

**Mobilfunksysteme für die
europäische Verkehrsleittechnik**
- Leistungsanalyse des CEN-DSRC-Standards -

Christian Martin Wietfeld

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke

Wietfeld, Christian Martin:

Mobilfunksysteme für die europäische Verkehrsleittechnik

- Leistungsanalyse des CEN-DSRC-Standards -

1. Auflage Aachen:

Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997

(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 12)

ISBN 3-86073-621-3

© 1997 Christian Martin Wietfeld

Verlag der Augustinus Buchhandlung

Pontstraße 66/68

52062 Aachen

Druck: Druckerei Paletti, Aachen

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

"D 82 (Diss. RWTH Aachen)"

KURZFASSUNG

Die Europäische Union strebt die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer durch Datenerfassungs-, Informations- und Leitsysteme an, um die bestehende Verkehrsinfrastruktur effizienter zu nutzen. Neben zellularen Mobilfunksystemen werden neuartige Systeme zur Fahrzeug-Baken-Kommunikation entwickelt, die über ihre Funkchnittstelle Anforderungen verschiedener Anwendungen der Verkehrsleittechnik unterstützen, wie den Austausch lokal relevanter Informationen zwischen Fahrzeugen und der straßenseitigen Infrastruktur in Kombination mit einer exakten Positionsbestimmung der Fahrzeuge zur elektronischen Gebührenerfassung. Voraussetzung für die europaweite Einführung von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen sind einheitliche Protokolle und Schnittstellen. Zum Nachweis der Erfüllung der geforderten Dienstgüte der Kommunikation (max. Fehlerrate 10^{-6} für die elektronische Gebührenerhebung) ist die Entwicklung neuer, über Labor- und Feldtests hinausgehender Leistungsbewertungsmethoden notwendig.

Der Autor stellt in dieser Arbeit seine Beiträge zur Entwicklung, Anwendung und Leistungsbewertung der unter seiner aktiven Mitwirkung entstandenen europäischen Standards für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation (den sog. DSRC¹-Standards) vor, die auf einem von ihm entwickelten, stochastischen Simulationskonzept zur integrierten DSRC-Systembewertung in einer realitätsnah modellierten Umgebung beruhen. Unter Nutzung formal spezifizierter und auf Standardkonformität geprüfter DSRC Kommunikationsprotokolle, validierter mikroskopischer Fahrzeugmobilitätsmodelle, die insbesondere das relevante Verhalten im Nahbereich exakt nachbilden, und der verkehrssituationsspezifischen Nachbildung der Eigenschaften des Funkübertragungskanal bei 5.8 GHz kann eine statistisch abgesicherte Analyse der Kapazität und Zuverlässigkeit einer DSRC-Systemkonfiguration schon vor der tatsächlichen Installation vorgenommen werden.

Ein Vergleich von Vielfachzugriffsverfahren (SDMA vs. TDMA) zeigt, daß bei der hier vorgeschlagenen optimalen Parametrisierung des Kanalzugriffsprotokolls der bei TDMA-Systemen auftretende Einfluß von Vielfachzugriffsinterferenzen minimiert werden kann, so daß eine vergleichbare Zuverlässigkeit der Kommunikation gewährleistet werden kann. Unter besonderer Berücksichtigung der Eigenschaften des Verkehrsflusses werden Empfehlungen für die Auswahl von Antennentypen und -konfigurationen sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung diskutiert. Ein Vergleich des europäischen DSRC-Ansatzes mit einem U.S.-amerikanischen, synchronen Protokollvorschlag zeigt die deutlich bessere Effizienz des DSRC-Protokolls. In dieser Arbeit entwickelte analytische Modelle zur Bewertung der Kanalzugriffsprotokolle unter Berücksichtigung der Kanalqualität bestätigen die Simulationsergebnisse.

¹Dedicated Short-Range Communications

ABSTRACT

Mobile Communication Systems for European Road Traffic & Transport Telematics - Performance Analysis of the CEN-DSRC-Standard -

The European Union intends to link transport users via data collection, information and route guidance systems in order to make use of the existing traffic infrastructure in a more efficient way. In addition to cellular mobile communication systems, innovative systems for vehicle-roadside communications have been developed, which are able to support the requirements of various road transport and traffic telematics applications, such as the exchange of locally relevant information between vehicles and the roadside infrastructure in combination with an exact localisation of vehicles for automatic fee collection. A prerequisite for a pan-european introduction of vehicle-roadside communication systems are common protocols and interfaces. To prove the required reliability of the communication (max. error rate of 10^{-6} for electronic fee collection), the development of new performance evaluation techniques in addition to laboratory and field tests is necessary.

The author presents in this thesis his contributions to the development, application and performance evaluation of the European standards for vehicle-roadside communications (the so-called DSRC¹ standards). The contributions are based on a stochastic simulation concept developed by the author specifically for the integrated DSRC system evaluation in a realistically modelled environment. Using formally specified and conformance-tested DSRC communication protocols, validated microscopic road traffic models, which especially take into account the behaviour for close distances, and the traffic-situation specific modelling of the transmission channel at 5.8 GHz enables a statistically proven analysis of the capacity and reliability of a DSRC system configuration before the actual system installation.

A comparison of different multiple access techniques (SDMA vs. TDMA) shows, that with the proposed optimized parameterization of the medium access control protocol the influence of multiple access interference in TDMA systems can be minimised, so that a comparable reliability of the communication can be achieved. Taking into account the characteristics of the traffic flow, recommendations for the selection of antenna types and configurations as well as measures to optimize the radio coverage are discussed. A comparison of the European DSRC approach with an U.S.-American, synchronous protocol proposal reveals a significantly better efficiency of the DSRC protocol. Analytical models developed in this thesis for the analysis of medium access control protocols taking into account the channel quality confirm the simulation results.

¹Dedicated Short-Range Communications

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Einsatz von Mobilfunksystemen für die Verkehrsleittechnik	5
2.1	Einführung	5
2.2	Anwendung von drahtloser Kommunikation in der Verkehrsleittechnik	6
2.3	Anforderungen an die Funkschnittstelle	11
2.4	Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Systemen	13
2.4.1	Ziele der Leistungsbewertung	13
2.4.2	Methoden zur quantitativen Leistungsbewertung	14
3	Technische Grundlagen und Rahmenbedingungen	17
3.1	Architektur eines Fahrzeug-Baken-Systems	17
3.1.1	Aufbau einer Bake (Road-Side Equipment RSE)	17
3.1.2	Aufbau einer mobilen Station (On-Board Unit OBU)	18
3.2	Anforderungen an die Funktechnik	19
3.2.1	Frequenzzuweisung	19
3.2.2	Multiplexing und Vielfachzugriff	21
3.2.3	Transpondertechnologie	25
3.2.4	Lokalisierungsfunktion	25
3.2.5	Typische <i>multi-lane</i> Systeminstallationen	26
3.3	Mikroskopische Eigenschaften der Fahrzeugmobilität	28
3.3.1	Definitionen und Grundlagen	29
3.3.2	Geschwindigkeitsverteilung	32
3.3.3	Verteilung der Zwischenankunftszeiten (Bruttoabstände)	32
3.3.4	Abstandsverteilung im Nahbereich (Nettoabstände)	34
3.3.5	Aufeinanderfolgen von Fahrzeugtypen im Fahrzeugverbund	34
3.4	Kommunikationsprotokolle	36
3.4.1	Das ISO/OSI-Referenzmodell	36
3.4.2	Kanalzugriffsverfahren in Lokalen Netzen	37
4	Eigenschaften des Funkkanals von Fahrzeug-Baken-Systemen	43
4.1	Grundlagen zur deterministischen Systembetrachtung	43
4.1.1	Zeitvarianz des Übertragungskanals	43
4.1.2	Deterministisches Kanalmodell	44
4.2	Modellierung der Antenneneigenschaften	46
4.2.1	Antennenentwurf für Shaped-Beam-Antennen	46
4.2.2	Antennenentwurf für Pencil bzw. Spot Beams	54
4.2.3	OBU-Antenneneigenschaften	56
4.3	Der Ausbreitungsraum	56
4.3.1	Freiraumausbreitung	56

4.3.2	Dämpfungseinflüsse	56
4.3.3	Bestimmung der funktechnischen Eigenschaften der makro- skopischen Systemumgebung durch Strahlverfolgungsverfahren	58
4.4	Sender-/Empfängereigenschaften	65
4.4.1	Modulation-/Demodulation	65
4.4.2	Fertigungstoleranzen	67
4.4.3	Nachbarkanalstörungen und Berücksichtigung aktiver Interferer	67
4.5	Deterministische Systembetrachtung für ausgewählte Szenarien	67
4.5.1	Die Position und Ausrichtung der Baken-Antenne	68
4.5.2	Reflexionen und Abschattung in der makroskopischen System- umgebung	69
4.5.3	Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung	74
4.6	Bewertung der Ausbreitungsmodellierung durch Vergleich mit Meß- daten	78
4.7	Zusammenfassung der vorgestellten Methoden	78
5	Der entwickelte Protokollstapel und seine Benutzung	81
5.1	DSRC Kommunikationsarchitektur	81
5.1.1	Die DSRC-3-Schichten Architektur - eine Übersicht	81
5.1.2	Rahmenstruktur	82
5.1.3	Kommunikationsprofile und das schichtenübergreifende Ma- nagement	83
5.2	DSRC Bitübertragungsschicht	84
5.2.1	Mikrowelle bei 5,8 GHz	84
5.2.2	Infrarot bei 850 nm	85
5.3	DSRC Kanalzugriffsprotokoll (MAC-Teilschicht)	85
5.3.1	Auswahl der Kommunikationsadressen	86
5.3.2	Das MAC Steuerungsfeld (MAC Control Field)	87
5.3.3	Transparenz des Datenstroms	88
5.3.4	Kanalzugriffsverfahren und Reservierungsmechanismen	89
5.3.5	Adaptive Kollisionsauflösungsverfahren	91
5.4	DSRC Datensicherungsprotokolle (LLC)	92
5.5	DSRC Anwendungsschicht	93
5.5.1	Basis-Dienste	93
5.5.2	Realisierung der Anmeldephase	94
5.6	Implementierung und Konformitätsprüfung	96
5.6.1	Implementierung der DSRC-Protokolle in SDL (Specification & Description Language)	97
5.6.2	Spezifikation und Durchführung von Konformitätsprüfungen gemäß ISO 9646	98
5.7	Benutzung der DSRC-Protokolle durch RTTT-Anwendungen	100
5.7.1	Elektronische Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren (AFC)	100
5.7.2	Reise- und Verkehrsinformationen	101
5.8	Realisierungsvorschläge für DSRC-Protokollimplementierungen	101
5.8.1	Dialog-orientierte Anwendung	101

5.8.2	Broadcast-orientierte Anwendung	105
5.8.3	Kombinierte Anwendungen	106
6	Modellierung des Kommunikationsprozesses mit homogenen Markov-Ketten	107
6.1	Grundlagen zu Markov-Ketten	107
6.2	Gegenstand der Modellierung	109
6.3	Modellierung der Anmeldephase für spezielle Verkehrssituationen	111
6.3.1	Das Grundmodell für bis zu 2 Fahrzeuge	111
6.3.2	Ein zustandsreduziertes Modell für $w=R$	115
6.3.3	Ergebnisse für das Grundmodell	115
6.4	Einfluß der Kanalqualität	118
6.4.1	Variation des Bitfehlerverhältnisses im Uplink	118
6.4.2	Differenzierte Betrachtung von Übertragungsfehlern im Downlink	118
6.5	Zustandsoptimierte Modellierung des vollständigen Kommunikationsprozesses	120
6.5.1	Wahl eines geeigneten Zeittaktes	120
6.5.2	Erweitertes Modell für bis zu drei Fahrzeuge	122
6.5.3	Ergebnisse für die Betrachtung des vollständigen Kommunikationsprozesses	124
6.5.4	Fehlerdiskussion	125
6.6	Berücksichtigung der Fahrzeugmobilität	126
6.6.1	Einfluß der Verkehrsstärke	126
6.6.2	Einfluß einer kombinierten broadcast-orientierten Anwendung	128
6.6.3	Zusammenfassung	129
7	Mikroskopische Fahrzeugmobilitätsmodelle: Entwurf und Validierung	131
7.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen	131
7.2	Ein Modell für die Fahrzeugmobilität	131
7.2.1	Fahrzeug- und Fahrereigenschaften	132
7.2.2	Berechnung des Risikoniveaus	132
7.2.3	Entscheidungsregeln für das Fahrzeugverhalten	134
7.3	Fahrzeuggenerierungsprozesse	136
7.3.1	Generierung der Zwischenankunftszeiten nach Pearson Typ 3 - Verteilungsfunktionen	137
7.3.2	Modellierung durch Mischprozesse	139
7.3.3	Bewertung und Validierung der Generatoren	141
8	Integriertes stochastisches Simulationsmodell zur DSRC-Systemanalyse	145
8.1	Anforderungen	146
8.1.1	Bewertungsziele und zu ermittelnde Leistungskenngrößen	146
8.1.2	Realisierungsaspekte	148

8.2	Simulationskonzept	151
8.3	Dynamisches Kanalmodell	153
8.3.1	Die Raumzonenmatrix	153
8.3.2	Integration der Ergebnisse der Funkfeldprädiktion	154
8.3.3	Bestimmung von Paketfehlern	156
8.4	Implementierungsaspekte	157
8.4.1	Objekt-orientierte Realisierung	157
8.4.2	Graphische Benutzeroberfläche	157
9	Simulative Leistungsbewertung	159
9.1	Analyse von Komponenten und Konfigurationen von DSRC-Systemen	159
9.1.1	Vergleich verschiedener Parametrisierungen des DSRC- Kanalzugriffsverfahrens	159
9.1.2	Vielfachzugriffstechniken	162
9.1.3	Gegenseitige Beeinflussung bei paralleler Unterstützung mehrerer Anwendungen	165
9.1.4	Dynamische Anpassung der Protokollparameter unter Berücksichtigung des Kanalzustands	166
9.1.5	Antennenkonfigurationen und Übertragungstechnik	170
9.2	Untersuchung eines US-amerikanischen Alternativvorschlages	172
9.2.1	Rahmenstruktur <i>Open-Road Frame</i>	172
9.2.2	Vergleich mit dem asynchronen DSRC-Protokoll	173
9.2.3	Realisierung eines synchronen Protokollablaufs auf der Basis des DSRC- Konzepts	176
9.3	Untersuchung des Einsatzes adaptiver Antennen	177
10	Zusammenfassung und Ausblick	181
A	Abkürzungsverzeichnis	185
B	Übersicht: DSRC-Standardisierung	188
C	Objekt-orientierte Implementierung	191
C.1	Das Klassenkonzept des Systemsimulators SIMCO3++ DSRC	192
C.2	Das Klassenkonzept des Ausbreitungsmodellierungswerkzeugs AS-SECSim	194
D	Validierung der Fahrzeuggeneratoren anhand von Meßdaten	196
E	Vergleich zwischen Simulation und analytischer Modellierung	199
F	AFC-Datentypen und Funktionen	200
	Quellenverzeichnis	201
	Danksagung	209

Einleitung

Die stetig steigende Belastung durch den innereuropäischen Güter- und Personenverkehr erfordert eine effizientere Ausnutzung der bestehenden Infrastruktur. Um dies zu ermöglichen, strebt die Europäische Union eine umfassende Vernetzung der Verkehrsteilnehmer durch Verkehrsdatenerfassungs-, Verkehrsinformations- und Verkehrsleitsysteme an ('Verkehrstelematik' oder *Road Traffic & Transport Telematics RTTT*). Die Anwendungen der Verkehrstelematik reichen von der dynamischen Routenführung über die Warnung von Fahrzeugen über gefährliche Straßenzustände bis hin zur elektronischen Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren.

Die Fahrzeug-Baken-Kommunikation stellt eine Funkschnittstelle zur Verfügung, die die Anforderungen verschiedener Anwendungen der Verkehrsleittechnik in idealer Weise unterstützt: die zuverlässige Datenkommunikation zum Austausch lokal relevanter Informationen zwischen den mobilen Verkehrsteilnehmern und der straßenseitigen Infrastruktur kann durch den lokal begrenzten Kommunikationsbereich mit einer exakten Positionsbestimmung der Fahrzeuge kombiniert werden.

In der hier vorgestellten Arbeit werden die Entwicklung, die Anwendung und die Leistungsbewertung des unter aktiver Mitwirkung des Autors entstandenen europäischen Standards für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation (*Dedicated Short-Range Communications DSRC*) beschrieben [73, 74, 54]. Dabei wird insbesondere die Umsetzung und Anwendung eines vom Autor neu entwickelten, stochastischen Simulationskonzeptes zur integrierten DSRC-Systembewertung in einer realitätsnah modellierten Umgebung vorgestellt.

Unter Berücksichtigung

- der formal spezifizierten und auf Standardkonformität geprüften DSRC Kommunikationsprotokolle,
- validierter mikroskopischer Fahrzeugmobilitätsmodelle, die insbesondere das relevante Verhalten im Nahbereich exakt nachbilden und
- der verkehrssituationsspezifischen Eigenschaften des Funkübertragungskanal

kann eine statistisch abgesicherte Analyse der Kapazität und Zuverlässigkeit einer DSRC-Systemkonfiguration schon vor der tatsächlichen Installation vorgenommen werden. Unter Einsatz der entwickelten simulativen Methoden wurden verschiedenste Systemeigenschaften quantitativ analysiert und Empfehlungen für die Systementwicklung und Standardisierung abgeleitet bzw. bestätigt (z.B. Verfahren zur Realisierung des Vielfachzugriffs, Einfluß der Eigenschaften des Verkehrsflusses, Auswahl von Antennentypen und -konfigurationen, Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung, Interferenz zwischen verschiedenen parallel abzuwickelnden Anwendungen, usw.). Die ebenfalls vorgestellten, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, analytischen Modelle zur Bewertung der Kanalzugriffsprotokolle unter

Berücksichtigung eines vereinfachten Kanalmodells ergänzen die Parameterauswahl und ermöglichen eine Validierung der Systemsimulation.

Über die Beiträge zur Systemspezifikation und europäischen Standardisierung hinaus, leisten die vorgestellten Methoden durch die differenzierte Nachbildung der systemspezifischen Eigenschaften einen Beitrag zur Unterstützung der vergleichenden Systemauswahl durch zukünftige Betreiber.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: in einer Einführung wird zunächst auf den **Einsatz von Mobilfunksystemen in der Verkehrsleittechnik** eingegangen, wobei neben einem Überblick über die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten für drahtlose Übertragungssysteme speziell auf die Notwendigkeit für zuverlässige Bewertungsmethoden zur anwendungsspezifischen Auswahl der geeigneten Funkchnittstelle eingegangen wird.

Danach werden die besonderen **Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Entwicklung einer einheitlichen Funkchnittstelle für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation** beleuchtet: neben den funktechnischen Voraussetzungen (z.B. Frequenzzuweisung) wird eingegangen auf die Anforderung seitens der Charakteristik der mikroskopischen Fahrzeugmobilität (speziell die für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation wichtige Verteilung der Zwischenankunftszeiten und der damit verbundenen Eigenschaften der Bildung von Fahrzeugverbänden) und der Grundlagen der Protokollmechanismen in den verwandten Lokalen Netzen.

Daran anschließend werden die Ergebnisse einer detaillierten, **deterministischen Analyse der Eigenschaften des DSRC-Übertragungskanals** anhand von speziell entwickelten Ausbreitungsmodellen für die Funkübertragung bei 5.8 GHz vorgestellt. Besonderer Wert wird dabei auf die Modellierung der Antenneneigenschaften für Phased Arrays ('Shaped Beam' und 'Pencil Beam') sowie die Analyse des Einflusses von Fahrzeugformen und der Systemumgebung gelegt. Weiterhin werden Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung diskutiert.

Das anschließende Kapitel stellt die, unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Systemrandbedingungen, entwickelte **3-Schichten DSRC-Kommunikationsarchitektur** für standardisierte Fahrzeug-Baken-Systeme vor. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Betrachtung der speziell für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation entwickelten Kanalzugriffssteuerungsschicht sowie die unter besonderer Berücksichtigung der Anforderung der Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren entwickelte Anwendungsschicht. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte formale Spezifikation der DSRC-Kommunikationsarchitektur und die eigens entwickelten DSRC-Konformitätsprüfungen werden ebenfalls in diesem Kapitel erläutert. Weiterhin werden die Nutzung der DSRC-Kommunikationsprotokolle durch Anwendungen der Verkehrsleittechnik anhand von Referenzimplementierungen vorgestellt und typische Systemparameter als Grundlage für die nachfolgende Systembewertung festgelegt. Die sich anschließende **analytische Modellierung typischer Eigenschaften der DSRC Protokolle** erfolgt im Hinblick auf einen Vergleich verschiedener Implementierungsvarianten der Anmeldephase von Fahrzeugen sowie der Einflüsse der Kanaleigenschaften auf die Parameterauswahl für die Kanalzugriffsprotokolle.

Im siebten Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und mit Meß-

daten von deutschen und holländischen Autobahnen validierten **mikroskopischen Modelle für die Fahrzeugmobilität** vorgestellt.

Das neue Konzept für eine detaillierte **integrierte Systemanalyse** unter Anwendung simulativer Techniken wird im darauf folgenden Kapitel vorgestellt, wobei hier insbesondere die Methode der dynamischen Nutzung der Ergebnisse der deterministischen Ausbreitungsmodellierung für die stochastische Systemsimulation einen Schwerpunkt bildet.

Im neunten Kapitel werden schließlich charakteristische **Ergebnisse der Analyse** unterschiedlichster DSRC- Systemkonfigurationen vorgestellt. Neben der Analyse des Einflusses verschiedener äußerer Systemfaktoren (umgebende Reflektoren, Eigenschaften des Verkehrsflusses) werden Ergebnisse zur Analyse eines vom Autor entwickelten Systemvorschlags zur Unterstützung mehrerer, unterschiedlich priorisierter Anwendungen durch eine Bake sowie zur Untersuchung der Wirksamkeit adaptiver Kanalzugriffsalgorithmen bei der vorliegenden stark veränderlichen Kanalqualität vorgestellt. Über den Rahmen des DSRC-Standards hinaus werden Ergebnisse für die Analyse eines US-amerikanischen synchronen Protokollvorschlags sowie einer Studie zur möglichen Nutzung von dynamisch nachführenden Antennen auf der Basis der DSRC-Protokolle vorgestellt.

Im letzten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

Der Anhang enthält ein Abkürzungsverzeichnis, eine Übersicht über die im DSRC-Umfeld relevanten Forschungsprojekte und Standardisierungsgremien, eine Darstellung der objekt-orientierten Implementierung der vorgestellten Methoden, einen direkten Vergleich von Analyse- mit Simulationsergebnissen sowie die Resultate einer Validierung der Fahrzeugmobilitätsmodelle.

Einsatz von Mobilfunksystemen für die Verkehrsleittechnik

2.1 Einführung

Die stetig wachsende Verkehrsdichte auf Europas Straßen ist ein zentrales Problem moderner Verkehrspolitik. Investitionen in den Straßenbau können mit dem steigenden Bedarf schon lange nicht mehr schritthalten. Anhand der Entwicklung von Verkehrsbelastung und Netzlänge der Autobahnen in Deutschland (siehe Abb. 2.1, [23]) wird deutlich, daß seit Mitte der achtziger Jahre die Verkehrsbelastung bei fast gleichbleibender Netzlänge deutlich angestiegen ist. Der volkswirtschaftliche Schaden durch Verzögerungen und Störungen des Verkehrsablaufs wird auf mehr als 100 Mrd. DM pro Jahr geschätzt (bezogen auf die Europäische Union).

Ein vielversprechender Lösungsansatz zur Verminderung der ökonomischen und ökologischen Schäden liegt in der effizienteren Nutzung der bestehenden Infrastruktur unter Einsatz von intelligenten Verkehrsleitsystemen [28]. Die dafür notwendige Vernetzung der verschiedenen am Verkehr beteiligten technischen Systeme (Datenerfassung, Kommunikations- und Leittechnik) wird auch unter dem Begriff 'Verkehrstelematik' zusammengefaßt¹. Neben der Effizienzsteigerung ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit eine wichtige Motivation für die Einführung der Telematik in den Straßenverkehr.

¹Telematik ist ein Kunstwort aus *Telekommunikation* und *Informatik*

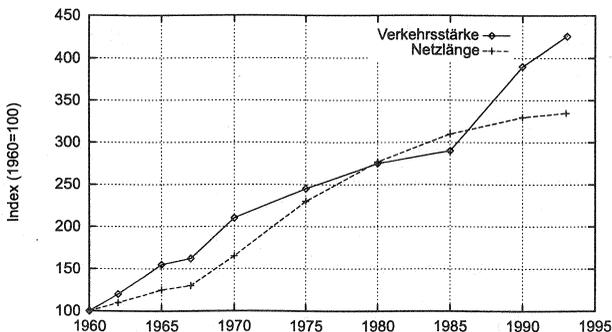


Abbildung 2.1: Entwicklung von Netzlänge und Verkehrsstärke (Autobahnen in der alten Bundesrepublik)

Im europäischen Rahmen wird darauf hingearbeitet, ein funktionsfähiges, den Anforderungen entsprechendes System für den Straßenverkehr zu entwickeln (*Road Transport & Traffic Telematics*) [50]. Dabei ist eine stufenweise Einführung bzw. Nutzung von Kommunikationstechnologien vorgesehen [103]:

1. Aufbau einer Infrastruktur zur Verkehrsdatenerfassung
2. Verteilung von Verkehrsinformationsdaten über Rundfunk (RDS-TMC Radio Data System - Traffic Message Channel)
3. Nutzung von Mobilfunksystemen in Kombination mit Satellitennavigationstechnik für bestimmte Anwendergruppen
4. Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur, die speziell die Anwendungen der Verkehrsleittechnik durch direkte Kommunikation zwischen infrastruktureitigen Baken und fahrzeugseitigen Kommunikationseinrichtungen (On-Board Unit OBU) unterstützt: Fahrzeug-Baken-Systeme mit entsprechender Anbindung an Verkehrsleitzentralen, siehe Abb. 2.2.

Bei der Realisierung dieser Pläne spielen entsprechende nationale und europäische Forschungs- und Standardisierungsprojekte eine wesentliche Rolle, da durch sie die Basis für eine breite Einführung im europäischen Rahmen geschaffen werden können (siehe Anhang B). Auch in den U.S.A. sowie in Japan wird intensiv an der Realisierung von vergleichbaren Verkehrsmanagementsystemen gearbeitet (ITS - Integrated Transport Systems/U.S.A.; UTMS - Universal Traffic Management System/Japan).

Im folgenden werden die Anwendungen der Verkehrsleittechnik und die daraus abzuleitenden Anforderungen an die Kommunikationstechnik diskutiert. Weiterhin wird der Einsatz von Funksystemen in der Verkehrsleittechnik im Überblick dargestellt (Rundfunk, Mobilfunk (Zellular- und Datenfunk), Fahrzeug-Bake). Abschließend wird diskutiert, welche Rolle Leistungsbewertungsmethoden für die zum Einsatz kommende Mobilfunktechnik (hier speziell die Fahrzeug-Baken-Kommunikation) bei der Entwicklung, Standardisierung und Implementierung von Verkehrsleitsystemen spielen.

2.2 Anwendung von drahtloser Kommunikation in der Verkehrsleittechnik

Bereits in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts wurden aufgrund des stark ansteigenden Verkehrsaufkommens insbesondere auf Kreuzungen in Großstädten elektro-mechanische Signalanlagen eingesetzt, um den Verkehr zu regeln und so die Effizienz zu erhöhen [75]. Schon bei diesen Vorläufern der modernen Verkehrsleittechnik kamen Methoden der Verkehrsdatenerfassung zum Einsatz: durch in der Fahrbahn eingelassene Bodenschwellen, die als Kontaktgeber fungierten und über aus der Fernmeldetechnik entlehene Konstruktionselemente zur Verkehrszählung eingesetzt wurden, konnten die Signalanlagen entsprechend des Verkehrsaufkommens beeinflusst werden. Am Trafalgar Square/London, der zur damaligen Zeit als der verkehrsreichste Platz der Welt galt, wurde durch den Einsatz einer dynamisch geregelten Signalanlage gegenüber einer manuellen Steuerung durch Verkehrspolizi-

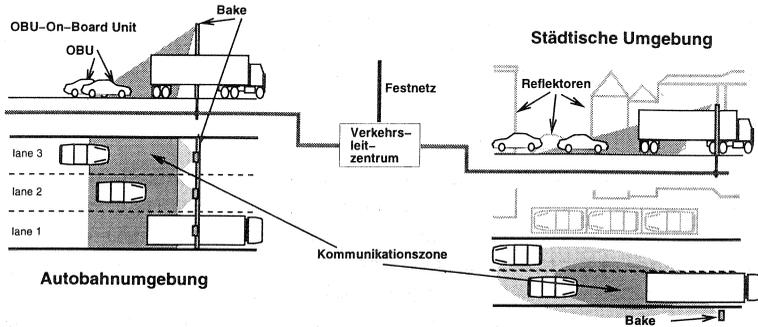


Abbildung 2.2: Fahrzeug-Baken-Kommunikation

sten eine Durchsatzsteigerung um 10 % zur Hauptverkehrszeit erreicht. Das durch diese Anlagen begründete Prinzip der Kombination der Verkehrsdatenerfassung mit einer kollektiven, d.h. an alle Verkehrsteilnehmer in gleicher Weise gerichteten Steuerung durch Signalanlagen oder Wechselverkehrszeichen hat bis heute breiten Einzug in den Straßenverkehr gehalten.

Bei der Einführung von drahtlosen Übertragungstechniken zur Kommunikation zwischen infrastrukturseitigen Verkehrsleitsystemen und fahrzeugseitigen Geräten, die dem Fahrer aufbereitete Informationen zur Verfügung stellen, lassen sich verschiedene Entwicklungslinien identifizieren [102]:

Einsatz des Rundfunks Die Anfänge der Unterstützung der Verkehrsleittechnik durch den Rundfunk liegen in den siebziger Jahren: das 1974 eingeführte ARI-System ermöglichte durch entsprechende Kennfrequenzen eine verbesserte Nutzung des Verkehrsfunks (Autofahrer Rundfunk Information) und ermöglichte eine individuelle Selektion der Information durch den Autofahrer. Die übermittelten Informationen waren jedoch noch von sehr beschränktem Umfang und nicht dynamisch veränderlich. Durch die seit 1985 betriebene Einführung des auf europäischer Ebene standardisierten RDS -TMC (Radio Data System - Traffic Message Channel) können weitaus differenziertere und aktuelle Informationen an die Autofahrer weitergegeben werden (über 2000 unterschiedliche Meldungen sowie 64000 Ortscodes pro Land). In den kommenden Jahren wird die Einführung des digitalen Rundfunks DAB (Digital Audio Broadcasting) erweiterte Möglichkeiten zur Übermittlung von Verkehrsinformationen an die Verkehrsteilnehmer bieten.

Autonome Zielführungssysteme Parallel zu den Entwicklungen im Rundfunkbereich wurden seit 1980 autonome Zielführungssysteme, deren Routenempfehlungen auf im Fahrzeug gespeicherten Navigations- und Zielführungsinformationen beruhen, erprobt (EVA Elektronischer Verkehrslotse für Autofahrer). Ausgehend von einer manuell eingegebenen Ortsreferenz wurde der Weg des Fahrzeugs anhand entsprechend aufwendiger Sensortechnik (Geschwindigkeitsmessung, Kompaß, etc.) nachvollzogen und mit den Fahrzeugdaten abgeglichen. Durch den Einsatz von digi-

talen Straßenkarten auf CD-ROM (die eine regelmäßige Aktualisierung ermöglichen) und die Kombination mit Satellitennavigationssystemen (die die Positionsbestimmung erleichtern) finden diese Systeme zunehmende Verbreitung. Die Kombination mit dem RDS-TMC System ermöglicht die Integration dynamischer Informationen in den Zielführungsalgorithmus.

Austausch individueller Leitinformationen durch Fahrzeug-Bakensysteme

Das ALI (Autofahrer Leit- und Informationssystem) kann als das erste rein individuell wirkende Verkehrsleitsystem betrachtet werden. Von Blaupunkt zur Vorführreihe entwickelt wurde es 1979-1981 auf einem 100 km langen Teilstück einer Autobahn im Ruhrgebiet erprobt. Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur wurde über in die Fahrbahn eingelassene Induktionsschleifen realisiert. Diese dienten zum einen zur Verkehrsdatenerfassung, zum anderen konnte über die Induktionsschleifen eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem ALI-Bordgerät und einem an die Induktionsschleife angebundenen Leitreechner ausgetauscht werden. Ein wesentliches Problem der praktischen Einführung dieses Systems lag in dem sehr aufwendigen Aufbau der Infrastruktur. Durch den Ersatz der Induktionsschleifen durch eine Infrarotübertragungsstrecke wurde der Ansatz des ALI-Systems weiterentwickelt und im Rahmen des LISB-Projekts (Leit- und Informationssystem Berlin) von 1988 bis 1990 erprobt. Einer breiten Einführung der Systeme stehen Probleme bei der Finanzierung der notwendigen Infrastruktur entgegen.

Unterstützung der Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren In vielen Ländern vor allem zur Finanzierung von Investitionen in den Straßenbau eingeführt, wird eine streckenbezogene Straßenbenutzungsgebühr im Rahmen der Verkehrsleittechnik als marktwirtschaftliches Instrument zur Steuerung von Angebot (Straßenkapazität) und Nachfrage (Verkehrsbelastung) eingesetzt. Die manuelle Erhebung von Mautgebühren wird seit Mitte der achtziger Jahre durch funkbasierte Techniken unterstützt, die eine unterbrechungsfreie Fahrt ermöglichen. Als eines der ersten Systeme dieser Art gilt das in Göteborg 1985 eingeführte Gebührenerfassungssystem, welches auf einer eindeutigen Identifizierung eines registrierten Fahrzeugs bei der Durchfahrt durch die Erhebungsstelle beruht. Im wesentlichen handelt es sich um eine durch eine Bake initiierte mono-direktionale Funkübertragung (856 MHz) von Identifikationsinformationen vom Fahrzeug zur Bake. Die Einführung der automatischen Gebührenerhebung auf der Basis von elektronischem Geld (Chipkarte), erfordert jedoch aufgrund der damit verbundenen Datensicherheitsanforderungen eine bidirektionale und extrem zuverlässige Datenkommunikation zwischen Bake und dem Fahrzeug. Die Kosten für das fahrzeugseitige Kommunikationsgerät müssen dabei trotzdem im angemessenen Verhältnis zur erhobenen Gebühr stehen (Kosten pro OBU-On Board Unit maximal 20 ECU). Eine für die hohen Anforderungen der automatischen Gebührenerhebung entwickelte Funkschnittstelle ist auch für andere Anwendungen der Verkehrsleittechnik geeignet. 1995 wurde in Deutschland ein Feldversuch 'Autobahntechnologien' durchgeführt, bei dem unter anderem sechs auf dem Fahrzeug-Baken-Prinzip beruhende proprietäre Systeme (Mikrowelle bei 2.4 und 5.8 GHz sowie Infrarot, darunter auch Chipkarten-basierte Lösungen) erfolgreich eingesetzt wurden [23].

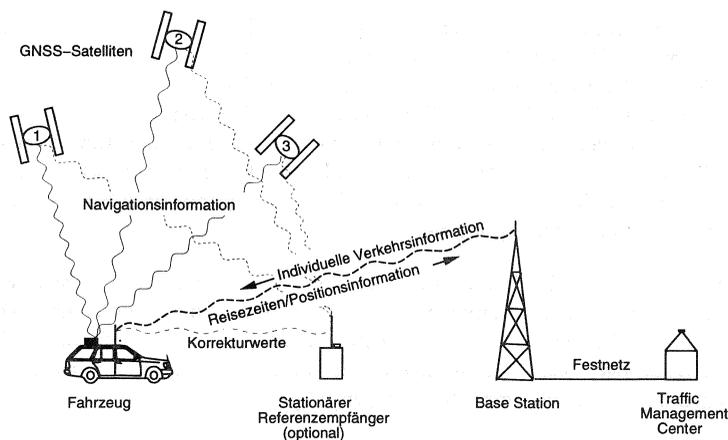


Abbildung 2.3: Mobilfunk-gestütztes System mit Satellitennavigation

Die Anwendung 'Automatische Gebührenerhebung' ist vor allem deshalb als eine Schlüsselanwendung bei der breiten Einführung der sie unterstützenden Kommunikationstechnologie zu sehen, weil bei ihr im Gegensatz zu anderen Anwendungen die Kosten für die Infrastruktur direkt in die erhobenen Straßenbenutzungsgebühren eingerechnet werden können. Zusätzliche Anwendungen der Verkehrsleittechnik können dann unter Nutzung bzw. Ergänzung dieser Infrastruktur als Mehrwertdienste angeboten werden.

Einsatz von Kommunikationstechnologien zur Verbesserung der Verkehrssicherheit Von 1985-1994 wurde in dem von der europäischen Automobilindustrie initiierten Forschungsprogramm PROMETHEUS an der Realisierung von verschiedensten Anwendungen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und Effizienz des Straßenverkehrs gearbeitet. Dabei wurden Funktechnologien untersucht zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen [104, 11] (z.B. zur Übermittlung von Statusinformationen über Fahrzeugsysteme wie der Lenkung und der Bremsanlage) sowie zwischen Fahrzeugen und infrastrukturseitigen Baken (z.B. zur Übermittlung von Informationen von vorausfahrenden Fahrzeugen über Sensoren wahrgenommene Fahrbahnzustände, wie z.B. Nebel, Glatteis oder auch Stauungen).

Nutzung digitaler Mobilfunksysteme in Kombination mit Satellitennavigationssystemen Durch die breite Einführung von digitalen Mobilfunksystemen (vor allem GSM, aber auch verschiedene Datenfunksysteme, wie z.B. MOBITEX) und die damit zu Verfügung stehende flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur für mobile Datendienste bietet sich eine entsprechende Nutzung durch Anwendungen der Verkehrsleittechnik an. Bei der Nutzung des GSM-Systems ist dabei insbesondere die Verwendung des Kurznachrichtendienstes SMS (Short Message Service) sowie des zukünftigen Datendienstes GPRS (General Packet Radio Service) [30] von Bedeutung. Die im Rahmen der Verkehrsleittechnik für die Verkehrsdatenerfassung

notwendige Ableitung von genauen Ortsinformationen wird durch Satellitennavigationssysteme (z.B. GPS (Global Positioning System)) innerhalb gewisser Grenzen ermöglicht (GPS ohne zusätzliche Ortsreferenz ca. 50 m Genauigkeit, GPS mit zusätzlicher Ortsreferenz DGPS (Differential GPS) ca. 5 m Genauigkeit), vgl. Abb. 2.3. Mobilfunksysteme eignen sich besonders zur Unterstützung von Anwendungen, für die eine flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur erforderlich ist und deren Nutzer bereit sind, die relativ hohen Kosten für die fahrzeugseitigen Einrichtungen zu tragen (z.B. Flottenmanagement)[29],[67].

Ausgehend von nationalen Initiativen wird seit 1989 im Rahmen europäischer Forschungsprojekte an der Realisierung von länderübergreifenden Konzepten und Technologien für die Verkehrsleittechnik gearbeitet. Abgeleitet aus den Erfahrungen bei der Umsetzung der oben beschriebenen ersten Ansätze stehen dabei folgende Anwendungen im Mittelpunkt der Überlegungen[105]:

- Dynamic Route Guidance (DRG)
- Driver Information (DI)
- Emergency Services (ES)
- Parking Information (PI)
- Fleet Management (FM)
- Public Transport (PT)
- Automatic Fee Collection (AFC)

Bei der dynamischen Streckenführung (DRG) wird dem Verkehrsteilnehmer im Dialog die für ihn optimale Strecke mitgeteilt werden. Driver Information (DI) ist ein Dienst, der die Gesamtheit aller Teilnehmer mit aktuellen Informationen versorgt. Dies können Wettermeldungen, Stauberichte und andere Warnhinweise sein. Der Notrufdienst (ES) soll die Gewährleistung eines schnellen Hilfeinsatzes in Notsituationen übernehmen. Hierbei ist die garantiert schnelle Übermittlung eines Notrufes wichtigstes Merkmal. Der Parkinformationsdienst (PI) teilt dem Verkehrsteilnehmer bei der Anfahrt eines Ballungszentrums die Belegzustände der für ihn relevanten Parkplätze mit. Das Flottenmanagement (FM) ermöglicht es insbesondere professionellen Nutzern, den Güterverkehr effizienter abzuwickeln und so z.B. vermeidbare Leerfahrten zu reduzieren. Im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs (PT) ist z.B. eine Priorisierung des Busverkehrs in Innenstadtbereichen eine nachgefragte Anwendung. Schließlich ist die bereits angesprochene automatische Gebührenerfassung (AFC) zu nennen. Dabei wird in verschiedenen Ländern innerhalb der Europäischen Union zum einen die Umstellung der bestehenden Vignettensysteme auf eine streckenbezogene Benutzungsgebühr für Lkw, wie auch an eine allgemeine Einführung für alle Verkehrsteilnehmer gedacht. In vielen Ländern wurde außerdem eine Umstellung der bestehenden manuellen Mautstellen auf eine automatische Erhebung der Gebühren begonnen (Italien, Frankreich, Österreich, etc.). In Deutschland ist zunächst nur die Einführung einer streckenbezogenen Benutzungsgebühr für Lkw bis zum Ende des Jahrzehnts geplant. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Anwendungen, ist die Automatische Gebührenerhebung ein vorgeschriebener Dienst, somit

Dienst	Datenmengen	Fehlerrate	Richtung	Zeitliche Relevanz	Örtliche Relevanz
DRG	1-100 kBit	10^{-4}	up-/downlink	Minutenbereich	flächendeckend
DI	1-100 kBit	10^{-4}	downlink	mehrere Sek.	flächendeckend
ES	wenige kBit	10^{-6}	uplink	Sek.-bereich	flächendeckend
PI	1-10 kBit	10^{-4}	up-/downlink	mehrere Sek.	Ballungszentren/Umfeld von Großveranstaltungen
FM	1-10 kBit	10^{-5}	up-/downlink	mehrere Sek.	flächendeckend/Ballungszentren
AFC	wenige kBit	10^{-6}	up-/downlink	mehrere Sek.	an definierten Punkten

Tabelle 2.1: Anforderungen an Kommunikationssysteme in Anhängigkeit zur RTTT-Anwendung

kann bei der Einführung mit hohen Stückzahlen für die fahrzeugseitigen Endgeräte gerechnet werden.

Wesentliche Voraussetzung für eine europaweite Einführung der Dienste der Verkehrsleittechnik ist die Harmonisierung der nationalen Anforderungen und Rahmenbedingungen. Daher wurden parallel zu den Forschungsarbeiten ein in der CEN angesiedeltes Standardisierungsprojekt zum Thema Road Transport & Traffic Telematics initiiert (CEN TC 278). In diesem Rahmen wird seit 1992 an der Entwicklung und Standardisierung einer Fahrzeug-Baken-Funkschnittstelle für den spezifischen Einsatz im Straßenverkehr gearbeitet: Dedicated Short-Range Communications (DSRC).

Im Anhang B findet sich eine ausführliche Darstellung der Arbeitsgebiete von CEN TC 278 sowie der Beziehungen zu nationalen und internationalen Standardisierungsgremien (DIN GK 717 'Interaktives Dynamisches Verkehrsmanagement' sowie ISO TC 204 'Traffic Information and Control Systems').

2.3 Anforderungen an die Funkschnittstelle

Bei der Nutzung von mobilen Kommunikationssystemen für Anwendungen der Verkehrsleittechnik sind die verschiedensten Anforderungen zu beachten [9, 23, 27, 3, 88]:

- Es muß eine *extrem zuverlässige Datenkommunikation* zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur *ohne Beeinträchtigung des Verkehrsflusses* und unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens mit ausreichender *Kapazität* gewährleistet werden.
- Die Charakteristik der zu unterstützenden Anwendungen unterscheidet sich im Hinblick auf die *Übertragungsrichtungen, die Datenmengen und die Anforderungen an den zeitlichen Ablauf des Datenaustauschs*: während für die Verkehrsdatenerfassung nur kurze Nachrichten vom Fahrzeug an die Verkehrsleitzentralen (mono-direktional) übertragen werden, erfordert die automatische Gebührenerhebung (AFC) einen in seiner zeitlichen Abfolge streng einzuhaltenen Dialog (dies ist begründet durch den Einsatz von Datensicherungsalgorithmen). Die Dynamische Routenführung (DRG) zeichnet sich aus durch große Datenmengen, die als Verkehrsinformationen an die Verkehrsteilnehmer übertragen werden. Tabelle 2.1 zeigt einen Überblick über die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Dienste an ihren Kommunikationsträger [83]

in bezug auf Datenmengen, geforderte Zuverlässigkeit, Übertragungsrichtung, zeitliche und örtliche Relevanz.

- Die Realisierung einer *Lokalisierungsfunktion*, die es einerseits dem Fahrzeug ermöglicht, seine Position zu bestimmen (Navigation), und zum anderen auch die exakte Positionsbestimmung des Fahrzeugs durch die Infrastruktur ermöglicht (eindeutige Zuordnung von Kommunikationsprozessen zu Fahrzeugen zwecks Identifikation fehlerhafter Kommunikationsprozesse²) muß gewährleistet sein, wobei hier auch Kombinationen verschiedener Technologien zum Einsatz kommen können (GPS, Video, etc.).
- Die europaweite *Interoperabilität* der Anwendungen wird durch den Einsatz standardisierter Technologien ermöglicht, die innerhalb des Einsatzgebiets entsprechende Verbreitung finden können.
- Die *Migration* von bestehenden, lokal im Einsatz befindlichen Systemen zu einem europaweit verfügbaren System ist eine weitere Anforderung. In diesem Zusammenhang sind auch *Flexibilität* und *Erweiterbarkeit* der Systeme zu nennen. Insbesondere im Bereich der Automatischen Gebührenerhebung sind durch Autobahnbetreiber bereits erhebliche Investitionen in proprietäre Systeme getätigt worden, die eine schrittweise Umstellung auf eine neue, standardisierte Technologie notwendig machen. In Ländern ohne eine bestehende Infrastruktur zur Erhebung von Autobahngebühren ist dieser Aspekt weniger relevant.
- Die *Einbindung* in das bereits im Aufbau befindliche *Festnetz zur Verkehrsdatenerfassung und Vernetzung der Verkehrsleitzentralen* ermöglicht den Aufbau eines integrierten Kommunikationsnetzes für die Zwecke der Verkehrsleittechnik [14].
- Anforderungen der *Datensicherheit* (Einsatz von elektronischem Geld und dem damit verbundenen Zeitbedarf für Authentifizierungs- und Verschlüsselungsalgorithmen, Wahrung der Anonymität der Benutzer) müssen erfüllt werden.
- Die *Einführungsstrategie* muß berücksichtigen, in welchem Zeitraum die Anwendung wievielen Benutzern verfügbar gemacht werden muß. Die Automatische Gebührenerhebung muß als Anwendung, die unter Umständen alle Verkehrsteilnehmer in gleicher Weise betrifft, eine Ausrüstung innerhalb kurzer Zeit ermöglichen. Bei der Nutzung einer bestehenden Kommunikationsinfrastruktur ist zu beachten, daß eine Anwendung wenigen Benutzern zwar innerhalb kurzer Zeit verfügbar gemacht werden kann, aber auch in der Endausbaustufe genügend Kapazität vorhanden sein muß.
- *Kostenaspekte* beim Aufbau und Betrieb spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Entscheidung für die Nutzung einer bestimmten Funkschnittstelle durch eine Anwendung der Verkehrsleittechnik.

Anhand dieser Fülle an Kriterien wird deutlich, daß keine der denkbaren Kommunikationstechnologien alle Kriterien für alle geplanten Anwendungen der Verkehrsleittechnik unterstützen kann. Somit ist eine anwendungsspezifische Auswahl der Funkschnittstelle notwendig.

²Diese Funktion ist speziell für die Automatische Gebührenerhebung von Bedeutung, siehe Abschnitt 3.2.4

2.4 Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Systemen

Bei der im folgenden ausschließlich betrachteten Fahrzeug-Baken-Kommunikation (oder DSRC - Dedicated Short-Range Communications) handelt es sich um eine Funkschnittstelle, die insbesondere einen Datenaustausch in einem lokal eng umgrenzten Umfeld unterstützen kann.

Die hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Datenkommunikation sind allerdings nur zu erfüllen, wenn die in der dynamisch veränderlichen Umgebung im Straßenverkehr unvermeidbaren Einflüsse von Abschattung und Mehrwegeausbreitung entsprechend reduziert werden. Periodische Unterbrechungen, wie sie typischerweise bei Mehrwegeausbreitung vorkommen, sowie die gleichzeitige Nutzung des Übertragungskanal durch mehrere mobile Stationen (Vielfachzugriffsinterferenz) können den Informationsaustausch vollständig behindern. Durch den Einsatz intelligenter Kanalzugriffsverfahren, die auf die jeweilige Art der Störung angemessen reagieren, oder durch die Verwendung leistungsstarker Fehlerkorrekturverfahren ist genauso eine Verbesserung zu erreichen wie durch eine aufwendigere Baken-Infrastruktur. Um die Störeinflüsse zu vermindern, ist demnach eine sorgfältige Systemdimensionierung im Hinblick auf die eingesetzte Übertragungstechnik (insb. Antennen) sowie die Kommunikationsprotokolle notwendig. Zur Bewertung der verschiedenen Systemoptionen werden daher zuverlässige Methoden benötigt, die insbesondere in der Lage sind, einen Nachweis der geforderten niedrigen Transaktionsfehlerrate zu ermöglichen.

In der hier vorgelegten Arbeit werden daher zum einen spezielle Methoden vorgestellt, die eine quantitative Überprüfung der bezüglich der Zuverlässigkeit der Datenkommunikation genannten Kriterien für Fahrzeug-Baken-Kommunikationssysteme erlauben. Weiterhin werden Protokollmechanismen und Systemkonfigurationen vorgestellt und bewertet, die in der Lage sind, die hohe Zuverlässigkeit der Kommunikation zu garantieren.

Die Eignung unterschiedlicher Methoden der Leistungsbewertung steht in engem Zusammenhang zu den Zielsetzungen der Anwender und zur notwendigen Modellbildung. Im nachfolgenden Abschnitt werden daher zunächst die Ziele der Leistungsbewertung von Nahbereichs-Mobilfunksystemen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einsatzbereichen und Nutzern der Ergebnisse dargestellt. Anschließend folgt eine Vorstellung und Beurteilung der für die hier betrachtete Anwendung in Frage kommenden Methoden.

2.4.1 Ziele der Leistungsbewertung

Folgende Ziele einer Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Systemen wurden im Rahmen dieser Arbeit zugrunde gelegt:

- Unterstützung der Systementwicklung, z.B. bei der Spezifikation der Antennencharakteristika und Protokollparameter sowie bei der Implementierung von Anwendungsprozessen;

- Auswahl der optimalen Systemparameter in Abhängigkeit zur Systemumgebung vor der Installation;
- Vergleich verschiedener Systemvorschläge zur Unterstützung der Erarbeitung harmonisierter Systemlösungen im Rahmen der Spezifikation standardisierter Systeme;
- Statistisch abgesicherter Nachweis niedriger Transaktionsfehlerraten bezogen auf die Anwendung (z.B. 10^{-6} für Elektronische Gebührenerhebung);
- Auswahl und Vergleich von Systemen verschiedener Anbieter durch zukünftige Systembetreiber (z.B. Autobahnbetreiber, etc.).

Charakteristisch für die genannten Einsatzziele ist, daß das betrachtete System entweder noch nicht vorliegt (z.B. in der Phase der Systementwicklung) oder daß die praktische Durchführung vergleichbarer Untersuchungen im Feld aufgrund des damit verbundenen Aufwands nicht realisierbar ist (Untersuchungen zum Nachweis niedriger Fehlerraten mit über 10 Millionen Kommunikationsprozessen). Dennoch müssen die angewandten Leistungsbewertungsmethoden eine ausreichend genaue Modellierung des Systemverhaltens (incl. entsprechender Validierung der Modelle) ermöglichen.

2.4.2 Methoden zur quantitativen Leistungsbewertung

Eine wesentliche Anforderung an die Leistungsbewertungsmethode ist, daß der ihr zugrunde liegende Modellierungsansatz eine realistische Berücksichtigung des Systemverhaltens ermöglicht, d.h. für Fahrzeug-Baken-Kommunikationssysteme müssen insbesondere das Protokollverhalten, die Fahrzeugmobilität und die Eigenschaften des Übertragungskanalns in angemessener Weise abgebildet werden. Das Systemverhalten ist dabei nicht rein deterministisch zu beschreiben, sondern von einer Vielzahl von Zufallsprozessen abhängig (z.B. dem Eintreffen von Fahrzeugen oder dem Auftreten von Bitfehlern).

Für die Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen empfehlen sich daher folgende Ansätze (siehe auch [69]):

Die mathematische Analyse erfordert die Beschreibung des Systemverhaltens durch entsprechende mathematische Formeln und Modelle (z.B. Markov-Ketten, siehe Kapitel 6). Durch die in den folgenden Kapiteln noch eingehend beschriebenen komplexen Abhängigkeiten der Systemkomponenten sind jedoch oft starke Vereinfachungen nötig, um eine entsprechende Modellierung zu ermöglichen. Die berechneten Ergebnisse sind jedoch exakt.

Die gemachten Vereinfachungen schränken oft auch die Flexibilität der entstehenden Modelle ein, so daß z.B. Änderungen im Protokollablauf einen erheblichen, erneuten Modellierungsaufwand mit sich bringen. Ein Vorteil der mathematischen Analyse ist es hingegen, daß die Ergebnisse der Berechnungen eines einmal erstellten Modells sehr schnell vorliegen.

Die stochastische Simulationstechnik beruht auf der Beschreibung des Systemverhaltens durch Zufallsprozesse, die unter Berücksichtigung der durch ein entsprechendes Systemmodell beschriebenen Abhängigkeiten zusammenwirken. Die Messung und statistische Auswertung bestimmter Systemparameter

ermöglicht eine quantitative Bewertung des Systemverhaltens, allerdings sind die Ergebnisse immer mit einer gewissen statistischen Unsicherheit behaftet. Es liegen jedoch erprobte Methoden zur statistischen Auswertung vor, die eine Bestimmung und Begrenzung der statistischen Fehler ermöglichen. Ein wesentlicher Vorteil der Simulationstechnik ist es, daß komplexe Abhängigkeiten im Detail berücksichtigt werden können und damit eine hohe Realitätsnähe erzielt werden kann; so kann beispielsweise eine Protokollimplementierung, die in gleicher Form für eine Zielhardware eingesetzt wird, gleichzeitig auch als Modell für die Systembewertung dienen. Die Anwendung eines Simulationsmodells erlaubt es weiterhin, das Systemverhalten schrittweise anschaulich nachzuvollziehen, was insbesondere die Validierung der Systemmodelle unterstützt.

Die detaillierte Betrachtung von Einzelereignissen bringt allerdings auch mit sich, daß eine Simulation einer Vielzahl von Ereignissen notwendig ist, um die erwünschte statistische Sicherheit der Ergebnisse gewährleisten zu können. Der Detaillierungsgrad eines Systemmodells wird also durch die als akzeptabel erachtete Dauer einer Simulation beschränkt.

Für die Leistungsbewertung von Protokollen für die Nahbereichskommunikation (Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und Fahrzeug-Baken-Kommunikation) wurden in [61] Ansätze für analytische wie auch simulative Bewertungsmethoden vorgestellt, die im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit aufgegriffen und weiterentwickelt wurden [100, 65, 64, 62]. Ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit liegt dabei in der Entwicklung und Integration von sehr detaillierten und realitätsnahen Modellen für Fahrzeugmobilität, Funkkanal und Protokollarchitektur des Gesamtsystems auf der Basis des DSRC-Standards [98, 91, 90, 94, 99, 93, 97, 96].

Im folgenden Kapitel werden zunächst die technischen Grundlagen und Rahmenbedingungen für die Entwicklung der DSRC-Kommunikationsarchitektur vorgestellt.

Technische Grundlagen und Rahmenbedingungen

Für den Entwurf einer DSRC-spezifischen Funkschnittstelle sind technische Rahmenbedingungen in bezug auf die zur Verfügung stehende Funktechnologie, die Fahrzeugmobilität, sowie die Grundlagen für Protokollarchitekturen für offene Systeme und Kanalzugriffsprotokolle für lokale Netze von Bedeutung.

3.1 Architektur eines Fahrzeug-Baken-Systems

Ein DSRC-System besteht aus einem ortsfesten Bakensystem (auch Road-side Equipment RSE) mit einer oder mehreren Antennen und einer im Fahrzeug installierten mobilen Kommunikationseinrichtung (auch On-Board-Unit OBU). Im folgenden werden die Komponenten eines DSRC-Systems basierend auf Mikrowelle in einer Übersicht dargestellt.

3.1.1 Aufbau einer Bake (Road-Side Equipment RSE)

Das stationäre Bakensystem (Blockschaltbild Abb. 3.1) besteht aus folgenden Komponenten:

Antennen Für das stationäre Bakensystem können sowohl Antennen mit einer festen Charakteristik als auch Array-Antennen verwendet werden, bei denen durch Variation der Gewichtungsfaktoren (Amplitude und Phase) eine dynamische Antennencharakteristik eingestellt werden kann. In Kapitel 4 werden der Antennenentwurf für DSRC-Systeme sowie die Eigenschaften des von DSRC-Antennen erzeugten Funkfelds detailliert erläutert.

Mikrowellenschaltkreis Der Schaltkreis beinhaltet die Sende- und Empfangseinheit sowie einen Modulator bzw. Demodulator.

Bakensteuerung Die vom Stationsrechner kommenden Daten werden ausgewertet und kodiert. Falls es sich um Array-Antennen handelt, werden die notwendigen Faktoren für das strahlformende Netzwerk berechnet und an den Mikrowellenschaltkreis weitergeleitet.

Stationsrechner Der Stationsrechner verwaltet das Bakensystem. Er schickt die jeweiligen Daten an die zuständige Bakensteuerung, verwaltet die eingehenden Daten und leitet diese an die Verkehrsleitrechner weiter. Im Fall der automatischen Gebührenerfassung können gleichzeitig die Bilder der Falsch- bzw. Nichtbezahler ausgewertet und evtl. Gebührenbescheide vorbereitet werden.

Sensoren und andere Hardware Sensoren erfüllen die Aufgaben der Fahrzeugerkennung und -klassifikation, die z.B. zur Erfassung des Straßenzustandes und zum Abgleich mit den über die Funkschnittstelle übermittelten Daten dienen.

Ein Beispiel ist der Einsatz von Videokameras, die Fahrzeuge erfassen, bei denen keine erfolgreiche Abbuchung von Gebühren vorgenommen werden konnte.

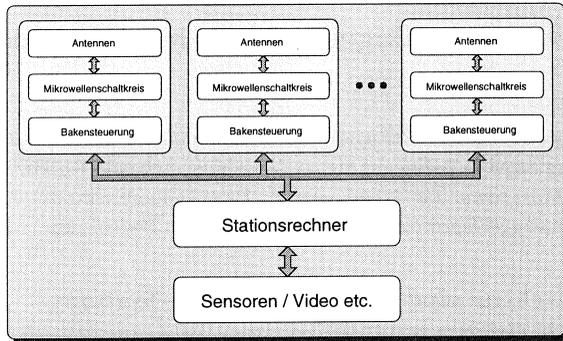


Abbildung 3.1: RSE-Blockschaltbild (Bake)

3.1.2 Aufbau einer mobilen Station (On-Board Unit OBU)

Die im Fahrzeug befindliche mobile Station wird On-Board Unit (OBU) genannt. Sie wird entweder auf dem Armaturenbrett oder hinter der Windschutzscheibe in der Nähe des Rückspiegels befestigt. Die On-Board Unit (Blockschaltbild Abb. 3.2) besteht aus den folgenden Komponenten:

Antenne Wegen der einfachen und kostengünstigen Herstellung wird in der Regel eine Patch-Antenne verwendet.

Mikrowellenschaltkreis Dies ist die Sende- und Empfangseinheit einschließlich eines Modulators bzw. Demodulators.

Steuerungsmodul und Kommunikationsschnittstelle Das Modul steuert den Kommunikationsablauf, schaltet aus dem energiesparenden Stand-by-Modus in den Betriebsmodus und codiert bzw. decodiert die Daten.

Die Kommunikationsschnittstelle leitet die Daten im Falle der automatischen Gebührenerfassung an die Smart Card oder stellt sie dem Bord-Computer zur Verfügung, der anschließend die Verkehrsmeldungen und die Leitinformationen auf einem Display anzeigt.

Chipkarte Die mobile Station kann eine Chipkarte aufnehmen, in der anwendungsspezifische Informationen gespeichert werden. Bei der Anwendung AGE werden von der Chipkarte der zu entrichtende Betrag abgebucht und ggf. eine Aufzeichnung der getätigten Transaktionen vorgenommen, die zur Nachprüfung der Abbuchungen herangezogen werden kann.

Energieversorgung Die mobile Station kann entweder aus dem Bordnetz oder mit einer Batterie gespeist werden. Um eine einfache Nachrüstung zu ermöglichen, ist für Systeme der ersten Generation eine eigene Batterieversorgung der OBU vorgesehen (in Kombination mit dem Einsatz der Transpondertechnik (siehe

unten)). Die eingesetzten Batterien sollen dabei eine Lebensdauer von mehreren Jahren haben.

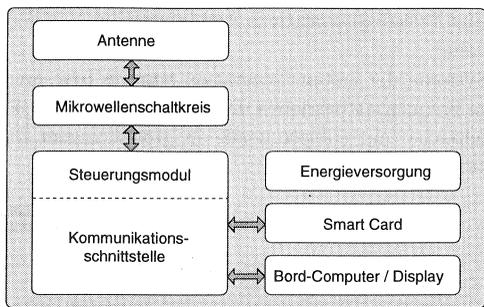


Abbildung 3.2: OBU-Blockschaltbild

3.2 Anforderungen an die Funktechnik

Im folgenden werden die wesentlichen funktechnischen Anforderungen vorgestellt, d.h. insbesondere:

- die zugewiesenen Frequenzbänder für Anwendungen im Bereich des Verkehrsmanagements
- die zum Einsatz kommende Transpondertechnologie
- die möglichen Vielfachzugriffsverfahren
- die notwendige Verbindung aus zuverlässiger Kommunikation und exakter Lokalisierung der mobilen Station
- die sich aufgrund der zur Verfügung stehenden Infrastruktur ergebenden typischen Systeminstallationen.

Auf die spezifischen Eigenschaften der Funkausbreitung in dem für die Entwicklung von Fahrzeug-Baken-Systemen relevanten Frequenzbereichen wird detailliert in Kapitel 4 eingegangen.

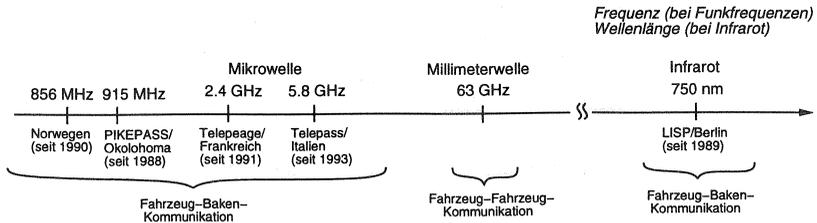
3.2.1 Frequenzzuweisung

Verkehrsleitsysteme sind auf der Basis verschiedener Funkfrequenzen sowie Infrarot realisiert worden (siehe auch Übersicht zur Entwicklung von Fahrzeug-Baken-Systemen, Abschnitt 2.2). Während für Infrarot die Zuweisung bestimmter Frequenzbereiche (noch) nicht institutionalisiert worden ist, wird die Nutzung von Funkfrequenzen durch entsprechende Behörden bzw. von den Länderregierungen eingesetzte Organisationen gesteuert.

Innerhalb von Europa ist das europäische Komitee für Funkkommunikation ERC (European Radiocommunications Committee) für die Frequenzuteilung zuständig

und hat sich daher auch mit den für die Zwecke der Verkehrsleittechnik zur Verfügung zu stellenden Frequenzbändern befaßt. Das ERC ist Teil der Konferenz der europäischen Post- und Telekommunikationsverwaltungen CEPT (Conference of European Postal and Telecommunications Administrations), in der die europäischen Staaten vertreten sind.

Fahrzeug-Baken-Systeme der ersten Generation wurden bzw. werden weltweit bei unterschiedlichsten Frequenzen betrieben. Die nachfolgende Übersicht zeigt die wichtigsten Frequenzbereiche und entsprechende in großflächigem Einsatz befindliche Systeminstallationen:



Die bereits genutzten Frequenzen stehen jedoch teilweise nicht europaweit zur Verfügung bzw. sind in der Zukunft für eine andere Nutzung vorgesehen. Andere Frequenzbänder werden hingegen, ausgehend von einer vormals militärischen Nutzung, für zivile Zwecke nutzbar gemacht. Besonders attraktiv erscheint das bereits in vielen Ländern für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen reservierte sog. ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical applications) im Bereich von 5.725-5.875 GHz.

Als Ergebnis einer Untersuchung des ERC über die Harmonisierung der Frequenzbänder für Verkehrsleitsysteme wurde unter Berücksichtigung der nationalen Voraussetzungen in den einzelnen CEPT-Mitgliedsländern folgende Festlegung (ERC/DRC/(92)02 [18]) für die Nutzung von Funkfrequenzen getroffen:

5.795-5.805 GHz für standardisierte Systeme der ersten Generation (insbesondere AGE)

5.805 - 5.815 GHz für die Nutzung auf nationaler Basis um besondere Anforderungen zu erfüllen

63-64 GHz für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (zukünftige Nutzung)

76-77 GHz für Radarsysteme für die Fahrzeugsteuerung (zukünftige Nutzung)

Infrarot steht ebenfalls als Übertragungsmedium zur Verfügung, kann jedoch ohne spezielle Frequenzzuweisung genutzt werden bzw. ist außerhalb der Kompetenz des ERC angesiedelt.

Folgende Rahmenbedingungen sind bei der Nutzung der vorgesehenen Frequenzbänder zu beachten:

- Die Nutzung erfolgt nicht-exklusiv, d.h. die Systementwicklung muß die parallele Nutzung des Frequenzbandes durch andere Anwendungen als die der Verkehrsleittechnik berücksichtigen.

- Systeme, die entsprechend den durch ETSI und anderen relevanten Standardisierungsinstituten definierten Prüfungen abgenommen worden sind, können ohne weitere Einschränkungen genutzt werden.

Die Infrarot- und 5.8 GHz- Technologie sind gut beherrschbar und werden sich in naher Zukunft (ab 1997) in großer Serie industriell fertigen lassen. Beide Technologien stellen somit die Basis für die Entwicklung standardisierter DSRC-Systeme. Die Technologie für Millimeterwellen (63 GHz) befindet sich dagegen noch im Forschungs- bzw. Vorentwicklungsstadium und soll hier, aufgrund des vorgesehenen Einsatzes für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, nicht weiter betrachtet werden.

Ausgehend von der europäischen Entscheidung wurden Zuweisungen im 5.8 GHz-Band weltweit bereits durchgeführt (insbesondere Südostasien, z.B. Singapur) bzw. sind geplant (z.B. U.S.A.). In den U.S.A. beschäftigt sich die für die Frequenzvergabe zuständige F.C.C. (Federal Communications Commission) seit März 1996 mit einem Antrag zur Reservierung des Bereichs 5.850 - 5.925 GHz (75 MHz Bandbreite) für Anwendungen der Verkehrsleittechnik, d.h. es würde sich um eine Zuweisung in einem gegenüber der europäischen Zuweisung nur leicht verschobenen Bereich handeln, was die Übertragung der europäischen DSRC-Standards für 5.8 GHz ermöglicht.

In der Vergangenheit wurden in den U.S.A. bereits 26 MHz im Bereich von 902 bis 928 MHz für Anwendungen der Verkehrsleittechnik reserviert (LMS - Location and Monitoring Service). Hier konnte sich jedoch kein einheitlicher Kommunikationsstandard etablieren, so daß mit einer Zuweisung des 5.8 GHz-Bandes und der Nutzung der entsprechenden DSRC-Standards die Aussicht auf eine landesweite Interoperabilität auf der Basis des (angepaßten) DSRC-Standards verbunden ist.

3.2.2 Multiplexing und Vielfachzugriff

Die Realisierung der parallelen Übertragungen mehrerer Teilnehmer in orthogonalen Übertragungskanälen (Multiplexing) und die Steuerung des Zugriffs mehrerer Stationen auf die so geschaffenen Übertragungskanäle (Vielfachzugriff oder Multiple Access) ist eine Kernfunktionalität eines Mobilfunksystems und hat einen entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Kommunikationsprotokolle. Die Verwendung einer Multiplexing-Technik ist dabei eng verknüpft mit dem dazugehörigen Vielfachzugriffsverfahren, jedoch kann ein Multiplexingverfahren auch eingesetzt werden, ohne daß eine Vielfachzugriffstechnik damit verbunden wird. Dies ist insbesondere bei Hybridsystemen der Fall, in denen mehrere Multiplexing- wie auch Vielfachzugriffstechniken miteinander kombiniert werden.

Im folgenden werden die wichtigsten Ansätze vorgestellt und ihre wesentlichen Eigenschaften zunächst allgemein und dann im Hinblick auf die Fahrzeug-Baken-Kommunikation diskutiert.

Das Grundprinzip, das hinter jedem der nachfolgend betrachteten Techniken steht, ist, daß mehrere Stationen den Übertragungskanal nutzen, ohne sich durch gegenseitige Interferenz während des Empfangs zu stören. Zur Vermeidung von gegenseitigen

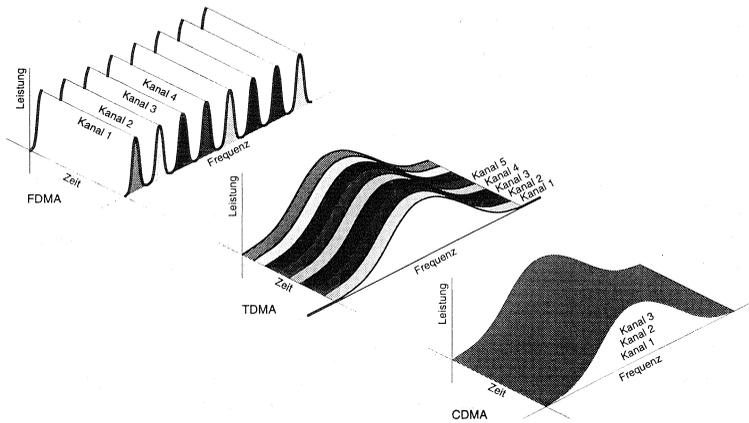


Abbildung 3.3: Verschiedene Zugriffsverfahren

Interferenzen wird daher die Verwendung von orthogonalen Signalen angestrebt. Bei einem gegebenen Satz von Signalen

$$x_i(t), \text{ (mit } i = 1, 2, \dots, n)$$

sind die Signal orthogonal zueinander, falls gilt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t)x_j(t) dt = \begin{cases} K & \text{wenn } i=j \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases}$$

wobei K eine Konstante ungleich Null ist. In der praktischen Anwendung sind die Signale jedoch nie vollkommen orthogonal, was entsprechende Schutzbereiche (abhängig vom Verfahren im Zeit-, Frequenz-, Code- oder Raumbereich) notwendig macht.

Im folgenden werden einige wichtige Eigenschaften der Techniken, die am häufigsten zum Einsatz kommen, erläutert (vgl. Abb. 3.3):

Frequency Division Multiplexing (FDM)/Multiple access (FDMA) Diese Techniken beruhen auf der Konzentration der zu übertragenden Information eines jeweiligen Benutzers auf ein relativ schmales Frequenzband innerhalb des gesamten dem System zur Verfügung stehenden Frequenzbandes. Gegenseitige Interferenz kann durch relativ steilflankige Filter sehr gut unterdrückt werden. Ein gewisser Sicherheitsabstand, das sogenannte Schutzband (*guard band*), zwischen den schmalen Frequenzbändern ist erforderlich, da die verwendeten Filter nur über eine endliche Flankensteilheit verfügen. Somit ist die komplette Nutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes nicht möglich. In der Vergangenheit wurde FDM/FDMA vor allem für zellulare analoge Mobilfunksysteme eingesetzt.

Time Division Multiplexing (TDM)/ Multiple Access (TDMA) Dieses Verfahren beruht auf dem Prinzip der Unterteilung der auf einem Kanal zur Verfügung stehenden Zeit in viele, relativ kurze Zeitfenster (Slot). Diese Zeitfenster werden entweder fest zugewiesen oder je nach Bedarf durch einzelne Stationen genutzt. Ähnlich wie im FDMA-System müssen auch im TDMA-System sogenannte Schutzzeiten (*guard times*) zwischen den einzelnen Zeitfenstern eingehalten werden, um gegenseitige Interferenzen möglichst gering zu halten. Dadurch wird genau wie im FDMA-System der theoretisch mögliche Systemausnutzungsgrad reduziert. Aufgrund der sehr genauen Synchronisation (zwischen allen beteiligten Sendern und Empfängern), die zum Betrieb eines solchen TDMA-Systems zwingend notwendig ist, erfordert ein solches System einen höheren technologischen Stand an Hard- sowohl als auch Software im Vergleich zum FDMA-System. Aufgrund seiner großen Flexibilität findet das TDMA-Prinzip bei den meisten Mobilfunksystemen der neueren Generation wie auch in digitalen Datennetzen Verwendung (siehe Abschnitt 3.4.2.2).

Space Division Multiplexing (SDM)/Multiple Access (SDMA) Durch die Anwendung von Raummultiplexverfahren kann unter Ausnutzung der Ausbreitungsdämpfung und/oder dem Einsatz der entsprechenden Antennentechnik eine räumliche Abgrenzung unterschiedlicher übertragender Stationen geschaffen werden. Der Vielfachzugriff gestaltet sich dadurch sehr einfach, da die Benutzer unsynchronisiert in 'ihrem' Raumbereich den Kanal nutzen können. An den Rändern bzw. Übergangsbereichen zwischen zwei Raumbereichen kommt es jedoch zu unerwünschten Interferenzen, die insbesondere in mobilen Umgebungen zu Beeinträchtigungen führen können, da aufgrund der erforderlichen kontinuierlichen Raumabdeckung ein Schutzbereich (vgl. FDM oder TDM) zwischen den Raumbereichen ungeeignet ist. Raummultiplextechniken werden für mobile Systeme in der Regel mit anderen Techniken (FDM oder TDM) kombiniert.

Durch dynamisches Nachführen von Antennen mit einem begrenzten Ausleuchtungsbereich kann ein sog. adaptives SDM/SDMA realisiert werden. Hierbei werden Störeinflüsse durch Vielfachzugriffsinterferenz und Mehrwegeausbreitung weitgehend reduziert.

Code Division Multiplexing (CDM)/Multiple Access (CDMA) Bei CDM /CDMA beruht der gemeinsame Zugriff auf den Kanal darauf, daß innerhalb des selben Frequenzbandes jede Station mindestens einen orthogonalen Pseudo Noise (PN) Code zur Trägermodulation seiner zu übermittelnden Information verwendet. Durch die Verwendung dieser PN-Codes wird das Signalspektrum jeder Station auf ein Vielfaches seiner Originalbandbreite gespreizt, wodurch die Mehrfachnutzung des Kanals ermöglicht wird [57]. Mittels mehrerer empfängerseitiger Korrelatoren können mit Kenntnis des jeweils verwendeten PN-Codes durch Bildung der AKF (Autokorrelationsfunktion) die Informationsbits einer Station decodiert werden. Das zur Codierung gespreizte Signalspektrum der durch die konkret ausgewählte PN-Sequenz zugeordneten Station wird wieder auf seine Originalbandbreite zusammengeschrumpft. Dabei trägt nur die Signalenergie der im Korrelator verwendeten PN-Folge zur Energie des

AKF-Signals bei. Die jeweiligen Signale der anderen Benutzer, deren Codes mit der ausgewählten PN-Folge nicht übereinstimmen, werden nicht auf ihre Originalbreite zurücktransformiert und tragen somit nur zum Rauschpegel des empfangenen Signals bei (Selbstinterferenz des CDMA- Systems). Aus dem Auftreten dieser Eigenstörungen kann einfach abgeleitet werden, daß bei einer bestimmten Anzahl von Signalen auf dem selben Kanal der Signal zu Rausch Abstand (SNR - Signal to Noise Ratio) einen gewissen, zum Empfang mit dem Korrelator erforderlichen Wert unterschreitet, und das CDMA-System sich somit selbst in der Anzahl der teilnehmenden Stationen begrenzt [45].

Hybridverfahren Dabei werden mehrere der hier angeführten Techniken miteinander kombiniert, z.B. beim GSM-System handelt es sich um ein SDM-/FDM-/TDM-/TDMA-Verfahren, d.h. durch den Systemaufbau geschieht ein Multiplexing im Raum (Zellstruktur), bezüglich der Frequenz und der Zeit, wobei der Vielfachzugriff immer nur im Zeitbereich auf einem Frequenzkanal innerhalb einer Zelle erfolgt [87]. Nach erfolgreichem Zugriff wird dann ein Frequenz/Zeitkanal zugewiesen. Beim DECT-System hingegen liegt ein SDM-/FDM-/TDM-/FDMA-/TDMA-System vor, da die mobile Station hier beim Vielfachzugriff neben Zeitmultiplexkanälen auch Frequenzmultiplexkanäle zur Verfügung hat, die örtlich bei ausreichendem Störabstand wiederverwendet werden.

Angewendet auf die Fahrzeug-Baken-Kommunikation ist grundsätzlich der Einsatz aller hier beschriebenen Verfahren denkbar. In der Abb. 3.4 sind basierend auf den oben allgemein eingeführten Verfahren mögliche Konfigurationen für Fahrzeug-Baken-Systeme dargestellt. Ein SDMA Ansatz mit statisch ausgeleuchteten Raumbereichen ist dabei nur in Kombination mit einem TDM (wechselnder Betrieb benachbarter Raumzonen) oder einem FDM (verschiedene Frequenzbereiche für benachbarte Raumzonen) möglich. Zeitlich parallele Übertragungen sind dabei nur im Uplink, d.h. von mobiler Station zur Bake sinnvoll. Im Downlink muß jeweils in allen Raumbereichen sequentiell gesendet werden, da die mobilen Stationen aufgrund der Fahrzeugmobilität jederzeit die Raumbereiche wechseln können (siehe multi-lane Betrieb, Abschnitt 3.2.5). Ein reiner TDM/TDMA-Betrieb ist ebenfalls eine realistische Option, wobei hier durch entsprechende Protokolle (siehe Kanalzugriffsprotokolle in Abschnitt 3.4.2.2 bzw. 5.3) der Vielfachzugriff realisiert wird. Der in den folgenden Kapiteln beschriebene DSRC-Systemansatz ermöglicht sowohl SDMA, TDMA sowie deren Kombination.

Adaptives SDMA und CDMA sind mögliche Alternativansätze für zukünftige Systeme, die in kritischen Umgebungen besonders störresistent reagieren, jedoch für die Implementierungen der nächsten Zukunft noch nicht relevant sind. Die in [34] und [107] vorgenommene Analyse eines CDMA-Ansatzes für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation hat jedoch gezeigt, daß die in Europa zugewiesene Bandbreite von 10 MHz nicht ausreicht, um die Vorteile von CDMA ausnutzen zu können. Vielmehr ist die bei entsprechender Spreizung des Signals pro Kanal erreichbare Datenrate nicht ausreichend, um RTTT- Anwendungen innerhalb der begrenzten Kommunikationszone abzuwickeln.

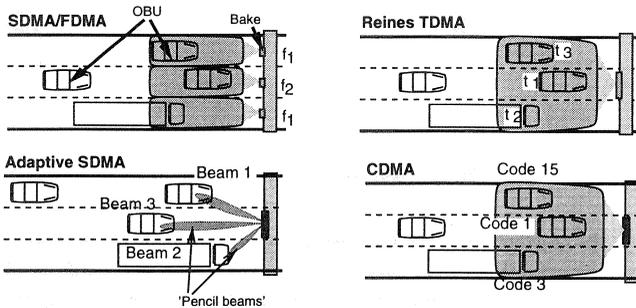


Abbildung 3.4: Mögliche Vielfachzugriffstechniken für DSRC-Systeme

Während ein CDMA-Ansatz nur weitgehend unabhängig von TDMA/SDMA-Systemen realisiert werden könnte, ist im Einsatz von dynamisch nachführenden Antennen eine Erweiterung des im DSRC-Systemkonzept unterstützten SDMA-Ansatzes zu sehen, wobei auch eine Rückwärtskompatibilität denkbar ist. Da sich auch die erforderliche Antennentechnik bereits in der Entwicklung befindet [20], erscheint es sinnvoll, diese Option auch im Hinblick auf die Eignung der DSRC-Protokollarchitektur zu analysieren (siehe Kapitel 9.3).

3.2.3 Transpondertechnologie

Die On-Board Units sollen preisgünstig in der Herstellung und möglichst unabhängig von einer im Fahrzeug befindlichen Energiequelle sein. Zu diesem Zweck eignet sich im Mikrowellenbereich, d.h. für 5.8 GHz, die Transpondertechnik [68]. Hierbei wird ein CW¹-Trägersignal zur OBU gesendet und von dieser moduliert, um anschließend von der Bake empfangen zu werden (Uplink). Aus Kostengründen wird für den Downlink, d.h. von der Bake zur OBU, Amplitudenmodulation (Amplitude Shift Keying, ASK) verwendet (Abb. 3.5), da mit einer Detektordiode eine einfache und billige Demodulation zu realisieren ist. Nachteil dieser Modulationsart ist ihre schlechte Effizienz. Für den Uplink können sowohl Frequenzmodulation (Frequency Shift Keying, FSK), Phasenmodulation (Phase Shift Keying, PSK) oder wieder ASK benutzt werden.

Durch die Verwendung des Transponderprinzips ist eine Trennung von Downlink und Uplink im Zeitbereich (Time Division Duplex TDD) vorgesehen, da eine gleichzeitige Übertragung von CW und einem modulierten Signal im Downlink nicht sinnvoll ist.

3.2.4 Lokalisierungsfunktion

Für Anwendungen, die mit einem Bezahlvorgang (Automatische Gebührenerhebung) verknüpft sind, ist es essentiell, daß der zugehörige Kommunikationsprozess

¹Continuous Wave

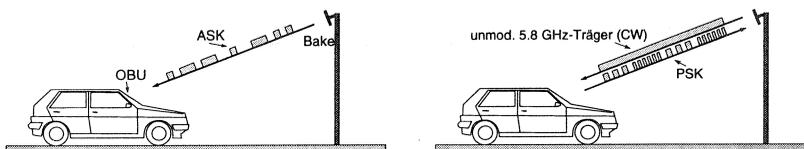


Abbildung 3.5: Downlink (links) und Uplink (rechts, Transponderbetrieb)

durch geeignete Lokalisierungsmaßnahmen von der Bake eindeutig mit einer entsprechenden Mobilstation bzw. dem entsprechenden Fahrzeug verknüpft werden kann. Es ist also eine bakenseitige Lokalisierung der OBU mit hoher Genauigkeit (wenige cm) notwendig.

Für Anwendungen, die lokal gültige Informationen austauschen (z.B. für die dynamische Routenführung oder bei Parkleitsystemen), ist ebenfalls eine genügend genaue Zuordnung zu einem Ort zu gewährleisten. Hierbei ist jedoch entscheidend, daß das Fahrzeug eine genaue Ortsreferenz ableiten kann. Hierzu kann z.B. die sog. 'Cut-off'-Linie, die sich durch das abrupte Absenken des Signalpegels beim Ausfahren aus der Kommunikationszone ergibt, verwendet werden.

Die für die bakenseitige Lokalisierung eingesetzten Verfahren haben einen erheblichen Einfluß auf den Einsatz der zur Verfügung stehenden Antennentechnologie. Verwendung finden z.B. aufwendige Antennenkonstruktionen (siehe Kapitel 4.2), die aufgrund der scharf abgegrenzten Kommunikationszone gewährleisten, daß sich praktisch maximal ein Fahrzeug in der Zone aufhalten kann (siehe Abb. 3.6 links). Dieser Ansatz ermöglicht zum einen eine von konkurrierenden Fahrzeugen freie Kommunikation (siehe SDMA), zum anderen eine eindeutige Lokalisierung der Fahrzeuge anhand der Zuordnung über die zur Übertragung genutzte Antenne. Ein weiterer Ansatz verwendet aus der Radartechnik bekannte Verfahren, indem über die Auswertung des Empfangspegels über mehrere sich überlappende Antennen der Ort einer mobilen Station bestimmt werden kann (z.B. Triangulationsverfahren, siehe Abb. 3.6 rechts).

Es bleibt festzuhalten, daß für die Schlüsselanwendungen von Fahrzeug-Baken-Systemen (insbesondere AGE) neben der zuverlässigen Kommunikation eine ebenso zuverlässige Lokalisierung erzielt werden muß und daher die Erfüllung beider Anforderungen einen erheblichen Einfluß auf die Systemgestaltung hat.

3.2.5 Typische *multi-lane* Systeminstallationen

Eine Grundvoraussetzung für die Installation einer zukünftigen DSRC-Infrastruktur ist, daß die Systeme ohne größere bauliche Veränderungen in das vorhandene Straßennetz integriert werden können (möglichst unter Nutzung bestehender Infrastruktur, z.B. Schilderbrücken) und keinerlei Behinderung für den fließenden Verkehr erzeugen². Dies bedeutet insbesondere, daß keine zusätzlichen Geschwindigkeitsbe-

²In Ländern, die bereits über eine entsprechende Infrastruktur zur manuellen Erfassung von Autobahngebühren verfügen, ist diese bestehende Infrastruktur auch geeignet, entsprechende Systeminstallationen aufzunehmen. In der Regel handelt es sich jedoch um einspurige, enge Fahrbahnen, die nur mit geringer Geschwindigkeit passiert werden können. Diese Systeme sollen

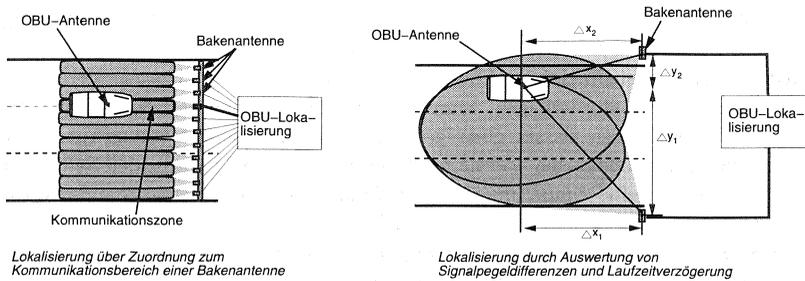


Abbildung 3.6: OBU-Lokalisierung

schränkungen und Einschränkungen bezüglich des Wechsels der Fahrspur in der Kommunikationszone toleriert werden können. Man spricht in diesem Zusammenhang von sog. *free-flow multi-lane* Systemen.

Als mögliche Standorte für Bakeninstallationen kommen somit auf Autobahnen z.B. Schildermasten am Straßenrand oder Schilderbrücken, im innerstädtischen Bereich z.B. zusätzlich auch Ampelanlagen in Frage. Die Größe der Kommunikationszone variiert (auch in Abhängigkeit zu der geforderten Genauigkeit der Lokalisierung der mobilen Stationen) zwischen wenigen Metern und bis zu 100 Metern.

Die Wahl des Multiplexing- und Vielfachzugriffsverfahrens führt zu entsprechenden Anforderungen an die Infrastruktur, die die Bakenantenne aufnehmen muß.

Aus den genannten Anforderungen leiten sich folgende typische Systemkonfigurationen für *multi-lane* Systeme ab:

Installationen auf Schilderbrücken (Gantry) Schilderbrücken bieten eine große Flexibilität und bei entsprechender Höhe (in der Regel 6 m) gute Voraussetzungen, Abschattungseffekte weitgehend zu vermeiden (siehe Leistungsbewertung in Kapitel 9.1.2). Schilderbrücken können zur Realisierung von S/F/TDMA-Systemen wie auch reinen TDMA-Systemen genutzt werden (siehe Konfiguration in Abb. 3.6, links, sowie Konfigurationen in Abb. 3.4). Nachteil der Schilderbrücken als Basis für DSRC-Systeme sind die hohen Kosten der Installation sowie die gewisse Beeinträchtigung des Landschafts- bzw. Stadtbildes (Akzeptanzproblem).

Seitliche Installationen (Sidepost) Weniger aufwendig und unauffälliger sind seitliche Installationen, z.B. unter Nutzung vorhandener Infrastruktur wie Ampelanlagen oder Pfosten für Verkehrsschilder (siehe z.B. Abb. 3.6, rechts). In der Regel sind nur wenige Antennen und daraus folgend ein reiner TDMA-Ansatz einsetzbar. Für mehrspurige Straßen ist jedoch der besondere Einfluß von Abschattungen zu berücksichtigen (siehe Leistungsbewertung in Kapitel 9.1.2), was je nach Anforderung an die Zuverlässigkeit zu Systeminstallationen mit mehreren Antennen führen kann. Durch die beabsichtigte Überlap-

jedoch hier aufgrund ihrer anderen (niedrigeren) Anforderungen nicht betrachtet werden.

pfung mehrerer Kommunikationsbereiche (Diversität) kann eine Verbesserung des Funkfeldes erzielt werden (siehe Abschnitt 4.5.3).

Kombinierte Installationen Abhängig von den szenario-spezifischen Voraussetzungen und Anforderungen, kann sich eine Kombination der oben eingeführten Grundformen als am günstigsten anbieten (z.B. eine Nutzung der heute üblichen Ampelanlagen, welche neben seitlichen Ampeln auf beiden Seiten der Straße auch eine Ampel über der Straße als mögliche Antennenstandorte zur Verfügung stellen (siehe Abschnitt 9.1.5.1).

Doppelbaken Zur Realisierung bestimmter Anwendungen werden auch Doppelbakenkonfigurationen eingesetzt: dabei wird der Anwendungsprozess in 2 Teilprozesse aufgeteilt, die jeweils an der ersten bzw. zweiten Bake abgewickelt werden. Der Abstand der Baken beträgt typischerweise zwischen ca. 10-20 m. Die Zeit zwischen den Baken (für eine Geschwindigkeit von 160 km/h und einem Bakenabstand von 10 m sind dies z.B. 225 ms) wird dann dazu genutzt, bestimmte Operationen innerhalb der OBU (z.B. Authentifizierungsalgorithmen für Chipkarten mit elektronischem Geld) oder eine Klassifizierung des Fahrzeugs seitens der Bake durchzuführen. Durch die zunehmende Leistungsfähigkeit der eingesetzten Chipkarten können diese Operationen jedoch inzwischen innerhalb einer Kommunikationszone abgewickelt werden: Doppelbaken werden daher vermutlich in der Zukunft eine geringere Rolle spielen.

3.3 Mikroskopische Eigenschaften der Fahrzeugmobilität

Da die mobilen Stationen (On-Board Units OBUs) für die hier betrachteten Anwendungen im Straßenverkehr direkt mit den Fahrzeugen verbunden sind, ist die Charakteristik des Verkehrsflusses ein wesentlicher Faktor für den Entwurf und die Bewertung des Kommunikationssystems.

Folgende Parameter sind dabei von besonderer Bedeutung:

- die Verteilung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge bestimmt die zur Verfügung stehende Kommunikationszeit innerhalb der Kommunikationszone des DSRC-Systems,
- die Dichte des Verkehrsflusses (Verkehrsstärke) beeinflusst die von den Kommunikationsprotokollen zu tragende Last,
- die Verteilung der Zwischenankunftszeiten der Fahrzeuge hat einen wesentlichen Einfluß auf die Anzahl der gleichzeitig in einer Kommunikationszone kommunizierenden OBUs
- die Abstandsverteilung der Fahrzeuge bestimmt die Häufigkeit möglicher Abschattungssituationen
- die Verteilung der Fahrzeugtypen ist aufgrund der unterschiedlichen funktchnischen Einflüsse der Fahrzeugformen mitbestimmend für das Auftreten bestimmter Kanaleigenschaften und damit verbundener Bitfehlerraten
- der Verlauf der Spur der Fahrzeuge innerhalb der Kommunikationszone (z.B. Fahrbahnwechsel) führt zu wechselnden funktchnischen Bedingungen

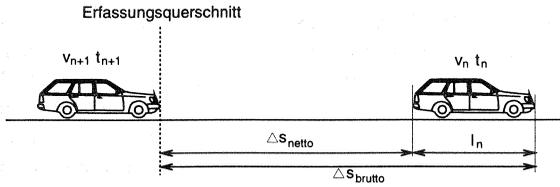


Abbildung 3.7: Definition Fahrzeugabstände

Im Rahmen der detaillierten Modellierung des Gesamtsystems (siehe Kapitel 8) wird ausführlich auf die Beeinflussung des Gesamtsystems durch die Eigenschaften der Fahrzeugmobilität eingegangen.

Im folgenden werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften der Fahrzeugmobilität im Straßenverkehr eingeführt. Daran anschließend werden die wesentlichen statistischen Eigenschaften der angesprochenen Parameter analysiert und anhand von einzelnen Beispielen vorgestellt. Die eingeführten Beispiele basieren auf eigenen statistischen Auswertungen von Meßdaten von deutschen (A430, A44) und holländischen Autobahnen (A2/NL, siehe Anhang D) sowie entsprechendem Quellenmaterial. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf den Eigenschaften der Fahrzeugmobilität bei fließendem Verkehr auf Autobahnen.

3.3.1 Definitionen und Grundlagen

3.3.1.1 Fahrzeugabstände

Bei der mikroskopischen Betrachtung des Verkehrsflusses ist insbesondere der Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen von Bedeutung. Vorgegeben durch die Erhebungsmethodik für entsprechende Meßdaten (Induktionsschleifen) werden üblicherweise die Zeitpunkte t_n der Durchfahrt der Fahrzeugspitzen an einem vorgegebenen Querschnitt erfaßt. Weiterhin werden die Länge der Fahrzeuge l_n , deren Geschwindigkeit v_n sowie eine zugeordnete Fahrbahn F_n bestimmt (vgl. Abb. 3.7). Aus der Differenz der Passagezeitpunkte zweier auf derselben Spur aufeinanderfolgender Fahrzeuge läßt sich die Zeitdifferenz Δt_{brutto} ableiten, welche als *Bruttozeitlücke* bezeichnet wird:

$$\Delta t_{brutto} = t_n - t_{n-1}.$$

Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs v_n und der Länge des Fahrzeugs wird die *Nettozeitlücke* Δt_{netto} und der *Nettoabstand* Δs_{netto} abgeleitet:

$$\Delta t_{netto} = \Delta t_{brutto} - \frac{l_n}{v_n}$$

$$\Delta s_{netto} = \Delta t_{brutto} \cdot v_n - l_n,$$

wobei näherungsweise eine konstante Geschwindigkeit v_n angenommen wird (was für die bei den späteren Betrachtungen zum Abschattungseffekt relevanten sehr kurzen Zeitlücken vertretbar ist).

Faßt man das Auftreten der Fahrzeuge als stochastischen Prozeß auf, so sind Bruttozeitlücken als die *Zwischenankunftszeiten* der Fahrzeuge interpretierbar, deren Verteilung für die späteren (kommunikations-) verkehrstheoretischen Betrachtungen von besonderer Bedeutung ist. Abhängig vom Aufbau des DSRC-Systems sind dabei insbesondere die Zwischenankunftszeiten von Fahrzeugen auf benachbarten Fahrbahnen von Interesse, so daß für die Berechnung der Bruttozeitlücke auch Daten von mehreren Richtungsfahrbahnen berücksichtigt werden können. In diesem Fall wird in Abgrenzung zur fahrbahnbezogenen Betrachtung von einer querschnittsbezogenen Betrachtung gesprochen.

3.3.1.2 Bildung von Fahrzeugverbänden

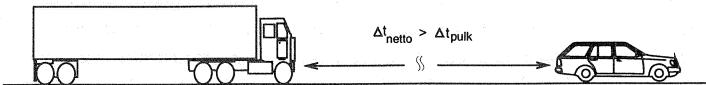
Die Eigenschaften eines an einem bestimmten Querschnitt zu beobachtenden Verkehrsflusses sind das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von:

- physikalischen Gesetzmäßigkeiten und
- Entscheidungen bzw. Verhaltensweisen des Fahrers als Reaktion auf den ihn umgebenden Verkehrsfluß (unter Berücksichtigung der Verkehrsregeln)

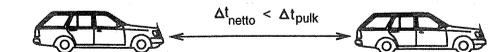
Hierzu sind im Bereich der Verkehrswissenschaft umfangreiche Untersuchungen vorgenommen worden z.B. im Zusammenhang mit dem Entwurf von Straßennetzen, der Vorhersage von Verkehrsstauungen und der Analyse von Verkehrssicherheitsaspekten.

Für die hier durchgeführte mikroskopische Betrachtung der Fahrzeugmobilität an einem bestimmten Querschnitt ist in Übereinstimmung mit diesen Untersuchungen und der eigenen Anschauung folgende Unterscheidung relevant:

- *Freifahrende* Fahrzeuge bewegen sich mit ihrer Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} unbeeinflußt von Nachbarfahrzeugen, insbesondere unbeeinflußt von einem vorausfahrenden Fahrzeug.



- *Gebunden fahrende* Fahrzeuge bewegen sich in einem Verbund von Fahrzeugen (Pulk). Die Geschwindigkeit wird vorgegeben durch das vorausfahrende Fahrzeug.



Die Klassifizierung in freifahrende und gebunden fahrende Fahrzeuge wird anhand der Nettozeitlücke Δt_{netto} vorgenommen. Der Nettoabstand gebunden fahrender Fahrzeuge unterschreitet den Schwellwert Δt_{pulk} . In der Literatur finden sich abhängig vom Untersuchungsgegenstand Werte für Δt_{pulk} zwischen 1.5 und 5 Sekunden [38, 47, 5]. Eine Faustformel für den sich einstellenden Sicherheitsabstand

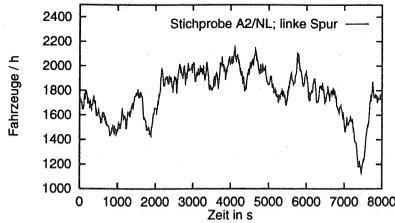


Abbildung 3.8: Kurzzeitige Schwankungen der Verkehrsstärke (Stichprobe A2/NL)

d_{sec} im Pulk leitet sich aus dem Produkt aus Geschwindigkeit des Fahrzeugs v und der mittleren Reaktionszeit t_{reac} ab:

$$d_{sec} = v \cdot t_{reac}.$$

Nachfolgend werden unter gebunden fahrenden Fahrzeugen jene Fahrzeuge verstanden, deren Nettozeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug so klein ist, daß davon auszugehen ist, daß sich das Fahrzeug im Bereich des - vom Fahrer individuell eingeschätzten - minimalen Sicherheitsabstandes bewegt. $\Delta t_{pulk} = t_{reac}$ wird im folgenden in Übereinstimmung mit [47] zu 1.5 Sekunden gesetzt, siehe Abschnitt 3.3.5.

3.3.1.3 Verkehrsstärken

Die Verkehrsstärke λ läßt sich aus der mittleren Bruttozeitlücke bzw. der mittleren Zwischenankunftszeit der Fahrzeuge ableiten:

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t_{brutto}}.$$

Die Verkehrsstärke kann kurzzeitig (im Sekundenbereich) erheblichen Schwankungen unterliegen, siehe Abb. 3.8. Bei einem stationären Verkehrsfluß und entsprechender Stichprobenauswahl (siehe unten) kann die mittlere Verkehrsstärke als konstant angenommen werden.

3.3.1.4 Fahrzeugtypen

Für die hier durchgeführten Betrachtungen wird eine Unterscheidung in Personenkraftwagen und Lastkraftwagen anhand der Fahrzeuglänge vorgenommen. Die Grenze wurde in Übereinstimmung mit [38] bei 5.4 m festgesetzt.

Die Berücksichtigung von Motorrädern kann besondere Anforderungen an ein DSRC-System stellen und ist daher für den Systementwurf und die Bewertung von besonderem Interesse. Da Motorräder jedoch bei der weit verbreiteten Erfassung von Meßdaten mittels Induktionsschleifen aus technischen Gründen nicht erkannt werden, liegt nur sehr wenig Datenmaterial vor. Für die nachfolgend vorgenommene Betrachtung der typischen Eigenschaften der Fahrzeugmobilität anhand der vorliegenden Stichproben werden Motorräder deshalb zunächst nicht weiter berücksichtigt.

Da Motorräder aufgrund der geringeren Fahrzeugabmessungen eine extrem dichte Pulkbildung ermöglichen (sowohl parallel auf einer Spur wie auch hintereinander bzw. versetzt), wird dieser Fahrzeugtyp bei der späteren Systembetrachtung für die Analyse von Extremlastzuständen von Bedeutung sein (siehe Kapitel 7).

3.3.1.5 Anmerkungen zur Auswahl der Stichproben

Die nachfolgend vorgestellten Daten beruhen auf der Auswertung von Stichprobenmessungen von zwei- und dreispurigen Autobahnteilstücken zu unterschiedlichen Tageszeiten (siehe Anhang D). Für die Auswertung sind dabei jeweils Stichproben für einen Zeitraum berücksichtigt worden, der einen weitgehend stationären Verkehrsablauf gewährleistet (zwischen zwei und drei Stunden). Der Umfang der jeweiligen Stichproben bewegt sich im Bereich von 2400 - 6000 Fahrzeugen (abhängig von der Verkehrsdichte).

3.3.2 Geschwindigkeitsverteilung

Über die Geschwindigkeitsverteilung auf Autobahnen existieren zahlreiche statistische Untersuchungen (z.B. [38]), die die Aussage stützen, daß sich die Geschwindigkeitsverteilung in fließendem Verkehr durch eine entsprechend dimensionierte Normalverteilung beschreiben läßt. Um der bezüglich der Geschwindigkeit unterschiedlichen Leistungsfähigkeit gerecht zu werden, sollte eine getrennte Betrachtung für Pkw und Lkw vorgenommen werden. Für Lkw ist dabei grundsätzlich mit niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten und geringeren Standardabweichungen zu rechnen als bei Pkw.

Die Abb. 3.9 zeigt die Beobachtungshäufigkeiten für bestimmte Geschwindigkeitsklassen für die rechte (1) und linke Fahrbahn (2) der Stichprobe A 430. Für die linke Fahrspur, auf der fast ausschließlich Pkw zu beobachten sind (98.2 % Pkw-Anteil), läßt sich ein durch eine Normalverteilung anzunähernder Verlauf erkennen. Bei den Ergebnissen für die rechte Fahrspur läßt sich die Überlagerung der Einflüsse durch Lkw (Anteil 40 %; Mittelwert der beobachteten Geschwindigkeiten $81 \frac{km}{h}$) und Pkw (Anteil 60 %; Mittelwert der beobachteten Geschwindigkeiten $97 \frac{km}{h}$) erkennen. Gut erkennbar sind auch die Unterschiede in der Standardabweichung der beobachteten Werte (Pkw: $18.2 \frac{km}{h}$; Lkw: $5.7 \frac{km}{h}$).

3.3.3 Verteilung der Zwischenankunftszeiten (Bruttoabstände)

Für die Analyse der Verteilung der Zwischenankunftszeiten kann zwischen einer fahrspurspezifischen und einer querschnittsbezogenen Betrachtungsweise unterschieden werden.

3.3.3.1 Fahrspurspezifische Betrachtung

Die statistischen Kenndaten der Verteilung der spurbezogenen Zwischenankunftszeiten werden vor allem durch den Anteil der im Pulk fahrenden Fahrzeuge beeinflusst.

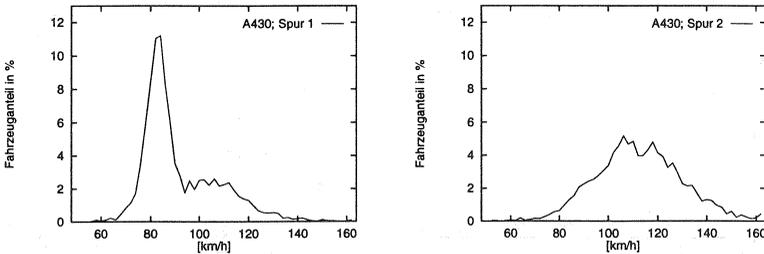


Abbildung 3.9: Geschwindigkeitsverteilung, Stichprobe A430, Spur 1 und 2

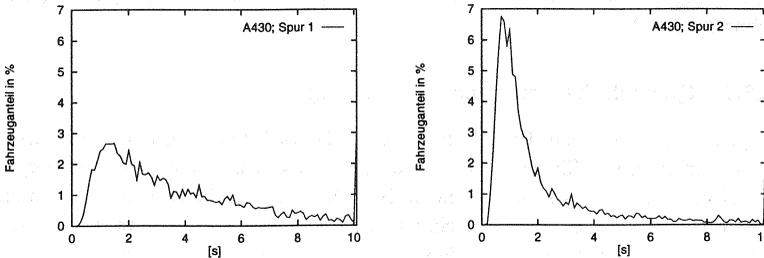


Abbildung 3.10: Verteilung der zeitlichen Abstände, Stichprobe A430, Spur 1 und 2

Besonders charakteristisch ist die insbesondere auf der Überholspur (2) häufig zu beobachtende Pulkbildung mit sehr kurzen Zwischenankunftszeiten. Die Zwischenankunftszeiten der Fahrzeuge sind dann bestimmt durch den Sicherheitsabstand, der abhängig ist vom innerhalb gewisser Grenzen zufällig verteilten Sicherheitsempfinden der Fahrer (dargestellt durch die Reaktionszeit, siehe oben). Es ergibt sich eine Normalverteilung mit geringer Varianz vergleichbare Verteilung der Zwischenankunftszeiten. Für größere zeitliche Abstände hingegen bewegen sich die Fahrzeuge vollkommen unabhängig voneinander mit ihrer Wunschgeschwindigkeit, d.h. die Zwischenankunftszeiten für freifahrende Fahrzeuge sind zufällig verteilt und lassen sich mit einer verschobenen negativ Exponentialverteilung vergleichen. In der Realität ergibt sich bei einer mittelfristigen Betrachtung eine Mischung dieser charakteristischen Zustände.

Die Abb. 3.10 (rechts) zeigt einen typischen Verlauf für die Beobachtungshäufigkeiten auf der linken Fahrspur der Stichprobe A430. Die Grenze zwischen freifahrenden und im Pulk fahrenden Fahrzeugen läßt sich in Übereinstimmung mit [47] und der Stichprobenanalyse auf 1.5 Sekunden festsetzen. Es ergibt sich ein Anteil von 52 % frei fahrender Fahrzeuge. In der Abb. 3.10 (links) ist die Auswertung für die rechte Fahrbahn der Stichprobe A430 dargestellt. Hier überwiegen mit einem Anteil von 84 % die freifahrenden Fahrzeuge mit Zwischenankunftszeiten von über 1.5 Sekunden. Die Verteilung der Beobachtungshäufigkeiten wird daher dominiert von einem durch eine verschobene negativ Exponentialverteilung anzunähernden Verlauf.

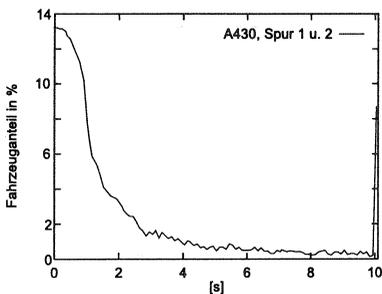


Abbildung 3.11: Querschnittsbezogene Betrachtung der zeitlichen Abstände, Stichprobe A430

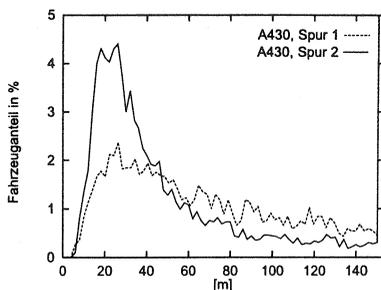


Abbildung 3.12: Nettoabstandsverteilung, Stichprobe A430, Spur 1 und 2

3.3.3.2 Querschnittsbezogene Betrachtung

Die querschnittsbezogene Betrachtung, d.h. die Betrachtung über mehrere Fahrspuren, ist von Interesse für den Entwurf von DSRC-Systemen, die fahrbahnübergreifende Kommunikationszonen verwenden. In Abb. 3.11 sind die Beobachtungshäufigkeiten für den vollständigen Querschnitt (2 Fahrspuren) der Stichprobe A430 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die sich durch die Überlagerung der Ankunftsprozesse ergebende erhöhte Beobachtungshäufigkeit für kurze Zwischenankunftszeiten. Während auf einzelnen Spuren eine Zwischenankunftszeit zwischen 0 und 200 ms für Pkw aus physikalischen Gründen praktisch ausgeschlossen ist, läßt sich für das entsprechende Zeitintervall bei einer Querschnittsbetrachtung über 3 Fahrspuren in dem hier vorliegenden Beispiel eine Häufigkeit von über 15 % beobachten.

3.3.4 Abstandsverteilung im Nahbereich (Nettoabstände)

Die Verteilung der Nettoabstände ist insbesondere im Nahbereich von Interesse, da es hier zu Abschattungssituationen kommen kann. Anders als bei der Betrachtung der Zwischenankunftszeiten gehen hier auch die unterschiedlichen Fahrzeuglängen mit ein. Statistische Reihenuntersuchungen auf Autobahnen wie auch die Auswertung der Stichproben zeigen, daß Fahrzeugabstände unter 2.5 Meter im fließenden Verkehr praktisch nicht auftreten. Aufgrund des Pulkverhaltens ergibt die Stichprobenanalyse für die Fahrspuren mit hohem Pulkanteil eine erhöhte Beobachtungshäufigkeit für Nettoabstände zwischen 20 und 40 Metern. Die Abb. 3.12 zeigt beispielhaft die Beobachtungshäufigkeit für Nettofahrfahrzeugabstände bis zu 150 m (Stichprobe A430).

3.3.5 Aufeinanderfolgen von Fahrzeugtypen im Fahrzeugverbund

Die detaillierte Analyse der Bildung von Fahrzeugverbänden kann noch dahingehend erweitert werden, daß die Häufigkeit für das dichte Aufeinanderfolgen von Fahrzeugen im Pulk nach Fahrzeugtyp differenziert betrachtet wird. Es ist zu erwarten, daß die Pulkbildung stark abhängig vom Fahrzeugtyp erfolgt, d.h. in den

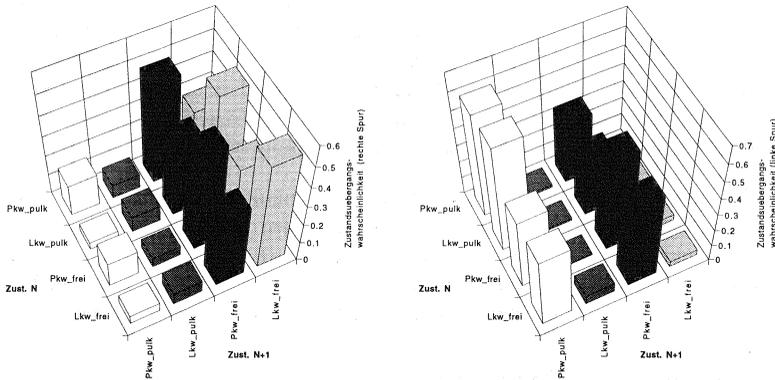


Abbildung 3.13: Beobachtungshäufigkeiten für das Aufeinanderfolgen von frei und gebunden fahrenden Fahrzeugen (Stichprobe A430 Überholspur)

'schnellen' Pulks auf den Überholspuren werden hauptsächlich Pkw beobachtet werden, während sich auf den 'langsameren' Spuren mit hohem Lkw-Anteil gemischte Pulks herausbilden werden, wobei an der vordersten Position eines Fahrzeugverbunds häufig ein Lkw zu finden sein wird.

Für die Leistungsanalyse von DSRC-Systemen wird es dabei von besonderem Interesse sein, zu beobachten, wie häufig ein Pkw in kurzem Abstand hinter einem Lkw zu finden ist. Dies liegt begründet im bereits eingeführten Abschattungseffekt.

Anhand der vorliegenden Stichproben wurde daher zunächst die Beobachtungshäufigkeit für kurze Nettoabstände in Abhängigkeit zum Fahrzeugtyp ermittelt. In einem weiteren Analyseschritt wurde die Abhängigkeit der Beobachtungshäufigkeit für bestimmte Fahrzeugabstände vom Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs zu dem ihm vorausfahrenden Fahrzeug bestimmt, d.h. es wurde das Aufeinanderfolgen von frei und gebunden fahrenden Fahrzeugen beobachtet.

Die Abb. 3.13 zeigt beispielhafte Ergebnisse für die Stichprobe A430. Es wird die jeweilige Beobachtungshäufigkeit für das Aufeinanderfolgen von Pkw (p_platoon) und Lkw (l_platoon) dargestellt, wobei die y-Achse den Zustand des vorausfahrenden Fahrzeugs N und die x-Achse den Zustand des nachfolgenden Fahrzeugs $N + 1$ identifiziert. Für die linke Spur zeigt sich dabei die Pulkbildung in ausgeprägter Form: ein Pkw, der sich bereits in einem Fahrzeugverbund befindet, wird mit größerer Häufigkeit von einem ebenfalls im Fahrzeugverbund fahrenden Pkw gefolgt als mit einem Pkw in größerem Abstand, d.h. im frei fahrenden Zustand (p_free). Für die rechte Spur zeigt sich hingegen ein anderes Bild: hier ist die Pulkbildung weniger stark, ein im Fahrzeugverbund fahrendes Fahrzeug, sei es Pkw oder Lkw, wird hier mit weitaus größerer Häufigkeit von einem Fahrzeug in größerem Abstand gefolgt als wiederum von einem Fahrzeug im dichten Abstand. Außerdem zeigt sich, daß

die Pulkbildung hier Fahrzeugtyp-spezifisch erfolgt: ein Pkw im Fahrzeugverbund wird mit einer dreimal höheren Häufigkeit durch einen Pkw im Fahrzeugverbund wie durch einen Lkw im Fahrzeugverbund gefolgt. Bei einem Lkw im Fahrzeugverbund ist hingegen die Häufigkeit für das dichte Aufeinanderfolgen eines Lkw weitaus höher als die Häufigkeit, daß ein Pkw folgt.

Ziel der späteren Modellierung des Gesamtsystems muß es sein, die so bestimmten Beobachtungshäufigkeiten bei der Entwicklung von Generierungsprozessen zur realistischen Nachbildung des Verkehrsflusses zu reproduzieren (siehe Kapitel 7).

Aus den hier vorgestellten Eigenschaften der Fahrzeugmobilität kann unter Berücksichtigung der bereits genannten Rahmenbedingungen in bezug auf mögliche Systemkonfigurationen die Notwendigkeit der Verwendung von entsprechenden Kanalzugriffsprotokollen abgeleitet werden. Im folgenden Abschnitt wird daher auch auf die Grundlagen für entsprechende Kommunikationsprotokolle eingegangen.

3.4 Kommunikationsprotokolle

Im folgenden werden die Grundlagen für die Entwicklung einer standardisierten Kommunikationsarchitektur für Fahrzeug-Baken-Kommunikation vorgestellt (siehe Kapitel 5).

3.4.1 Das ISO/OSI-Referenzmodell

Das Konzept der Standardisierung offener Systeme hat zum Ziel, daß die eingesetzten Systeme herstellerunabhängig ohne zusätzliche Hilfsmittel unmittelbar miteinander kommunizieren können. Das von der ISO definierte OSI Referenzmodell (Open Systems Interconnection) definiert die Kommunikationsarchitektur von Teilnehmern und Bestandteilen von offenen Systemen [86, 81]. Das Referenzmodell sieht dabei drei Abstraktionsebenen vor:

OSI-Architekturmodell Beschreibung der Architektur von offenen Systemen durch 7 Schichten, die jeweils abgegrenzte Funktionalitäten beinhalten (siehe Abb. 3.14).

OSI-Dienste Beschreibung der Möglichkeiten und Leistungsmerkmale einer Schicht, die einem Benutzer über einen Dienstzugangspunkt angeboten werden. Über die Realisierung der Dienste wird dabei keine Aussage gemacht.

OSI-Protokolle Konkrete Beschreibung der Regeln für die schichtbezogene Kommunikation durch Austausch wohldefinierter Kommandos und dienstbezogener Nutzerinformation.

Jede Schicht, mit Ausnahme der obersten, bietet der nächsthöheren Schicht Dienste (*Services*) an. Um die Dienste erbringen zu können, erfolgt eine Informationsübermittlung zwischen der Instanz der jeweiligen Schicht eines Systems und der entsprechenden Partnerinstanz des anderen Systems über sogenannte *Protokolle*. Für diese Übermittlung stehen einer Schicht die Dienste der nächstniedrigeren Schicht zur Verfügung. Innerhalb eines Kommunikationsprozesses kommuniziert also jede Instanz logisch mit ihrer Partnerinstanz, physisch nur mit der Instanz der nächsthöher-

lungen sowie die IEEE 802.3 (CSMA/CD)/803.2 (Logical Link Control) Standards eingegangen.

Durch die IEEE 802-Standards, die von der ISO als ISO 8802-Standards übernommen worden sind, werden für lokale Netze nur die Bitübertragungsschicht (Schicht 1 nach ISO-OSI Referenzmodell) und die Datensicherungsschicht (Schicht 2) definiert. Während die IEEE 802 Bitübertragungsschicht systembedingt nicht als Basis für die unter vollkommen anderen physikalischen Bedingungen arbeitenden DSRC-Systeme herangezogen werden können, sind Konzepte der LAN-Datensicherungsschicht für eine Anpassung an die besonderen Anforderungen von DSRC-Systemen geeignet und sollen daher hier vorgestellt werden.

3.4.2.1 Dynamische Kanalzuordnung

Ein wesentliches Problem in lokalen Netzen ist die Verteilung der zur Verfügung stehenden Kanalkapazität auf die einzelnen Stationen. Man kann bei der Betrachtung von folgenden Grundannahmen ausgehen (siehe auch [81]):

- Die Stationen stellen innerhalb statistisch verteilter Zeitintervalle Datenrahmen für eine Datenübertragung bereit. Eine Station ist solange blockiert, bis der Datenrahmen gesendet wurde.
- Alle Stationen senden und empfangen auf einem einzigen Kanal. Es können daher Konkurrenzsituationen auftreten, die durch die verwendeten Protokolle vermieden bzw. aufgelöst werden müssen.
- Kommt es beim Empfang eines Datenrahmens zu einer Überschneidung mit der Übertragung anderer Datenrahmen, spricht man von einer Kollision. In diesem Fall ist eine wiederholte Übertragung der kollidierten Datenrahmen erforderlich.
- Die Stationen können entweder kontinuierlichen Zugriff auf den Kanal erhalten (*continuous time*) oder es wird ein Zeitraster vorgegeben, welches einen Zugriff auf den Kanal innerhalb einzelner Zeitintervalle, sog. Slots, ermöglicht (*slotted time*).
- Durch eine Trägererkennung (*carrier sensing*) kann es den Stationen ermöglicht werden, vor dem Senden eines Datenrahmens festzustellen, ob der Kanal bereits von einer anderen Station genutzt wird.

Basierend auf diesen Grundannahmen sind eine Reihe von Protokollen entwickelt worden, von denen insbesondere die an der Universität von Hawaii von Abramson/Roberts entwickelten Protokolle, die sog. ALOHA Protokolle, eine weitreichende Bedeutung erlangt haben [4].

3.4.2.2 ALOHA-Protokolle

Unsynchronisiertes ALOHA (*Pure ALOHA*) Das ALOHA-Protokoll arbeitet in seiner Grundform (*pure ALOHA*) nach dem einfachen Prinzip, daß jede Station die Datenrahmen unmittelbar nachdem sie zur Übertragung bereit gestellt werden absendet. Nach der Übertragung erwartet die sendende Station einen Feedback über den erfolgreichen Empfang des Datenrahmens. Kollidierte Datenrahmen, die in diesem System bei entsprechender Last häufig auftreten, werden nach einer gewissen

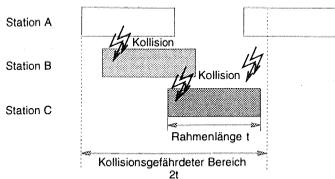


Abbildung 3.15: Reines Aloha

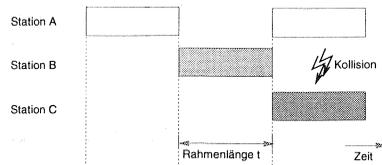


Abbildung 3.16: Slotted Aloha

Wartezeit erneut übertragen. Die Wartezeit muß dabei zufällig gewählt werden, um zu verhindern, daß die Pakete erneut kollidieren (vgl. Abb. 3.15).

Für den Durchsatz S eines reinen ALOHA-Systems (Verhältnis zwischen übertragenen Rahmen zur Rahmendauer) mit sehr vielen unkoordinierten Stationen ergibt sich folgende Abhängigkeit zur Belastung G :

$$S = G \cdot e^{-2G}.$$

G steht dabei für die mittlere Anzahl der erzeugten Rahmen pro Rahmendauer. Die Wahrscheinlichkeit $Pr[k]$, daß innerhalb der gegebenen Rahmendauer k Rahmen generiert werden, kann dabei durch eine Poissonverteilung beschrieben werden:

$$Pr[k] = \frac{G^k \cdot e^{-G}}{k!}.$$

Der Durchsatz des ALOHA-Systems wird begrenzt durch sich überlappende Übertragungen von Datenpaketen (siehe Abb. 3.15). Durch die fehlende Synchronisierung der Stationen kommt es zu teilweise überlappenden Übertragungen: damit ein Datenpaket erfolgreich übertragen werden kann, darf innerhalb der doppelten Rahmenlänge nur ein Datenpaket übertragen werden. Der maximale Durchsatz des reinen ALOHA-Systems ergibt sich somit bei $G = 0.5$ zu $S = \frac{1}{2e} = 0.184$. Es handelt sich somit um ein mit einfachen Mitteln zu realisierendes, aber auch sehr ineffizientes System.

Synchronisiertes ALOHA (Slotted ALOHA) Sind die Stationen in einem ALOHA-System ideal synchronisiert, so kann der Durchsatz verbessert werden (siehe Abb. 3.16): Für die Übertragung eines Datenpakets stehen vorgegebene Zeitspannen zur Verfügung (*Time slots*), die von den Stationen genutzt werden können. Die für Überlappungen kritische Zeitperiode wird somit halbiert, da es keine teilweisen Überlappungen mehr geben kann. Der Durchsatz ergibt sich zu:

$$S = G \cdot e^{-G}.$$

Der optimale Durchsatz von $S = \frac{1}{e} = 0.368$ wird bei $G = 1$ erreicht. Durch die Synchronisierung des Systems wurde demnach eine Verdopplung des Durchsatzes erreicht. Bei der praktischen Realisierung muß jedoch beachtet werden, daß eine zuverlässige Synchronisierung der Stationen nur mit teilweise erheblichem technischen Aufwand zu erzielen ist. Die Synchronisierungsinformation wird entweder intern im System verbreitet und reduziert dadurch den Nutzdatenanteil, oder sie wird extern

vorgegeben und erfordert dann einen zusätzlichen Kanal [104]. Ungenauigkeiten der Synchronisierung werden durch entsprechende Schutzzeiten, welche nicht zur Nutzdatenübertragung zur Verfügung stehen, ausgeglichen.

3.4.2.3 Protokolle für lokale Netze

Auf der Grundlage der ALOHA-Protokolle sind eine Reihe von Protokollen vorgeschlagen und analysiert worden, die einen deutlich verbesserten Durchsatz bieten. Im folgenden sollen insbesondere die Varianten vorgestellt werden, welche in der Praxis eine weite Verbreitung gefunden haben.

Trägererkennungsprotokolle ohne Kollisionserkennung Das Ziel der Trägererkennungsprotokolle (*Carrier Sense Multiple Access CSMA*) ist, Überschneidungen von Datenübertragungen durch Berücksichtigung des momentanen Kanalzustandes zu vermeiden: die Übertragung eines Datenpakets wird nicht durchgeführt, wenn aufgrund von der Station vorgenommener Messungen (*Carrier sensing*) von einer bereits stattfindenden Datenübertragung durch eine andere Station auszugehen ist. Aufgrund der Signallaufzeiten im System kann es jedoch dazu kommen, daß eine bereits begonnene Übertragung für eine gewisse Zeitspanne nicht detektiert wird. Für die Durchführung eines erneuten Übertragungsversuchs gibt es verschiedene Ausgestaltungsvarianten:

1-persistent: Es findet eine kontinuierliche Überwachung des Kanals statt, und sobald ein freier Kanal detektiert wird, findet die Übertragung statt. Ist eine Datenübertragung nicht erfolgreich (als Folge einer Kollision), wird die kontinuierliche Überwachung des Kanals nach einer zufällig bestimmten Wartezeit wiederaufgenommen. Warten allerdings bereits mehrere Stationen auf den freien Kanal, so kommt es nach dem Freiwerden des belegten Kanals zwangsläufig zu Datenkollisionen, was den Durchsatz bei hohem Nachrichtenverkehrsaufkommen herabsetzt.

non-persistent: Anstatt einer kontinuierlichen Überwachung setzt die übertragungswillige Station bei einem belegten Kanal für eine zufällig bestimmte Zeitspanne mit der Überwachung aus, und überprüft erst nach Ablauf der Wartezeit den Kanal erneut. Dadurch 'verteilen' sich die Übertragungsversuche bei hoher Last besser als beim 1-persistent-Verfahren, allerdings muß eine erhöhte Verzögerungszeit insbesondere bei geringer Last in Kauf genommen werden.

p-persistent: Bei diesem Verfahren, welches ein synchronisiertes System voraussetzt, werden die kontinuierliche Überwachung des Übertragungskanals mit dem verzögerten Zugriff auf den freien Kanal kombiniert: eine Station, die einen freien Zeitschlitz erkennt, überträgt die Daten in diesem entweder mit der Wahrscheinlichkeit p oder sie wartet mit der Wahrscheinlichkeit $q = 1 - p$ auf den nächsten MiniSlot³, in dem sie wiederum mit der Wahrscheinlichkeit p sendet oder entsprechend wartet. Durch diese 'Zurückhaltung' beim Antreffen eines freien Kanals werden bei entsprechender Wahl von p insbesondere Kollisionen durch gleichzeitige Übertragungen bereits wartender Stationen reduziert.

³Der Minislot ist ein Bruchteil der Paketübertragungsdauer und entspricht z.B. der Signallaufzeit im System.

Trägererkennungsprotokolle mit Kollisionserkennung Während die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten CSMA-Protokolle in der Lage sind, Kollisionen zu vermeiden, berücksichtigen verbesserte Protokolle die Möglichkeit des Endgerätes diese Kollisionen zu detektieren (CSMA/CD *Collision Detection*), wobei sich überlappende Übertragungen unterbrochen werden können. Durch die Verkürzung der Kollisionsperioden ist ein höherer Durchsatz zu erzielen. Das CSMA/CD-Protokoll laut IEEE 802.3 führt eine ununterbrochene Überprüfung des Kanals inklusive Kollisionsdetektion durch (1-persistent CSMA/CD). Nach einer aufgetretenen Kollision wartet die Station eine zufällige Zeitspanne, deren Länge adaptiv an die Anzahl bereits aufgetretener Kollisionen angepaßt wird (binary exponential back-off): nach i bereits aufgetretenen Kollisionen wird ein erneuter Übertragungsversuch nach n Minislots vorgenommen, wobei n als Zufallszahl aus dem Intervall von 0 bis $2^i - 1$ bestimmt wird. Die Station wartet also nach der ersten Kollision entweder 0 oder 1 Minislots, nach 2 Kollisionen zwischen 0 und 3, etc. Der adaptive Algorithmus ermöglicht somit einen Kompromiß zwischen notwendiger Verzögerungszeit und erforderlichem Kollisionsauflösungsvermögen für unterschiedliche Lastfälle. Um die Verzögerungszeit zu begrenzen und um Fehlerfälle frühzeitig zu erkennen und an die darüberliegenden Schichten der Kommunikationsarchitektur weiterleiten zu können, wird nach der 10. Kollision jeder nächste Übertragungsversuch innerhalb von 1023 Zeitschlitzten vorgenommen. Nach der 16. Kollision wird eine Fehlermeldung generiert. Leistungsanalysen des *exponential back-off* Algorithmus und verwandter Algorithmen sind z.B. von [10], [39] vorgenommen worden.

Um eine Kollisionserkennung auch für kurze Rahmenlängen zu gewährleisten, ist es erforderlich, daß eine minimale Rahmenlänge erreicht wird. Unter Berücksichtigung einer Übertragungsrate von 10 Mbit/s und eines maximalen Ausbreitungswegs von 2,5 km ergibt sich eine Mindestlänge von 510 bit, um auch bei einer kurzen Rahmenlänge eine korrekte Kollisionserkennung zu ermöglichen.

Im Zusammenhang einer möglichen Verwendung der Kollisionsdetektion für DSRC-Systeme (siehe Abschnitt 5.3.5) werden die hier beschriebenen Verfahren wieder aufgegriffen.

Weitere Protokollvarianten Da in dem hier betrachteten Zusammenhang die wesentlichen Grundprinzipien von Protokollen für lokale Netze im Hinblick auf ihre Verwendung für den Nahbereichsfunk im Vordergrund stehen, wird nachfolgend auf eine detaillierte Darstellung weiterer Protokollvarianten verzichtet. Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Protokolle für bestimmte Anwendungsfälle sind z.B.:

- Reservierungsverfahren, welche die Reservierung von Kanalkapazität vor der eigentlichen Nutzdatenübertragung vorsehen (Reservation ALOHA)
- Adaptive Verfahren, welche z.B. die Sendewahrscheinlichkeit an die entsprechende Anzahl der auftretenden Kollisionen adaptieren.
- Prioritätsmechanismen, welche z.B. den Stationen mit zunehmender Wartezeit eine höhere Priorität einräumen.

Einige dieser Verfahren werden bei der Darstellung der Leistungsbewertung und Optimierung der Zugriffsprotokolle für den Nahbereichsmobilfunk wieder aufgegriffen

und für die speziellen Anforderungen adaptiert (siehe Kapitel 9). Andere Verfahren sind hingegen für den Nahbereichsmobilfunk nicht geeignet, da ihnen Annahmen zugrunde liegen, die nur durch festverdrahtete Stationen erfüllt werden können (siehe [81]).

3.4.2.4 Spezifische Anforderungen in mobilen Umgebungen

Die zuvor betrachteten Protokolle sind für fest verdrahtete Netze entwickelt worden. Für die Adaption dieser Protokolle für mobile Umgebungen müssen insbesondere folgende Bedingungen beachtet werden:

Dynamisch veränderliche Kanalqualität Anders als in festverdrahteten Netzen spielen Bitfehler, die durch einen veränderlichen Signalpegel bedingt werden, eine erhebliche Rolle für den Kommunikationsprozeß. Einflußfaktoren sind dabei der veränderliche Abstand von Sender und Empfänger sowie die Einflüsse durch Mehrwegeausbreitung und Abschattung. Die Gründe für eine Übertragungsstörung lassen sich somit in mobilen Umgebungen nicht wie in festverdrahteten Lokalen Netzen in erster Linie auf Datenkollisionen reduzieren. Das Problem bei der Dimensionierung der Protokolle für mobile Netze ist, daß zur Vermeidung von Datenkollisionen die Sendewahrscheinlichkeit verringert werden muß, während bei Übertragungsfehlern bedingt durch einen schwachen Signalpegel die Sendewahrscheinlichkeit erhöht werden sollte.

Hidden Station Problem In festverdrahteten Netzen ist davon auszugehen, daß jede Station alle anderen Stationen 'hören' kann. In mobilen Netzen ist dagegen aufgrund der unterschiedlichen Abstände der sendenden Stationen (und der damit verbundenen Dämpfung des Signals) nicht gewährleistet, daß alle Stationen den Kanalzustand durch Abhören korrekt einschätzen können. Hinzu kommt, daß auch die Eigenschaften der Antennen dazu führen können, daß sendende Stationen sich nicht gegenseitig hören können, aber trotzdem beim Empfänger eine Kollision verursachen.

In Kapitel 5 wird ein Vorschlag für eine Spezifikation einer Kommunikationsarchitektur für DSRC-Systeme vorgestellt, für die wo möglich, Konzepte der Protokolle für Lokale Netze übernommen wurden, aber an die speziellen Bedingungen der DSRC-Systeme angepasste Protokollmechanismen entwickelt wurden. Eine besondere Rolle bei der Entwicklung der DSRC-Kommunikationsarchitektur und anschließenden Bewertung spielen dabei die Eigenschaften des Übertragungskanals von Fahrzeug-Baken-Systemen. Diese werden im folgenden Kapitel ausführlich diskutiert.

Eigenschaften des Funkkanals von Fahrzeug-Baken-Systemen

Die Analyse der Eigenschaften des Funkkanals von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen setzt eine detaillierte Modellierung der Antennencharakteristika und der Einflüsse des Ausbreitungsraums voraus. Im folgenden wird daher die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur deterministischen Berechnung des Funkfeldes (insbesondere bei 5.8 GHz) von Fahrzeug-Baken- bzw. DSRC-Systemen in Straßenverkehrsszenarien vorgestellt und anhand von Vergleichen zwischen Messungen und Modellierungsergebnissen validiert.

Unter Verwendung der entwickelten Methode werden die grundsätzlichen Eigenschaften sowie die dominanten Störeinflüsse in DSRC-Szenarien ermittelt. Weiterhin werden Vergleiche verschiedener Realisierungsoptionen, wie z.B. die Polarisation und Einsatz von Diversitätsverfahren, im Hinblick auf eine Optimierung der Eigenschaften des Funkfeldes diskutiert.

Aus den Eigenschaften des Funkfeldes lassen sich wichtige Anforderungen an die standardisierte DSRC-Kommunikationsarchitektur und Auswahl von Systemkonfigurationen ableiten.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten deterministischen Betrachtungen bilden die Grundlage für die in Kapitel 8 vorgestellte integrierte Systemsimulation von Fahrzeugmobilität, Kommunikationsprotokollen und Kanaleigenschaften.

4.1 Grundlagen zur deterministischen Systembetrachtung

4.1.1 Zeitvarianz des Übertragungskanals

Aufgrund der Mobilität der Mobilstation und der makroskopischen Systemumgebung sowie zeitlicher Schwankungen der elektromagnetischen Eigenschaften des Mediums ist das Übertragungsverhalten des Funkkanals von Fahrzeug-Baken-Systemen zeitabhängig (fading channel). Aufgrund von Mehrwegeausbreitung durch Reflexionen in der Systemumgebung kommt es immer wieder zu starken Signalpegeleinbrüchen (multipath channel). Die Kanaleigenschaften und somit die für die spätere Analyse des Protokollverhaltens relevante Bitfehlerwahrscheinlichkeit BER hängen zu jedem Zeitpunkt von der momentanen Ausrichtung, Position und Geschwindigkeit der Mobilstation sowie vom aktuellen Zustand und der jeweiligen Zustandsänderungen der Systemumgebung ab:

$$BER = BER(t) = BER(\vec{\alpha}_{mob}, \vec{r}_{mob}, \vec{v}_{mob}, \Sigma_{env}, \dot{\Sigma}_{env}, \Sigma_{medium}, \dot{\Sigma}_{medium}, \dots)$$

$\vec{\alpha}_{mob}$: Ausrichtung der Mobilstation

\vec{r}_{mob}	: Ortsvektor der Mobilstation
\vec{v}_{mob}	: Geschwindigkeit der Mobilstation
Σ_{env}	: Zustand der makroskopischen Systemumgebung (Position, Lage und Materialeigenschaften von störenden Objekten)
$\dot{\Sigma}_{env}$: Zustandsänderung der makroskopischen Systemumgebung
Σ_{medium}	: Zustand des Mediums
$\dot{\Sigma}_{medium}$: Zustandsänderung des Mediums

Um die Eigenschaften des binären Kanals zu erfassen, ist jedoch zunächst eine Betrachtung des analogen Kanals erforderlich: Vernachlässigt man alle Nichtlinearitäten, so ist der analoge Kanal zu jedem Zeitpunkt ein linearer Filter mit der Übertragungsfunktion $C(f, t) = |C(f, t)| \cdot e^{j\Theta(f, t)}$, an dessen Ausgang additives weißes Gauß-verteiltetes Rauschen überlagert wird (memoryless AWGN channel).

Unter der Voraussetzung, daß die Anzahl der unterschiedlichen Reflektoren und Ausbreitungspfade groß ist (bei Systemen größerer Reichweite, z.B. GSM), kann der zentrale Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitstheorie angewendet werden. Die Übertragungsfunktion $C(f, t)$ ist dann ein komplexwertiger Gauß-verteilter Zufallsprozeß. Ist eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger vorhanden (line of sight), läßt sich der Betrag der Übertragungsfunktion $|C(f, t)|$ bei genügend vielen unterschiedlichen Ausbreitungspfaden durch eine Rice-Verteilung beschreiben.

Aufgrund der begrenzten Reichweite von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen ist jedoch die Anzahl der in Frage kommenden relevanten Reflektoren und der unterschiedlichen Ausbreitungspfade gering und eine Anwendung der oben eingeführten Verteilung nicht sinnvoll. Aufgrund der begrenzten Dimensionen der zu betrachtenden Szenarien ist es für Fahrzeug-Baken-Szenarien möglich, eine zunächst deterministische Analyse für charakteristische Verkehrssituationen vorzunehmen und daraus ein stochastisches Kanalmodell abzuleiten (siehe Kapitel 8).

4.1.2 Deterministisches Kanalmodell

Die Eigenschaften der Übertragungsstrecke hängen zu jedem Zeitpunkt auf vielfältige Weise von der Mobilität der Fahrzeuge ab. Eine genaue Nachbildung dieser Abhängigkeiten ist allerdings sehr aufwendig.

In einem ersten Ansatz werden daher folgende vereinfachende Annahmen getroffen (quasistatische Näherung, Begründung siehe Abschnitt 4.3.3.2):

- der Kanal zeigt langsames Schwundverhalten.
- Der Doppler-Effekt wird vernachlässigt.

Der Einfluß der Mobilität der Fahrzeuge äußert sich demnach nur in der Position und Ausrichtung der Mobilstation und der störenden Objekte im Ausbreitungsraum. Es ergibt sich somit ein rein geometrisches Ausbreitungsmodell, das folgende Komponenten umfaßt (vgl. Abb. 4.1):

- die binäre Informationsquelle, deren Symbole (0,1) als gleichverteilt angesehen werden,

- den Modulator, der einen Eingangsbitstrom fortlaufend in kontinuierliche leitungsgebundene Signalformen umwandelt,
- die Sendeantenne, die die Signalformen in Raumwellen umsetzt,
- den Ausbreitungsraum, der das quasihomogene Medium und die makroskopische Systemumgebung in sich vereint,
- die Empfangsantenne, die die empfangenen Raumwellen in leitungsgebundene Signalformen umsetzt,
- den Demodulator, der die empfangenen Signalformen in einen fehlerhaften Ausgangsbitstrom zurückwandelt,
- die binäre Informationssenke,
- die Rauschquellen, die zu einer einzigen additiven Rauschquelle am Eingang des Demodulators zusammengefaßt werden,
- die Verkehrssituation, die die momentan vorhandenen Fahrzeugtypen und deren räumliche Konfiguration umfaßt.

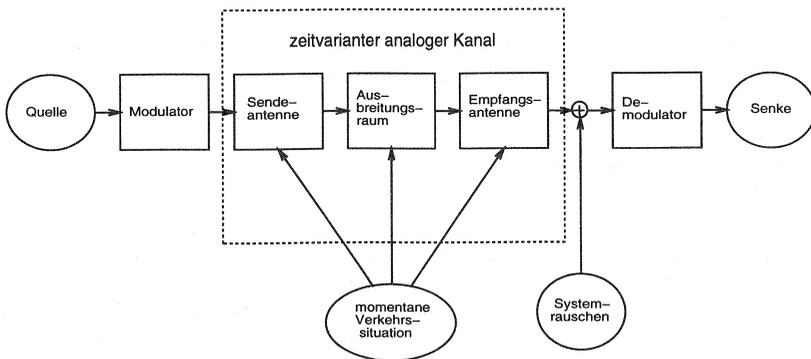


Abbildung 4.1: Quasistatisches Kanalmodell

Zur besseren Orientierung für die nachfolgenden Abschnitte seien hier zusätzlich zu den bisher gemachten Annahmen weitere Vereinfachungen zur Kanalmodellierung vorweggenommen:

- Nichtlinearitäten aller Art werden nicht berücksichtigt.
- Der Betrag der Übertragungsfunktion sei innerhalb der Bandbreite der Signalübertragung eine Konstante.
- Das Systemrauschen sei Gauß-verteilt.
- Der Empfänger sei ein kohärenter oder inkohärenter Korrelationsempfänger (matched filter).
- Die Wellenausbreitung sei quasioptisch und die Reflexionsflächen seien glatt.

Im nächsten Abschnitt werden zunächst die Eigenschaften von Antennen im Hinblick auf die Modellierung des Übertragungskanals betrachtet.

4.2 Modellierung der Antenneneigenschaften

Die Charakteristik der Übertragungstrecke zwischen Bake und mobiler Station wird in hohem Maße von den Eigenschaften der verwendeten Antennen, insbesondere der Bakenantenne, beeinflusst. Im folgenden werden daher die Entwurfskriterien und die für die Entwicklung von realen Antennen eingesetzten Antennenentwurfsmechanismen vorgestellt. Durch die Anwendung dieser Mechanismen für die Modellierung kann eine realitätsnahe Nachbildung der Eigenschaften beliebiger Antennen erzielt werden, was eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Modellierung und Optimierung der Übertragungstrecke darstellt. Dabei werden sowohl 'Shaped Beam'- wie auch 'Pencil Beam'-Antennen betrachtet.

4.2.1 Antennenentwurf für Shaped-Beam-Antennen

4.2.1.1 Randbedingungen für den Entwurf von Shaped-Beam-Antennen

Für den Antennenentwurf bestehen abhängig von der Anwendung mehr oder weniger strenge Anforderungen an:

- Antennencharakteristik (z.B. Antennengewinn, Hauptstrahlbreite, maximale Höhe der Nebenmaxima, Richtungsselektivität)
- Kosten/Aufwand
- Gewicht/Größe
- Betriebsfrequenz/Bandbreite
- Flexibilität
- Zuverlässigkeit

Angesichts einander widersprechender Entwurfsziele ergibt sich stets eine Vielzahl verschiedener Entwurfsmöglichkeiten. Das Entwurfsproblem wird zunächst durch die Entwurfsziele und die Randbedingungen als auch die Prioritäten für die einzelnen Ziele eingegrenzt. Bei Rundfunkanwendungen spielt z.B. die Antennencharakteristik keine besondere Rolle. Hier geht es im wesentlichen darum, die Zuverlässigkeit zu maximieren und die Kosten so gering wie möglich zu halten. Richtfunkanwendungen (Punkt-zu-Punkt Verbindungen) stellen dagegen erhöhte Anforderungen an die Direktivität der Antenne. Hier stehen Richtungsselektivität und Gewinn im Vordergrund. Bei Antennen, die einen begrenzten Bereich abdecken sollen (Sektorantennen) schließlich, ist die Form der Antennencharakteristik bestimmend.

Bei den nachfolgend durchgeführten Betrachtungen steht die Nachbildung typischer Antenneneigenschaften für eine spätere Verwendung bei der Funkfeldanalyse im Vordergrund. Technologische Aspekte werden dabei nicht betrachtet. Hierzu wird auf Arbeiten in der Hochfrequenztechnik und die entsprechende Fachliteratur verwiesen [7].

Entwurfsziele Der Entwurf von Baken-Antennen orientiert sich an den Vorgaben für den gewünschten Kommunikationsbereich. Die Abmessungen des gewünschten Kommunikationsbereiches werden durch die Geometrie des Szenarios und durch die Anwendung bestimmt. Die minimal erforderliche Abmessung des Kommunikationsbereiches in Fahrtrichtung hängt z.B. von der Datenmenge, der Bitrate, der

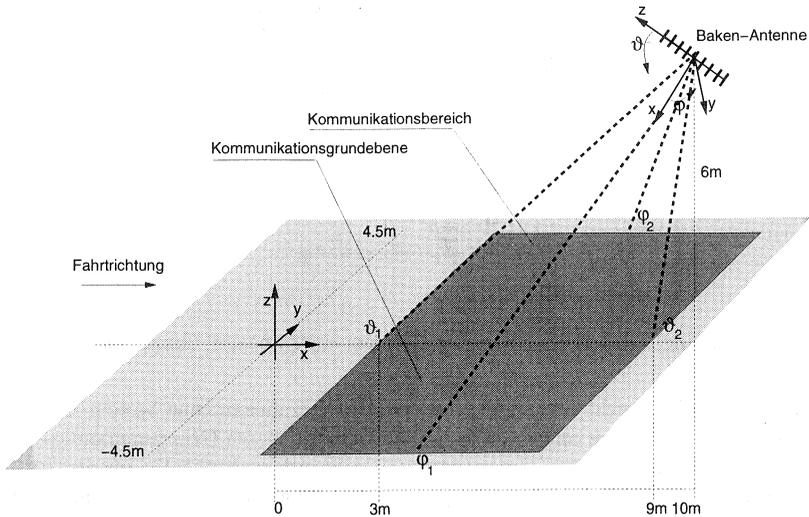


Abbildung 4.2: Vorgaben zum Entwurf einer Baken-Antenne

Höhe der Mobilstation und der Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge ab. Bei Anwendungen von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen auf Autobahnen oder im innerstädtischen Bereich erstreckt sich der Kommunikationsbereich idealerweise zwischen der Baken-Antenne und einem rechteckförmigen Fahrbahnabschnitt (siehe Abb. 4.2). Der gewünschte Kommunikationsbereich sollte möglichst gut erfaßt und scharf gegenüber der Umgebung abgegrenzt werden. Externe Störeinflüsse müssen weitestgehend reduziert, und benachbarte Kommunikationseinrichtungen dürfen im Sinne der Frequenzökonomie (frequency reuse) nur minimal gestört werden. Für bestimmte Anwendungen, namentlich Automatische Gebührenerhebung, müssen Bereiche außerhalb der Fahrbahnbegrenzungen der bemauteeten Straße explizit ausgeschlossen werden, um Fehlabbuchungen zu vermeiden. Zudem sollten die Übertragungsbedingungen innerhalb des Kommunikationsbereiches annähernd gleich bleiben. Da im Nahbereich (um 10 Meter) die Richtungsselektivität der Baken-Antenne über die Ausbreitungsdämpfungen dominiert, wird hier die äußere Form des Kommunikationsbereiches in erster Linie von der Baken-Antenne bestimmt. Eine Baken-Antenne mit einem rechteckigen homogenen Strahlungsfeld erfüllt die Anforderungen in idealer Weise. Hieraus ergeben sich strenge Anforderungen an die Form der Antennencharakteristik und die anzuwendenden Entwurfsverfahren (shaped beam design). Aus technologischen Gründen (Transpondertechnologie, siehe auch Abschnitt 4.5.1) kommt nur eine halbschräge Ausrichtung der Antenne in Frage.

Einsatz planarer Gruppenantennen Die Anforderungen für den Entwurf einer Baken-Antenne können besonders gut von planaren Gruppenantennen erfüllt werden. Reflektorantennen sind wegen ihrer geringen Flexibilität weniger geeignet

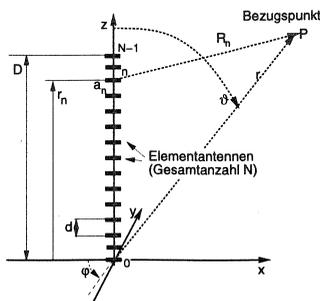


Abbildung 4.3: Lokales Koordinatensystem einer linearen Gruppenantenne

und werden hier nicht betrachtet. Eine planare Gruppenantenne besteht aus zwei orthogonal zueinander angeordneten äquidistanten linearen Gruppenantennen. Die Richtwirkung der planaren Gruppenantenne setzt sich multiplikativ aus den Richtwirkungen der beiden linearen Gruppenantennen zusammen. Die Baken-Antenne wird daher für beide Richtungen getrennt entworfen. Der Einfluß der Charakteristik der Elementantennen wird vernachlässigt (Kugelstrahler-Näherung). Die Abstände der Elementantennen liegen typischerweise bei $\lambda/2$ ¹.

Unter Fernfeldbedingungen für die einzelnen Elementantennen und bei einheitlicher Polarisation ergibt sich die Gesamtfeldstärke $E_G(\vec{r})$ aus der Summation der Einzelstärken $E_n(\vec{R}_n)$, $\vec{R}_n = \vec{r} - \vec{r}_n$ nach Betrag und Phase (vgl. Abb. 4.3):

$$\begin{aligned} E_G(\vec{r}) &= \sum_{n=0}^{N-1} E_n(\vec{R}_n) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot f_n(\vartheta_n, \varphi_n) \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot R_n}}{R_n} \end{aligned} \quad (4.1)$$

\vec{r}_n : Position der n-ten Elementantenne im lokalen Koordinatensystem der Gruppenantenne ($n = 0..N - 1$)

R_n : Abstand vom Beobachtungspunkt zur n-ten Elementantenne

$f_n(\vartheta_n, \varphi_n)$: Charakteristik der n-ten Elementantenne

a_n : effektive Anregung der n-ten Elementantenne

β : Wellenzahl $2\pi/\lambda$

Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung (mutual coupling, vgl. [80]) der Elementantennen, hängt die Anregungsgröße der einzelnen Elementstrahler nicht nur vom jeweiligen Generator an deren Eingang ab, sondern auch von den Anregungsgrößen der Nachbarelemente. Dieser Effekt ist umso kleiner, je größer der Abstand und je ausgeprägter die Richtcharakteristik der Elemente ist. Bei der Systembeschreibung

¹Größere Abstände können neben dem Hauptmaximum zu weiteren Maxima mit gleicher Amplitude (grating lobes) führen. In den meisten Fällen sind diese unerwünscht, da dann auch aus anderen Richtungen Signale empfangen werden, die zu Störungen führen.

bung von Gruppenantennen sowie beim Antennenentwurf kann davon ausgegangen werden, daß das Speisetzwerk diesen Effekt vollständig kompensiert.

Die oben eingeführte Gleichung 4.1 beschreibt das elektrische Feld in der strahlenden Nahfeldregion der Gruppenantenne. Für genügend große Entfernungen zum Phasenzentrum der Gruppenantenne (Fernfeld der Gruppenantenne) und bei identischen Elementantennen mit gleicher Ausrichtung folgt aus der Definition der Antennencharakteristik mit Gleichung 4.1:

$$\begin{aligned} f_G(\vartheta, \varphi) &= f_E(\vartheta, \varphi) \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} h_n \cdot e^{-j\beta\Delta r} \right| \\ &= f_E(\vartheta, \varphi) \cdot |f_S(\vartheta, \varphi)| \end{aligned} \quad (4.2)$$

h_n : normierte effektive Anregung der n-ten Elementantenne

f_E : Charakteristik der Elementantenne

f_G : Charakteristik der Gruppenantenne

f_S : komplexwertiger Systemfaktor der Gruppenantenne

Δr : Wegdifferenz $R_n - r$

Die Charakteristik der Gruppenantenne ist somit entkoppelt von der Charakteristik der Elementantennen; der Systemfaktor f_G hängt nur von den Anregungsgrößen und der räumlichen Anordnung der Elementantennen ab. Für den Systemfaktor ergibt sich mit $\Delta r \approx -n \cdot d \cdot \cos(\vartheta)$ (d ist der Abstand zweier Elementantennen ²⁾ für entsprechend große Abstände in guter Näherung:

$$f_S(\vartheta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n \cdot e^{j\beta \cdot n \cdot d \cdot \cos(\vartheta)} \quad (4.3)$$

Durch entsprechende Umformung (Substitution $u = \frac{\cos(\vartheta)}{\lambda}$) nimmt der Systemfaktor $f_S(u)$ die Form einer endlichen Fourierreihe an:

$$f_S(u) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot d \cdot u} \quad (4.4)$$

Die Randbedingungen für den Entwurf einer linearen Gruppenantenne Das lokale Koordinatensystem einer äquidistanten linearen Gruppenantenne sei das Referenzsystem nach Abb. 4.3. Zur Veranschaulichung für den Entwurf in x-Richtung dient Abb. 4.2. Die lineare Gruppenantenne sei so ausgerichtet, daß die z-Achse ihres Koordinatensystems senkrecht auf der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels α des gewünschten Kommunikationsbereiches steht. Die Hauptstrahlrichtung $\hat{\vartheta}$ der Gruppenantenne wird damit zu 90° (broadside) festgelegt. Die Rechteckbreite muß so groß gewählt werden, daß der gesamte gewünschte Kommunikationsbereich von der Baken-Antenne erfaßt wird. Der Polarwinkel ϑ kann nur auf der Berandung der Kommunikationsgrundebene seine Extrema annehmen. Die Rechteckbreite berechnet sich damit zu:

$$\Delta\hat{\vartheta} = \vartheta_2 - \vartheta_1$$

²Herleitung der Näherung siehe [80] oder [60]

4.2.1.2 Entwurfsverfahren für lineare äquidistante Gruppenantennen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Randbedingungen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Entwurfsverfahren basierend auf der modifizierten Fourierapproximation für die Modellierung der Eigenschaften konkreter Shaped-Beam-Antennen eingesetzt [60]. Weitere Verfahren zum Entwurf von Shaped-Beam-Antennen werden in [80] vorgestellt. Vereinfachend wird das Verfahren hier anhand des Entwurfs für eine Gruppenantenne mit einem rechteckigen Systemfaktor beschrieben (d.h. die Einflüsse der Ausbreitungsdämpfung werden beim Entwurf der Antennencharakteristik nicht berücksichtigt, so daß das ideale rechteckförmige Strahlungsfeld nur näherungsweise erzielt wird).

Die modifizierte Fourier-Approximation Oben wurde bereits gezeigt (vgl. Gleichung 4.4), daß der Systemfaktor $f_S(u)$ die Form einer endlichen Fourierreihe hat. Die Annäherung des Systemfaktors einer Gruppenantenne an eine Wunschvorgabe ist vergleichbar mit dem aus der digitalen Signalverarbeitung bekannten Problem des Entwurfs von digitalen Filtern [60, 46].

Ausgehend von einer Wunschvorgabe für den Systemfaktor wird bei der modifizierten Fourierapproximation zunächst eine Fourieranalyse durchgeführt. Für den angestrebten Rechtecksystemfaktor ergibt sich die SI-Verteilung [46]. Der Wunschfaktor wird dann durch eine gefensterte Partialsumme angenähert (vergl. Abb. 4.5).

Die Koeffizienten dieser Partialsumme (d.h. die Anregungsfolge $\{a_n\}$ für die Elementstrahler der Näherung) erhält man aus der Multiplikation der Verteilung der Koeffizienten der Fourierreihe $\{h_n\}$ mit einer Gewichtsfunktion (Fenster) w_n :

$$a_n = h_n \cdot w_n$$

Durch die Form der Fensterfunktion ist es möglich, die Konvergenz der Partialsumme gezielt zu beeinflussen.

Im folgenden wird anhand eines Toleranzschemas ein Kriterium für die Qualität der durch das beschriebene Verfahren erzielten Näherung eingeführt.

Das Toleranzschema für den Rechteckfaktor und wichtige Kenngrößen

Wie jedes Näherungsverfahren benötigt der Antennenentwurf mindestens eine Steuervariable und mindestens ein Abbruchkriterium. Abstandsmaß und Abbruchkriterien werden dabei aus der Antennencharakteristik abgeleitet. Für die hier erforderliche Näherung des Rechteckfaktors $f_R(\vartheta)$ mit der Hauptstrahlrichtung $\hat{\vartheta}$ und der Rechteckbreite $\Delta\hat{\vartheta}$ lassen sich Abstandsmaß und Abbruchkriterien aus dem Toleranzschema nach Abb. 4.4 gewinnen.

Dabei kommen folgende Definitionen zur Anwendung:

- Durchlaßbereich $\Delta\vartheta_d$:** Ein zusammenhängender Bereich um den Hauptstrahlwinkel $\hat{\vartheta}$, der nicht zum Übergangsbereich gehört.
- Durchlaßgrenze ϑ_d :** Grenze des Durchlaßbereiches ($\vartheta_d > \hat{\vartheta}$)
- Welligkeit δ_d :** Die maximale Abweichung von 1 im Durchlaßbereich.
- Sperrbereich $\Delta\vartheta_s$:** Ein Bereich, der weder zum Durchlaß-, noch zum Übergangsbereich gehört.
- Sperrgrenze ϑ_s :** Grenze des Sperrbereiches ($\vartheta_s > \hat{\vartheta}$)

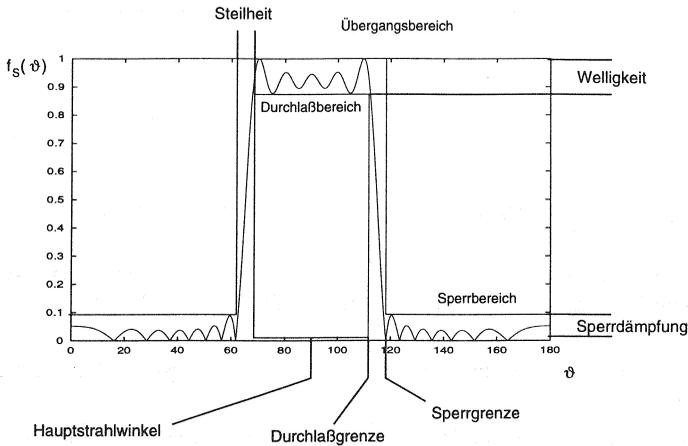


Abbildung 4.4: Das Toleranzschema für den Rechteckfaktor

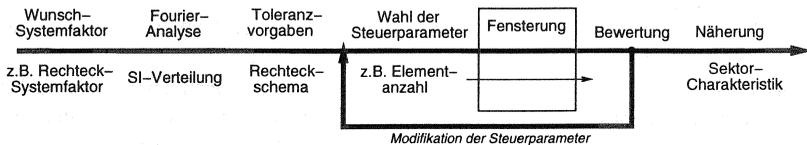


Abbildung 4.5: Antennenentwurf (modifizierte Fourier-Approximation)

Sperrdämpfung δ_s : Das Maximum im Sperrbereich.

Übergangsbereich $\Delta\vartheta_{ds}$: Ein für $\vartheta < \hat{\vartheta}$ ($\vartheta > \hat{\vartheta}$) zusammenhängender, streng monoton steigender (fallender) Bereich um den Winkel $\vartheta_1 = \hat{\vartheta} - \frac{\Delta\hat{\vartheta}}{2}$ ($\vartheta_2 = \hat{\vartheta} + \frac{\Delta\hat{\vartheta}}{2}$) mit der Eigenschaft, daß eine Verkleinerung dieses Bereiches die Welligkeit oder die Sperrdämpfung vergrößert.

Steilheit s :
$$s = \frac{1}{\vartheta_s - \vartheta_d}$$

Automatisierter Antennenentwurf nach Toleranzvorgaben Auf der Grundlage der vorgestellten Parameter lassen sich verschiedene Entwurfsstrategien formulieren. So ist es z.B. möglich, einen Grenzfaktor ($\hat{\vartheta}$, $\Delta\hat{\vartheta}$), ein Toleranzschema (δ_d , δ_s , ϑ_d , ϑ_s) und die Elementdistanz d vorzugeben und dann unter Variation von Elementanzahl N und der Fensterfunktion einen Entwurf zu bestimmen, der die Elementanzahl minimiert [60]. Es ergibt sich jedoch das Problem, daß bei zu strengen Vorgaben, die Elementanzahl zu groß wird.

Bei einem weiteren im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Verfahren wird dieses Problem umgangen, indem man die Elementanzahl N vorgibt. Die Steuervariable ist hier die Rechteckbreite $\Delta\hat{\vartheta}$. Als Abbruchkriterium dient die vorgegebene Durchlaßgrenze ϑ_d , und Optimierungsvariablen sind entweder die Welligkeit δ_d , die Sperrdämpfung

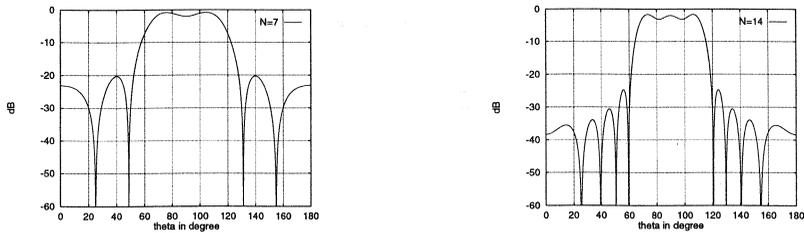


Abbildung 4.6: Antennencharakteristik (ohne Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung) in Abhängigkeit vom Winkel ϑ für $N=7$ und $N=14$

δ_s oder die Steilheit s . Im einzelnen wird folgender automatisierter Entwurfsprozess durchlaufen:

1. Vorgabe der Hauptstrahlrichtung $\hat{\vartheta}$, der Durchlaßgrenze ϑ_d , der Elementanzahl N und der Elementdistanz d vor
2. Auswahl einer Fensterfunktion (z.B. Rechteck-, Hanning-, Hamming-, Kaiser-, Binomial-Fenster)
3. Erhöhung des Parameters $\Delta\hat{\vartheta}$ (Rechteckbreite) der SI-Verteilung solange, bis die vorgegebene Durchlaßgrenze ϑ_d eingehalten wird
4. Wiederholung von Schritt 2 und 3 bis alle Fensterfunktionen betrachtet wurden
5. Bestimmung des besten Entwurf mit demjenigen Fenster und der dazugehörigen Rechteckbreite $\Delta\hat{\vartheta}$, der entweder die Welligkeit $\Delta\vartheta_{ds}$ oder die Sperrdämpfung δ_s minimiert oder die Steilheit s maximiert

4.2.1.3 Ein Beispiel zur Modellierung einer 'Shaped Beam'-Bakenantenne

Mit den angesprochenen Entwurfsmethoden steht ein Instrumentarium für die Nachbildung vorgegebener Antennencharakteristika von bereits im Einsatz befindlichen Antennen wie auch für die realitätsnahe Abschätzung der Charakteristika von Antennen, die in zukünftigen Systeminstallation zum Einsatz kommen sollen.

Abb. 4.2 zeigt die räumlichen Vorgaben zum Entwurf einer Baken-Antenne für eine Anwendung auf Autobahnen. Die Baken-Antenne befindet sich in einer Höhe von 6 m über der Fahrbahn und soll einen rechteckförmigen Bereich von 6 m in x-Richtung und 2,5 m in y-Richtung auf der Fahrbahnoberfläche erfassen. Die Mittenfrequenz sei $f_0 = 5,8$ GHz und die Bandbreite für die Signalübertragung betrage $\Delta f = 10$ MHz. Der Elementabstand wird zu $d = \lambda/2 = 25$ cm gesetzt.

Die zum Einsatz kommende planare Gruppenantenne besteht wie oben bereits eingeführt aus zwei orthogonal zueinander angeordneten linearen Gruppenantennen mit je einem eigenen lokalen Koordinatensystem (x, y, z) (z -Achse in Fahrtrichtung) bzw. (x', y', z') (z' -Achse quer zur Fahrtrichtung). Der Wunschfaktor der beiden Gruppenantennen ist der Rechteckfaktor mit Hauptstrahlrichtung $\hat{\vartheta}$ und Rechteckbreite $\Delta\hat{\vartheta}$.

Die Baken-Antenne werde so ausgerichtet, daß die Hauptstrahlrichtung ihrer beiden linearen Gruppenantennen bei $\hat{\vartheta} = 90^\circ$ bzw. $\hat{\vartheta}' = 90^\circ$ (broadside) liegt. Die

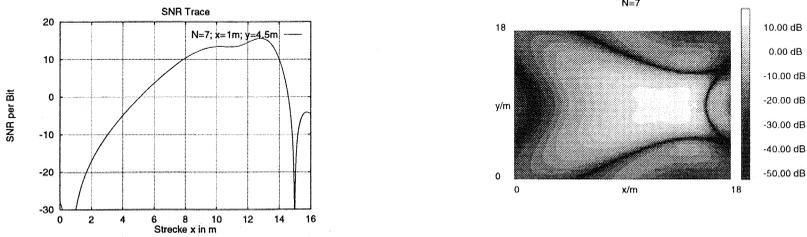


Abbildung 4.7: Strahlungsfeld ($z = 1$ m) in Abhängigkeit zur Wegstrecke x sowie als horizontaler Schnitt ($N = 7$)

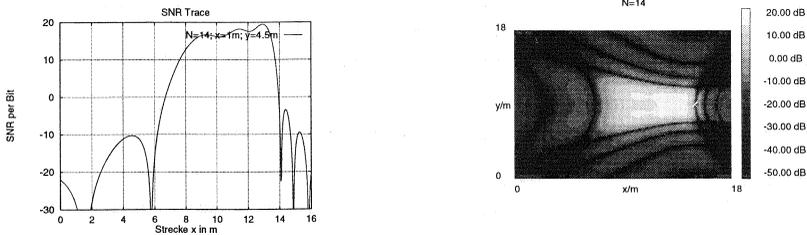


Abbildung 4.8: Strahlungsfeld ($z = 1$ m) in Abhängigkeit zur Wegstrecke sowie als horizontaler Schnitt ($N = 14$)

Rechteckbreiten $\Delta\hat{\vartheta}$ bzw. $\Delta\hat{\vartheta}'$ werden so gewählt, daß der gewünschte Kommunikationsbereich vollständig erfaßt wird.

Damit sind die Vorgaben für den Entwurf bekannt. Gesucht wird nun eine Baken-Antenne mit möglichst großer Steilheit oder vergleichsweise minimalem Übergangsbereich. Die maximale Anzahl der Elemente wird zu 7 (und alternativ zu 14) gesetzt. Mit der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Entwurfsmethode erhält man aus der SI-Verteilung und dem Rechteckfenster die in den Abbildungen 4.6, 4.7 und 4.8 dargestellten Ergebnisse. In Abb. 4.6 ist die Charakteristik der Antenne für $N = 7$ und $N = 14$ in Abhängigkeit zum Winkel ϑ dargestellt. Man erkennt, daß die Annäherung an eine Rechteckcharakteristik durch eine erhöhte Elementanzahl verbessert werden kann. In Abb. 4.7 (rechts) ist das Strahlungsfeld für $z = 1$ m (unter Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung) dargestellt (Normierung: max. Signalpegel entspricht einer Bitfehlerrate von 10^{-9} , vgl. Abschnitt 4.4.1). Der gewünschte Kommunikationsbereich wird vollständig erfaßt. Deutlich zu erkennen sind jedoch auch die geometrischen Verzerrungen, die in Abhängigkeit von der Position und Ausrichtung der Baken-Antenne entstehen. Weiterhin ist der Signalpegelverlauf (mit Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung) über einem möglichen Weg der Mobilstation durch das Szenario (mittlere Fahrspur) aufgetragen (Abb. 4.7, links). Man erkennt, wie die Antenneneigenschaften von der Mobilstation aus „gesehen“ werden. Der Übergangsbereich ist im Vergleich zur Antennencharakteri-

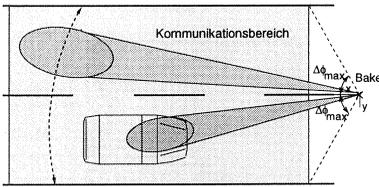


Abbildung 4.9: Aufsicht

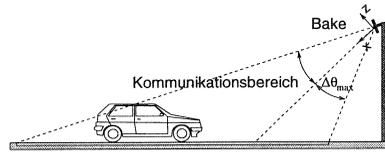


Abbildung 4.10: Seitenansicht

stik stark überdehnt. Die Ursache hierfür liegt darin, daß große Änderungen in der Position der Mobilstation aufgrund der Ausrichtung der Antenne bei der Einfahrt in die Kommunikationszone nur relativ geringe Winkeländerungen bewirken. Die entsprechenden Ergebnisse für das Strahlungsfeld für $N=14$ sind in Abb. 4.8 dargestellt. Erkennbar ist die deutliche Verkürzung des Übergangsbereichs.

4.2.2 Antennenentwurf für Pencil bzw. Spot Beams

Die zuvor vorgestellten 'Shaped Beam'-Antennen werden die Antennentypen sein, die auf Jahre hinaus die Basiskomponenten für Fahrzeug-Baken-Systeme darstellen. Wie sich in der späteren Betrachtung der Funkfeldcharakteristika noch zeigen wird, können hohe Anforderungen an das Funkfeld in kritischen Szenarien (insbesondere Innenstadtbereiche) nur mit hohem Aufwand erfüllt werden, da die Einflüsse der Mehrwegeausbreitung kompensiert werden müssen. Daher werden auch für Fahrzeug-Baken-Systeme dynamisch nachführende Antennen diskutiert, welche es durch die dort eingesetzten 'Pencil beams' ermöglichen, den Kommunikationsbereich auf ein Fahrzeug zu beschränken und Störeinflüsse weitgehend zu minimieren. Die Modellierung der Eigenschaften von 'Pencil beams' erfordert die Anwendung anderer Entwurfsmechanismen und soll daher im folgenden vorgestellt werden.

4.2.2.1 Vorgaben und Randbedingungen für den Entwurf

Aus den Abmessungen des gewünschten Kommunikationsbereiches ergeben sich auch die notwendigen Schwenkbereiche bzw. -winkel. Die Bakenantenne ist dabei so auf die Kommunikationszone ausgerichtet, daß jeweils gleiche Winkelbereiche überstrichen werden können. Zeigt das Maximum der Hauptkeule in die Richtung, die senkrecht zur Antennenebene steht, so spricht man von *broadside antennas*. Die Hauptstrahlrichtungen werden damit zu $\vartheta = 90^\circ$ und $\phi = 0^\circ$ gewählt. Die Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen einen Kommunikationsbereich in der Aufsicht und der Seitenansicht mit den Schwenkbereichen der Bakenantennen und den zugehörigen Koordinatensystemen.

Weitere wichtige Vorgaben sind die Strahlbreite der Hauptkeule (HP-Half Power Beamwidth) und die Dämpfung der Nebenmaxima (SLL-Side Lobe Level), um sicherzustellen, daß jeweils nur ein Fahrzeug über eine Antennenkeule kommunizieren kann.

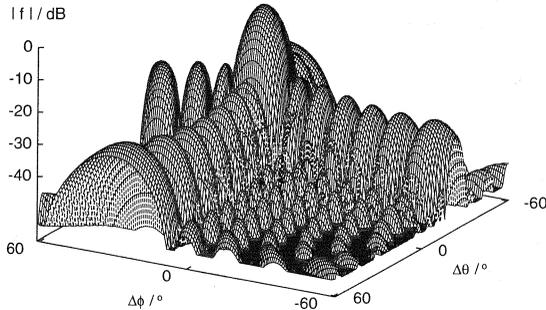


Abbildung 4.11: Charakteristik einer planaren Gruppenantenne mit $N = 13$, $\bar{n} = 3$, $SLL = -20.5$ dB und $HP = 8.8^\circ$

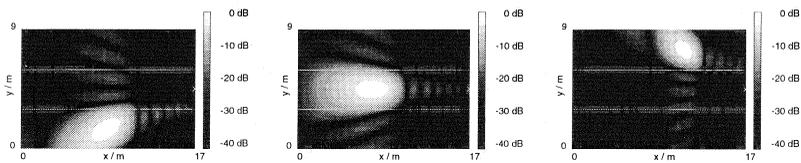


Abbildung 4.12: Unterschiedliche Ausrichtungen des Hauptstrahles einer planaren Gruppenantenne

4.2.2.2 Entwurf von linearen Gruppenantennen mit niedrigen Nebenkeulen und enger Strahlbreite

In der Literatur werden eine Reihe spezieller Methoden zum Entwurf von linearen Gruppenantennen mit niedrigen Nebenkeulen und enger Strahlbreite beschrieben [80]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die *Dolph-Tschebyscheff-Belegung* [21] bzw. die *Taylor- \bar{n} -Belegung* [49] eingesetzt. Sie bieten einen Kompromiß zwischen der größten Bündelungsschärfe und gleichgroßer Nebenkeulen.

Ohne an dieser Stelle auf die Einzelheiten der Verfahren eingehen zu können, soll hier ein beispielhaftes Ergebnis eines Antennenentwurfs (unter Anwendung der Taylor- \bar{n} -Belegung) beschrieben werden. Die Bakenantenne befindet sich dabei 6 m über der Fahrbahn und die Länge des Kommunikationsbereiches beträgt ca. 15 m. Die Mittenfrequenz wird zu $f = 5.8$ GHz gewählt. Der Hauptstrahl soll maximal eine Fahrbahnbreite von 3 m erfassen, damit benachbarte Fahrzeuge die Kommunikation nicht stören. Die Nebenmaxima sollen mindestens um 20 dB gedämpft werden.

Eine dreidimensionale Darstellung der entsprechenden Antennencharakteristik ist in Abb. 4.11 zu finden. Durch Multiplikation der beiden Charakteristiken sind die Nebenkeulen kleiner als bei der Einzelcharakteristik. Einen horizontalen Schnitt durch

das Strahlungsfeld mit verschiedenen Auslenkungen in Höhe einer On-Board Unit ($h = 1.25$ m) zeigt Abb. 4.12. Dargestellt ist der Bereich einer dreispurigen Straße. Die Position der Antenne wird durch das weiße Kreuz am rechten Rand markiert.

4.2.3 OBU-Antenneneigenschaften

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt diskutiert, ist die Charakteristik der Bakenantenne von entscheidender Bedeutung für die Festlegung der Eigenschaften des Kommunikationsbereiches. Für die OBU-Antennen wird im folgenden in der Regel eine rundstrahlende Charakteristik angenommen (worst case). Durch Verwendung von Antennen mit einer gewissen Richtwirkung ergibt sich eine Reduzierung der Störeinflüsse (siehe Abschnitt 4.5.3).

4.3 Der Ausbreitungsraum

Bisher wurde weder das Ausbreitungsmedium noch die makroskopische Systemumgebung berücksichtigt. Hier soll nun der Schwerpunkt auf die Modellierung des Ausbreitungsmediums und der Einflüsse störender Objekte gelegt werden.

Die Qualität eines drahtlosen Nachrichtenübertragungssystems hängt in entscheidendem Maße von dem Nutz-/Störleistungsverhältnis (Signal-to-Noise power Ratio, SNR) am Empfänger ab. Der Wert der Empfangsleistung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, angefangen bei der Sendeleistung über die Antenneneigenschaften, die Einflüsse des Ausbreitungsraums (Reflexion, Dämpfung, Streuung, Beugung und Abschattung) bis zu den verwendeten Modulationsverfahren.

4.3.1 Freiraumausbreitung

Die Leistungsflußdichte S einer Sendeantenne mit der abgestrahlten Leistung P_S beträgt im Abstand r

$$S = \frac{P_S G_S}{4\pi r^2}. \quad (4.5)$$

G_S ist der Gewinn der Antenne. Für die maximale Leistung, die dem Feld mit der Leistungsflußdichte S entnommen werden kann, gilt

$$P_E = S A_E = P_S G_S G_E \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (4.6)$$

G_E stellt den Gewinn und $A_E = \frac{\lambda^2 G_E}{4\pi}$ die Wirkfläche der Empfangsantenne dar.

4.3.2 Dämpfungseinflüsse

4.3.2.1 Witterungsabhängige Dämpfung

Das Ausbreitungsmedium ist ein isotropes Gemisch verschiedener Gase, kleiner Partikel und Wasser. Es ist mikroskopisch inhomogen, kann aber makroskopisch als quasihomogen angesehen werden. Ein homogenes Medium wird vollständig durch seine komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ_r und durch seine komplexe Permeabilität

beschrieben. Verlustmechanismen im Medium werden dabei durch den Imaginärteil der Konstanten erfaßt. Für schwach verlustbehaftete Medien ($\tan\delta \leq 0,1$) berechnet sich das Dämpfungsmaß α näherungsweise zu:

$$\alpha \approx \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r''} \cdot \frac{\epsilon_r''}{2 \cdot \epsilon_r'}$$

r : Entfernung zur Sendeantenne.

Die Empfangsfeldstärke bei Ausbreitung in einem homogenen Medium ist gegenüber der Empfangsfeldstärke im Vakuum zusätzlich gedämpft:

$$\frac{E}{E_{\text{Vakuum}}} = e^{-\alpha \cdot r}$$

Die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums sind stark frequenzabhängig (Dispersion). Hier wird angenommen, daß sich die elektromagnetischen Eigenschaften des Mediums innerhalb der Bandbreite nicht wesentlich verändern. Im GHz-Bereich dominiert die Absorption durch Wasserdampf und Sauerstoff. Nach [48] ist der Gasdämpfungskoeffizient proportional zur Dichte, die für Sauerstoff in der Nähe des Erdbodens konstant ist ($\rho_{\text{O}_2} \approx 0,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$). Die Wasserdampfdichte liegt in Deutschland im Mittel im Februar bei $(2 \dots 5) \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ und im August bei $(10 \dots 15) \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$. Streuung tritt an Regentropfen oder allgemein an Niederschlägen auf. Beim Durchqueren eines Regenfeldes wird die elektromagnetische Welle in alle Richtungen umgelenkt. In der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung, die vom Sender zum Empfänger führt, breitet sich nach dem Durchqueren nur ein Teil der Welle aus. Für den Empfänger ist dies eine Dämpfung. Durch das Regenfeld wird die Welle zusätzlich depolarisiert. Es entstehen Polarisationsverluste, da die Empfangsantenne für eine bestimmte Polarisation angepaßt ist. Der Regendämpfungskoeffizient α_r ist abhängig von der Regenrate und der Frequenz. Regenraten von $R_{\text{rain}} > 150 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ treten in Mitteleuropa nur selten auf. In [48] wird für die Sauerstoff- und Wasserdampfabsorption sowie für die Regendämpfung im GHz-Bereich jeweils eine Näherungsformel angegeben. Im Nahbereich bis zu 50m kann die Regendämpfung für $5,8 \text{GHz}$ jedoch in Übereinstimmung mit [8] meistens vernachlässigt werden. Selbst bei extrem starkem Regen $R_{\text{rain}} > 75 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ ergibt sich durch das Ausbreitungsmedium eine zusätzliche Dämpfung von maximal $30 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 50 \text{m} = 1,5 \text{dB}$. Für den durch schnellfahrende Fahrzeuge bei und nach Regen erzeugten Wassernebel liegen keine speziellen Messungen vor, jedoch ist anzunehmen, daß dieser Fall vergleichbar ist mit extrem starkem Regen.

4.3.2.2 Windschutzscheibendämpfung

Bei der Modellierung des Funkkanals müssen neben der bereits eingeführten Ausbreitungsdämpfung zusätzliche Dämpfungen berücksichtigt werden, da die On-Board Unit hinter der Windschutzscheibe angebracht wird. Nach Messungen in [8] betragen die Verluste bei der Transmission durch die Windschutzscheibe zwischen 2 und 6 dB. Eine dünne Wasserschicht (0,5 – 1 mm) macht sich mit einer Dämpfung von 7–12 dB bemerkbar, die Scheibenwischer verursachen je nach Stellung einen Verlust von bis zu 9 dB. Für metallisch beschichtete Windschutzscheiben können sich

Dämpfungsfaktoren von 20-40 dB ergeben. Für diesen Scheibentyp muß durch eine Laserbehandlung oder andere konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden, daß die Dämpfung noch vom System zu verkräftende Werte von 5-7 dB annimmt [2]. Weitere Störungen können sich durch Schmutz, Frost und Schnee auf der Windschutzscheibe ergeben. Üblicherweise ist jedoch eine Installation der OBU im Wischerfeld vorgesehen, so daß diese Einflüsse weitgehend reduziert werden können.

4.3.3 Bestimmung der funktechnischen Eigenschaften der makroskopischen Systemumgebung durch Strahlverfolgungsverfahren

Die makroskopische Systemumgebung umfaßt alle Objekte, die im Vergleich zur Wellenlänge groß sind und die Wellenausbreitung zwischen dem Sender und dem Empfänger passiv beeinflussen (z.B. benachbarte Fahrzeuge, Fahrbahn, Randbebauung). Wenn die Abmessungen der Störer sehr viel größer sind als die Wellenlänge, ist die Wellenausbreitung quasi-optisch, d.h. sie läßt sich mit Hilfe geometrischer Gesetze beschreiben (ray tracing).

Im folgenden werden die für die Modellierung zu betrachtenden funktechnischen Eigenschaften vorgestellt und gegebenenfalls entsprechende Näherungen begründet:

- Reflexionen und Mehrwegeausbreitung
- Doppler-Effekt (zeitspektiver Schwund)
- Pfadverzögerung (frequenzsektiver Schwund)
- Streuung
- Abschattung und Beugung

4.3.3.1 Reflexionen und Mehrwegeausbreitung

An der Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien wird eine einfallende Welle sowohl gebrochen als auch reflektiert. Der Reflexionsfaktor ist von den Materialeigenschaften ϵ_r (Dielektrizitätskonstante) und σ (Leitfähigkeit), der Polarisation der Welle und dem Erhebungswinkel δ abhängig. Der Erhebungswinkel ist der Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung der Welle und der Grenzfläche (Abb. 4.13).

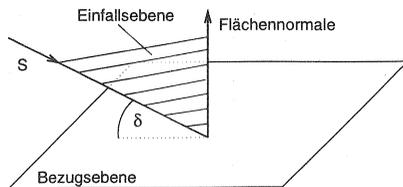


Abbildung 4.13: Definition der Einfallsebene und des Erhebungswinkels

Die Polarisationsebene wird von dem elektrischen Feldstärkevektor und dem Poynting-Vektor (Ausbreitungsvektor) der einfallenden Welle aufgespannt. Liegen Polarisations- und Einfallsebene — das ist die Ebene, die von der Flächennormalen und dem Poynting-Vektor aufgespannt wird (Abb. 4.13) — parallel, dann nennt man die

Welle parallel polarisiert. Steht die Polarisationssebene auf der Einfallsebene senkrecht, so spricht man von einer senkrecht polarisierten Welle. Falls eine waagerechte Bezugsebene (Straße) vorliegt, wird die senkrechte Polarisation als horizontale und die parallele Polarisation als vertikale Polarisation bezeichnet.

Die Polarisationssebene der reflektierten Welle bleibt bei senkrechter und paralleler Polarisation erhalten, sie ändert nur ihre Neigung.

Für die parallele Polarisation gilt nach [51]:

$$r_{\parallel} = \frac{\epsilon_r \sin \delta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \delta}}{\epsilon_r \sin \delta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \delta}} \quad (4.7)$$

Die senkrechte Polarisation ergibt sich zu:

$$r_{\perp} = \frac{\sin \delta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \delta}}{\sin \delta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \delta}} \quad (4.8)$$

mit

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (4.9)$$

Falls die einfallende Welle zirkular oder elliptisch polarisiert ist, kann diese in die senkrecht und parallel polarisierten Teilwellen zerlegt werden. Die reflektierte Welle wird abhängig vom Einfallswinkel und der Materialparameter sowohl ihre Drehrichtung als auch ihre Polarisation ändern. Die Depolarisation trägt somit zu einer weiteren Dämpfung der Empfangsleistung bei.

Reflexionen in der makroskopischen Systemumgebung führen zu Mehrwegeausbreitung. Zu jedem Ausbreitungspfad gehört eine Dämpfung, eine Frequenzverschiebung (siehe Dopplereffekt) und eine Verzögerung bzw. Phasenverschiebung (siehe Ausbreitungsverzögerung). Die Empfangsfeldstärke $E_r(\vec{r}, t)$ ist die vektorielle Summe der Teilsignale (Echos) über alle Ausbreitungspfade. Ohne Berücksichtigung der Polarisation gilt:

$$E_n(\vec{r}, t) = a \cdot f_t(\vartheta_{t_n}, \varphi_{t_n}) f_r(\vartheta_{r_n}, \varphi_{r_n}) \prod_{k=0}^{K_n-1} \varrho_{nk} \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n} e^{j2\pi(f+f_{D_n})t} \quad (4.10)$$

$$= a \cdot a_n \cdot \frac{e^{-j\beta r_n}}{r_n} e^{j2\pi(f+f_{D_n})t}$$

$$E_r(\vec{r}, t) = \sum_{n=0}^{N-1} E_n(\vec{r}, t) \quad (4.11)$$

a : effektive (komplexwertige) Anregungsgröße

N : Anzahl der Pfade

a_n : n-ter Dämpfungsfaktor

α : Dämpfungsmaß des quasihomogenen Mediums

r_n : n-te Pfadlänge, $r_0 = r$ (Line Of Sight)

K_n : Gesamtanzahl der Reflexionen des n-ten Pfades

ϱ_{nk} : k-ter Reflexionsfaktor des n-ten Pfades, $\varrho_{00} = 1$, $K = 1$ für $n = 0$

f_{D_n} : Frequenzverschiebung des n-ten Pfades

f_t : Charakteristik der Sendeantenne

f_r : Charakteristik der Empfangsantenne

ϑ_{t_n} : Polarwinkel des sendeseitigen Reflexionspunktes des n-ten Pfades im lokalen Koordinatensystem der Sendeantenne

ϑ_{r_n} : Polarwinkel des empfangsseitigen Reflexionspunktes des n-ten Pfades im lokalen Koordinatensystem der Empfangsantenne

φ_{t_n} : Azimutwinkel des sendeseitigen Reflexionspunktes des n-ten Pfades im lokalen Koordinatensystem der Sendeantenne

φ_{r_n} : Azimutwinkel des empfangsseitigen Reflexionspunktes des n-ten Pfades im lokalen Koordinatensystem der Empfangsantenne

Durch die angewandte Transpondertechnologie kann es im Uplink zusätzlich zur Reflektion der von der Bake ausgestrahlten unmodulierten Energiestrahlung (Continuous Wave CW) kommen. Im ungünstigsten Fall wird die unmodulierte Energie zur Empfangsantenne zurückreflektiert und überlagert sich mit der Übertragung der OBU (Backscatter). Durch entsprechende Auslegung des Übertragungsverfahrens kann die Störstrahlung weitgehend eliminiert werden.

4.3.3.2 Frequenz- und Zeitselektivität des Übertragungskanals

Doppler-Effekt Aufgrund der Bewegung der Mobilstationen bei der Fahrzeug-Baken-Kommunikation kommt es zu einer Frequenzänderung, die auch Dopplerverschiebung genannt wird. Es wird in Abhängigkeit von der Sendefrequenz f_0 , der Geschwindigkeit v , des Winkels γ zwischen Bewegungs- und Einfallrichtung der elektromagnetischen Welle und der Lichtgeschwindigkeit c eine um

$$f_D = f_0 \frac{v}{c} \cos \gamma \quad (4.12)$$

verschobene Sendefrequenz empfangen. Der maximale Betrag berechnet sich für einen zur Bewegungsrichtung parallelen Einfall zu:

$$f_{D_{max}} = f_0 \frac{v}{c} = \frac{v}{\lambda} \quad (4.13)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Sendesignals. Am Ort der bewegten Empfangsantenne treffen Teilwellen aus unterschiedlichen Richtungen ein. Es entsteht ein zeitvariantes, kontinuierliches Dopplerspektrum im Bereich:

$$f_0 - f_{D_{max}} \leq f \leq f_0 + f_{D_{max}} \quad (4.14)$$

Der Schwund wird als *nicht zeitselektiv* bezeichnet, falls für die Dopplerverbreiterung (Doppler spread) $f_{D_{max}}$ und die Signal- bzw. Symboldauer T gilt:

$$f_{D_{max}} \ll \frac{1}{T} \approx \Delta f \quad (4.15)$$

Für eine relative Geschwindigkeit von z.B. 50 m/s = 180 km/h und bei einer Frequenz von $f = 5,8$ GHz beträgt die maximale Dopplerverschiebung $f_{D_{max}} \approx 1$ kHz.

Die Pfadverzögerungen Die unterschiedlichen Ausbreitungspfade haben Laufzeitverzögerungen und damit Zeit- und Phasenverschiebungen zur Folge. Es kommt zu Nachbarsymbolinterferenzen, falls die Unterschiede in den Pfadverzögerungen $\Delta\tau$ groß im Vergleich zur Symboldauer T werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Pfadlängen r_n sind die einzelnen Teilsignale gegeneinander zeit- bzw. phasenverschoben. Bei einer Wegdifferenz von $\Delta r = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ addieren sie sich destruktiv (Fadingeffekt) und bei $\Delta r = k \cdot \lambda$ addieren sie sich konstruktiv.

Sind die Unterschiede in den Pfadverzögerungen $\Delta\tau$ (multipath spread) groß im Vergleich zur Symboldauer T , so kommt es zu Nachbarsymbol-Interferenzen (intersymbol interference), die zu Fehlern im Demodulator führen. Die Bedingung für *nicht frequenzselektiven* Schwund ist nach [48]:

$$T \ll \frac{1}{\Delta\tau_{max}} \quad (4.16)$$

Kombiniert man Gleichung 4.15 und 4.16, so ergibt sich als Bedingung dafür, daß sich eine Symboldauer T finden läßt, für die der Kanal nicht-frequenzselektiv ist und zugleich langsames Schwundverhalten aufweist (Spreizprodukt):

$$f_{D_{max}} \cdot \Delta\tau_{max} \ll 1$$

Bei Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen im Nahbereich beträgt die Wegdifferenz der einzelnen Pfade maximal $\Delta r = 5m$. Damit berechnet sich eine Verzögerungsdifferenz von maximal: $\Delta\tau_{max} = \frac{c}{\Delta r} = 0,0167\mu s$. Zusammen mit $f_{D_{max}} = 1$ kHz aus dem obigen Beispiel ergibt sich das Spreizprodukt zu: $f_{D_{max}} \cdot \Delta\tau_{max} = 0,00002 \ll 1$, d.h. der Kanal ist nicht-frequenzselektiv und zeigt langsames Schwundverhalten.

4.3.3.3 Streuung an rauen Flächen

Unter Streuung wird die Ablenkung von Strahlungsenergie aus der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung verstanden. Es wird zwischen der Volumenstreuung und der Streuung an rauen Flächen unterschieden. Volumenstreuung liegt z. B. bei Niederschlagsstreuung vor, wenn die gesamte Streuleistung vieler Streuer in einem größeren Volumen zu berechnen ist (siehe Dämpfungseinflüsse). Die Streuung an rauen Oberflächen wird durch deren statistische Eigenschaften, der verwendeten Frequenz, dem Einfallswinkel und den Materialkonstanten beschrieben. Die Rauigkeit wird meist durch eine Normalverteilung (Mittelwert $\xi = 0$, Standardabweichung z_0) beschrieben.

Das Verhältnis von Leistungsflußdichte \bar{S} zur reflektierten Leistungsflußdichte S_0 bei ebener Fläche ist nach [48]:

$$\frac{\bar{S}}{S_0} = e^{-g^2} \quad (4.17)$$

wobei der Rauigkeitsparameter

$$g = \frac{4\pi z_0 \sin \delta}{\lambda} \quad (4.18)$$

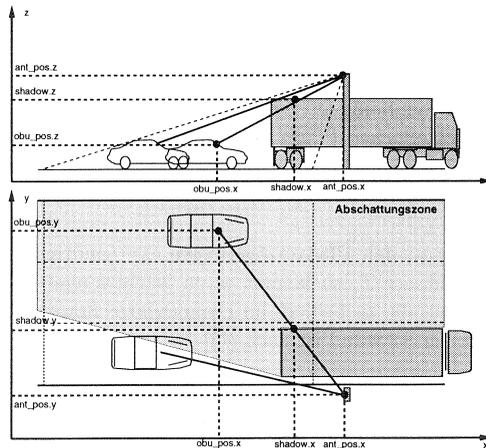


Abbildung 4.14: Geometrisches Abschattungsmodell (Strahlenoptik)

ein Maß für die Streuleistung darstellt. δ ist der Erhebungswinkel der einfallenden Welle. Das Rayleigh-Kriterium besagt, daß eine Fläche als eben gilt, falls folgende Bedingung erfüllt ist:

$$z_0 < \frac{\lambda}{16 \sin \delta} \quad (4.19)$$

Für Szenarien im Straßenverkehr können Fahrzeugoberflächen als eben angesehen werden, für Straßen- und Häuseroberflächen gilt die Annahme nur als Näherung. Die Reflexionseigenschaften typischer Oberflächen der Systemumgebung liegen jedoch oft in Abhängigkeit vom Winkel vor. Dabei geht die Dämpfung aufgrund der Rauigkeit mit in den Reflexionsfaktor ein.

4.3.3.4 Abschattungen und Beugung

Unter der Annahme einer rein geometrischen Wellenausbreitung können Hindernisse Abschattungsgebiete erzeugen, in denen keine Funkversorgung gegeben ist. In Straßenverkehrsszenarien kann dies in bestimmten Konfigurationen aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeughöhen (Pkw/Lkw) mit nicht zu vernachlässigender Häufigkeit auftreten (siehe Abb. 4.14).

Elektromagnetische Wellen können jedoch um Hindernisse herumgreifen und damit in die geometrischen Schattenregionen gelangen. In diesem Fall spricht man von Beugung. Wie sehr eine elektromagnetische Welle dabei in die Schattenregion vordringt, hängt sowohl von der Wellenlänge als auch von den geometrischen Abmessungen der Hindernisse ab. Bei Frequenzen im GHz-Bereich sind die Abmessungen der Fahrzeuge groß gegenüber der Wellenlänge.

Beispielhaft soll hier für eine typische Situation der Signalpegel ermittelt werden, der bei Kantenbeugung auftritt. Dazu wird eine Halbebene zwischen Sender und Empfänger betrachtet, die senkrecht zur direkten Verbindungslinie eingebracht wird. Nach dem Huygen'schen Prinzip stellt jeder Punkt der Wellenfront am Ort der Halbebene den Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle dar. Dies führt mit Benutzung der Fresnel-Integrale nach [48] zu folgendem Feldstärkeverhältnis:

$$\frac{E}{E_0} = \left| \frac{1}{2} - \frac{\exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) [C(\nu) + jS(\nu)]}{\sqrt{2}} \right| \quad (4.20)$$

E_0 ist die empfangene Freiraumfeldstärke bei freiem Ausbreitungsweg. Für die Fresnel-Integrale $C(\nu)$ und $S(\nu)$ gilt:

$$C(\nu) = \int_0^\nu \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \quad \text{und} \quad S(\nu) = \int_0^\nu \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

mit dem Parameter

$$\nu = H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_S} + \frac{1}{d_E}\right)}. \quad (4.21)$$

H ist der Abstand von der Verbindungslinie Sender-Empfänger zur Kante der Halbebene, d_S und d_E sind die Abstände vom Sender bzw. Empfänger zur Halbebene. H und ν erhalten negative Vorzeichen, wenn die Kante unterhalb der Sichtlinie liegt, andernfalls positive.

Zur Untersuchung der Beugungserscheinungen ist die Signaldämpfung eines hinter einem LKW fahrenden PKW ermittelt worden (Abb. 4.15). Der Abstand zwischen der OBU (Höhe 1.5 m) und der Hinterkante des LKW (Höhe 4m, Breite 2 m) beträgt 2 m. Die Sendeantenne befindet sich 1.5 m vom Fahrbahnrand entfernt.

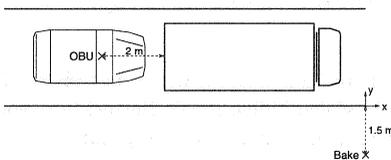


Abbildung 4.15: Untersuchung der Beugungserscheinungen

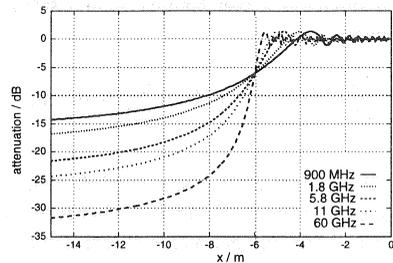


Abbildung 4.16: Beugungsdämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz

Abb. 4.16 zeigt den Dämpfungsverlauf in Abhängigkeit von der OBU-Entfernung zur Sendeantenne; Parameter ist die Frequenz. Deutlich ist die Abhängigkeit des Beugungsschattens von der Wellenlänge zu erkennen. Je kürzer die Wellenlänge,

d. h. je höher die Frequenz ist, desto ausgeprägter ist der Schatten. Bei $x = -6$ m tritt die OBU aus dem Schattenbereich in direkte Sichtverbindung (Line Of Sight, LOS) zur Sendeantenne. Im Beugungsschatten erreicht die Signaldämpfung bei Frequenzen von einigen GHz schnell Werte von 15 dB und mehr. Die Beugung wird daher im folgenden vernachlässigt, durch das geometrische Abschattungsmodell ist eine ausreichende 'worst-case' Abschätzung gegeben ³

4.3.3.5 Vereinfachte Modelle der Signalübertragung unter Berücksichtigung der Mehrwegeausbreitung

Die oben eingeführten Gleichungen zur Mehrwegeausbreitung können unter Berücksichtigung der nachfolgend vorgestellten Annahmen vereinfacht werden.

Unter Vernachlässigung des Doppler-Effekts vereinfacht sich Gleichung 4.10 zu:

$$E_n(\vec{r}, t) = a \cdot f_t(\vartheta_{t_n}, \varphi_{t_n}) \cdot f_r(\vartheta_{r_n}, \varphi_{r_n}) \cdot \prod_{k=0}^{K_n-1} \varrho_{nk} \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n} \cdot e^{j2\pi f \cdot t}$$

Die harmonische Zeitabhängigkeit wird üblicherweise weggelassen. Damit ergibt sich:

$$E_n(\vec{r}) = a \cdot f_t(\vartheta_{t_n}, \varphi_{t_n}) \cdot f_r(\vartheta_{r_n}, \varphi_{r_n}) \cdot \prod_{k=0}^{K_n-1} \varrho_{nk} \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n}$$

Für die Leistungsübertragung zwischen einer Sende- und einer Empfangsantenne unter Berücksichtigung von Mehrwegeausbreitung und der Dämpfungen des quasihomogenen Mediums gilt bei der festen Frequenz $f = f_0$:

$$\frac{P_{r0}}{P_{t0}} = \left(\frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} f_t(\vartheta_{t_n}, \varphi_{t_n}) \cdot f_r(\vartheta_{r_n}, \varphi_{r_n}) \cdot \prod_{k=0}^{K_n-1} \varrho_{nk} \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta_0 \cdot r_n}}{r_n} \right|^2$$

Sind die Wegdifferenzen Δr der einzelnen Ausbreitungspfade nicht zu groß (nicht-frequenzselektiver Kanal), so läßt sich für die Übertragung der Signalleistung schreiben:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} f_t(\vartheta_{t_n}, \varphi_{t_n}) \cdot f_r(\vartheta_{r_n}, \varphi_{r_n}) \cdot \prod_{k=0}^{K_n-1} \varrho_{nk} \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n} \right|^2 \quad (4.22)$$

Gleichung 4.22 läßt sich vereinfachen, wenn man Mehrfachreflexionen nur bis zu einem maximalen Grad K_{max} berücksichtigt. In vielen Fällen ist die Betrachtung von Einfachreflexionen völlig ausreichend, da Mehrfachreflexionen so sehr gedämpft werden, daß sie vernachlässigbar sind. Der Reflexionsfaktor hängt nach den Gleichungen 4.8 bzw. 4.7 von der jeweiligen Polarisation der einfallenden Welle ab.

Im Hinblick auf die dynamische Nachbildung des Kanals während der Protokollsimulation ist es wünschenswert, die Einflüsse der Antennencharakteristik und der

³Die worst-case Abschätzung beinhaltet auch, daß die abschattenden Fahrzeuge aus Materialien beschaffen sind, die undurchlässig für elektromagnetische Strahlung sind. Dies ist insbesondere für Lkw-Aufbauten nicht immer der Fall, soll aber hier nicht weiter betrachtet werden.

Systemumgebung in der Beschreibung weitestgehend zu separieren. Dies wird dann möglich, wenn die Winkel $\vartheta_{tn}, \vartheta_{rn}, \varphi_{tn}, \varphi_{rn}$ jeweils in einem Intervall liegen, in dem sich die Charakteristik der Sende- bzw. Empfangsantenne nur geringfügig ändert:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r \cdot |f_t(\vartheta_{t0}, \varphi_{t0}) \cdot f_r(\vartheta_{r0}, \varphi_{r0})|^2 \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} \varrho_n \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n} \right|^2 \quad (4.23)$$

Der Term

$$F = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \varrho_n \cdot e^{-\alpha \cdot r_n} \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r_n}}{r_n} \right|^2$$

wird Ausbreitungsfaktor genannt. Er beschreibt den Einfluß des Ausbreitungsraumes auf die Signalübertragung.

Sind die Wegunterschiede $\Delta r_n = r_n - r$ der einzelnen Pfade im Vergleich zu $r = r_0$ so gering, daß nur die Phasenverschiebungen betrachtet werden müssen, und wird der Reflexionsfaktor $\varrho \equiv -1$ gesetzt, so ergibt sich als gröbste Näherung:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot r}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r \cdot |f_t(\vartheta_{t0}, \varphi_{t0}) \cdot f_r(\vartheta_{r0}, \varphi_{r0})|^2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot r_0} \cdot \left| 1 - \sum_{n=1}^{N-1} e^{-j\beta \cdot \Delta r_n} \right|^2 \quad (4.24)$$

4.4 Sender-/Empfängereigenschaften

Neben den Antennen, die bereits ausführlich betrachtet wurden, sind Modulator bzw. Demodulator, Fertigungstoleranzen des Senders bzw. Empfängers sowie das Verhalten bei Vielfachzugriff und Nachbarkanalstörungen weitere zu berücksichtigende Sender-/Empfängereigenschaften.

4.4.1 Modulation-/Demodulation

Die Eigenschaften des Modulationsverfahrens bzw. Demodulationsverfahrens sind von besonderer Bedeutung für die Ableitung der für die Protokollsimulation relevanten Bitfehlerwahrscheinlichkeiten.

Durch die Modulation werden jeweils k Bit der Bitdauer $T_b = 1/R$ auf eine von $M = 2^k$ Signalformen der Symboldauer $T = k \cdot T_b$ abgebildet. Im allgemeinen sind die Signale Bandpaßsignale der Form

$$s_m(t) = \operatorname{Re} \left\{ s_{T_m}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \right\} \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (4.25)$$

Man nennt $s_{T_m}(t)$ die komplexe Hüllkurve und $\exp(j2\pi f_0 t)$ den komplexen Träger des Bandpaßsignals. f_0 ist die Trägerfrequenz. Für die Energie E_m einer Signalform gilt

$$E_m = \int_0^T s_m^2(t) dt. \quad (4.26)$$

Beispiele für einfache Modulationsverfahren sind ASK (Amplitude Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying) und einige spezielle Formate wie QAM (Quadrature Amplitude Modulation) und MSK (Minimum Shift Keying).

Unter der Voraussetzung, daß das Sendesignal auf der Übertragungsstrecke vom Modulator zum Demodulator von Gauß-verteilterm weißen Rauschen additiv überlagert wird, läßt sich bei bekannten Signalformen ein Empfänger finden, der die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Erkennung minimiert. Dieser Empfänger wird Korrelationsempfänger (matched filter) genannt. Wird die Phasenlage des Empfangssignals zur Demodulation benutzt, spricht man von einem *kohärenten* Empfänger. Ein *inkohärenter* Empfänger benötigt keine phasenstarre Synchronisation des Empfängerszillators mit dem ankommenden Trägersignal, führt aber auch zu einer Verschlechterung des Signal-/Rauschleistungsverhältnisses um etwa 1–2 dB [46].

Störungen durch fremde Funkdienste und Rauschteile, die durch das System verursacht werden, können wie Rauschstörer betrachtet werden, da sie weitgehend unkorreliert sind. Der gesamte Rauschpegel N ergibt sich durch leistungsmäßige Addition der Einzelbeiträge. Die Bitfehlerwahrscheinlichkeit P_B bzw. die Bitfehlerrate BER ist eine Funktion des gewählten Empfangsverfahrens, des Modulationsverfahrens und des Signal-/Rauschleistungsverhältnisses S/N . Eine wichtige Größe ist der Signal-zu-Rausch-Abstand pro Bit, der sich aus dem Zusammenhang

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST}{N_0} = \frac{S}{RN_0} = \frac{S\Delta f}{RN_0\Delta f} = \frac{S}{N} \cdot \frac{\Delta f}{R} \quad (4.27)$$

ergibt. Für die in Abschnitt 3.1 genannten Modulationsverfahren ergeben sich nach [76], [53] Bitfehlerwahrscheinlichkeiten als Funktionen von $\frac{E_b}{N_0}$.

Abb. 4.17 zeigt die Bitfehlerwahrscheinlichkeiten der für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation diskutierten Modulationsverfahren. Auch andere Verfahren wurden im Kanalmodell implementiert [60] und stehen für Simulationszwecke zur Verfügung.

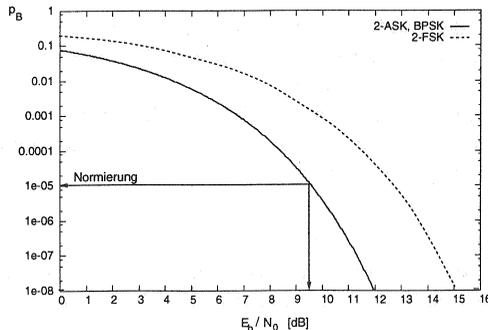


Abbildung 4.17: Bitfehlerwahrscheinlichkeiten der angeführten Modulationsverfahren

Für die Ableitung der Bitfehlerverhältnisse aus einer berechneten Signalpegelverteilung wird im folgenden eine Normierung der Signalpegels auf die SNR-BER-Kennlinie vorgenommen. Dabei wird der bei Freiraumdämpfung maximal erreichbare Signalpegel auf eine vorgegebene Bitfehlerwahrscheinlichkeit normiert. So ergibt

sich eine für jedes Modulationsverfahren spezifische Verteilung der Bitfehlerraten innerhalb der Kommunikationszone. Durch die Normierung bei Freiraumausbreitung ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für unterschiedliche Einflüsse der Systemumgebung gewährleistet.

4.4.2 Fertigungstoleranzen

Unter anderem sind auch Toleranzen sowohl bei der Fertigung der Geräte (Antennen, OBU etc.) als auch durch die Variationen bei der Positionierung der OBU als zusätzliche Dämpfungsfaktoren zu berücksichtigen.

4.4.3 Nachbarkanalstörungen und Berücksichtigung aktiver Interferer

Interferenzsignale von benachbarten Baken, die unterschiedliche Kommunikationsbereiche ausleuchten (space division), müssen in die Signalpegelberechnung ebenfalls eingehen, weil sich diese Bereiche wegen nicht idealer Richtcharakteristiken der Antennen teilweise überlappen können. Da diese mit dem Nutzsignal stark korreliert sind, erfolgt die Addition unter Berücksichtigung von Amplitude und Phase.

Durch gleichzeitige Übertragungen mehrerer OBUs kann es zu Vielfachzugriffinterferenzen (Datenkollisionen) im Uplink kommen. Bei geringen Entfernungsdifferenzen der OBUs zur Bake und damit ähnlich hohen Signalpegeln führt die Überlagerung dazu, daß der Empfänger die Daten nicht decodieren kann. Unterscheiden sich die Abstände der OBUs zum Empfänger (der Bake) jedoch stark, kann der Fall eintreten, daß der schwache Signalpegel der weiter entfernten OBU im Rauschen untergeht und somit die Übertragung der näheren OBU erfolgreich ist ('Capture'-Effekt). Insgesamt ergibt sich also für die Berücksichtigung des Capture-Effektes eine Verbesserung des Systemverhaltens, so daß die Annahme, daß bei mehreren gleichzeitigen Übertragungen innerhalb einer Kommunikationszone alle beteiligten Datenpakete nicht genutzt werden können, auf der 'sicheren' Seite liegt.

Um Nachbarkanalstörungen zu vermindern, werden benachbarte Kommunikationszonen oft bei unterschiedlichen Frequenzen betrieben (FDMA). Näherungsweise können parallele Übertragungen in unterschiedlichen Frequenzbändern als unabhängig voneinander angesehen werden.

4.5 Deterministische Systembetrachtung für ausgewählte Szenarien

In diesem Abschnitt werden nun deterministische Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die auf den zuvor beschriebenen Antennen- und Ausbreitungseigenschaften aufbauen. Hierzu wurde ein entsprechendes Werkzeug realisiert (siehe Anhang C), welches es ermöglicht die DSRC-spezifischen Eigenschaften des Funkfeldes in Straßenverkehrsszenarien mikroskopisch nachzubilden (ASSECSim- Analysis of Street Scenarios and Evaluation Channel data for Simulation).

Die Ausbreitungsbedingungen und insbesondere die makroskopische Systemumgebung sind vollständig bekannt und unterliegen keinen zufälligen Schwankungen. Der

nachfolgende Unterabschnitt befaßt sich mit der Positionierung und Ausrichtung der Baken-Antenne. Danach werden Ergebnisse der verkehrssituationsspezifischen Einflüsse von Reflexion und Abschattung vorgestellt. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung diskutiert. Die hier vorgenommene Identifizierung der relevanter Einflußgrößen bildet die Grundlage des für die Protokollsimulation verwendeten Kanalmodells.

4.5.1 Die Position und Ausrichtung der Baken-Antenne

Die Kontur des Kommunikationsbereiches und damit auch das Langzeitschwundverhalten (long term fading) des Kanals wird im Nahbereich von der Baken-Antenne bestimmt. Deshalb ist die Dimensionierung, Positionierung und die Ausrichtung der Baken-Antenne von großer Bedeutung. Der Entwurf einer Baken-Antenne wurde bereits zuvor behandelt. Hier geht es nun um die Position und Ausrichtung der Baken-Antenne. In Abb. 4.18 sind drei mögliche Grundfälle bei gleicher Kommunikationsgrundebene nach Abb. 4.2 zusammengestellt. Das erste Bild zeigt einen horizontalen Schnitt durch das Strahlungsfeld einer Baken-Antenne bei senkrechter Ausrichtung zur Kommunikationsgrundebene. Im zweiten Bild sind die räumlichen Verhältnisse bei halbschräger Ausrichtung (Neigung in x-Richtung; vergl. auch Abb. 4.2) und im dritten Teilbild bei schräger Ausrichtung (Neigung in x- und y-Richtung) zu sehen.

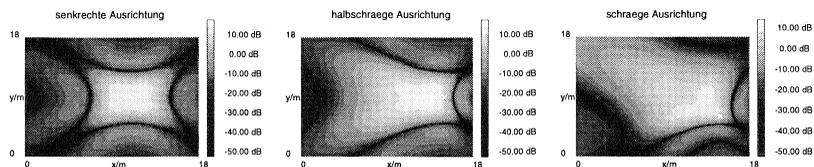


Abbildung 4.18: Strahlungsfelder für unterschiedliche Positionen und Ausrichtungen der Baken-Antenne im Vergleich

Die Begrenzungskurven $\vartheta = const$ in der jeweiligen Schnittebene sind entweder Hyperbeln, Parabeln oder Ellipsen (Kegelschnitte).

Bei Anwendungen im Straßenverkehr soll die Baken-Antenne einen Kommunikationsbereich mit rechteckförmiger Grundfläche möglichst gut erfassen. Eine solche Fläche wird im ersten Fall (senkrechte Ausrichtung) am besten ausgeleuchtet, wohingegen der Überlappungsbereich⁴ im letzten Fall (schräge Ausrichtung) am größten ist. Bei Verwendung passiver Transponder ist eine senkrechte Ausrichtung allerdings nicht möglich. Das unmodulierte Sinussignal (CW), das die Bake für den Uplink aussendet, würde von den Reflexionsflächen der Fahrzeuge oder der Fahrbahn fast in voller Stärke zurückreflektiert werden und das modulierte Nutzsignal von der Mobilstation überdecken. Deshalb ist bei solchen Systemen eine halbschräge Ausrichtung

⁴Der Überlappungsbereich ist derjenige Teil der tatsächlichen Kommunikationszone, der von der gewünschten Kommunikationszone abweicht.

(gantry) am besten. Im innerstädtischen Bereich wird es jedoch aus Akzeptanzgründen in der Regel nicht möglich sein, auffällige Baken-Konstruktionen über der Fahrbahn zu errichten. Hier kommt wohl eher eine schräge Ausrichtung der Baken-Antenne (sidepost) in Frage.

Ein weiterer Aspekt ist die Höhe der Baken-Antenne. Hier gilt folgender Zusammenhang: Je höher die Baken-Antenne, desto mehr Sendeleistung ist erforderlich, und desto größer sind die Überlappungsbereiche. Gleichzeitig können aber Gruppenantennen mit mehr Elementen benutzt werden, um die Richtwirkung zu erhöhen.

4.5.2 Reflexionen und Abschattung in der makroskopischen Systemumgebung

Nachfolgend werden die Einflüsse der makroskopischen Systemumgebung in einem Szenario auf der Autobahn (halbschräge Ausrichtung der Baken-Antenne) und in einem innerstädtischen Szenario (schräge Ausrichtung der Baken-Antenne) bei einer Frequenz von $f = 5,8 \text{ GHz}$ untersucht. Dabei werden drei unterschiedliche Fahrzeugtypen (PKW, LKW, Motorrad) und drei unterschiedliche Verkehrssituationen (ein einziges Fahrzeug in der Kommunikationszone, dichtes Auffahren, Überholen) zugrundegelegt. Die unterschiedlichen Objekte in der makroskopischen Systemumgebung unterteilen sich in statische Störer (z.B. Fahrbahn) und dynamische Störer (z.B. Fahrzeug-Karosserie). In Abb. 4.19 sind die geometrischen Modelle von LKW und PKW dargestellt. Bei LKW liegt die Mobilstation höher als bei PKW. Bei LKW wird im Gegensatz zu PKW keine Motorhaube berücksichtigt.

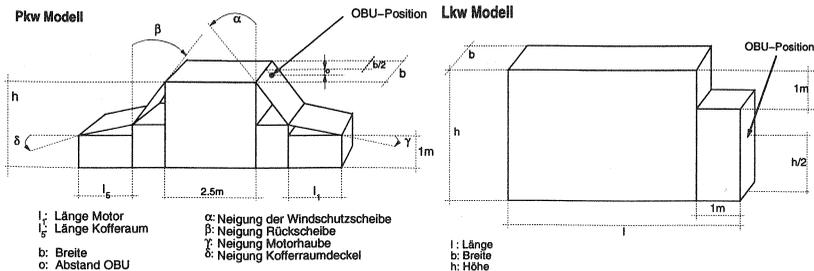


Abbildung 4.19: Geometrisches Modell von PKW und LKW

Für die Berechnung nach Gleichung 4.22 wird zunächst vertikale Polarisation angenommen. Die Reflexionsflächen seien glatt und eben. Bei Fahrzeugen bestehen sie (bis auf die Scheiben) aus Metall (d.h. $\rho = -1$). Die Straße habe die Materialkonstanten $\epsilon_r' = 3$, $\sigma = 0,7 \frac{A}{V \cdot m}$ (trockene Straße, vergl. [101]). Es werden maximal Zweifachreflexionen betrachtet ($K_{max} = 2$). Die Untersuchungen beziehen sich auf den analogen Kanal im Downlink. Die Untersuchungsergebnisse sind einerseits in Form eines horizontalen Schnittbildes durch das Empfangspegelfeld (SNR per Bit) in Höhe der Mobilstation und andererseits als Empfangspegelprofil über der Bahnkurve der Mobilstation aufbereitet.

4.5.2.1 Einflußfaktoren in Szenarien mit kurzen Kommunikationszonen

Abb. 4.20 zeigt schematisch die drei verschiedenen Verkehrssituationen, die hier betrachtet werden. Die Überholsituation (rechtes Teilbild) wird dabei durch eine reflektierende Seitenwand auf der benachbarten Fahrspur nachgebildet.

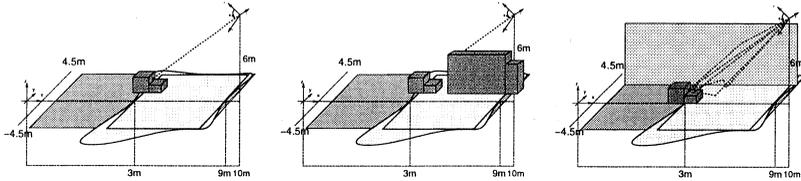


Abbildung 4.20: Unterschiedliche Verkehrssituationen

Isolierte Verkehrssituation Zunächst werden nur einzelne Fahrzeuge in der Kommunikationszone zugelassen (Abb. 4.20, linkes Teilbild). Das Fahrzeug bewege sich jeweils in x-Richtung auf der mittleren Fahrspur. Die Mobilstation (OBU) sei bei PKW in einer Höhe von 1.5 Metern und bei LKW in einer Höhe von 2.5 Metern angebracht. In den Abbildungen 4.21 bzw. 4.22 sind die Empfangspegelprofile für die Durchfahrt eines PKWs ($\alpha = \beta = \gamma = \delta = 0^\circ$, $l_1 = 0$ m, $l_5 = 1$ m) bzw. eines LKWs ($l = 6$ m, $b = 3$ m, $h = 3.5$ m) dargestellt. In den Empfangspegelprofilen ist jeweils das entsprechende Profil für die Freiraumausbreitung zum Vergleich aufgetragen.

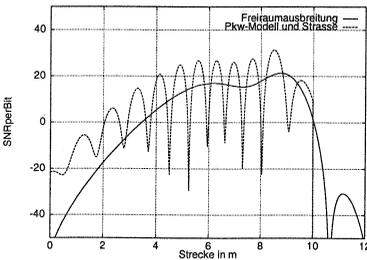


Abbildung 4.21: Durchfahrt eines einzelnen PKWs im Autobahnszenario ($z = 1.5$ m)

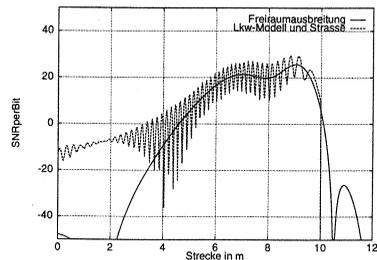


Abbildung 4.22: Durchfahrt eines einzelnen LKWs im Autobahnszenario ($z = 2.5$ m)

Durchfahrt eines PKWs Die Charakteristik der Antenne (vgl. Freiraumausbreitung) bestimmt allgemein die Kontur des Kommunikationsbereiches. Die Durchfahrt des PKWs durch das Szenario besteht aus drei charakteristischen Phasen. Zunächst schiebt sich die Motorhaube in den scharf abgegrenzten Kommunikationsbereich. Es kommt zu einem reflektierten Ausbreitungspfad, die Kommunikationszone wird verlängert. In der zweiten Phase befindet sich

	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
Höhe [m]	1.35	1.40	1.45	1.80
Breite [m]	1.65	1.70	1.80	1.80
Motorhaubenlänge [m]	0.80	0.90	1.20	1.20
Motorhaubenwinkel	15°	10°	8°	5°
Windschutzscheibenwinkel	55°	55°	55°	20°
OBUspos [m]	1.20	1.25	1.30	1.65
Häufigkeit [%]	≈ 29.0	≈ 40.0	≈ 29.0	≈ 2.0

Tabelle 4.1: Abmessungen und Winkel verschiedener Fahrzeugtypen

zusätzlich die Mobilstation in der Kommunikationszone, es entsteht eine Zwei-Wege-Ausbreitung mit starken periodischen Signalpegel einbrüchen. Aufgrund der metallischen Oberfläche der Motorhaube ($\varrho = -1$) kommt es fast bis zur völligen Auslöschung des Signalpegels. In der dritten Phase schließlich bleibt nur noch die direkte Verbindung zwischen Mobilstation und Bake bestehen, da auf der Motorhaube kein Reflexionspunkt mehr gefunden wird. Im rückwärtigen Bereich einer realen Baken-Antenne ist über die Nebenmaxima der Antennencharakteristik kein Empfang mehr möglich, da die direkte Sichtverbindung vom Dach des PKWs abgeschattet wird.

Durchfahrt eines LKWs Bei der Durchfahrt eines LKW dominiert hingegen der Einfluß der Fahrbahnoberfläche. In Abb. 4.22 lassen sich die gleichen Ausbreitungsphasen erkennen wie beim PKW. Allerdings liegen hier die Pegel einbrüche viel enger zusammen und sind nicht so tief (anderes Material). Die Verbindungsqualität wird durch die Einbrüche lediglich verschlechtert, die Kommunikation wird jedoch nicht notwendigerweise unterbrochen. Der Abstand der Einbrüche ist umso geringer, je größer der Abstand der Mobilstation zum Reflektor liegt. Kleine Wegänderungen in Fahrtrichtung haben dann im Vergleich zur Wellenlänge große Änderungen in der Längendifferenz Δr der beiden Ausbreitungspfade zur Folge.

Die Neigung von Motorhaube und Windschutzscheibe Nachdem in der vorangegangenen Betrachtung festgestellt wurde, daß bei PKW die Motorhaube dominierend auf den Signalpegelverlauf einwirkt, wird nun der Einfluß unterschiedlicher Neigungswinkel von Motorhaube und Windschutzscheibe untersucht. Die Neigung der Windschutzscheibe bestimmt die relative Lage und Ausrichtung der Mobilantenne.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen werden 4 typische Fahrzeugformen für Pkw eingeführt. Die Abmessungen und Winkel der einzelnen Typen ergeben sich nach Tabelle 4.1.

Um die Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen besser darzustellen, erfolgt die Untersuchung mit einer am rechten Fahrbahnrand positionierten Bakenantenne und isotropen Antennencharakteristiken.

Die Abb. 4.23 stellt die Signal-/Rauschleistungsverhältnisse in der Kommunikationszone für die verschiedenen Fahrzeugtypen dar:

Typ A (Stadtauto) zeigt am Anfang der Kommunikationszone die typische Zweivegecharakteristik. Ab der Mitte des Kommunikationsbereiches wird

nur der direkte Pfad empfangen, da die Motorhaube die Reflexion der Straße abschattet. Aufgrund der starken Motorhaubenneigung gibt es keine von ihr reflektierten Pfade, die zu einer Überlagerung führen.

Typ B (Golf-Klasse) Die ersten Meter des Kommunikationsbereiches von Fahrzeugtyp B werden durch die Überlagerung des direkten Pfades mit den von der Straße und der Motorhaube reflektierten Pfaden bestimmt. Im daran anschließenden Bereich wird die Straßenreflexion abgeschattet. In der Nähe der Bakenantenne tritt die Freiraumausbreitung auf.

Typ C (Limousine) zeigt einen ähnlichen Empfangspegelverlauf wie Typ B, die einzelnen Bereiche lassen sich allerdings leichter identifizieren. Deutlich sind die starken Signalpegel einbrüche zu erkennen, die durch die metallische Motorhaube verursacht werden.

Typ D (Geländewagen) Die geringe Neigung der Motorhaube von Fahrzeugtyp D verbunden mit der steilen Windschutzscheibe führt zu den starken Signalpegelchwankungen in der Nähe der Bakenantenne.

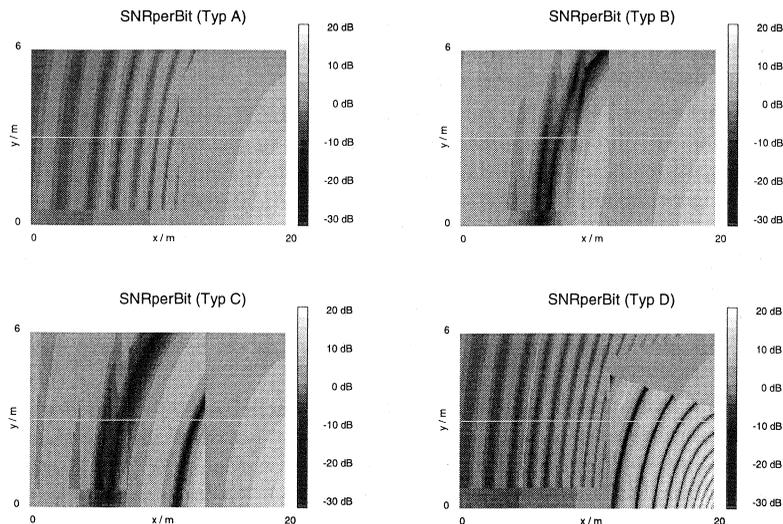


Abbildung 4.23: Signalpegelverteilung für unterschiedliche Fahrzeugtypen

Dichtes Auffahren Bei zu dichtem Auffahren eines PKWs auf einen voranfahrenden LKW (siehe Abb. 4.20, mittleres Teilbild) kommt es zur Abschattung (unter Berücksichtigung des worst-case, geometrischen Abschattungsmodells). In Abb. 4.24 ist diese Situation für eine Auffahrdistanz von $d = 1$ m bzw. $d = 1.5$ m dargestellt. Der Kommunikationsbereich wird aufgrund der Abschattung entsprechend reduziert. Andererseits muß auch berücksichtigt werden, daß diese extrem geringen Fahrzeugabstände nur bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten, für die sich die Auf-

enthaltsdauer in der Kommunikationszone verlängert, auftreten. Die zur Verfügung stehende Kommunikationsdauer ist daher auch bei Abschattung durch dichtes Auffahren in der Regel ausreichend.

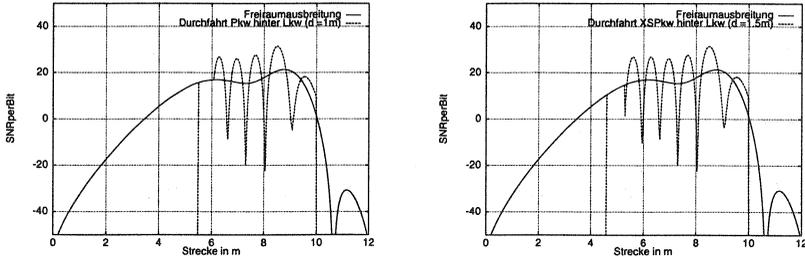


Abbildung 4.24: PKW bei dichtem Auffahren auf einen voranfahrenden LKW ($d = 1 \text{ m}$, 1.5 m) - Abschattungssituation

Überholssituationen In Überholssituationen müssen neben den Reflexionsflächen des kommunizierenden Fahrzeuges noch die Reflexionsflächen fremder Fahrzeuge berücksichtigt werden (siehe Abb. 4.20, rechtes Teilbild). Beim Überholen eines LKWs auf der Nachbarspur wird der Empfang der Mobilstation zusätzlich durch die Seitenfläche des LKWs beeinflusst. Hier wird dieser Effekt durch eine reflektierende Seitenwand aus Metall berücksichtigt. Dagegen hat ein benachbarter PKW nur einen geringen Einfluß auf den Empfang des kommunizierenden Fahrzeuges.

Sowohl bei PKW als auch bei LKW kommt gegenüber der isolierten Verkehrssituation ein Ausbreitungspfad hinzu. In unmittelbarer Nähe zur Baken-Antenne macht sich die Seitenwand kaum bemerkbar. In größerer Entfernung jedoch ist der Verlauf sehr unregelmäßig (Abb. 4.25). Bei einem Abstand der OBU von mehr als drei Metern von der Seitenwand läßt der Einfluß spürbar nach.

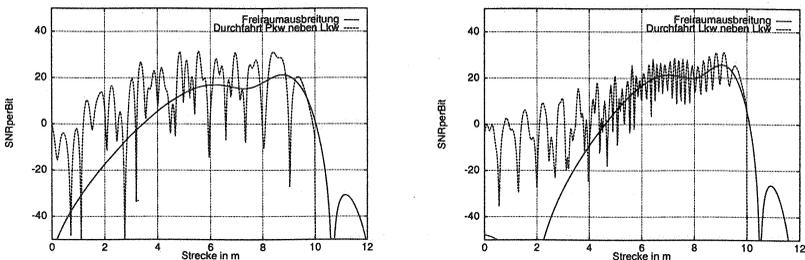


Abbildung 4.25: PKW und LKW in einer Überholssituation (LKW auf der Nachbarspur)

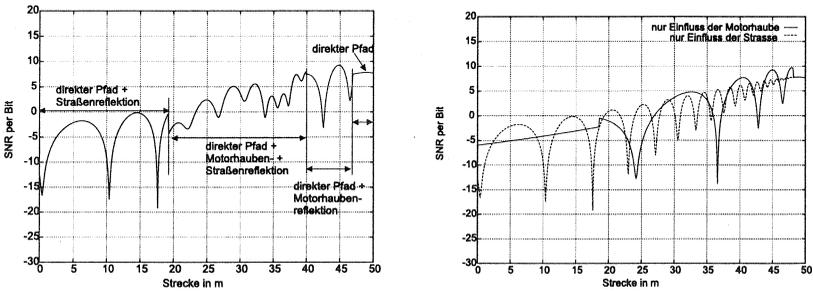


Abbildung 4.26: Durchfahrt eines einzelnen PKWs in einem System größerer Reichweite

4.5.2.2 Einflußfaktoren in einem System größerer Reichweite

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde festgestellt, daß bei PKW der dominierende Einfluß von der Motorhaube ausgeht. Reflexionen an der Straße sind im Nahbereich vernachlässigbar. Bei Systemen größerer Reichweite (bis 50 m) kann allerdings auch ein über die Straße reflektierter Pfad von der Bake zur Mobilstation eines PKWs gelangen. In Abb. 4.26 sind die möglichen Phasen bei einer Durchfahrt eines PKWs ($\alpha = \beta = \delta = 0^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $l_1 = 0$, $l_5 = 1$) zu erkennen. Hierbei wurde wieder eine Baken-Antenne mit 4 Elementen verwendet (siehe auch Validierung der Ausbreitungsmodellierung in Abschnitt 4.6). Um die Einflüsse der verschiedenen Reflektoren (Motorhaube und Straßenoberfläche) zu verdeutlichen, wurde die Untersuchung auch unter Berücksichtigung nur eines Einflußfaktors durchgeführt.

Einfluß der Randbebauung bei breitstrahlenden Antennen Bei der Betrachtung eines beispielhaften innerstädtischen Szenarios umfaßt der gewünschte Kommunikationsbereich eine rechteckförmige Grundfläche von 6 Metern in x-Richtung und 9 Metern in y-Richtung. Allerdings kommt hier eine Baken-Antenne mit schräger Ausrichtung zur Anwendung. Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt gelten auch hier. Aufgrund der Randbebauungen in Innenstädten und der Ausrichtung der Baken-Antenne kommt es in diesem Szenario allerdings zu deutlichen Deformationen des Kommunikationsbereiches. In der Abb. 4.27 sind die Schnittbilder der Freiraumausbreitung (oben links) und der Durchfahrt eines PKWs bei $z = 1,5$ mit (unten rechts) und ohne (oben rechts) Häuserwand zu sehen. Dazu ist der Einfluß der Häuserwand (unten links) gesondert dargestellt.

4.5.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung

4.5.3.1 Charakteristik der OBU-Antenne

Bisher wurde als Mobilantenne ein isotroper Kugelstrahler angenommen. Im einfachsten Fall werden die Fahrzeuge allerdings mit einer Dipol-Antenne ausgestattet, die auf die Hauptstrahlrichtung der Bakenantenne ausgerichtet ist. Hierdurch können die Signalpegel einbrüche aufgrund der Zwei-Wege-Ausbreitung unterdrückt werden

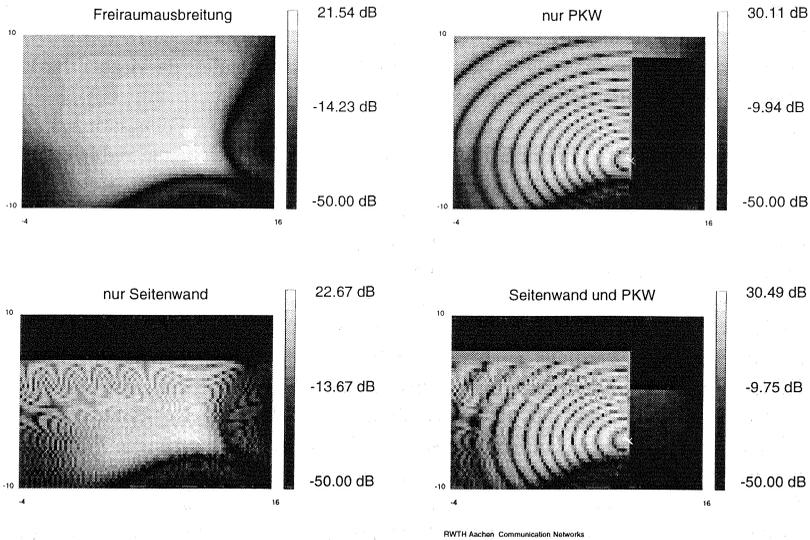


Abbildung 4.27: Reflexion und Abschattung im innerstädtischen Szenario

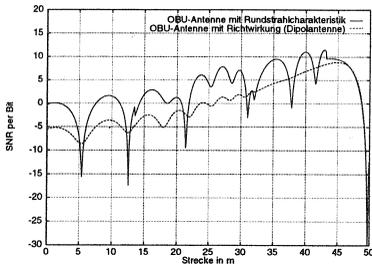


Abbildung 4.28: Einfluß einer gerichteten OBU-Antenne

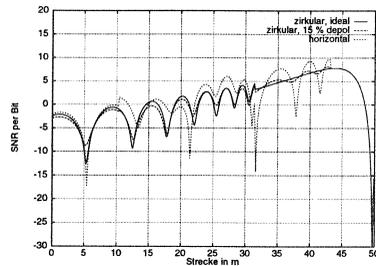


Abbildung 4.29: Vergleich bei horizontaler und zirkularer Polarisation

(die Reflexionen über die Motorhaube werden wirksam unterdrückt), vgl. Abb. 4.28. Andererseits wird die Kommunikationszone dort verkürzt, wo sich keine optimale Übereinstimmung der Ausrichtung der OBU-Antenne ergibt.

Der Einfluß der Motorhaube oder Straßenoberfläche könnte noch weiter reduziert werden, wenn die Mobilstation nicht hinter der Windschutzscheibe, sondern auf dem Dach der Fahrzeuge angebracht würde. Dann würden von unten kommende Reflexionen fast vollständig abgeschattet.

Polarisation Die Polarisation elektromagnetischer Wellen hat entscheidenden Einfluß auf die empfangenen Signalpegel bei der Fahrzeug-Baken-Kommunikation. Die Reflexions- und Transmissionseigenschaften sind von der verwendeten Polarisa-

tion abhängig, und beeinflussen somit die bei der Mehrwegeausbreitung auftretenden konstruktiven und destruktiven Überlagerungen der Teilwellen.

Bisher wurde die horizontale Polarisation im Modell verwendet, da hierbei der Einfluß der metallischen Reflektoren besonders deutlich wird.

Aus diesen Überlegungen folgt, daß bei Verwendung zirkularer Polarisation die Systemleistung ansteigt, da die Wirkung destruktiver Überlagerungen reduziert werden kann. Abb. 4.29 zeigt, daß der Einfluß des metallischen Reflektors 'Motorhaube' weitgehend eliminiert werden kann (bei idealen Antennen). Auf der anderen Seite entfallen dabei auch konstruktive Überlagerungen, die für bestimmte Anwendungen bereits ausreichen, um einen Teil des Kommunikationsprozesses abzuwickeln. Somit ist der Einfluß der Polarisation auf das Kommunikationssystem noch genauer zu analysieren (vgl. Systembewertung, Abschnitt 9.1.5.2).

Zu beachten ist allerdings auch der Einfluß auf die Lokalisierungsfunktion des Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystems (siehe Abschnitt 3.2.4). Ist dabei der empfangene Signalpegel für eine Abschätzung der Position der mobilen Station relevant, so ist in jedem Fall ein von starken Signalpegelschwankungen freier Kommunikationsbereich vorzuziehen. Für Lokalisierungsverfahren, die eine Zuordnung der Fahrzeugposition über den von einer Antenne ausgeleuchteten Raumbereich vornehmen, ist eine unkontrollierte - da fahrzeugtyp-spezifische - Vergrößerung der Kommunikationszone unerwünscht, da dies die Eindeutigkeit und Genauigkeit der Lokalisierungsfunktion beeinträchtigt.

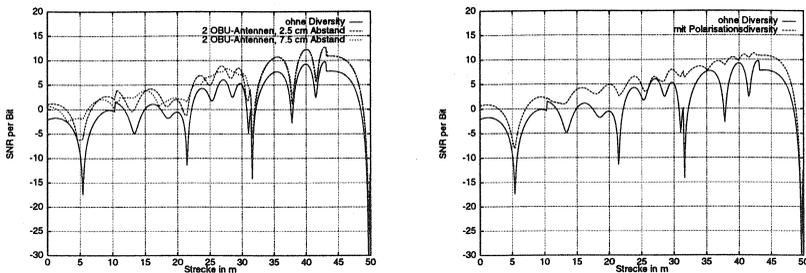


Abbildung 4.30: Einsatz von Mikrodiversität in der OBU (Raumdiversität, Polarisationsdiversität)

OBU-Diversität Um den Einfluß von tiefen Fadingeinbrüchen zu vermindern, kann eine zweite Antenne auf OBU-Seite (OBU-Diversität) eingesetzt werden. In dem hier betrachteten System werden beide Signale dem Empfänger zugeführt (siehe [68]), die Beträge der Empfangsleistungen beider Antennen werden addiert. Dementsprechend läßt sich also eine maximale Anhebung des Empfangspegels um 3 dB erzielen.

Entscheidend für die Erzielung optimaler Ergebnisse ist der Abstand der Antennen in bezug auf die Phasenverschiebung der unterschiedlichen Signale. Im Idealfall sind die Signale um 90 Grad phasenverschoben, d.h. immer dann, wenn ein Signal einen Fadingeinbruch hat, wird dieser durch das andere Signal ausgeglichen. Um den Ef-

fekt in dieser idealen Form zu erzielen, müßte der Abstand aber in einer mobilen Umgebung laufend angepaßt werden.

Die Wahl des Abstandes muß in realen Systemen (dort ist der Abstand fest vorzugeben) so bestimmt werden, daß der Diversitätseffekt dort, wo es relevant ist, optimal wirkt. Da die Abmessungen der OBU begrenzt sind, kann der Abstand zwischen den Antennen allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen variiert werden.

Möglich ist weiterhin die Anwendung von Polarisationsdiversität. Hierbei ist die OBU in der Lage die rechts- wie linksdrehende Komponente einer Welle zu empfangen.

Die Abb. 4.30 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Antennenabstände in den bereits eingeführten Szenarien.

Man erkennt, daß die Raumdiversität für unterschiedliche Antennenabstände in bestimmten Teilbereichen besonders wirksam ist, während in anderen Bereichen der Übertragungsstrecke nur eine geringe Wirkung zu erzielen ist (abgesehen von der oben bereits angesprochenen 3 dB Anhebung). Für die Polarisationsdiversität ergibt sich eine durchgehende Verbesserung durch die Reduktion der besonders tiefen Fadingeinbrüche.

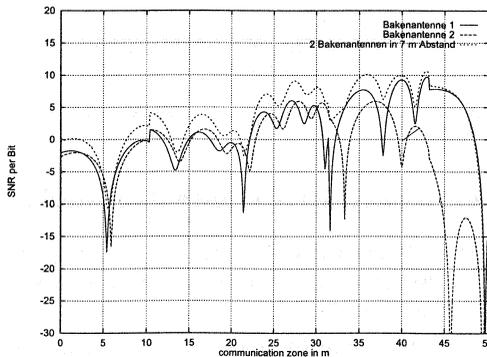


Abbildung 4.31: Einsatz von Makrodiversität (Raumdiversität)

Baken-Diversität Im Raumdiversitätsbetrieb erfolgt die Signalabstrahlung von zwei (oder mehreren) Baken synchron bei unterschiedlichen Trägerfrequenzen, die beide von der mobilen Station empfangen werden können [68]. Die Empfangsleistungen können dann betragsmäßig addiert werden. Aufgrund des großen Abstandes zwischen den Bakenantennen spricht man auch von Makrodiversität.

Die Abb. 4.31 zeigt die Ergebnisse für die Empfangsleistung für eine beidseitige Installation gemäß Abb. 3.6 in den bereits eingeführten Szenarien. Es zeigt sich eine deutliche Reduzierung des Einflusses der Mehrwegeausbreitung, insbesondere tiefe Fadingeinbrüche sind vermindert worden.

In Kapitel 9.1.5.1 zur Systembewertung werden die Einflüsse der verschiedenen Techniken auf die Gesamtleistungsfähigkeit des Systems ausführlich diskutiert.

4.6 Bewertung der Ausbreitungsmodellierung durch Vergleich mit Meßdaten

Zur Validierung der Funkkanalberechnung wurden neben der Standardliteratur (z.B. [51]) insbesondere Arbeiten von [8], [26], [33] und [19] berücksichtigt. In Abb. 4.32 werden die Ergebnisse der Berechnungen des Funkfeldmodellierungswerkzeugs mit Meßergebnissen [26] gegenübergestellt. Man erkennt die gute Übereinstimmung zwischen der Messung und der Berechnung speziell für das Auftreten von Pegelminima.

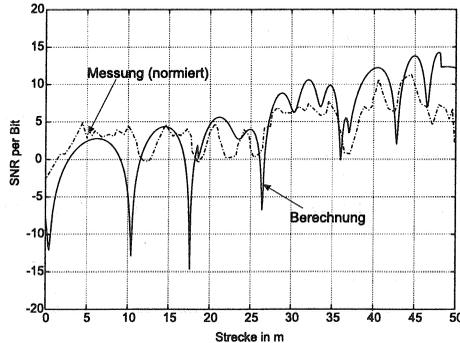


Abbildung 4.32: Berechneter Signalpegelverlauf verglichen mit Messung

4.7 Zusammenfassung der vorgestellten Methoden

Die hier vorgestellten Methoden wurden in einem Werkzeug implementiert (ASSEC-Sim, siehe Anhang C), welches folgende Methoden für die Analyse des DSRC-Übertragungskanals zur Verfügung stellt:

- Die Antennencharakteristiken sowohl der Baken- als auch der Mobilantennen werden berücksichtigt. Für die Bakenantennen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:
 - Einlesen von berechneten oder gemessenen Daten (horizontale Schnitte)
 - Entwurf von Gruppenantennen (Shaped Beams bzw. Pencil Beams)
 - Rekonstruktion zuvor entworfener Antennen durch direkte Angabe der Parameter
- Verschiedene Polarisationsarten (horizontal, vertikal, zirkular) können vorgegeben werden.
- Verschiedene Modulationsverfahren sowie Modulationstabellen können für den Down- und Uplink getrennt vorgegeben werden.
- Die Normierung der berechneten Signalpegeldaten erfolgt durch die Vorgabe einer Bitfehlerwahrscheinlichkeit für den Punkt im Kommunikationsbereich mit dem höchsten Empfangspegel unter den Bedingungen der Freiraumausbreitung. Anschließende Berechnungen werden hierauf normiert. Die Höhe des Normierungspunktes ist frei wählbar.

- Es werden verschiedene Diversity-Arten berücksichtigt:
 - Mikrodiversity (OBU) durch Spezifikation einer weiteren Antenne in einem vom Benutzer zu definierenden Abstand (Raumdiversity).
 - Makrodiversity durch Definition von überlappenden Kommunikationsbereichen (Raum- und Frequenzdiversity)
 - Polarisationsdiversity durch Berücksichtigung der kopolaren wie auch kreuzpolaren Komponente einer einfallenden Welle.
- Die Eingabe von beliebig im Raum angeordneten, sich überlappenden Kommunikationsbereichen für verschiedene Applikationen ist möglich. Diese Erweiterung erlaubt die Konfiguration und Auswertung von komplexen Szenarien [43].
- Gemeinsame und nach Down- und Uplink getrennte Parameter, z. B. Frequenz, Datenrate, usw., werden durch den Benutzer vorgegeben.
- Durch die Wahl der Systemumgebung ist eine Analyse verschiedener Szenarien möglich. Dabei wird zwischen statischen und mitbewegten Reflektoren unterschieden. Der Einfluß von Gebäuden, Schallschutzwänden, von parkenden und benachbarten Fahrzeuge kann untersucht werden.
- Die graphische Ausgabe von beliebigen Schnitten und Profilen erlaubt die Auswertung der
 - Horizontal- und Vertikaldiagramme sowie der Strahlungsfelder der verwendeten Antennen,
 - Signal-/Rauschleistungsverhältnisse und
 - Bitfehlerwahrscheinlichkeiten.
- Die Kanalparameter (SNR/BER) für die in Kapitel 8 ausführlich erläuterte integrierte Systemsimulation können berechnet werden. Die Berechnung der Signalpegeldaten ist dabei abgestimmt auf den für die Systemsimulation notwendigen, situationsabhängigen Zugriff auf unterschiedliche BER/SNR-Matrizen. Somit können die in unterschiedlichen Verkehrssituationen auftretenden Einflüsse auf den Empfangspegel zunächst im Vorfeld der Simulation untersucht und dann später in der Systemsimulation dynamisch berücksichtigt werden.

Der entwickelte Protokollstapel und seine Benutzung

Im nachfolgenden Kapitel werden die wesentlichen Eigenschaften des für Nahbereichsmobilfunksysteme entwickelten Protokollstapels vorgestellt. Nach einer Einführung in den Aufbau der Kommunikationsarchitektur, die Rahmenstruktur und das schichtenübergreifende Management folgt eine Darstellung der nun als Standardisierungsentwurf vorliegenden Spezifikationen für die Bitübertragungs-, die Sicherungs- und die Anwendungsschicht. Daran anschließend wird auf die hier durchgeführte formale Spezifikation der DSRC-Kommunikationsarchitektur in SDL sowie die Definition und Durchführung von DSRC-Konformitätsprüfungen eingegangen. Abschließend wird die Benutzung der DSRC-Kommunikationsarchitektur anhand von Implementierungsvorschlägen für typische Anwendungsprozesse demonstriert.

5.1 DSRC Kommunikationsarchitektur

5.1.1 Die DSRC-3-Schichten Architektur - eine Übersicht

Die DSRC Kommunikationsarchitektur wurde aus dem ISO-OSI 7-Schichten Referenzmodell (siehe Abschnitt 3.4.1) abgeleitet, wobei die speziellen Rahmenbedin-

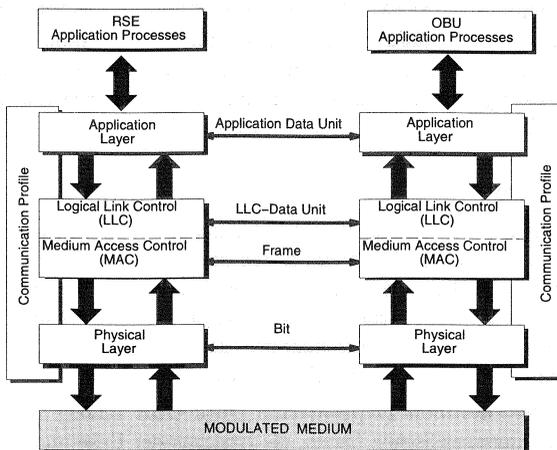


Abbildung 5.1: DSRC Kommunikationsarchitektur

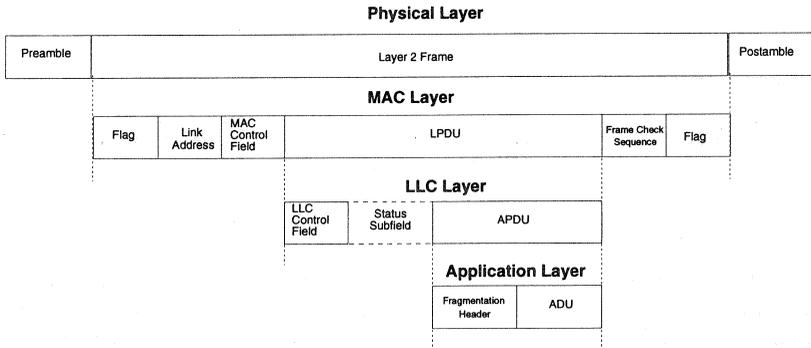


Abbildung 5.2: DSRC Rahmenstruktur

ungen für Nahbereichsmobilfunksysteme zu folgender 3-Schichten-Struktur führten (siehe Abb. 5.1):

- Für die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) wurden Spezifikationen für zwei Übertragungsmedien, für Mikrowelle bei 5.8 GHz [71] und Infrarot [72] mit Wellenlängen zwischen 850 nm entwickelt.
- Die Datensicherungsschicht (Data Link Layer) [73] besteht aus der LLC (*Logical Link Control*)- und der MAC (*Medium Access Control*) Teilschicht. Die Spezifikation für die LLC Teilschicht wurde weitgehend vom IEEE 802.3 Standard abgeleitet. Die MAC Teilschicht sorgt für einen effizienten Kanalzugriff und insbesondere für die Vermeidung sowie Auflösung von Datenkollisionen bei Mehrfachzugriff. Die MAC Teilschicht wurde speziell für DSRC-Systeme entwickelt und wird daher im folgenden ausführlich dargestellt.
- Die Anwendungsschicht (Application Layer) [74] stellt eine Schnittstelle für die verschiedenen RTTT-Anwendungsprozesse zur Verfügung. Sie ist insbesondere für die Initialisierung der Kommunikation zwischen OBU und Bake, für die Fragmentierung von Datenpaketen und für das Multiplexen von Anwendungen verantwortlich.

5.1.2 Rahmenstruktur

Der DSRC-Rahmen enthält die Protokoll Daten der verschiedenen Schichten der Kommunikationsarchitektur, wobei die Daten der darüberliegenden Schicht jeweils von der darunterliegenden Schicht gekapselt werden. Nachfolgend werden die in einem Rahmen enthaltenen Information von innen nach außen (siehe Abb. 5.2). vorgestellt. Die detaillierte Erläuterung einzelner Elemente der DSRC-Rahmenstruktur erfolgt jeweils in den nachfolgenden Abschnitten.

Anwendungsdateneinheit (Application Data Unit ADU) Die ADU enthält die anwendungsspezifischen Daten, die zwischen der Bake und mobilen Stationen ausgetauscht werden. Sie werden in der Regel in abstrakter Form spezifiziert (Abstract Syntax Notation One ASN.1) und dann durch entsprechende

Codierer in eine Bitrepräsentation umgesetzt. Es kann sich aus Gründen des Datenschutzes bzw. der Datensicherheit auch um verschlüsselte Daten handeln. Die Spezifikation der ADU liegt vollkommen in der Verantwortung der Anwendung. Ein Beispiel für die Spezifikation von anwendungsbezogenen Daten wird in Abschnitt 5.7 gegeben.

Anwendungsprotokolldateneinheit (Application Protocol Data Unit) Die APDU enthält die zur Steuerung der Funktionen des Anwendungsschichtprotokolls notwendigen Daten, z.B. zur Abwicklung der Defragmentierung. Da im Anwendungsschichtprotokoll die Spezifikation der relevanten Daten bis auf einige Steuerdaten unter Verwendung der abstrakten Spezifikationsprache ASN.1 vorgenommen wurde, ist das Format der Bitrepräsentation durch die entsprechenden Kodierungsregeln festgelegt: aus Effizienzgründen werden die Packed Encoding Rules PER verwendet ([82]).

Verbindungsprotokolldateneinheit (Logical Link Control PDU) Die LPDU setzt sich zusammen aus einem Steuerfeld (detaillierte Erläuterung siehe unten) und dem Informationsfeld, welches durch die APDU beschrieben ist.

Rahmen des Kanalzugriffsprotokolls (Medium Access Control MAC Frame)

Der MAC Rahmen enthält die LPDU, welche durch folgende spezifische Datenfelder ergänzt wird:

- Ein Startflag und Endflag des MAC Rahmens ist für die korrekte Dekodierung eines Rahmens erforderlich, da die Rahmenlänge variabel ist.
- Kommunikationsadresse (Link Address)
- MAC Steuerfeld (MAC Control Field)
- Rahmenkontrollsequenz (Frame Check Sequence FCS)

MAC Rahmen ohne LPDU können dann eingesetzt werden, wenn die Kommunikation auf reine Kanalzugriffsprotokollfunktionen beschränkt ist (siehe unten).

Preamble/Postamble Abhängig von der Spezifikation der Bitübertragungsschicht ist eine Post- bzw. Preamble zwingend bzw. optional vorgesehen, deren Dauer für die Berechnung von Übertragungszeiten eines DSRC- Rahmens von der Kanalzugriffssteuerungsschicht mitberücksichtigt werden müssen

5.1.3 Kommunikationsprofile und das schichtenübergreifende Management

DSRC-Kommunikationsprofile tragen der Notwendigkeit nach einer Abstimmung der schichtenspezifischen Parameter Rechnung. Durch ein Kommunikationsprofil wird der Lösungsraum, der sich durch die Kombination aller parametrisierbaren Eigenschaften der einzelnen DSRC- Kommunikationsschichten (z.B. Datenraten, Parameter der Kanalzugriffsprotokolle) ergibt, auf eine konkrete Systemlösung eingeschränkt. Mobile Stationen wie auch Baken können dabei mehrere Kommunikationsprofile unterstützen. Durch die in Abschnitt 5.5 beschriebene Anmeldephase einer mobilen Station werden die jeweils unterstützten Kommunikationsprofile ausgetauscht und ein Kommunikationsprofil für die Abwicklung des folgenden Kommunikationsprozesses ausgewählt. Nach der Auswahl eines Kommunikationsprofils

gelten für den nachfolgenden Kommunikationsprozeß die entsprechenden Kommunikationsparameter (z.B. Datenrate). Die Bake muß dabei in der Lage sein, gleichzeitig mehrere mobile Stationen mit unter Umständen unterschiedlichen Kommunikationsprofilen zu unterstützen.

Das DSRC Management erfüllt somit folgende Aufgaben:

- Auswahl des geeigneten Kommunikationsprofils (siehe hierzu Anmeldephase in Abschnitt 5.5),
- Weiterleitung der mit dem gewählten Kommunikationsprofil verbundenen Parameterwerte an die Schichten der Kommunikationsarchitektur,
- Steuerung paralleler Kommunikationsprozesse auf der Basis unterschiedlicher Kommunikationsprofile.

Standardisierungsbedarf besteht dabei nur bei der Festlegung des Auswahlprozesses für das Kommunikationsprofil sowie für die eindeutige Spezifikation des mit einem Kommunikationsprofil verbundenen Parametersatzes.

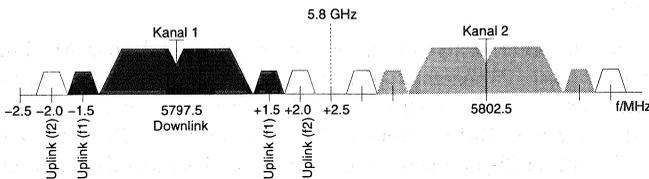
5.2 DSRC Bitübertragungsschicht

Für die zwei für Anwendungen der Verkehrsleittechnik zur Verfügung stehenden Übertragungsmedien sind folgende für die spätere Betrachtung des Gesamtsystems relevante Festlegungen getroffen worden [71] [72].

5.2.1 Mikrowelle bei 5,8 GHz

Innerhalb der zur Verfügung stehenden 10 MHz Bandbreite (Mittenfrequenz 5.8 GHz, Details zur Frequenzzuweisung siehe Abschnitt 3.2.1) stehen 2 Downlink-Kanäle mit je 2.5 MHz Bandbreite zur Verfügung. Die Downlinkkanäle werden eingesetzt entweder zur Datenübertragung (moduliert) oder zur Aussendung von CW (Continuous Wave), die vom Transponder (OBU) zur Uplinkübertragung genutzt wird (siehe Abschnitt 3.2.3).

Die Datenrate je Downlinkkanal beträgt 500 kbit/s (Modulationsverfahren ASK-2, Codierung FM0). Im Uplink stehen pro Downlinkkanal jeweils 2 Übertragungskanäle (Trägerfrequenz 1.5 oder 2 MHz) zur Verfügung. Die Datenrate beträgt 250 kbit/s (Modulationsverfahren 2-PSK, Codierung NRZI).



Die so gewählte Aufteilung des Frequenzbandes ermöglicht eine Realisierung der in Abschnitt 3.2.2 dargestellten FDMA Konfigurationen (pro Bakeninstallation stehen 2 Uplinkkanäle zur Verfügung, die im Wechsel eingesetzt werden können). Weiterhin werden durch die Verfügbarkeit zweier Downlink-Kanäle Installationen von

mehreren, unsynchronisierten Baken auf engem Raum (in Innenstadtbereichen oder Doppelbakenkonfigurationen) unterstützt (siehe Abschnitt 3.2.5).

Als Polarisationsverfahren wird zirkulare Polarisation eingesetzt (linksdrehend), was nach den in Abschnitt 4.5.3 vorgestellten Untersuchungen zu einer weitgehenden Vermeidung von Signalpegeleinbrüchen durch den dominanten Reflektor 'Motorhaube' führt.

5.2.2 Infrarot bei 850 nm

Infrarot bei 850 nm steht als alternatives Übertragungsmedium für Anwendungen der Verkehrsleittechnik zur Verfügung. Die verwendete Bandbreite von 100 nm ist jeweils symmetrisch um 850 nm angeordnet (800...900 nm). Im Downlink und Uplink wird ASK-OOK als Modulationsverfahren eingesetzt. Die Datenrate beträgt 500 kbit/s im Downlink und 125 kbits/s im Uplink, wobei höhere Datenraten optional verfügbar sind.

Die Systemkenngrößen (Toleranzbereiche für Sendeleistungen und Empfängerempfindlichkeiten) sind so gewählt, daß für eine Kommunikationszone von 10 m (Referenzbitfehlerverhältnis 10^{-7}) unter ungünstigsten Bedingungen (niedrigste Abstrahlleistung und geringste Empfängerempfindlichkeit) der Einfluß der direkten Sonneneinstrahlung nicht größer ist als 7.4 dB (dies ist die maximal zu erwartende Dämpfung bei starkem Regen, Nebel, Schmutz oder dämpfendem Windschutzscheibenbelag, wie z.B. Schmutz oder Eis). Somit kann für Infrarot eine weitgehend von ungünstigen Witterungsbedingungen unabhängige Kanalqualität angenommen werden.

5.3 DSRC Kanalzugriffsprotokoll (MAC-Teilschicht)

Das DSRC Kanalzugriffsprotokoll steuert den Zugriff auf das zur Verfügung stehende Medium, wobei das Protokoll so aufgebaut ist, daß es sich durch entsprechende Parametrisierung an die Erfordernisse unterschiedlicher Medien anpassen läßt. Die innerhalb einer Systeminstallation zu betrachtenden Kommunikationspartner sind, wie bereits eingeführt, die fest-installierte DSRC Kommunikationseinrichtung, die *Bake*, sowie die mobilen DSRC Kommunikationseinrichtungen (üblicherweise in Fahrzeugen installiert), die im folgenden als *mobile Stationen* oder *OBU (On-Board-Unit)* bezeichnet werden.

Bei dem entwickelten DSRC Kanalzugriffsprotokoll handelt es sich um ein asynchrones TDD/TDM/TDMA-Protokoll, wodurch folgendes Verhalten gekennzeichnet ist:

- Time Division Duplexing TDD (oder auch Halb-Duplex-Mode):
Die Trennung zwischen Übertragungen von Bake zu mobilen Stationen bzw. umgekehrt findet im Zeitbereich statt (Übertragungen zwischen Baken oder zwischen Fahrzeugen sind nicht vorgesehen).
- Asynchrones Zeitmultiplex (Asynchronous Time Division Multiplexing TDM):
Die Trennung von Übertragungen unterschiedlicher mobiler Stationen erfolgt

ebenfalls im Zeitbereich, wobei keine synchrone Rahmenstruktur vorgegeben ist, sondern die Zeitpunkte der Übertragungen nach Bedarf, d.h. asynchron, festgelegt werden können.

- Zeitlich gesteuerter Mehrfachzugriff (Time Division Multiple Access): Der Zugriff der mobilen Stationen auf das Medium erfolgt innerhalb der durch die Bake vorgegebenen Zuteilung der Übertragungszeiten durch einen zufallsgesteuerten Mehrfachzugriff.

Das Verhältnis zwischen Bake und mobilen Stationen ist dadurch gekennzeichnet, daß die Bake die Zuteilung des Übertragungsmediums steuert (unbalanced communication). Für eine Zeitspanne, die für eine bestimmte Übertragungsart reserviert ist, wurde die Bezeichnung Übertragungsfenster bzw. Window geprägt. Die von der Bake zugewiesenen Übertragungsfenster werden wie folgt differenziert:

Downlink Windows dienen Übertragungen von der Bake zu einer oder mehreren bestimmten mobilen Stationen.

Private Uplink Windows werden einer bestimmten Mobilstation zur exklusiven Nutzung zur Verfügung gestellt.

Public Uplink Windows dienen Übertragungen von mobilen Stationen zur Bake, wobei ein Public Window unter Anwendung des von der Bake vorgegebenen Zufallszugriffsverfahrens von jeder mobilen Station genutzt werden darf, somit als frei zugänglich zu betrachten ist.

Die Zuteilung von frei zugänglichen oder privaten Übertragungsfenstern erfolgt jeweils durch die Bake in einem Downlink Window als Teil des später noch im Detail zu erläuternden MAC-Feldes. Die mobilen Stationen haben die Möglichkeit, bei Bedarf bei der Bake private Übertragungsfenster anzufordern. Die Längen der Übertragungsfenster werden in der Anmeldephase durch die Auswahl eines Kommunikationsprofils festgelegt.

Im folgenden werden spezifische Elemente der DSRC-MAC-Rahmenstruktur, die Steuerung des Kanalzugriffs sowie die der LLC-Schicht zur Verfügung gestellten Dienste vorgestellt. Die Darstellung der Kanalzugriffsschicht wird abgeschlossen mit einem Vergleich zu den verwandten IEEE 802.3 LAN-Spezifikationen. Hierbei werden insbesondere die dort zum Einsatz kommenden adaptiven Steuerungsmechanismen für den Kanalzugriff auf ihre Anwendbarkeit für DSRC- Systeme hin diskutiert.

5.3.1 Auswahl der Kommunikationsadressen

Die Kommunikationsadresse ist ein wesentlicher Teil der in der MAC-Schicht zu transportierenden Information. Sie wird auch von den oberen Schichten, insbesondere von den Anwendungsprozessen, dazu verwendet, den Adressaten für eine Datenübertragung zu identifizieren. Mit jeder Kommunikationsadresse ist ein Dienstzugangspunkt (Service Access Point) in der Bake bzw. der mobilen Station verbunden. Bei DSRC-Systemen ist dabei immer nur die Adresse der mobilen Stationen (entweder als Ziel- oder Absenderadresse) explizit zu benennen. Die Adresse der Bake ergibt sich aus dem Systemaufbau: Für jede mobile Station ist innerhalb einer Ba-

keninstallation jeweils nur eine Bake der einzig mögliche Kommunikationspartner (Kommunikation zwischen mobilen Stationen ist nicht vorgesehen).

Es werden folgende Adresstypen unterschieden:

- Die Broadcast Adresse (1111 1111) erlaubt die Adressierung aller innerhalb einer Kommunikationszone befindlichen mobilen Stationen. Der zugehörige Dienstzugangspunkt ist in jeder mobilen Station vorhanden.
- Durch Multicast Adressen (XXXX XXX1, mit $X=0,1$ und 1111 1111 ausgeschlossen) können Gruppen von mobilen Stationen adressiert werden.
- Die individuelle Adresse einer mobilen Station wird jeweils von der mobilen Station zufällig bestimmt und im Rahmen der Anmeldephase der Bake übermittelt (als Teil des oben eingeführten Kommunikationsprofils). Die Länge der zu übermittelnden Adresse (ein natürliches Vielfaches eines Oktets) wird von der Bake vorgegeben. So wird ermöglicht, daß die Länge der individuellen Adresse den Abmessungen der Kommunikationszone angepaßt werden kann. Die individuelle Adresse einer mobilen Station ist wie folgt aufgebaut:

```
xxxx xxx0
xxxx xxx0
.... ....
xxxx xxx1 mit x=0,1.
```

Für DSRC-Systeme der ersten Generation ist für die individuelle Adresse eine Länge von 4 Oktets vorgesehen [70]. Für die Wahrscheinlichkeit, daß sich 2 Fahrzeuge dieselbe Adresse auswählen, gilt unter der Annahme eines idealen Zufallszahlengenerators: $0.5^{28} = 3,7 \cdot 10^{-9}$.

Bei der praktischen Realisierung durch Pseudo-Zufallszahlengeneratoren muß darauf geachtet werden, daß die eingesetzten Algorithmen so beschaffen sind, daß dieser theoretische Wert auch tatsächlich erreicht werden kann. Es ist dabei insbesondere zu beachten, daß es weniger darauf ankommt, daß zwei Fahrzeuge, die zu beliebigen Zeitpunkten die Bake passieren, mit dieser Wahrscheinlichkeit unterschiedliche Adressen auswählen, vielmehr muß gewährleistet werden, daß Fahrzeuge, die sich zur gleichen Zeit in der Kommunikationszone aufhalten, unterschiedliche Adressen auswählen. Eine direkte Abhängigkeit von durch die Bake vorgegebenen Referenzen (z.B. einer Zeitreferenz) erscheint daher für die Generierung der Pseudo-Zufallszahl ungeeignet. Der Pseudo-Zufallszahlengenerator sollte vielmehr unabhängig von Informationen sein, die von der Bake ausgesendet werden. Da über die Qualität des Zufallszahlengenerators in den Standardisierungsvorschlägen keine quantitativen Angaben gemacht werden, wird dieser Punkt im Rahmen der Konformitätsprüfungen aufgegriffen. Zunächst wird im folgenden davon ausgegangen, daß die Wahrscheinlichkeit für eine Gleichheit zweier Kommunikationsadressen zu vernachlässigen ist.

5.3.2 Das MAC Steuerungsfeld (MAC Control Field)

Das MAC Steuerungsfeld ist spezifisch für die Anforderungen von DSRC-Systemen zugeschnitten worden und ist aufgrund des unsymmetrischen Verhältnisses für Bake

und mobile Station verschieden. Es handelt sich um ein Oktet mit folgender Codierung (siehe auch Abb. 5.3):

L	D	R	C/R	X	X	X	X	Uplink
L	D	A	C/R	S	X	X	X	Downlink

L Bit	0 = Rahmen ohne LPDU 1 = Rahmen mit LPDU
D Bit	0 = Downlink 1 = Uplink
R Bit	0 = Fensteranforderung (mobile Station) 1 = Keine Fensteranforderung (mobile Station)
A Bit	0 = Fensterreservierung (Bake) 1 = Keine Fensterreservierung (Bake)
C/R Bit	0 = Anweisung LPDU 1 = Antwort LPDU
S Bit	MAC Sequence Bit
X Bits	zu Null gesetzt (zukünftige Erweiterungen)

Abbildung 5.3: DSRC MAC Steuerfeld

fensters, während alle anderen Adresstypen (Broadcast/Multicast) frei zugängliche Übertragungsfenster anzeigen.

- Das L-Bit zeigt die Existenz einer LPDU an
- Das D-Bit identifiziert die Übertragungsrichtung
- Das A-Bit (nur Bake) zeigt die Reservierung von Uplinkkapazität an. Ob es sich dabei um ein frei zugängliches oder privates Übertragungsfenster handelt, ist durch die Kommunikationsadresse (LID) gekennzeichnet. Eine individuelle Adresse kennzeichnet die Reservierung eines privaten Übertragungsfensters, während alle anderen Adresstypen (Broadcast/Multicast) frei zugängliche Übertragungsfenster anzeigen.
- Das R-Bit (nur mobile Station) dient dazu, die Anforderung eines privaten Übertragungsfensters durch die mobile Station zu kennzeichnen.
- Das C/R-Bit zeigt die Funktion der LPDU als Command oder Response an.
- Das S-Bit (nur Bake) dient dazu, der mobilen Station anzuzeigen, ob es sich bei einer durch das A-Bit angezeigten Reservierung eines Übertragungsfensters um eine wiederholte Reservierung handelt.
- Die noch nicht belegten Bits sind für eine spätere Nutzung durch zusätzliche Funktionen vorgesehen, z.B. bestünde hier die Möglichkeit, zusätzlich Informationen zur optimalen Steuerung des Kanalzugriffsmechanismus zu übertragen (siehe Abschnitt 5.3.4).

5.3.3 Transparenz des Datenstroms

Wie für die transparente Datenübertragung (HDLC-Standard) üblich, wird durch Einfügen von Nullen (Zero Bit Insertion) gewährleistet, daß das Start und Endflag korrekt identifiziert wird: Wenn im Bitstrom zwischen einem Start und Endflag eine Serie von 5 aufeinanderfolgenden Einsen auftritt (und somit bei einer nachfolgenden '10'-Sequenz der Decodierer im Empfänger fälschlicherweise ein Endflag identifizieren würde), wird im Anschluß an die fünfte Eins durch den Sender eine Null eingefügt. Diese eingefügten Nullen werden vom Empfänger wieder entfernt. Für den ungünstigsten Fall, daß der Bitstrom nur aus Einsen besteht, ergibt sich eine Vergrößerung der zu übertragenden Datenmenge um 20 %. Bei einem Bitstrom mit gleichverteiltem Auftreten von Nullen und Einsen ist die Wahrscheinlichkeit für fünf aufeinanderfolgende Einsen allerdings durch 0.5^5 gegeben (was einer Zunahme der Datenmenge von nur 0.625 % entspricht).

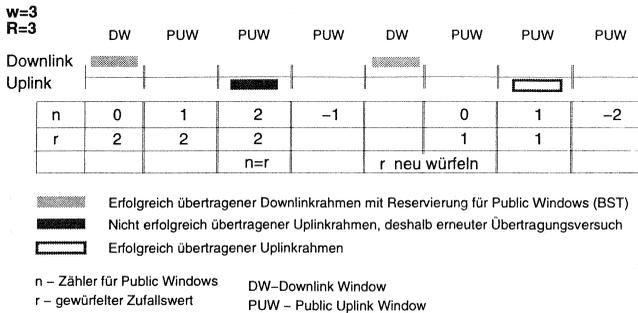


Abbildung 5.4: Beispiel für mögliche Parameterkombinationen für den Auswahlmechanismus der frei zugänglichen Übertragungsfenster

5.3.4 Kanalzugriffsverfahren und Reservierungsmechanismen

5.3.4.1 Auswahlmechanismus für frei zugängliche Übertragungsfenster

Der Auswahlmechanismus wird durch einen von der mobilen Station bestimmten Zufallswert gesteuert (Random Delay Counter Mechanismus). Die wesentlichen Parameter sind ¹:

- die Anzahl der nach einer Downlinkübertragung aufeinanderfolgenden frei zugänglichen Uplink-Übertragungsfenster w ,
- der maximale Zufallswert R ,
- der von der mobilen Station ausgewählte Zufallswert r und
- der Zähler für das aktuell zur Verfügung stehende Übertragungsfenster n .

Der Mechanismus unterscheidet die Fälle $w = 1$ und $w > 1$. Zunächst sei der Fall $N > 1$ betrachtet (siehe auch Abb. 5.4).

1. Nach dem Empfang eines Downlink-MAC-Rahmens mit einer entsprechenden Reservierung von Uplink-Übertragungsfenstern und bei gleichzeitigem Vorliegen einer zu übertragenden LPDU wird der Mechanismus gestartet.
2. Zunächst wählt die mobile Station einen Zufallswert r zwischen 1 und R aus ($1 \leq r \leq R$) und setzt den Zähler $n = 0$.
3. Sobald ein Übertragungsfenster verfügbar wird, erhöht sich der Zähler n um Eins. Unter der Bedingung $n = r$ kann dieses Fenster für die Übertragung eines Uplink-MAC- Rahmens genutzt werden. Der Zähler n wird danach zu $n = r - R$ gesetzt, sowie erneut eine Zufallszahl zwischen 1 und R bestimmt.
4. Der Mechanismus wird erst beendet, wenn ein an die mobile Station gerichteter Rahmen (d.h. unter Verwendung der individuellen Kommunikationsadresse) empfangen wird. Dies bedeutet, daß der Mechanismus nach Downlink-Über-

¹Die im DSRC Standardisierungsentwurf verwendeten Bezeichnungen sind N5 (entspricht w), N6 (n), N7 (r) und N8 (R). Aus Gründen der Lesbarkeit werden hier abweichende Bezeichnungen verwendet

tragungen mit erneuten Reservierungen von Uplink-Übertragungsfenstern nicht neu gestartet wird, sondern dem unter 3. beschriebenen Verhalten folgt.

Für den Fall $w=1$ wird im gegenwärtigen Entwurf der oben beschriebene Mechanismus so variiert, daß das erste einer mobilen Station in einer Kommunikationszone zur Verfügung stehende Übertragungsfenster in jedem Fall genutzt wird (d.h. unabhängig von dem vorgegebenen R). Ist die Nutzung des ersten verfügbaren Übertragungsfensters nicht erfolgreich, wird der Mechanismus in gleicher Weise wie für $w > 1$ beschrieben durchgeführt². So soll erreicht werden, daß in Szenarien, in denen die Wahrscheinlichkeit für einen gleichzeitigen Zugriff von mehr als einer mobilen Station sehr gering ist, ein unverzögerter Zugriff ermöglicht wird. Ein solcher Ansatz wird jedoch nur unter folgenden Bedingungen zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führen: Der Übertragungskanal muß so beschaffen sein, daß die Kanalqualität in Down- und Uplink gleichzeitig sprunghaft ansteigt, d.h. daß die Kommunikationszone sehr scharf begrenzt ist. Ist die Kanalqualität jedoch im Uplink zunächst schlechter als im Downlink, werden die ersten Uplinkübertragungen mit hoher Wahrscheinlichkeit von Bitfehlern betroffen sein. Die Folge davon ist, daß die erwünschte Leistungsverbesserung im Übergangsbereich der Kommunikationszone bereits 'verpufft'. Der Einfluß der Kanalqualität wird im folgenden noch im Zusammenhang mit dem möglichen Einsatz von adaptiven Verfahren (siehe Abschnitt 5.3.5) sowie in den Kapiteln zur Leistungsbewertung (Kapitel 6 und 9) im Detail behandelt.

5.3.4.2 Anforderung von privaten Übertragungsfenstern

Oben wurde bereits eingeführt, daß der Kommunikationsprozeß vollständig durch die Bake kontrolliert wird, d.h. eine mobile Station kann nur nach einer Reservierung eines Übertragungsfensters eine Uplink-Übertragung vornehmen. Eine Möglichkeit ist dabei das direkte Reservieren eines privaten Übertragungsfensters durch den bakenseitigen Anwendungsprozess.

Nicht in jedem Fall ist der bakenseitige Anwendungsprozess in der Lage, erforderliche private Übertragungsfenster zu reservieren. Aus diesem Grunde wird zusätzlich die Anforderung von privaten Übertragungsfenstern durch die mobile Station ermöglicht. D.h. immer dann, wenn mindestens eine Dateneinheit (LPDU) zur Übertragung bereitsteht, die nicht unmittelbar übertragen werden kann, wird die Anforderung eines privaten Fensters durch eine mobile Station entweder in einem frei zugänglichen oder privaten Fenster übertragen. Die Bake sollte innerhalb einer im Kommunikationsprofil vorgegebenen Zeit ein entsprechendes privates Übertragungsfenster zur Verfügung stellen. Wird das auf eine Anforderung hin reservierte Übertragungsfenster nicht genutzt, kann die Bake erneut ein privates Übertragungs-

²Der Standardisierungsentwurf [73] sieht nach der Nutzung des ersten verfügbaren Fensters vor, daß die Mobilstation die nächsten $n - 1$ Übertragungsfenster nicht nutzt. Es ist unklar, wozu diese Schutzzeit dienen soll, denn sollte die Übertragung im frei zugänglichen Fenster nicht erfolgreich gewesen sein, so liegt dies entweder in einer Datenkollision oder in einem Bitfehler durch zu schwachen Pegel begründet. In beiden Fällen macht eine Schutzzeit keinen Sinn. Vielmehr scheint es sinnvoller, nach dem offensichtlich erfolglosen Versuch, direkt mit dem Zufallszugriff zu beginnen.

fenster zuweisen. Über das S-Bit des MAC-Stuerrahmens wird der mobilen Station angezeigt, daß es sich um eine erneute Zuweisung handelt. Entsprechend wird dann die zuvor übertragene LPDU erneut übertragen.

Mit der Anforderung privater Übertragungsfenster durch die mobile Station wurde somit zum einen ein Reservierungsmechanismus, zum anderen auch ein Fehlerlösungsverfahren vorgesehen. Die Tatsache, daß die Bake den Zugriff in alleiniger Verantwortung steuert (d.h. sie 'sollte', muß aber nicht, auf eine Reservierungsanforderung reagieren) führt speziell für Umgebungen, in denen unterschiedlich priorisierte interaktive Anwendungen abgewickelt werden sollen, zu folgendem Problem: Dadurch, daß die Abwicklung einer Reservierung auf MAC-Ebene erfolgt, kann die Bake nicht entscheiden, welche OBU-Anwendung Übertragungskapazität anfordert, d.h. sie kann bei der Entscheidung, ob das gewünschte Fenster zugewiesen wird, nicht Prioritäten einzelner Anwendungen berücksichtigen. Weiterhin ist nicht ausgeschlossen, daß eine OBU unkontrolliert private Übertragungskapazität anfordert, und somit die Leistungsfähigkeit des Systems beeinträchtigt. Das bakenseitige Steuern muß demnach die Zuweisung von privater Übertragungskapazität im Hinblick auf die Gesamtleistungsfähigkeit des Systems hin überprüfen.

Es wird somit deutlich, daß die Verwendung der Funktion zur Anforderung von Übertragungskapazität durch die mobile Station eine gut abgestimmte Steuerung voraussetzt. Für 'kontrollierte' Umgebungen mit nur einer Anwendung, die immer gleich abläuft, sollte das Problem beherrschbar sein. Für 'offene' Umgebungen, in denen mehrere Anwendungen mit unterschiedlichsten und variablen Abläufen über eine Bake abgewickelt werden sollen, muß die bakenseitige Steuerung entsprechend ausgelegt sein, um eine gleichbleibende Zuverlässigkeit der Anwendungen zu gewährleisten.

5.3.5 Adaptive Kollisionsauflösungsverfahren

Grundsätzlich lassen sich auch in der vorliegenden Form des DSRC-Standards adaptive Algorithmen, welche auf einer Kollisionserkennung beruhen, implementieren (siehe IEEE 802.3, Abschnitt 3.4). Die adaptive Steuerung muß sich dabei an der Bake orientieren, da sich die Fahrzeuge aufgrund der vorliegenden Antennencharakteristik nicht gegenseitig 'hören' können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß ein striktes 'Master-Slave' Verhalten vorgesehen ist und die Parameter des Zugriffsverfahrens nur durch die Bake festgelegt werden. Losgelöst vom gegenwärtigen Stand der Standardisierungsentwürfe wären zwei Ansatzpunkte grundsätzlich denkbar:

- Bei einer *zentralen Steuerung des Algorithmus durch die Bake*, kann die Bake durch entsprechende Modifikation der Einträge in der BST eine Veränderung der Parameter des Kanalzugriffsverfahrens (insbesondere Fensteranzahl und max. Zufallswert) laufend vornehmen. Die Änderung wird für alle Fahrzeuge sofort wirksam, die die veränderte BST empfangen. Für die Auswahl der günstigsten Parameterkonfiguration könnte die Bake zum Beispiel auf Kanalmessungen, welche einen Rückschluß auf aufgetretene Kollisionen erlauben, zurückgreifen oder aber auch andere Informationen des Gesamtsystems mitberücksichtigen (z.B. Messungen der Verkehrsdichte durch ein System zur Fahr-

zeugklassifizierung). Es muß in jedem Fall unterschieden werden, ob die Ursache von Übertragungsfehlern in Bitfehlern aufgrund eines geringen Pegels oder aufgrund von Interferenzen durch Überlagerung mehrerer Übertragungen zu suchen ist. Ansonsten besteht die Gefahr, daß aufgrund der (falschen) Annahme von Datenkollisionen, die Anzahl der Übertragungsversuche reduziert wird, während im Gegenteil eine Erhöhung angebracht wäre. Gerade in den Randbereichen der Kommunikationszone, und dort findet in der Regel auch die Anmeldung in Public Uplink Windows statt, ist mit einer Überlagerung beider Effekte zu rechnen und eine Differenzierung der Fehlerquellen unter Umständen schwierig. Ist eine geeignete Identifizierung der Fehlerquellen jedoch möglich, so erscheint eine Anpassung der Parameter sinnvoll.

- Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, im Fahrzeug aufgrund der Anzahl von erfolglosen Versuchen der Nutzung eines Public Uplink Windows eine entsprechende Modifikation der Parameter des Zugriffsverfahrens vorzunehmen. Diese *autonome Steuerung durch das Fahrzeug* entspricht weitgehend der Vorgehensweise in LANs. Dabei ergibt sich jedoch auch hier das Problem der Differenzierung der Fehlerquellen in Datenkollisionen und Bitfehler durch zu geringen Pegel. Da im Fahrzeug keine Messung des Kanalzustands vorgenommen werden kann, bleibt die Möglichkeit, diese Information durch die Bake über die BST zu verbreiten (siehe oben). Der Rückschluß, daß eine erfolglose Nutzung eines Public Windows durch eine Datenkollision bewirkt wurde, ist allerdings nur für sehr gute Kanäle mit sehr scharfen Grenzen der Kommunikationszone erlaubt.

Die Anpassungsalgorithmen müssen dabei sehr schnell reagieren, da die insgesamt zur Verfügung stehende Kommunikationszeit (anders als bei LANs) begrenzt ist. Eine ausführliche Diskussion der adaptiven Algorithmen wird im Rahmen der Leistungsbewertung in Kapitel 9 anhand konkreter Referenzkonfigurationen vorgenommen.

5.4 DSRC Datensicherungsprotokolle (LLC)

Die DSRC-Datensicherungsprotokolle wurden direkt von den LAN-Standards IEEE 802.3 abgeleitet, um den Einsatz von Standardkomponenten zu ermöglichen.

Für die DSRC Datensicherungsschicht wurden folgende Dienste übernommen::

- Der nicht bestätigte verbindungslosen Datenaustausch (Type 1).
- Der bestätigte verbindungslose Datenaustausch (Type 3).

Der nicht bestätigte Datenaustausch wird zur Initialisierung der Kommunikationsbeziehung genutzt und wenn die erfolgreiche Datenübertragung nicht bestätigt werden soll. Die Verbindung ist entweder eine Punkt-zu-Punkt-, eine Multicast- oder eine Broadcastverbindung. Der bestätigte Datenaustausch wird dagegen genutzt, um die erfolgreiche Übertragung zu quittieren. Hierbei ist nur eine Punkt-zu-Punkt Verbindung möglich.

Auf die verbindungs-orientierten Dienste ist verzichtet worden, da innerhalb der kurzen zur Verfügung stehenden Kommunikationszeit ein Verbindungsaufbau als zu aufwendig erscheint.

Da die DSRC-LLC-Protokolle somit weitgehend bekannte Mechanismen beschreiben, wird hier auf eine ausführliche Darstellung verzichtet. Für eine ausführliche Darstellung kann auf [77] verwiesen werden.

5.5 DSRC Anwendungsschicht

Die DSRC Anwendungsschicht (oder auch DSRC Schicht 7³) setzt direkt auf der Datensicherungsschicht auf und stellt eine gemeinsame Schnittstelle für die unterschiedlichen RTTT-Anwendungen zur Verfügung.

Die DSRC Anwendungsschicht unterstützt die folgenden Dienste:

- Dienste zur Durchführung des Verbindungsaufbaus und Auswahl der für eine Verbindung geltenden Kommunikationsparameter (Kommunikationsprofile [70])
- Dienste zum Datentransfer und zur Aktivierung von Funktionen, die zur Unterstützung spezifischer Anwendungen dienen (vgl. Abschnitt 5.7)
- Dienste zur Unterstützung der Abwicklung eines Kommunikationsprozesses über mehrere Baken (Assoziierung)
- Anpassung/Aufteilung der Datenmengen auf die von der Datensicherungsschicht verarbeitbaren Datenpaketgrößen (Fragmentierung) und entsprechendes Zusammenführen der Fragmente nach der Übertragung (Defragmentierung)
- Kodierung der in abstrakter Form vorliegenden Daten (ASN.1 [78]) in transferierbare Daten gemäß entsprechender Kodierungsregeln (Packed Encoding Rules PER [82])
- Abwicklung gleichzeitiger Übertragungswünsche mehrerer unterschiedlicher Anwendungen unter Berücksichtigung statischer Prioritäten (Anwendungsmultiplexing)

5.5.1 Basis-Dienste

Der Grundbaustein der Architektur der DSRC Anwendungsschicht wird durch das Übertragungskernelement (Transfer Kernel Element T-KE) beschrieben. Es stellt folgende Basis-Dienste zur Verfügung (siehe auch Abb. 5.6):

- Lesen von Informationen (GET)
- Schreiben von Informationen (SET)
- Aktivierung eines Anwendungsdienstes (ACTION)
- Erzeugung eines Ereignisberichts (EVENT-REPORT)
- Anmeldung eines Fahrzeugs bei der Bake (Initialisation)

³Die DSRC Anwendungsschicht wird oft auch als DSRC Schicht 7 bezeichnet, da sie die DSRC Kommunikationsarchitektur gegenüber den Anwendungsprozessen abschließt. Sie beinhaltet jedoch alle Kommunikationsfunktionen, die nicht bereits durch die unteren Schichten (Bitübertragungs- und Datensicherungsschicht) abgedeckt sind, darunter auch Funktionen, die üblicherweise unterschiedlichen Schichten des ISO-OSI-Referenzmodells zugeordnet werden (Schicht 4 bis 7). Aus Effizienzgründen wurde jedoch auf eine strenge Auslegung des ISO-OSI-Modells verzichtet.

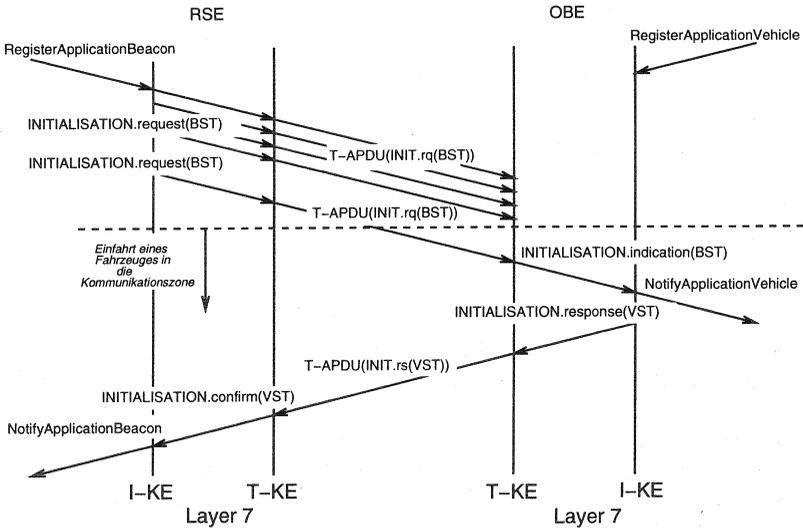


Abbildung 5.5: Anmeldephase

Das Übertragungskernelement verwendet die von der Datensicherungsschicht zur Verfügung gestellten Dienste und stellt wiederum seine Dienste den Anwendungsprozessen sowie weiteren (optionalen) Kernelementen der Anwendungsschicht zur Verfügung.

5.5.2 Realisierung der Anmeldephase

Das Initialisierungskernelement (Initialisation Kernel Element) unterstützt die Anmeldung einer OBU und nutzt exklusiv den Initialisierungsdienst des Übertragungskernelements. Über das Initialisierungskernelement werden die mobilen Stationen über von einer Bake angebotene Anwendungsdienste informiert. Die mobilen Stationen können bzw. müssen (bei vorgeschriebenen Anwendungen) sich über das Initialisierungskernelement bei dem entsprechenden Anwendungsdienst der Bake anmelden. Das Initialisierungskernelement bietet im einzelnen folgende Dienste an:

- Registrierung von Anwendungen (über ihre entsprechende Elementkennzeichnung) bei der Anwendungsschicht der Bake bzw. der mobilen Station im Fahrzeug
- Abmeldung einer Anwendung
- Information über die Existenz eines Anwendungselements in der Bake oder eines Anwendungselements einer mobilen Station (Notification)
- Information über die Beendigung einer Anwendung (ReadyApplication)

Der Anmeldung eines Fahrzeuges wird durch die Bake ausgelöst und wie folgt gesteuert (vgl. Abb. 5.5):

Die Bake versendet in bestimmten zeitlichen Abständen eine sog. Bakendienstinformation (Beacon Service Table BST), welche Informationen über die von der Bake unterstützten Kommunikationsprofile sowie die in der Bake registrierten Anwendungen enthält. Die Länge des Abstandes zwischen der Aussendung zweier BSTs ist nicht standardisiert, da sie jeweils an die Gegebenheiten einer bestimmten Installation angepaßt werden muß. Die detaillierte Gestaltung und Parametrisierung des BST-Aussendemechanismus ist daher ein wichtiger Untersuchungsgegenstand bei der optimalen Konfiguration von Systeminstallationen (siehe analytische und simulative Leistungsbewertung in den Kapiteln 6 und 9).

Nach dem Empfang der BST sendet die mobile Station eine sog. Fahrzeugdienstinformation (Vehicle Service Table VST). Im einzelnen ist das Verhalten der mobilen Station wie folgt gekennzeichnet:

Unter der Voraussetzung,

- daß die Bakennummer von der zuletzt empfangenen Bakennummer abweicht (d.h. eine neue Bake wurde erreicht), oder
- daß innerhalb einer festgelegten Zeit T_1 nach Absenden einer VST keine Anwendungsdaten von der Bake empfangen werden konnten (d.h. aufgrund einer schlechten Kanalqualität sind die VST oder die Anwendungsdaten verlorengegangen), oder
- daß zwischen dem Empfang zweier BSTs mehr als 255 Sekunden vergangen sind (D.h. es ist in diesem Fall davon auszugehen, daß das Fahrzeug die Bake zum wiederholten Mal passiert. Sollte das Fahrzeug aufgrund eines Staus unterhalb der Bake zum Stehen kommen, liegt zwischen dem Empfang zweier BSTs üblicherweise ein erheblich geringerer Zeitraum (im Millisekundenbereich))⁴.

werden durch das Initialisierungskernelement der mobilen Station folgende Funktionen durchgeführt:

- Auswahl eines von der Bake angebotenen Kommunikationsprofils
- Bestimmung einer LLC-Adresse gemäß der Spezifikation der DSRC Datensicherungsschicht
- Information der in der mobilen Station registrierten Anwendungsdienste über die angebotenen Dienste
- Zusammenstellung der VST und Übertragung der VST zusammen mit der LLC-Adresse an die Bake.

Die Bake wertet die VST im Hinblick auf die übermittelten Anwendungsdaten aus und leitet sie zusammen mit der Adresse des Fahrzeugs an die entsprechenden Anwendungsprozesse der Bake weiter. Weiterhin werden die Prioritäten der Anwendungen festgelegt.

Nach Abschluß der Anmeldephase ist über die nun bekannte Adresse des Fahrzeugs eine individuelle Adressierung möglich. Weiterhin sind über die durch die BST

⁴Es bleibt eine Restwahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug bei einem Stau im Umfeld einer Bake zum Stehen kommt und trotzdem zwischen dem Empfang zweier BST mehr als 255 Sekunden vergehen, z.B. wenn sich das Fahrzeug für längere Zeit im Schatten eines Lkw befindet. Diese sehr seltenen Spezialfälle müssen durch entsprechende Maßnahmen mitberücksichtigt werden, um z.B. Doppelbuchungen bei einer Gebührenerhebung auszuschließen.

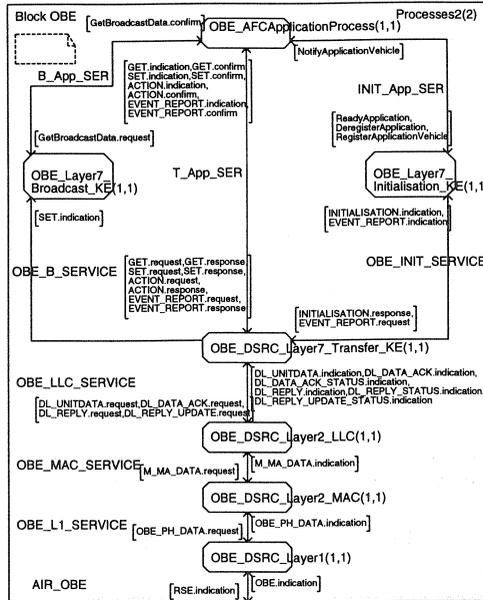


Abbildung 5.6: Übersicht der DSRC-SDL-Prozesse und Signale (OBU)

bzw. VST ausgetauschten Daten die Rahmenbedingungen für die sich anschließende Durchführung der Anwendungsprozesse festgelegt.

5.5.2.1 Broadcast-Dienste

Das Verteilungselement (Broadcast Kernel Element) dient speziell der Verteilung von Daten durch die Bake und stellt entsprechende Dienste zur Verfügung. Zur Nutzung des Broadcastdienstes ist keine Anmeldung über den oben beschriebenen BST-VST-Mechanismus notwendig.

5.6 Implementierung und Konformitätsprüfung

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde parallel zur aktiven Mitarbeit bei der Erstellung der oben beschriebenen Spezifikationen eine Implementierung der Funktionalität der DSRC Datensicherungsschicht (MAC und LLC) und der DSRC Anwendungsschicht sowie die Entwicklung von entsprechenden Konformitätsprüfungen vorgenommen. Hierdurch konnten während des Standardisierungsprozesses frühzeitig inkonsistente oder unvollständige Definitionen aufgedeckt werden. Die Verwen-

derung standardisierter formaler Spezifikationsprachen und entsprechender Werkzeuge ermöglichte dabei die Erzeugung lauffähiger Protokollimplementierungen (SDL⁵ und SDT⁶) als auch der eigens definierten Testfälle (TTCN⁷ und ITEX⁸), sodaß eine Prüfung der Protokollimplementierung auf ihre Standardkonformität möglich wurde.

Im folgenden wird auf die wesentlichen Merkmale des gewählten Ansatzes eingegangen (siehe [37]).

5.6.1 Implementierung der DSRC-Protokolle in SDL (Specification & Description Language)

Ausgehend von der hauptsächlich in Textform vorliegenden DSRC-Spezifikationen wurde im Rahmen dieser Arbeit während der Entwicklungsphase des DSRC-Standards begleitend zunächst (bis 1994) eine Implementierung der Protokolle in C++ vorgenommen und für Funktionstests und Leistungsbewertungsuntersuchungen verwendet (siehe auch Kapitel 8). Mit der zunehmenden Stabilisierung der Spezifikation wurde seit 1994 eine Spezifikation mit einer allgemein akzeptierten, leicht lesbaren und gleichzeitig eindeutigen Beschreibungssprache angestrebt: die von der ITU standardisierte, formale Spezifikationsprache SDL ist für diesen Zweck sehr gut geeignet und kam daher im weiteren Verlauf der Arbeit zum Einsatz.

Die Sprache SDL ermöglicht die gewünschte eindeutige Beschreibung des Verhaltens einer DSRC-Kommunikationsschicht bzw. der vollständigen DSRC-Kommunikationsarchitektur. Da die graphische Syntax, die eine übersichtliche Darstellung ermöglicht, in eine textuelle Syntax überführt werden kann, ist ausgehend von der in standardisierter Form vorliegenden Spezifikation eine automatische Generierung ausführbarer, plattform-spezifischer Software realisierbar. Die so generierte Software kann sowohl zu Verhaltenstests, zur Leistungsbewertung (siehe Abschnitt 8) wie auch zum Einsatz auf einer Zielhardware (echtzeit-fähig) eingesetzt werden.

Unter Verwendung von SDL wurde daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Implementierung der DSRC Datensicherungsschicht (MAC und LLC), der DSRC Anwendungsschicht und der Anwendungsprozesse vorgenommen (siehe Abb. 5.6). Wie in Kapitel 8 und im Anhang C gezeigt wird, konnte diese Spezifikation in ein integriertes Systemmodell zur Leistungsbewertung eingebunden werden (als Ersatz der zuvor von Hand in C++ codierten Implementierung).

Im folgenden wird näher auf die Notwendigkeit und Durchführung der Prüfung einer DSRC-Protokollimplementierung (hier speziell der SDL-Implementierung) eingegangen.

⁵Specification & Description Language

⁶SDL Development Tool/Telelogic

⁷Tree & Tabular Combined Notation

⁸Interactive TTCN Editor and Executor/Telelogic

Test Case Dynamic Behaviour					
Test Case Name : BST_send_and_receive					
Group : BITS/					
Purpose : Test to check the addressing mechanism and to decide whether or not to run further tests					
Configuration :					
Default :					
Comments : The OBE should go from sleep mode to wake up mode					
Nr	Label	Behaviour Description	Constraints Ref	Verdict	Comments
1		IOi START Rec	OBEind_init		Init.req
2		?Ri	RSEind_init	(P)	Init.con
3		(LiAd := Ri.Link_Address)			
4		IOi START Rec2	OBEind_action		Action.req
5		?Ri	RSEind_action	(P)	Action.con
6		?OTHERWISE		(F)	
7		?TIMEOUT Rec2		(F)	
8		?OTHERWISE		(F)	
9		?TIMEOUT Rec		(F)	
Detailed Comments :					

Legende (TTCN-Syntax)

- ! - Senden
- ? - Empfangen
- () - Zuweisung
- P - Pass (Bestanden)
- F - Fail (Nicht bestanden)

Abbildung 5.7: Verhaltensteil des Grundverbindungstest für eine DSRC-OBU-Implementierung

5.6.2 Spezifikation und Durchführung von Konformitätsprüfungen gemäß ISO 9646

Konformitätsprüfungen einer Protokollimplementierung dienen dazu, nachzuweisen, daß die durch eine Spezifikation beschriebenen Anforderungen an das Verhalten tatsächlich erfüllt werden. Für ISO-OSI Systeme wird durch die ISO 9646-Standards (*OSI Conformance Testing Methodology and Framework*⁹) eine Vorgehensweise vorgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit für DSRC-Systeme umgesetzt wurde.

5.6.2.1 Spezifikation der Testfällen in TTCN (Tree & Tabular Combined Notation)

Die durch die X.292 Empfehlung beschriebene Spezifikationssprache ermöglicht die Definition von Testfällen in einer graphischen Syntax (TTCN-GR), die in eine textuelle Syntax (TTCN-MP Machine Processable) überführt werden kann. Die TTCN-MP Beschreibung kann dann z.B. in C-Code übersetzt werden und dient letztlich als Basis für ein ausführbares Programm.

TTCN unterstützt die Definition der DSRC-Testfälle durch folgende Elemente:

Deklarationsteil Hier werden die verwendeten Datentypen (vorzugsweise in ASN.1) sowie die Testoperationen definiert. Es werden eine Reihe von Standarddatentypen und -operationen zur Verfügung gestellt (z.B. INTEGER, BOOLEAN und arithmetische sowie logische Operationen), die um entsprechende DSRC-spezifische Operationen erweitert wurden. Weiterhin werden die Testschnitt-

⁹Der ISO 9646-Standard umfaßt insgesamt 7 Teile, von denen in dem hier beschriebenen Kontext insbesondere der Teil 2 zur Spezifikation von abstrakten Test Suiten sowie der Teil 3 mit der Definition der formalen Spezifikationssprache TTCN von Interesse sind. Für eine ausführliche Einführung in den Standard sei auf [40] verwiesen.

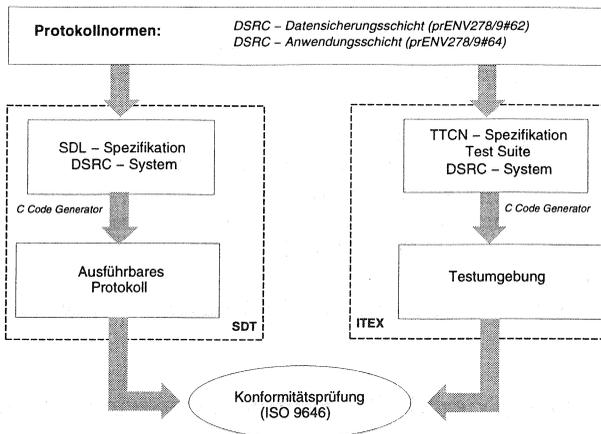


Abbildung 5.8: Zusammenwirken von SDL-Spezifikation und TTCN-Konformitätsprüfungen für DSRC-Protokolle

stellen (PCO *Point of Control and Observation*), sowie die für die Prüfungen relevanten Timer und die Dienstprimitive definiert.

Bedingungsteil Hier werden für die im Deklarationsteil abstrakt definierten Parameter konkrete Werte für die Durchführung eines spezifischen Testfalls festgelegt, d.h. es werden Bedingungen (oder auch *Constraints*) definiert, für die ein bestimmtes Verhalten der zu testenden Implementierung zu erwarten ist. Die zur Anwendung kommenden Werte orientieren sich dabei an den durch den DSRC-Standard vorgegebenen Wertebereichen (z.B. für Timer des Kanalzugriffsprotokolls).

Verhaltensteil In diesem Teil der Testspezifikation wird der eigentliche Ablauf eines Testfalles festgelegt, d.h. das zeitliche Aufeinanderfolgen der einzelnen Operationen und zugeordneten Bedingungen, wobei die ebenfalls dort festgelegte Auswertung des beobachteten Verhaltens der getesteten Implementierung zu einem Urteil (PASS, FAIL oder INCONCLUSIVE) führt. Abb. 5.7 zeigt ein Beispiel für den Verhaltensteil eines Testfalls zur Überprüfung der Fähigkeit der OBU zur korrekten Anmeldung bei der Bake.

Aus der DSRC-Spezifikation wurden eine Reihe von Testfällen (insgesamt über 80) abgeleitet und spezifiziert. Um die Prüfung von komplexeren Abläufen zu unterstützen, wurde eine Testmanagementanwendung entwickelt und in die SDL-DSRC-Spezifikation integriert.

5.6.2.2 Prüfung der DSRC-SDL-Protokollimplementierung

Eine Prüfung der DSRC-SDL-Spezifikation wurde dadurch ermöglicht, daß sowohl aus der SDL, wie auch aus der TTCN-Spezifikation automatisch lauffähiger Code generiert werden kann, der eine automatische Durchführung der Konformitätsprüfung

in einer UNIX-Umgebung ermöglicht (siehe Abb. 5.8). Als Ergebnis steht somit eine konformitätsgeprüfte SDL-DSRC-Implementierung zur Verfügung. Die Verwendung dieser Protokollimplementierung für die Leistungsbewertung wird in Kapitel 8 diskutiert.

In einem zukünftigen Schritt können die so erarbeiteten Prüfungen auf DSRC-Hardware (Verfügbarkeit voraussichtlich Mitte 1997) angewendet werden. Vorgesehen ist der Einsatz der hier erarbeiteten Konformitätsprüfungen insbesondere in dem europäischen Forschungsprojekt VASCO (Validation of Dedicated Short-range Communications), in dem europäische DSRC-System-Hersteller den DSRC-Standard validieren (siehe Anhang B).

Die hierzu notwendigen Echtzeitschnittstellen befinden sich in der Spezifikationsphase [55].

5.7 Benutzung der DSRC-Protokolle durch RTTT-Anwendungen

Im folgenden wird die Nutzung der DSRC-Kommunikationsarchitektur anhand der typischen Anwendungen 'Elektronische Gebührenerhebung' und 'Verkehrs- und Reiseinformationen' vorgestellt, um im darauffolgenden Abschnitt die Ableitung von Vorschlägen für Referenzimplementierungen als Basis für die Leistungsbewertung zu ermöglichen.

5.7.1 Elektronische Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren (AFC)

Eine AFC-spezifische Erweiterung der DSRC Anwendungsschicht muß Datentypen (AFC Attributs) und Funktionen (AFC Actions) zur Verfügung stellen, die die existierenden unterschiedlichen nationalen Anforderungen berücksichtigen. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Charakterisierung der erbrachten Dienstes (und der damit verbundenen Festlegung der Benutzungsgebühr) wie auch die Abwicklung des Bezahlvorgangs.

Im Anhang F sind die für eine europäische Standardisierung erarbeiteten [54] und zur Abstimmung kommenden Entwürfe für entsprechende AFC Datentypen (z.B. VehicleCharacteristics) und AFC Funktionen (z.B. DEBIT) in einer Übersicht dargestellt. Es ist bei der Realisierung einer AFC-Anwendung vorgesehen, daß die AFC Funktionen grundsätzlich von der Bake ausgelöst werden und durch die OBU entsprechend beantwortet oder quittiert werden. Die Anwendung wird also als ein durch die Bake gesteuerter Dialog abgewickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit sind dabei insbesondere die zur Anwendung kommenden Datenmengen, sowie die Übertragungsrichtung, in der die Daten typischerweise übertragen werden, interessant, da diese Informationen eine realistische Definition von Referenzanwendungen für die Leistungsbewertung ermöglichen. Ohne an dieser Stelle auf die Einzelheiten der Benutzung der AFC Datentypen und Funktionen eingehen zu können, sei jedoch darauf hingewiesen, daß Datensicherheitsaspekte eine wesentliche Rolle für den Ablauf einer AFC-Transaktion spielen, da die durch Datensicherungsalgorithmen verursachten Verarbeitungszeiten einen erheblichen Anteil

an der insgesamt zur Abwicklung benötigten Zeit einnehmen (Beispiel: Authentifizierung der elektronischen Geldbörse einer OBU).

5.7.2 Reise- und Verkehrsinformationen

Für die Anwendungen der Verkehrs- und Reiseinformation (Traffic & Traveller Information TTI) werden Informationsdaten im Downlink-Broadcastmodus an die Fahrzeuge übertragen, während die Fahrzeuge ihrerseits zur Verkehrsdatenerfassung ihre Reisezeiten im Uplink an die Base übertragen. Das detaillierte Datenformat wurde in [89] definiert. Die Datenmengen umfassen bis zu 64 kbyte im Downlink und bis zu ca. 200 byte im Uplink. Die tatsächlich zu übertragenden Datenmengen hängen sehr stark von der Komplexität der möglichen Routenführung ab, so sind auf Autobahnen typischerweise deutlich weniger Daten als in Innenstadtbereichen zu übertragen. Anwendungsspezifische Dienste werden - anders als für die zuvor beschriebene AFC-Anwendung - nicht benötigt: Die Spezifikation der DSRC Anwendungsschicht bietet bereits den Broadcast-Pool für die Downlink-Übertragung an. Die Uplink-Übertragungen können durch einen einfachen SET-Befehl realisiert werden.

5.8 Realisierungsvorschläge für DSRC-Protokollimplementierungen

Als Basis für die Leistungsbewertung von DSRC-Systemen werden nachfolgend typische Referenzimplementierungen für ein dialog-orientiertes Protokoll (auf der Basis der elektronischen Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren oder Automatic Fee Collection AFC) und ein broadcast-orientiertes Protokoll (auf der Basis der Verkehrs- und Reiseinformation oder Traffic and Traveller Information TTI) vorgeschlagen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die analytische sowie die simulative Leistungsbewertung zu gewährleisten, werden typische Referenzwerte für bestimmte Protokollparameter (Datenmengen und Timer) eingeführt. Im Rahmen der detaillierten Protokollbewertung (siehe insbesondere Kapitel 6 und 9) werden die hier eingeführten Referenzprotokolle analysiert und mögliche Modifikationen sowie Erweiterungen diskutiert und untersucht.

5.8.1 Dialog-orientierte Anwendung

Die hier vorgestellten Protokollabläufe für eine dialog-orientierte Anwendung sind von den oben eingeführten Anforderungen für die elektronische Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren (AFC) abgeleitet worden. Die beiden hier eingeführten Referenzprotokolle beschreiben 2 Realisierungsvarianten für die Anmeldungsphase eines dialog-orientierten Anwendungsprozesses. Wie bereits erläutert, ermöglicht der dort vorgestellte BST/VST-Mechanismus eine Anmeldung bzw. Registrierung auf 2 Ebenen:

- **Datensicherungsschicht:** Die Übertragung der fahrzeug-spezifischen Linkadresse dient dazu, eine individuelle Adressierung eines Fahrzeugs zu ermöglichen

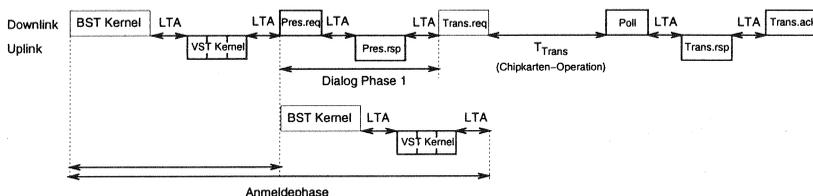


Abbildung 5.9: Protokoll mit zweistufiger Anmeldephase (Dialog A)

und ist daher die Grundvoraussetzung für die Durchführung der dialogorientierten Anwendung.

- **Anwendungsprozess:** Dialogorientierte Anwendungsprozesse sind oft so aufgebaut, daß die Bake die entsprechende Anwendung anbietet und das Fahrzeug aufgefordert wird, bei entsprechender Nutzung der Anwendung entsprechende Registrierungsdaten zu übertragen. Ein Beispiel ist die AFC-Anwendung, bei der das Fahrzeug zunächst die Fahrzeugklasse sowie die zur Verfügung stehenden Zahlungsmittel übermittelt, bevor der eigentliche Zahlungsvorgang abgewickelt wird. Es ist grundsätzlich möglich, bereits in der BST bzw. VST anwendungsspezifische Daten zu übertragen.

Die im folgenden vorgestellten Protokolle beschreiben eine Variante, in der zunächst der Austausch der Linkadresse vorgenommen wird und danach anwendungsspezifische Daten ausgetauscht werden (zwei-stufige Anmeldung), sowie eine weitere Variante, in der bereits im ersten Datenaustausch anwendungsspezifische Daten mitübertragen werden, um so einen Kommunikationsschritt zu sparen (einstufige Anmeldung).

5.8.1.1 Protokoll mit zweistufiger Anmeldung

Im einzelnen wird folgender Protokollablauf angenommen (siehe Abb. 5.9):

1. Die BST wird von der Bake periodisch ausgesendet und enthält bis auf einen Eintrag der dialogorientierten Anwendung keine anwendungsspezifischen Daten (BST Kernel). Zusammen mit der BST werden Public Uplink Windows angeboten.
2. Nach Empfang der BST durch die OBU und einer entsprechenden Verarbeitungszeit nutzt die OBU die angebotenen Public Uplink Windows zur Übertragung der VST, wobei die VST in diesem Fall im wesentlichen die Linkadresse sowie einen Eintrag der dialogorientierten Anwendung in der Liste der durch die OBU zu bearbeitenden Anwendungen enthält (VST Kernel).
3. Nach erfolgreichem Empfang und Verarbeitung der VST ist die erste Stufe der Anmeldung abgeschlossen und die Abwicklung des dialogorientierten Anwendungsprozesses beginnt mit folgenden Phasen:
 - **Presentation Request (Pres.req)** durch die Bake (mit Private Uplink Window Reservierung)

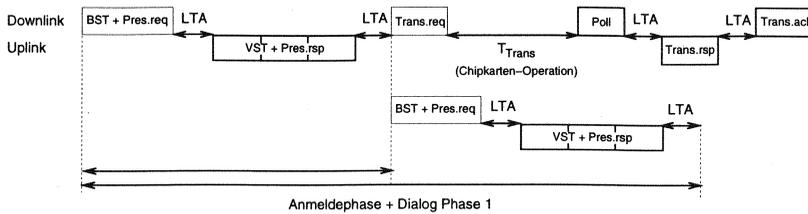


Abbildung 5.10: Protokoll mit einstufiger Anmeldephase (Dialog B)

- Presentation Response (Pres.rsp) durch die OBU (in einem Private Uplink Window) (Abschluß der zweiten Phase der Anmeldung)
- Transaction Request (Trans.req) durch die Bake
- Reservierung eines Private Uplink Windows durch die Bake (Poll)
- Transaction Response (Trans.rsp) durch die OBU (in einem Private Uplink Window)
- Transaction Acknowledge (Trans.ack) durch die Bake

Verschiedene Verarbeitungszeiten (teilweise durch den Standard vorgegeben) werden berücksichtigt, wobei insbesondere die Dauer der Operationen auf der Chipkarte (bedingt durch Authentifizierungsfunktionen) besonders relevant sind (T_{trans}). Aufgrund ihrer Länge von mehreren 10 ms, ist eine Reservierung eines Private Uplink Windows unmittelbar zusammen mit dem Transaction Request nicht möglich, sondern muß separat vorgenommen werden. In der hier betrachteten Version wird ein Polling durch die Bake vorgesehen. Eine andere Realisierungsvariante sieht die Anforderung eines Private Uplink Windows in einem von der BST angebotenen Public Uplink Window vor. Da diese Vorgehensweise jedoch erneute Vielfachzugriffsinterferenzen zur Folge haben kann, wird sie im folgenden nicht betrachtet (vgl. [56]).

5.8.1.2 Protokoll mit einstufiger Anmeldephase

Die hier betrachtete Variante einer integrierten Anmeldephase (siehe Abb. 5.10) sieht vor, daß bereits BST und VST die anwendungsspezifischen Daten des Presentation Request und Presentation Response enthalten. Die BST bzw. VST setzen sich demnach aus BST/VST Kernel und Presentation request/Response zusammen. Durch entsprechend vergrößerte Public Uplink Windows wird die anwendungsspezifische Information bereits im ersten Kommunikationsschritt übertragen und die Anzahl der Kommunikationsschritte reduziert sich.

5.8.1.3 Typische Protokollparameter

Die konkrete Implementierung von DSRC-Systemen ist abhängig von einer Vielzahl von Systemparametern. Das Ziel der hier vorgestellten Analysen soll es nicht sein, Aussagen zu machen, die nur für eine konkrete Systemimplementierung gültig sind. Vielmehr sollen allgemein gültige Aussagen getroffen werden, die dann auf konkrete Systemimplementierungen angewendet werden können. Um die Aussagen anhand

Rahmenelement	Reiner MAC Rahmen		Rahmen (Mode 1)		Rahmen (Mode 3)	
	broadcast	private	broadcast	private	cmd	rsp
Flags/FCS	16	16	16	16	16	16
Adresse	8	16	16	16	16	16
MAC Kontrollfeld	8	8	8	8	8	8
LLC Kontrollfeld	-	-	8	8	8	16
Status Feld	-	-	-	-	-	16
Summe	48	72	56	80	80	104

Tabelle 5.1: Protokollspezifische Daten der Datensicherungsschicht

von Beispielen mit quantitativen Ergebnissen belegen zu können, ist es jedoch notwendig, konkrete Systemparameter anzunehmen. Für die quantitative Bewertung der unterschiedlichen Realisierungsvarianten werden daher die folgenden typischen Referenzparameter verwendet (abgeleitet aus den DSRC-Spezifikationen und realistischen Anforderungen der Anwendungen).

Die gewählten Modellierungsansätze bleiben von der hier getroffenen Auswahl unberührt und sind unabhängig von einer konkreten Systemimplementierung einsetzbar. Dies gilt sowohl für die analytischen wie auch die simulativen Betrachtungen.

Bestimmung der zu berücksichtigenden protokollspezifischen Daten Zur Bestimmung der zu übertragenden Datenmengen müssen zunächst die mit den einzelnen Schichten verbundenen protokollspezifischen Daten (Overhead) berücksichtigt werden:

- Für die Bitübertragungsschicht (Schicht 1) trägt Preamble mit mindestens 16 bit (Postamble ist optional) bei. Im Uplink sind je 8 Bit für Post- und Preamble sowie zusätzlich 40 μ s Dauer mit nicht moduliertem Träger für die Preamble (entspricht 10 bit bei 250 kbit/s Uplinkdatenrate) zu berücksichtigen. D.h im Downlink sind 16, im Uplink 26 bit für die Berechnung des Overheads zu berücksichtigen.
- Für die Sicherungsschicht (Schicht 2) berechnen sich die protokollspezifischen Daten wie in Tabelle 5.1 dargestellt. Zusätzlich ist durch für die transparente Datenübertragung notwendiges Einfügen von Nullen in den Bitstrom eine Vergrößerung der Datenmenge um bis zu 20 % zu beachten.
- Die in der Anwendungsschicht (Schicht 7) entstehende protokollspezifische Datenmenge ist abhängig von der genutzten Funktionalität (z.B. bei Nutzung der Fragmentierung sind mindestens 8 bit zu berücksichtigen), von den genutzten Diensten und von der Kodierung der in ASN.1 spezifizierten Anwendungsdatendaten. Für einen Schreibbefehl (set.request) für den einfachsten Anwendungsdatentyp (Container OCTETSTRING) ergibt sich z.B. die in Tabelle 5.2 angeführte Datenmenge.

Für die in der Anwendungsschicht verarbeitete BST bzw. VST ergibt sich im Minimalfall (für eine Anwendung) eine Datenmenge von 72 bzw. 80 bit.

Zusammenfassend liegt der feste Overhead im Bereich zwischen 100 und 200 bit. Durch 'Bit insertion' kommen bis zu 20 % hinzu (bezogen auf den kompletten MAC Rahmen (inklusive Anwendungsdaten)).

Inhalt	Datenmenge (in bit)
Kodierung Dienstprimitiv	8
Element Identifier	8
Kodierung Anzahl Attribute	8
Kodierung Attribute Identifier	8
Kodierung Daten Typ CONTAINER = OCTETSTRING	8
Länge des OCTETSTRINGS	8
Summe Layer 7 Overhead	48

Tabelle 5.2: Protokollspezifische Daten der Anwendungsschicht

Datenpaket	bit	ms
BST Kernel	125 (DL)	0.25
BST (incl. Pres.resp)	250 (DL)	0.5
VST Kernel	125 (UL)	0.25
PRES.req	250 (DL)	0.5
PRES.resp	500 (UL)	2.0
TRANS.req	500 (DL)	1.0
Poll	250 (DL)	0.5
TRANS.resp	500 (UL)	2.0
TRANS.ack	250 (DL)	0.5

Verarbeitungszeiten	
t_{LTA}	0.5 ms
t_{Trans}	40 ms

Tabelle 5.3: Typische Referenzparameter für DSRC-Protokollimplementierungen (AFC)

Datenmengen, Übertragungszeiten und Timer Unter Berücksichtigung der Anforderungen der dialog-orientierten Anwendung AFC und des Overheads wurden die nachfolgend dargestellten Datenmengen zugeordnet und entsprechend der Datenraten von 500 kbit/s im Downlink (DL) und 250 kbit/s im Uplink (UL) in Übertragungszeiten umgerechnet. Der Overhead ist dabei in vollem Umfang berücksichtigt.

Außerdem werden für den Wechsel zwischen Uplink und Downlinkübertragungen (Link-Turn-Around LTA) sowie die Dauer der Chipkartenoperation (Transaction) die in Tabelle 5.3 dargestellten Werte angenommen.

5.8.2 Broadcast-orientierte Anwendung

5.8.2.1 Protokollablauf

Für die Spezifikation einer broadcast-orientierten Anwendung wird bezug genommen auf die Anforderungen einer Anwendung zur Verkehrs- und Reiseinformation (Traffic and Traveller Information TTI). Die Abb. 5.11 zeigt den Protokollablauf. Dabei werden fragmentierte INFO-Daten über den Straßenzustand und die empfohlenen Routen bezüglich der Bakenposition im Downlink an alle mobilen Stationen verteilt (Broadcast INFO Daten). Die Fahrzeuge übermitteln der Bake ihre Reisezeiten in einem privaten Fenster (TrTime), welches von der Bake nach der Anmeldung zugewiesen wird. In der hier als Referenz vorgeschlagenen Variante liegt also eine Kombination aus einem reinen Broadcast und einer einzelnen Uplink-Übertragung vor. Die Uplink-Übertragung der Reisezeiten ist jedoch nicht Teil eines Dialogs und erfolgt daher unabhängig von der empfangenen Broadcast-Nachricht. Die Übermittlung der Reisezeiten hat dabei Vorrang vor der Übertragung der Broadcast-INFO

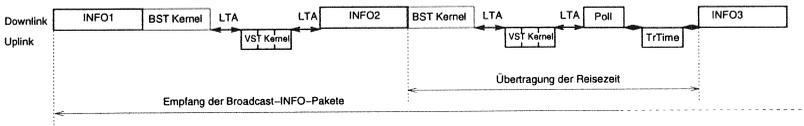


Abbildung 5.11: Broadcast-orientierte Anwendung (TTI)

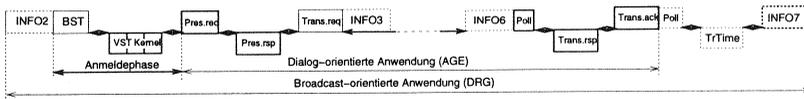


Abbildung 5.12: Kombination der beiden Anwendungen (dialog- und broadcast-orientiert)

Daten, d.h. die Bake wird einer mobilen Station, die sich nach einer empfangenen BST anmeldet sofort ein privates Übertragungsfenster zur Verfügung stellen.

5.8.2.2 Protokollparameter

Für die Broadcast-INFO-Daten wird eine Datenmenge von 16 kbit angenommen, wobei die optimale Fragmentierung der Broadcast-Daten Gegenstand der Leistungs-bewertungsuntersuchungen ist. Bei dem Datenpaket mit der Reisezeit handelt es sich um ein kurzes Paket:

Datenpaket	bit	ms
INFO (fragmentiert)	16000	32
TrTime	250	1

Das die Übertragung der Reisezeiten einleitende Poll-Datenpaket wird maximal N mal gesendet (N wird im Rahmen der simulativen Leistungsbewertung in Kapitel 9 eingehend betrachtet).

5.8.3 Kombinierte Anwendungen

Von besonderem Interesse für die optimale Ausnutzung einer zukünftigen DSRC-Infrastruktur wird die bereits in Kapitel 2 angesprochene kombinierte Nutzung der Bakeninfrastruktur durch mehrere Anwendungen sein. Die oben vorgestellten Referenzanwendungen sollen daher auch in einer kombinierten Form untersucht werden. Die Abb. 5.12 zeigt den entsprechenden Protokollablauf. Die dialog-orientierte Anwendung wird dabei bevorzugt abgewickelt, d.h. immer dann, wenn keine Daten seitens einer dialog-orientierten Anwendung zur Übertragung anstehen, kann der broadcast-orientierte Dienst abgewickelt werden.

Es wird Gegenstand der simulativen Leistungsbewertung in Kapitel 9 sein, die Auswirkung einer Kombination beider Anwendungen aufzuzeigen. Von Bedeutung ist dabei insbesondere, inwieweit die höher priorisierte dialog-orientierte Anwendung (AFC) die hohen Anforderungen an die erfolgreiche Abwicklung trotz einer weiteren parallelen Anwendung erfüllen kann.

Modellierung des Kommunikationsprozesses mit homogenen Markov-Ketten

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten DSRC-Standards eröffnen aufgrund der großen Anzahl der frei wählbaren Parameter eine Vielzahl von unterschiedlichen Systemlösungen. Dabei stellt sich das Problem der optimalen Parameterauswahl aufgrund von quantitativen Entscheidungskriterien. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Modellierung durch homogene Markovketten ermöglicht, wesentliche Elemente des Kommunikationsprozesses analytisch zu beschreiben und quantitative Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lösungsvarianten zu machen.

Zunächst werden die Grundlagen der Modellbildung eingeführt und danach zwei Lösungsansätze für die Realisierung der zeitkritischen Anmeldephase vorgestellt. Anhand der Situation zweier gleichzeitig in die Kommunikationszone einfahrender Fahrzeuge werden ein Grundmodell eingeführt und die anhand von typischen Referenzparametern ermittelten Leistungskenngößen diskutiert. Für die Untersuchung des Einflusses der Kanalqualität werden die Ergebnisse auf der Basis des Grundmodells sowie mögliche Erweiterungen des Modells vorgestellt. Im Anschluß daran wird der gesamte Kommunikationsprozeß, d.h. Anmeldephase und Transaktionsphase, in die Betrachtung einbezogen und ein entsprechendes Modell für Mehrfachankünfte eingeführt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse dienen später der Validierung von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 9).

6.1 Grundlagen zu Markov-Ketten

Die hier vorgestellten Kommunikationsprozesse werden als homogene Markov-Ketten modelliert. In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten Definitionen und Formeln aufgeführt, die für das Verständnis und die Berechnung der Modelle nötig sind [86]:

Def.: Stochastischer Prozeß (SP)

X_t sei eine Zufallsvariable bzgl. der Merkmalmenge M ; t sei aus der Menge der Zahlen I . Dann wird $\{X_t, t \in I\}$ stochastischer bzw. Zufallsprozeß genannt. Die Komponenten eines SPs sind:

- Zustand X_t : Zustand des SP zur Zeit t
- Zustandsraum $\{X_t\}$: Menge aller möglichen Zustände
- Parameter t : Zeit

Def.: Markov-Prozeß (MP)

Ein Markov-Prozeß ist ein Sonderfall eines Stochastischen Prozesses. Der Wert

des Folgezustands hängt nicht von allen, sondern nur vom vorhergehenden Zustand ab. Hat ein Markov-Prozeß diskrete Zustände X_t (d.h. eine endliche Anzahl von Zuständen oder abzählbar viele Zustände), bezeichnet man die Folge $\{X_t\}$ als Markov-Kette. Ist der Parameter t diskret, so nennt man die Markov-Kette diskret.

Def.: Zustandswahrscheinlichkeit

Die Zustandswahrscheinlichkeit $P_i(t_1)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß X_t zum Zeitpunkt t_1 im Zustand i ist (wobei $x_t = i$ gilt).

Def.: Startzustand

Eine homogene Markov-Kette hat genau einen Startzustand s , wenn gilt: $P_s(t = 0) = 1$.

Def.: Endzustand

Eine homogene Markov-Kette hat genau einen Endzustand z , wenn gilt: $P_z(t \rightarrow \infty) = 1$.

Def.: Zustandsübergangswahrscheinlichkeit

Die Übergangswahrscheinlichkeit $p_{ij}(t_1, t_2)$ gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür an, daß X_t zum Zeitpunkt t_2 den Wert j annimmt, wenn zum Zeitpunkt t_1 $X_t = i$ gilt.

Def.: Homogener Prozeß

Ein Prozeß heißt homogen, wenn gilt: $p_{ij}(t_1, t_2) = p_{ij}(t_2 - t_1) = p_{ij}(T)$.

D.h. die Zustandsübergangswahrscheinlichkeit ist nicht abhängig von den Zeitpunkten t_1 und t_2 , sondern nur von dem Zeitintervall T zwischen t_1 und t_2 .

Def.: Stochastische Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten

Seien $1, 2, \dots, n$ die Zustände. Dann ist

$$\underline{p}(T) = \begin{pmatrix} p_{11}(T) & p_{12}(T) & \cdots & p_{1n}(T) \\ p_{21}(T) & p_{22}(T) & \cdots & p_{2n}(T) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1}(T) & p_{n2}(T) & \cdots & p_{nn}(T) \end{pmatrix}$$

die Stochastische Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten für eine homogene Markov-Kette.

Für die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten gilt die Vollständigkeitsbedingung:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(T) = 1 \text{ für alle } i$$

D.h. die Wahrscheinlichkeit, daß der Prozeß im Zeitintervall T aus dem Zustand i in irgendeinen Zustand j übergeht, ist Eins.

Weiterhin gilt die Chapman-Kolmogorov-Gleichung:

$$p_{ij}(t+h) = \sum_k p_{ik}(t)p_{kj}(h)$$

oder anders geschrieben:

$$\underline{p}(t+h) = \underline{p}(t)\underline{p}(h)$$

Daraus läßt sich folgender Satz ableiten:

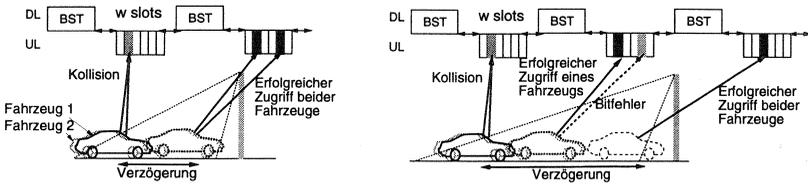


Abbildung 6.1: Anmeldephase: Verzögerung durch Datenkollisionen und Bitfehler

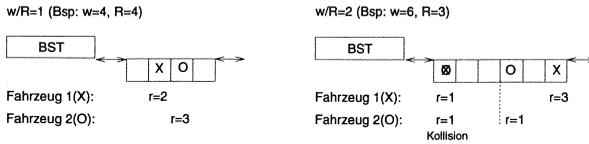


Abbildung 6.2: Beispiele für die Funktionsweise des betrachteten Zufallszugriffsverfahrens

Sei $\underline{p}(T)$ die Stochastische Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten für eine homogene Markov-Kette mit m Zuständen. Die Markov-Kette besitze genau einen Startzustand s und genau einen Endzustand z mit $s, z \in 1, \dots, m$. Dann läßt sich die Wahrscheinlichkeit $P_z(nT)$, daß bis zum Zeitpunkt nT der Endzustand erreicht wird, folgendermaßen berechnen:

$$A := (a_{i,j})_{i,j=1}^m := \underline{p}^n(T)$$

$$P_z(nT) = a_{sz} \tag{6.1}$$

Dieser Satz wird im folgenden dazu angewendet, die Wahrscheinlichkeit des Erreichens eines bestimmten Zustands im Kommunikationsprozeß in Abhängigkeit der Zeit $t = nT$ zu ermitteln.

6.2 Gegenstand der Modellierung

Für die hier durchgeführten Betrachtungen kann der Gegenstand der Modellierung wie folgt eingegrenzt werden:

- Es werden Systemkonfigurationen betrachtet, in denen es zur Überlagerung paralleler Anmeldeversuche innerhalb einer Kommunikationszone kommen kann (*Multiple-Access Interference*). Es handelt sich also um die in Kapitel 3 eingeführten TDMA-Konfigurationen. Daher wird für die Berücksichtigung der Verteilungsdichtefunktion der Zwischenankunftszeiten auf die Ergebnisse der querschnittsbezogenen Analyse der Fahrzeugmobilität (siehe Abschnitt 3) zurückgegriffen.
- Die hier vorgestellten Modelle beziehen sich in erster Linie auf die in Abschnitt 5.8 vorgestellten asynchronen DSRC-Protokollvarianten für eine dialogorientierte Anwendung (auf der Basis der Erfassung von streckenbezogenen

Benutzungsgebühren auf Autobahnen). Für die Betrachtung des speziellen Einflusses einer parallel durchgeführten broadcast-orientierten Anwendung sowie zur Untersuchung eines synchronen Protokolls werden die Modelle entsprechend angepaßt.

- Die Modellierung bezieht sich insbesondere auf die in Abschnitt 5 vorgestellte, zeitkritische Anmeldephase, in der mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf Public Windows zugreifen können (siehe Abb. 6.1). Das dabei zum Einsatz kommende DSRC-Zufallszugriffsverfahren wird in Übereinstimmung mit Kapitel 5 in folgender Form betrachtet:

Empfängt ein Fahrzeug ein Downlink-Window, das die Übertragung eines Datenpakets in einem der folgenden w Public Uplink Windows ermöglicht, so erzeugt ein Zufallszahlengenerator eine ganze Zahl r zwischen 1 und dem Parameter R ($1 \leq i \leq R$). Das Fahrzeug wählt dann das r -te auf eine Downlink-Übertragung folgende Public Uplink Window für die Übertragung seiner Daten aus. Im Standardisierungsvorschlag für die DSRC Kommunikationsprofile [70] wurde das Verhältnis zwischen Fensteranzahl und maximalem Zufallswert als kleiner oder gleich Eins gesetzt $w/R \leq 1$. Für die Leistungsanalyse ist es jedoch auch von Interesse, den Fall zu betrachten, in dem durch Zeitdiversität ein Fahrzeug mehrmals die Möglichkeit hat, innerhalb einer Gruppe von Public Windows Daten zu senden. Daher werden im Rahmen der Modellierung die Fälle $w/R = n$ mit $n \in 1, 2$ zugelassen. Für den Fall $w/R = 2$ werden also 2 Gruppen mit je R Fenstern zur Verfügung gestellt; der Zufallswert r wird dabei für jede Fenstergruppe neu bestimmt. Die Abb. 6.2 zeigt Beispiele für die Funktionsweise der hier betrachteten Fälle.

- Übertragungsfehler, die die Wiederholung bereits gesendeter Datenblöcke notwendig machen, werden für die Modellierung in folgender Weise berücksichtigt:
 - Bei gleichzeitiger Übertragung von Datenpaketen durch mehrere Fahrzeuge werden die betroffenen Datenpakete verworfen (Kollision von Datenpaketen).
 - Bitfehler werden durch ein vereinfachtes Bitfehlermodell mit statischen Bitfehlerverhältnissen in Downlink und Uplink berücksichtigt. Durch Variation der Bitfehlerverhältnisse können Aussagen über das Verhalten der Protokolle unter extremen Bedingungen sowie Mindestanforderungen an die Qualität des Übertragungskanals abgeleitet werden. Soweit nichts anderes angegeben ist, gilt für die Bitfehlerverhältnisse für den Downlink und für den Uplink: $BER_{DN} = BER_{UP} = BER = 10^{-6}$ Fehler/Bit. Die Paketfehlerwahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit zur Länge des übertragenen Datenpakets l vereinfacht zu $p_{err} = 1 - (1 - BER)^l$ angenommen. Von Bitfehlern betroffene Datenpakete tragen auch zu Datenkollisionen bei.

Die Modellierung erfolgt unabhängig von der konkreten Antennenkonfiguration und vom Aufenthaltsort der Fahrzeuge innerhalb der Kommunikationszone, d.h. besondere Effekte wie Abschattungen und Capture werden hier nicht berücksichtigt (siehe hierzu Untersuchungen mit dem integrierten Simulationsmodell in Kapitel 9).

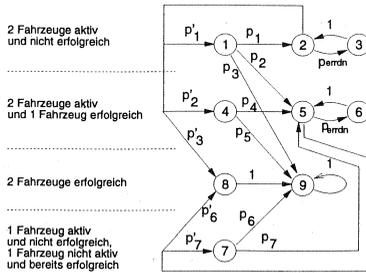


Abbildung 6.3: Grundmodell (für $w/R=2$)

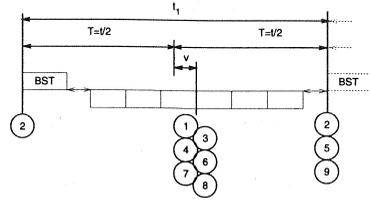


Abbildung 6.4: Zeitliche Zuordnung der Zustände

6.3 Modellierung der Anmeldephase für spezielle Verkehrssituationen

6.3.1 Das Grundmodell für bis zu 2 Fahrzeuge

Anhand eines ausführlicheren Beispiels soll hier der grundsätzliche Aufbau der durch homogene Markov-Ketten beschriebenen Modelle erklärt werden. Die spezielle Situation, die hier zunächst betrachtet wird, ist der gleichzeitige Anmeldeversuch zweier Fahrzeuge. Es wird die Anmeldephase der Protokollvariante mit vorgeschalteter Anmeldephase mit $w/R = 2$ modelliert. Da in diesem Fall jedes Fahrzeug pro Fensterblock zwei Versuche macht, sich anzumelden, die mit ähnlichen Wahrscheinlichkeiten zum Erfolg führen, ist es sinnvoll, der Dauer eines Fensterblocks $t_1 = 2T$ in dem Modell zwei Zustände zuzuordnen.

Für die Wahrscheinlichkeit, daß beide Fahrzeuge auf dasselbe von R Fenstern zugreifen, gilt $1/R$, p_{errup} ist die Wahrscheinlichkeit für einen Paketfehler bei der Übertragung der VST und p_{errdn} ist die Wahrscheinlichkeit für einen Paketfehler bei der Übertragung der BST.

Im einzelnen beschreibt das in Abb. 6.3 dargestellte Modell folgenden Prozess (die Abb. 6.4 verdeutlicht die zeitliche Zuordnung der Zustände):

Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich das System im Startzustand 2. Betrachtet wird ein Fahrzeug, welches sich in Konkurrenz zu einem weiteren Fahrzeug, bei der Bake anmeldet. Die Bake sendet die erste BST. Dabei können folgende Ereignisse auftreten:

1. Mit der Wahrscheinlichkeit p_{errdn} ereignet sich ein Übertragungsfehler im Downlink. Da beide Fahrzeuge keine korrekte BST erhalten haben, können sie sich nicht anmelden und müssen auf die nächste BST warten. Das System kehrt über den Zwischenzustand 3 nach der Zeit T in den Startzustand 2 zurück.
2. Mit der Wahrscheinlichkeit $1/R$ greifen beide Fahrzeuge auf dasselbe der ersten

¹Für die Bezeichnungen der Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten wurden die Indices unabhängig von den betrachteten Zuständen gewählt, um eine spätere Wiederverwendbarkeit für modifizierte Modelle zu erleichtern. Außerdem unterscheiden sich gestrichelte Zustandsüber-

R Public Uplink Windows zu (dann kommt es zur Datenkollision) oder beide Fahrzeuge haben einen Übertragungsfehler im Uplink:

$$p'_1 = \left(\frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)p_{errup}^2\right) \cdot (1 - p_{errdn})$$

In beiden Fällen kann sich keines der beiden während der ersten R Public Uplink Windows anmelden. Das System befindet sich im Zustand 1.

3. Mit der Wahrscheinlichkeit p'_2 greifen die Fahrzeuge auf verschiedene Public Uplink Windows zu und eins von ihnen hat einen Fehler im Uplink:

$$p'_2 = \left(\left(1 - \frac{1}{R}\right)2p_{errup}(1 - p_{errup})\right) \cdot (1 - p_{errdn})$$

Dann kann sich nur das andere anmelden und das System befindet sich im Zustand 4.

4. Mit der Wahrscheinlichkeit p'_3 greifen die Fahrzeuge auf verschiedene Fenster zu und haben keine Übertragungsfehler:

$$p'_3 = \left(\left(1 - \frac{1}{R}\right)(1 - p_{errup})^2\right) \cdot (1 - p_{errdn})$$

Dann können sich beide erfolgreich anmelden und das System geht über den Zustand 8 nach der Zeit T in den Endzustand 9 über.

Könnte sich kein Fahrzeug während der ersten R Public Uplink Windows anmelden, dann befindet sich das System im Zustand 1. Es können folgende Ereignisse auftreten:

1. Mit der Wahrscheinlichkeit p_1 hat auch während der zweiten R Public Uplink Windows kein Fahrzeug Erfolg:

$$p_1 = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)p_{errup}^2$$

Das System befindet sich zur Zeit $t = 2T$ wieder im Ausgangszustand 2.

2. Mit der Wahrscheinlichkeit p_2 hat ein Fahrzeug Erfolg:

$$p_2 = \left(1 - \frac{1}{R}\right)2p_{errup}(1 - p_{errup})$$

Nach der Zeit $t = 2T$ befindet sich das System im Zustand 5.

3. Mit der Wahrscheinlichkeit p_3 haben beide Fahrzeuge Erfolg:

$$p_3 = \left(1 - \frac{1}{R}\right)(1 - p_{errup})^2$$

Das System geht in den Endzustand 9 über.

gangswahrscheinlichkeiten nur durch einen Faktor, der jeweils die Fehlerwahrscheinlichkeit der Downlinkübertragung angibt, von ungestrichenen Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten mit demselben Index: $p'_i = p_i \cdot (1 - p_{errdn})$. Auch diese Vorgehensweise erleichtert im folgenden die Modifikation bereits eingeführter Modelle.

Konnte sich während der ersten R Public Uplink Windows ein Fahrzeug anmelden, befindet sich das System im Zustand 4. Da das erfolgreiche Fahrzeug jedoch noch keine Bestätigung für den erfolgreichen Zugriff erhält, versucht es auch während der zweiten R Public Uplink Windows sich anzumelden und kann das andere Fahrzeug behindern. Es können folgende Ereignisse auftreten:

1. Mit der Wahrscheinlichkeit p_4 wird das andere Fahrzeug vom erfolgreichen behindert oder es hat einen Übertragungsfehler im Uplink:

$$p_4 = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)(p_{errup}^2 + p_{errup}(1 - p_{errup})) = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)p_{errup}$$

Dann kann es sich nicht anmelden. Das System geht zur Zeit $t = 2T$ über in den Zustand 5.

2. Mit der Wahrscheinlichkeit p_5 wird das Fahrzeug nicht behindert und hat keinen Übertragungsfehler:

$$p_5 = \left(1 - \frac{1}{R}\right)((1 - p_{errup})^2 + p_{errup}(1 - p_{errup})) = \left(1 - \frac{1}{R}\right)(1 - p_{errup})$$

Dann kann auch dieses Fahrzeug sich anmelden und das System befindet sich im Endzustand 9.

Befindet sich das System im Zustand 5, dann konnte sich in den bisherigen Fensterblöcken ein Fahrzeug bereits anmelden. Ein Fahrzeug, das sich in einem Fensterblock erfolgreich anmelden konnte, kommuniziert im weiteren nur noch über Private-Windows mit der Base und greift nicht mehr auf Public Uplink Windows der folgenden Fensterblöcke zu. Das verbleibende Fahrzeug kann also nicht mehr von dem erfolgreichen behindert werden. Ausgehend vom Zustand 5 wird also allgemein der Fall beschrieben, daß nur ein Fahrzeug einen Anmeldeversuch durchführt. Vom Zustand 5 aus sind folgende Übergänge möglich:

1. Mit der Wahrscheinlichkeit p_{errdn} ereignet sich ein Übertragungsfehler im Downlink. Das verbleibende Fahrzeug muß den nächsten Fensterblock abwarten. Das System kehrt über den Zwischenzustand 6 nach der Zeit $t + 2T$ in den Zustand 5 zurück.
2. Mit der Wahrscheinlichkeit p'_7 hat das Fahrzeug einen Fehler in der Uplink-Übertragung und kann sich in den ersten R Public Uplink Windows nicht anmelden:

$$p'_7 = p_{errup} \cdot (1 - p_{errdn})$$

Das System geht in den Zustand 7 über.

3. Mit der Wahrscheinlichkeit p'_6 hat das Fahrzeug während der ersten R Public Uplink Windows des Blockes Erfolg:

$$p'_6 = 1 - p_{errup} \cdot (1 - p_{errdn})$$

Das System geht über den Zwischenzustand 8 nach der Zeit T in den Endzustand 9 über.

Befindet sich das System im Zustand 7, dann hatte das eine verbleibende Fahrzeug in den ersten R Public Uplink Windows des Blockes keinen Erfolg. Während der zweiten R Public Uplink Windows des Blockes gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Mit der Wahrscheinlichkeit p_7 kann sich das Fahrzeug wegen eines Fehlers im Uplink wieder nicht anmelden:

$$p_7 = p_{errup}$$

Das System kehrt in den Zustand 5 zurück.

2. Mit der Wahrscheinlichkeit p_6 kann sich das Fahrzeug anmelden und das System geht in den Endzustand 9 über:

$$p_7 = p_{errup}$$

Die Stochastische Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten ergibt sich zu:

$$\underline{p}(T) = \begin{pmatrix} 0 & p_1 & 0 & 0 & p_2 & 0 & 0 & 0 & p_3 \\ p'_1 & 0 & p_{errdn} & p'_2 & 0 & 0 & 0 & p'_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_4 & 0 & 0 & 0 & p_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{errdn} & p'_6 & p'_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_6 & 0 & 0 & 0 & p_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Unter Verwendung eines entsprechenden Algebra-Programms (wie z.B. Maple [16]) kann nach Gleichung 6.1 für alle n die Wahrscheinlichkeit $P_9(nT) = a_{29}$ berechnet werden, mit der das System bis zum Zeitpunkt nT vom Startzustand $s = 2$ in den Endzustand $z = 9$ übergegangen ist. Da für die Betrachtung jeweils die Wahrscheinlichkeit nach Abschluß eines vollständigen Fensterblocks (t_1) relevant ist, erfolgt eine Berechnung wegen $t_1 = 2T$ für alle geraden n . Für ungerade n befindet sich das System in Hilfszuständen (Zustände 3, 4, 6, 7 und 8), die die Beschreibung des Prozesses erleichtern, deren Zustandswahrscheinlichkeiten hier jedoch nicht von Interesse sind. Deshalb verursacht die zugunsten einer Reduktion der Anzahl der notwendigen Zustände in Kauf genommene zeitliche Inhomogenität bezüglich dieser Hilfszustände (siehe Skizze 6.4 Zeitverschiebung v) auch keinen Fehler.

In den nachfolgenden Ergebnisgraphen ist in der Regel die komplementäre Funktion der Wahrscheinlichkeit $1 - P_9(nT)$ dargestellt und diese als Nichterfolgswahrscheinlichkeit bezeichnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Punkte, in denen sich die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Zeit ändert, durch Linien miteinander verbunden ².

Das Verhalten von nur einem Fahrzeug kann ebenfalls aus dem Modell abgeleitet werden. Es muß dann ein Startzustand zugrunde gelegt werden, in dem nur noch ein Fahrzeug aktiv eine Anmeldung durchführt (hier Zustand 5).

Das vorgestellte Modell erlaubt eine Parametrisierung bezüglich

²Da sich zwischen den berechneten Werten die Wahrscheinlichkeit nicht ändert, wäre auch eine Darstellung in Stufen möglich. Dies führt jedoch zu sehr unübersichtlichen Darstellungen, was insbesondere einen Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Lösungen erschwert.

1. der Bitfehlerverhältnisse in Uplink und Downlink (BERUP und BERDN), bzw. der entsprechenden Paketfehlerraten,
2. der Kombinationen der Parameter w und R (für $w/R = 2$),
3. der Übertragungsraten und Verarbeitungszeiten,
4. der Fenstergrößen sowie
5. der Protokollvarianten mit ein- und zweistufiger Anmeldephase.

Im ersten und zweiten Fall ändern sich lediglich die Zahlenwerte der entsprechenden Variablen, im dritten, vierten und fünften Fall die Größe des Zeitintervalls t bzw. T und die Fehlerwahrscheinlichkeiten p_{errup} und p_{errdn} . Die Kombinationen der Fensterzahl w und des Parameters R dürfen jedoch nur so gewählt werden, daß das Verhältnis $w/R = 2$ beträgt. Für andere Verhältnisse w/R sind modifizierte Modelle notwendig. Insbesondere für $w/R = 1$ vereinfacht sich das Modell (wie im folgenden Abschnitt 6.3.2 dargestellt).

6.3.2 Ein zustandsreduziertes Modell für $w=R$

Das Modell für $w/R = 1$ ist von praktischer Relevanz, da durch diese Festlegung besonders effiziente Implementierungen ermöglicht werden und sie daher für die erste Generation von DSRC-Systemen als Teil eines Standardprofils vorgesehen ist [70].

Abgeleitet aus dem vorher beschriebenen Modell ergibt sich für das Verhältnis $w/R = 1$ das in Abb. 6.5 beschriebene Modell. Gegenüber dem Grundmodell sind die Zustände 1, 2 und 3 zu dem Zustand 1' zusammengefaßt worden. Analog wurde für die Zustände 4, 5, 6, 7 (2') sowie 8, 9 (3') verfahren. Die zugeordneten Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten entsprechen den bereits im vorhergehenden Abschnitt eingeführten.

In den folgenden Kapiteln wird hauptsächlich das umfangreichere und allgemeinere Grundmodell aus Abb. 6.3 untersucht. Alle Erweiterungen des Grundmodells können entsprechend für das reduzierte Modell analog übernommen werden.

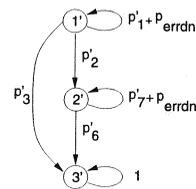


Abbildung 6.5: Zustandsreduziertes Modell für $w=R$

6.3.3 Ergebnisse für das Grundmodell

Bei den folgenden Ergebnissen wurden bis auf die jeweils variierten Größen jeweils die in Abschnitt 5.8 vorgestellten Referenzparameter und Protokollvarianten (Dialog A und B) vorausgesetzt. Die Taktzeit T ergibt sich dabei aus den in Tabelle 5.3 angegebenen Zeiten in Abhängigkeit zur gewählten Protokollvariante³ (vgl. Tabelle 6.1).

6.3.3.1 Vergleiche von verschiedenen Werten für w und R

Für die optimale Auswahl der Fensteranzahl und des maximalen Zufallswerts R muß ein Kompromiß zwischen der Fähigkeit zur Auflösung einer Datenkollision und der

³Beispiel für Dialog A und $w=6$: $T = t_1/2 = 1/2 \cdot (t_{BST} + t_{LTA} + w \cdot t_{VSTKernel} + t_{LTA}) = 4.5$ ms

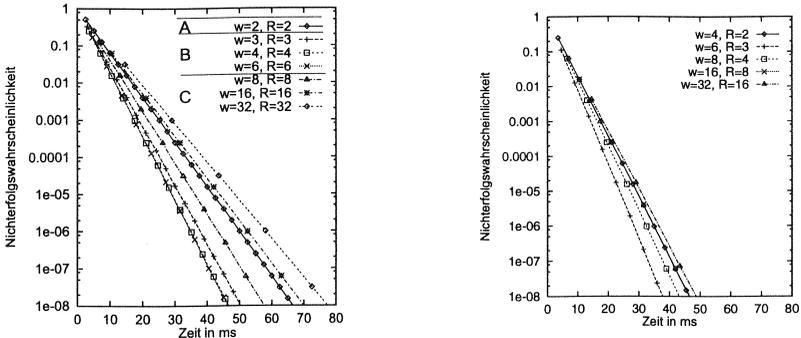


Abbildung 6.6: Variation der Fensterzahl und des max. Zufallswertes für $w/R = 1$ und $w/R = 2$

durch das Verfahren eingeführten Verzögerung gefunden werden.

Die Abb. 6.6 zeigt die Nichterfolgswahrscheinlichkeit für einige Kombinationen von w und R für die Fälle $w/R = 1$ (links) und $w/R = 2$ (rechts). Anhand der Ergebnisse läßt sich folgende Klassifizierung einführen:

- Hohe Verzögerung aufgrund von Datenkollisionen (siehe A):**
 Ist die Fensteranzahl zu gering, bzw. der maximale Zufallswert zu klein, treten wiederholt Datenkollisionen auf, die zu einer Wiederholung bereits gesendeter Datenpakete und damit zu entsprechenden Verzögerungen führen.
- Hohe Verzögerung durch zu langsamen Zugriff (siehe C):**
 Wird die Fensteranzahl sehr groß gewählt, werden Kollisionen zwar weitgehend vermieden, aber die mit (den für seltene Ereignisse notwendigen) Wiederholungen der Fensterblöcke verbundene Verzögerung führt dazu, daß für sehr niedrige Nichterfolgswahrscheinlichkeiten ähnliche Verzögerungszeiten wie für den Fall der zu niedrigen Fensteranzahl beobachtet werden.
- Schnellstmöglicher Zugriff durch geringe Verzögerung (siehe B):**
 Besonders kurze Verzögerungszeiten ergeben sich, wenn ein optimaler Kompromiß zwischen dem Kollisionsauflösungsvermögen und dem durch hohe Fensteranzahlen eingeführten Overhead gefunden ist. Für die auf typischen Anwendungsanforderungen beruhenden Referenzparameter ergibt sich für $w=4$, $R=4$ sowie für $w=6$ und $R=6$ bzw. $R=3$ ein sehr günstiges Verhalten: nach ca. 35 ms ist ein erfolgreicher Zugriff beider Fahrzeuge mit einer Erfolgswahrscheinlichkeit von $1 - 10^{-6}$ gewährleistet.

6.3.3.2 Vergleich zwischen ein- und zweistufiger Anmeldephase

In Abb. 6.7 werden anhand des Falls $w=6$, $R=3$ Ergebnisse für die beiden Protokollvarianten mit ein- und zweistufiger Anmeldephase (siehe Dialog A und B in Abschnitt 5.8) für Einzel- und Doppellankünfte miteinander verglichen. Dabei wird für Einzel- bzw. Doppellankünfte die Zeit für den ersten Teil des individuellen Dia-

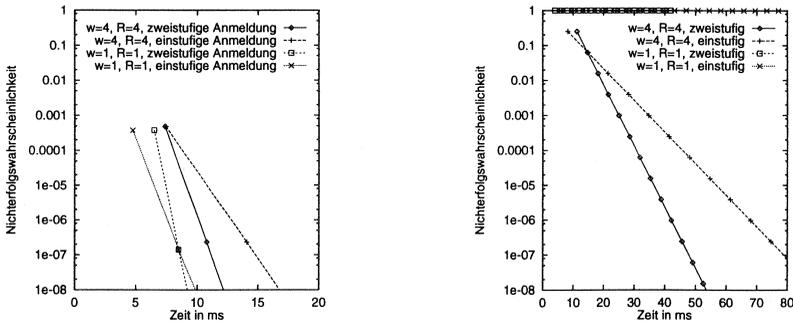


Abbildung 6.7: Vergleich der Protokollvarianten mit ein- und zweistufiger Anmeldephase für Einzel- und Doppellankünfte

logs der Fahrzeuge mit der Bake für die Variante mitberücksichtigt, indem sie einmal bzw. zweimal zu der aus den Modellen berechneten Zeit hinzuaddiert wird. Für die Variante mit der einstufigen Anmeldung sind diese Übertragungszeiten bereits durch die entsprechende Anpassung der Größe der Zeitschritte mit berücksichtigt. Die Abbildung zeigt also die Zeiten, die die Fahrzeuge benötigen, um einen vergleichbaren Zustand zu erreichen (vor der Chipkartenoperation).

Aus der Abbildung läßt sich folgendes ablesen:

- Betrachtet man den Fall der Einzelankunft, so ist die Variante mit integrierter Anmeldephase durch die Einsparung eines Kommunikationsschritts dann günstiger, wenn keine wiederholten Übertragungen durch Bitfehler notwendig werden.
- Sobald jedoch wegen Übertragungsfehlern oder Datenkollision eine Wiederholung der Anmeldephase nötig wird, ist das Protokoll mit zweistufiger Anmeldephase deutlich günstiger, da bei diesem Protokoll die sich unter Umständen mehrmals wiederholende Anmeldephase aufgrund der kurzen Public Windows deutlich effizienter ist.

Zusammenfassend gilt also, daß für Systeminstallationen, in denen aufgrund der Antennencharakteristik Datenkollisionen ausgeschlossen werden können (SDMA, nur Einzelankünfte), die einstufige Anmeldephase von leichtem Vorteil ist, wenn die Anzahl der Public Windows sehr niedrig bzw. zu Eins gesetzt wird. Durch eine zweistufige Anmeldephase wird in diesen Fällen ein geringfügiger Overhead eingeführt. In Systeminstallationen, in denen Datenkollisionen nicht ausgeschlossen werden können (TDMA, Mehrfachankünfte), ist dagegen die Variante mit zweistufiger Anmeldephase in jedem Fall vorzuziehen. Im Falle einer einstufigen Anmeldephase entstehen Verzögerungen, die die Leistungsfähigkeit deutlich beeinflussen.

Da zukünftige DSRC-Systeme sowohl als SDMA wie auch als RTDMA-Systeme betrieben werden, ist für einen interoperablen Betrieb der unterschiedlichen Systemlösungen die zwei-stufige Anmeldephase vorzusehen.

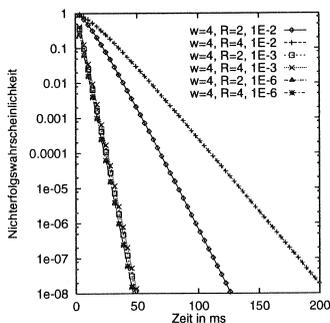


Abbildung 6.8: Variation des Bitfehlerverhältnisses bei $w=4$, $R=2$ und $R=4$

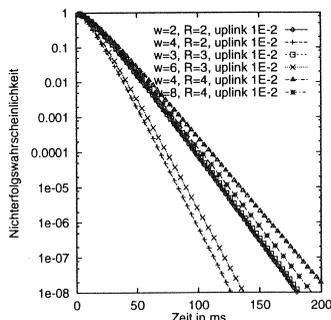


Abbildung 6.9: Variation der Parameter w und R bei $\text{BER} = 10^{-2}$

6.4 Einfluß der Kanalqualität

6.4.1 Variation des Bitfehlerverhältnisses im Uplink

Im folgenden wird angenommen, daß die Bitfehlerverhältnisse für die Downlinkübertragung unverändert bei 10^{-6} liegt, während für die Uplinkübertragung eine Variation von 10^{-2} bis 10^{-6} vorgenommen wird. Abb. 6.8 zeigt die Nichterfolgswahrscheinlichkeit für diese verschiedenen Qualitäten des Übertragungskanals. Für die Parameter des Kanalzugriffsverfahrens wurden dabei Wertepaare ausgewählt, für die sich bei der Betrachtung für einen sehr guten Kanal praktisch keine Unterschiede zeigen ($w=4$, $R=2$ und $R=4$, siehe auch Abschnitt 6.3.3). Abb. 6.9 zeigt Ergebnisse für unterschiedliche Parameterkombinationen für w und R bei einem hohen Bitfehlerverhältnis von 10^{-2} . Hierbei wird ersichtlich, daß bei insgesamt deutlich verlängerten Anmeldezeiten, Parameterkombinationen mit niedrigerem R vorteilhaft sind, da die Fähigkeit zur Kollisionsauflösung gegenüber dem wiederholten Ausenden eines Datenpakets aufgrund von Paketfehlern in den Hintergrund tritt. Für schlechte Kanäle wirkt sich der zweimalige Versuch ($w/R = 2$) innerhalb eines Fensterblocks besonders günstig aus: die Parameterkombinationen $w=4$, $R=2$ und $w=6$, $R=3$ erzielen deutlich niedrigere Zugriffszeiten als alle Kombinationen für $w/R = 1$.

6.4.2 Differenzierte Betrachtung von Übertragungsfehlern im Downlink

In dem bisher betrachteten Modell wurde der Übertragungsfehler im Downlink als Broadcast-Fehler berücksichtigt. Dabei wurde vereinfachend angenommen, daß ein Fehler bei der Übertragung der BST und dem anschließenden Downlink-Window alle Fahrzeuge im Kommunikationsbereich betrifft (Broadcastfehler). Dies resultiert darin, daß ein vollständiger Fensterblock verloren geht. Für eine differenziertere Betrachtung möglicher Übertragungsfehler im Downlink werden im folgenden Downlinkübertragungsfehler für jedes Fahrzeug einzeln modelliert. Dabei wird diesmal vorausgesetzt, daß ein Downlinkfehler, der mit der Wahrscheinlichkeit p_{errdn} auf-

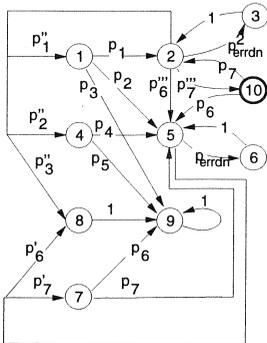


Abbildung 6.10: Differenzierte Betrachtung der Downlink-Übertragungsfehler

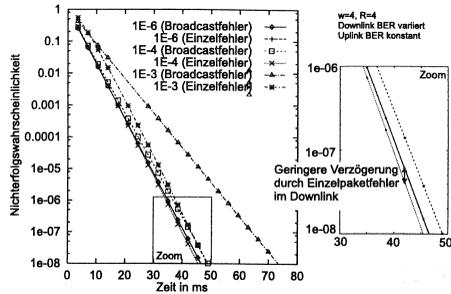


Abbildung 6.11: Vergleich der Modellierungsvarianten für unterschiedliche Bitfehlerraten

tritt, jeweils nur ein Fahrzeug betrifft (individueller Fehler). Die Wahrscheinlichkeit, daß beide betrachteten Fahrzeuge von einem Downlinkfehler betroffen sind, ist mit p_{errdn}^2 bei dieser Modellierung wesentlich kleiner als bei der vorigen Betrachtungsweise. Die Abb. 6.10 zeigt das um den Zustand 10 erweiterte Modell.

Die folgenden Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten werden gegenüber Kapitel 6.3.1 neu eingeführt:

$$\begin{aligned}
 p_i'' &= p_i(1 - p_{errdn})^2 & i \in \{1, 2, 3\} \\
 p_i''' &= 2p_i p_{errdn}(1 - p_{errdn}) & i \in \{6, 7\}
 \end{aligned}$$

Abb. 6.11 zeigt die Ergebnisse für die Modellierung des Downlinkfehlers als Broadcast-Fehler und als individuelle Fehler bei Variation des Bitfehlerverhältnisses BER. Bei Modellierung als Broadcastfehler wird die Nichterfolgswahrscheinlichkeit mit steigendem Bitfehlerverhältnis erwartungsgemäß größer. Dies ist bei der Modellierung als Einzelfehler nicht durchgehend der Fall. Ein Bitfehlerverhältnis von 10^{-4} führt hier zu kürzeren Zugriffszeiten als ein Bitfehlerverhältnis von 10^{-6} . Dieses zunächst überraschende Ergebnis liegt darin begründet, daß sich bei dieser Modellierungsvariante ein Fahrzeug ungestört anmelden kann, während das andere Fahrzeug aufgrund des Fehlers im Downlink nicht sendet und daher auch nicht zu Kollisionen beiträgt. Somit tragen Downlinkübertragungsfehler in diesem Fall zur Kollisionsvermeidung bei. Da jedoch im Regelfall insbesondere im Downlink von Bitfehlerverhältnissen deutlich kleiner 10^{-4} auszugehen ist, soll dieser Spezialeffekt bei der weiteren Betrachtung keine Rolle spielen, da sich die Ergebnisse für niedrige BER kaum unterscheiden. Im folgenden wird daher die vereinfachte Modellierung durch einen Broadcast-Fehler beibehalten.

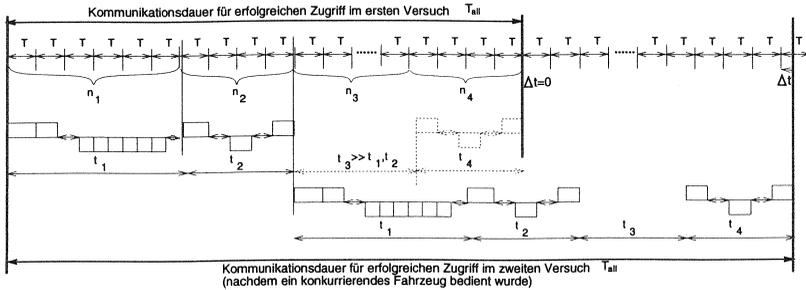


Abbildung 6.12: Aufteilung der Kommunikationsphasen in Zeitintervalle (nicht maßstabsgerecht)

Protokoll	w	R	t_1 ms	t_2 ms	t_3 ms	t_4 ms	T ms	n_1	n_2	n_3	n_4
Dialog A	2	2	2.5	4.5	40	4.5	0.5	5	9	80	9
Dialog A	3	3	3.0	4.5	40	4.5	1.5	2	3	27	9
Dialog A	4	4	3.5	4.5	40	4.5	0.5	7	9	80	9
Dialog A	6	3	4.5	4.5	40	4.5	2.25	2	2	18	2
Dialog A	8	4	6.5	4.5	40	4.5	0.92	7	5	43	5
Dialog A	16	4	10.5	4.5	40	4.5	1.5	7	3	27	3
Dialog B	2	2	5.75	1.0	40	4.5	1.0	6	1	40	4
Dialog B	4	4	7.75	1.0	40	4.5	1.0	8	1	40	4

Tabelle 6.1: Modellparameter für unterschiedliche Protokollvarianten (vgl. Abschnitt 5.8)

6.5 Zustandsoptimierte Modellierung des vollständigen Kommunikationsprozesses

Während bisher nur der Anmeldevorgang modelliert wurde, soll im folgenden ein Ansatz für eine vereinfachte Modellierung des vollständigen Anwendungsprozesses vorgestellt werden. Die Fragestellung erweitert sich dahingehend, daß nun die zur Abwicklung benötigte Zeitdauer des Kommunikationsprozesses eines Fahrzeugs ermittelt werden soll. Dazu wird zunächst die für die Anzahl der insgesamt zu berücksichtigenden Zustände wichtige Wahl eines geeigneten Zeittaktes für das Modell diskutiert. Anhand eines Beispiels wird ein zustandsreduziertes Modell vorgestellt und anschließend durch eine Fehlerbetrachtung ergänzt.

6.5.1 Wahl eines geeigneten Zeittaktes

Der hier gewählte Ansatz der Modellierung durch diskrete Markov-Ketten bedingt, daß der Prozeß der Gesamtdauer t in gleichgroße Zeitintervalle T aufgeteilt werden muß. Die Anzahl der Zustände des den Prozeß beschreibenden Modells steigt dabei umgekehrt proportional zur Größe des Zeitintervalls T . Die Komplexität der zugeordneten Matrix steigt quadratisch mit der Anzahl der Zustände. Um das betrachtete Problem beherrschbar zu halten, ist es das Ziel der nachfolgenden Überlegungen,

das Problem so weit einzugrenzen und das Zeitintervall T so zu wählen, daß eine Berechnung mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Die Phasen der hier zu betrachtenden Protokolle sind:

1. die Anmeldephase t_1 ,
2. der erste Teil des individuellen Dialogs t_2 ,
3. die Chipkarten-Operation t_3 und
4. der zweite Teil des individuellen Dialogs t_4 .

Die in den vorhergehenden Abschnitten eingeführten Modelle ermöglichen, die Anmeldephase in einem bzw. zwei Zeitintervallen T zu betrachten. Da jedoch die Chipkarten-Operation ein Vielfaches der Zeit für die Anmeldephase ($t_1 \ll t_3$ bzw. $t_2 \ll t_3$) benötigt, entstünden durch eine vollständige Berücksichtigung der Chipkarten-Operation eine erhebliche Anzahl von Zuständen (z.B. beim Protokoll mit zweistufiger Anmeldephase (Dialog A) beträgt die Zeit für den ersten Teil des individuellen Dialogs nur 1.0 ms während die Zeit für die Smart-Card-Operation 40 ms beträgt. Die Smart-Card-Operation müßte also durch mindestens $n_3 = 40/1.0 = 40$ Zustände dargestellt werden). Die Modellierung des vollständigen Kommunikationsprozesses durch eine homogene Markovkette würde also zu Modellen mit sehr vielen Zuständen führen, deren Berechnung entsprechend aufwendig ist.

Bei genauerer Analyse wird deutlich, daß für die Betrachtung der Konkurrenzsituation zwischen mehreren Fahrzeugen insbesondere die Phasen t_1 und t_2 von Relevanz sind, da sie in Konkurrenzsituationen mehrmals durchlaufen werden. Die Phasen t_3 und t_4 laufen dagegen abgesehen von möglichen Bitfehlern weitgehend deterministisch ab. D.h. ist erst einmal entschieden, in welcher Reihenfolge die Fahrzeuge abgearbeitet werden, stören sich die beteiligten Fahrzeuge nicht mehr. Aus diesem Grund wird wie folgt vorgegangen: die den Phasen der Chipkarten-Operation sowie der anschließenden zweiten Phase des individuellen Dialogs zugeordneten Verarbeitungs- und Übertragungszeiten t_3 und t_4 werden zu den Ergebnissen des detaillierten Modells für die Anmeldephase und erste Phase des individuellen Dialogs hinzuaddiert. Es wird also angenommen, daß der die zweite Phase einleitende Polling-Befehl der Bake in jedem Fall direkt nach Abschluß der Chipkarten-Operation ausgesendet werden kann und Bitfehler ausgeschlossen sind. Diese Näherung ist zulässig für gute Kanaleigenschaften.

Unter der Annahme, daß die Phasen t_1 bzw. t_2 mehrmals, d.h. x bzw. y mal, durchlaufen werden, ergibt sich für die Dauer des vollständigen Kommunikationsprozesses näherungsweise:

$$T_{\text{all}} = x \cdot t_1 + y \cdot t_2 + t_3 + t_4.$$

Zur exakten Bestimmung des variablen Anteils wird die Anmeldephase (Dauer t_1 , Anzahl der Zeitschritte n_1) und der erste Teil des individuellen Dialogs (t_2 , n_2) in gleichgroße Zeitintervalle $T = \frac{t_1+t_2}{n_1+n_2}$ eingeteilt (siehe Abb. 6.12). Zur Bestimmung von T , n_1 und n_2 wird wie folgt vorgegangen:

Beim Aufteilen der gegebenen Phasen t_1 und t_2 in n_1 bzw. n_2 Zeitintervalle T kann ein Rundungsfehler entstehen, der abhängig ist von den gewählten Parametern n_1 , n_2 und T sowie von der Anzahl der zu berücksichtigenden Durchläufe der einzelnen

Phasen:

$$\Delta t = x \cdot (t_1 - n_1 \cdot T) + y \cdot (t_2 - n_2 \cdot T)$$

Der Fehler wird umso kleiner, je kleiner man das Zeitintervall T wählt. Je kleiner T ist, desto größer wird die Anzahl der notwendigen Zeitschritte n und damit auch die Anzahl der Zustände in dem Modell. Um Modelle mit möglichst wenigen Zuständen zu erhalten, bestimmt man $\min(n_1 + n_2)$ unter der Randbedingung eines maximal vertretbaren, relativen Fehlers, d.h. $\Delta t_{rel} = \frac{\Delta t}{x \cdot t_1 + y \cdot t_2} < \Delta t_{max}$, um eine genügende Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. In Abschnitt 6.5.4 wird im Rahmen einer Fehlerdiskussion im Detail beschrieben, wie der maximal auftretende Rundungsfehler anhand von Abschätzungsformeln bestimmt werden kann.

Für diese Vorgehensweise ergeben sich für die bereits eingeführten Referenzparameter die in Tabelle 6.1 dargestellten Parameter. Bei den hier zugrunde gelegten Referenzparametern gelingt es für die meisten Fälle, eine Intervallgröße zu bestimmen, für die kein Rundungsfehler entsteht. Für die übrigen Fälle bleibt der maximale relative Fehler unter 2 % (siehe Abschnitt 6.5.4).

Als Ergebnis dieser Betrachtungen bleibt festzuhalten, daß die Anzahl der Zustände des den vollständigen Kommunikationsprozess beschreibenden Modells bei vertretbaren Näherungen auf ein beherrschbares Maß beschränkt werden kann. Allerdings ist die Anzahl der Zeittakte und damit die Anzahl der Zustände an die jeweiligen Modellparameter anzupassen. Es ist jedoch möglich, die Berechnung der Modelle weitgehend zu automatisieren, so daß eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Varianten möglich ist [41].

Im folgenden wird nun anhand eines konkreten Anwendungsfalls ein entsprechendes Modell für bis zu drei gleichzeitig eintreffende Fahrzeuge vorgestellt.

6.5.2 Erweitertes Modell für bis zu drei Fahrzeuge

Als Beispiel für ein Modell mit Berücksichtigung des individuellen Dialogs wird das Modell in Abb. 6.13 betrachtet (für $w=6$, $R=3$). Mit Hilfe dieses Modells kann die Zeit berechnet werden, die ein Fahrzeug benötigt, um sich anzumelden und den ersten Teil des individuellen Dialogs zu beenden, wenn maximal zwei andere Fahrzeuge dasselbe versuchen. Dabei wird angenommen, daß Fahrzeuge, die sich erfolgreich angemeldet haben, sofort anschließend an die Anmeldephase den individuellen Dialog abwickeln können. Melden sich mehrere Fahrzeuge gleichzeitig erfolgreich an, ist die Reihenfolge der Abwicklung des individuellen Dialogs zufällig. Folgende Fälle müssen berücksichtigt werden:

- Das betrachtete Fahrzeug meldet sich als erstes an. Entsprechend muß die Zeit für den individuellen Dialog einmal berücksichtigt werden (Zustandsübergänge $18 \rightarrow 19 \rightarrow 1$).
- Eins der anderen zwei Fahrzeuge oder sogar beide Fahrzeuge wickeln den individuellen Dialog vor dem betrachteten Fahrzeug ab. Dadurch verlängert sich die Dauer bis zum erfolgreichen Abschluß des individuellen Dialogs entsprechend (Zustandsübergänge $14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 1$)

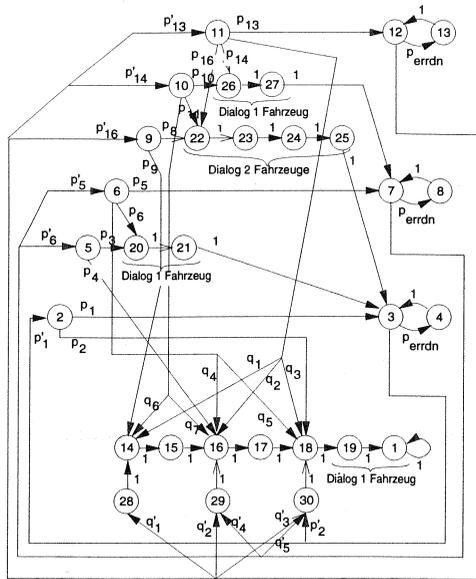


Abbildung 6.13: Erweitertes Modell für bis zu drei Fahrzeuge

Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= Perrup \\
 p_2 &= 1 - Perrup \\
 p_3 &= \frac{1}{R} + (1 - \frac{1}{R})Perrup \\
 p_4 &= (1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup) \\
 p_5 &= \frac{1}{R} + (1 - \frac{1}{R})Perrup^2 \\
 p_6 &= (1 - \frac{1}{R})Perrup(1 - Perrup) \\
 p_7 &= (1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup)^2 + Perrup(1 - Perrup) \\
 p_8 &= \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(2 + Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup \\
 p_9 &= \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})(1 - Perrup) \\
 p_{10} &= \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(1 + 2Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup^2 \\
 p_{11} &= \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup(1 - Perrup) \\
 p_{12} &= (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})(1 - Perrup)^2 \\
 p_{13} &= \frac{1}{R^2} + 3 \cdot \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})Perrup + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup^3 \\
 p_{14} &= 2 \cdot \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})2Perrup^2(1 - Perrup) \\
 p_{15} &= \frac{1}{R}(1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup) + (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup(1 - Perrup) \\
 p_{16} &= (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})Perrup(1 - Perrup)^2 \\
 p_{17} &= (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{2}{R})2Perrup(1 - Perrup)^2 \\
 p_{18} &= (1 - \frac{1}{R})(1 - \frac{1}{R})(1 - Perrup)^3 \\
 q_1 &= \frac{p_{18}}{3} \\
 q_2 &= \frac{p_{18}}{R} + \frac{p_{17}}{2} \\
 q_3 &= \frac{p_{18}}{R} + \frac{p_{17}}{2} + p_{15} \\
 q_4 &= \frac{p_{17}}{2} \\
 q_5 &= \frac{p_{17}}{2} + p_6 \\
 q_6 &= \frac{p_{12}}{2} \\
 q_7 &= \frac{p_{12}}{2} + p_{11} \\
 q'_1 &= \frac{p_{18}}{3} \\
 q'_2 &= \frac{2p_{18}}{3} + \frac{p_{17}}{2} \\
 q'_3 &= \frac{p_{18}}{3} + \frac{p_{17}}{2} + p'_{15} \\
 q'_4 &= \frac{2p_{17}}{2} \\
 q'_5 &= \frac{p_{17}}{2} + p'_6 \\
 p'_i &= p_i(1 - Perrdn) \text{ für alle } i = 1, \dots, 7
 \end{aligned}$$

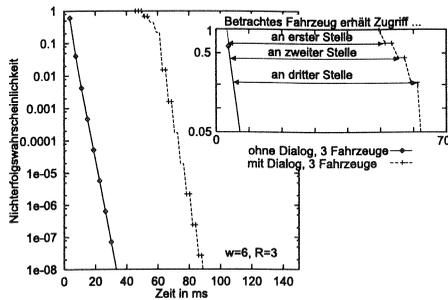


Abbildung 6.14: Berücksichtigung des individuellen Dialogs (Vergleich mit Betrachtung der Anmeldephase bei 3 Fahrzeugen)

6.5.3 Ergebnisse für die Betrachtung des vollständigen Kommunikationsprozesses

Abb. 6.14 zeigt die Ergebnisse für den vollständigen Kommunikationsprozeß. Bei dieser und den folgenden Berechnungen wurde eine Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-6} im Downlink und 10^{-6} im Uplink angenommen. Für $w=6$ und $R=3$ ergibt sich nach Tabelle 6.1 für T ein Wert von 2.25 ms.

Die Kurve der Nichterfolgswahrscheinlichkeit mit Berücksichtigung des individuellen Dialogs ist gegenüber der Kurve ohne Berücksichtigung des individuellen Dialogs zeitverschoben. Dabei nimmt die Zeitverschiebung zwischen den Kurven für kleiner werdende Nichterfolgswahrscheinlichkeiten zunächst zu und bleibt dann aber konstant. Dies ist wie folgt zu erklären:

1. Gelingt es dem betrachteten Fahrzeug, sich im ersten Fensterblock anzumelden, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß eins der beiden anderen Fahrzeuge vor dem betrachteten einen individuellen Dialog mit der Bake führt, relativ klein ($< 1/3$). Die beiden Kurven unterscheiden sich nur um die Zeit $2T$ für den individuellen Dialog des betrachteten Fahrzeugs.
2. Gelingt es dem betrachteten Fahrzeug erst in einem späteren (z.B. dem siebten) Fensterblock sich anzumelden, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß die beiden anderen Fahrzeuge vor dem betrachteten einen individuellen Dialog mit der Bake führen, sehr groß. Die beiden Kurven unterscheiden sich um die Zeit $6T$ für die individuellen Dialoge aller drei Fahrzeuge mit der Bake.

Die Ergebnisse zeigen demnach, daß für eine Grenzwertbetrachtung die Annahme, daß sich die Anmeldephase um die n -fache Zeit für den individuellen Dialog (n Anzahl der betrachteten Fahrzeuge) verlängert, ausreichend ist:

$$T_{all} = x \cdot t_1 + n \cdot t_2 + t_3 + t_4,$$

wobei $x \cdot t_1$ die durch die entsprechenden Markovmodelle zu berechnende Anmeldezeit für n Fahrzeuge beschreibt.

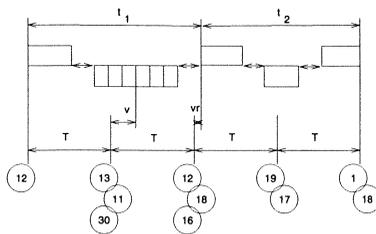


Abbildung 6.15: Zuordnung der Zustände des Modells 6.13 zum Protokollablauf für die Fehlerbetrachtung

6.5.4 Fehlerdiskussion

Wie in Abschnitt 6.5.1 beschrieben, werden durch die Betrachtung zustandsreduzierter Modelle gewisse Rundungsfehler eingeführt, welche durch entsprechende Auswahl des Zeitintervalls T begrenzt werden können.

Es erfolgt nun eine detaillierte Diskussion der entstehenden Fehler und eine Ableitung einer Abschätzungsformel für den maximal auftretenden Fehler.

Abb. 6.15 zeigt die Einteilung der Kommunikationsphasen in Zeitintervalle T und die dabei auftretenden Zeitverschiebungen v und vr für das Protokoll 'Dialog A' mit den Parametern $w=6$ und $R=3$. Die Zeitverschiebung v führt wie beim Grundmodell nicht zu Fehlern (da es sich um Hilfszustände handelt), während die Zeitverschiebung vr zu Rundungsfehlern im Ergebnis führen kann.

Die entstehenden Rundungsfehler sind abhängig davon, wie oft die Kommunikationsphasen t_1 (Anmeldephase) und t_2 (erster Teil des individuellen Dialogs) im Modell durchlaufen werden:

- Wenn die beiden Phasen t_1 und t_2 gleich oft durchlaufen werden, entsteht kein Fehler, da $t_1 + t_2 = (n_1 + n_2) \cdot T$ gilt. Dies ist z.B. beim Durchlauf der folgenden Pfade im erweiterten Modell für drei Fahrzeuge der Fall (siehe Abb. 6.13): $12 \rightarrow 30 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 1$ oder $12 \rightarrow 10 \rightarrow 26 \rightarrow 27 \rightarrow 7 \rightarrow 30 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 1$.
- Wird die Phase t_2 n -mal öfter durchlaufen als die Phase t_1 , so kann sich der dadurch entstehende Fehler maximal zu $\Delta t = 2 \cdot (t_2 - n_2 \cdot T)$ addieren, da die Phase t_2 bei drei Fahrzeugen höchstens dreimal und die Phase t_1 mindestens einmal durchlaufen wird. Der maximale relative Fehler ergibt sich zu:

$$\Delta t_{rel} = \frac{2 \cdot (t_2 - n_2 \cdot T)}{(n_1 + 3 \cdot n_2) \cdot T}$$

- Wird die Phase t_1 n -mal öfter durchlaufen als die Phase t_2 , läßt sich der absolute Fehler wie folgt ermitteln: $\Delta t = (n - 1) \cdot (t_1 - n_1 \cdot T)$. Der Faktor n kann dabei theoretisch beliebige positive natürliche Werte annehmen, wodurch sich ein unter Umständen entsprechend großer Fehler ergeben kann. Für den maximalen relativen Fehler ergibt sich bezogen auf die vollständige Anmeldephase und den ersten Teil des individuellen Dialogs: $\Delta t_{rel} = \frac{(n-1) \cdot (t_1 - n_1 \cdot T)}{(n \cdot n_1 + n_2) \cdot T}$. Für sehr große

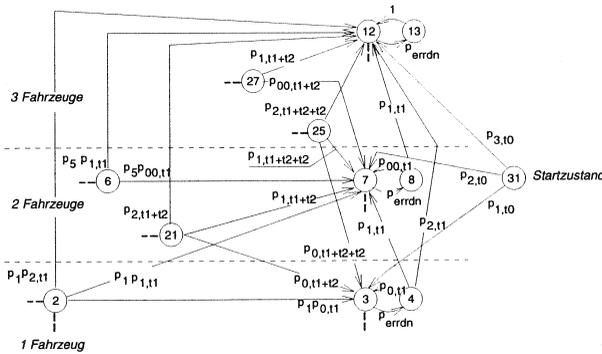


Abbildung 6.16: Berücksichtigung der Ankunfts wahrscheinlichkeit weiterer Fahrzeuge während des Kommunikationsablaufs des betrachteten Fahrzeugs

$n \gg n_2$ ergibt sich im Grenzfall

$$\Delta t_{rel} = \frac{(t_1 - n_1 \cdot T)}{n_1 \cdot T} = \frac{t_1}{n_1 T} - 1$$

Durch die Anwendung der hier eingeführten Formeln läßt sich somit überprüfen, ob der maximal tolerierbare relative Fehler bei der Auswahl von n_1 und n_2 tatsächlich unterschritten wird. Für die in Tabelle 6.1 angegebenen Werte ergibt sich ein maximaler relativer Fehler von 2 %.

6.6 Berücksichtigung der Fahrzeugmobilität

6.6.1 Einfluß der Verkehrsstärke

Bisher wurde die Kommunikation eines Fahrzeugs mit der Bake in der Anmeldephase und dem ersten Teil des individuellen Dialogs nur getrennt für drei spezielle Verkehrssituationen beschrieben:

1. Das Fahrzeug kommuniziert mit der Bake und wird dabei nur durch Übertragungsfehler behindert.
2. Das Fahrzeug wird bei seiner Kommunikation mit der Bake von Übertragungsfehlern und einem weiteren gleichzeitig in den Kommunikationsbereich eingefahrenen Fahrzeug behindert.
3. Das Fahrzeug wird bei seiner Kommunikation mit der Bake von Übertragungsfehlern und zwei weiteren gleichzeitig in den Kommunikationsbereich eingefahrenen Fahrzeugen behindert.

Jetzt werden diese drei Fälle gleichzeitig betrachtet, indem die Wahrscheinlichkeit angegeben wird, mit der diese Fälle eintreten. Vorausgesetzt wird, daß sich zu Beginn der Betrachtung noch kein Fahrzeug im Kommunikationsbereich aufhält.

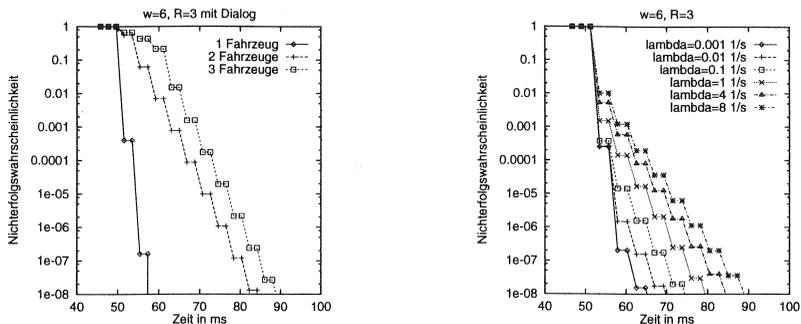


Abbildung 6.17: Ergebnisse für die Betrachtung von Einzelsituationen (für 1, 2 und 3 Fahrzeuge) sowie für die kombinierte Betrachtung für bis zu 3 Fahrzeuge bei unterschiedlichen Verkehrsstärken

Außerdem wird angenommen, daß die Ankunfts wahrscheinlichkeiten der Fahrzeuge unabhängig voneinander und damit Poisson-verteilt sind (siehe querschnittsbezogene Betrachtung der Zwischenankunftszeiten in Abschnitt 3.3). Bezeichnet λ die Ankunftsrate der Fahrzeuge und t den betrachteten Zeitraum, so ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, daß k Fahrzeuge in t eintreffen:

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

Es wird angenommen, daß aufgrund der Anzahl der Fahrspuren und der Mindestabstände zwischen den Fahrzeugen nicht mehr als drei Fahrzeuge gleichzeitig in die Kommunikationszone einfahren.

Nach Einführung eines Startzustandes (31) und entsprechender zusätzlicher Zustandsübergänge ist es nun möglich, das in Abschnitt 6.5.2 eingeführte Modell so zu erweitern, daß auch das Einfahren von zusätzlichen Fahrzeugen während der Abwicklung der Anmeldephase mitberücksichtigt wird (siehe Abb. 6.16).

Für die zusätzlichen Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten gilt:

$$\begin{aligned} p_{1,t_1} &= (\lambda t_1) e^{-\lambda t_1} \\ p_{2,t_1} &= \frac{(\lambda t_1)^2}{2!} e^{-\lambda t_1} \\ p_{3,t_1} &= \frac{(\lambda t_1)^3}{3!} e^{-\lambda t_1} \\ p_{1,t_0} &= \frac{p_{1,t_1} + p_{2,t_1} + p_{3,t_1}}{p_{2,t_1}} \\ p_{2,t_0} &= \frac{p_{1,t_1} + p_{2,t_1} + p_{3,t_1}}{p_{1,t_1} + p_{2,t_1} + p_{3,t_1}} \\ p_{3,t_0} &= \frac{p_{1,t_1} + p_{2,t_1} + p_{3,t_1}}{p_{3,t_1}} \\ p_{1,t_1+t_2} &= (\lambda(t_1 + t_2)) e^{-\lambda(t_1+t_2)} \\ p_{2,t_1+t_2} &= \frac{(\lambda(t_1+t_2))^2}{2!} e^{-\lambda(t_1+t_2)} \\ p_{1,t_1+t_2+t_2} &= (\lambda(t_1 + t_2 + t_2)) e^{-\lambda(t_1+t_2+t_2)} \\ p_{2,t_1+t_2+t_2} &= \frac{(\lambda(t_1+t_2+t_2))^2}{2!} e^{-\lambda(t_1+t_2+t_2)} \\ p_{0,t_1} &= 1 - p_{1,t_1} - p_{2,t_1} \\ p_{00,t_1} &= 1 - p_{1,t_1} \\ p_{0,t_1+t_2} &= 1 - p_{1,t_1+t_2} - p_{2,t_1+t_2} \\ p_{00,t_1+t_2} &= 1 - p_{1,t_1+t_2} \\ p_{0,t_1+t_2+t_2} &= 1 - p_{1,t_1+t_2+t_2} - p_{2,t_1+t_2+t_2} \end{aligned}$$

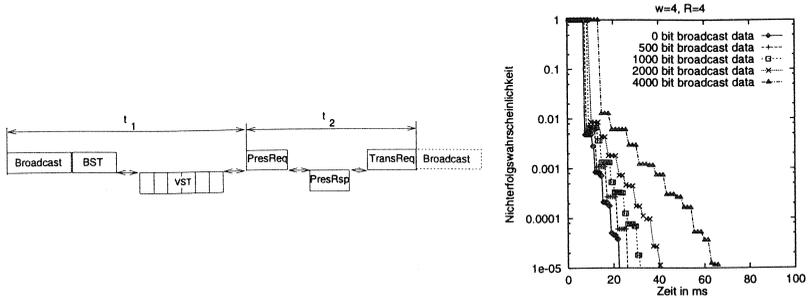


Abbildung 6.18: Verzügerte Aussendung der BST durch kombinierte broadcast-orientierte Anwendung

mit t_1 und t_2 gemäß Tabelle 6.1.

Abb. 6.17 zeigt die Ergebnisse für unterschiedliche Verkehrsstärken im Vergleich mit der Betrachtung der Ergebnisse für die jeweilige Einzelsituation.

Es wird deutlich, daß sich erwartungsgemäß für sehr niedrige Verkehrsstärken (z.B. $\lambda = 0.001$ Fahrzeuge/s) eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen für die Situation mit nur einem Fahrzeug ergibt. Da die Wahrscheinlichkeit für ein gleichzeitiges Eintreffen innerhalb der gegebenen Zeitspannen sehr niedrig ist, wird eine Verzögerung durch eine wiederholte Anmeldung erst für sehr niedrige Nichterfolgswahrscheinlichkeiten erkennbar. Für hohe Verkehrsstärken hingegen treten Situationen mit 2 oder sogar 3 Fahrzeugen, die sich bei der Anmeldung gegenseitig behindern, zunehmend häufig auf. Dies hat eine Annäherung an die Ergebniskurven für die Betrachtung der Einzelsituationen zur Folge.

6.6.2 Einfluß einer kombinierten broadcast-orientierten Anwendung

Betrachtet man den in Abschnitt 5.8 eingeführten Fall einer kombinierten Anwendung aus dem bisher betrachteten interaktiven Dialog mit einer broadcast-orientierten Anwendung, so kann der Einfluß der Verzögerung durch einen zusätzlichen Broadcastanteil in der BST berücksichtigt werden.

Hierzu wird die Größe der BST entsprechend variiert, d.h. die BST wird ausgehend von der Referenzparameterkonfiguration von 250 bit (entspricht bei einer Datenrate von 500 kbit/s 0.5 ms Übertragungszeit) auf bis zu 5000 bit (entspricht 10 ms Übertragungszeit) um Broadcastdaten erweitert.

Es zeigt sich hierbei, daß das Protokoll bei optimaler Einstellung bis zu einer Datenmenge von ca. 1000 bit unempfindlich auf die Größe der BST und die damit bestimmte Verzögerung des vollständigen Empfangs der BST reagiert, vgl. Abb. 6.18.

6.6.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen. Es wurden Markov-Ketten-Modelle vorgestellt, die eine Analyse der Parameter des DSRC Kanalzugriffsverfahrens unter Berücksichtigung der Kanalqualität (für statische Bitfehlerraten) und der Verkehrsstärke (für idealisierte Ankunftsprozesse) erlauben.

Folgende Systemeigenschaften können mit den vorgestellten analytischen Modellen untersucht werden:

- die optimale Auswahl von maximalem Zufallswert R und Anzahl der frei zugänglichen Fenster w in der Anmeldephase bei gegebenen zu übertragenden Datenmengen unter Berücksichtigung der Kanalqualität
- die Einflüsse von anwendungsspezifischen Kommunikationsprozessen unter Berücksichtigung der Datenmengen und Verarbeitungszeiten
- die maximalen Kommunikationszeiten bezogen auf eine vorgegebene Nichterfolgsrate unter Berücksichtigung der Verkehrsstärke

Der vorgestellte Modellierungsansatz ermöglicht dabei durch eine geschickte Wahl des Zeittaktes des Modells sowie entsprechende Näherungen und Einschränkungen eine Berechnung mit standardisierten Algebrawerkzeugen. Durch die Anwendung von Abschätzungsformeln kann sichergestellt werden, daß entstehende maximale Fehler zu bestimmen sind.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.8 vorgestellten DSRC Referenzprotokolle unterstützen die Ergebnisse folgende Aussagen:

- Um die geforderten Nichterfolgsraten von 10^{-6} zu erreichen, ist eine sorgfältige Auswahl der Parameter des Kanalzugriffsverfahrens erforderlich:
 - Der maximale Verzögerungsfaktor R sollte zwischen drei und fünf, die Fensteranzahl w zwischen drei und sechs liegen, um einen optimalen Kompromiß zwischen Kollisionsauflösungsvermögen und zu großen Verzögerungen zu gewährleisten.
 - Parameterkombinationen, in denen das Verhältnis aus Fensteranzahl und max. Verzögerungsfaktor gleich zwei ist ($w/R = 2$), zeigen sich insbesondere für schlechte Kanäle ($BER > 10^{-3}$), aber auch für gute Kanäle leistungsfähiger als die aus Gründen der einfachen Implementierbarkeit für die DSRC-Systeme der ersten Generation vorgesehene Parameterkombination mit $w/R = 1$. Es ist daher zu empfehlen, diese Parameterkombination für zukünftige Systeme vorzusehen.
- Die Anmeldephase sollte in zwei Stufen erfolgen, d.h. die frei zugänglichen Fenster der ersten Stufe sollten so kurz wie möglich sein, während umfangreichere Datenmengen in privaten Fenstern übertragen werden können. Nur so ist eine genügende Leistungsfähigkeit für RTDMA-Konfigurationen zu gewährleisten.
- Bei einer Mischung von interaktiven Kommunikationsprozessen mit der Übertragung von Broadcastdaten, ist darauf zu achten, daß die dadurch hervorgerufene Verzögerung der Aussendung einer BST nicht zu groß wird. Übersteigt die Verzögerung die maximale Länge eines Schicht 2 - Rahmens (128 byte),

ist eine ausreichende Zuverlässigkeit der interaktiven Anwendung nicht mehr gewährleistet.

Trotz dieser für den Entwurf und die Implementierung von DSRC-Systemen wichtigen Aussagen, können eine Reihe von Fragestellungen durch die analytische Modellierung nicht ausreichend geklärt werden:

- Der Kommunikationsprozess kann nur in vereinfachter Form betrachtet werden, d.h. es kann nur eine reduzierte Funktionalität analysiert werden.
- Die szenariospezifischen dynamischen Kanaleigenschaften (bedingte Mehrwegeausbreitung und Abschattung) werden nicht berücksichtigt.
- Die Einflüsse der realistischen Fahrzeugmobilität, die sowohl die Kanaleigenschaften wie auch die Anforderungen an den Kommunikationsprozeß beeinflussen, können nicht miteinfaßt werden.

Für eine zuverlässige Bewertung von DSRC-Systemen ist daher eine detaillierte Modellierung des Gesamtsystems durch stochastische Simulationstechniken notwendig.

Mikroskopische Fahrzeugmobilitätsmodelle: Entwurf und Validierung

In Kapitel 3 wurden bereits die wesentlichen beobachtbaren Eigenschaften der Fahrzeugmobilität im Straßenverkehr beschrieben. Nachfolgend werden daraus abgeleitete mikroskopische Modelle für die Fahrzeugmobilität vorgestellt.

7.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen

Die hier anwendbaren Modelle sind aufgrund der besonderen Eigenschaften von DSRC-Systemen spezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen unterworfen:

Ziel der Modellierung: Die Modellierung hat die Erzeugung eines in den für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation relevanten Eigenschaften realistischen Verkehrsflusses zum Ziel. Der modellierte Verkehrsfluß liefert dabei die Grundlage für die weitere Analyse des Systems in bezug auf das Kanalmodell und die Leistungsfähigkeit der Kommunikationsprotokolle: Das Modell der Fahrzeugmobilität liefert zum einen eine realistische Beschreibung der Verkehrslast. Weiterhin muß die notwendige Genauigkeit der Modellierung im Hinblick auf die Berücksichtigung von Abschattungen und Mehrwegeausbreitung gewährleistet werden.

Detaillierungsgrad der Modellierung: Aufgrund der kurzen Kommunikationszonen (von 2 bis 30 m) ist eine mikroskopische Modellierung erforderlich, d.h. die Fahrzeugbewegungen müssen bis zu einer Genauigkeit von wenigen Dezimetern modelliert werden.

Parametrisierung: Für die Parametrisierung der Modelle kann davon ausgegangen werden, daß mikroskopisch erfaßte Stichproben-Daten vorliegen (d.h. Erfassung der Fahrzeugankunftszeiten bezüglich eines Fahrbahnquerschnitts auf Millisekunden genau), die dann für eine detaillierte statistische Auswertung und Extraktion der relevanten Parameter der Modelle genutzt werden können.

Laufzeiteffizienz: Da eine spätere Verwendung der Fahrzeugmobilitätsmodelle im Rahmen einer Systembetrachtung angestrebt wird, ist bei der Modellierung der Fahrzeugmobilität eine Beschränkung auf die wesentlichen Eigenschaften vorzunehmen und auf eine laufzeit-effiziente Implementierbarkeit zu achten.

7.2 Ein Modell für die Fahrzeugmobilität

Im folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften eines Modells für die Fahrzeugmobilität dargestellt, welches die für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation relevanten Eigenschaften ausreichend genau abbildet.

7.2.1 Fahrzeug- und Fahrereigenschaften

Die Bewegung eines Fahrzeugs ist beeinflusst:

- durch die Entscheidungen des Fahrers (bestimmt durch Verkehrs- und Verhaltensregeln, individuelles Sicherheitsbedürfnis sowie die Umgebungseinflüsse, d.h. insbesondere Nachbarfahrzeuge und Straßenführung)
- durch die physikalischen Eigenschaften des betrachteten Fahrzeugs und
- durch die von entsprechenden Bewegungsgesetzen vorgegebenen physikalischen Grenzen.

Die Modellierung legt dabei das in Stichproben beobachtete typische Verhalten und nicht unbedingt die gesetzlich vorgeschriebenen Verkehrsregeln zugrunde, um der Forderung nach einem realistischen Verkehrsfluß nachzukommen.

Für das hier vorgeschlagene Modell werden folgende Fahrzeugeigenschaften berücksichtigt:

- Länge des Fahrzeugs l
- Maximale Beschleunigung $a_{acc,max}$
- Maximale Verzögerung $a_{dec,max}$
- Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch}
- Momentane Geschwindigkeit v

Für die Modellierung des fahrerspezifischen Einflusses dient:

- die Reaktionszeit t_{reac} , welche die Verzögerung angibt, nach der ein Fahrzeug auf das Verhalten eines anderen Fahrzeugs reagiert,
- das richtungsabhängige maximale Risikoniveau RN_{max} , welches die individuell verschiedene Schwelle für das Auslösen einer Reaktion auf einen erkannten Verkehrszustand beschreibt, der zu einer Kollision mit einem anderen Fahrzeug (oder auch einem anderen Hindernis) führen könnte sowie
- der Mindestabstand d_{min} , der die untere Grenze für den Abstand zwischen 2 Fahrzeugen angibt

Das Risikoniveau steuert insbesondere die Einstellung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie das Verhalten bei Überholvorgängen. Die obere Grenze für das maximale Risikoniveau läßt sich aus der Situation ableiten, in welcher unter Berücksichtigung aller physikalischen Rahmenbedingungen gerade eine Unterschreitung des Mindestabstands zwischen den betroffenen Fahrzeugen vermieden werden kann.

7.2.2 Berechnung des Risikoniveaus

Das Risikoniveau wird jeweils bezüglich eines benachbarten Fahrzeugs ermittelt. Dabei können Fahrzeuge berücksichtigt werden, die auf der eigenen Fahrspur (z.B. bei normaler Geradeausfahrt) sowie auf der benachbarten rechten oder linken Fahrspur (z.B. bei Überholvorgängen) das angestrebte Verhalten eines Fahrzeugs stören könnten (siehe Abb. 7.1).

Zunächst sei der notwendige minimale Sicherheitsabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug betrachtet. Anhand der Betrachtung zweier hintereinanderfahrender

Fahrzeug A und B läßt sich die Berechnung des notwendigen Sicherheitsabstandes erläutern. Der Sicherheitsabstand d_{sec} muß so groß sein, daß auch bei maximaler Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs A, das Fahrzeug B unter Berücksichtigung der Reaktionszeit und der eigenen, maximalen Bremsverzögerung nicht den Mindestabstand d_{min} unterschreitet:

$$d_{sec} = t_{reac,B} \cdot v_B + \frac{v_B^2}{2 \cdot a_{dec,max}} - \frac{v_A^2}{2 \cdot a_{dec,max}} + l_A + d_{min,B} \quad (7.1)$$

mit

- v_A, v_B - Geschwindigkeiten der Fahrzeuge
- $t_{reac,B}$ - Reaktionszeit des folgenden Fahrzeugs
- $a_{dec,max}$ - maximale mögliche Bremsverzögerung
- $d_{min,B}$ - minimaler Abstand zwischen Fahrzeug B und anderen Fahrzeugen
- l_A - Länge des vorderen Fahrzeugs

Für $v_A = v_B$ vereinfacht sich der Ausdruck zu der bereits in Kapitel 3 eingeführten Formel für den Sicherheitsabstand von Fahrzeugen im Fahrzeugverbund.

Fahrzeuge halten in der Regel größere Abstände ein, da der Einsatz der maximal möglichen Bremsverzögerung in Abhängigkeit zur Risikobereitschaft vom Fahrer nicht gewünscht ist [58]. Das Risikoniveau RN ist daher definiert als Verhältnis zwischen der in einer Situation notwendigen Bremsverzögerung a_{dec} und der maximal verfügbaren Bremsverzögerung $a_{dec,max}$:

$$RN = \frac{a_{dec}}{a_{dec,max}} \quad (7.2)$$

Ersetzt man in Gleichung 7.1 den Sicherheitsabstand d_{sec} durch den in einer bestimmten Situation vorhandenen Abstand d sowie die maximale Bremsverzögerung durch die notwendige Bremsverzögerung, ergibt sich nach entsprechender Umformung als Ausdruck für das Risikoniveau bezüglich des vorausfahrenden Fahrzeugs RN :

$$RN = \frac{\frac{v_B^2}{2 \cdot a_{dec,max}}}{d - \frac{v_A^2}{2 \cdot a_{dec,max}} + l_A + d_{min,B} - t_B \cdot v_B} \quad (7.3)$$

Das Risikoniveau bezüglich eines hinterherfahrenden Fahrzeugs läßt sich in analoger Weise ableiten. Dabei wird für die Bestimmung des Sicherheitsabstandes ebenfalls angenommen, daß beide Fahrzeuge die maximal mögliche Bremsverzögerung einsetzen:

$$RN = \frac{\frac{v_A^2}{2 \cdot a_{dec,max}}}{d - \frac{v_B^2}{2 \cdot a_{dec,max}} + l_A + d_{min,A} - t_A \cdot v_A} \quad (7.4)$$

Abhängig von der momentanen Verkehrssituation und des beabsichtigten zukünftigen Verhaltens des Fahrzeugs wird das Risikoniveau für bis zu 6 Richtungen bestimmt (siehe Abb. 7.1, RN_v -Risikoniveau vorne, RN_{hl} -Risikoniveau hinten links, etc.). Das aus den physikalischen Gegebenheiten abgeleitete Risikoniveau kann zur

7.2.3.1 Einfluß des Risikoniveaus

Jedem Fahrzeug ist wie oben bereits angeführt ein maximal tolerierbares Risikoniveau RN_{max} zugeordnet, nach dessen Überschreiten die nachfolgend beschriebenen Regeln greifen.

Für den einfachsten Fall der Geradeausfahrt ist zunächst die Betrachtung des Risikoniveaus bezüglich des vorausfahrenden Fahrzeugs RN_v relevant (mit dem entsprechenden maximalen Risikoniveau $RN_{v,max}$):

- Geringes Risiko: $RN_v < RN_{v,max}$
Das Fahrzeug beschleunigt auf die Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} und behält diese anschließend bei.
- Hohes Risiko: $RN_v > RN_{v,max}$
Das Fahrzeug versucht unter Beachtung des Risikoniveaus der betroffenen Richtungen (vorne und hinten links) einen Überholvorgang einzuleiten.
Ist ein Fahrspurwechsel nicht möglich, wird entsprechend dem Risikoniveau RN_v mit der Bremsverzögerung $a_{dec} = RN_v \cdot a_{dec,max}$ abgebremst.

Für die Geradeausfahrt ebenfalls zu berücksichtigen ist das Risikoniveau RN_h bezüglich des auf derselben Fahrspur fahrenden Fahrzeugs:

- Geringes Risiko $RN_h < RN_{v,max}$
Das Fahrzeug behält die durch das Risikoniveau bezüglich des vorausfahrenden Fahrzeugs vorgegebene Geschwindigkeit bei.
- Hohes Risiko $RN_h > RN_{v,max}$
Das Fahrzeug versucht unter Beachtung des Risikoniveaus der betroffenen Richtungen (vorne und hinten rechts) einen Fahrspurwechsel nach rechts einzuleiten, um dem von hinten kommenden Fahrzeug Platz zu machen.

Anhand des Beispiels für die Geradeausfahrt wird schon sichtbar, daß dem einem Fahrzeug zugeordneten, tolerierbaren Risikoniveau eine große Bedeutung für die Parametrisierung des Modells zukommt. Ein hoher Wert für RN_{max} entspricht einer aggressiven Fahrweise, während ein niedriger Wert eine vorausschauende und defensive Fahrweise beschreibt. Der Parameter ermöglicht auch die Berücksichtigung wetterspezifischer und länderspezifischer Faktoren.

7.2.3.2 Verkehrs- und Verhaltensregeln

Neben dem Risikoniveau sind auch die Verkehrs- und Verhaltensregeln im Straßenverkehr für das Verhalten eines Fahrzeugs zu berücksichtigen. Für den Autobahnverkehr sind dabei vor allem folgende Regeln von Bedeutung:

- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Rechtsfahrgebot
- Rechtsüberholverbot
- Beim Fahrbahnwechsel und Überholen sollen keine anderen Fahrzeuge behindert werden.
- Fahrbahnwechsel werden nur zur Nachbarspur und nicht über mehrere Spuren hinweg vorgenommen

- Spontane Fahrbahnwechsel (d.h. ohne Verletzung der Bedingungen für das Risikoniveau und anderer Regeln) sind möglich.

Für länderspezifische Anpassungen können diese Regeln entsprechend angepaßt werden (z.B. für die Untersuchung von Systemen in Melbourne/Australien).

7.3 Fahrzeuggenerierungsprozesse

DSRC-Szenarien sind dadurch gekennzeichnet, daß nur ein sehr kurzer Straßenabschnitt von Interesse ist, in der Regel zwischen 50 und 200 Meter, wobei die Kommunikationszone oft nur zwischen fünf und sechs Meter lang ist. Der Beginn des betrachteten Straßenabschnitts läßt sich dabei als Fahrzeugquelle, das Ende als Fahrzeugsenke interpretieren. Der Fahrzeugquelle ist ein entsprechender Fahrzeuggenerierungsprozess zugeordnet, welcher den Generierungszeitpunkt des Fahrzeugs sowie die dem Fahrzeug zugeordneten Eigenschaften festlegt. Das Ziel der Modellierung soll es sein, zu Beginn der Kommunikationszone des zu analysierenden DSRC-Systems einen realistischen Verkehrsfluß beobachten zu können.

Die Fahrzeuggenerierung umfaßt folgende Parameter: nachdem der Fahrzeugtyp gemäß einer vorgegebenen Verteilung oder in Abhängigkeit von einem spezifischen Generator (siehe Mischgenerator im nächsten Abschnitt) festgelegt wurde, werden die folgenden Eigenschaften in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp festgelegt:

- Wunschgeschwindigkeit (nach Normalverteilung)
- max. Risikoniveau (nach Normalverteilung)

Wie oben erläutert werden die innerhalb einer Fahrzeugtypklasse gleich gewählten max. Beschleunigungen und Abbremsverzögerungen durch den individuell festgelegten Wert des Risikofaktors gewichtet.

Neben den für das Fahrzeugmobilitätsmodell relevanten Parametern, werden auch individuelle Werte für Kanalparameter (Dämpfungsfaktoren) und die Protokollparametrisierung (z.B. Dauer der Chipkartenoperation in Anhängigkeit zur Leistungsfähigkeit des OBU-Prozessors) festgelegt.

Für die im folgenden detailliert betrachtete Generierung der Zwischenankunftszeiten sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar. Geht man zunächst von einem einfachen Generierungsprozess aus (in der Regel eine Negativ-Exponentialverteilung mit einer Anpassungsfunktion zur Vermeidung der Generierung von übereinanderliegenden Fahrzeugen), so lassen sich gute Ergebnisse für die beobachteten makroskopischen Kenndaten erzielen (z.B. bezüglich der Verkehrsstärke) [66]. Um jedoch auch bei mikroskopischer Betrachtung, insbesondere für kurze Zwischenankunftszeiten unter 2 Sekunden, gute Ergebnisse erzielen zu können, muß eine Anpassungszone von ausreichender Länge zur Verfügung gestellt werden, um ein realistisches Verhalten innerhalb der Kommunikationszone zu gewährleisten. Innerhalb der Anpassungszone stellt sich dann aufgrund der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Verhaltensregeln ein entsprechender Verkehrsfluß ein. Die erforderliche Anpassungszone ist jedoch in der Regel sehr viel länger als die tatsächlich relevante Zone.

Da jedoch die Modellierung der Fahrzeugmobilität aufgrund des umfangreichen Regelwerks sehr laufzeitintensiv ist, werden hier zwei Ansätze für Generierungsprozesse

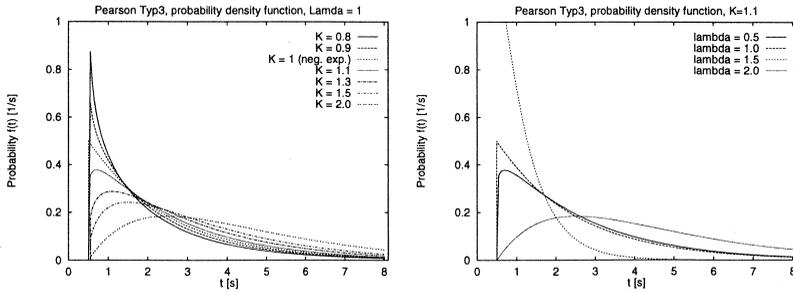


Abbildung 7.3: Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktion (links - $\lambda = 1[\frac{1}{s}]$, rechts - $K = 1.1$)

se vorgestellt, die die Eigenschaften des gewünschten Verkehrsfusses bereits bei der Generierung so gut nachbilden, daß die Anpassungszone sehr stark verkürzt werden kann.

Das Ziel wird es dabei sein, die in Kapitel 3 vorgestellte Mischung von Fahrzeugen im Fahrzeugverbund (Pulk) und Fahrzeugen, die sich unbehindert mit ihrer Wunschgeschwindigkeit bewegen, nachzubilden.

7.3.1 Generierung der Zwischenankunftszeiten nach Pearson Typ 3 - Verteilungsfunktionen

7.3.1.1 Die Familie der Pearson Typ 3 - Verteilungsfunktionen

Die Familie der Pearson Typ 3 Verteilungsfunktionen ermöglicht aufgrund ihres Aufbaus eine sehr genaue Anpassung an verschiedenste Formen von Verteilungsdichtefunktionen.

Die zugehörige Verteilungsdichtefunktion ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(K)} (\lambda(t - \alpha))^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t-\alpha)} \quad (7.5)$$

mit

- $f(t)$ Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktion
- $\lambda [\frac{1}{s}]$ Parameter, der abhängt von der mittleren Zwischenankunftszeit sowie von den durch den Anwender festzulegenden Parameter K und α ($\lambda = \frac{1}{t}$ gilt nur für $K=1$!)
- K Parameter, der die Form der Verteilungsdichtefunktion festlegt (Wertebereich $0 < K < \infty$, Festlegung durch Anwender)
- α [s] Verschiebungswert der Verteilungsdichtefunktion (Wertebereich $\alpha > 0$, Festlegung durch den Anwender)
- t [s] Zwischenankunftszeit
- $\Gamma(K)$ Gammafunktion

Die Gammafunktion ist nicht geschlossen lösbar, jedoch liegen tabellierte Werte mit genügender Dichte vor [15]. Es gilt die Beziehung $\Gamma(K) = (K - 1) \cdot \Gamma(K - 1)$. Für ganzzahlige K läßt sich die Gammafunktion somit zu $(K - 1)!$ vereinfachen.

Die Abb. 7.3 zeigt die Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktion unter Variation der Parameter K und λ .

Aus der Pearson Typ 3 Verteilungsfunktion lassen sich einige bekannte Verteilungsfunktionen, wie die negative exponentielle Verteilung oder die Erlangverteilung, ableiten. Dies geschieht jeweils durch Einschränkung der Wertebereiche für K und α . Die Tabelle 7.1 gibt eine Übersicht über die in der Familie der Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktionen enthaltenen Funktionen.

Art	λ	$f(t)$
Pearson Typ 3 (K, α)	$\frac{K}{T-\alpha}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} (\lambda(t-\alpha))^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t-\alpha)}$
Gamma ($K, \alpha = 0$)	$\frac{K}{T}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} (\lambda \cdot t)^{K-1} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$
Erlang ($K = 1, 2, 3, \dots, \alpha = 0$)	$\frac{K}{T}$	$\frac{\lambda}{(K-1)!} (\lambda \cdot t)^{K-1} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$
Vershoben negativ exponentiell ($K = 1, \alpha > 0$)	$\frac{1}{T-\alpha}$	$\lambda \cdot e^{-\lambda(t-\alpha)}$
Negativ exponentiell ($K = 1, \alpha = 0$)	$\frac{1}{T}$	$\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Tabelle 7.1: Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktionen

7.3.1.2 Parametrisierung des Pearson Typ 3 Generators

Der Pearson Typ 3 Generator verwendet zur Bestimmung der Generierungszeitpunkte für Fahrzeuge die oben vorgestellte Pearson Typ 3 Verteilungsdichtefunktion.

Für die Parametrisierung ist dabei insbesondere die Wahl des die Form der Verteilungsdichtefunktion bestimmenden Parameters K von Bedeutung. Nach [47] kann ein Schätzwert für K aus der mittleren Zwischenankunftszeit \bar{t} , der Standardabweichung s und der Verschiebung α der Funktion in x-Richtung abgeleitet werden:

$$K = \frac{\bar{t} - \alpha}{s}.$$

Der Wert für λ ergibt sich dann aus der in Tabelle 7.1 angegebenen Formel. Die Werte für \bar{t} , s und α lassen sich direkt aus der statistischen Analyse der Stichproben ableiten.

Wie der Vergleich mit den Meßdaten zeigen wird, liefert die Anwendung der Schätzformel bereits eine gute Annäherung an die Eigenschaften der Stichproben. Mit einer manuellen Anpassung kann eine weitere Verbesserung erzielt werden.

7.3.2 Modellierung durch Mischprozesse

Im folgenden werden Mischprozesse vorgestellt, die in der Lage sind, die für die Analyse von DSRC-Systemen relevanten Korrelationseigenschaften des Verkehrsflusses nachzubilden. Die Beschreibung der Parametrisierung der Generatoren erfolgt im Anschluß an die Vorstellung der Modelle.

7.3.2.1 Gedächtnisloser Mischprozess

Wie oben bereits eingeführt, bilden die negative exponentielle Verteilungsdichtefunktion und die Normalverteilungsdichtefunktion gute Näherungen für die zwei typischen Zustände der frei fahrenden Fahrzeuge sowie der Bildung von Fahrzeugverbänden.

Um den üblicherweise auftretenden Wechsel zwischen diesen Extremzuständen zu modellieren, liegt eine Mischung von Generatoren mit verschiedenen Verteilungsfunktionen nahe. Durch [47] wird daher eine Mischung eines Generators V (FahrzeugVerbund), der normalverteilte Zwischenankunftszeiten liefert, mit einem weiteren Generator F (freifahrende Fahrzeuge), dessen Zwischenankunftszeiten negativ exponentiell verteilt sind, vorgeschlagen. Die Generatoren werden dabei entsprechend dem zuvor anhand der Stichproben bestimmten Anteils an gebunden bzw. frei fahrenden Fahrzeugen gemischt.

Die Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung $f(t)$ ist gegeben durch:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^2/\sigma^2} \quad (7.6)$$

wobei μ den mittleren Erwartungswert und σ die Standardabweichung bezeichnet. Die Verteilungsdichtefunktion der negativ exponentiellen Verteilung wurde bereits als Spezialfall der Pearson-Typ 3-Verteilung eingeführt. Da sich die Pearson-Typ 3-Verteilungsfunktion jedoch wie bereits gesehen sehr flexibel an beliebige Verteilungsfunktion anpassen läßt, wird im folgenden abweichend zu dem Vorschlag von [47] anstatt der negativ exponentiellen Verteilung die Pearson-Typ 3-Verteilung verwendet.

Unter der Voraussetzung, daß sich eine passende Parameterisierung finden läßt, bietet der gedächtnislose Mischgenerator jedoch keine entscheidenden Vorteile gegenüber dem bereits eingeführten reinen Pearson-Typ 3-Generator. Erst die im folgenden vorgestellte Berücksichtigung der fahrzeugtyp-spezifischen Bildung von Fahrzeugverbänden (siehe Kapitel 3) bietet die Realitätsnähe, wie sie für eine Analyse des Abschattungseffektes bei Fahrzeug-Baken-Systemen erforderlich ist.

7.3.2.2 Gedächtnisbehafteter Mischprozess - Modellierung durch Markovketten

Zunächst soll eine Modellierung des Generierungsprozesses durch eine Markov-Kette mit zwei Zuständen betrachtet werden. Analog zu dem bereits vorgestellten Modell werden im Zustand V Fahrzeuge im Fahrzeugverbund generiert, während im Zustand

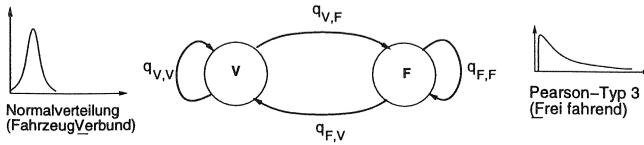


Abbildung 7.4: Gedächtnisbehafteter Mischprozess mit 2 Zuständen

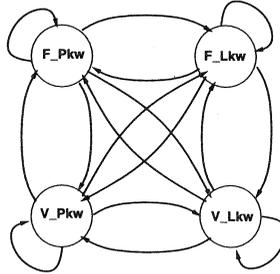


Abbildung 7.5: Gedächtnisbehafteter Mischprozess mit 4 Zuständen

F frei fahrende Fahrzeuge erzeugt werden. Nachdem ein Fahrzeug erzeugt wurde, erfolgt ein Zustandsübergang gemäß einer Übergangsmatrix $q = (q_{i,j} \in V, F)$. Die Zustandsübergänge $z_i \rightarrow z_j$ werden also durch die Wahrscheinlichkeitsmaße $q_{i,j}$ mit $i, j \in V, F$ beschrieben, die man zu einer Matrix \mathbf{q}_2 zusammenfaßt:

$$\mathbf{q}_2 = \begin{pmatrix} q_{V,V} & q_{V,F} \\ q_{F,V} & q_{F,F} \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

Durch die Erweiterung des Mischprozesses auf vier Zustände wird es nun möglich, auch das Aufeinanderfolgen von Fahrzeugtypen geeignet zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung des oben eingeführten Modells erhält man die Zustände V_Pkw, V_Lkw, F_Pkw und F_Lkw (siehe Abb. 7.3.2.2 sowie die entsprechende Zustandsübergangsmatrix \mathbf{q}_4 :

$$\mathbf{q}_4 = \begin{pmatrix} q_{V_Pkw,V_Pkw} & q_{V_Pkw,F_Pkw} & q_{V_Lkw,V_Pkw} & q_{V_Lkw,F_Pkw} \\ q_{F_Pkw,V_Pkw} & q_{F_Pkw,F_Pkw} & q_{F_Lkw,V_Pkw} & q_{F_Lkw,F_Pkw} \\ q_{V_Pkw,V_Lkw} & q_{V_Pkw,F_Lkw} & q_{V_Lkw,V_Lkw} & q_{V_Lkw,F_Lkw} \\ q_{F_Pkw,V_Lkw} & q_{F_Pkw,F_Lkw} & q_{F_Lkw,V_Lkw} & q_{F_Lkw,F_Lkw} \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

7.3.2.3 Die Parametrisierung der Mischgeneratoren

Die Parametrisierung eines Mischgenerators mit 2 Zuständen betrifft:

- den mittleren Erwartungswert \bar{t}_V und die Standardabweichung σ_V der Normalverteilung,
- den K -Wert der Pearson-Typ 3-Verteilung (siehe oben) und

- die Zustandübergangswahrscheinlichkeiten $q_{i,j}$ mit $i, j \in V, F$ zwischen den Generatoren.

Dabei ergibt sich die mittlere Zwischenankunftszeit \bar{t} unter Berücksichtigung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten $Pr\{V\}$ und $Pr\{F\}$ für die Zustände V und F:

$$\bar{t} = \bar{t}_V Pr\{V\} + \bar{t}_F Pr\{F\} = \bar{t}_V \frac{q_{F,V}}{(q_{V,F} + q_{F,V})} + \bar{t}_F \frac{q_{V,F}}{(q_{V,F} + q_{F,V})} \quad (7.9)$$

Für Mischgeneratoren mit mehr als zwei Zuständen ergeben sich analoge Berechnungsformeln.

Die für die Kalibrierung der Generatoren notwendigen Parameter können aus statistischen Analysen der vorliegenden Stichproben direkt abgeleitet werden. Dabei werden Fahrzeuge mit Zwischenankunftszeiten unter 1.5 Sekunden dem Zustand V (Fahrzeugverbund) zugeordnet (siehe Festlegung in Abschnitt 3.3). Da sich aus den Stichproben auch für jeden Datensatz ein Fahrzeugtyp ableiten läßt, können die für die Parametrisierung notwendigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten aus den Beobachtungshäufigkeiten für ein Aufeinanderfolgen von Fahrzeugtypen und dem zugehörigen zeitlichen Abstand abgeleitet werden.

7.3.3 Bewertung und Validierung der Generatoren

Anhand der Stichprobe A2/NL wird im folgenden die Eignung der vorgestellten Generatoren diskutiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung der Zwischenankunftszeiten und der Fahrzeugtyp-spezifischen Pulkbildung. Für die weiteren Stichproben wurde ebenfalls eine entsprechende Analyse durchgeführt, die zu vergleichbaren Aussagen führen. Im Anhang D sind die Ergebnisse für die Vergleiche der Stichproben mit den verschiedenen Generatoren dargestellt.

7.3.3.1 Zwischenankunftszeiten

Für den Vergleich der statistischen Eigenschaften der Zwischenankunftszeiten wird die Verteilungsfunktion herangezogen, da bei ihr die Abweichungen zwischen Stichprobe und Generator deutlicher werden als bei der Verteilungsdichtefunktion.

Abb. 7.6 zeigt Vergleiche zwischen Stichprobe und den Ergebnissen des Pearsongenerators bzw. des Mischgenerators. Man erkennt die gute Übereinstimmung beider Generatoren für die querschnittsbezogene Betrachtung über alle Fahrspuren sowie für die rechte und mittlere Spur. Für die linke Spur mit der typischerweise ausgeprägten Pulkbildung (siehe Abschnitt 3.3) läßt sich mit dem Mischgenerator eine bessere Nachbildung realisieren. Für den Pearson-Typ 3-Generator läßt sich die Abweichung auch durch automatisierte Suche eines optimalen K-Faktors (Exhaustive search im Bereich des Schätzwertes) nicht weiter verringern.

Die Abb. 7.7 verdeutlicht den Mischungsprozess bei der Verwendung des Mischgenerators. Man erkennt anhand der Verteilungsdichtefunktion für die rechte Spur (Stichprobe A2/NL), wie sich Normalverteilung und Pearson-Typ 3-Verteilung überlagern.

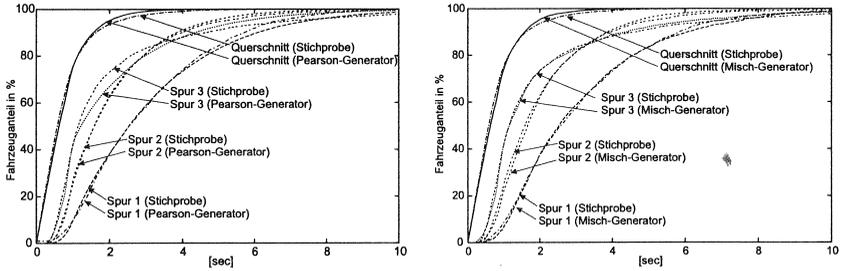


Abbildung 7.6: Pearson-Generator (links) und Misch-Generator (rechts) im Vergleich mit Meßdaten A2/NL (Verteilungsfunktion der Zwischenankunftszeiten)

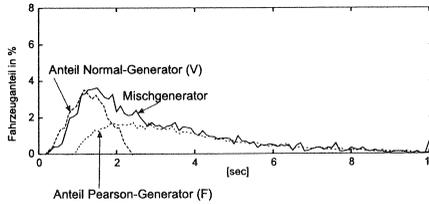


Abbildung 7.7: Verteilungsdichtefunktion der Zwischenankunftszeiten (A2/NL, rechte Spur)

7.3.3.2 Verkehrsstärken

Die gute Anpassung der Verteilungsfunktionen läßt erwarten, daß auch die Verkehrsstärken gut mit den Stichprobendaten übereinstimmen. In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Abweichung bleiben dabei unter 5 %.

7.3.3.3 Geschwindigkeiten

Die Mittelwerte und Standardabweichung der Geschwindigkeiten zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Abweichung bleiben dabei in der Regel unter 2 %. Nur für die Standardabweichung auf der schnellen linken Spur (Spur 3) zeigt sich eine größere Abweichung, die sich wie folgt begründen läßt. Die Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge werden unabhängig vom Abstand zum vorhergehenden Fahrzeug generiert. Wird ein Fahrzeug jedoch in einen Fahrzeugverbund hinein generiert, nimmt es zunächst die

Spur	Verkehrsstärke [$\frac{F_{\text{Fahrzeuge}}}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	1160	1150	1140	- 0.9	- 1.7
2	1758	1801	1771	+ 2.4	+ 0.7
3	1743	1824	1826	+ 4.6	+ 4.7

Tabelle 7.2: Vergleich der Verkehrsstärken

Spur	Mittlere Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	100.1	102.1	101.9	+ 2.0	+ 1.8
2	112.1	114.0	114.0	+ 1.7	+ 1.7
3	119.9	122.1	121.9	+ 1.8	+ 1.7

Spur	Standardabweichung der Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	11.7	11.8	11.8	+ 0.9	+ 0.9
2	10.2	10.1	10.0	- 1.0	- 2.0
3	10.5	9.1	8.9	- 13.3	- 15.2

Tabelle 7.3: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten

Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs an. Dadurch wird die zu beobachtenden Varianz der Geschwindigkeiten reduziert. Da jedoch die durchschnittlichen Geschwindigkeiten davon nicht betroffen sind, ist diese Abweichung tolerierbar.

7.3.3.4 Aufeinanderfolgen von Fahrzeugen im Fahrzeugverbund

Abschließend sei das Aufeinanderfolgen der Fahrzeuge im Fahrzeugverbund betrachtet. Wie bereits erläutert, ist dabei besonders das Aufeinanderfolgen von Pkw hinter einem Lkw für die Analyse des Abschattungseffektes in Fahrzeug-Baken-Systemen von besonderem Interesse (vgl. Abschnitt 3.3.5). Die Abb. 7.8 zeigt den Vergleich der Beobachtungshäufigkeiten für das Aufeinanderfolgen von Fahrzeugen in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp und vom Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug; in jeder Graphik sind dabei die Beobachtungshäufigkeiten bezogen auf einen Folgezustand dargestellt.

Vergleicht man die Ergebnisse für den Pearsongenerator mit denen für den Mischgenerator so wird deutlich, daß der Mischgenerator besser in der Lage ist, die Ausbildung typspezifischer Fahrzeugverbünde nachzubilden. Für die hier betrachtete rechte Spur ist es wahrscheinlicher, daß ein Lkw im Fahrzeugverbund wieder von einem Lkw gefolgt wird, als von einem Pkw. Der Mischgenerator ist in der Lage, dies korrekt nachzubilden, während der Pearsongenerator hier deutliche Abweichungen zeigt. Dies ist verständlich vor dem Hintergrund, das die Fahrzeugtypen beim Pearsongenerator ohne Berücksichtigung von Fahrzeugverbänden vorgenommen wird. Der Pearsongenerator erzeugt also häufiger als erforderlich die in bezug auf den Abschattungseffekt kritische Situation, daß ein Pkw im dichten Abstand einem Lkw folgt.

Abschließend ist festzustellen, daß beide Generatoren in der Lage sind, die relevanten Eigenschaften der Fahrzeugmobilität bereits zum Zeitpunkt der Generierung sehr realitätsnah nachzubilden. Es ist demnach kein zeitraubender Adaptionsprozess erforderlich, in dem sich erst ein realistischer Verkehrsfluß einstellen muß. Für die Untersuchung der Abschattungsproblematik ist der Mischgenerator vorzuziehen, da er die typabhängige Bildung von Fahrzeugverbänden besser wiedergibt.

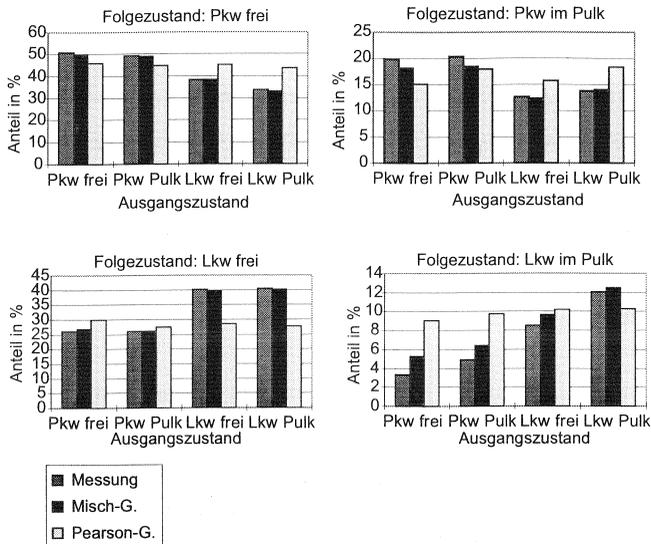


Abbildung 7.8: Typabhängige Bildung von Fahrzeugverbänden

Integriertes stochastisches Simulationsmodell zur DSRC-Systemanalyse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zunächst unabhängig voneinander Methoden zur realitätsnahen Modellierung der Fahrzeugmobilität (Kapitel 7) und zur Analyse der Eigenschaften des Übertragungskanal in Straßenverkehrsszenarien (Kapitel 4) sowie die entwickelte DSRC-Kommunikationsarchitektur (Kapitel 5) vorgestellt. In Kapitel 6 wurden die Möglichkeiten - aber auch die Grenzen in bezug auf die Realitätsnähe - einer analytischen Bewertung der Kommunikationsprotokolle aufgezeigt.

Um eine detaillierte Bewertung der DSRC-Kommunikationsprotokolle auf der Basis von möglichst realistischen Rahmenbedingungen vornehmen zu können, wird hier eine Integration der Modelle für Fahrzeugmobilität und Übertragungskanal mit den Kommunikationsprotokollen vorgeschlagen und die entsprechende Realisierung vorgestellt. Im folgenden werden zunächst die Anforderungen an das integrierte Modell beschrieben in bezug auf, vgl. Abb. 8.1:

- das Zusammenwirken der Modellkomponenten,
- die notwendige Skalierbarkeit des Modells und mögliche Wiederverwendbarkeit von bereits erzielten Ergebnissen um einen Kompromiß aus Detaillierungsgrad und Simulationseffizienz zu erzielen,
- die Abstraktion von deterministisch gewonnen Systemcharakteristika zu statistischen Modellkomponenten,
- die Validierbarkeit der Modellkomponenten und
- die statistische Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse.

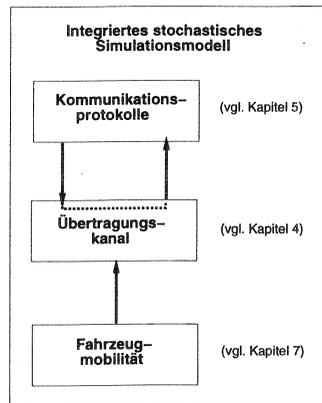


Abbildung 8.1: Integriertes Simulationsmodell

Daran anschließend wird eine konkrete Realisierung eines integrierten Simulationskonzeptes vorgestellt, das auf der Verwendung von vorberechneten, verkehrssituations-spezifischen Kanalcharakteristika während der Systemsimulation beruht. Das Kapitel wird abgeschlossen mit einer Darstellung der als Ergebnis der Realisierung des integrierten Konzeptes entstandenen objekt-orientierten Simulationsumgebung SIMCO3++/DSRC.

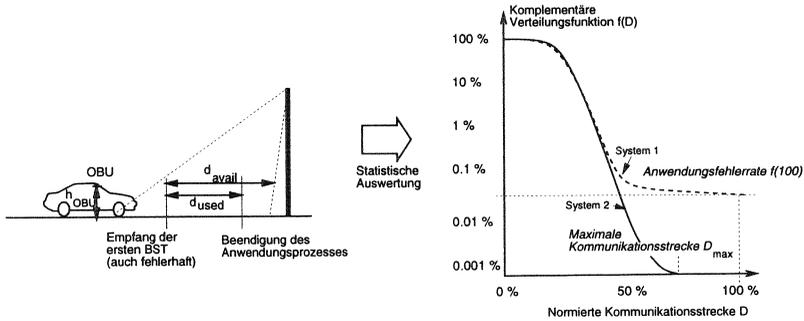


Abbildung 8.2: Verteilungsfunktion der normierten Kommunikationsstrecke D

8.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die integrierte Systemsimulation ergeben sich zum einen aus den zu ermittelnden Leistungskenngrößen sowie aus zu beachtenden Realisierungsaspekten.

8.1.1 Bewertungsziele und zu ermittelnde Leistungskenngrößen

Ein wichtiges Ziel der Leistungsbewertung ist es nachzuweisen, daß vorgegebenen Anwendungsprozesse (wie z.B. AFC oder DRG) unter den gegebenen Randbedingungen durch das System mit einer geforderten Zuverlässigkeit abgewickelt werden können. Die entsprechende Leistungskenngröße ist somit die nachfolgend definierte Erfolgsrate der Anwendungsprozesse.

Neben diesem globalen Parameter sind aber auch weitere Kenngrößen des Systems von Interesse. Sie dienen einer detaillierten Analyse der Gründe, die zu einer bestimmten Erfolgsrate führten, und sind daher vor allem für die Systemoptimierung von Interesse. Weiterhin dienen sie dazu, die Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften von Fahrzeugmobilität, Übertragungskanal und Parametrisierung der Kommunikationsprotokolle aufzuzeigen. In diesem Zusammenhang sind die nachfolgend definierten Kommunikationsprofile sowie die differenzierten Fehlerstatistiken zu nennen.

8.1.1.1 Erfolgsrate der Anwendungsprozesse

Die globale Bewertung des Systems kann anhand folgender Analyseparameter vorgenommen werden (siehe auch Abb. 8.2) :

Normierte Kommunikationsstrecke D : D ist definiert als Quotient aus der zum erfolgreichen Abschluß des Anwendungsprozesses genutzten Kommunikationsstrecke und der zur Verfügung stehenden Kommunikationsstrecke:

$$D = \frac{d_{used}}{d_{avail}}$$

Komplementäre Verteilungsfunktion: $f(D)$ Anhand der komplementären Verteilungsfunktion für D kann der Anteil der Fahrzeuge, die den Anwendungsprozeß nach einem in der Kommunikationszone zurückgelegten Weg D nicht erfolgreich abgeschlossen haben, an der Gesamtzahl der in die Kommunikationszone eingetretenen Fahrzeuge abgelesen werden:

$$f(D) = 1 - \frac{N_{\text{completed}}(D)}{N_{\text{entered}}}$$

Die entscheidenden aus der Verteilungsfunktion abgeleiteten Parameter sind dabei entweder die Anwendungsfehlerrate für $D = 100\%$, $f(100)$, oder die maximale Ausnutzung der Kommunikationszone D_{max} bezogen auf einen vorgegebenen Anteil von Fahrzeugen.

Um den Einfluß der Fahrzeuggeschwindigkeiten zu eliminieren, kann eine Betrachtung auch im Zeitbereich durchgeführt werden. Hier wird dann die Verteilungsfunktion der zum Abschluß der Kommunikation benötigten Zeit betrachtet. Dies entspricht der Betrachtungsweise, die bereits für die Bewertung der Kommunikationsprotokolle mit analytischen Methoden vorgenommen wurde.

8.1.1.2 Kommunikationsprofile

Kanalnutzungsprofil Das Kanalnutzungsprofil dient dazu, die Nutzung des Kanals durch die OBU zu beschreiben. Hierzu werden die Anwendungsprozesse in Phasen aufgeteilt, die unterschiedliche Nutzungscharakteristika des Kanals darstellen.

Zur Aufnahme des Aktivitätsprofils wird der Kommunikationsablauf der automatischen Gebührenerhebung z.B. in zwei Phasen zerlegt. „Phase 1“ bezeichnet dabei die Zeitspanne vom Empfang der ersten BST bis zum Start der Chipkarten-Operation. „Phase 2“ benennt den Zeitraum vom Ende der Chipkarten-Operation bis zum Empfang der Bestätigung des erfolgreichen Abschlusses der Transaktion durch die Bake. Während der Chipkarten-Operation findet keine Nutzung des Kanals durch die OBU statt.

Es wird jeweils der Anteil der Fahrzeuge gemessen, der sich in einer dieser Phasen befindet und dieser Wert bezüglich der Länge der Kommunikationszone abgetragen.

Analog können andere Anwendungen, z.B. die hier ebenfalls betrachtete Anwendung Reise- und Verkehrsinformation, gegliedert werden.

Eine Analyse des Kanalnutzungsprofils erlaubt es insbesondere, Zonen der geringen Nutzung des Kanals zu erkennen, und daher die Kapazität für weitere Anwendungen, die parallel zu einer bestehenden Anwendung abgewickelt werden können, zu identifizieren. Ein entsprechendes Anwendungsbeispiel wird im Abschnitt 9.1.3 im Zusammenhang mit einer kombinierten Abwicklung von mehreren Anwendungen diskutiert.

Quality of Service-Profil Dieses Kommunikationsprofil stellt den Anteil erfolgreicher Übertragungen für jede Stelle des Kommunikationsbereichs dar, d.h. es

wird der Quotient aus der Anzahl der erfolgreich übertragenen Datenpakete zur Anzahl der Übertragungsversuche gebildet. Dabei wird über Up- und Downlink sowie über PKWs und LKWs gemittelt. Findet an einer Stelle niemals Kommunikation statt, so wird der Wert zu Null gesetzt.

Die Auswertung des Quality-of-Service-Profiles stellt eine Mittelung der innerhalb der Kommunikationszone zu beobachtenden Kanalqualität dar. Wie bereits im Kapitel 4 erläutert, sind Fadingeinbrüche innerhalb der Kommunikationszone stark fahrzeugtyp- und verkehrssituationsabhängig, so daß anhand des Quality-of-Service-Profiles der Einfluß einer spezifischen Verkehrscharakteristik auf die Qualität des Übertragungskanals abgebildet wird.

8.1.1.3 Fehlerstatistiken

Statistiken über die Anzahl der aufgetretenen Übertragungsfehler pro OBU erlauben eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens, wobei die Abhängigkeit eines Simulationsergebnisses von der Konfiguration des Übertragungskanals, der Fahrzeugmobilität und der Leistungsfähigkeit der Kommunikationsprotokolle differenziert betrachtet werden kann. Von Interesse sind dabei folgende Übertragungsfehlertypen:

- Bitfehler (gemessen anhand der Anzahl der Paketfehler pro OBU)
- Abschattungsfehler (gemessen anhand der Anzahl der abgeschatteten Datenpakete pro OBU)
- Übertragungsfehler durch Vielfachzugriffsinterferenz (gemessen anhand der Anzahl der von Datenkollisionen betroffenen Datenpakete pro OBU).

Treten gehäuft Abschattungsfehler auf, so ist bezogen auf die vorliegende Fahrzeugmobilität auf eine ungünstige Antennenkonfiguration zu schließen, während ein hoher Anteil von Kollisionsfehlern eine Modifikation der Parameter des Kanalzugriffsverfahrens nahe legt. Eine ausführliche Diskussion der Anwendungen der einzelnen Statistiken erfolgt im Kapitel zur Leistungsbewertung.

8.1.2 Realisierungsaspekte

Bei der Entwicklung eines Konzeptes für eine DSRC-Systembewertung unter realitätsnah modellierten Umgebungsbedingungen müssen folgende Realisierungsaspekte beachtet werden:

Zusammenwirken der Modellkomponenten Die Modellkomponenten Fahrzeugmobilität, Übertragungskanal und Protokollimplementierung wirken wie folgt zusammen:

Das Verkehrsmodell gibt für einen bestimmten Zeitpunkt die Position eines Fahrzeugs und die zugeordneten Fahrzeugeigenschaften (Position der On-Board Unit, Fahrzeugform, Windschutzscheibendämpfung, ...) innerhalb eines Szenariums mit stationären und mobilen Störern (insbesondere Nachbarfahrzeuge) vor. Durch den Protokollablauf wird gesteuert, wann Übertragungen stattfinden, wobei durch das Modell des Übertragungskanals bestimmt wird, ob eine Übertragung den Adressaten erreicht, bzw. ob die Übertragung fehlerbehaftet

ist. Dabei müssen insbesondere die ständig wechselnden Einflüsse von der Straßenverkehrsumgebung und die dadurch bewirkten Störungen durch Mehrwegeausbreitung, Abschattung und Vielfachzugriffsinterferenz berücksichtigt werden.

Es entstehen also komplexe Abhängigkeiten zwischen den Modellkomponenten, die sorgfältig aufeinander abgestimmt werden müssen. Es muß jeweils geprüft werden, ob die erzeugende Modellkomponente den entsprechenden Parameter in genügend realistischer Weise generiert bzw. ob die von dem Parameter abhängenden Modellkomponenten diesen auch in einer entsprechenden Differenzierung verarbeiten können.

Ein Beispiel hierzu ist die horizontale und vertikale Positionsänderung der OBU, die von der Position des Fahrzeuges und damit von der Modellierung der Fahrzeugmobilität abhängig ist. Für die longitudinale Position, d. h. in Fahrtrichtung, sind aussagekräftige Meßdaten verfügbar, woraus ein realistisches Fahrzeuggenerierungs- und Bewegungsmodell abgeleitet wurde (siehe Kapitel 7). Die Seiten- und Höhenvariationen (keine Ideallinie in der Fahrbahnmitte, Überholmanöver, Fahrbahnunebenheiten und Schwingungen des Fahrzeuges) sind aber noch unzureichend untersucht worden, so daß in diesem Fall eine statistische Modellierung mit geeigneten Annahmen sinnvoll ist.

Skalierbarkeit des Systemmodells Bei der Entwicklung eines Systemmodells zu Simulationszwecken ist ein Kompromiß zwischen notwendiger Detaillierung und wünschenswerter Simulationseffizienz zu finden. Die Simulationseffizienz bezieht sich dabei auf die notwendige Simulationsdauer¹ und den Speicherplatzbedarf. Die differenzierte Skalierbarkeit des Simulationsmodells ist eine wichtige Voraussetzung für den praktischen Einsatz des Systemmodells, da hierdurch eine Anpassung an den Untersuchungsgegenstand ermöglicht wird.

Eine Realisierungsmöglichkeit eines integrierten Systemmodells besteht darin, die zuvor einzeln betriebenen Modelle in ihrem höchsten Detaillierungsgrad zur Simulationslaufzeit zu kombinieren. Dies würde insbesondere bedeuten, daß der für eine Übertragung relevante Signalpegel für jede einzelne Übertragung gemäß den in Kapitel 4 vorgestellten Methoden parallel zur Protokoll- und Fahrzeugmobilitätssimulation erfolgen müßte. Ein solcher Ansatz bietet zwar den Vorteil, daß alle denkbaren Einflüsse erfaßt werden, jedoch ist damit auch ein erheblicher Berechnungsaufwand verbunden, der einem praktischen Einsatz entgegensteht².

Alternativ zu dem oben beschriebenen Modell wird hier ein skalierbarer Ansatz vorgeschlagen, der folgenden Überlegungen Rechnung trägt:

- Zur Auswahl einzelner Systemparameter, z. B. der Kanalzugriffsprotokolle, müssen *Vergleichsuntersuchungen* vorgenommen werden, d.h. es wird eine begrenzte Anzahl von Parametern variiert und deren Einfluß auf die Systemleistung verglichen. In der ersten Phase der Untersuchungen kann dabei auf bestimmte Teilmodelle des Gesamtsystems, die keinen unmittel-

¹unter Berücksichtigung der zu erzielenden statistischen Sicherheit der Ergebnisse

²Für eine vergleichende Betrachtung der Simulationslaufzeiten bei unterschiedlichen Detaillierungsgraden siehe Abschnitt 9

baren Einfluß auf den betrachteten Systemparameter haben verzichtet werden (z. B. Abschattungseffekte sind weitgehend unabhängig von der Effizienz der Kanalzugriffsverfahren, daher braucht die Abschattung für Voruntersuchungen nicht mitbetrachtet werden). Die Verwendung vereinfachter Modelle ermöglicht nach entsprechend kurzen Simulationslaufzeiten eine Vorauswahl der optimalen Systemparameter. Zur *Bestimmung der absoluten Systemleistung* mit den ermittelten Parametern sollten dann möglichst alle Einflußfaktoren Berücksichtigung finden.

- Durch die *Wiederverwendung von charakteristischen Modellparametern* kann die Simulationseffizienz gesteigert werden. Die Vorabberechnung und Wiederverwendung von Modellparametern macht vor allem dann Sinn, wenn auf die Daten unabhängig vom Untersuchungsgegenstand immer wieder zugegriffen wird. Dies kann z.B. durch den Aufbau einer Datenbank ermöglicht werden, auf die während der Simulation dynamisch zugegriffen werden kann. Es entsteht aber eine große Datenmenge, falls alle erdenklichen Situationen vorausberechnet werden. Aus diesem Grund sind geeignete Maßnahmen und Überlegungen anzustellen, um die Datenmenge zu reduzieren. Gleichzeitig muß aber auch die korrekte Modellbildung erhalten bleiben. Im nächsten Abschnitt wird dieser Ansatz auf die Berechnung der Kanaleigenschaften angewandt.
- Zu beachten ist weiterhin, inwieweit sich die Berücksichtigung eines bestimmten Effektes auf das angestrebte Endergebnis auswirkt, z. B. der Einfluß der Beugung auf die maximal benötigte Kommunikationsdistanz. Ein Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Berücksichtigung eines Effektes kann zum Ergebnis führen, daß die Berücksichtigung dieses Effektes nicht in angemessener Beziehung zum Aufwand steht. Ergibt ein einfacher Modellierungsgrad ein ungünstigeres Ergebnis, kann im Rahmen einer *worst-case*-Abschätzung, je nach Untersuchungsgegenstand, oft auf das einfachere Modell zurückgegriffen werden.
- Eine deterministische Berücksichtigung der Eigenschaften einer Systemkomponente (wie z.B. des Übertragungskanals) ist immer dann möglich, wenn abgesicherte Modelle oder Daten über das Verhalten vorliegen. Beispiele sind die Ausbreitungsdämpfung oder das Abschattungsverhalten. Liegen die Daten aufgrund statistischer Erhebungen vor oder können sie aus deterministischen Modellen abgeleitet werden, bietet sich der Einsatz eines statistischen Modells an. Ein statistisches Modell findet oft auch Anwendung, wenn Annahmen über ein Verhalten gemacht werden müssen, d.h. deterministische Beschreibungen nicht möglich oder sinnvoll sind bzw. statistische Erhebungen nicht vorliegen, z. B. Störungen durch Spritzwasser oder durch andere Funkdienste.

Die deterministische Beschreibung der Prozesse ist dabei in der Regel oft genauer und besser nachvollziehbar, aber auch rechenzeitintensiver, während statistische Beschreibungen bei verbesserter Simulationseffizienz ebenso aussagekräftige Ergebnisse liefern können. Dies muß jedoch in entsprechenden Vergleichsuntersuchungen im Einzelfall nachgewiesen werden.

Die Skalierbarkeit des Systemmodells ermöglicht somit, den für den Untersuchungsgegenstand angemessenen Abgleich zwischen Detaillierungsgrad und Simulationseffizienz zu finden.

Validierbarkeit Um die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse zu belegen, ist eine Validierung der Teilkomponenten des Systemsimulators notwendig. Für das Fahrzeugmobilitätsmodell konnte eine detaillierte Validierung anhand von Meßdaten von deutschen und holländischen Autobahnen vorgenommen werden. Die Funkausbreitungsmodellierung konnte ebenfalls anhand von Meßdaten validiert werden. Die Implementierung der DSRC-Kommunikationsprotokolle wurden einer Konformitätsprüfung gegenüber den DSRC-Standardisierungsentwürfen unterzogen, sodaß eine Übereinstimmung mit dem Verhalten von realen Systemen gewährleistet ist. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, das zeitliche Verhalten der Protokolle in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke mit analytischen Ergebnissen abzugleichen.

Eine Validierung der Ergebnisse bezogen auf die globale Leistungskenngröße Erfolgsrate ist nicht möglich, da die Anzahl der praktischen Tests deutlich begrenzt ist.

Insgesamt wurden jedoch die Teilkomponenten des Systemmodells einer detaillierten Validierung unterzogen, so daß die Ergebnisse des integrierten Systemmodells bis zu einem gewissen Grade abgesichert erscheinen.

Statistische Zuverlässigkeit Bei der Auswertung von Ergebnissen stochastischer Simulationen ist die statistische Unsicherheit bezüglich der Genauigkeit der Ergebnisse insbesondere beim Auftreten von seltenen Ereignissen zu berücksichtigen. Hierzu müssen statistische Methoden, wie z.B. die Bestimmung der Konfidenzintervalle, angewendet werden. Die Ermittlung der Konfidenzintervalle (95 %) für ausgewählte Systemkonfigurationen hat gezeigt, daß für abgesicherte Aussagen bzgl. einer Transaktionsfehlerrate von 10^{-6} mindestens 10^7 Fahrzeuge simuliert werden sollten.

8.2 Simulationskonzept

Unter Beachtung der oben eingeführten Ziele und Rahmenbedingungen einer integrierten Systembewertung wurde ein Simulationskonzept entwickelt und implementiert, welches die in den vorhergehenden Kapiteln eingeführten Methoden zur detaillierten Systemmodellierung nutzt und gleichzeitig eine ausreichende Simulationseffizienz bietet, um innerhalb kurzer Zeit zu abgesicherten Ergebnissen zu gelangen.

Die Abb. 8.3 vermittelt eine Übersicht über die Vorgehensweise. Wesentliches Kennzeichen ist der Aufbau einer verkehrssituations-spezifischen Datenbank für die relative Verteilung des Signalpegels innerhalb der Kommunikationszone. Auf diese Signalpegelverteilungen wird während der Systemsimulation entsprechend einer identifizierten Verkehrssituation durch das dynamische Kanalmodell zugegriffen. Die Umrechnung der Signalpegel in Bitfehlerverhältnisse erfolgt unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Charakteristika, wie z.B. Windschutzscheibendämpfung und Gerätetoleranzen. Die für die Kommunikation relevanten Abschattungseffekte

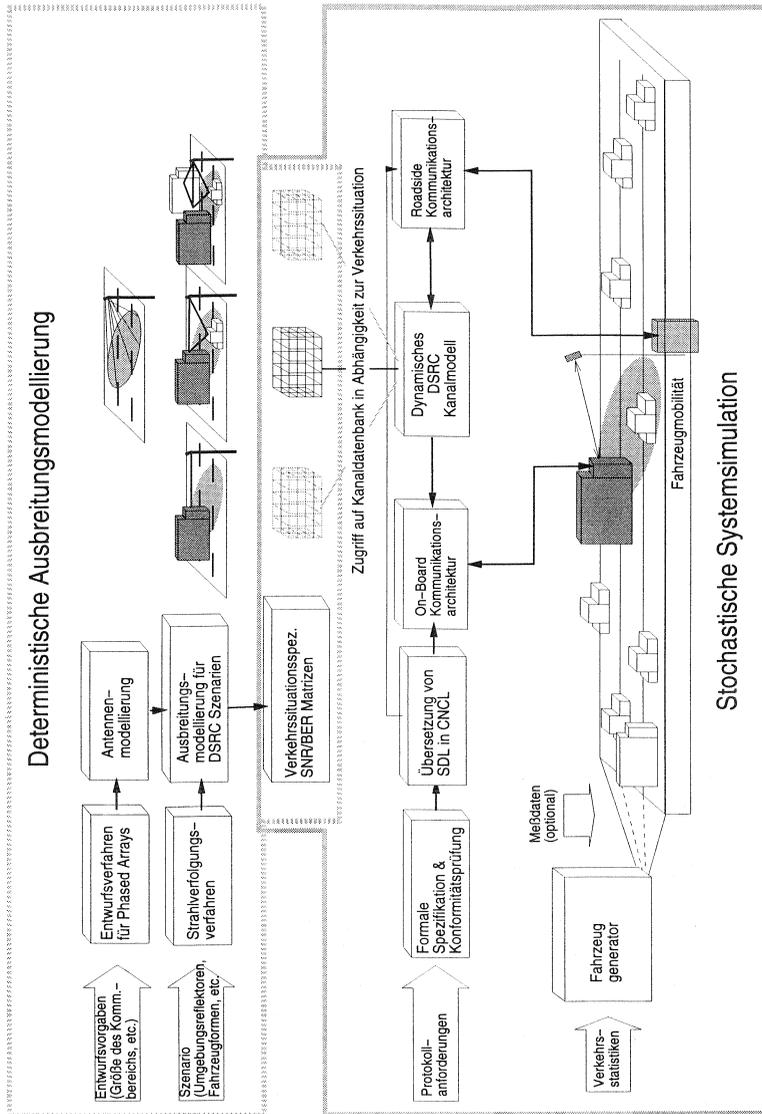


Abbildung 8.3: Übersicht Systemsimulation

können individuell für jede Übertragung unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeometrien des betrachteten Fahrzeugs sowie für mögliche Störer bestimmt werden. Nachfolgend werden insbesondere die Eigenschaften des dynamischen Kanalmodells

Wahl der Auflösung der Raumzonenmatrix Die Diskretisierung in Fahrtrichtung hängt von der Inhomogenität und der Ausdehnung der Kommunikationszone sowie der Paketdauer der Protokolle, der Taktzeit des Simulators ($T_{Sim} = 1ms$) und der minimalen Geschwindigkeit der Fahrzeuge ab. Bei fließendem Verkehr beträgt die Minimalgeschwindigkeit auf Autobahnen ungefähr $v_{min} \approx 80 \frac{km}{h} \approx 22 \frac{m}{s}$. Damit ergibt sich für die notwendige Diskretisierung in Fahrtrichtung eine Begrenzung:

$$\Delta x \geq v_{min} \cdot T_{Sim} = 2,2cm$$

Da sich die Fahrzeuge im Systemsimulator jeweils auf der Mitte einer Fahrspur (ausgenommen Fahrspurwechsel, die kontinuierlich vollzogen werden) bewegen, kann die Auflösung in y-Richtung oft auf die Anzahl der Fahrspuren beschränkt werden. Für genauere Analysen des Einflusses von Fahrspurwechseln ist eine höhere Auflösung sinnvoll sein. In z-Richtung ist eine Auflösung von mindestens $No.Z = 2$ sinnvoll, um zwischen PKW und LKW zu unterscheiden. Die Diskretisierung wird so gewählt, daß die Inhomogenität der Kommunikationszone voll erfaßt wird. Während der Simulation werden die Elemente der Bitfehler- bzw. SNR-Matrizen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge und der Datenrate ausgelesen und der jeweils schlechteste Werte im betreffenden Intervall benutzt (worst-case). Die Abb. 8.5 zeigt unterschiedliche Auflösungen einer Ebene der Raumzonenmatrize.

8.3.2 Integration der Ergebnisse der Funkfeldprädiktion

Automatische Berechnung der Raumzonenmatrizen Die Vorabberechnung von Daten für die Raumzonenmatrix ist die Voraussetzung für eine effiziente Nutzung des Kanalmodells. Die Werte der Elemente sind abhängig von der Systemumgebung und den verwendeten Antennen sowie von den Modulationsverfahren und den ermittelten Signal-/Rauschleistungsverhältnissen. Die Vorausberechnung der Signalpegelverteilung wird unter Beachtung vorgegebener Verkehrssituationen und Fahrzeugtypen im Vorfeld der Simulation vorgenommen. Zum Zeitpunkt der Simulation werden die Fahrzeugtypen entsprechend einer Häufigkeitsverteilung generiert und der Zugriff auf die mehrdimensionale Raumzonenmatrix erfolgt in Abhängigkeit zum Fahrzeugtyp und zur ermittelten Verkehrssituation.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Auswahlkriterien für die Bestimmung der relevanten Verkehrssituationen erläutert.

Relevante Verkehrssituationen Die Klassifizierung der relevanten Verkehrssituationen geschieht unter der Annahme, daß nur die Fahrzeuge betrachtet werden, die sich auf den benachbarten Spuren befinden. Aufgrund der räumlichen Anordnung können nur die von den vorderen, seitlichen Nachbarn reflektierten Wellen zur On-Board Unit gelangen. Abb. 8.6 zeigt die 9 möglichen Kombinationen. Jede Position kann durch einen Pkw oder einen Lkw besetzt werden. Für jede Verkehrssituation werden die Signal-/Rauschleistungsverhältnisse in der Kommunikationszone bestimmt. Im Rahmen einer worst-case-Betrachtung sind unter Anwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Methoden die Situationen ermittelt worden, die den größten Einfluß auf die relative Empfangspegelverteilung haben. Die für die Kommunikation

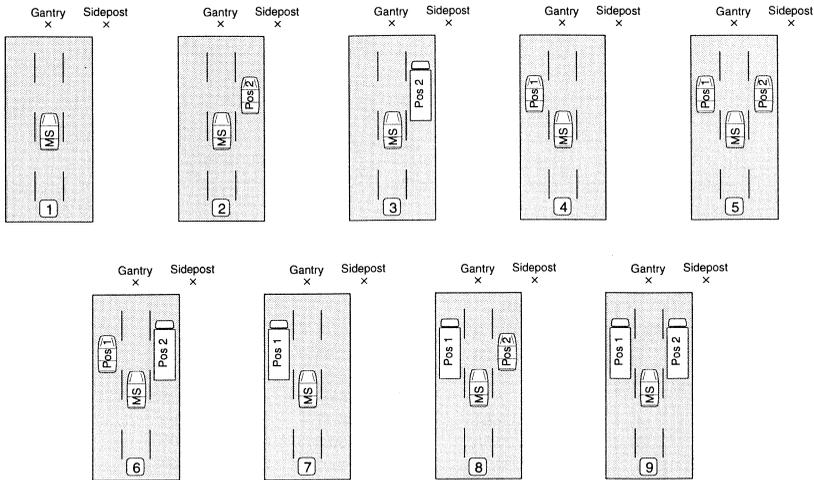


Abbildung 8.6: Pkw-Verkehrssituationen (analog für Lkw)

relevanten Situationen ergeben sich aus der räumlichen Anordnung der Bakenantenne und werden anhand der möglichen Reflektoren ermittelt.

Durch eine worst-case-Abschätzung kann die Anzahl der während der Simulation betrachteten Situationen reduziert werden. Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über relevante Verkehrssituationen (mit einem 'X' gekennzeichnet) für die Positionierung einer Antenne sowohl am rechten Straßenrand (Sidepost) als auch über der Straßenmitte (Gantry). In einem Beispiel soll ein Pkw von einem anderen Pkw überholt werden, die Sidepost-Anordnung wird betrachtet. Das Kanalmodell ermittelt Verkehrssituation 4. Aufgrund der worst-case-Abschätzung wird auf Situation 7 verwiesen, da ein überholender Lkw mit seinen größeren Reflexionsflächen stärkeren Einfluß auf den Signalpegelverlauf hat. Die Bestimmung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit geschieht durch Auslesen des Elementes aus der Raumzonenmatrix der Verkehrssituation 7.

Eine beispielhafte Statistik der erkannten Verkehrssituationen ist anhand einer dreispurigen Straße mit hoher Verkehrsdichte und innerstädtischem Verkehr (7–15 % Lkw-Anteil) durch eine Simulation ermittelt worden (Tabelle 8.2). Beispielsweise fahren 25.53 % der Pkw auf Spur 1 und werden bei der Kommunikation nicht durch benachbarte Fahrzeuge gestört. In 4.62 % der Fälle werden Pkw auf der Spur 1 von einem anderen Pkw überholt und haben somit Einfluß auf die Ausbreitungspfade der Wellen und den empfangenen Signalpegel.

Relevante Fahrzeugtypen Neben der örtlichen Beziehung des betrachteten Fahrzeugs zu den benachbarten Fahrzeugen ist die Fahrzeugform ein wichtiger Einflußfaktor. Die Signalpegelverteilung für die oben beschriebenen Verkehrssitua-

Mobilstation	Situation	Position 1	Position 2	Sidepost	Gantry
Pkw	1	-	-	X	X
	2	-	Pkw	→ 1	→ 3 → 9
	3	-	Lkw	→ 1	→ 9
	4	Pkw	-	→ 7	→ 2 → 3 → 9
	5	Pkw	Pkw	→ 4 → 7	→ 9
	6	Pkw	Lkw	→ 4 → 7	→ 9
	7	Lkw	-	X	→ 3 → 9
	8	Lkw	Pkw	→ 7	→ 6 → 9
	9	Lkw	Lkw	→ 7	X

Tabelle 8.1: Reduktion der Anzahl der zu betrachtenden Verkehrssituationen durch worst-case-Abschätzungen

Nr.	Pkw			Lkw		
	Spur 1	Spur 2	Spur 3	Spur 1	Spur 2	Spur 3
1	25.53	23.23	28.09	37.98	14.78	26.47
2	0.00	3.70	5.07	0.00	2.32	4.33
3	0.00	1.77	0.97	0.00	1.19	0.95
4	4.62	3.91	0.00	6.37	2.58	0.00
5	0.00	0.54	0.00	0.00	0.40	0.00
6	0.00	0.32	0.00	0.00	0.24	0.00
7	0.84	1.21	0.00	1.41	0.84	0.00
8	0.00	0.17	0.00	0.00	0.09	0.00
9	0.00	0.06	0.00	0.00	0.05	0.00

Tabelle 8.2: Statistik erkannter Verkehrssituationen (vgl. Abb. 8.6)

tionen muß demnach unter Berücksichtigung der bereits in Kapitel 4 eingeführten Fahrzeugformen ermittelt werden.

Für die prozentualen Anteile der Typen im Straßenverkehr sind für die Fahrzeuggenerierung unter Berücksichtigung der Zulassungszahlen geeignete Werte angenommen worden.

8.3.3 Bestimmung von Paketfehlern

Wie oben bereits dargestellt, wird während der Simulationslaufzeit auf die Kanaldatenbank zugegriffen und für jede Paketübertragung eine entsprechende Bitfehlerrate identifiziert. Um nun festzustellen, ob ein Datenpaket von einem Bitfehler betroffen ist, wird bezogen auf ein Raumzonelement und der zugeordneten Bitfehlerrate Ankunft des nächsten fehlerbehafteten Bits ermittelt (siehe Abb. 8.7). Die innerhalb des Raumzonelements übertragenen Datenbits werden während der Simulationslaufzeit solange aufsummiert, bis der vorberechnete Wert erreicht bzw. überschritten wird. Das entsprechende Datenpaket wird als fehlerbehaftet verworfen. Die Vorgehensweise ermöglicht die Berücksichtigung unterschiedlicher Ankunftsprozesse für die Bitfehler. Eine worst-case Betrachtung ergibt sich für die Generierung nach einer Gleichverteilung, da dann die Bitfehler möglichst breit gestreut sind und für ein vorgegebenes Bitfehlerverhältnis eine maximale Paketfehlerrate erreicht wird.

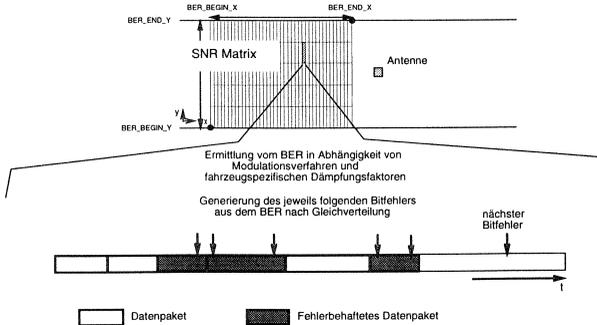


Abbildung 8.7: Bestimmung von Paketfehlern

8.4 Implementierungsaspekte

Im folgenden wird kurz auf einige Implementierungsaspekte des integrierten Simulationsmodells eingegangen. Für eine detaillierte Betrachtung sei auf den Anhang C bzw. auf die Dokumentation in [95] und [92] verwiesen.

8.4.1 Objekt-orientierte Realisierung

Das Simulationsmodell wurde basierend auf der CNCL (ComNets Class Library) [31] als ereignisgesteuertes Simulationswerkzeug in C++ realisiert [84, 56, 60, 12, 37]. Die entsprechende objekt-orientierte Klassenstruktur des entstandenen Simulators SIMCO3++/DSRC ist im Anhang C dargestellt.

Die Protokollimplementierung wurde zum einen von Hand in C++ vorgenommen, zum anderen wurde eine automatische Übersetzung der in Kapitel 5 vorgestellten konformitätsgeprüften SDL-Implementierung (siehe Abschnitt 5.6) eingesetzt (unter Verwendung des am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze entwickelten Übersetzers SDL2CNCL [79]).

8.4.2 Graphische Benutzeroberfläche

Der Einsatz der vorgeschlagenen Methoden wird unterstützt durch eine eigens realisierte, graphische Benutzeroberfläche, die welche die detaillierte Konfiguration und Analyse von Systemsimulationen ermöglicht. Die Benutzeroberfläche beinhaltet die Möglichkeit, den Simulationsablauf in einem Animationsmodus schrittweise nachzuvollziehen, wobei alle wichtigen Systemfunktionen (z.B. Protokollzustände) zugänglich gemacht werden. Abb. 8.8 zeigt eine Kopie der Bedienoberfläche [59].

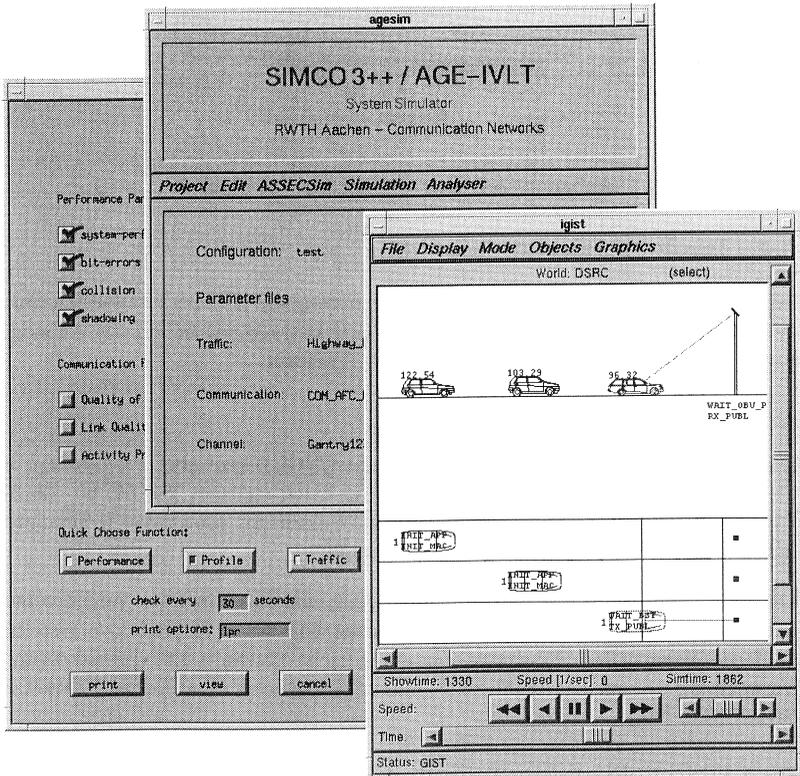


Abbildung 8.8: Graphische Simulationsumgebung

Simulative Leistungsbewertung

Nachfolgend werden Ergebnisse von Leistungsanalysen vorgestellt, die unter Einsatz des Systemsimulators SIMCO3++/DSRC erzielt wurden. Zunächst werden Ergebnisse für DSRC-Systemkonfigurationen erläutert (Optimale Parametrisierung des DSRC- Kanalzugriffsverfahrens, dynamische Anpassung der Sendewahrscheinlichkeit, Vergleich verschiedener Vielfachzugriffsverfahren, Interferenz bei parallelem Betrieb von Anwendungen, Auswirkungen verschiedener Techniken zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung auf die Gesamtleistungsfähigkeit des Systems). Anschließend werden die Ergebnisse für den Vergleich des asynchronen DSRC-Protokolls mit einem synchronen Protokoll (U.S.-amerikanischer Vorschlag) vorgestellt. Abschließend wird das Potential des zukünftigen Einsatzes von dynamisch nachführenden Antennen basierend auf der DSRC-Protokollarchitektur abgeschätzt.

9.1 Analyse von Komponenten und Konfigurationen von DSRC-Systemen

9.1.1 Vergleich verschiedener Parametrisierungen des DSRC- Kanalzugriffsverfahrens

Die Auswahl und Parametrisierung eines geeigneten Kanalzugriffsverfahrens für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation bestimmt wesentlich die Leistungsfähigkeit eines DSRC-Systems und ist daher ausführlich auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht worden [22, 61, 44, 56, 84, 63]. Im wesentlichen geht es dabei um die effiziente Nutzung der durch die Bake in periodischen Abständen zur Verfügung gestellten Public Uplink Windows, auf die Fahrzeuge ohne spezielle Zuweisung zugreifen können (siehe Kapitel 5).

Im Kapitel 6 zur analytischen Protokollbewertung wurden bereits Aussagen in bezug auf die optimale Parametrisierung des DSRC-Kanalzugriffsverfahrens gemacht, die an dieser Stelle mit Ergebnissen aus der Systemsimulation für verschiedene Szenarien verglichen werden sollen. Im folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mechanismen, die Simulationsszenarien und -ergebnisse zusammenfassend vorgestellt.

Mechanismen zur Auswahl der Public Windows Im Laufe der Entwicklung von standardisierten Kommunikationsprotokollen für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation wurden zwei Entscheidungsmechanismen zur Nutzung der Public Windows vorgeschlagen [61]. Beim Persist-Mechanismus entscheidet die OBU jeweils anhand einer vorgegebenen Sendewahrscheinlichkeit p , ob ein

Public Window genutzt wird (vgl. entsprechende LAN-Protokolle, siehe auch Abschnitt 3.4.2.2). Der sog. Random Delay Counter Mechanismus bewirkt, daß die OBU jeweils zufällig ein Public Uplink Window aus einer vorgegebenen Anzahl von Public Windows auswählt (Anzahl der Fenster w , max. Zufallswert R , genaue Beschreibung siehe Kapitel 6).

In Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden sind, vgl. [56], konnte gezeigt werden, daß die Leistungsfähigkeit beider Mechanismen bei entsprechender Parametrisierung (z.B. $p = 0.5$ oder $R = 3$ bei jeweils $w = 6$ Fenstern) praktisch gleich ist. Für den Persist-Mechanismus besteht die - wenn auch sehr unwahrscheinliche - Möglichkeit, daß sich ein Fahrzeug während des Aufenthalts in der Kommunikationszone überhaupt nicht anmeldet, während beim Random Delay Mechanismus eine Nutzung des Public Windows spätestens nach R Fenstern garantiert ist. Dies kann für Fahrzeuge mit hohen Geschwindigkeiten und entsprechend begrenzter Kommunikationszeit entscheidend für den erfolgreichen Abschluß des Kommunikationsprozesses sein. Bei ansonsten gleicher Leistungsfähigkeit gab dieser Aspekt letztlich den Ausschlag für die Entscheidung, den Random Delay Counter Mechanismus (RDC) in den DSRC-Standard aufzunehmen (siehe Kapitel 5). Nachfolgend wird daher nur der RDC-Mechanismus betrachtet.

Wahl von Fensteranzahl w und max. Verzögerungsfaktor R In Kapitel 6 wurde bereits festgestellt, daß der Kanalzugriffsmechanismus für die Parameterkombination $w = 6$ und $R = 3$ einen besonders effizienten Zugriff ermöglicht. Durch den Einsatz des Systemsimulators kann diese Aussage nun anhand verschiedener realitätsnah modellierter Szenarien überprüft werden. Hierzu wird die Fensteranzahl w im Bereich von 1 bis 12, der maximale Zufallswert R im Bereich 1 bis 6 variiert. Für die Untersuchung wird ein reines TDMA System mit einer idealisierten Kommunikationszone, die jeweils alle Fahrspuren erfäßt (6m Länge in Fahrtrichtung, Rechteckcharakteristik), angenommen.

Verkehrsszenarien Das Verkehrsszenario setzt sehr dichten Verkehr auf drei bzw. 12 Spuren voraus¹. Das System muß dabei 5500 Fahrzeuge pro Stunde (3 Spuren) bzw. 22000 Fahrzeuge pro Stunde (12 Spuren) über einen TDMA-Kanal bearbeiten. Zum Vergleich wird jeweils auch das Ergebnis für eine SDMA-Konfiguration, in der parallele Kanäle konkurrenzfreie Uplink-Übertragungen erlauben, ermittelt². Um die max. Kommunikationsdistanz bezüglich 1.000.000 Fahrzeuge diskutieren zu können, wurden pro Simulationslauf 5 Mill. Fahrzeuge simuliert³.

¹Um ein 12-spuriges Szenario zu erzeugen wurde das Szenario A2/NL so erweitert, daß die Charakteristik der mittleren Spur des 3-spurigen Szenarios auf die Spuren 2-11 des 12-spurigen Szenarios übertragen wurden. Die detaillierten Eigenschaften des A2/NL-Szenarios sind im Anhang D zu finden.

²Das SDMA-System wird in Abschnitt 9.1.2 noch detaillierter diskutiert, hier dient es zunächst als Vergleichsmaßstab, da es das bestmögliche Verhalten beschreibt.

³Unter Einsatz verschiedener in [69] beschriebener Verfahren (Bestimmung der Konfidenzintervalle, Batch-Means, LRE Limited Relative Error) wurde eine Analyse der durch den Systemsimulator SIMCO3++/DSRC produzierten Ergebnisse vorgenommen. Dabei zeigte sich, daß die Betrachtung einer max. Kommunikationsdistanz bezogen auf 1.000.000 Fahrzeugen nach einer Simulation der 5-10 - fachen Anzahl der betrachteten Fahrzeuge (d.h. 5-10 Mill. Fahrzeuge) er-

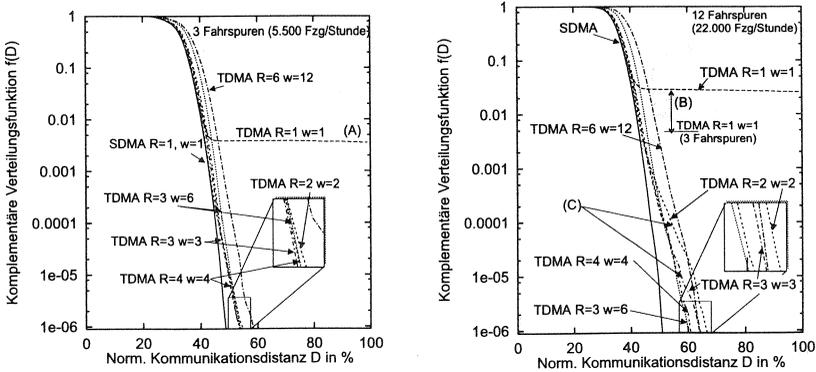


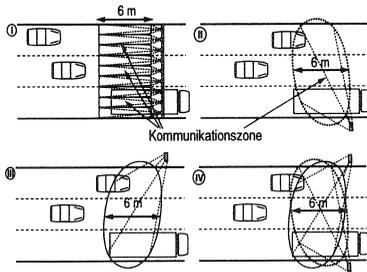
Abbildung 9.1: Ergebnisse für unterschiedliche Parametrisierungen des DSRC-Kanalzugriffsverfahrens (3 Spuren, links; 12 Spuren, rechts)

Anwendungsprotokoll Die hier vorgestellten Ergebnisse berücksichtigen den in Abschnitt 5.7 definierten dialog-orientierten Anwendungsprozess in der Variante mit der zweistufigen Anmeldephase (Dialog A). Die Untersuchungen in Kapitel 6, Abschnitt 6.3.3.2 haben bereits gezeigt, daß diese Variante der einstufigen Variante (Dialog B) vorzuziehen ist.

In Abb. 9.1 sind die Ergebnisse der Simulation für 3 Fahrspuren (links) und 12 Fahrspuren (rechts) dargestellt. Es ist die in Kapitel 8 eingeführte komplementäre Verteilungsfunktion der Kommunikationsstrecke aufgetragen (vgl. Abb. 8.2):

- Es zeigt sich, daß durch den Verzicht auf ein Kollisionsauflösungsverfahren ($w = 1, R = 1$) ca. 0.4 % (für 3 Fahrspuren) bzw. 3 % (für 12 Fahrspuren) der Fahrzeuge von Kollisionen betroffen sind und daher den Kommunikationsprozeß nicht erfolgreich abschließen können (siehe Markierung A und B). Der höhere Prozentsatz bei 12 Fahrspuren erklärt sich durch die höhere Last.
- Sobald für den maximalen Verzögerungswert ein Wert ungleich eins gewählt wird, ergeben sich deutlich verbesserte Resultate, die sich nur noch in der maximal benötigten Kommunikationsstrecke (bezogen auf 1.000.000 Fahrzeuge) unterscheiden (siehe vergrößerte Bereiche in Abb. 9.1):
 - Für das dreispurige Szenario liefern die Kombinationen $w = 2, R = 2$ bis $w = 6, R = 3$ bezogen auf die maximale Kommunikationsdistanz für 1.000.000 Fahrzeuge vergleichbare Ergebnisse, so daß sich keine eindeutige Empfehlung ableiten läßt. Für die Kombination $w = 2, R = 2$ deutet sich jedoch durch ein leichtes Abknicken des Kurvenverlaufs an, daß hier die Auflösung von Datenkollisionen zu Verzögerungen führt.
 - Für das 12-spurige Szenario treten diese Verzögerungen aufgrund des erhöhten Anteils von potentiellen Kollisionssituationen ausgeprägter auf und führen zu einer entsprechend verlängerten max. Kommunikations-

fordert, um eine hohe statistische Sicherheit zu erreichen [106, 12]. Die Konfidenzintervalle sind dann so klein, daß sie sich im Bereich der Strichdicke bewegen.



Konfiguration	I	II,III,IV
Vielfachz.	SDMA	TDMA
Downlink	500 kbit/s	500 kbit/s
Uplink	250 kbit/s	250 kbit/s
No. Downlink Kan.	1	1
No. Uplink Kan.	9	1
No. Pub. Upl. Slots	2	6
Max. RDC	2	3

Auto- bahn	Spur	Stärke Fzg/h	Pkw/Lkw %	km/h (mitt./max)	
				Pkw	Lkw
A 2 / NL	1	1157	78/22	96/160	85/120
A 2 / NL	2	1753	97/3	112/160	87/120
A 2 / NL	3	1683	100/0	120/160	- / -
A 9 / D	1	616	74/26	106/250	87/120
A 9 / D	2	680	93/7	140/250	89/120
A 9 / D	3	411	100/0	168/250	- / -

Abbildung 9.2: Betrachtete Referenzkonfigurationen

Abbildung 9.3: Simulationsparameter

distanz für $w = 2$, $R = 2$ und auch $w = 3$, $R = 3$ (vgl. Markierung C). Es zeigt sich, daß für diesen Extremlastfall das DSRC-Protokoll für Parameterkombinationen mit $3 < w \leq 6$, $R \geq 3$ Datenkollisionen effizient vermeiden und auflösen kann. Durch die Verwendung von mehr als 6 Fenstern und einem entsprechend höheren max. Zufallswert läßt sich keine zusätzliche Verbesserung der Ausnutzung der Kommunikationszone erzielen (z.B. $w = 12$, $R = 6$).

- Im Vergleich zur ebenfalls abgetragenen Referenzkurve für ein System mit der Möglichkeit zur parallelen Übertragung im Uplink (SDMA) ergibt sich für die TDMA-Lösung bei optimierter Parameterwahl insbesondere für den Regelfall von bis zu 3 Fahrspuren nur ein geringfügiger Overhead.

Somit können insbesondere die Kombination $R = 3$ mit 3 oder 6 Fenstern bzw. $R = 4$ mit 4 Fenstern für TDMA-DSRC Systeme empfohlen werden. Diese Schlußfolgerungen decken sich auch mit den Ergebnissen der analytischen Untersuchungen in Kapitel 6. Der im Anhang E dargestellte direkte Vergleich von Simulationsergebnissen mit Ergebnissen der mathematischen Analyse zeigt die gute Übereinstimmung der durch unterschiedliche Methoden gewonnenen Resultate.

Die als Ergebnis der Systemanalyse empfohlenen Parametersätze wurden innerhalb der entsprechenden Standardisierungsgremien vorgestellt und im Standardisierungsentwurf für DSRC-Kommunikationsprofile [70] berücksichtigt. In den nachfolgend diskutierten Ergebnissen wurde in der Regel die Parameterkombination $w = 6$ und $R = 3$ eingesetzt, da diese Parameterkombination in der analytischen wie auch der simulativen Untersuchung ein besonders stabiles Verhalten gegenüber Vielfachzugriffsinterferenzen gezeigt hat.

9.1.2 Vielfachzugriffstechniken

Nachfolgend werden verschiedene Grundkonfigurationen für DSRC-Systeme miteinander verglichen im Hinblick auf die Bedeutung des Einflusses der Vielfachzugriffstechnik im Verhältnis zu szenario-spezifischen Einflüssen durch Abschattung und durch Unterschiede in der Verkehrsflußcharakteristik.

Systemkonfigurationen Für die Analyse der durch die DSRC-Spezifikation unterstützten Vielfachzugriffsverfahren wurden die in Abbildung 9.2 dargestellten Systemkonfigurationen untersucht:

- Die TDM/SDMA/FDMA-Schilderbrücken-Konfiguration (I) stellt sehr schmale Kommunikationszonen zur Verfügung, die ein Auftreten von Datenkollisionen praktisch ausschließen. Selbst wenn sich 2 Fahrzeuge (insbesondere Motorräder) in der Kommunikationszone gleichzeitig aufhalten, werden sie nur hintereinander oder versetzt in die Zone einfahren können. Daher werden Datenkollisionen durch das zeitliche Aufeinanderfolgen des Eintreffens der Fahrzeuge vermieden. Durch die voneinander unabhängigen Uplinkkanäle werden zeitlich parallele Uplinkübertragungen ermöglicht.
- Die Konfigurationen (II) bis (IV) setzen einen reinen TDM/TDMA-Ansatz ein, d.h. Datenkollisionen müssen durch den im DSRC-Standard vorgesehenen Vielfachzugriffsmechanismus behandelt werden. Die Konfigurationen (II) und (III) setzen dabei jeweils nur eine Antenne am rechten bzw. linken Fahrbahnrand ein. Bei der Konfiguration (IV) handelt es sich um eine Diversitätskonfiguration mit 2 Antennen.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden die Eigenschaften des Übertragungskanal wie folgt festgelegt: die Bakenantennen werden in 6 m Höhe installiert, die Länge der Kommunikationszone beträgt 6 m auf Fahrbahnhöhe, es wurden idealisierte Antennendiagramme angenommen, die eine rechteckige Ausleuchtung der Straße gewährleisten. Die Referenzbitfehlerwahrscheinlichkeiten betragen 10^{-6} im Downlink und 10^{-5} im Uplink [90, 91, 93].

Protokollparameter Die Protokollparameter werden gemäß der in Abschnitt 5.8 eingeführten Referenzimplementierungen sowie unter Berücksichtigung der in Kapitel 6 und Abschnitt 9.1.1 gemachten Untersuchungen zur optimalen Parametrisierung des Kanalzugriffsverfahrens festgelegt. In der Abbildung 9.3 sind die ausgewählten Parameter zusammengefaßt. In diesem Abschnitt wird zunächst nur die Einzelanwendung AFC betrachtet. In Abschnitt 9.1.3 werden zusätzlich Ergebnisse zu Mehrfachanwendungen vorgestellt.

Verkehrsszenario Für die hier vorgestellten Untersuchungen werden die Daten für sehr dichten Verkehr auf einer dreispurigen Autobahn (A2/NL, Pendlerverkehr) sowie für eine ebenfalls dreispurige Autobahn mit niedriger Dichte, dafür aber höheren Geschwindigkeiten (A9/D) betrachtet. Die wesentlichen Kenndaten sind der unteren Tabelle in Abbildung 9.3 zu entnehmen.

In der Abbildung 9.4 sind die Ergebnisse für die zuvor vorgestellten Szenarien, die unter Anwendung des Systemsimulators SIMCO3++/DSRC untersucht wurden, dargestellt. Es ist wiederum die komplementäre Verteilungsfunktion der zum erfolgreichen Abschluß der Anwendung benötigten Kommunikationsdistanz dargestellt. Folgende Ergebnisse lassen sich festhalten (bezogen auf 1.000.000 Fahrzeuge und das A2 Szenario):

Konfiguration I (SDMA/FDMA): Da keine Verzögerungen durch Datenkollisionen auftreten und der Uplink parallel genutzt werden kann, erzielt diese Konfiguration mit einer maximal benötigten Kommunikationsstrecke von 44 % die besten

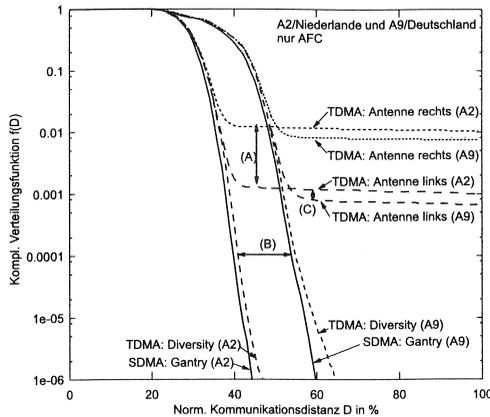


Abbildung 9.4: Ergebnisse für interaktiven Dialog (AFC)

Ergebnisse. Der Einfluß von Abschattungen ist in dem hier angenommenen fließenden Verkehr aufgrund der auftretenden longitudinalen Fahrzeugabstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen nicht von Bedeutung (Nettoabstand größer 3 m).

Konfiguration II und III (TDMA/Einzelle Antenne): für beide Konfigurationen läßt sich ein starker Einfluß von Abschattungen durch Fahrzeuge auf benachbarten Spuren erkennen, der den hier zu erwartenden Einfluß der Datenkollisionen um ein Vielfaches übersteigt. Es werden Fehlerraten von 1 % (rechts installierte Antenne) und 0.1 % (links installierte Antenne) beobachtet. Der Unterschied zwischen diesen Ergebnissen (siehe Markierung A) läßt sich dadurch erklären, daß aufgrund der fahrspurspezifischen Zusammensetzung der Fahrzeugtypen (Verhältnis Pkw/Lkw) bei der rechts installierten Bake insbesondere Pkw auf der mittleren und linken Spur durch Abschattungen durch Lkw auf der rechten Spur betroffen sind. Insgesamt sind die auftretenden Fehlerraten für viele Anwendungen (insbesondere AFC) deutlich zu hoch.

Konfiguration IV (TDMA/Raumdiversität): Durch den Einsatz zweier Antennen kann der Einfluß der Abschattung weitgehend reduziert werden. Nur durch den notwendigen Einsatz des Kollisionsauflösungsverfahrens ergibt sich eine geringfügig vergrößerte Kommunikationsstrecke gegenüber der Konfiguration I (47 % für das A2 Szenario gegenüber 44 %).

Der Einfluß unterschiedlicher Verkehrscharakteristika kann durch die Einbeziehung der Ergebnisse für das A9-Szenario diskutiert werden:

Geschwindigkeiten: Durch die höheren Spitzengeschwindigkeiten für das A9 Szenario (bis zu 250 km/h) erhöht sich die maximal benötigte Kommunikationsstrecke auf 59 % (gegenüber 44 %) für die SDMA Konfiguration (siehe Markierung B in Abb. 9.4).

Verkehrsstärke: Der Unterschied in der Verkehrsstärke (die Verkehrsstärke auf der A9 ist deutlich niedriger als für das A2-Szenario) macht sich vor allem in den Konfigurationen II und III bemerkbar, da diese stark durch Abschattungseffekte beeinflusst sind: durch die geringere Dichte verringert sich der Einfluß der Abschattungen geringfügig (siehe Markierung C).

9.1.3 Gegenseitige Beeinflussung bei paralleler Unterstützung mehrerer Anwendungen

Ausgehend von den oben beschriebenen Konfigurationen I (SDMA/FDMA) und IV (TDMA/Diversität) werden im folgenden Ergebnisse für die gegenseitige Beeinflussung verschiedener parallel abgewickelter Dienste diskutiert [56, 98, 93, 97]. Diese Fragestellung ist insofern von großem Interesse für zukünftige Betreiber mautfinanzierter Straßen, da sie auf diese Weise die primär zur Durchführung der elektronischen Gebührenerhebung installierten DSRC-Systeme auch für andere Dienste, sog. Mehrwertdienste, nutzen können. So kann sich durch die Übermittlung von ortsbezogenen Verkehrs- und Reiseinformationen und die gleichzeitige Erfassung von Reisezeiten ein Zusatznutzen für die Verkehrsteilnehmer ergeben (TTI). Bei einer entsprechenden parallelen Nutzung durch mehrere Dienste genießt die elektronische Gebührenerhebung in der Regel die höchste Priorität. Im Abschnitt 5.8 wurde ein entsprechender Protokollablauf für eine dialog-orientierte Anwendung (AFC) und eine broadcast-orientierte Anwendung (TTI) eingeführt. Im Kapitel 6 wurde bereits analytisch gezeigt, daß eine Fragmentierung der TTI-Broadcastnachricht so vorgenommen werden sollte, daß die Größe eines Schicht 2-Rahmens nicht überschritten wird. Somit wird im folgenden von einer Fragmentierung in 16 Pakete zu je 1000 bit ausgegangen ⁴.

Nachfolgend werden die in der Systemsimulation erzielten Ergebnisse diskutiert (basierend auf dem A2 Szenario und bezogen auf jeweils 1.000.000 Fahrzeuge). In der Abbildung 9.5 ist die maximal benötigte Kommunikationsstrecke jeweils für die Einzelanwendungen (hell dargestellt) sowie für die kombinierte Anwendung (dunkel dargestellt) abgetragen:

Einfluß auf den höher priorisierten Dienst (AFC): Die Ergebnisse zeigen, daß die AFC-Anwendung bei der hier zugrunde gelegten Dimensionierung nur geringfügig durch den zusätzlichen Dienst (TTI) beeinflusst wird. Dies gilt für beide hier betrachteten Konfigurationen (SDMA/FDM wie auch reines TDMA).

Einfluß auf den niedriger priorisierten Mehrwertdienst: Beim Vergleich zwischen den Ergebnissen für die Einzelanwendung und den kombinierten Dienst wird deutlich, daß sich die maximal benötigte Kommunikationsdistanz im parallelen Betrieb erwartungsgemäß deutlich vergrößert. Die Abb. 9.6 verdeutlicht anhand des Aktivitätsprofils der DSRC-Übertragungsstrecke (Definition siehe Abschnitt 8.1.1.2), daß sich die broadcast-orientierte Anwendung in drei Phasen aufteilt: Ein Teil der Broadcastdaten kann bereits vor dem Beginn der AFC-Anwendung

⁴In Abschnitt 9.2 werden später noch Ergebnisse für unterschiedliche Fragmentierungen diskutiert.

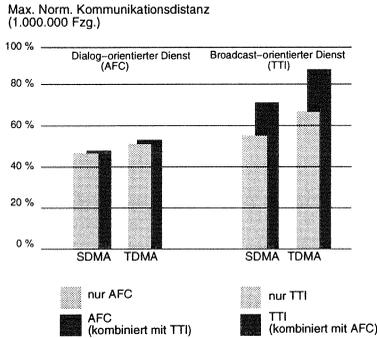


Abbildung 9.5: Interferenz zwischen den Anwendungen

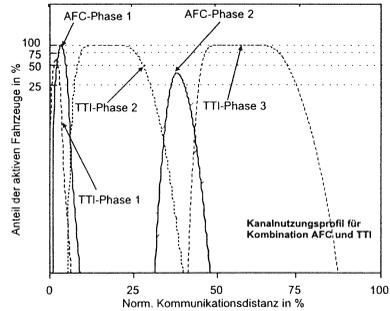


Abbildung 9.6: Aktivitätsprofile bei kombinierten Anwendungen

(TTI-Phase 1) empfangen werden, dann wird die TTI-Anwendung zugunsten der AFC-Anwendung unterbrochen, um während der Chipkartenoperation der AFC-Anwendung wieder aufgenommen zu werden (TT-Phase 2). Es folgt eine weitere Unterbrechung durch die AFC-Anwendung, um dann schließlich in der Phase 3 die TTI-Anwendung zum Abschluß zu bringen.

Kapazität für zusätzliche Dienste: Die Ergebnisse zeigen auch, daß die Konfiguration IV (reines TDMA) aufgrund des für die Kollisionsauflösung eingeführten Overheads über eine geringere Kapazität für zusätzliche Dienste verfügt: im kombinierten Modus ergibt sich für die TTI-Anwendung eine maximal benötigte Kommunikationsstrecke von 86 % verglichen mit 70 % für die SDMA/FDMA-Konfiguration. Insgesamt sind jedoch beide Konfiguration sehr gut in der Lage, zusätzliche Dienste anzubieten, ohne daß die Zuverlässigkeit der AFC-Anwendung signifikant beeinträchtigt wird.

9.1.4 Dynamische Anpassung der Protokollparameter unter Berücksichtigung des Kanalzustands

Der DSRC-Standard geht in der Regel von einer statischen Einstellung der Fensteranzahl w und des max. Verzögerungswertes R aus, d.h. das System wird für die 'worst-case' Situation eines sehr dichten Verkehrs dimensioniert. Bereits in Abschnitt 5.3.5 wurde der mögliche Einsatz von adaptiven Verfahren zur Anpassung an den Kanalzustand diskutiert. Diese Überlegungen sollen hier wieder aufgegriffen und eine entsprechende Erweiterung des DSRC-Standards vorgeschlagen werden.

Zwei Aspekte spielen dabei eine besondere Rolle. Zum einen verursacht das Kollisionsauflösungsverfahren vermeidbare Verzögerungen für der großen Anteil der Fahrzeuge, die die Kommunikationszone unbehindert durch Vielfachzugriffsinterferenzen passieren. Weiterhin durchfahren die Fahrzeuge beim Einfahren in die Kommunikationszone eine Übergangszone, in der die Kanalqualität zunächst nur schrittweise besser wird (vgl. Antennencharakteristik mit stark überdehntem Übergangsbereich,

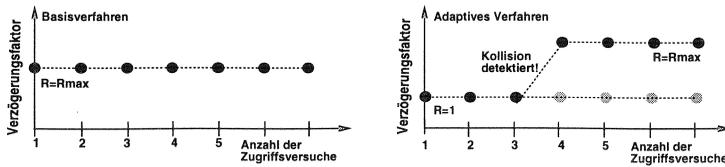


Abbildung 9.7: Kanalzugriffsverfahren mit konstantem max. Verzögerungswert R (links) und mit dynamischer Anpassung nach Auftreten einer Datenkollision

Abschnitt 4.5). Diese Zone kann effizienter genutzt werden, wenn eine OBU nach dem Empfang der ersten BST zunächst mit hoher Sendewahrscheinlichkeit zu senden beginnt und nur im Falle einer Datenkollision die Sendewahrscheinlichkeit verringert. Der hier untersuchte adaptive Mechanismus versucht also, die nutzbare Kommunikationszone zu vergrößern.

Dynamische Anpassung der Sendewahrscheinlichkeit Der adaptive Mechanismus sieht vor, daß die OBU bei der Einfahrt in die Kommunikationszone zunächst jedes angebotene Public Window nutzt, d.h. der max. Verzögerungswert R wird zu Eins gesetzt. Sobald eine Vielfachzugriffskollision aufgetreten ist, verringert die OBU diese Eingangssendewahrscheinlichkeit (R wird also z.B. von 1 auf $R_{max} = 3$ erhöht). Die Anzahl der angebotenen Fenster w bleibt dabei konstant. Der hier untersuchte Mechanismus ist in Abb. 9.7 verdeutlicht.

Da die OBU sich nicht gegenseitig hören können, schließt die OBU im einfachsten Fall aus der ausbleibenden Bestätigung der Bake bei einer vorherigen Uplinkübertragung auf das Auftreten einer Kollision. In schlechten Übertragungskanälen ist jedoch oft ein zu schwacher Pegel der Grund für eine nichterfolgreiche Übertragung im Uplink. Somit erscheint - wie bereits in Abschnitt 5.3.5 ausgeführt - eine Anpassung der Sendewahrscheinlichkeit besonders sinnvoll, wenn das System zwischen Datenkollisionen und Bitfehlern aufgrund von zu schwachem Pegel unterscheiden kann. Aus diesem Grund wird nachfolgend als eine Option betrachtet, daß die Bake aufgrund des empfangenen Signalpegels entscheiden kann, ob als Grund für eine fehlerhafte Übertragung eine Kollision in Frage kommt (Channel Sensing). Als Teil eines modifizierten MAC-Steuerfeldes überträgt die Bake diese Information an die Fahrzeuge zusammen mit der Zuweisung eines frei zugänglichen Übertragungsfensters.

Untersuchte Szenarien Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 9.1.1 gewonnenen Erkenntnisse wird das Verfahren im folgenden für die Parameterkombination $w = 6, R = 3$ im statischen Modus (Basisverfahren) sowie im adaptiven Modus mit und ohne Channel Sensing auf der Basis des bereits eingeführten AFC-Protokolls und dem A2-Verkehrsszenarium untersucht.

Zum Vergleich wird auch der bereits im DSRC-Standard vorgeschlagene adaptive Mechanismus mituntersucht (siehe Abschnitt 9.1.1), der allerdings nur eine reduzierte Funktionalität bietet: das Verfahren sieht nur den Fall $w = 1$ vor und verzichtet auf eine Channel Sensing Funktion. Hier wird dieses Verfahren für die Kombination $w = 1, R = 4$ betrachtet.

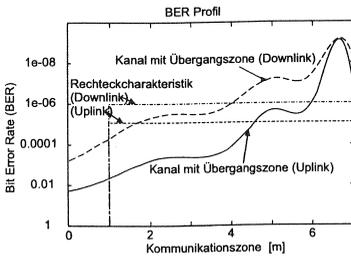


Abbildung 9.8: BER-Profil

Um die grundsätzlichen Eigenschaften der Verfahren besser identifizieren zu können, werden die Untersuchungen zunächst für einen Übertragungskanal mit idealisierter Rechteckcharakteristik und einer homogenen Verteilung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit durchgeführt (BER 10^{-6} , 6 m Länge). Das eigentliche Ziel der Untersuchungen ist es jedoch, die Wirkungsweise der adaptiven Verfahren in einem Kanal mit Übergangszone aufzuzeigen: hier wird entsprechend eine realitätsnah modellierte Antennen zugrunde gelegt. In Abb. 9.8 sind die BER-Profile des zugrunde gelegten Übertragungskanals dargestellt. Die BER-Profile zeigen, daß die Kanalqualität im Downlink in der Übergangszone deutlich besser ist als für den Uplink (diese Unsymmetrie ist durch das Transponderprinzip begründet). D.h. in der Übergangszone kann die OBU die Bake empfangen, während die Bake die OBU noch nicht störungsfrei empfangen kann. Zum Vergleich ist auch das BER-Profil für den idealisierten Kanal mit Rechteckcharakteristik dargestellt.

Simulationsergebnisse Die Abb. 9.9 zeigt die Ergebnisse für den idealisierten Kanal (Rechteckcharakteristik) und den Kanal mit Übergangszone. Unter Berücksichtigung der in der Graphik besonders hervorgehobenen bzw. markierten Bereiche unterstützen die Ergebnisse folgende Aussagen:

- Für den Kanal mit Rechteckcharakteristik zeigt das Protokoll für $w = 1$ in der adaptiven Variante zunächst Vorteile gegenüber der statischen Variante: ca. 99.9 % der Fahrzeuge sind in der Lage, die Kommunikation in einer bis zu 4 % kürzeren Kommunikationsdistanz abzuschließen (32 % vs 36 % max. Kommunikationsdistanz bezogen auf 99.9 % der Fahrzeuge) (vgl. Markierung A).
- Bei der Betrachtung seltener Ereignisse ist allerdings festzustellen, daß die adaptiven Verfahren für den idealisierten Kanal nicht grundsätzlich die besten Ergebnisse erzielen können: die insgesamt kürzeste max. Kommunikationsdistanz bezogen auf 1.000.000 Fahrzeuge ergibt sich für das Basisverfahren $w = 6, R = 3$ (vgl. Markierung B). Dies liegt darin begründet, daß die es bei den adaptiven Verfahren immer erst zur Kollision kommen muß, bis die Kollisionsauflösung einsetzt, während die statischen Verfahren aufgrund der konstant reduzierten Sendewahrscheinlichkeit in der Lage sind, Kollisionen bereits im Vorfeld zu verhindern.
- Für den realitätsnahen Kanal mit Übergangszone und unsymmetrisch verteilter Kanalqualität in Downlink und Uplink zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Der zuvor sichtbare Vorteil durch die Verwendung nur eines Fensters ($w = 1$) in Kombination mit dem adaptiven Verfahren ist nicht mehr sichtbar (vgl. (C) mit (A) in der Graphik). Der Grund hierfür liegt in der anfangs sehr schlechten Übertragungsqualität im Uplink: selbst wenn die Anmeldung im Vergleich zu

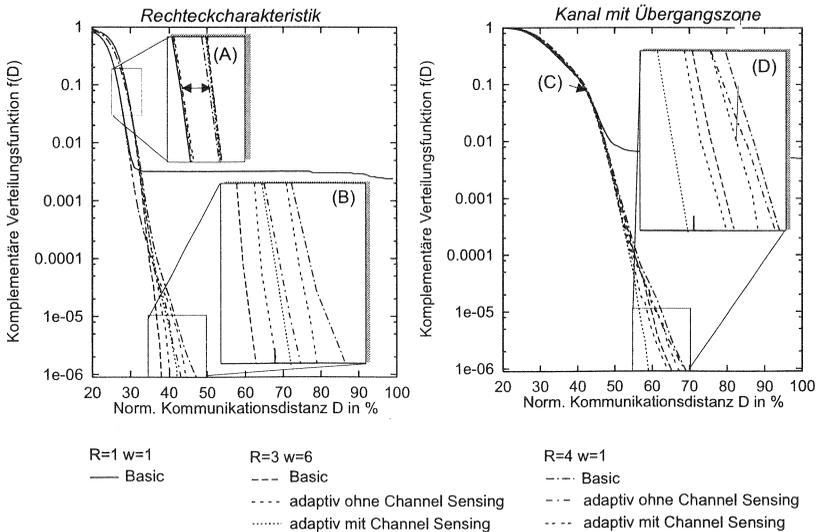


Abbildung 9.9: Adaptives Kanalzugriffsverfahren: Ergebnisse (Kanal mit Rechteckcharakteristik (links), Kanal mit Übergangsbereich (rechts))

einem Protokoll mit einer anderen Parametrisierung schneller erfolgt, so wird die nachfolgende Kommunikation zwischen Bake und OBU so stark behindert, daß daraus im Hinblick auf die insgesamt benötigte Kommunikationsdistanz zunächst kein Vorteil abzuleiten ist.

- Der Vorteil der adaptiven Verfahren zeigt sich allerdings für die Betrachtung der maximalen Kommunikationsdistanz bezogen auf 1.000.000 Fahrzeuge. Anhand des vergrößert dargestellten Bereichs (Markierung D) wird deutlich, daß die adaptiven Protokolle in der Lage sind, die Kommunikationszone besser auszunutzen, insbesondere unter Einsatz des Channel Sensings. Das beste Ergebnis wird erzielt unter Verwendung der Parametrisierung $w = 6, R = 3$ in Kombination mit Channel Sensing (59 % max. Kommunikationsdistanz im Vergleich zu 65 % für das statische Verfahren).

Zukünftige Erweiterung des DSRC-Standards Für die zukünftige Erweiterung des DSRC-Standards sind folgende Schlußfolgerungen abzuleiten:

- Die adaptive Anpassung der Sendewahrscheinlichkeit beim Zugriff auf Public Windows ist für DSRC-Systeme ohne Channel Sensing mit nur geringen Leistungsverbesserungen verbunden und damit keine mit Dringlichkeit einzuführende Funktionalität. Ein Zugriff mit einem optimal konfigurierten statischen Verfahren führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Der im DSRC-Standard bereits vorgesehene adaptive Mechanismus für $w = 1$ kann nur für Kanäle mit annäherender Rechteckcharakteristik und Anwendungen mit mittleren Anforderungen an die Dienstgüte der Kommunikation empfohlen werden.

- In Kombination mit der oben vorgeschlagenen Channel Sensing Funktion kann die Leistungsfähigkeit der adaptiven Anpassung gesteigert werden. Hierzu ist eine Erweiterung des DSRC-Standards notwendig. Die Channel Sensing Funktion kann über eines der 4 noch freien Bits im DSRC MAC Steuerfeld der Bake ermöglicht werden (vgl. Abschnitt 5.3.2). Dieses Kollisions-Bit wird zu 1 gesetzt, wenn die Bake eine Datenkollision detektiert hat. Sobald die OBU das Kollisions-Bit empfangen hat, wird der maximale Zufallswert von 1 auf den im Kommunikationsprofil vorgegebenen Wert erhöht. Dieser Wert wird dann innerhalb einer Bakeninstallation beibehalten. Dieser Algorithmus ist unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig mit der BST angebotenen Fenster einsetzbar.
- Eine schrittweise Einführung der Funktion wäre möglich, da OBU's ohne die Option zur adaptiven Anpassung unbeeinflusst die Kommunikation durchführen können. Für OBU's mit adaptiver Anpassung ergibt sich jedoch, wie hier demonstriert, eine weitere Verbesserung der Zuverlässigkeit der Kommunikation.

9.1.5 Antennenkonfigurationen und Übertragungstechnik

Nachfolgend wird anhand eines Beispiels demonstriert, wie sich der Einsatz von den in Kapitel 4 diskutierten Maßnahmen zur Verbesserung der Funkfeldausleuchtung auf das Gesamtsystem auswirkt [60, 12, 94].

9.1.5.1 Analyse des Einsatzes von Diversitätstechniken

Für die nachfolgend vorgestellte Analyse des Einsatzes von Diversitätstechniken wird ein Szenario mit 2 Fahrspuren und einem hohen Lkw-Anteil (rechte Spur 48 %, linke Spur 4 %) zugrunde gelegt (A430, vgl. Anhang D). Für die Antenneninstallation stehen zwei seitliche Positionen in 4 m Höhe sowie eine Position in der Mitte beider Fahrbahnen in 6 m Höhe zur Verfügung (vgl. typische Ampelkonfiguration). Die Ausleuchtungsbereiche der zum Einsatz kommenden Bakenantennen sind in Abb. 9.10 angedeutet. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird die Kommunikationsdistanz auf jeweils 10 m normiert.

Zunächst wird auf die Wirkungsweise der Makrodiversität auf Bakenseite eingegangen. Danach wird die Verbesserung der Systemleistung durch den Einsatz von Mikrodiversität auf Fahrzeugseite erläutert.

Makrodiversität (auf Bakenseite) In Abschnitt 9.1.2 wurde bereits gezeigt, daß eine wesentliche Auswirkung der Makrodiversität in der Reduktion der Einflüsse durch Abschattungen liegt. Hier sollen nun die Auswirkungen der Makrodiversität insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung der Kanalqualität analysiert werden. In Abb. 9.11 sind die Ergebnisse der hier untersuchten unterschiedlichen Konfigurationen (für zirkulare Polarisation) dargestellt. Der Ausgangspunkt der Untersuchung ist eine Konfiguration, für die mit nur einer Bakenantenne (Antenne 2) ein unbefriedigendes Ergebnis erzielt wird (vgl. Markierung A). Die zuvor alleine eingesetzte Bakenantenne 2 wird nun ergänzt durch Antennen auf der Position 1 bzw. 3. Erkennbar wird, daß durch die Diversitätskonfiguration eine Verbesserung der Systemleistung erzielt werden kann (Markierung B). Die Kombination 2/3 liefert etwas

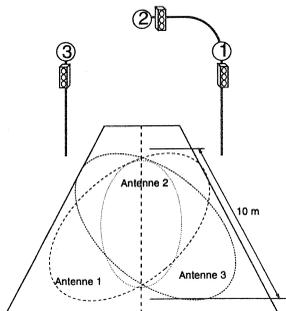


Abbildung 9.10: Ampel-Anordnung

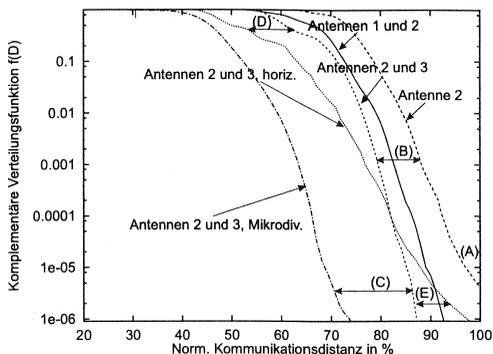


Abbildung 9.11: Ergebnisse für verschiedene Systemkonfigurationen

günstigere Ergebnisse, da hier durch die zusätzliche Antenne am linken Fahrbahnrand insbesondere die schnelleren Fahrzeuge auf der linken Fahrspur unterstützt werden.

Mikrodiversität (fahrzeugseitig) Wie in Kapitel 4 bereits gezeigt, führt der Einsatz von Mikrodiversität zu einer Anhebung des Signalpegels, allerdings nur in bestimmten Raumbereichen. Die in Abb. 9.11 dargestellten Ergebnisse für einen OBU-Antennenabstand von 5 cm zeigen, daß die Kommunikation hierdurch deutlich früher beendet werden kann (siehe Markierung C).

9.1.5.2 Vergleich Polarisationsverfahren (zirkular/horizontal)

Das im vorhergehenden Abschnitt eingeführte Szenario wird nun so modifiziert, daß horizontale anstatt der im DSRC-Standard vorgesehenen zirkularen Polarisation angenommen wird (für die Antennenkombination 2/3, vgl. Abb. 9.10). Wie sich bereits in Kapitel 4 gezeigt hat, sind damit destruktive (Fadingeinbrüche), aber auch konstruktive Interferenzen verbunden. Im Gegensatz dazu bietet das Funkfeld für zirkuläre Polarisation eine gleichmäßigere Verteilung der Signalpegel.

Die in Abb. 9.11 gegenübergestellten Ergebnisse zeigen, daß die konstruktiven Interferenzen von vielen Fahrzeugen dazu genutzt werden können, die Kommunikation mit der Bake bereits früher zu beenden (vgl. Markierung D), d.h. durch die Motorhaubenreflektion verlängert sich die nutzbare Kommunikationszone. Für einige Fahrzeuge jedoch führen die Fadingeinbrüche zu zusätzlichen Verzögerungen, so daß letztendlich die maximale Kommunikationsdistanz gegenüber der Systemlösung mit zirkularer Polarisation ansteigt (vgl. Markierung E). Für Anwendungen, die eine sehr zuverlässige Kommunikation benötigen, ist somit die im DSRC-Standard getroffene Wahl der zirkularen Polarisation die zu bevorzugende Variante.

9.2 Untersuchung eines US-amerikanischen Alternativvorschlages

Im Rahmen der Entwicklung des US-amerikanischen *Intelligent Vehicle Highway Systems (IVHS)*-Programms wurde 1993 in [36] ein synchrones TDMA-Protokoll für die Fahrzeug-Baken-Kommunikation vorgeschlagen. Die zunächst proprietäre vollständige Spezifikation wurde 1996 als ASTM⁵-Standardisierungsvorschlag veröffentlicht [6]. Die Ergebnisse eines detaillierten Leistungsvergleichs, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt [91, 90] wurde, werden nachfolgend vorgestellt.

9.2.1 Rahmenstruktur *Open-Road Frame*

Im Gegensatz zum in der Regel asynchron betriebenen DSRC-Protokoll sieht das in [36] vorgeschlagene TDMA-Protokoll eine feste Rahmenstruktur vor. Da das Protokoll speziell für *multi-lane* Umgebungen (siehe Abschnitt 3.2.5) vorgesehen ist, wird die Rahmenstruktur als *Open Road Frame* bezeichnet. Folgende Elemente sind charakteristisch (siehe auch 9.12):

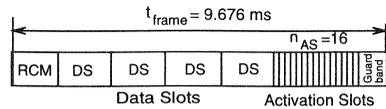


Abbildung 9.12: Vorschlag für eine synchrone Rahmenstruktur

RCM - Reader Control Message Die von der Bake ausgesendete RCM dient der Synchronisierung der Fahrzeuge. Außerdem wird den Fahrzeugen mitgeteilt, wie die nachfolgenden Zeitschlitz (Slots) belegt sind. Neu in die Kommunikationszone einfahrende Fahrzeuge finden hier außerdem Informationen über die spezifischen Parameter des Kanalzugriffsverfahrens.

Data Slots Nach der RCM folgen eine feste Anzahl gleichgroßer Zeitschlitz, die abhängig von der in der RCM mitgeteilten Belegung für Downlinkübertragungen durch die Bake oder für Uplinkübertragungen der in der RCM adressierten Fahrzeuge genutzt werden können.

Activation Slots Die Rahmenstruktur wird abgeschlossen durch eine Reihe sehr kurzer Zeitschlitz, die von den Fahrzeugen zur Anmeldung und Anforderung von Übertragungskapazität im Rahmen eines zufalls gesteuerten Zugriffs genutzt werden können.

Ein Vergleich mit der DSRC-Spezifikation zeigt, daß verwandte Grundmechanismen zur Anwendung kommen:

- Die Activation Slots entsprechen den Public Uplink Windows.
- Die Data Slots entsprechen den Private Windows, die Reservierung der Data Slots für individuelle Uplinkübertragungen erfolgt ebenfalls durch die Bake.
- Die RCM übernimmt eine zur BST verwandte Funktion, d.h. durch sie wird insbesondere der Anmeldevorgang ausgelöst.

Somit lassen sich die bereits eingeführten Referenzimplementierungen für die DSRC-Protokolle entsprechend auch auf den *Open Road Frame* abbilden (siehe [91]).

⁵American Society for Testing and Materials

9.2.2 Vergleich mit dem asynchronen DSRC-Protokoll

Für die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse wurde die Diversitätskonfiguration IV (siehe Abschnitt 9.1.2), d.h. eine reine TDMA-Konfiguration im 3-spurigen Autobahnzenarium, zugrunde gelegt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde die Parametrisierung des *Open Road Frames* auf die bereits eingeführten Referenzkonfigurationen angepaßt (für die Datenmengen und Verarbeitungszeiten der einzelnen Anwendungsprozesse siehe Abschnitt 5.8).

Wie bereits in Abschnitt 9.1.3 eingeführt, wurden auch hier der interaktive Dialog (vergleichbar mit AFC) sowie die broadcast-orientierte Anwendung (vergleichbar mit TTI) sowohl als Einzelanwendung wie auch als kombinierte Anwendung betrachtet, wobei der interaktive Dialog mit einer höheren Priorität bearbeitet wird. Aufgrund der bereits angesprochenen Verwandtschaft der Protokolle hinsichtlich der Grundmechanismen konnten folgende Festlegungen gemacht werden:

- Die frei zugänglichen Zeitfenster des DSRC-Protokolls (*Public Windows*) und des *Open Road Frames* (*Activation Slots*) sind gleich groß. Bei einer separat vorgenommenen Analyse [56] für die optimale Anzahl der Zeitfenster ergab sich, daß für eine Anzahl von 6 Zeitfenstern und einen maximalen Zufallswert von 3 der Einfluß von Datenkollisionen für die hier vorgenommene Vergleichsuntersuchung vernachlässigt werden kann.
- Die Größe der Zeitfenster zur Übertragung von individuellen Daten, die *Data slots* des *Open Road Frames* sind so bemessen, daß das größte Datenpaket unfragmentiert übertragen werden kann. Beim DSRC-Protokoll können die Datenfenster für individuell adressierte Übertragungen (*Private Windows*) aufgrund der Asynchronität jeweils an die tatsächliche Datenmenge angepaßt werden.
- Die Länge der RCM wurde entsprechend der Größe der BST gewählt.

Eine wichtige Überlegung für den Vergleich der Protokolle ist, inwieweit sich der durch eine feste Rahmenstruktur eingeführte Overhead auf die Leistungsfähigkeit des Systems auswirkt. Denn immer dann, wenn keine Anwendungsdaten zu übertragen sind, bleiben Datenslots leer und verzögern dadurch den Protokollablauf. Auf der anderen Seite kann eine nicht ausreichende Anzahl von Datenslots für den Fall, daß gleichzeitig mehrere Fahrzeuge zu bedienen sind, ebenfalls zu unerwünschten Verzögerungen führen. Dies gilt insbesondere für den Fall der bereits für das DSRC-Protokoll betrachteten Abwicklung paralleler Anwendungen. Somit wurden die Parameter der Protokolle für die Untersuchung wie folgt variiert:

- Das synchrone Protokoll wird mit jeweils einer unterschiedlichen Anzahl von *Data Slots* (Anzahl 1 bis 4) betrieben, d.h. die Größe der Rahmenstruktur wird variiert, wodurch sich auch die Aussendefrequenz der RCM ändert.
- Für das asynchrone DSRC-Protokoll wird die Fragmentierung des im Broadcast übertragenen Datenpakets (insgesamt 16 kbit) variiert, um den Einfluß der broadcast-orientierten Anwendung auf den interaktiven Dialog zu beobachten (Variation von $16 \cdot 1$ kbit bis $4 \cdot 4$ kbit). Je größer die Einzelpakete sind, umso niedriger wird die Aussendefrequenz der BST (da sich die erneute Aussendung

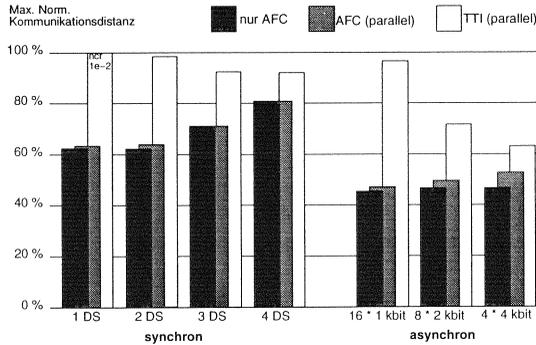


Abbildung 9.13: Vergleich synchrones vs. asynchrones Protokoll; BER 10^{-6}

einer BST jeweils um die Dauer der Übertragung des Broadcast-Datenpakets verzögert, siehe auch Abschnitt 9.1.3).

Die Abbildungen 9.13 und 9.14 zeigen die Ergebnisse jeweils für eine sehr gute Kanalqualität (Referenzbitfehlerverhältnis BER 10^{-6}) und eine reduzierte Kanalqualität (Referenzbitfehlerverhältnis BER 10^{-4}). Gezeigt wird jeweils die maximal benötigte normierte Kommunikationsstrecke (bezogen auf 1.000.000 Fahrzeuge) für die dialogorientierte Einzelanwendung (nur AFC) sowie für den Fall der parallelen Abwicklung für die dialog- wie auch die broadcast-orientierte Anwendung (AFC (parallel), TTI (parallel)). Können einige Fahrzeuge die Kommunikation nicht erfolgreich abschließen, so beträgt die maximal benötigte Kommunikationsstrecke 100 %, und es wird die entsprechende Nichterfolgsrate (ncr) angegeben.

Aus den Ergebnisse lassen sich folgende Schlüsse für die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Protokolle ziehen (zunächst wird nur das Szenario mit der guten Kanalqualität betrachtet, siehe Abb. 9.13):

- Für die *dialog-orientierte Einzelanwendung* (nur AFC) zeigt sich, daß sich für die asynchrone Variante eine maximale Kommunikationsdistanz von 44 % ergibt. Die Ergebnisse für das synchrone Protokoll hängen erwartungsgemäß sehr stark von der Anzahl der Datenslots und dem dadurch eingeführten Overhead ab. Für mehr als zwei Datenslots steigt die maximal benötigte Kommunikationsdistanz deutlich an (bis zu ca. 80 % für vier Datenslots), da die zusätzlichen Datenslots zur Datenübertragung benötigt werden und damit nur zur verzögerten Anmeldung der Fahrzeuge führen. Die Ergebnisse für ein und zwei Datenslots sind jedoch fast gleich (62 % bzw. 63 %), was sich wie folgt begründen läßt:

Wird nur ein Datenslot verwendet, so ist dies eine optimale Konfiguration für den Fall, daß sich nur ein Fahrzeug anmeldet; der einzelne Datenslot reicht dann gerade aus, um die Anwendungsdaten zu transportieren. Melden sich allerdings zwei oder sogar drei Fahrzeuge gleichzeitig über die Aktivierungsslots an, so verzögert sich die Abwicklung entsprechend, da jeweils nur ein Datenslot zur

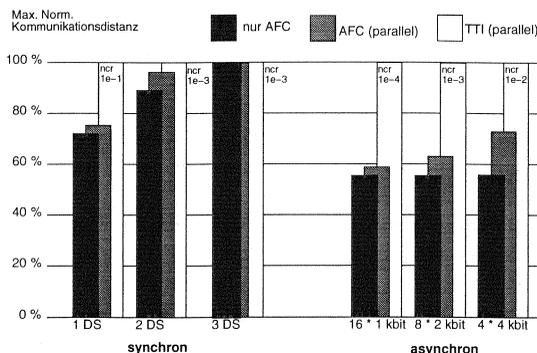


Abbildung 9.14: Vergleich synchrones vs. asynchrones Protokoll; BER 10⁻⁴

Verfügung steht. Werden hingegen zwei Datenslots verwendet, so wird dadurch zwar für den 'Normalfall' des einzelnen Fahrzeugs ein Overhead eingeführt, jedoch können dann die seltenen Fälle mit Mehrfachanmeldungen schneller abgewickelt werden. Insgesamt jedoch ist die maximal benötigte Kommunikationsdistanz von 62 % auch bei optimaler Konfiguration höher als beim asynchronen Protokoll.

- Für den Fall des *parallelen Betriebs der Anwendungen* (AFC und TTI parallel) zeigt sich die unterschiedliche Beeinflussung der höher priorisierten AFC-Anwendung für unterschiedliche Parametrisierungen der Protokolle. Beim synchronen Betrieb wird die AFC-Anwendung praktisch nicht von der zusätzlichen Broadcast-Anwendung TTI beeinflusst, da sie die vorher ungenutzten Datenslots nutzen kann, ohne die AFC-Anwendung zu behindern. Für die TTI Anwendung wirkt es sich dagegen günstig aus, möglichst viele Datenslots pro Rahmenstruktur zu verwenden: wird nur ein Datenslot zur Verfügung gestellt, so ist die Interferenz mit der AFC-Anwendung so groß, daß nicht alle Fahrzeuge die TTI-Anwendung erfolgreich abschließen können (Nichterfolgsrate 1 %). Für vier Datenslots läßt sich die maximal benötigte Kommunikationsstrecke für TTI bis auf 90 % verringern. Da das asynchrone Protokoll die Übertragungskapazität bereits für die Einzelanwendung optimal nutzt, läßt sich beim parallelen Betrieb erwartungsgemäß ein gewisser Einfluß auf die AFC-Anwendung feststellen (vgl. auch Abschnitt 9.1.3): je gröber die Fragmentierung der Broadcast-Daten ist, umso mehr steigt die maximal benötigte Kommunikationsstrecke der AFC-Anwendung an (zwischen einem und fünf Prozent) und umso schneller kann im Gegenzug die TTI-Anwendung abgewickelt werden (maximale Kommunikationsstrecke von 96 bis zu 63 %). Trotz dieser Einflüsse ist festzuhalten, daß das asynchrone Protokoll für die hier betrachteten Szenarien insgesamt deutlich effizienter arbeitet.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die reduzierte Kanalqualität (siehe Abb. 9.14) zeigt sich, daß für Szenarien, in denen eine wiederholte Übertragung von

Datenpaketen notwendig ist, das asynchrone Protokoll dem synchronen Protokoll überlegen ist. Insbesondere für die priorisierte AFC-Anwendung wird der mit jeder wiederholten Übertragung eingeführte Overhead durch einen signifikanten Anstieg der maximalen Kommunikationsstrecke erkennbar: während bei einer fehlerhaften RCM sowohl Datenslots als auch Aktivierungsslots verloren gehen, führt der Verlust einer BST nur dazu, daß die frei zugänglichen Public Windows nicht genutzt werden können.

Insgesamt läßt sich also schluffolgern, daß durch die Verwendung des im ASTM-Entwurf vorgeschlagenen synchronen Ansatzes in den hier betrachteten Szenarien deutliche Abstriche bezüglich der optimalen Ausnutzung der Kapazität der Kommunikationszone gemacht werden müssen. Insbesondere die im ASTM-Vorschlag genannte Anzahl von vier Datenslots erscheint zumindest für europäische Verhältnisse (in der Regel bis zu 3 Fahrspuren) überdimensioniert (siehe Abb. 9.12).

Beim parallelen Betrieb mehrerer Anwendungen läßt sich als Vorteil des synchronen Protokolls die festgestellte Stabilität des Leistungsniveaus der höher priorisierten Anwendung anführen, d.h. bei entsprechend großzügigerer Dimensionierung der Kommunikationszone kann eine weitgehend gleichbleibende Leistungsfähigkeit garantiert werden. Auch in diesem Fall erscheinen jedoch 2 oder 3 Datenslots angemessen.

Die vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen, warum der DSRC-Standard auch in den U.S.A. zunehmend auf Interesse stößt [24]. Der DSRC-Standard ist vor allem auch deshalb eine attraktive Basis für die Harmonisierung der unterschiedlichen Vorstellungen in den U.S.A. und Europa, da er grundsätzlich auch die Möglichkeit zu einem synchronen Betrieb bietet.

9.2.3 Realisierung eines synchronen Protokollablaufs auf der Basis des DSRC- Konzeptes

Wie oben gezeigt wurde, führt der asynchrone Betrieb des DSRC-Protokolls zu einer optimalen Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität, insbesondere für die Schlüsselanwendung der elektronischen Gebührenerhebung (AFC). In bestimmten Szenarien könnte es jedoch erwünscht sein, das DSRC-Protokoll auch synchron zu betreiben⁶. Weiterhin bietet sich durch das Aufzeigen von synchronen Umsetzungen des DSRC-Protokolls ein Ansatzpunkt für eine mögliche Integration des synchronen ASTM-Ansatzes in das DSRC-Konzept im Rahmen der internationalen Standardisierung (ISO TC 204).

Wie in Abschnitt 5.5 erläutert, wird der Protokollablauf durch die Bake gesteuert, insbesondere wird die BST von der Bake regelmäßig ausgesendet, wobei der Aussendemechanismus durch die individuelle Implementierung festgelegt wird, d.h. nicht standardisiert ist. Bei der asynchronen Realisierung wird der Aussendzeitpunkt jeweils so angepaßt, daß Anwendungsdaten zunächst bevorzugt abgewickelt werden;

⁶Zum Beispiel für Szenarien, in denen die Fahrzeuge regelmäßig über eine straßenseitig installierte Bakeninfrastruktur Warnhinweise und Statusinformationen austauschen. Aufgrund der notwendigen Dichte der Baken ist dann ein synchroner Betrieb zur Reduktion von Nachbarkanalstörungen sinnvoll

allerdings muß eine Mindestaussendefrequenz eingehalten werden, um Anmeldungen zusätzlicher Fahrzeuge zu ermöglichen. Die Grundlage für die Realisierung einer synchronen Rahmenstruktur wird somit durch die synchrone Aussendung der BST gelegt. Nach der BST schließen sich unmittelbar die frei zugänglichen Fenster an (d.h. in diesem Punkt ändert sich die Rahmenstruktur gegenüber dem ASTM-Ansatz). Bis zur erneuten Aussendung einer BST kann die Bake entweder eigene Downlinkübertragungen vornehmen oder durch entsprechende Reservierungsanweisungen Uplinkübertragungskapazität zur Verfügung stellen (Private Window Reservations). Allerdings muß jedes Uplinkfenster einzeln reserviert werden (auch dies ist eine Änderung gegenüber dem ASTM-Ansatz, da hier die Nutzung der Datenslitze eines Rahmens schon durch die RCM festgelegt wird). Die Abbildung 9.15 zeigt eine mögliche Variante eines so erzeugten DSRC-Rahmens.

Somit wurde gezeigt, daß auch mit dem DSRC-Ansatz grundsätzlich eine synchrone Realisierung des Protokollablaufs möglich ist. Eine allgemeine Verwendung einer festen DSRC-Rahmenstruktur ist jedoch nicht sinnvoll, da - wie oben gezeigt - ein asynchroner Betrieb aufgrund der Anpassungsfähigkeit an ein spezifisches Szenario eine deutlich bessere Leistungsfähigkeit zeigt.

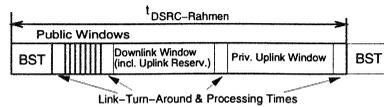


Abbildung 9.15: Realisierung einer synchronen DSRC-Rahmenstruktur

9.3 Untersuchung des Einsatzes adaptiver Antennen

Die bisher betrachteten Systemkonfigurationen bezogen sich auf den Einsatz von Shaped-Beam-Antennen, die eine vorgegebene Kommunikationszone gleichmäßig ausleuchten. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Antennentypen im Zusammenspiel mit entsprechenden Kanalzugriffsprotokollen sehr gut geeignet sind, Anwendungen wie die elektronische Gebührenerhebung (Kommunikation und Lokalisierung) zu unterstützen, allerdings ist eine entsprechende, straßenseitige Infrastruktur (Schilderbrücken o.ä.) vorzusehen.

In [20] wird der Einsatz von adaptiven Antennen vorgeschlagen, die in der Lage sind, durch einen adaptiv nachgeführten sehr schmalen Ausleuchtungsbereich (Pencil beam) jeweils ein Fahrzeug zu versorgen. Im Abschnitt 4.2.2 wurde eine entsprechende Charakteristik vorgestellt.

Unter der Voraussetzung, daß die eingesetzten Antennen zuverlässig nachgeführt werden können, bieten sich folgende Vorteile durch die Reduktion von Vielfachzugriffsinterferenz und Störeinflüssen durch Mehrwegeausbreitung:

- Da jeweils nur ein Fahrzeug von einer Antennenkeule versorgt wird, können auf OBU-Seite entsprechend vereinfachte Protokolle ohne Kollisionsauflösungsvermögen verwendet werden. Durch die in [20] vorgeschlagene Technik kann der Einfluß von Nebenkeulen zusätzlich abgesenkt werden.

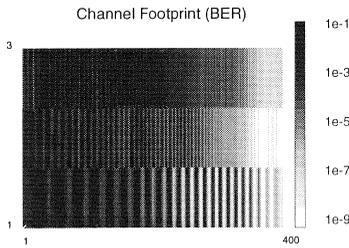


Abbildung 9.16: BER Shaped Beam

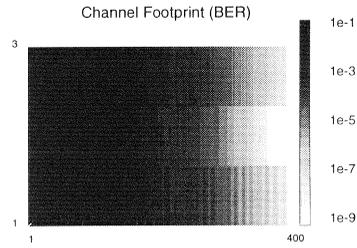


Abbildung 9.17: BER Pencil Beam

- Störeinflüsse durch Reflexionen von Nachbarfahrzeugen und statischen Reflektoren werden weitestgehend reduziert.

Um die dadurch zu erzielende Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Systems in einer Umgebung mit extremen Einflüssen durch Reflexionen abschätzen zu können, wurde der System Simulator eingesetzt. Dabei wurde ein 'worst-case'-Szenario mit sehr dichtem Verkehr und zusätzlichen Reflektoren (parkende Fahrzeuge, metallische Schallschutzwand) angenommen. Zu Vergleichszwecken wird von stark vereinfachten Systemrandbedingungen ausgegangen:

Es wird ein einfaches Shaped-Beam basiertes System angenommen, wobei eine Antenne alle 3 Fahrspuren versorgt, vgl. Abschnitt 4.2.1.3). Es werden hier keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verbesserung des Funkfeldes, wie z.B. Mikrodiversität, eingesetzt. Für das System mit dynamisch nachführenden Antennen wird von einem idealen Nachführalgorithmus ausgegangen, d.h. die OBU-Antenne befindet sich jeweils in der Hauptstrahlrichtung der sich der Bewegung des Fahrzeugs anpassenden Pencil Beam Antenne. Vielfachzugriffsinterferenzen treten nicht auf. Daher werden bei der Abwicklung des Kommunikationsprozesses nur Public Windows eingesetzt, eine individuelle Zuweisung von Übertragungskapazität im Uplink erübrigt sich.

Unter Einsatz der in Kapitel 4 und 8 vorgestellten Methoden kann das Funkfeld und daraus entsprechend die Kanalqualität als BER-Matrix für Shaped Beam- wie auch Pencil Beam-Antenne abgeleitet werden. In Abb. 9.16 und 9.17 sind beispielhaft die Bitfehlermatrizen für die Durchfahrt eines einzelnen Fahrzeugs dargestellt. Die Normierung der Bitfehlerwahrscheinlichkeiten wurde so vorgenommen, daß dem jeweils höchsten Signalpegel eine BER von 10^{-9} zugeordnet wird. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich die in den Abbildungen 9.16 und 9.17 dargestellten BER-Matrizen (Auflösung 3 Fahrspuren in y-Richtung). Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, werden die Unterschiede der Systemkonfigurationen vor allem durch die unterschiedliche Homogenität in der Verteilung der BER gekennzeichnet. Der Einfluß der Mehrwegeausbreitung ist für die Pencil Beam Variante stark reduziert, da durch die engstrahlende Charakteristik nur der gewünschte Ausleuchtungsbereich der Kommunikationszone erfaßt wird.

Abbildung 9.18 zeigt die Simulationsergebnisse. Durch die konstruktiven Überlagerungen ergibt sich bei der Shaped Beam Antenne ein etwas früherer Kommuni-

kationsbeginn gegenüber der Pencil Beam Variante. Die Inhomogenität der BER-Verteilung führt aber insgesamt zu einer deutlich stärkeren Auslastung der Kommunikationszone.

Die vorgenommene Untersuchung hat somit gezeigt, daß die durch adaptive Antennen unterstützte homogene Ausleuchtung der Kommunikationszone eine zuverlässigere Kommunikation ermöglicht, als eine durch destruktive Interferenzen gekennzeichnete inhomogene Ausleuchtung.

Bei der zukünftigen Entwicklung dieses Systemansatzes steht vor allem die Realisierung des Antennensystems und der Nachführalgorithmen im Vordergrund. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte DSRC-Kommunikationsarchitektur ist bereits heute in der Lage, diesen Systemansatz

zu unterstützen. Insbesondere die Kanalzugriffsprotokolle können so angepaßt werden (durch die ausschließliche Verwendung von Public Uplink Windows), daß die Vorteile des Systemansatzes seitens des Kommunikationssystems ausgenutzt werden können. Besonders attraktiv sind adaptive Antennen aber vor allem auch deswegen, weil sie neben der zuverlässigen Kommunikation ohne zusätzlichen Aufwand eine exakte Lokalisierung der OBU's ermöglichen (vgl. Abschnitt 3.2.4).

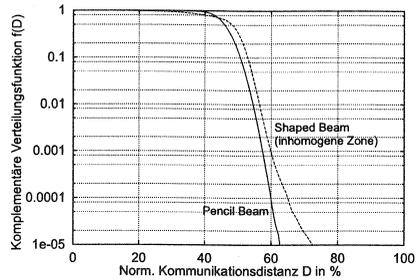


Abbildung 9.18: Vergleich einer Shaped Beam Antenne mit einer ideal nachführenden Antenne (Pencil Beam)

Zusammenfassung und Ausblick

Der im Rahmen der europäischen Standardisierung (CEN) unter Mitwirkung des Autors erarbeitete Dedicated Short-Range Communications (DSRC)-Standard beschreibt ein neuartiges Mobilfunksystem für den Einsatz in der Verkehrsleittechnik (Fahrzeug-Baken-Kommunikation), das ergänzend zu Zellularfunksystemen entwickelt wurde. Durch die begrenzte Kommunikationszone sind DSRC-Systeme speziell dazu geeignet, den individuellen Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und der straßenseitigen Infrastruktur bei gleichzeitiger Ortungsmöglichkeit zu unterstützen (z.B. für die elektronische Gebührenerhebung). Ergänzend stehen Zellularfunksysteme für Anwendungen der Verkehrsleittechnik, die eine flächendeckende Versorgung erfordern, zur Verfügung (z.B. Flottenmanagement).

Viele europäische Länder besitzen bereits heute Vorstufen von DSRC-Systemen (Italien, Frankreich, Norwegen, Portugal) bzw. planen oder untersuchen deren Einführung vor allem für Lkw, teilweise auch für Pkw (Österreich, Niederlande, Großbritannien und Deutschland). Daß bereits 10 europäische Hersteller DSRC-basierte Systeme entwickeln, zeigt die große Akzeptanz der entstandenen Spezifikation. Bedingt durch Umsetzung einer EU-Richtlinie ist abzusehen, daß bis zum Jahre 2002 die für den Güterverkehr innerhalb Europas bestehenden Vignettensysteme zur Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren durch entsprechende elektronische Systeme ersetzt werden.

Der für die Einführung erforderliche Nachweis der Erfüllung der hohen Anforderungen an die Dienstgüte der DSRC-Kommunikation (max. Fehlerrate 10^{-6} für AFC) machte die Entwicklung neuer, über Labor- und Feldtests hinausgehender Leistungsbewertungsmethoden notwendig.

Die Beiträge der hier vorgelegten Arbeit beziehen sich auf die Entwicklung und Implementierung von neuen Methoden zur Leistungsanalyse von DSRC-Systemen sowie deren Anwendung zur Durchführung von DSRC-Systemanalysen.

Die Entwicklung von Leistungsbewertungsmethoden für DSRC-Protokolle mußte dabei die besonderen Bedingungen des Einsatzes im Straßenverkehr berücksichtigen. Der im Rahmen der Arbeit entstandene stochastische Systemsimulator SIMCO3++/DSRC zeichnet sich deshalb durch ein Fahrzeugmobilitätsmodell aus, das anhand von vorliegenden Meßdaten von Autobahnen in Deutschland und den Niederlanden validiert werden konnte. Spezielle Fahrzeuggenerierungsprozesse gewährleisten dabei, daß die für die Systemanalyse wichtige fahrzeugtyp-spezifische Bildung von Fahrzeugverbänden realitätsgetreu nachgebildet wird. Der Systemsimulator berücksichtigt weiterhin die durch die Mobilität der Fahrzeuge bedingten spezifischen Einflüsse auf den Übertragungskanal durch Abschattungen, Mehrwegeaus-

breitung und Vielfachzugriffsinterferenz. Ein neu entwickeltes DSRC-spezifisches Antennen- und Ausbreitungsmodell erlaubt im Vorfeld der Systemsimulation die detaillierte deterministische Analyse der Eigenschaften des Funkfeldes von DSRC-Systemen im Mikrowellenbereich (5.8 GHz). Die Integration von formal spezifizierten Protokollarchitekturen ermöglicht schließlich eine Bewertung verschiedener Protokollvarianten und Parametrisierungen unter Berücksichtigung der realitätsnah modellierten Umgebung.

Die so entstandenen Methoden sind im Rahmen der Arbeit eingesetzt worden zur:

- Unterstützung der Systementwicklung von DSRC-System-Herstellern
- Erarbeitung und Bewertung von Beiträgen für die Standardisierung von DSRC-Systemen in CEN TC 278 WG 1 und WG 9, speziell zur Definition der Kanalzugriffsmechanismen und zur Spezifikation der Anwendungsprozesse
- Durchführung von Machbarkeitsstudien von zukünftigen Systembetreibern zum Nachweis der hohen Zuverlässigkeit von DSRC-Systemen (speziell AGE-Systemen, z.B. Rekening Rijden¹ Projekt des niederländischen Verkehrsministeriums)
- Validierung von DSRC-Systemen unterschiedlicher Hersteller im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts VASCO (Validation of Dedicated Short-Range Communications)

Wesentliche Ergebnisse dieser Analysen sind z.B. die Auswahl des Kanalzugriffsverfahrens für den DSRC-Standard sowie Realisierungsempfehlungen für die zeitkritische Anmeldephase für unterschiedliche Systemumgebungen. Es konnte gezeigt werden, daß ein Systemansatz mit ausschließlicher Behandlung von Mehrfachankünften durch ein effizientes TDMA-Protokoll eine mit einem SDMA-Systemansatz vergleichbare Dienstgüte erzielen kann. Für beide Fälle wird die geforderte max. Fehlerrate von 10^{-6} (bezogen auf die AFC-Anwendung) deutlich unterschritten (auch unter Extremlastbedingungen).

Die Untersuchung von Verfahren zur dynamischen Anpassung der Sendewahrscheinlichkeiten an den Kanalzustand zeigte, daß für Übertragungskanäle mit einer ausgeprägten Übergangscharakteristik eine deutlich verbesserte Ausnutzung der Kommunikationszone erzielt werden kann. Hierfür ist es allerdings erforderlich, daß die Bake Informationen über den Kanalzustand an die Fahrzeuge überträgt. In diesem Zusammenhang wird eine entsprechende Erweiterung des DSRC-Standards vorgeschlagen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, wie dem Einfluß von Abschattungen, der bei ungünstiger seitlicher Positionierung zu Fehlerraten im Bereich von mehreren Prozent führen kann, durch entsprechende Antennenkonfigurationen begegnet werden kann. Es wurde weiterhin demonstriert, welchen Einfluß die Wahl der Übertragungstechnik (Polarisation, Mikrodiversität) auf das Verhalten des Kommunikationssystems hat.

Die Untersuchung einer vom Autor vorgeschlagenen kombinierten Durchführung von unterschiedlich priorisierten Anwendungsprozessen zeigte, daß DSRC-Systeme bei entsprechender Konfiguration in der Lage sind, mehrere Dienste parallel abzuwickeln, ohne daß die Zuverlässigkeit des höher priorisierten Dienstes darunter leiden

¹Rechnungserstellung während des Fahrens', d.h. elektronische Gebührenerhebung

muß. Dies ist von Bedeutung im Hinblick auf die in vielen Ländern zu beobachtende Entwicklung, daß die Hauptmotivation von Autobahnbetreibern für die Installation von DSRC-Systemen oft in der elektronischen Gebührenerhebung liegt, es jedoch für Betreiber und Verkehrsteilnehmer sinnvoll und akzeptanzerhöhend sein kann, die dann bestehende DSRC-Infrastruktur auch für andere Dienste (z.B. Reiseinformationen oder Verkehrsdatenerhebung) zu nutzen.

Die Untersuchung eines in den U.S.A. vorgeschlagenen rein synchronen Protokolls zeigte weiterhin, daß der für DSRC-Systeme gewählte Ansatz eines asynchronen Protokolls aufgrund der besseren Adaptierbarkeit dem rein synchronen Ansatz überlegen ist.

Die simulative Leistungsbewertung wurde ergänzt durch mathematische Analysen, durch die insbesondere Voruntersuchungen zum Einfluß der Kanalqualität auf das Kanalzugriffsverfahren sowie eine Bestätigung der Simulationsergebnisse ermöglicht wurden.

Im Rahmen der Implementierung des DSRC-Standards für die Leistungsbewertung liegt als Ergebnis der Arbeit eine formale SDL-Spezifikation der DSRC-Protokolle vor. Außerdem wurden DSRC-Konformitätsprüfungen nach ISO 9646 entwickelt. Weiterführende Arbeiten liegen u.a. im Bereich der Entwicklung eines echtzeit-fähigen Testsystems, welches die Anwendung der DSRC-Konformitätsprüfungen auf kommerzielle DSRC-Systeme, die bis Ende 1997 verfügbar sein werden, ermöglicht.

Im Zuge der Einführung von Verkehrsleitsystemen ist zu erwarten, daß die hier eingeführten Methoden in den kommenden Jahren vor allem zur Systemauswahl durch Straßenbetreiber sowie zur Weiterentwicklung der DSRC-Systemkonzepte zum Einsatz kommen werden. Mit der Verfügbarkeit von DSRC-Systemen für Labor- und Feldtests wird es möglich sein, die Parametrisierung der Systemmodelle durch die Auswertung von zusätzlichen Messungen weiter zu verfeinern. Durch die Kombination der Simulationsmethoden mit der Durchführung von Messungen am realen System zur Gewinnung von Eingabeparametern für die Simulation steht somit eine kostengünstige und zuverlässige Methodik zur Bewertung unterschiedlicher DSRC-Systemlösungen zur Verfügung.

Abkürzungsverzeichnis

AGE	Automatische Gebührenerhebung
AFC	Automatic Fee Collection
AK	Arbeitskreis
APDU	Application Protocol Data Unit
ASDU	Applikation Service Data Unit
ASN.1	Abstract Syntax Notation One
ASP	Abstract Service Primitive
ATM	Abstract Test Method
ATS	Abstract Test Suite
BER	Basic Encoding Rules (siehe ASN.1) oder Bit Error Rate
BIT	Basic Interconnection Test
B-KE	Broadcast Kernel Element
BNF	Backus Naur Form
BP	Broadcast Pool
BST	Beacon Service Table
CCITT	Comité Consultatif International des Télégraphes et Téléphones
CEN	Comité Européen de Normalisation
C/R	Command/Response
CW	Continious Wave
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DRG	Dynamic Route Guidance
DSRC	Dedicated Short-Range Communications
ETS	Executable Test Suite
FIFO	First In First Out
FM	Fleet Management
F/P	Final/Poll

GKE	Grundkommission Elektrotechnik
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
IDVM	Integriertes Dynamisches Verkehrsmanagement
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
I-KE	Initialisation Kernel Element
ISO	International Standards Organisation
ITU	International Telecommunications Union
IUT	Implementation Under Test
LLC	Logical Link Control
LPDU	LLC Protocol Data Unit
LSDU	LLC Service Data Unit
LT	Lower Tester
MAC	Medium Access Control
MOT	Means of Testing
MP	Machine Processable
OBE	On-Board Unit
OSI	Open Systems Interconnection
P	Poll
PATS	Parameterized Abstract Test Suite
PCO	Point of Control and Observation
PCTR	Protocol Conformance Test Report
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packed Encoding Rules
PETS	Parameterized Executable Test Suite
PICS	Protocol Implementation Conformance Statement
PIXIT	Protocol Implementation Extra Information For Testing
PM	Parking Management
RDC	Random Delay Counter
RR	Response Request

RSE	Roadside Equipment
RTDMA	Random Time Division Multiple Access
RTTT	Road Traffic and Transport Telematics
SAP	Service Access Point
SATS	Selected Abstract Test Suite
SCS	System Conformance Statement
SCTR	System Conformance Test Report
SDL	Specification and Description Language
SDMA	Space Division Multiple Access
SDU	Service Data Unit
SUT	System Under Test
TC	Technical Committee
TCP	Test Coordination Procedure
TDMA	Time Division Multiple Access
TET	Transport Expert Team
T-KE	Transport Kernel Element
TMP	Test Management Protocol
TTCN	Tree and Tabular Combined Notation
TTI	Traveller and Traffic Information
UT	Upper Tester
WG	Working Group
VASCO	Validation of Dedicated Short-Range Communications
VST	Vehicle Service Table

Übersicht: DSRC-Standardisierung

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die verschiedenen Standardisierungsgremien im Bereich der Verkehrsleittechnik gegeben [103]:

DIN GK 717 Auf nationaler Ebene ist in Deutschland seit 1989 die Kommission 'Interaktives Dynamisches Verkehrsmanagement (IDVM)' (DIN GK 717) aktiv. Die Kommission setzt sich aus Vertretern der Industrie (Automobil und Elektronik, z.B. Robert Bosch GmbH, Siemens AG, Adam Opel AG, etc.), der Behörden (z.B. Bundesanstalt für Straßenwesen) sowie von Hochschulen (RWTH Aachen) zusammen. Parallel zur Bildung fachspezifischer Arbeitsgruppen in den europäischen Standardisierungsgruppen wurden entsprechende 'Spiegel'-Arbeitskreise, gebildet, die die nationalen Beiträge in den europäischen/internationalen Gremien harmonisieren. Besonders aktiv sind die Arbeitskreise AK 1 (Automatische Gebührenerhebung AGE, seit 1993) sowie AK 9 (Dedicated Short-Range Communications, seit 1991).

Befasste sich der Arbeitskreis anfangs vornehmlich mit der Anwendung der Verkehrsleittechnik im Straßenverkehr, so werden seit 1996 zunehmend auch Fragen der Unterstützung der Integration der verschiedenen Verkehrsträger durch die Verkehrsleittechnik (Verkehrstelematik) betrachtet.

CEN TC 278 Als Ergebnis einer Expertengruppe (*Transport Expert Team TET*, die sich aus Vertretern der in Europa für elektrotechnische Systeme und deren Anwendung zuständigen Standardisierungsinstituten CEN (*Comité Européen de Normalisation*), CENELEC (*Comité Européen des Normalisation Electro-techniques*) und ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) zusammensetzte [25], wurde 1992 das Technische Komitee CEN TC 278 *Road Traffic and Transport Telematics* (RTTT) gegründet. Das TC 278 befaßt sich mit der Standardisierung der Dienste, Datenbanken und Schnittstellen im Bereich der Verkehrsleittechnik [1]. Ergänzend dazu befassen sich die Arbeitsgrup-

	allgemein	elektrische Geräte	Telekommunikation
International	ISO TC 204 (seit 93)	IEC TC 96 (nicht aktiv)	ITU-T
Europa TET (92)	CEN TC 278 (seit 92)	CENELEC TC 114	ETSI RES 8
National (z.B. Deutschland)	DIN GK 717 (seit 89/90)		FTZ

Abbildung B.1: Übersicht der Standardisierungsgremien im Bereich der Verkehrsleittechnik

pen von CENELEC und ETSI mit allgemeinen funktechnischen Eigenschaften (Störstrahlung, etc.) der zum Einsatz kommenden Systeme (siehe Abb. B.1). Über die nationalen Standardisierungsinstitute werden entsprechende Experten in die einzelnen CEN TC 278 Arbeitsgruppen entsandt. Die Struktur und die Aufgabengebiete der Arbeitsgruppen sind in der Abb. B.2 (linke Seite) dargestellt.

ISO TC 204 Als Ergebnis der weltweiten Aktivitäten im Bereich der Einführung von Verkehrsleitsystemen wurde 1993 innerhalb der ISO ein Komitee zur Standardisierung von Verkehrsinformations- und Steuerungssystemen (*Traffic Information and Control Systems* (TICS) eingerichtet (ISO 204, siehe Abb. B.2 (rechte Seite). Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt schon fortgeschrittenen Arbeiten der CEN-Arbeitsgruppen, wurde für einige Arbeitsgruppen vereinbart, daß die europäische CEN-Arbeitsgruppe eine Leitungsfunktion übernimmt, und ISO-Mitglieder aus nicht-europäischen Staaten (insbesondere aus Japan, den USA und Australien) jeweils als Gäste an den entsprechenden Treffen der europäischen Arbeitsgruppe teilnehmen können. Dies betrifft insbesondere die DSRC-relevanten Bereiche (CEN TC 278 WG1 (AFC) und WG9 (DSRC) bzw. ISO TC 204 WG 5 und WG 15).

Die wesentlichen Ergebnisse der bisherigen Arbeit der Standardisierungsgremien in bezug auf die Fahrzeug-Baken-Kommunikation sind (Stand Anfang 1997):

CEN TC 278 WG 9 Die Spezifikationen für eine standardisierte Funkschnittstelle für den Einsatz in der Verkehrsleittechnik, der *Dedicated Short-Range Communications* DSRC-Standard [71, 72, 73, 74, 70],

CEN TC 278 WG 1 die Spezifikation für standardisierte Anwendungsprotokolle für die elektronische Gebührenerhebung [54] und

CEN TC 278 WG 4 die Spezifikation für die Datenformate und Protokolle für Verkehrs- und Reiseinformationen [89].

Im Rahmen des EU-Projekts **VASCO** (*Validation of Dedicated Short-Range Communications*) wird seit Anfang 1996 unter Beteiligung der führenden europäischen Hersteller für DSRC-Systeme eine umfangreiche Validierung des DSRC-Standards vorgenommen [17]. Dabei kommen insbesondere die in dieser Arbeit beschriebenen simulativen Methoden (SIMCO3++/DSRC) zum Einsatz.

CEN TC 278

Road Traffic & Transport
Telematics (RTTT)

ISO TC 204

Transport Information & Control
Systems (TICS)

Dienste/Anwendungen

WG 1	Automatic Fee Collection (AFC)	Automatische Gebührenerhebung	Fee & Toll Collection	WG 5
WG 2	Freight- & Fleetmanagement	Fracht- & Flottenmanagement	General Fleet Management Commercial Fleet / Freight Management	WG 6 WG 7
WG 3	Public Transport	Öffentlicher Personenverkehr & Notfalldienstbevorrechtigung	Public Transport/Emergency	WG 8
WG 4	Individual Traffic Information	Individuelle Verkehrsinformation & Navigation	Traveller Information Systems Route Guidance & Navigation Systems	WG 10 WG 11
WG 5	Traffic Control	Verkehrslenkung	Integrated Transport Info, Management & Control Vehicle Roadway Warning & Control Systems	WG 9 WG 14
WG 6	Parking Management	Parkraumbewirtschaftung	Parking Management / Off-Road Commercial	WG 12
WG 12	Automatic Vehicle & Equipment Identification	Automatische Fahrzeugerkennung	Automatic Vehicle & Equipment Identification	WG 1.4

Datenbanken

WG 7	Geographic & Road Databases	Geographische & Straßendatenbanken	TICS Database Technology	WG 3
WG 8	Road Data – Elaboration/Storage/ Distribution	Straßendaten – Erhebung/ Speicherung/Verteilung		

Schnittstellen

WG 9	Dedicated Short-Range Communications DSRC	Nahbereichsfunkkommunikation	Dedicated Short-Range Communications for TICS	WG 15
–	<i>Behandlung als Teil der Anforderungen an Dienste (WG1–WG6, WG 12)</i>	Weitbereichskommunikation (Rundfunk, Zellularfunk, Datenfunk, etc.)	Wide-Area Communications Protocols & Interfaces	WG 16
WG 10	Man – Machine Interfaces	Mensch–Maschine Schnittstellen	Human Factors & Man–Machine Interface	WG 13
WG 11	Subsystem & Intersystem Interfaces	Unter- und Zwischen-systemschnittstellen	<i>Behandlung in WG4</i>	

Querschnittsaufgaben

WG 13	Architecture & Terminology	Architektur und Terminologie	Architecture	WG 1
–	<i>Behandlung als Teil der Anforderungen an Dienste (WG1–WG6, WG 12)</i>	Qualitäts- & Zuverlässigkeitsanforderungen	Quality & Reliability Requirements	WG 2

Abbildung B.2: Arbeitsgruppen in CEN TC 278 und ISO TC 204

Objekt-orientierte Implementierung

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Software wurde nach der objekt-orientierten Entwurfsmethode entwickelt und implementiert [13]. Im folgenden wird der Aufbau des Systemsimulators SIMCO3++/DSRC sowie des Ausbreitungsmodellierungswerkzeugs ASSECSim beschrieben.

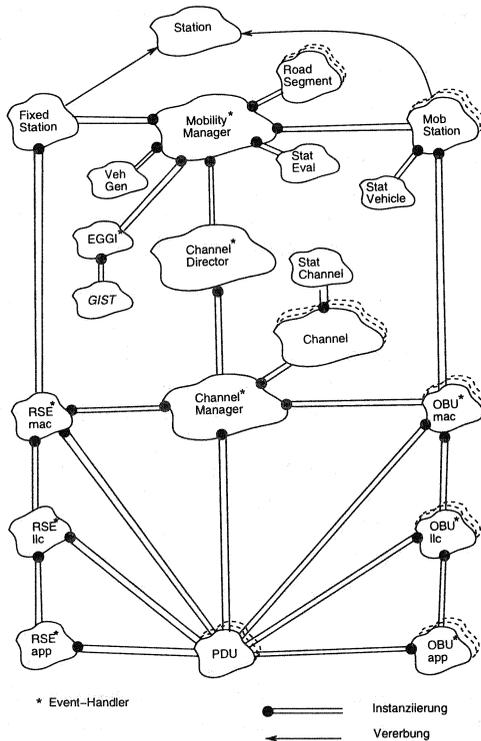


Abbildung C.1: Klassen-Hierarchie SIMCO3++/DSRC

C.1 Das Klassenkonzept des Systemsimulators SIMCO3++/DSRC

In Abbildung C.1 ist die Klassenhierarchie des Systemsimulators SIMCO3++/DSRC (Simulation of Mobile Communication for Dedicated Short-Range Communication Systems) dargestellt.

Es handelt sich um einen ereignisgesteuerten Simulator (*event-driven simulation*), der unter Verwendung der am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, entwickelten Klassenbibliothek CNCL (ComNets Class Library) objekt-orientiert realisiert wurde [31, 32].

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die für den Systemsimulator relevanten Klassen und Beziehungen dargestellt, d.h. auf die Darstellung der CNCL-Standardklassen wurde verzichtet. Alle Klassen werden von CNCL - Basisklassen abgeleitet bzw. nutzen CNCL-Klassen, wie z.B. zum Einlesen von Parametern, zur Erzeugung von Zufallszahlen, zur Verwaltung von Listen und zur statistischen Auswertung von Simulationsergebnissen.

Die Klasse *Mobility Manager* verwaltet die Informationen über den Aufbau des Szenariums (d.h. Straßenführung (*Road Segment*, Positionen der festen Stationen (*Fixed Station*)) und steuert die dynamischen Positionsänderungen der Fahrzeuge (*MobStation*) innerhalb des Szenariums. Die Klassen *FixedStation* und *MobStation* sind beide von der Klasse *Station* abgeleitet. Die Klasse *Mobility Manager* besitzt für jede Fahrbahn eine Instanz der Klasse *VehGen*, die für die realitätsnahe Erzeugung von Zwischenankunftszeiten der Fahrzeuge verantwortlich ist. Da die Klasse *Mobility Manager* auch die Löschung von Instanzen der Klasse *MobStation* vornimmt, wird hier auch die statistische Auswertung der im Laufe einer Simulation in einer Mobilstation gesammelten Daten vorgenommen (Klasse *StatEval*).

Jeder Instanz der Klasse *FixedStation* wird eine Instanz der zugehörigen Kommunikationsarchitektur zugeordnet, wobei nur die Kanalzugriffsschicht direkt über eine Instanziierung mit der *FixedStation* verbunden ist (*RSEmac*, *RSEllc*, *RSEapp*). Analog verhält es sich mit der *MobStation* und den dazugehörigen Instanzen der Klassen *OBUmac*, *OBULLc* und *OBUapp*. Während die Schichten der Kommunikationsarchitektur oberhalb der Bitübertragungsschicht also jeweils durch eine entsprechende Klasse repräsentiert sind, wird die Bitübertragungsschicht als Teil des unten näher beschriebenen Übertragungskanals abgebildet. Jede Instanz einer Protokollklasse enthält eine Instanz einer *PDU*, d.h. einer Protokolldateneinheit, die in diesem Fall aus Effizienzgründen als Pointer von den Protokollklassen jeweils weitergereicht wird und von allen Protokollschichten genutzt werden kann.

Die Abläufe im Übertragungskanal werden auf drei Hierarchieebenen abgebildet. Die Klasse *Channel* bildet jeweils einen Übertragungskanal zwischen RSE und OBU ab. Sie enthält insbesondere die unter Verwendung des im nächsten Abschnitt vorgestellten Werkzeugs ASSECSim automatisch erstellte Kanaldatenbank, auf die während der Simulation zugegriffen wird. Die Klasse berücksichtigt auch fahrzeugspezifische Dämpfungsfaktoren und ermittelt Abschattungssituationen sowie das Auftreten von

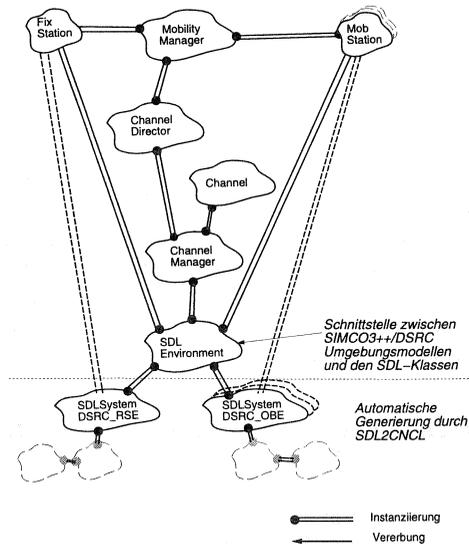


Abbildung C.2: Klassen-Hierarchie SIMCO3++/DSRC mit Einbindung von automatisch erzeugten SDL-Klassen

Vielfachzugriffsinterferenz. Die Klasse *ChannelManager* verwaltet mehrere, sich unter Umständen überlappende Übertragungskanäle einer Bakeninstallation. Alle innerhalb eines *ChannelManagers* überwachten Übertragungskanäle sind als synchron zu betrachten. Der *ChannelManager* ist mit den Kanalzugriffsschichten *RSEmac* und *OBEmac* verbunden und ordnet die zu übertragenden Datenpakete unter Berücksichtigung der Position der Fahrzeuge den durch die *Channel*-Instanzen beschriebenen Übertragungskanälen zu. Entsprechend berücksichtigt er auch das Auftreten von Nachbarkanalstörungen. Der *ChannelDirector* schließlich verwaltet mehrere *ChannelManager*, was dann relevant ist, wenn innerhalb eines Szenariums (speziell in Innenstadtbereichen an Kreuzungen) auf engerem Raum voneinander unabhängige - d.h. asynchrone - Bakeninstallationen betrieben werden. Der *ChannelDirector* ist direkt mit dem *MobilityManager* verbunden und ordnet die *MobStations* den Einflußbereichen der *ChannelManager* zu.

In Abbildung C.2 ist der Fall dargestellt, daß aus SDL-Spezifikationen der Protokolle abgeleitete Klassen eingesetzt werden. Hierzu wurde der am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze entwickelte Übersetzer *SDL2CNCL* eingesetzt ([42, 79]). In diesem Fall wird an den *ChannelManager* anstatt der *RSEmac* und *OBEmac* Klassen, die Klasse *SDLEnvironment* angebunden. Diese individuell an den Systemsimulator SIMCO3++/DSRC angepaßte Klasse bildet die Schnittstelle zwischen der Systemumgebung und den SDL-Systemen *SDSystemDSRC_OBE* und *SDSystemDSRC_RSE* und der dazugehörigen Klassenhierarchie. Die Klasse *SDLEnvironment*

erzeugt eine indirekte Zuordnung der SDL-Klasseninstanzen zur zugehörigen *Fixed-Station* bzw. *Mobstation*.

Für die Realisierung der Animation konnte auf die ebenfalls am Lehrstuhl entwickelte Klassenbibliothek GIST (Graphical Interactive Simulation result Tool) [52] zurückgegriffen werden. Über die Klasse *EGGI* (Event-Gesteuertes Graphik Interface) wird die Verbindung zur GIST-Klassenhierarchie hergestellt und somit die graphische Animation des Simulationsablaufs realisiert. Jede Instanz der *SIMCO3++/DSRC*-Klassen kann Steuerbefehle an die *EGGI*-Instanz senden, wobei die Aufbereitung und Anwendung der GIST-Funktionalitäten nur in der Klasse *EGGI* realisiert wurde. Diese klare Trennung wurde vorgenommen, um eine Anpassung auf veränderte Graphikfunktionen ohne Änderung der *SIMCO3++/DSRC*-Steuerbefehle realisieren zu können.

C.2 Das Klassenkonzept des Ausbreitungsmodellierungswerkzeugs ASSECSim

In Abbildung C.3 ist die Klassenhierarchie des Werkzeugs ASSECSim (Analysis of Street Scenarios and Evaluation of Channel data for Simulation) dargestellt. Die Basisklassen sind *Vector*, *Matrix*, *CoorSys*, *ElementAntenna* und *PhysicalLink*.

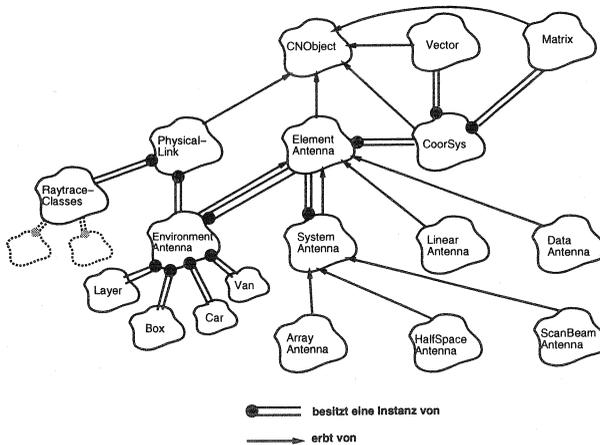


Abbildung C.3: Klassen-Hierarchie ASSECSim

Eine Antenne ist ein Objekt mit einem lokalen dreidimensionalen Koordinatensystem, einer komplexwertigen Funktion $0 \leq |f(\vartheta, \varphi)| \leq 1$ in Abhängigkeit von zwei reellen Variable $0 \leq \vartheta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ und einer reellen Zahl $G \geq 1$. Die virtuelle Basisklasse *ElementAntenna* stellt die notwendigen Grundkomponenten zur Verfügung. Eine Instanz der Klasse *ElementAntenna* ist ein isotroper Kugelstrahler. Von der Basisklasse *ElementAntenna* sind die Klassen:

- *LinearAntenna*,
- *SystemAntenna*,
- *EnvironmentAntenna*,
- *DataAntenna*

abgeleitet. Die Klassenhierarchie kann leicht um weitere *Element*- oder *SystemAntennas* erweitert werden. Eine Instanz der Klasse *LinearAntenna* ist eine Linearantenne einer bestimmten Länge. Die Klasse *SystemAntenna* ist die virtuelle Basis-Klasse für die Klassen:

- *ArrayAntenna*
- *ScanBeamAntenna*
- *HalfSpaceAntenna*.

Jede *SystemAntenna* besitzt einen Systemfaktor, der eine Antennenanordnung als Operator beschreibt. *ArrayAntennas* mit einer möglichst gleichmäßigen Ausleuchtung des Funkfeldes und Pencil-Beam-Antennen werden in [60] bzw. [12] ausführlich beschrieben. Eine *HalfSpaceAntenna* strahlt nur in einen Halbraum ab. Ihr Gewinn verdoppelt sich. Eine *EnvironmentAntenna* ist eine *ElementAntenna*, der die störender Reflektoren, die sich mit der Antenne durch das Szenario bewegen, zugeordnet ist. Die relative Lage der mobilen Störer zueinander und zur Mobilstation bleibt dabei erhalten. In ASSECSim wird für jeden Fahrzeugtyp (PKW, LKW) und verschiedene Verkehrsszenarien eine Mobilantenne vom Typ *EnvironmentAntenna* initialisiert. Sowohl im Analyse-Modus als auch zur Berechnung der BER- bzw. SNR-Werte für die Protokollsimulation wird die Mobilantenne des *PhysicalLinks* fahrzeug- und situationsabhängig ausgetauscht.

Eine *DataAntenna* schließlich liest die Werte ihrer Antennencharakteristik aus Dateien ein. Ihr Gewinn muß in der Parameterdatei eingegeben werden. Sie stellt die gleiche Funktionalität wie eine Elementantenna zur Verfügung.

Die Klasse *PhysicalLink* besitzt zwei *UmgebungsAntennas* (beacon, mobil) bzw. eine Liste von Umgebungsantennen für ein Bakensystem sowie Instanzen notwendiger *Raytrace*-Klassen und Funktionen zur Funkfeldberechnung.

Die *Raytrace*-Klassen stellen die Funktionalität eines auf der Spiegelungsmethode beruhenden Strahlverfolgungsverfahrens zur Verfügung. Sie basieren auf Arbeiten von [85] und [35] und wurden für die spezifische Anwendung für DSRC-Systeme angepaßt (Berücksichtigung der Polarisations-eigenschaften).

ANHANG D

Validierung der Fahrzeuggeneratoren anhand von Meßdaten

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Validierung der Fahrzeuggeneratoren für verschiedene Stichprobendaten vorgestellt. Die Stichprobendaten wurden freundlicherweise von der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) sowie vom niederländischen Verkehrsministerium zur Verfügung gestellt.

Stichprobe: Autobahn A2 (Utrecht-Amsterdam)

Zeitraum der Messung: 15.30 Uhr - 18.30 Uhr

Stichprobeneigenschaften:

Spur	Anzahl gemessener Fahrzeuge	PKW-Anteil	LKW-Anteil
1	3466	61.7%	38.3%
2	5260	95.6%	4.4%
3	5051	99.8%	0.2%

Vergleich der Verkehrsstärken, Zwischenankunftszeiten und Geschwindigkeiten:

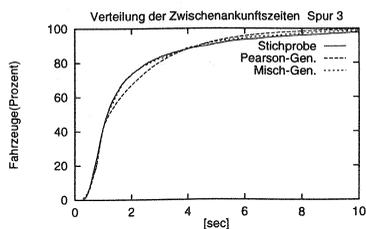
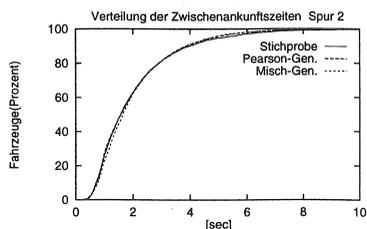
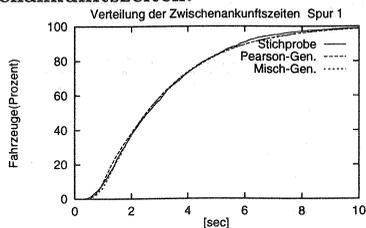
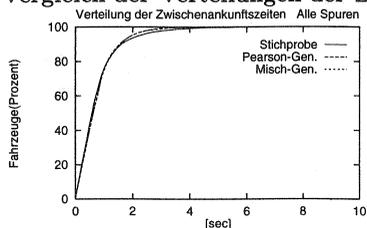
Spur	Verkehrsstärke [$\frac{\text{Fahrzeuge}}{\text{h}}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	1160	1160	1150	0.0	- 0.9
2	1758	1769	1735	+ 0.6	- 1.3
3	1743	1739	1766	- 0.2	- 1.3

Spur	Mittelwert der Zwischenankunftszeiten [s]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	3.10	3.10	3.13	+ 0.6	+ 1.0
2	2.05	2.03	2.07	- 1.0	+ 1.0
3	2.06	2.07	2.04	+ 0.5	- 1.0

Spur	Mittlere Geschwindigkeit [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	100.1	102.1	101.9	+ 2.0	+ 1.8
2	112.1	114.0	114.0	+ 1.7	+ 1.7
3	119.9	122.1	121.9	+ 1.8	+ 1.7

Spur	Standardabweichung der Geschwindigkeit [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	11.7	11.8	11.8	+ 0.9	+ 0.9
2	10.2	10.1	10.0	- 1.0	- 2.0
3	10.5	9.1	8.9	- 13.3	- 15.2

Vergleich der Verteilungen der Zwischenankunftszeiten:



Stichprobe: Autobahn A430 (Bochum-Dortmund)

Zeitraum der Messung: 15.15 Uhr - 16.45 Uhr

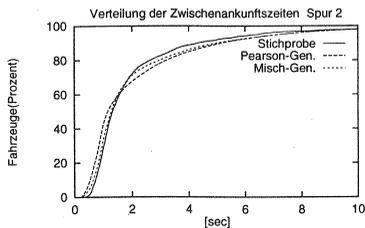
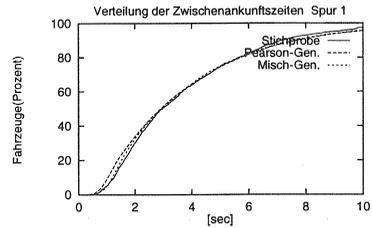
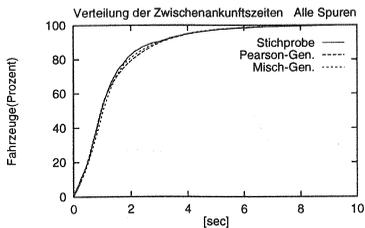
Stichprobeneigenschaften:

Spur	Anzahl gemessener Fahrzeuge	PKW-Anteil	LKW-Anteil
1	4371	51.7%	48.3%
2	6578	96.0%	4.0%

Vergleich der Verkehrsstärken, Zwischenankunftszeiten und Geschwindigkeiten:

Spur	Verkehrsstärke [$\frac{\text{Fahrzeuge}}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	963	951	956	- 1.3	- 2.2
2	1704	1652	1741	- 3.1	+ 2.1
Spur	Mittelwert der Zwischenankunftszeiten [s]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	3.73	3.78	3.76	+ 1.3	+ 0.8
2	2.11	2.18	2.07	+ 3.2	- 1.9
Spur	Mittlere Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	94.9	98.8	98.4	+ 3.9	+ 3.6
2	107.9	113.8	113.4	+ 5.2	+ 4.9
Spur	Standardabweichung der Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]			Abweichung [%]	
	Stichprobe	Pearson-G.	Misch-G.	Pearson-G.	Misch-G.
1	17.48	16.91	17.03	- 3.4	- 2.6
2	17.77	16.20	15.80	- 9.7	- 12.0

Vergleich der Verteilungen der Zwischenankunftszeiten:



Vergleich zwischen Simulation und analytischer Modellierung

Um die Ergebnisse der Systemsimulation (vgl. Kapitel 9) und der mathematischen Analyse (vgl. Kapitel 6) mit dem Ziel einer Validierung vergleichen zu können, muß ein vereinfachtes Simulationsszenarium angenommen werden:

Ankunftsprozeß der Fahrzeuge Da die mathematische Analyse von neg. exponentiell-verteiltern Zwischenankunftszeiten ausgeht, muß der Fahrzeuggenerierungsprozeß des Systemsimulators entsprechend angepaßt werden: ausgehend vom Mischgenerator (siehe Abschnitt 7.3.2.3) wird der Pearson Typ 3 - Anteil zu 100 % gesetzt und so parametrisiert, daß sich negativ exponentiell verteilte Zwischenankunftszeiten einstellen. Weiterhin werden die sonst zum Einsatz kommenden Mechanismen zur Erzeugung eines realistischen Verkehrsflusses (insbesondere Beachtung des Sicherheitsabstandes) außer Kraft gesetzt. Es wird eine Verkehrsstärke von 3600 Fahrzeugen pro Stunde angenommen.

Protokollablauf Für das Kanalzugriffsprotokoll wird die Parameterkombination $w=6$ und $R=3$ gewählt. Ansonsten gelten die in Abschnitt 5.8 eingeführten Parameter.

Kanalmodell Es wird ein Kanalmodell mit idealisierter Rechteckcharakteristik mit einer konstanten Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-6} in Down- und Uplink verwendet.

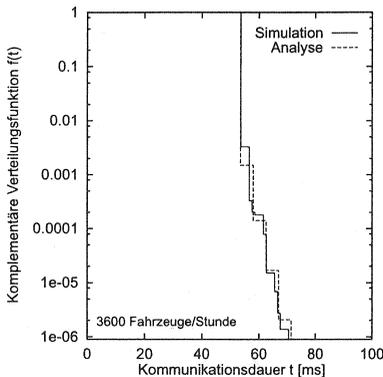


Abbildung E.1: Simulation vs. Analyse

Der Vergleich der Ergebnisse wurde durchgeführt anhand der Verteilungsfunktion der zum Abschluß des vollständigen AFC-Kommunikationsprozesses benötigten Kommunikationszeit. Aufgrund des Zeittaktes des Protokolls kann die Kommunikationszeit nur diskrete Werte annehmen. Die Abbildung E.1 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der vereinfachten Systemsimulation und der mathematischen Analyse, insbesondere bezüglich der maximal benötigten Kommunikationszeiten. Die etwas geringer ausgeprägte Differenzierung der Abstufung des Kurvenverlaufs für die Ergebnisse des analytischen

Modells ist eine Folge der vereinfachenden Annahmen zum Protokollablauf (vgl. Abschnitt 6.5).

ANHANG F

AFC-Datentypen und Funktionen

Nachfolgend werden die Datentypen (Attribute) und Funktionen (Actions) zur Durchführung einer AFC-Anwendung vorgestellt (basierend auf [54]).

Attribut	Länge ¹ [byte]	Attribut	Länge [byte]
AFC-ContextMark	6 (↑)	VehicleAuthenticator	variabel (↑)
ContractSerialNumber	4 (↑)	VehicleSpecificCharacteristics	4 (↑)
ContractValidity	6 (↑)	VehicleWeightLaden	2 (↑)
ContractVehicle	variabel (↑)	VehicleWeightLimits	4 (↑)
ContractAuthenticator	variabel (↑)	VehicleAxles	2 (↑)
ReceiptServicePart	13 (↓/↑)	VehicleDimensions	3 (↑)
ReceiptServiceSerialNumber	3 (↓/↑)	EquipmentOBUId	4 (↑)
ReceiptFinancialPart	23 (↓)	EquipmentICC-Id	variabel (↑)
ReceiptContract	9 (↓)	EquipmentStatus	2 (↑)
ReceiptOBUId	4 (↓)	DriverCharacteristics	3 (↑)
ReceiptICC-Id	variabel (↓)	PaymentMeans	11 (↑)
ReceiptText	variabel (↓)	PaymentMeansBalance	3 (↑)
ReceiptAuthenticator	variabel (↓)	PaymentMeansUnit	2 (↑)
VehicleId	4 (↑)	PaymentSecurityData	variabel (↑)
VehicleLicensePlateNumber	4 (↑)	<i>future CEN use</i>	-
VehicleClass	1 (↑)	<i>private use</i>	-

Basisfunktion	Erläuterung
Get	Lesen eines Attributs
Set	Schreiben eines Attributs
Action	Erläuterung
Get_Stamped	Lesen mit Unterschrift
Set_Stamped	Schreiben mit Unterschrift
Get_Secure	Lesen mit Datensicherheitsfunktion
Set_Secure	Schreiben mit Datensicherheitsfunktion
Get_Instance	Lesen mehrerer Instanzen eines Attributs
Set_Instance	Schreiben von Instanzen eines Attributs
Get_Nonce	Lesen eines Zufallswertes von der OBU
Set_Nonce	Schreiben eines Zufallswertes durch die Bake
Transfer_Channel	Transparenter Datenaustausch zu OBU-Komponenten (z.B. Chipkarte)
Copy	Kopieren von Attributen
Set_MMI	Ansteuern der OBU-Benutzerschnittstelle (Man-Machine Interface)
Subtract	Subtrahieren eines Wertes
Add	Addieren eines Wertes
Debit	Abbuchen von einer elektronischen Geldbörse
Credit	Aufbuchen auf eine elektronische Geldbörse
Echo	Unterstützung der Detektion von OBUs durch Echo der OBU

Tabelle F.1: Datenattribute und Funktionen Automatic Fee Collection

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] CEN TC 278. *Programme of work for the standardization in Road Transport and Traffic Telematics (CEN/TC278 N 299)*. Version 1.6, CEN Central Secretariat, Brussels, Rue Stassart 36, 1994.
- [2] DIN/GK 717. *Abschlussbericht*. Technical report, ad hoc Arbeitskreis Windschutzscheibe, Frankfurt, March 1995.
- [3] H. Bruinsma A. Zandbergen. *Traffic Conditions and Operational Constraints, Requirements for Automatic Debiting Systems*. Technical Report DRIVE/TG1/Taskforce CI, CEN/TC278/WG1/SG2, May 1993.
- [4] N. Abramson. *THE ALOHA-SYSTEM – Another alternative for computer communications*. In *AFIPS Conf. Proc., Fall Joint Computer Conference*, pp. 281–285, 1970.
- [5] M. S. Aly. *Headway Distribution Model Interrelationships between Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics*. Dissertation, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1990. Schriftenreihe Heft 43/89 ISSN 0341-5503.
- [6] ASTM. *Standard for Dedicated Short-Range Two-Way Vehicle-to-Roadside Communications Equipment*. Draft, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, February 1996.
- [7] K. Milne A.W. Rudge. *The Handbook of antenna design*. Peter Peregrinus Ltd, London, 1986.
- [8] S. Baranowski, M. Lienard, P. Degauque. *Beacon-Vehicle Link in the 1-10 GHz Frequency Range*. *Advanced Telematics in Road Transport*, Band 1, pp. 194–217, 1991.
- [9] C. Bertheau. *Einsatz von Mobilfunksystemen fuer das Verkehrsmanagement*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, June 1995.
- [10] D. Bertsekas, R. Gallager. *Data Networks*. Prentice-Hall, 1993.
- [11] A. Bhandal, W. Detlefsen, J. Graf, P. Kimber, R. Schmedding. *Short Range Communication Systems used by the PROMETHEUS project*. In *First World Congress on Applications of Transport Telematics*, Vol. 5, p. 2573ff, Paris, France, ERTICO, 1994.
- [12] H.-G. Boettger. *Optimierung der Funkfeldausleuchtung von Nahbereichsmobilfunksystemen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, January 1995.
- [13] G. Booch. *Object-oriented Analysis and Design*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1994.

- [14] G. Brasche, C.-H. Rokitansky, C. Wietfeld. *Communication Architecture and Performance Analysis of Protocols for RTT Infrastructure Networks and Vehicle-Roadside Communications*. In *Vehicular Technology Conference*, Vol. 1, pp. 384–390, Stockholm, Sweden, IEEE-Vehicular Technology Society, June 1994.
- [15] N. Bronstein, I. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harry Deutsch, 1985.
- [16] Bruce W. Char, Keith O. Geddes. *First Leaves: A Tutorial Introduction to Maple V*. Springer-Verlag.
- [17] B. Coenen, W. Melchers, C. Wietfeld et al. *Validation Plan Part 1*. Deliverable D 3.1, TR 1062 VASCO, Aachen, August 1996.
- [18] European Radiocommunications Committee. *ERC Decision of 22 October 1996 on the frequency bands to be designated for the coordinated introduction of Road Transport Telematic Systems (ERC/DEC/(92)02)*. Technical report, Conference of European Postal and Telecommunications administrations (CEPT), October 1992.
- [19] W. Detlefsen, W. Grabow, U. Kerksen, R. Schmedding. *Reliability of 5.8 GHz Short-Range Links in Vehicle-Roadside Communications*. In *Vehicle Navigation and Information Systems*, Ottawa, Canada, IEEE, October 1993.
- [20] F. Dobias, W. Grabow. *Adaptive Array Antennas for 5.8 GHz Vehicle to Roadside Communication*. In *Vehicular Technology Conference*, Stockholm, Sweden, IEEE-Vehicular Technology Society, June 1994.
- [21] C. L. Dolph. *A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship Between Beam Width and Side-Lobe Level*. Proc. of the I.R.E., Vol. 34, pp. 335–348, June 1946.
- [22] L. Egnell. *A link protocol for vehicle-roadside communication devised for anonymous road-use in free traffic flow*. In *3rd Conference on Vehicle Navigation & Information Systems*, pp. 420–425, Oslo, Norway, 1992.
- [23] Demski et al. *Feldversuch Autobahntechnologien A 555*. Technical report, Institut für Software, Elektronik und Bahntechnik, Köln, 1996.
- [24] J. Kossack et al. *Special Session: Development of DSRC Standardisation in Europe, America and Japan*. In *World Congress on Intelligent Transport Systems*, Brussels, ERTICO, October 1996. Presentation slides.
- [25] Joint CEN/CENELEC/ETSI expert team on Road Transport Informatics. *CEN TC 278 N53 (TET-report)*. Technical report, CEN Central Secretariat, Brussels, Rue Stassart 36, 1992.
- [26] R. Kattenbach F. W. Bode, H. Fruechting. *Bit Error Measurements on a 5.8 GHz Mobile Radio Channel for Short-Range Traffic Management Systems*. In *International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Boston, U.S.A., IEEE, October 1992.

- [27] G. Freij, D. De Preter, R. Schuessler. *Technological Options for Vehicle-Beacon-Communication*. Technical Report V1057-WP4/2, September 1990.
- [28] Bundesministerium für Verkehr. *Telematik im Verkehr*. Strategiepapier, Juni 1993.
- [29] H. E. Gerland. *Intelligence on Board*. In *Vehicle Navigation and Information Systems*, p. 557ff, Yokohama, Japan, IEEE, 1994.
- [30] P. Gilchrist, B. Guenther, D.A. Demery. *General Packet Radio Service on GSM for ATT*. In *First World Congress on Applications of Transport Telematics*, Vol. 5, p. 2289ff, Paris, France, ERTICO, 1994.
- [31] C. Görg, M. Junius. *Ein Programmpaket zur ereignisgesteuerten Simulation in C++*. In B. Walke, O. Spaniol, editors, *Messung, Modellierung und Bewertung von Rechen- und Kommunikationssystemen, Aachener Beiträge zur Informatik*, pp. 204–215, Aachen, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Sept. 1993.
- [32] K. E. Gorlen. *Data Abstraction and Object-Oriented Programming in C++*. John Wiley & Sons Ltd., 1990.
- [33] W. Grabow, A. Schrei. *A Study on Diversity Techniques in a 5.8 GHz Microwave Link for Traffic Management Systems*. In *International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 556–560, Boston, U.S.A., IEEE, October 1992.
- [34] A. Guntsch. *Untersuchung und Simulation von CDMA-Techniken für den Nahbereichsmobilfunk*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, December 1993.
- [35] H. Hußmann. *Simulation of Propagation using Raytracing Techniques*. In *Proc. RACE Mobile Telecommunications Workshop*, Metz, July 1993.
- [36] M. Kady, M. Ristenblatt. *An Evolutionary IVHS Communication Architecture*. In *Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, Ottawa, Canada, IEEE, October 1993.
- [37] C. Keil. *Entwicklung und Implementierung von Verfahren zur Durchführung von Konformitätsprüfungen von Kommunikationsprotokollen für DSRC-Systeme*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, November 1996.
- [38] G. Kellermann. *Periodische Analyse des Verkehrsablaufs im Autobahnnetz: Entwicklung des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens*. Fortschreibung herbst 1991, Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach, August 1992.
- [39] L. Kleinrock. *Queueing Systems*, Vol. 2. John Wiley & Sons, 1976.
- [40] K. G. Knightson. *OSI Protocol Conformance Testing*. McGraw-Hill, 1993.

- [41] K. Koch. *Entwicklung von homogenen Markov-Ketten zur Modellierung von Protokollen für Nahbereichsmobilfunksysteme*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, February 1996.
- [42] C. Lampe. *Entwicklung und Implementierung eines Übersetzters zur automatischen Transformation in SDL formal spezifizierter Mobilfunkprotokolle nach C++*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, January 1994.
- [43] U. Lange. *Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Systemen fuer das innerstaedtische Verkehrsmanagement*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, October 1994.
- [44] M. Lautier. *Leistungsanalyse und Simulation von Protokollen für die Fahrzeug-Baken Kommunikation*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, February 1993.
- [45] William C. Y. Lee. *Power Control in CDMA*. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 77–80, St. Louis, May 1991.
- [46] H. D. Lüke. *Signalübertragung: Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 4. Auflage, 1990.
- [47] Adolf D. May. *Traffic Flow Fundamentals*. Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- [48] Meinke, Gundlach. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 5. Auflage, 1992.
- [49] Th. Milligan. *Modern Antenna Design*. McGraw-Hill, Inc., 1985.
- [50] Council of the European Union. *On the Deployment of Telematics in the Road Transport Sector*. Council resolution, Sep 1995.
- [51] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, London, 1992.
- [52] D. Plaßmann, M. Horneffer. *GIST Manual - Graphical Interactive Simulation result Tool*. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, 1994.
- [53] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill Book Company, New York, 2nd Auflage, 1989.
- [54] CEN TC 278 WG1 PT02. *Road Traffic and Transport Telematics - Automatic Fee Collection - Application Interface Specification for the DSRC*. Draft prENV 278/1/#367, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, December 1996.
- [55] CEN TC 278 WG1 PT04. *Road Traffic and Transport Telematics - Automatic Fee Collection - Test procedures for AFC user and ground equipment*. Draft prENV 278/1/#, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, January 1997.
- [56] F. Quack. *Entwurf von Verfahren zur Optimierung von Kanalzugriffsprotokollen fuer die Fahrzeug-Baken-Kommunikation*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, June 1994.

- [57] Qualcomm. *Wideband Spread Spectrum Digital Cellular System Dual-Mode Mobile Station — Base Station Compatibility Standard*. Proposed interim standard, EIA/TIA, April 21 1992.
- [58] H. J. Risse. *Das Fahrverhalten bei normaler Fahrzeugführung*. VDI Verlag, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [59] Stephan Risse. *Eine graphische Benutzeroberfläche für ein Simulationswerkzeug zur Leistungsbewertung digitaler Mobilfunksysteme*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen, Juli 1994.
- [60] S. Roemer. *Entwicklung und Implementierung eines Kanalmodells fuer die Simulation von Fahrzeug-Baken-Systemen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, April 1994.
- [61] C.-H. Rokitansky. *Performance analysis and simulation of vehicle-beacon protocols*. In *Proc. Vehicular Technology Conference*, pp. 1056–1057, Denver, Colorado, USA, IEEE, 1992.
- [62] C.-H. Rokitansky, A. Guntsch, B. Bjelajac, C. Wietfeld. *SIMCO3++: Simulation of Mobile Communications for Performance Evaluation of Cellular Networks, Short-Range Communications and Satellite Communications*. In *RACE Mobile Telecommunications Workshop*, Vol. 2, pp. 578–584, Amsterdam, Netherlands, May 1994.
- [63] C.-H. Rokitansky, C. Wietfeld. *Comparison of Adaptive Medium Access Control Schemes for Beacon-Vehicle Communications*. In *Proc. Vehicle Navigation and Information Systems VNIS*, Ottawa, Kanada, IEEE, October 1993.
- [64] C.-H. Rokitansky, C. Wietfeld. *Markov Chain Analysis Methods and Simulation Tools for Performance Evaluation and Validation of Vehicle-Roadside Communications*. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, Canada, IEEE, September 1995.
- [65] C.-H. Rokitansky, C. Wietfeld. *Methods and Tools for the Performance Evaluation and Validation of Vehicle-Roadside Communications proposed for Standardization*. In *Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 964–970, Chicago, U.S.A., IEEE, July 1995.
- [66] C.-H. Rokitansky, C. Wietfeld, C. Plenge. *SIMCO3++: Simulation of Mobile COmmunications based on Realistic Mobility Models and Road Traffic Scenarios*. In *Proc. MATHMOD*, Vienna, Austria, IMACS, February 1994.
- [67] L. Savage. *Mobitex Public Networks in Europe*. In *First World Congress on Applications of Transport Telematics*, Vol. 5, p. 2663ff, Paris, France, ERTICO, 1994.
- [68] A. Schrei. *Untersuchungen zum 5,8 GHz-Funkübertragungskanal von Verkehrssystemen*. Verlag Shaker, 1994.
- [69] F. Schreiber, C. Goerg. *Vorlesungsskript Stochastische Simulationstechnik*. Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, 1996.

- [70] CEN TC 278 WG9 SG4. *Road Traffic and Transport Telematics - Dedicated Short-Range Communications - DSRC Communication Profiles*. Draft prENV, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, February 1997.
- [71] CEN TC 278 WG9 SG.L1. *Road Traffic and Transport Telematics - Dedicated Short-Range Communications - DSRC Physical Layer: Microwave at 5.8 GHz*. Draft prENV 278/9/#62, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, March 1995.
- [72] CEN TC 278 WG9 SG.L1. *Road Traffic and Transport Telematics - Dedicated Short-Range Communications - DSRC Physical Layer: Infrared at 850 nm*. Draft prENV 278/9/#63, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, December 1995.
- [73] CEN TC 278 WG9 SG.L2. *Road Traffic and Transport Telematics - Dedicated Short-Range Communications - DSRC Data Link Layer: Medium Access and Logical Link Control*. Draft prENV 278/9/#64, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, March 1995.
- [74] CEN TC 278 WG9 SG.L7. *Road Traffic and Transport Telematics - Dedicated Short-Range Communications - DSRC Application Layer*. Draft prENV 278/9/#65, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, February 1996.
- [75] G. Siemens. *Der Weg der Elektrotechnik*. Verlag Karl Alber, Freiburg/München, 1961.
- [76] B. Sklar. *Digital Communications — Fundamentals and Applications*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [77] W. Stallings. *Handbook of Computer-Communications Standards*. A Howard W. Sams & Company, 1993.
- [78] D. Steedmann. *Abstract Syntax Notation One (ASN.1: The Tutorial and Reference)*. Springer, 1990.
- [79] M. Stepler. *SDL2CNCL — A C++ Code Generator*. RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, January 1996.
- [80] W.L. Stutzman, G.A. Thiele. *Antenna Theorie and Design*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1981.
- [81] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall International Editions, 1988.
- [82] International Telecommunications Union Telecommunication. *Rec. X.209 - Specification of Basic Encoding Rules for Abstract Syntax Notation One (ASN.1)*, 1988.
- [83] R. v. Tomkewitsch. *Kooperatives Verkehrsmanagement*. Siemens-Zeitschrift, pp. 6–10, Frühjahr 1993.

- [84] B. Uszko. *Entwicklung und Leistungsbewertung von adaptiven Vielfachzugriffsprotokollen fuer die Fahrzeug-Baken-Kommunikation*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, October 1993.
- [85] B. von Ehren, H. Hussmann, C. Plenge. *Propagation channel modelling using raytracing techniques and stochastic modelling at 60 GHz*. In *Proc. RACE Mobile Telecommunications Workshop*, Amsterdam, May 1994.
- [86] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie*. Vorlesungsmitschrift, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, RWTH Aachen, 1995.
- [87] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. Vorlesungsmitschrift, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, 1996.
- [88] B. Walke, C.-H. Rokitansky. *Short-Range Mobile Radio Networks for Road Transport Informatics*. In *MRC'91*, pp. 183–192, Nice, France, November 1991.
- [89] CEN TC 278 WG4. *Road Traffic and Transport Telematics - Traffic and Traveller Information - TTI Messages via Dedicated Short-Range Communications*. Draft prENV 278/4/2/16, CEN, European Committee for Standardisation, Central Secretariat, Brussels, April 1995.
- [90] C. Wietfeld. *Performance evaluation of Multiple Access Techniques for Vehicle-Roadside Communication Systems*. In *MICROWAVES Conference Proceedings*, pp. 392–397, London, UK, October 1994.
- [91] C. Wietfeld. *System Performance of Vehicle-Roadside Communications using Asynchronous and Synchronous MAC Protocols*. In R. Prasad, editor, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC*, pp. 1399–1403, The Hague, Netherlands, IEEE, September 1994.
- [92] C. Wietfeld. *ASSECSim Manual — Analysis of Street Scenarios and Evaluation of Channel data for Simulation*. RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, September 1995.
- [93] C. Wietfeld. *Performance Evaluation of Short-Range Communication Links for Road Transport & Traffic Telematics*. In B. Walke, editor, *Fachtagung Mobile Kommunikation*, Neu-Ulm, VDE-ITG, VDE-Verlag, September 1995.
- [94] C. Wietfeld. *Performance of Vehicle-Roadside Communication Systems in Shadowing and Multi-Path Fading Environments*. In *Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 947–952, Chicago, U.S.A., IEEE, July 1995.
- [95] C. Wietfeld. *SIMCO3++/DSRC Manual — Simulation of Mobile Communication / Dedicated Short-Range Communications*. RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, September 1995.
- [96] C. Wietfeld. *DSRC Dedicated Short-Range Communications*. Wireless Communication, The Interactive Multi-Media CD-ROM, Editor: J.-P. Linnartz, ISSN 13834231, October 1996.
- [97] C. Wietfeld. *Reliability of Traffic Management Applications based on Digital Short-Range Communications*. In *Proc. International Computer Performance*

- & Dependability Symposium*, pp. 139–148. IEEE Computer Society, September 1996.
- [98] C. Wietfeld, C.-H. Rokitansky. *Performance of Vehicle-Roadside Communication Systems supporting Multiple Applications*. In *Vehicle Navigation and Informations Systems Conference*, pp. 133–138, Yokohama, Japan, IEEE, August 1994.
- [99] C. Wietfeld, C.-H. Rokitansky. *Markov Chain Analysis of Alternative Medium Access Control Protocols for Vehicle-Roadside Communications*. In *Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 958–963, Chicago, U.S.A., IEEE, July 1995.
- [100] C. Wietfeld, C.-H. Rokitansky, G. Brasche. *Entwurf und Leistungsanalyse von Protokollen fuer die Fahrzeug-Baken-Kommunikation*. In *8. Aachener Kolloquium Signaltheorie 'Mobile Kommunikationssysteme'*, Aachen, Germany, RWTH Aachen, March 1994.
- [101] P. Willars. *60 GHz for Vehicle Short-range Communications Propagation - an Initial Study*. PhD thesis, Swedish Telecom Radio, 1990.
- [102] W. Zechnall. *Individuelle Verkehrsleittechnik*. Bosch Technische Berichte, Band 54, pp. 10–16, 1991.
- [103] W. Zechnall. *Interaktives Verkehrsmanagement und Stand der Standardisierung*. In C. H. Rokitansky, editor, *Seminar Europäischer Nahbereichsfunk*. Haus der Technik, Essen, September 1995.
- [104] W. Zhu. *Synchronisation mobiler Stationen in Nahbereichsfunknetzen*. VDI-Verlag, 1994.
- [105] F. Zijderhand. *SOCRATES: the open system and its applications*. In *First World Congress on Applications of Transport Telematics*, Vol. 5, p. 2281ff, Paris France, ERTICO, 1994.
- [106] L. Zilverstand. *Statistische Analyse eines Simulators fuer die Leistungsbewertung von Fahrzeug-Baken-Kommunikationssystemen*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, July 1993.
- [107] L. Zilverstand. *Vergleich von CDMA- und TDMA-Verfahren fuer Nahbereichsmobilfunk-Systeme*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Kommunikationsnetze, December 1994.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Walke für die Anregungen zum Thema der Dissertation, die sehr gute Betreuung und Förderung der Arbeit sowie die kritische Durchsicht des Textes. Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Rembold danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und die Hinweise zum Manuskript.

Ein besonderer Dank gilt weiterhin dem VASCO-Team des Lehrstuhls unter der Leitung von Herrn Dr. Carl-Herbert Rokitansky sowie allen Diplomanden, Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften, die durch ihren Einsatz wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Allen Kollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls sowie den Partnern in den Projekten und Standardisierungsgremien danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit.

Meiner Verlobten Annette Tauer danke ich für die liebevolle Unterstützung, insbesondere für das gründliche Korrekturlesen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern und meinem Bruder Markus, die mich stets mit Rat und Tat unterstützt haben.

Aachen, Mai 1997

Christian Wietfeld

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

ABMT Band 1

Herrmann, C.
Stochastische Modelle für ATM-Konzepte,
1. Auflage 1995, 138 Seiten;
ISBN 3-86073-380-X

ABMT Band 2

Lawniczak, D. R.
Modellierung und Bewertung der Datenverwaltungskonzepte in UMTS,
1. Auflage 1995, 230 Seiten;
ISBN 3-86073-381-8

ABMT Band 3

Junius, M.
Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme,
1. Auflage 1995, 208 Seiten;
ISBN 3-86073-382-6

ABMT Band 4

Steffan, H.
Stochastische Modelle für den Funkkanal und deren Anwendung,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-383-4

ABMT Band 5

Böhmer, S.
Entwurf eines ATM-basierten Funknetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung,
1. Auflage 1996, 172 Seiten;
ISBN 3-86073-384-2

ABMT Band 6

Guntermann, M.
Universelle Benutzermobilität auf der Basis des Intelligenten Netzes - Entwurf, Bewertung und Implementierung -,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-385-0

ABMT Band 7

Kleier, S.
Neue Konzepte zur Unterstützung von Mobilität in Telekommunikationsnetzen,
1. Auflage 1996, 204 Seiten;
ISBN 3-86073-386-9

ABMT Band 8

Decker, P.
Entwurf und Leistungsbewertung hybrider Fehlersicherungsprotokolle für paketierte Sprach- und Datendienste im GSM-Mobilfunksystem,
1. Auflage 1997, 232 Seiten;
ISBN 3-86073-387-7

ABMT Band 9

Hußmann, H.
Algorithmen zur Kapazitätsoptimierung schnurloser Mobilfunksysteme nach DECT-Standard,
1. Auflage 1997, 180 Seiten;
ISBN 3-86073-388-5

ABMT Band 10

Plenge, C.
Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme,
1. Auflage 1997, 258 Seiten;
ISBN 3-86073-389-3

ABMT Band 11

Kennemann, O.
Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmeßdaten,
1. Auflage 1997, 162 Seiten;
ISBN 3-86073-620-5

ABMT Band 12

Wietfeld, C. M.
Mobilfunksysteme für die europäische Verkehrsleittechnik - Leistungsanalyse des CEN-DSRC-Standards -,
1. Auflage 1997, 210 Seiten;
ISBN 3-86073-621-3

