. ; SCHWINGENSCHLÖGL, Ch. ; BETTSTETTER, Ch.: Situative IP-basierte Fahrerinformationssysteme: Szenarien, Routing und prototypische Realisierung. In: *Proceedings of the VDE Kongress 2002 Networks*. Dresden, Germany, October 2002
- [KSE+06] KOSCH, T. ; STRASSBERGER, M. ; EICHLER, S. ; SCHROTH, Ch. ; ADLER, Ch.: The Scalability Problem of Vehicular Ad Hoc Networks and How to Solve it. In: *IEEE Wireless Communications* VOL. 13, NO. 5 (2006)
- [KV98a] KO, Y. ; VAIDYA, N.: Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-based Multicast Algorithms. In: *Proceedings of the second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, 1998, S. 101
- [KV98b] KO, Y. ; VAIDYA, N.: Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile computing and Networking (MobiCom '98)*. Dallas, United States, October 1998, S. 66–75

- [KV98c] KO, Y. ; VAIDYA, N.: Location-based Multicast in Mobile Ad Hoc Networks / Texas A & M University. College Station, TX, USA, March 1998. – TR98-018
- [KV00] KO, Y. ; VAIDYA, N.: GeoTORA: A protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Networking Protocols (ICNP)*, 2000, S. 240
- [LA02] LA, R. ; ANANTHARAM, V.: Utility-Based Rate Control in the Internet for Elastic Traffic. In: *IEEE/ACM Transactions On Networking*, 2002
- [LAS03] LINDGREN, A. ; ALMQUIST, A. ; SCHELEN, O.: Quality of Service Schemes for 802.11 Wireless LANs, An Evaluation. In: *Proceedings of Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2003
- [LB03] LI, B. ; BATTITI, R.: Performance Analysis of an Enhanced IEEE 802.11e Distributed Coordination Function Supporting Service Differentiation. In: *Proceedings of the International Workshop on Quality of Future Internet Services (QoFIS)*, 2003
- [LBD⁺01] LI, J. ; BLAKE, C. ; DE COUTO, D. ; LEE, H. I. ; MORRIS, R.: Capacity of Ad Hoc wireless networks. In: *Mobile Computing and Networking*, 2001, 61-69
- [LBDM04] LEBELTEL, O. ; BESSIÈRE, P. ; DIARD, J. ; MAZER, E.: Bayesian Robots Programming. In: *Autonomous Robots* 16:49–79 (2004)
- [LHH02] LI, L. ; HALPERN, J. ; HAAS, Z.: Gossip-based Ad Hoc Routing. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2002
- [LHT⁺03] LOCHERT, Ch. ; HARTENSTEIN, H. ; TIAN, J. ; FÜSSLER, H.r ; HERMANN, D. ; MAUVE, M.: A Routing Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003*. Columbus, OH, USA : IEEE, June 2003, S. 156–161
- [Lin98] LINSMEIER, K.-D.: *Sensorsysteme für das Auto*. Moderne Industrie (1998), Landsberg am Lech, 1998
- [LK01] LIM, H. ; KIM, C.: Flooding in Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the ACM MSWiM Workshop at MOBICOM* Bd. 24, 2001, S. 353–363
- [LMFH05a] LOCHERT, Ch. ; MAUVE, M. ; FÜSSLER, H. ; HARTENSTEIN, H.: On Utility-Fair Broadcast in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2005)*. Hamburg, Germany, March 2005
- [LMFH05b] LOCHERT, Ch. ; MAUVE, M. ; FÜSSLER, H. ; HARTENSTEIN, H.: Geographic Routing in City Scenarios. In: *Proceedings of the ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)* Bd. 9, 2005, S. 69–72

- [Loc03] LOCHERT, Ch.: *Ad-Hoc Routing für Kommunikation zwischen Fahrzeugen in Stadtszenarien*. Mannheim, Lehrstuhl für Praktische Informatik IV, Universität Mannheim, Diplomarbeit, March 2003
- [LS88] LAURITZEN, S.L. ; SPIEGELHALTER, D.J.: Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. In: *Journal of the Royal Statistical Society* 50 (1988), S. 157–224
- [MAF⁺98] MICHAEL, L.B. ; AKASH, N. ; FUJIMOTO, N. ; NAKAGAWA, M. ; TOKUDA, K. ; MIZUI, K.: DS/SS Inter-Vehicle Communication Experiments in 2.4 GHz ISM Band. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles (IV)*, 1998
- [Mag04] MAGIERA, P.: *Reputationssysteme in großen, hoch-mobilen Ad-hoc-Netzen*, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Informatik, Diplomarbeit, 2004
- [Mar02] MARWITZ, H.: *Innovationen im Nutzfahrzeug - der Weg zum Fail-Safe Truck*. DaimlerChrysler Innovation Symposium, <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-75472-49-77526-1-0-0-0-0-36-7165-0-0-0-0-0-0-0.html>, 2002. – last accessed: 04.09.2006
- [Mer06] MERKLE, Ch.: *Aggregation von Verkehrs- und Gefahreninformationen in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen*, Technische Universität München, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Diplomarbeit, 2006
- [MFE03] MAIHÖFER, C. ; FRANZ, W. ; EBERHARDT, R.: Stored Geocast. In: *Proceedings of the 13. Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS)*. Leipzig, Germany : Springer, February 2003 (Informatik Aktuell), S. 257–268
- [Mie06] MIETZNER, R.: *COMeSafety - EU Support Activity*. DG INFSO Workshop on V2X Communication Spectrum Requirements, Brussels, 2006
- [MJK⁺00] MORRIS, R. ; JANNOTTI, J. ; KAASHOEK, F. ; LI, J. ; COUTO, D. D.: CarNet: A Scalable Ad Hoc Wireless Network System. In: *Proceedings of the 9th Workshop on ACM SIGOPS European Workshop*. Kolding, Denmark, 2000, S. 61–65
- [MK96] MCLACHLAN, G. J. ; KRISHNAN, T.: *The EM Algorithm and Extensions*. Wiley, 1996
- [MMP⁺05] MATHEUS, K. ; MORICH, R. ; PAULUS, I. ; MENIG, C. ; LÜBKE, A. ; RECH, B. ; SPECKS, W.: Car2Car Communication - Market Introduction and Success Factors. In: *Proceedings of 5th European ITS Congress and Exhibition, Hannover*, 2005
- [MP02] MURPHEY, R. ; PARDALOS, P.M.: *Cooperative Control and Optimization (Applied Optimization)*. Springer, 2002

- [MTM06] M. TORRENT-MORENO, Ha. H. A. Festag F. A. Festag: System Design for Information Dissemination in VANETs. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Pages: 27 - 33, Hamburg, Germany, March, 2006
- [MTT00] MIYATAKE, H. ; T.TOMOKAZU ; TADAMITSU, I.: 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, 2000
- [Mur02] MURPHY, K. P.: *Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning*, University of California, Berkeley, Diss., 2002
- [Mv04] MCGUINNESS, D. L. ; VAN HARMELEN, F.: OWL Web Ontology Language Overview / World Wide Web Consortium. Version: February 2004. <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/>. 2004. – W3C Recommendation. – Last accessed: 10.04.2006
- [MWH01] MAUVE, M. ; WIDMER, J. ; HARTENSTEIN, H.: A Survey on Position-based Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In: *IEEE Network Magazine* 15 (2001), November, Nr. 6, S. 30–39
- [Naa98] NAAB, K.: ACC in Ballungsräumen. In: *Proceedings 7. Aachener Kolloquium für Fahrzeug und Motorenentwicklung*, 1998, S. Seiten 551–566
- [Naa04] NAAB, K.: Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit. In: *Proceedings Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme (FAS 04)*, 2004
- [Nea04] NEAPOLITAN, R. E.: *Learning Bayesian networks*. Prentice Hall, 2004
- [Neu94] *Kapitel Scale in Distributed Systems*. In: NEUMAN, B. C.: *Readings in Distributed Computing Systems*. Los Alamitos, CA : IEEE Computer Society, 1994, S. 463–489
- [NoW] NoW: *Network on Wheels Projekthomepage*. <http://www.network-on-wheels.de>, . – last accessed: 02.02.2007
- [NR98] NAAB, K. ; REICHART, G.: Grundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht. In: *Seminar „Fahrerassistenzsysteme“, Haus der Technik, Essen, 16./17.11.1998*, 1998
- [NRR+02] NEUMERKEL, D. ; RAMMELT, P. ; REICHARDT, D. ; STOLZMANN, W. ; VOGLER, A.: Fahrermodelle - Ein Schlüssel für unfallfreies Fahren? In: *KI* 16(3) (2002), S. Seiten 34–36
- [ODS07] OSTERMAIER, B. ; DÖTZER, F. ; STRASSBERGER, M.: Enhancing the Security of Local Danger Warnings in VANETs - A Simulative Analysis of Voting Schemes. In: *Proceedings of the Second International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2007)*, 10-13 April, Wien, Österreich, 2007

- [Ope] OPENCYC: *Project Web Site*. <http://www.opencyc.org>, . – last accessed: 12.01.2007
- [ORSN98] OHTOMO, M. ; RYOUJI, K. ; SHIGEKI, F. ; NOBORU, F.: Automatic Following System Utilizing Vehicle-to-Vehicle Communication. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles (IV)*, Stuttgart, 1998
- [Ost05] OSTERMAIER, B.: *Analysis and Improvement of Inter-Vehicle Communication Security by Simulation of Attacks*. Munich, Germany, Technische Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2005
- [PE03] POHL, J. ; EKMARK, J.: Development of a haptic intervention system for unintended lane departure. In: *Proceedings of 2003 SAE World Congress*, 2003
- [Pei02] PEIFROTH, J.: *Entwicklung und Implementierung eines Fahrzeug-Mobilitätsmodells zur Ad Hoc Netzwerk Simulation*, Technische Universität München, Munich, Germany, Diplomarbeit, 2002
- [Per97] PERKINS, C.: Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing. In: *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications (WMCSA)*. New Orleans, USA, February 1997, S. 90–100
- [PKTA05] POLYCHRONOPOULOS, A. ; KOUTSIMANIS, Ch. ; TSOGAS, M. ; AMDITIS, A.: Prediction of Unintentional Lane Departure Using Evidence Theory. In: *Proceedings of 8th International Conference on Information Fusion, Philadelphia, USA*, 2005
- [Pre05] PREVENT / WILLWARN PROJECT DELIVERABLE: *D22.53/I Protocols and Standards*. Project Internal, 2005
- [Pre06a] PREVENT / INTERSAFE PROJECT: *The PREVENT Intersafe Project Website*. http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/intersection_safety/intersafe/, 2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [Pre06b] PREVENT / WILLWARN PROJECT: *The PREVENT Willwarn Project Website*. http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/safe_speed_and_safe_following/willwarn/, 2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [Pre06c] PREVENT MAPS&ADAS PROJECT: *The PREVENT Willwarn Maps&ADAS Website*. http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/horizontal_activities/maps__adas/, 2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [Pre06d] PREVENT WILLWARN PROJECT DELIVERABLE: *D22.42 Position and relevance check*. unpublished, 2006

- [Pre07] PREVENT / WILLWARN PROJECT DELIVERABLE: *D22.53/II Protocols and Standards*. Project Internal, 2007
- [Pro06] PROHASKA, Th.: *Beurteilung von Analyseergebnissen*. Arbeitsunterlagen zur Vorlesung Chemisches Rechnen II, Universität für Bodenkultur, Wien, 2006
- [RAMC04] RANGANATHAN, A. ; AL-MUHTADI, J. ; CAMPBELL, R. H.: Reasoning about Uncertain Contexts in Pervasive Computing Environments. In: *IEEE Pervasive Computing* vol. 03 no. 2 (2004), S. Seiten 62–70
- [RB99] R. WAHRIG-BURFEIND: *Wahrig Fremdwörterlexikon*. Deutscher Taschenbuchverlag (dtv.), München, 1999
- [Rüd04] RÜDENAUER, J.: *Einsatz probabilistischer Verfahren zur Entscheidungsfindung im RoboCup*, Institut für Parallele und Verteilte Systeme, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2004
- [Rei06a] REISS, M.: *Fusion of Spatio-Temporal Information and Knowledge in Vehicles using Probabilistic Networks*. Passau, Germany, Universität Passau, Fakultät für Mathematik und Informatik, Diplomarbeit, February 2006
- [Rei06b] REISCHL, S.: *Evaluation der Systemgrenzen (Skalierbarkeit) von IEEE 802.11 WLAN für Applikationen der aktiven Sicherheit*, Fachhochschule Rosenheim, Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2006
- [RH06] RAYA, M. ; HUBAUX, J.-P.: Securing Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Journal of Computer Security* Special Issue on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (2006)
- [RN03] RUSSELL, S. ; NORVIG, P. ; 9780137903955, ISBN-13: (Hrsg.): *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 2003
- [RNT03] ROMDHANI, L. ; NI, Q. ; TURLETTI, T.: Adaptive EDCF: Enhanced Service Differentiation for IEEE 802.11 Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of IEEE WCNC'03 (Wireless Communications and Networking Conference)*. New Orleans, Louisiana, March 2003
- [Roba] ROBERT BOSCH AG: *Funktionsprinzip Regensensor*. http://rb-k.bosch.de/de/start/product_s_eb_b_2_1.html, . – last accessed: 09.01.2007
- [Robb] ROBERT BOSCH AG: *Predictive Safety Systems PSS*. http://rb-k.bosch.de/de/start/fb_prod_index_kt2g.html, . – last accessed: 08.01.2007
- [Rob02] ROBERT BOSCH AG: *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*. Bosch, Gelbe Reihe, Jahrgang 2002, 2002

- [RPH06] RAYA, M. ; PAPADIMITRATOS, P. ; HUBAUX, J.-P.: Securing Vehicular Communications. In: *IEEE Wireless Communications Magazine, Special Issue on Inter-Vehicular Communications* VOL. 13, NO. 5 (2006)
- [RSS06] REISS, M. ; SICK, B. ; STRASSBERGER, M.: Collaborative Situation-Awareness in Vehicles by Means of Spatio-Temporal Information Fusion With Probabilistic Networks. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Mountain Workshop on Adaptive and Learning Systems, Seiten 189-194*, 2006
- [RT99] ROYER, E. ; TOH, C.: A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks. In: *IEEE Personal Communications* 6 (1999), April, Nr. 2, S. 46–55
- [SA06] STRASSBERGER, M. ; ADLER, Ch.: Lokale Gefahrenwarnung in Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzen - Eine umfassende Analyse und aktuelle Lösungsansätze. In: *Proceedings of the 2. Tagung für Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching, Germany, April 2006
- [SAE06] STRASSBERGER, M. ; ADLER, C. ; EIGNER, R.: Situationsadaptive Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc-Netzen. In: *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation. Fachzeitschrift für den Einsatz von Informationssystemen*. 29 (2006), Nr. 1, S. 44–50
- [Saf] SAFESPOT: *Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety*. <http://www.safespot-eu.org/pages/page.php>, . - last accessed: 02.02.2007
- [Sam84] SAMET, H.: The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures. In: *ACM Computing Surveys* 16 (1984), June, Nr. 2, S. 187–260. <http://dx.doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/356924.356930>. - DOI <http://doi.acm.org/10.1145/356924.356930>. - ISSN 0360–0300
- [Sam90] SAMET, H.: *The design and analysis of spatial data structures*. Boston, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990. - ISBN 0–201–50255–0
- [Sch76] SCHULZ, W.: *Die Konstruktion von Realität in den Nachrichtenmedien*. Alber, Freiburg/München, 1976
- [Sch97] SCHMIDT, H.: *Was ist Genauigkeit? Zum Einfluss systematischer Abweichungen auf Mess- und Ausgleichsergebnisse*. Geodätisches Institut der RWTH Aachen, 1997
- [Sch05] SCHROTH, Ch.: *Simulating the Effects of Car-to-Car Communication on Road Traffic*. Munich, Germany, Technische Universität München, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Bachelor's Thesis, June 2005

- [Sch06] SCHROTH, Ch.: *An Altruistic Approach for Message Dissemination in Vehicular Ad hoc Networks*, Technische Universität München - Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Diplomarbeit, 2006
- [Sch07] SCHÖN, Th.: *Kooperative Vorhersage der Fahr situation auf der Basis probabilistischer Schließverfahren*, Universität Passau, Fakultät für Informatik, Diplomarbeit, 2007
- [SDK+05] SCHROTH, Ch. ; DOETZER, F. ; KOSCH, T. ; OSTERMAIER, B. ; STRASSBERGER, M.: Simulating the Traffic Effects of Vehicle-to-vehicle Messaging Systems. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on ITS Telecommunications*. Brest, France, June 2005
- [See06] SEEBERGER, D.: *COMeSafety Project Deliverable: D06 Standardization Overview*. unpublished, 2006
- [Sei05] *Kapitel Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. In: SEIFFERT, U.: *Fahrzeug-sicherheit*. 2005
- [SES03] SANTOS, R. A. ; EDWARDS, R. M. ; SEED, N. L.: Inter Vehicular Data Exchange Between Fast Moving Road Traffic Using an Ad-hoc Cluster-Based Location Routing Algorithm and 802.11b Direct Sequence Spread Spectrum Radio. In: *Proceedings of the PGNet 2003*, 2003
- [SES06] S. EICHLER, Ch. M. ; STRASSBERGER, M.: Data Aggregation System for Distributing Inter-Vehicle Warning Messages. In: *Proceedings of 31st Conference of Local Computer Networks (LCN 06), Tampa, USA*, 2006
- [SF96] SCHWICKERT, A. ; FISCHER, K.: Der Geschäftsprozess als formaler Prozess - Definition, Eigenschaften und Arten / Arbeitspapiere WI Nr 4/1996, Universität Mainz. 1996. – Forschungsbericht
- [SFL01] SUN, M.-T. ; FENG, W. ; LAI, T.-H.: Location Aided Broadcast in Wireless Ad hoc Networks. In: *Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2001*. San Antonio, Texas, November 2001, S. 2842–2846
- [SFTE06] SCHNAUFER, S. ; FÜSSLER, H. ; TRANSIER, M. ; EFFELSBERG, W.: Vehicular Ad Hoc Networks - Single Broadcast is not enough. In: *Proceedings of 3rd International Workshop on Intelligent Transportation Systems (WIT06)*. Hamburg, Germany, 2006, S. pp. 49–54
- [SG91] SPIRITES, P. ; GLYMOUR, C.: An algorithm for fast recovery of sparse causal graphs. In: *Social Science Computer Review* Vol. 9, No. 1 (1991), S. Seiten 62–72
- [SGM04] SUN, Q. ; GARCIA-MOLINA, H.: Using Ad-hoc Inter-vehicle Networks for Regional Alerts / Stanford University. 2004. – Forschungsbericht. – 10 S.

- [Sha48] SHANNON, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. In: *The Bell System Technical Journal* Vol. 27. (1948), S. pp. 379–423
- [SHM⁺04] SCHMITZ, R. ; HARTENSTEIN, H. ; MELIA, T. ; PEREZ-COSTA, X. ; EFFELSBURG, W.: Der Einfluss von Schwankungen der Übertragungsreichweite auf die Leistungsfähigkeit von Ad-Hoc Netzwerken. In: *Proceedings of the 18th DFN-Arbeitsstagung über Kommunikationsnetze, Seiten 77-86, Düsseldorf, 2004*
- [Sic06] SICK, B.: *Softcomputing, Vorlesungsskriptum 2005/2006, Institut für Informatik der Universität Passau*. 2006
- [SK02] SCHWINGENSCHLÖGL, Ch. ; KOSCH, T.: Enhancements of AODV for Vehicular Applications using Geocast. In: *Proceedings of the ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* Bd. 6. New York, NY, USA : ACM Press, July 2002, S. 96–97
- [SKGK04] STROHBACH, M. ; KORTUEM, G. ; GELLERSEN, H.-W. ; KRAY, Ch.: Using Cooperative Artefacts as a Basis for Activity Recognition. In: *Proceedings of 2nd European Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI 2004), Eindhoven, Niederlande, 2004*, S. pp.49–60
- [SL04] STRANG, Th. ; LINNHOF-POPIEN, C.: A Context Modeling Survey. In: *Proceedings of Workshop on Advanced Context Modelling, Reasoning and Management associated with the Sixth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004), Nottingham/England, 2004*
- [SL06] STRASSBERGER, M. ; LASOWSKI, R.: A New Approach for Obstacle Detection Based on Dynamic Vehicle Behaviour. In: *10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications*. Berlin, Germany, April 2006
- [SLR95] SAHAMI, M. ; LILLY, J. ; ROLLINS, B.: An Autonomous Mobile Robot Architecture Using Belief Networks and Neural Networks / Stanford University, Computer Science Department. 1995. – Forschungsbericht
- [Smi03] *Kapitel Ontology*. In: SMITH, Barry: *The Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information*. Blackwell Pub, 2003
- [Soc06] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: SAE J2735 - Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary / SAE. 2006. – Forschungsbericht
- [SPKR96] SWARTOUT, B. ; PATIL, R. ; KNIGHT, K. ; RUSS, T.: Toward Distributed Use of Large-Scale Ontologies. In: *Proceedings of 10th Workshop on Knowledge Acquisition*, 1996
- [SSEE06] SCHROTH, Ch. ; STRASSBERGER, M. ; EIGNER, R. ; EICHLER, S.: A Framework for Network Utility Maximization in VANETs. In: *Third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006) - Poster, September 29, Los Angeles, U.S.A., 2006*

- [SSR⁺04] SCHWARZ, R. ; SCHAUFELBERGER, W. ; RAYMANN, L. ; MERZ, H. ; ZAUGG, F. ; KLOTH, T. ; FARAGO, P.: Wirksamkeit und Nutzen von Verkehrsinformation / Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI). 2004 (SVI 2000/386). – Research Proposal
- [SSS07] SCHÖN, Th. ; SICK, B. ; STRASSBERGER, M.: Hazard Situation Prediction Using Spatially and Temporally Distributed Vehicle Sensor Information. In: *Proceedings of 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining*, 2007
- [Sta06a] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Unfallgeschehen im Strassenverkehr 2005*. <http://www.destatis.de>. <http://www.destatis.de/>. Version: 2006. – Last accessed: 21.02.2007
- [Sta06b] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehr, Verkehrsunfälle, Fachserie 8 / Reihe 7*. <http://www.destatis.de>. <http://www.destatis.de/>. Version: 2006. – Last accessed: 21.02.2007
- [Str03] STRANG, Th.: *Service-Interoperabilität in Ubiquitous Computing Umgebungen*, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Diss., 2003
- [sum] *SUMO: Suggested Upper Merged Ontology*. <http://www.ontologyportal.org>, . – last accessed: 21.02.2007
- [suo] *SUO: Standard Upper Ontology*. <http://suo.ieee.org>, . – last accessed: 06.11.2006
- [SY04] SCOTT, D. J. ; YASINSAC, A.: Dynamic Probabilistic Retransmission in Ad Hoc Networks. In: ARABNIA, Hamid R. (Hrsg.) ; YANG, Laurence T. (Hrsg.) ; YEH, Chi-Hsiang (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN 04)* Bd. 1. Las Vegas, Nevada : CSREA Press, June 2004. – ISBN 1-932415-38-6, S. 158–164
- [T-S] T-SYSTEMS TRAFFIC: *TMCpro*. <http://www.t-traffic.de>, . – last accessed: 10.01.2007
- [Tau07] TAUSCH, F.: *Dynamische Generierung und situationsadaptive Instantiierung von Bayesschen Netzen zur lokalen Gefahrenwarnung im automobilen Umfeld mit Techniken des Semantic Web*, Universität Passau, Fakultät für Informatik, Diplomarbeit, 2007
- [The] THE OREGON STATE WEB SITE: *Signal Preemption Systems*. http://www.oregon.gov/ODOT/HWY/TRAFFIC-ROADWAY/signal_preemption.shtml, . – last accessed: 08.01.2007
- [TL97] TANK, T. ; LINNARTZ, J.-P.: Vehicle-to-Vehicle Communications for AVCS Platooning. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 46(2) (1997), S. Seiten 528–536

- [TLL05] TRUONG, B. A. ; LEE, Y.-K. ; LEE, S.-Y.: Modeling Uncertainty in Context-Aware Computing. In: *Proceedings of 4th Annual ACIS International Conference on Computer and Information Science*, 2005
- [TMCSEH06] TORRENT-MORENO, M. ; CORROY, S. ; SCHMIDT-EISENLOHR, F. ; HARTENSTEIN, H.: IEEE 802.11-Based One-Hop Broadcast Communications: Understanding Transmission Success and Failure under Different Propagation Environments. In: *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, Seiten 68-77, Torremolinos, Spanien, 2006
- [TMJH04] TORRENT-MORENO, M. ; JIANG, D. ; HARTENSTEIN, H.: Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11- Based Vehicular Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the first ACM workshop on Vehicular Ad hoc Networks (VANET)*. Philadelphia, PA, USA, October 2004, S. 10–18
- [TMSEFH06] TORRENT-MORENO, M. ; SCHMIDT-EISENLOHR, F. ; FÜSSLER, H. ; HARTENSTEIN, H.: Effects of a Realistic Channel Model On Packet Forwarding in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings fo the IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, Las Vegas, USA, 2006
- [TMSH05] TORRENT-MORENO, M. ; SANTI, P. ; HARTENSTEIN, H.: Fair Sharing of Bandwidth in VANETs. In: *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET '05)*. Cologne, Germany : ACM Press, 2005. – ISBN 1-59593-141-4, S. 49–58
- [TNCS99] TSENG, Y.-C. ; NI, S.-Y. ; CHEN, Y.-S. ; SHEU, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. In: *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*. Seattle, USA : ACM Press, 1999. – ISSN 1022-0038, S. 151–162
- [TPAD04] THOMAS, M. ; PEYTCHEV, E. ; AL-DABASS, D.: Auto-Sensing and Distribution of Traffic Information in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the UK Simulation Society (UKSIM 2004)*. Oxford, UK, March 2004, S. 124–128
- [TPE] TPEG FORUM: *Web Site*. <http://www.tpeg.org/>, . – last accessed 08.01.2007
- [Unia] UNION EUROPÉENNE DE RADIO-TÉLÉVISION: *B/TPEG - Transport Protocol Experts Group*. http://www.ebu.ch/en/technical/projects/b_tpeg.php, . – last accessed 08.01.2007
- [Unib] UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA: *The Network Simulator - ns-2*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>, . – last accessed 06.02.2007

- [Unic] UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA: *Two-ray ground reflection model*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node217.html>, . – last accessed 06.02.2007
- [Veh06] VEHICLE SAFETY COMMUNICATIONS CONSORTIUM (VSC): *The Vehicle Safety Communications Consortium Website*. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-12/CAMP3/pages/VSCC.htm>, 2006. – Last accessed: 10.04.2006
- [VI] VOIP-INFO.DE: *Das deutschsprachige Voice over IP- Informationsportal*. <http://www.voip-info.de/>, . – last accessed: 08.01.2007
- [VII] VII: *Vehicle Infrastructure Integration, Web Site*. <http://www.its.dot.gov/vii/>, . – last accessed: 02.02.2007
- [Vol06] VOLZ, A.: *Modellierung von Kontextinformationen in ad-hoc Fahrzeugnetzen*, Technische Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2006
- [VV] VLA (VERKEHRSL EISTUNGSASSISTENZ) invent: *Kurzdarstellung des Teilprojektes Verkehrsleistungsassistentz VLA als ergänzende Information zur INVENT-Broschüre*. <http://www.invent-online.de/downloads/VLA-handout-D.pdf>, . – last accessed: 08.01.2007
- [WER⁺03] WISCHHOF, L. ; EBNER, A. ; ROHLING, H. ; LOTT, M. ; HALFMANN, R.: SOTIS - A Self-Organizing Traffic Information System. In: *Proceedings of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 03 Spring)*. Jeju, South Korea, April 2003
- [WER05] WISCHHOF, L. ; EBNER, A. ; ROHLING, H.: Information Dissemination in Self-organizing Intervehicle Networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6 (2005), March, Nr. 1, S. 90–101
- [WFGH04] WU, H. ; FUJIMOTO, R. ; GUENSLER, R. ; HUNTER, M.: MDDV: A Mobility-centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks. In: *Proceedings of the Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET '04)*. New York, NY, USA : ACM Press, 2004. – ISBN 1–58113–922–5, S. 47–56
- [WFR04] WU, H. ; FUJIMOTO, R. ; RILEY, G.: Analytical Models for Information Propagation in Vehicle-to-Vehicle Networks. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall)*, 2004
- [WHO02] WHO ; ORGANISATION, WHO World H. (Hrsg.): *World report on road traffic injury prevention*. WHO - World Health Organisation, 2002. – <http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2000/PDFs/PetrucciPHRAP.pdf>

- [Wika] WIKIPEDIA: *Digital Audio Broadcasting*. http://de.wikipedia.org/wiki/Digital_Audio_Broadcasting, . – last accessed: 08.01.2007
- [Wikb] WIKIPEDIA: *Floating Car Data*. http://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Car_Data, . – last accessed: 10.01.2007
- [Wike] WIKIPEDIA: *Hidden Node Problem*. http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_terminal_problem, . – last accessed: 23.01.2007
- [Wikd] WIKIPEDIA: *Ramp meter*. http://en.wikipedia.org/wiki/Ramp_meter, . – last accessed: 08.01.2007
- [Wike] WIKIPEDIA: *Traffic Message Channel*. http://de.wikipedia.org/wiki/Traffic_Message_Channel, . – last accessed: 08.01.2007
- [Wikf] WIKIPEDIA: *Vorrangwarteschlange*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Vorrangwarteschlange>, . – last accessed: 23.01.2007
- [Wil67] WILFERT, K.: Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personewagen. In: *IATZ* (1967), S. 48–53
- [Wit02] WITTIG, F.: *Maschinelles Lernen Bayes'scher Netze für benutzeradaptive Systeme*, Universität des Saarlandes, Diss., Dezember 2002
- [WR05] WISCHHOF, L. ; ROHLING, H.: Congestion Control in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety 2005*. Shaanxi, China, October 2005, S. 58–63
- [XHSv02] XU, Q. ; HEDRICK, K. ; SENGUPTA, R. ; VAN DER WERF, J.: Effects of Vehicle-Vehicle Roadside-Vehicle Communication on Adaptive Cruise Controlled Highways. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Vancouver (BC), Kanada, 2002*
- [XJ99] XIANG, Y. ; JENSEN, F. V.: Inference in Multiply Sectioned Bayesian Networks with Extended Shafer-Shenoy and Lazy Propagation. In: *Proceedings of the 15th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-99)*, 1999
- [XSJ03] XU, Q. ; SENGUPTA, R. ; JIANG, D.: Design and Analysis of Highway Safety Communication Protocol in 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication Spectrum. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring)* Bd. 4, 2003, S. 2451– 2455
- [Zad65] ZADEH, L.: *Fuzzy Sets*. 8(3):33-8-353, 1965
- [ZC03] ZHU, H. ; CHLAMTAC, I.: An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCF Differential Services. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2003

- [ZJL02] ZHANG, Y. ; JI, Q. ; LOONEY, C. G.: Active Information Fusion For Decision Making Under Uncertainty. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion*, 2002

Index

- Abbiege-Assistenz, 24
- Abhängigkeitstabelle, 139
- Ad hoc on demand distance vector routing, 111
- Adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication, 121
- Adaptive Drivetrain Management, 28
- Adaptive Headlamp Aiming, 26
- Adaptive Verkehrsbeeinflussung, 27
- Agora-C Consortium, 44
- AIFS, 238
- Aktiv, 94
- Altruismus, 176
- American Society for Testing and Materials, 94
- Antiblockiersystem, 12
- Anwendungsdurchdringung, 188, 192
- Anwendungsnutzen, 176
- AODV, 111
- Approaching Emergency Vehicle, 23
- Aquaplaning, 83, 149
- Arbitration Interframe Space, 107, 238
- Aspekt, 18, 83
- ATSM, 94
- Auffahr-Warnung, 24
- Ausrollprozess, 140
- Ausstattungsrate, 96
- Auto-sensing and distribution of traffic information in vehicular ad hoc networks, 122
- Automatic Cruise Control, 13
- Automatisierung
 - teilweise, 11
 - voll, 11
- Autonome Fahrzeugverfolgung, 25
- Autonomous Gossiping, 120

- Baustellen-Warnung, 28
- Bayes-Formel, 137
- Bayesian Belief Network, 136
- Bayesian Network, 136
- Bayessche Netze, 136
- Beaconing, 112
- Beeinflusst-Zustand-Beziehung, 62
- Belief Network, 136
- Beobachtung, 17, 18
- Beobachtungsvarianz, 162
- Besitzt-Beziehung, 62
- Bewegungskorrelation, 62
- Bidirectional perimeter-based propagation protocol, 120
- BiPP, 120
- Blind Spot Warning, 24
- Bremsassistentz, 13
- Broadcast, 116
- Broadcast Storm, 109, 116

- C2C-CC, 93
- CALM, 93
- Capabilities, 70
- Car-to-Car Communication Consortium, 93
- CarNet/Grid, 112
- CarTalk 2000, 94

- Causal Networks, 136
- CBF, 112
- CBLR, 111
- Cicas-V, 94
- Cluster-based location routing, 111
- Cluster-Head, 111
- Clustertabelle, 111
- CMM, 79
- COMeSafety, 94
- Conditional Probability Table, 139
- Contention Based Forwarding, 112
- Contention Window, 105
- Continous Communications for Vehicles, 93
- Cooperative Adaptive Cruise Control, 24
- Cooperative Collision Warning, 24
- Cooperative Forward Collision Warning, 24
- Cooperative Glare Reduction, 26
- Cooperative Systems for Intelligent Road Safety, 94
- Cooperative Traffic Information, 26
- Cooperative Vehicle-Highway Automation System, 25
- Cooperative Vehicle-Infrastructure System, 94
- COOPERS, 94
- CPT, 139
- CVIS, 94

- D-Separation, 147
- DCF, 105
- Decentralized Floating Car Data, 26
- Dedicated Short Range Communication, 93
- Degree-of-belief, 137
- Dempster-Shafer-Netze, 256
- Deus-Sicht, 59
- Diagnostische Unterstützung, 139
- Dienstankündigungen, 105
- Differential GPS, 29
- DIFS, 105
- Digital Audio Broadcast, 14
- Direct Diffusion, 122
- Directional broadcast, 118
- Dissemination Area, 121

- Distributed Coordination Function, 105
- Distributed Coordination Function Interframe Space, 105
- Drive-through Payment, 29
- DSRC, 93
- Dynamic Source Routing, 111
- Dynamische Bayessche Netze, 140
- Dynamische Stabilitätskontrolle, 12

- EDCF, 107, 238
- Effektive Distanz, 194
- Einfädel-Warnung, 24
- Elektronisches Stabilitätsprogramm, 12
- Emergency Electronic Brake Lights, 25
- Enhanced Distributed Coordination Function, 107, 238
- Enhanced Route Guidance and Navigation, 26
- Erweiterte Adaptive Navigation, 26
- ETSI, 93
- European Telecommunications Standards Institute, 93
- Extended Floating Car Data - XFCD, 16

- Fahraufgabenbezogene Systeme, 10
- Fahrdynamikregelung, 11
- Fahrerassistenzsysteme, 10
- Fahrssituation, 20
- Fahrweise, 36
- Fahrzeug-Ego, 31
- Fahrzeugübergreifende Nachrichtendifferenzierung, 186
- Fahrzeugdiagnosesysteme, 10
- Fahrzeugkonfiguration, 35
 - abhängig, 36
 - unabhängig, 36
- Fahrzeugkontext, 195
- Fahrzeugkontextmodell, 81
- fahrzeugzentrische Nachrichtendifferenzierung, 186
- Fermi Funktion, 208
- FleetNet, 94
- Floating Car Data, 15
- Fluten, 116
- Free-Flow Tolling, 29
- Frequenz-Sprungschema, 105

- Frequenzvergabe, 95
- Geisterfahrer-Warnung, 23
- Genauigkeit, 83
- Geo-Broadcast, 122
- Geocast, 111
- GeoHorizont, 88
- GeoObjekte, 90
- Gewichtungsfaktoren, 189
- GIST, 78
- GPRC, 112
- GPS Correction, 29
- GPSR, 112
- Grad der Fahrerunterstützung, 12
- Grad des Dafürhaltens, 83
- Grad des Eingetretenseins, 67
- Greedy Perimeter Coordinator Routing, 112
- Greedy Perimeter Stateless Routing, 112
- Heuristik, 190
- Highway Merge Assistant, 24
- IEEE
- 1609.1, 94
 - 1609.2, 94
 - 802.11, 105
 - 802.11a, 105
 - 802.11e, 105
 - 802.11p, 105
- In-Vehicle Signage, 28
- Individualsicht, 59
- information connector, 213
- Information-Centric Forwarding, 213
- Informationsklassen, 31
- Informationskontext, 196
- Instant Messaging, 29
- Intelligent Traffic Flow Control, 27
- Inter-vehicle Hazard Warning, 94
- interface queue, 198
- internal contention, 107
- Intersection Collision Warning, 24
- Invent VLA, 94
- Ist-Teil-Von-Beziehung, 62
- IVHW, 94
- Kanalzugriffsverfahren, 104
- Kausale Konsolidierung, 164
- Kausalitätsketten, 83
- Kommunikationsart, 125
- Konsortien, 93
- Kontext, 17
- höherwertig, 18
 - niederwertig, 18
- Kontext-MetaModell, 79
- Kontextbaum, 63
- Kontextinformationen
- aggregiert, 19
 - primär, 19
 - Rohsensorinformationen, 19
- Kontextsensitives System, 21
- Kontrollkanal, 105
- kooperative Adaptive Geschwindigkeitsregelung, 24
- Kooperative Blendreduzierung, 26
- Kooperative Kollisionswarnung, 24
- Kooperative Lichtregulierung, 26
- Kooperative Motorsteuerung, 28
- Kooperative Verkehrsinformationen, 26
- Kooperativen Kreuzungsassistenz, 24
- Lane Change Warning, 24
- LBB, 119
- LBM, 119
- Left Turn Assistance, 24
- Lichtsignalanlagen, 27
- Linksabbiege-Assistenz, 24
- Local Danger Warning, 22
- Location Based Multicast, 119
- Location-aided Broadcast, 118
- Logistische Funktion, 208
- Lokale Gefahrenwarnung, 22
- Markteinführung, 95
- Matching, 85
- MDDV, 120
- Message dissemination among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication, 121
- Minimalist Upper Ontology, 78
- Mobiles Bezahlen, 29
- Mobility-centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks, 120

- Motormanagementsysteme, 10
- Multi Attribute Utility Theory, 159
- Multicast Group, 120
- Multicast Region, 120
- Multiply Sectioned Bayesian Network, 141

- Nachrichtenaustausch, 29
- Nachrichtendifferenzierung
 - fahrzeugübergreifend, 201
 - fahrzeugzentrisch, 188
- Nachrichtenkontext, 195
- Nachrichtenredundanz, 188, 191
- Nachrichtenrelevanz, 190
- Nachrichtenwarteschlange, 198
- Network Simulator 2, 129
- Network Utility Maximization, 178
- Network-on-Wheels, 94
- Notbrems-Warnung, 25
- NoW, 94
- NUM, 178
- Nutzenoptimierung, 175
- Nutzens, 187

- Object Oriented Bayesian Networks, 141
- Objekt-Orientierte Bayessche Netze, 141
- Objektivität, 35
- Oct-Trees, 90
- ODAM, 121
- Ontology Web Language, 79
- OpenCyc-Projekt, 78
- Opfer-Phänomen, 37
- Optimized dissemination of alarm messages in vehicular ad hoc networks, 121
- Overlay-Bayesnetz, 168
- OWL, 79

- Packet-Centric Forwarding, 213
- Park Distance Control, 10
 - PDC, 10
- Penetrationsrate, 96
- Perimeter Token, 121
- Persistency Factor, 106
- Phasenübergangsphänomen, 96
- Physical Store and Forward, 50
- Platooning, 25

- Point of Interest Notification, 28
- Positionsbasierte Fahrerinformation, 28
- Positionsverfeinerung, 29
- Post-Crash Warning, 23
- Prädiktionsparadoxon, 37
- PREVENT - Intersafe, 94
- PREVENT - Willwarn, 94
- Priority Queue, 200
- Probabilistic Networks, 136
- Prometheus, 94
- Propagation von Evidenzen, 139

- Quad-Trees, 90
- QuadTrees, 87

- Ramp Metering, 27
- RDF, 79
- Relevanz, 187
- Relevanzgebiet, 121
- Resource Description Framework, 79
- Right of Way Violation Warning, 25
- Road Feature Notification, 22
- Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks, 119
- Routing-Protokolle
 - on-demand, 110
 - positionsbasiert, 111
 - proaktiv, 110
 - reaktiv, 110
 - tabellenzentrisch, 110
- Routing-Verfahren, 109

- SAE, 94
- Safespot, 94
- Satz von Bayes, 137
- Scheduler, 216
- Schnelle Aktivierungsfunktion, 208
- Segment-oriented data abstraction and dissemination, 123
- Sekundären Kontextinformationen, 19
- Selbstorganisation, 177
- Selbstorganisierendes Verkehrsinformationssystem, 26
- Self-Organizing Traffic Information System, 26
- Self-organizing Traffic Information System, 122

-
- semantische Entropie, 183
 - Send Buffer, 198
 - Service Announcements, 105
 - Sichtweitenwarnung, 22
 - Signal Preemption, 27
 - Situation, 17
 - Situationsdynamik, 34
 - chaotisch, 35
 - statisch, 35
 - stetisch, 35
 - Skalierbarkeit, 52
 - Slot Time, 105
 - Society of Automotive Engineers, 94
 - SODAD, 123
 - Sondersignalfahrzeug-Annäherung, 23
 - Sondersignalfahrzeug-Vorrang, 27
 - Sondersituationen, 21
 - SOTIS, 26, 122
 - Spurwechsel-Warnung, 24
 - Standard Upper Ontology, 78
 - Standardisierungsgremien, 93
 - Starkregen, 143
 - Stop Sign Violation Warning, 25
 - Stored Geocast, 120
 - Straßencharakteristikmeldung, 22
 - Straßenzustandswarnung, 22
 - Suggested Upper Merged Ontology, 78
 - SUMO, 78
 - SUO, 78
 - Sybil Attacks, 57

 - Target Area, 121
 - Technical Committee 204 - Intelligent Transportation Systems, 93
 - Technical Committee 278 - Road Transport and Traffic Telematics, 93
 - Todwinkel-Warnung, 24
 - Total One-hop Capacity, 103
 - Totale Wahrscheinlichkeit, 137
 - Traffic Message Channel, 14
 - Traffic Signal Violation Warning, 24
 - Turn Assistance, 24
 - Two Ray Ground Model, 129, 220

 - Übertragungsrelevanz, 188, 190
 - Übertragungsschicht, 104

 - UBPFCC, 123
 - UMB, 118
 - Unfall-Warnung, 23
 - Urban Multi-hop Broadcast Protocol, 118
 - Utility-based packet forwarding and congestion control, 123
 - Utility-fair broadcast in vehicular ad hoc networks, 124

 - Varianz, 161
 - Varianzkonsolidierung, 162
 - VCM, 81
 - Vehicle Context Model, 81
 - Vehicle Dynamics Control, 11
 - Vehicle Infrastrukture Integration, 94
 - Vehicle Safety Communications Consortium, 93
 - Vehicle-Based Road Condition Warning, 22
 - Vehicle-to-vehicle location-based broadcast, 119
 - Verbindungscharakteristik, 188, 193
 - Verbreitungscharakteristik, 188, 193
 - Verkehrszeichen-Assistenz, 28
 - VII, 94
 - Visibility Enhancer, 22
 - Vorrangwarteschlange, 200
 - VSC, 93

 - Wahrscheinlichkeitsgebirge, 163
 - Warnsysteme, 11
 - Warnung vor Rotlicht überschreitung, 24
 - Warnung vor Stoppschild überschreitung, 25
 - Warnung vor Vorfahrtsmissachtung, 25
 - WAVE, 105
 - Wechselwirkungen, 164
 - Wettbewerbsfenster, 105
 - Wireless Access in Vehicular Environments, 105
 - Work Zone Warning, 28
 - Wrong Way Driver Warning, 23

 - Zeitrespektierende Kantenstaffel, 100
 - Zeitrespektierender Weg, 100
 - Zone of Relevance, 121

Index

Zustand, 18
Zuverlässigkeit, 83

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockier System
ACC	Active Cruise Control
AIFS	Arbitration Interframe Space
AODV	Ad hoc on demand distance vector routing
AoI	Area of Interest
ATSM	American Society for Testing and Materials
BiPP	Bidirectional perimeter-based propagation protocol
C2C-CC	Car-to-Car Communication Consortium
CALM	Continous Communications for Vehicles
CBF	Contention Based Forwarding
CBLR	Cluster-based location routing
CMM	Context Meta Model
COOPERS	Cooperative Systems for Intelligent Road Safety
CPT	Conditional Probability Table
CVIS	Cooperative Vehicle-Infrastructure System
CW	Contention Window
DAB	Digital Audio Broadcast
DBN	Dynamic Bayesian Network
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Coordination Function Interframe Space
DSC	Dynamische Stabilitätscontrol
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDCF	Enhanced Distributed Coordination Function
EDCF	Enhanced Floating Car Data
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCD	Floating Car Data

Abkürzungsverzeichnis

FIFO	First in first out
GPRC	Greedy Perimeter Coordinator Routing
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IVHW	Inter-vehicle Hazard Warning
KEBN	Engineering with Bayesian Networks
LBB	Vehicle-to-vehicle location-based broadcast
LBM	Location-based Multicast
MDDV	Mobility-centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks
NoW	Network on Wheels
NUM	Network Utility Maximization
ODAM	Optimized dissemination of alarm messages in vehicular ad hoc networks
OOBN	Object-oriented Bayesian Network
OWL	Ontology Web Language
PDC	Park Distance Control
PF	Persistency Factor
PoI	Point of Interest
RDF	Resource Description Framework
RDS	Radio Data System
SAE	Society of Automotive Engineers
SODAD	Segment-oriented data abstraction and dissemination
SOTIS	Self-organizing Traffic Information System
SUMO	Suggested Upper Merged Ontology
SUO	Standard Upper Ontology
TMC	Traffic Message Channel
TPEG	Transport Protocol Experts Group
UBPFCC	Utility-based packet forwarding and congestion control
UMB	Urban Multi-hop Broadcast Protocol
VCM	Vehicle Context Model
VII	Vehicle Infrastructure Integration
VLA	Verkehrsleistungs-Assistenz
VSC	Vehicle Safety Communication
Wave	Wireless Access in Vehicular Environments
XFCD	eXtended Floating Car Data

Lebenslauf

Zur Person	Name: Markus Straßberger, geb. Dunst Geburtsdatum: 11.10.1977 Geburtsort: München Anschrift: Landsberger Str. 349 80687 München Familienstand: Verheiratet, 1 Kind	
Schule	1988 – 1992 Gymnasium Kirchheim, Kirchheim b. München 1992 – 1997 Karl-Ritter-von-Frisch-Gymnasium, Moosburg Abschluss mit allgemeiner Hochschulreife	
Zivildienst	1997 – 1998 Rettungssanitäter beim Malteser Hilfsdienst, Freising	
Studium	1998 – 2004 Studium der Informatik an der TU – München mit Nebenfach Psychologie. Abschluss als Dipl.-Inf. Univ. 04/2004 – 03/2007 Promotionsstipendium bei der BMW Forschung und Technik GmbH, ZT-4 IT-Drive, zum Thema „Kontextbereitstellung in automobilen Ad-hoc Netzen“.	
Berufserfahrung	Seit 04/2007 Spezialist Entwicklung bei der BMW Forschung und Technik GmbH Seit 06/2007 Leiter der Architekturarbeitsgruppe des Car-to-Car Communication Consortiums	
Lehre	SS 2002 Tutor zur Vorlesung "Einführung in die Informatik IV" am Lehrstuhl von Prof. Mayr SS 2006 Summer School Media Informatics - Future Telematics Services based on Car-to-Car Communication	
Praktika	07/2000 – 08/2002 Werksstudent bei akm-software Beratung und Entwicklung GmbH, Unterhaching 09/2001 u. 09/2002 Teilnahme an der Ferienakademie der TUM / FAU	
Soziales Engagement	1998 – 2000 Neben-/Ehrenamtlicher Rettungssanitäter beim Malteser Hilfsdienst Seit 02/2002 Gründungsmitglied und aktiv im "Verein zur Förderung von sozialem und ehrenamtlichem Engagement am Gymnasium Moosburg"	
Stipendien	06/2001 – 05/2007 Stipendiat bei e-fellows.net	

Veröffentlichungen und Vorträge (I)

Journals / Magazine

Situationsadaptive Verbreitung von Kontextinformationen in automobilen Ad-hoc-Netzen

Markus Strassberger, Christian Adler, Robert Eigner
Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation (PIK), vol. 29 (1/06), Seiten 43-49,
München, Saur Verlag, März, 2006.

The Scalability Problem of Vehicular Ad Hoc Networks and How to Solve it

Timo Kosch, Markus Strassberger, Stephan Eichler, Christoph Schroth, and Christian Adler
In IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 13, NO. 5, October 2006

Harnessing Mobile Networks for Driver Assistance

Timo Kosch, Markus Strassberger
In IEEE Pervasive Computing, October-December 2006 (Vol. 5, No. 4), ISSN 1536-1268

Konferenz- Beiträge

Enhancing the Security of Local Danger Warnings in VANETs - A Simulative Analysis of Voting Schemes

Benedikt Ostermaier, Florian Dötzer, Markus Strassberger
The Third International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2007),
April 10-13 2007, Vienna, Austria

Concurrent Inference of High Level Context Using Alternative Context Construction Trees

Michael Krause, Claudia Linnhoff-Popien, Markus Strassberger
The Third International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2007)
June 19-25, 2007 - Athens, Greece

Results from the WILLWARN Project

Andreas Hiller, Arno Hinsberger, Markus Strassberger
6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services,
Aalborg, Denmark

Hazard Situation Prediction Using Spatially and Temporally Distributed Vehicle Sensor Information

Thomas Schön, Bernhard Sick, Markus Strassberger
IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining, April 1-5 2007, Hawaii, USA

A Framework for Network Utility Maximization in VANETs

Christoph Schroth, Markus Strassberger, Robert Eigner, Stephan Eichler
The Third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2006) - Poster,
September 29 2006, Los Angeles, U.S.A.

Data Aggregation System for Distributing Inter-Vehicle Warning Messages

Stephan Eichler, Christian Merkle, Markus Strassberger
The 31st IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN) - Poster, 14-16 November 2006,
Tampa, U.S.A.

Putting Together The Pieces - A Comprehensive View On Cooperative Local Danger Warning

Christian Adler, Markus Strassberger
In Proceedings the 13th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and
Services (ITS'06), October 8-12 2006, London, UK

Strategies for adaptive information diffusion in vehicular ad-hoc networks

Christian Adler, Stephan Eichler, Timo Kosch, Christoph Schroth, Markus Strassberger
Proceedings of the Fifth IASTED International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'06),
5 - 8 September 2006, Valencia Spain

Context-Adaptive Information Dissemination in VANETS - Maximizing the Global Benefit

Christian Adler, Robert Eigner, Christoph Schroth, and Markus Strassberger
In Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Communication Systems And
Networks (CSN 2006), August 28-30 2006,
Palma de Mallorca, Spain

Collaborative Situation-Awareness in Vehicles by Means of Spatio-Temporal Information Fusion With Probabilistic Networks

Maximilian Reiss, Bernhard Sick, Markus Strassberger,
In Proceedings of the 2006 IEEE Mountain Workshop on Adaptive and Learning Systems,
pp. 189-194, July 24-26, 2006, Logan, U.S.A.

Veröffentlichungen und Vorträge (II)

Konferenzen (Fortsetzung)

MEDUSA — Framework for Secure Peer-to-Peer Sharing of Topic-Map based Knowledge

Martin Adamski, Bernd Brügge, Patrick Renner, Markus Strassberger
In Proceedings of the IASTED International Conference on Knowledge Sharing and Collaborative Engineering (KSCE 2004), ACTA Press, St. Thomas, US Virgin Islands, November, 2004

Lokale Gefahrenwarnung in Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzen – Eine umfassende Analyse und aktuelle Lösungsansätze

Markus Strassberger, Christian Adler
In Proceedings of 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Seiten 267-276, Garching, Germany, April, 2006.

A New Approach For Obstacle Detection Based On Dynamic Vehicle Behaviour

Markus Strassberger, Robert Lasowski
In Proceedings of the 10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, April, 2006.

Classification for traffic related inter-vehicle messaging

Florian Dötzer, Markus Strassberger, Timo Kosch
In Proceedings of the 5th International Conference on ITS Telecommunications, Brest, France, Juni, 2005.

Simulating the traffic effects of vehicle-to-vehicle messaging systems

Christoph Schroth, Timo Kosch, Markus Strassberger, Benedikt Ostermaier, Florian Dötzer
In Proceedings of the 5th International Conference on ITS Telecommunications, Brest, France, Juni, 2005.

Secure Communication for Intersection Assistance

Florian Dötzer, Florian Kohlmayer, Timo Kosch, Markus Strassberger
In Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2005), Hamburg, Germany, März, 2005.

Vorträge

The role of new wireless technologies in automotive telematics and active safety

8th Symposium Mobile Communication in Transport, November 2004, Sophia-Antipolis, France

Kooperative Fahrerassistenz - Den Horizont erweitern.

ProMotion 2006, FIZ Forum, München