

Leistungsbewertung von TETRA-Mobilfunksystemen durch Analyse und Emulation ihrer Protokolle

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung
des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Martin Stepler

aus Düsseldorf

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke
 Universitätsprofessor Dr. sc. techn. Heinrich Meyr

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 2002

394 Seiten mit 115 Abbildungen und 33 Tabellen

KURZFASSUNG

Der europäische Standard für Bündelfunksysteme *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) stellt eine rein digitale Informationstechnologie für schmalbandige Sprach- und Datenübertragung dar. TETRA setzt einen neuen Maßstab hinsichtlich der Effizienz von sicherheitsrelevanten und geschäftlichen Telekommunikationsanwendungen.

TETRA ist vor Allem aufgrund seiner fortgeschrittenen Abhör-, Stör- und Manipulationssicherheit für *Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* (BOS) von großer Bedeutung. Zusätzlich sind TETRA-Systeme mit dem Gruppenrufdienst und der Möglichkeit, Funkverbindungen ohne Netzinfrastruktur unterhalten zu können (*Walkie-Talkie*-Betrieb), für den Einsatz bei der Polizei, der Feuerwehr, den Rettungsdiensten, etc. besonders geeignet.

TETRA-Netze stehen sowohl in Europa als auch in Asien kurz vor der Implementierung. Da Investitionen von mehreren Mrd. Euro bevorstehen, ist eine genaue Kenntnis der technischen Leistungsmerkmale TETRAs für die Netzplanung und den Netzbetrieb notwendig.

Umfassend die Leistungsfähigkeit von TETRA-Systemen zu bewerten, ist das Ziel dieser Arbeit. Um diese Bewertung mit formalen, objektorientierten Methoden durchführen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Methoden und Werkzeuge für die stochastische, ereignisorientierte Simulation, insbesondere von TETRA-Systemen, entwickelt.

Zur simulativen Untersuchung auf Systemebene wird eine TETRA-Zelle mit einem Ring von sechs Gleichkanalstörerzellen herangezogen. In diesen Zellen befinden sich Mobil- und Basisstationen, deren Protokollstapel *Voice plus Data* (V+D) und *Packet Data Optimised* (PDO) in der formalen Beschreibungssprache *Specification and Description Language* (SDL) spezifiziert vorliegen.

In Hochlastszenarien wird unter Berücksichtigung von Gleichkanalstörungen ermittelt, welche Bedeutung die Parameter des TETRA-Zufallszugriffs haben und wie sich an TETRA angepasste Kollisionsauflösungsalgorithmen und Reservierungszuteilungsstrategien auf Verkehrs- und Dienstgüte, Durchsatz, Paketverzögerung und Gesprächsaufbauzeit auswirken.

ABSTRACT

The European trunked radio standard *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) is a pure digital information technology usable for small band voice and data transmissions. TETRA marks a new milestone regarding the efficiency of security and business related telecommunication applications.

Due to its advanced capability to shield off interception, jamming, and manipulation, TETRA is especially of great interest for public safety organisations. Additionally, TETRA systems are well suited to police forces, fire brigades, rescue services, etc., because of its group call services and the possibility to maintain radio connections without a network infrastructure (*walkie talkie* mode).

TETRA networks are about to be implemented in Europe and Asia. Owing to forthcoming investments of several billions of Euros, an exact knowledge of the technical features of TETRA is essential for network planning and maintenance.

It is the main goal of this thesis to evaluate the performance of TETRA systems. In order to carry out these assessments with the help of formal, object-oriented methods, new tools and methods have been developed as part of this thesis for stochastic, event-driven simulations, especially of TETRA systems.

Simulations at system level use one TETRA cell and a ring of six co-channel interferer cells. The protocol stacks *Voice plus Data* (V+D) and *Packet Data Optimised* (PDO) of the mobile and base stations located in these cells are formally specified in the *Specification and Description Language* (SDL).

The meaning of the parameters of the TETRA random access is examined in hot spot scenarios under consideration of co-channel interference. Furthermore, the effect of collision resolution algorithms and reservation allocation strategies adapted to TETRA is investigated with regard to grade of service, quality of service, throughput, packet delay, and call setup time.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	iii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
1.1 Kapitelübersicht	2
1.2 Lesehinweise	3
1.3 Bezugsmöglichkeiten	4
2 Das Bündelfunksystem TETRA	5
2.1 Die technische Entwicklung vom analogen Betriebsfunk zum digitalen Bündelfunk	5
2.2 Die Protokollfamilien des TETRA-Standards	7
2.3 Technische Daten	8
2.4 Dienste des Bündelfunksystems TETRA	11
2.5 Architektur des TETRA-Standards	13
2.5.1 Funktioneller Aufbau des TETRA-Systems	13
2.5.1.1 Mobilstation	14
2.5.1.2 Drahtgebundene Feststation	15
2.5.1.3 Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur	15
2.5.2 Schnittstellen des TETRA-Systems	16
2.5.2.1 Teilnehmerschnittstelle der Mobilstation	16
2.5.2.2 Teilnehmerschnittstelle der Feststation	16
2.5.2.3 Die Funkschnittstelle	18
2.6 Der Protokollstapel Voice plus Data	18
2.6.1 Aufbau des Protokollstapels Voice plus Data	18
2.6.2 Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m	18
2.6.2.1 Die Multiplex-Strukturen	19
2.6.2.1.1 Frequenzmultiplex-Struktur	20
2.6.2.1.2 Zeitmultiplex-Struktur	21
2.6.2.2 Logische Kanäle	24
2.6.2.2.1 Verkehrskanäle	25

2.6.2.2.2	Signalisierkanäle	25
2.6.2.3	Abbildung der logischen Kanäle auf physikalische Kanäle	27
2.6.3	Die Bitübertragungsschicht im TETRA-Standard . . .	29
2.6.4	Die Sicherungsschicht im TETRA-Standard	32
2.6.4.1	Medium Access Control	33
2.6.4.1.1	Kanalcodierung	34
2.6.4.1.2	Funkbetriebsmittelverwaltung . . .	38
2.6.4.1.3	Dienstelemente der MAC-Dienstzugangspunkte	40
2.6.4.1.4	Datenstrukturen	40
2.6.4.1.5	Zustandsdiagramm der Mobilstation	43
2.6.4.1.6	Zustandsdiagramm der Basisstation	46
2.6.4.1.7	Kanalzugriffssteuerung	48
2.6.4.1.7.1	Die Parameter des Zufallszugriffsprotokolls	49
2.6.4.1.7.2	Die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“	52
2.6.4.1.7.3	Die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“	53
2.6.4.2	Logical Link Control	54
2.6.4.2.1	Überblick und Funktionen der Teilschicht LLC	54
2.6.4.2.2	Dienstelemente der LLC-Dienstzugangspunkte	55
2.6.4.2.3	Datenstrukturen	55
2.6.4.2.3.1	Basic Link	55
2.6.4.2.3.2	Advanced Link	56
2.6.4.2.4	Zustandsdiagramme	58
2.6.4.2.4.1	Basic Link	58
2.6.4.2.4.2	Advanced Link	59
2.7	Der Protokollstapel Packet Data Optimised	61
2.7.1	Architektur der Sicherungsschicht	63
2.7.1.1	Logical Link Control	63
2.7.1.1.1	Datenstrukturen	65
2.7.1.1.2	Dienstelemente des LLC-Dienstzugangspunktes	66
2.7.1.1.3	Zustandsdiagramm	66

2.7.1.1.3.1	Verbindungsaufbau	67
2.7.1.1.3.2	Bestätigte Datenübertragung	69
2.7.1.2	Medium Access Control	69
2.7.1.2.1	Dienstelemente der MAC-Dienstzu- gangspunkte	70
2.7.1.2.2	Interne logische Kanäle	70
2.7.1.2.3	Datenstrukturen	71
2.7.1.2.4	Zufallszugriffsprotokoll	72
2.7.1.2.4.1	Prioritätsgesteuerter Zufalls- zugriff	76
2.7.1.2.5	Zustandsdiagramm der Mobilstation	77
2.7.1.2.6	Zustandsdiagramm der Basisstation	80
2.7.1.2.7	Kanalcodierung	82
2.7.2	Büschelstruktur	83
2.7.2.1	Abwärtsstrecke	83
2.7.2.2	Aufwärtsstrecke	83
3	SDL-orientierter Softwareentwurf von Kommunikationssystemen	87
3.1	Anforderungsanalyse	88
3.2	Systemanalyse	90
3.3	Systementwurf	91
3.4	Objektentwurf	92
3.5	Implementierung	93
3.6	Leistungsbewertung von SDL-Spezifikationen	93
4	Kollisionsauflösung und Reservierungszuteilung	95
4.1	Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei S-ALOHA	96
4.1.1	Exponentieller Backoff-Algorithmus	96
4.1.2	Stochastische Annäherung	98
4.1.3	Pseudo-Bayes-Algorithmus	99
4.1.4	MMSE-Algorithmus	100
4.1.5	Splitting-Algorithmus	101
4.2	Übersicht über (nicht) unterbrechende Abfertigungsstrategien	105
4.3	Optimale Abfertigungsstrategie für TETRA-Systeme	107
5	Analyse der Funkbetriebsmittel	109
5.1	S-ALOHA-Systeme mit endlicher Teilnehmerzahl	109
5.2	Durchsatz, Auftragsüberhang und Paketverzögerung	113

5.3	Abschätzung der Wiederholrate	115
5.3.1	Abschätzung der Wiederholrate bei V+D	115
5.3.2	Abschätzung der Wiederholrate bei PDO	117
5.4	Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff	118
5.4.1	Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff bei V+D	119
5.4.2	Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff bei PDO	121
5.5	Wartewahrscheinlichkeit bei TETRA-Systemen	122
5.6	Abschätzung der Bediendauer	125
5.6.1	Abschätzung der Bediendauer bei V+D	125
5.6.2	Abschätzung der Bediendauer bei PDO	127
5.7	Maximale Teilnehmerzahl bei reservierter Übertragung	131
5.7.1	Sprach- und Datenübertragung bei V+D	131
5.7.2	Sprach- und Datenübertragung bei PDO	133
5.8	Zusammenfassung	135
6	Die Entwicklungsumgebung SPEET	137
6.1	Der zweifach rekursive Produktentwicklungszyklus	138
6.2	Die Werkzeugkomponenten von SPEET	141
6.3	Verkehrslastgeneratoren	143
6.4	Übertragungsmodelle	146
6.5	Hardwareemulation	147
6.6	Statistische Auswertung	149
6.7	Zusammenfassung	153
7	Die Simulationsklassenbibliothek SPEETCL	155
7.1	Programmtechnische Konzepte	155
7.2	Klassenhierarchie	157
7.3	Ereignisorientierte Simulation	158
7.4	Ausnahmefehlerbehandlung	158
7.5	Persistenz	159
7.6	Softwarequalitätssicherung	162
8	Automatische Codegenerierung von SDL nach C++	163
8.1	Entwurfsziele für einen SDL→C++-Codegenerator	163
8.2	Leistungsumfang des Codegenerators	164
8.3	Das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL	167
9	Das Modell für Übertragungsfehler bei TETRA	169

9.1	Störeinflüsse auf den Mobilfunkkanal	170
9.1.1	Rauschen, Pfadverlust, Abschattung, Bewegung und Mehrwegeausbreitung	170
9.1.2	Gleichkanalstörungen	173
9.2	Modell des Mobilfunkkanals	178
9.3	Modell eines TETRA-Empfängers	182
9.3.1	Filtern, Entzerren, Abtasten und Entscheiden	182
9.3.2	Bestimmung des Bitfehlerverhältnisses	182
9.4	Fehlermusterdateien für TETRA-Pakete	185
9.4.1	Modell für die Verteilung von Fehlerbüschellängen bei TETRA	185
9.4.2	Ermittlung des Paketfehlerverhältnisses	187
9.5	Paketfehler für versch. Zellgruppengrößen und Signalstö- rstände	188
10	Leistungsbewertung mit dem TETRA-Simulator	193
10.1	Simulatoraufbau	193
10.2	Simulative Untersuchung des Protokollstapels V+D	195
10.3	Simulative Untersuchung des Protokollstapels PDO	206
11	Zusammenfassung und Ausblick	215
A	TETRA-Standard	219
A.1	TETRA-Zusatzdienste	219
A.2	Dienstelemente der V+D-MAC-Dienstzugangspunkte	221
A.3	Dienstelemente der V+D-LLC-Dienstzugangspunkte	223
A.4	Dienstelemente des PDO-LLC-Dienstzugangspunktes	227
A.5	Dienstelemente der PDO-MAC-Dienstzugangspunkte	228
A.6	Die Dokumente des TETRA-Standards	230
B	TETRA-Szenarien	237
C	Die SPEETCL-Klassenhierarchie	245
C.1	Basisklassen	245
C.2	Felder	246
C.3	Ausnahmefehlerbehandlung	247
C.4	Allgemeine Behälter und Iteratoren	247
C.5	Ereignisorientierte Simulationssteuerung	249

C.6 Zufallszahlengeneratoren	249
C.7 Wahrscheinlichkeitsverteilungen	249
C.8 OSI-Referenzmodell	250
C.9 Lastgeneratoren	251
C.10 Übertragungsmodelle	253
C.11 Codec-Modelle	254
C.12 Modem-Modelle	254
C.13 Kanalmodelle	255
C.14 SDL-Laufzeitsystem	256
C.15 Statistische Auswertung	257
C.16 Persistenz	259
C.17 Verschiedenes	259
D Paket- und Bitfehlerverhältnisse in mehrzellularen Umgebungen	261
Abbildungsverzeichnis	271
Tabellenverzeichnis	277
Glossar	279
Liste der Formelzeichen	287
Abkürzungsverzeichnis	303
Verzeichnis unveröffentlichter Quellen	313
Literaturverzeichnis	319
Namensverzeichnis	355
Stichwortverzeichnis	359
Lebenslauf	381
Nachwort	383

Einleitung

Der europäische Standard für Bündelfunksysteme *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) wurde vom *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) entwickelt und stellt eine rein digitale Informationstechnologie für schmalbandige Sprach- und Datenübertragung dar, vgl. Anh. A.6, S. 230. TETRA setzt einen neuen Maßstab hinsichtlich der Effizienz von sicherheitsrelevanten und geschäftlichen Telekommunikationsanwendungen.

Für viele Firmen eröffnen sich z. B. durch die Möglichkeit des Gruppenrufs bei der Steuerung von Fahrzeugflotten neue Rationalisierungspotenziale. Datenübertragung kann eingesetzt werden, um den Außendienst von Wartungs- und Servicefirmen zu optimieren oder um in der Telemetrie mobil Messdaten zu erfassen. Da keine gesprächsabhängigen sondern nur monatliche Grundgebühren anfallen, bedeutet dies einen weiteren großen Vorteil von Bündelfunksystemen.

Neben dem herstellerunabhängigen Betrieb von Endgeräten in einem TETRA-Netz und der Möglichkeit der Kommunikation mit Teilnehmern anderer TETRA-Netze und anderer öffentlicher und privater Netze, wie z. B. das öffentliche Telefonnetz, ist TETRA vor allem aufgrund seiner fortgeschrittenen Abhör-, Stör- und Manipulationssicherheit für *Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* (BOS) von großer Bedeutung. Die Polizei, die Feuerwehr, Rettungsdienste und auch das Militär können ihre eigenen Verschlüsselungsalgorithmen und deren Parameter definieren und falls notwendig während des Netzbetriebs verändern.

TETRA-Netze sind zusätzlich für BOS von großem Interesse, da es bei TETRA mobilen Endteilnehmern gestattet ist, direkte Funkverbindungen zueinander aufzubauen, ohne auf eine Infrastruktur angewiesen zu sein (*Walkie-Talkie*-Betrieb, *Direct Mode* (DM)). BOS stellen im Vergleich zu kommerziellen Nutzern erhöhte Anforderungen an ein TETRA-Netz in Bezug auf Ausfallwahrscheinlichkeit, Gesprächsaufbauzeiten und grenzüberschreitende Funkversorgung vor allem in dünnbesiedelten Gebieten, innerhalb von Gebäuden und besonders am Zellrand.

Nach mehreren Feldversuchen stehen eine Vielzahl von europäischen Staaten kurz davor, am Anfang des 21. Jahrhunderts nationale TETRA-Netze für BOS mit Pilotfunktion für das außereuropäische Ausland, insbesondere für den asiatischen und australischen Raum, zu implementieren. Da Investitionen von mehreren Mrd. Euro bevorstehen, ist eine genaue Kenntnis der technischen Leistungsmerkmale TETRAs für die Netzplanung und den Netzbetrieb notwendig.

Umfassend die Leistungsfähigkeit von TETRA-Systemen zu bewerten, ist das Ziel dieser Arbeit. Um diese Bewertung mit formalen, objektorientierten Methoden durchführen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Methoden und Werkzeuge für die stochastische, ereignisorientierte Simulation, insbesondere von TETRA-Systemen, entwickelt.

1.1 Kapitelübersicht

In Kap. 2, S. 5, wird der Leser zuerst in die Gründe für die technische Entwicklung vom analogen Betriebsfunk zum digitalen Bündelfunk eingeführt. Anschließend wird nach einer allgemeinen Einführung in das digitale Bündelfunksystem TETRA der Aufbau der beiden Protokollstapel TETRAs V+D und PDO umfassend erläutert. Großes Augenmerk wird hierbei auf Dienstelemente, Datenstrukturen und Zustandsdiagramme der einzelnen Teilschichten gelegt. Besonders detailliert wird auf die Zufallszugriffsprozeduren der beiden Protokollstapel eingegangen, da sie die Grundlage für die Untersuchungen in den darauffolgenden Kapiteln darstellen. In Anh. A, S. 219, sind die einzelnen Dokumente des TETRA-Standards aufgeführt.

Protokolle komplexer Kommunikationssysteme werden mit Hilfe von formalen Beschreibungstechniken spezifiziert. In Kap. 3, S. 87, wird der objektorientierte Softwareentwurf von Kommunikationssystemen unter Verwendung der formalen Beschreibungssprache *Specification and Description Language* (SDL) vorgestellt. Die Erweiterung dieses Entwurfsprozesses um den Aspekt der Leistungsbewertung ist ein wesentlicher Teil dieser Arbeit.

Die beiden Protokollstapel von TETRA, V+D und PDO, definieren keine Algorithmen für die Auflösung von Kollisionen beim Zufallszugriff, d.h. beim Wettbewerb um Betriebsmittel. In Kap. 4, S. 95, werden aus der Literatur bekannte Algorithmen und deren Anpassung an die TETRA-spezifischen Eigenheiten des Zufallszugriffs vorgestellt, die mit der Absicht

entwickelt wurden, das *Slotted-ALOHA* (S-ALOHA)-Verfahren zu stabilisieren und dabei gleichzeitig Durchsatz und Paketverzögerung zu optimieren.

Ausgehend von einem Modell für die Ermittlung des mittleren Durchsatzes und der mittleren Paketverzögerung eines S-ALOHA-Systems bei endlicher Teilnehmerzahl und einem Modell für die Berechnung der Wartewahrscheinlichkeit in einem TETRA-System wird in Kap. 5, S. 109, die mögliche bedienbare maximale Teilnehmerzahl bei TETRA-Systemen abgeschätzt.

Ziel der Entwicklungsumgebung *SDL Performance Evaluation Environment and Tools* (SPEET) ist der Entwurf und die Leistungsbewertung komplexer, formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme in einer frühen Phase ihrer Entwicklung mit Hilfe von Simulation und Emulation, vgl. Kap. 6, S. 137. Die programmtechnische Grundlage der SPEET-Umgebung stellt die C++-Klassenbibliothek *SDL Performance Evaluation Environment and Tools Class Library* (SPEETCL) dar, vgl. Kap. 7, S. 155. Sie wurde für die stochastische, ereignisorientierte Simulation entwickelt. Die Klassenhierarchie und die Funktionalität der einzelnen Klassen sind in Anh. C, S. 245, dokumentiert. SDL-Spezifikationen nach C++ auf das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL umzusetzen, ist die Aufgabe des in Kap. 8, S. 163, beschriebenen Codegenerators.

In Kap. 9, S. 169, wird beschrieben, auf welche Weise Fehlermusterdateien zur Protokollsimulation hergestellt wurden, um untersuchen zu können, wie sich TETRA-Systeme bei gestörter Übertragung in einem mehrzellularen Netz verhalten. Die ermittelten Paket- und Bitfehlerverhältnisse sind in Anh. D, S. 261, abhängig vom Kanaltyp und der Zellgruppengröße aufgeführt. Mit Hilfe dieser Fehlermusterdateien werden in Kap. 10, S. 193, Übertragungsfehler auf Paketebene nachgebildet und das Verhalten der Kollisionsauflösungsalgorithmen bei gestörter Übertragung in einem Hochlastverkehrsszenarium unter Variation der Parameter der TETRA-Protokollstapel untersucht. Typische Verkehrslastszenarien sind in Anh. B, S. 237, aufgeführt.

1.2 Lesehinweise

Zu Beginn eines jeden Kapitels befindet sich ein Inhaltsverzeichnis zusammen mit dieses Kapitel charakterisierenden Schlüsselwörtern. Eine Kurzbeschreibung des Kapitels schließt sich diesen jeweils an. Abkürzungen werden

bei ihrer ersten Verwendung ausgeschrieben und können im Abkürzungsverzeichnis ab S. 303 nachgeschlagen werden. Die Liste der Formelzeichen ab S. 287 beinhaltet nicht nur alle in Formeln eingesetzten Bezeichner, sondern auch neben deren Bedeutung, den zugeordneten Einsatzbereich und den Ort ihrer ersten Erwähnung.

Das Literaturverzeichnis ist zweigeteilt in ein Verzeichnis unveröffentlichter und eines veröffentlichter Quellen. Beide Verzeichnisse sind kommentiert, d. h. mit kurzen Inhaltsangaben versehen. Ferner wird in den einzelnen Einträgen auf die Seite des Zitats im Text und auf eine Bezugsmöglichkeit im Internet hingewiesen.

Alle zitierten Personen sind im Namensverzeichnis aufgeführt. Das Glossar erläutert kurz die vom Autor als besonders wichtig erachteten Begriffe. Große Sorgfalt wurde darauf verwendet, ein vollständiges Stichwortverzeichnis zu erstellen. Es wird dem Leser geraten, dieses intensiv zu nutzen. Es wurde in der ganzen vorliegenden Arbeit versucht, immer dort, wo es möglich erschien, deutsche Begriffe anstatt englischer zu verwenden. Bei der erstmaligen Verwendung wird der englische Begriff ebenfalls erwähnt. Ansonsten sei auf das Stichwortverzeichnis verwiesen. Die Verzeichnisse aller Tabellen und Abbildungen vervollständigen den Anhang.

1.3 Bezugsmöglichkeiten

Eine vollständige elektronische Version dieser Dissertation im *Portable Document Format* (PDF) ist unter <http://www.steppler.de> verfügbar. Der Autor ist per E-Mail unter martin@steppler.de erreichbar. Diese und weitere elektronische Dissertationen der RWTH Aachen werden von der Hochschulbibliothek unter <http://www.bth.rwth-aachen.de/ediss/ediss.html> veröffentlicht. Diese Arbeit ist in Buchform als Band der Reihe *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation* (ABMT) über den Wissenschaftsverlag Mainz (<http://www.verlag-mainz.de>) erhältlich.

Das Bündelfunksystem TETRA

Inhalt

2.1 Vom analogen Betriebsfunk zum digitalen Bündelfunk	5
2.2 Die Protokollfamilien des TETRA-Standards	7
2.3 Technische Daten	8
2.4 Dienste des Bündelfunksystems TETRA	11
2.5 Architektur des TETRA-Standards	13
2.6 Der Protokollstapel Voice plus Data	18
2.7 Der Protokollstapel Packet Data Optimised	61

Schlüsselwörter

V+D, PDO, logische und physikalische Kanäle, LLC, MAC, Zustandsdiagramme, SAP, Dienstelemente, PDU, Datenstrukturen, Kanalcodierung, Zufallszugriff, PL, Büschelstruktur

In diesem Kapitel wird der Leser zuerst in die Gründe für die technische Entwicklung vom analogen Betriebsfunk zum digitalen Bündelfunk eingeführt, vgl. Abs. 2.1. Anschließend wird nach einer allgemeinen Einführung in das digitale Bündelfunksystem TETRA der Aufbau der beiden Protokollstapel TETRAs V+D, vgl. Abs. 2.6, S. 18, und PDO, vgl. Abs. 2.7, S. 61, umfassend erläutert. Großes Augenmerk wird hierbei auf Dienstelemente, Datenstrukturen und Zustandsdiagramme der einzelnen Teilschichten gelegt. Besonders detailliert wird auf die Zufallszugriffsprozeduren der beiden Protokollstapel eingegangen, da sie die Grundlage für die Untersuchungen in den darauffolgenden Kapiteln darstellen.

2.1 Die technische Entwicklung vom analogen Betriebsfunk zum digitalen Bündelfunk

Neben dem öffentlichen Funktelefondienst und dem Funkrufdienst bestehen weitere Funkdienste, die nicht öffentlich zugänglich sind. Es werden von diesen mit *nichtöffentlicher beweglicher Landfunk* (nöbL) bezeichneten Funkdiensten Frequenzen verwendet, die nicht von der Öffentlichkeit, sondern nur von spezifischen Anwendern bzw. Anwendergruppen benutzt werden.

Zu dem wohl bekanntesten nÖbL-Funkdienst zählt der seit vielen Jahren von Großunternehmen wie Fluggesellschaften, Taxi- und Transportunternehmen, Bahnen, Häfen oder in *Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* (BOS) verwendete Betriebsfunk. Kennzeichen bisheriger Betriebsfunksysteme ist, dass sie über einen Funkkanal verfügen, der exklusiv von allen mobilen Endstellen einer Anwendergruppe gemeinsam genutzt wird. Analysiert man die konventionellen Betriebsfunksysteme, so offenbaren sich aus der Sicht von Kunden und Betreibern folgende Schwachstellen:

- feste Funkkanalvergabe führt in Ballungsgebieten durch eine zu große Anzahl von Betriebsfunkteilnehmern zu einer Frequenzüberlastung,
- zu kleine Funkversorgungsgebiete,
- Mithörmöglichkeit für Unbefugte,
- keine Verbindung zu öffentlichen Fernmeldenetzen,
- eingeschränkte Unterstützung von Sprach- und Datenübertragung.

Die Frequenzüberlastung war der wesentliche Grund, über neue Funksysteme und -infrastrukturen nachzudenken. Das Ergebnis sind die als Nachfolgesystem für den Betriebsfunk eingeführten Bündelfunksysteme (*Trunked Mobile Radio System*).

Obwohl Bündelfunksysteme das verfügbare Frequenzspektrum nicht erweitern können, tragen sie durch Optimierung der Frequenzausnutzung und durch Erhöhung der Kanalnutzung zur Verbesserung der Dienstgüte sowohl für Endverbraucher als auch Netzbetreiber bei. Der Fortschritt bei der Bündelfunktechnik besteht darin, den Anwendergruppen jeweils nicht nur einen Kanal wie beim Betriebsfunk, sondern vielen Teilnehmern gemeinsam ein Kanalbündel zur Verfügung zu stellen.

Der Kanal wird dem Benutzer vom System nur bei Bedarf zugeordnet und anschließend sofort wieder entzogen. Während beim Betriebsfunk ein Benutzer warten musste, bis ein seiner Anwendergruppe zugeordneter Kanal freigegeben wurde, kann der Bündelfunkbenutzer sprechen, sobald irgendein beliebiger Kanal des Kanalbündels frei ist. Beim Bündelfunk wird das Verkehrsaufkommen gleichmäßig auf alle verfügbaren Funkkanäle aufgeteilt, wobei die Bündelung der Kanäle einen Bündelungsgewinn erzielt, d. h. die Verlustwahrscheinlichkeit p_v wird mit steigender Kanalzahl im Bündel und konstanter Auslastung je Kanal immer kleiner (WALKE, 2001b, Anh. A.2). Der tragbare Verkehr in Erlang/MHz, d. h. die Frequenzökonomie, steigt mit der Bündelstärke. Neben der Frequenzökonomie haben Bündelfunksysteme weitere Vorteile:

- geringerer Installationsaufwand verglichen mit getrennten Funkzentralen,
- Funkversorgungsgebiete entsprechend den wirtschaftlichen Aktionsräumen,
- höhere Reichweite,
- kein unerwünschtes Mithören durch andere,
- Erhöhung der Verfügbarkeit durch bedarfsgerechte Zuteilung der Kanäle,
- optionaler Zugang zum öffentlichen Telefonnetz,
- erweitertes Dienstleistungsangebot durch Selektivruf, variablen Gruppenruf und Prioritätsgespräche,
- Verbesserung der Verkehrsgüte bei Sprach- und Datenübertragung und
- geordneter Warteschlangenbetrieb.

Für den nicht-öffentlichen Bündelfunk der BOS wird auch die Bezeichnung *Private Mobile Radio* (PMR) verwendet. Im Gegensatz hierzu wird der durch kommerzielle Netzbetreiber zur Verfügung gestellte, für Firmen frei zugängliche Bündelfunk *Public Access Mobile Radio* (PAMR) genannt. Als Oberbegriff für den BOS-Funk (PMR) und den Betriebsfunk (PAMR) hat sich die Bezeichnung Profifunk (*Professional Mobile Radio*, PMR) herausgebildet.

2.2 Die Protokollfamilien des TETRA-Standards

Trotz der europaweiten Einführung des *Global System for Mobile Communication* (GSM) wird erwartet, dass die Teilnehmerzahl für Bündelfunksysteme stetig anwachsen wird, wobei man bis zum Jahr 2006 mit ungefähr 1 Mio. Teilnehmern allein beim BOS-Funk in Deutschland rechnet.

Auf dem vom britischen Ministerium für Post und Telekommunikation (*Ministry of Post and Telecommunication*, MPT) entwickelten Bündelfunkstandard MPT 1327/1343 basieren die analogen Bündelfunknetze der ersten Generation.

Keines dieser auf dem Markt existierenden Bündelfunksysteme der ersten Generation bietet ein ausreichendes Angebot an Sprach- und Datendiensten oder ist technisch geeignet, die erwartete Teilnehmerzahl zu bedienen. Zur Harmonisierung des europäischen Bündelfunkmarktes und unter Berücksichtigung dieser Faktoren beschloss das ETSI im Jahre 1988, einen

Standard für ein digitales, paneuropäisches Bündelfunknetz zu erarbeiten. Der erste Arbeitstitel für dieses von dem Technischen Subkomitee Radio Equipment and Systems (RES) 06 entwickelte System war Mobile Digital Trunked Radio System (MDTRS). Ende 1991 wurde für MDTRS aber der neue Begriff Trans-European Trunked Radio (TETRA) eingeführt. Um den Anspruch auf einen weltweiten Standard für Bündelfunksysteme zu unterstreichen, steht das Kürzel TETRA heute für Terrestrial Trunked Radio.

Für TETRA sind zwei Familien von Standards erarbeitet worden:

- Sprache und Daten (Voice plus Data, V+D) und
- optimierte Datenübertragung (Packet Data Optimised, PDO).

Im Anhang sind in Tab. A.6, S. 230, die vom RES 06-Subkomitee erstellten Dokumente des TETRA-Standards aufgeführt.

Der V+D-Standard ist als Nachfolger der bestehenden Bündelfunknetze der 1. Generation gedacht, während der PDO-Standard ein Paketfunksystem der 2. Generation definiert. Beide Standards benutzen dieselbe Bitübertragungstechnik und weitgehend dasselbe Sende- und Empfangsgerät.

Europaweite Standardisierung erzwingt Interoperabilität, d. h. Herstellerunabhängigkeit der Endgeräte des TETRA-Netzes, sowie Interworking zwischen verschiedenen TETRA-Netzen und den Festnetzen. Lokale und regionale Sprach- und Datenfunkt Anwendungen werden durch ein europäisches Bündelfunksystem ersetzt, das alle Sprach- und Datendienste abdeckt und den heutigen Anforderungen bezüglich Bitrate und Übertragungsverzögerung genügt. Flottenmanagement, Telemetrie, Einsatz bei Servicefirmen und Kommunikation bei BOS gehören zu den Hauptanwendungsgebieten von TETRA.

Um eine breite Durchsetzung des ETSI-TETRA-Standards im europäischen Markt zu ermöglichen, wurden Netzbetreiber, Gesetzgeber, Hersteller und Benutzer in die Standardisierung einbezogen. Ende des Jahres 1996 waren die ersten TETRA-Produkte verfügbar.

2.3 Technische Daten

Das Bündelfunksystem TETRA kann als ein- oder mehrzelliges Netz eingesetzt werden. Da die Endgeräte eine Sendeleistung von 1 W, 3 W oder 10 W haben, ist der maximale Zellradius für ländliche Gebiete auf 25 km begrenzt. Als Frequenzbänder sind für die Aufwärtsstrecke (Uplink, UL) bzw. die Abwärtsstrecke (Downlink, DL) vier Bereiche zwischen 380 MHz und 470 MHz bzw. 870 MHz bis 933 MHz vergeben worden, vgl. Tab. 2.1, S. 9. Es wird außerdem untersucht, Frequenzen im 1,8 GHz-Band zu verwenden.

Tabelle 2.1: Technische Daten des Bündelfunksystems TETRA

Frequenzen (MHz)	UL: 380–390, DL: 390–400; UL: 410–420, DL: 420–430 UL: 450–460, DL: 460–470; UL: 870–888, DL: 915–933	
Kanalraster (kHz)	25	
Modulation	$\pi/4$ -DQPSK	
Bitrate	36 kbit/s brutto, 19,2 kbit/s netto (im 25 kHz-Kanal)	
Kanäle/Träger	V+D:	4 TDMA-Sprach- oder Datenkanäle pro 25 kHz
Zugriffsverfahren	PDO:	Statistischer Mehrfachbetrieb von Paketen
	V+D:	TDMA mit S-ALOHA auf dem Zufallszugriffskanal (mit Reservierung bei Paketdaten)
	PDO:	S-ALOHA mit Reservierung bzw. DSMA je nach Verkehrslast
Rahmenstruktur	V+D:	14,17 ms pro Zeitschlitz; 4 Zeitslitze pro Rahmen; 18 Rahmen pro Multirahmen; 60 Multirahmen pro Hyperrahmen; Zeitschlitzlänge: 510 bit
	PDO:	UL und DL benutzen Blöcke der Länge 124 bit, die durch FEC mit Coderate $2/3$ gesichert sind; kontinuierliche Übertragung auf dem DL, diskontinuierliche Übertragung auf dem UL
Nachbarkanalschutz	-60 dBc	
Verbindungsaufbau	< 300 ms	kanalvermittelt
	< 1 s	Gesprächswiederherstellung
	< 2 s	verbindungsorientiert
Übertragungsver- zögerung	V+D:	Bei einem 100 byte-Referenzpaket
	< 500 ms	bei verbindungsorientiertem Dienst
	< 3–10 s	bei verbindungslosem Dienst ab- hängig von der Übertragungs- priorität,
	PDO:	< 100 ms bei 128 byte-Nachricht

In Deutschland ist das erste Frequenzband (UL: 380 MHz–390 MHz, DL: 390 MHz–400 MHz) für das Militär und BOS reserviert (WALKE et al., 1998; KRUSE, 1993; MARTEN, 1998 bzw. 1999; PERNSTEINER, 1992), während das zweite Frequenzband für öffentliche und private Bündelfunknetze privater Netzbetreiber Verwendung findet (UL: 410 MHz–420 MHz, DL: 420 MHz–430 MHz). Das dritte Frequenzband (UL: 450 MHz–460 MHz, DL: 460 MHz–470 MHz) wird z. Z. noch vom analogen C-Netz der Deutsche Telekom MobilNet GmbH belegt. Am 900 MHz-Band (UL: 870 MHz–888 MHz, DL: 915 MHz–933 MHz) haben die Betreiber bisheriger analoger und zukünftiger Bündelfunksysteme aufgrund der anderen Funkausbreitungsbedingungen gegenüber den 400 MHz-Bändern wenig Interesse gezeigt, so dass auch Hersteller von TETRA-Netzkomponenten dieses Band nur teilweise unterstützen. Als Reaktion hierauf ist die Vergabe von Lizenzen in diesem Band durch die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) unsicher.

Das TETRA-System benutzt das $\pi/4$ -differentielle, quaternäre Phasenumtastverfahren ($\pi/4$ -Differential Quaternary Phase Shift Keying, $\pi/4$ -DQ-PSK) (PROAKIS, 1995) zur Modulation und bietet eine Bruttobitrate von 36 kbit/s in einem 25 kHz-Kanal an. Bei einer mittleren Dienstgüte der Kanalcodierung liegt die Nettobitrate bei $19,2 \text{ kbit/s}$. Ohne Kanalcodierung kann die maximale Nettobitrate von $28,8 \text{ kbit/s}$ erreicht werden, vgl. Tab. 2.2, S. 13. Pro Träger stehen bei V+D vier Time Division Multiple Access (TDMA)-Sprach- oder Datenkanäle zur Verfügung, bei PDO wird auf kanalvermittelte Kommunikation verzichtet und stattdessen statistischer Mehrfachbetrieb der Pakete verwendet.

Slotted-ALOHA (S-ALOHA) mit Reservierung bei Paketdatenübertragung wird als Zugriffsverfahren bei V+D verwendet. Bei PDO kann zwischen den Zugriffsverfahren S-ALOHA mit Reservierung und Data Sense Multiple Access (DSMA) abhängig von der Verkehrslast gewählt werden. Die Rahmenstruktur besteht bei V+D aus vier 510 bit-Zeitschlitz pro Rahmen, 18 Rahmen pro Multirahmen und 60 Multirahmen pro Hyperrahmen, der die größte zeitliche Einheit darstellt und ungefähr eine Minute dauert, vgl. Abs. 2.6.2.1.2, S. 21.

Beim PDO-Protokoll beträgt die Länge der Informationsblöcke 124 bit, die durch eine Faltungscodierung mit der Rate $2/3$ geschützt werden und auf der Abwärtsstrecke kontinuierlich, auf der UL diskontinuierlich übertragen werden. Der genaue Ablauf der Kanalcodierung ist für V+D in Abs. 2.6.4.1.1, S. 34, und für PDO in Abs. 2.7.1.2.7, S. 82, dargestellt.

Der Aufbau einer Verbindung soll bei Kanalvermittlung 300 ms und bei verbindungsorientierter Übertragung von Paketdaten (Connection Oriented Network Service, CONS) 2 s nicht überschreiten. Die Übertragungsverzögerung eines 100 byte-Referenzpaketes bei verbindungsorientierter Übertragung soll bei V+D maximal 500 ms betragen, bei verbindungsloser Übertragung abhängig von der jeweiligen Transaktionspriorität maximal 3 s, 5 s oder 10 s. Bei PDO wurde als Obergrenze für verbindungsorientierte Dienste für ein 128 byte-Referenzpaket eine Transitverzögerung von maximal 100 ms festgelegt.

2.4 Dienste des Bündelfunksystems TETRA

Das TETRA-System sieht kanalvermittelte Daten- und Sprachdienste vor, welche nur im V+D-Standard verfügbar sind, und Paketdatendienste, die vom PDO- und vom V+D-Standard angeboten werden. Die paketorientierten Dienste unterscheiden folgende Verbindungsarten:

- verbindungsorientierte Paketdatenübertragung gemäß ISO 8208 Connection Oriented Network Service (CONS) und Dienst entsprechend Telecommunication Standardization Sector of ITU (ITU-T)-Empfehlung X.25 und
- verbindungslose Paketdatenübertragung gemäß ISO 8473 Connection-less Network Service (CLNS) für quitierte Punkt-zu-Punkt (PzP)-Dienste und bzw. oder TETRA-spezifische quitierte PzP- und nicht-quitierte Punkt-zu-Mehrpunkt (PzM)-Dienste.

Kanalvermittelte Sprache kann ungeschützt über sog. Trägerdienste oder (bevorzugt) durch Kanalcodierung geschützt über Teledienste übertragen werden, vgl. Tab. 2.2, S. 13. Ein Teledienst (Tele Service) ist ein Systemdienst, der von einem Endbenutzer über die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Man Machine Interface, MMI) des Endgeräts verwendet wird. Er stellt die gesamte Funktionalität für die Kommunikation zwischen zwei Endbenutzern zur Verfügung und deckt die Open Systems Interconnection (OSI)-Schichten 1 bis 7 ab (KERNER, 1993). Ein Trägerdienst (Bearer Service) ermöglicht die Kommunikation zwischen zwei mobilen Netzabschlüssen (Mobile Termination, MT) oder Festnetzabschlüssen (Network Termination, NT), vgl. Abs. 2.5.2, S. 16. Er beinhaltet jedoch keine Funktionalität bezüglich der Endgeräte, so dass er sich lediglich über die OSI-Schichten 1 bis 3

erstreckt. Teledienste bauen grundsätzlich auf Trägerdiensten auf. Zusatzdienste (*Supplementary Services*) verändern oder erweitern Träger- oder Teledienste. Die TETRA-Teledienste für Sprachübertragung ermöglichen fünf Verbindungsarten:

Einzelruf: PzP-Verbindung zwischen rufendem und gerufenem Teilnehmer.

Gruppenruf: PzM-Verbindung zwischen dem rufenden Teilnehmer und einer über eine gemeinsame Gruppennummer angewählten Gruppe. Der Verbindungsaufbau findet schnell statt, da keine Bestätigung notwendig ist. Die Kommunikation erfolgt im Halbduplexmodus durch Betätigung einer Sprechaste (*Push-to-Talk*, PTT).

Direktruf (Direct Mode, DM): PzP-Verbindung zwischen zwei Mobilgeräten ohne Nutzung der Infrastruktur. Dabei stellt eine *Mobilstation* (MS) ohne Vermittlung einer *Basisstation* (BS) eine Verbindung zu anderen MSen her, hält sie aufrecht und übernimmt alle für die lokale Kommunikation nötigen Funktionen einer BS. Dafür werden sonst nicht im Netz benutzte Frequenzbereiche benutzt. Eine Station kann sogar auf einem anderen Kanal eine Verbindung zu einer BS unterhalten (CAYLA, 1992). Es können z. B. Verbindungen zwischen zwei Teilnehmern aufgebaut werden, von denen sich einer nicht im Einzugsbereich einer Basisstation befindet.

Bestätigter Gruppenruf: PzM-Verbindung zwischen rufendem Teilnehmer und der über eine gemeinsame Gruppennummer angewählten Gruppe, wobei die Anwesenheit der Gruppenmitglieder dem rufenden Teilnehmer durch eine Bestätigung mitgeteilt wird. Ist ein Gruppenmitglied nicht anwesend oder führt ein anderes Gespräch, wird dies dem rufenden Teilnehmer von der TETRA-Infrastruktur (*Switching and Management Infrastructure*, SwMI) mitgeteilt. Ist die Anzahl der erreichbaren Mitglieder zu klein, kann sich der rufende Teilnehmer entscheiden, ob er die Verbindung unterbricht oder aufrecht erhält. Als Option wird ermöglicht, dass Gruppenmitglieder, die anfangs besetzt waren, sich später dem Gespräch zuschalten.

Rundfunkruf: PzM-Verbindung, bei der die über die Rundsendenummer angewählte Teilnehmergruppe dem rufenden Teilnehmer nur zuhören kann.

In Tab. 2.2, S. 13, sind die in den Standards vorgesehenen Träger- und Teledienste für die Protokollstapel V+D und PDO aufgeführt. Die für TETRA definierten Zusatzdienste sind in Anh. A.1, S. 219, beschrieben.

Das TETRA-System unterstützt folgende Daten- und Textdienste:

- Gruppenruf,
- Statusmeldungen,
- Datennachrichten,
- Notrufnachrichten,
- elektronische Post,
- Faksimile und Videotex.

Tabelle 2.2: Träger- und Teledienste für V+D und PDO im TETRA-Standard

TETRA		V+D	PDO
Träger- dienste	7,2–28,8 kbit/s kanalvermittelte, ungeschützte Sprache oder Daten	×	—
	4,8–19,2 kbit/s kanalvermittelte, schwach geschützte Daten	×	—
	2,4–9,6 kbit/s kanalvermittelte, stark geschützte Daten	×	—
	verbindungsorientierte Paketübertragung (PzP)	×	×
	verbindungslose Paketübertragung im Standardformat (PzP)	×	×
	verbindungslose Paketübertragung im Spezialformat (PzP, PzM, Rundfunk)	×	×
Tele- dienste	4,8 kbit/s Sprache	×	—
	verschlüsselte Sprache	×	—

2.5 Architektur des TETRA-Standards

2.5.1 Funktioneller Aufbau des TETRA-Systems

Das TETRA-System ist wie das GSM (WALKE, 2001b, Kap. 3) aufgebaut, mit einigen Unterschieden. Es gibt folgende drei Teilsysteme, deren Schnittstellen in Abb. 2.1, S. 14, aufgeführt sind:

- Mobilstation (MS),
- drahtgebundene Feststation (Line Station, LS) und
- Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur (Switching and Management Infrastructure, SwMI).

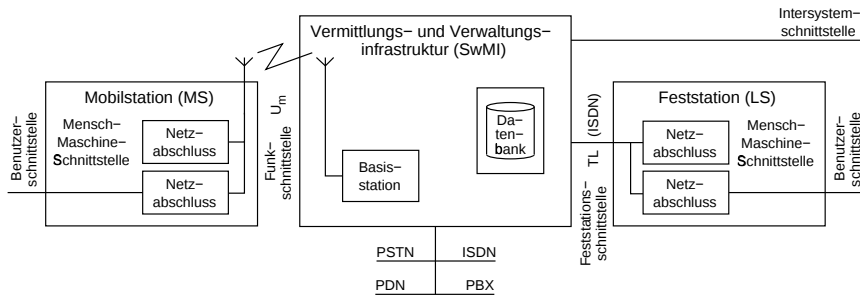


Abbildung 2.1: Die Architektur des TETRA-Systems

2.5.1.1 Mobilstation

Die Mobilstation (MS) umfasst die gesamte physikalische Ausrüstung des Teilnehmers: das Funkgerät und die Schnittstelle, die der Benutzer beim Zugriff auf die Dienste einsetzt.

Wie im GSM besteht die MS aus zwei Teilen: Dem Gerät, das alle für die Funkschnittstelle nötigen Hard- und Softwarekomponenten enthält und dem Subscriber Identity Module (SIM), das alle teilnehmerspezifischen Informationen enthält. Das SIM kann als Smart-Karte realisiert sein, die die Größe einer Scheckkarte hat, oder ist fest eingebaut. Die erste Variante besitzt den Vorteil des schnellen Besitzerwechsels der MS. Als dritte Möglichkeit können die teilnehmerspezifischen Informationen der MS auch durch Eingabe eines *Login-Codes* übermittelt werden. Auch hier ist das Mobilgerät benutzerunabhängig.

Zusätzlich zur Teilnehmeridentifikation gibt es für jedes Mobilgerät eine TETRA Equipment Identity (TEI), die gerätespezifisch ist. Diese Nummer wird vom Betreiber eingegeben; nur er kann das Gerät sperren oder wieder freigeben. Somit kann ein gestohlenes Gerät sofort unbrauchbar gemacht werden, und unbefugter Zugriff ist praktisch ausgeschlossen.

Damit die MS eindeutig adressiert und verwaltet werden kann, sind ihr folgende Nummern bzw. Identitäten zugeordnet worden:

- TETRA Subscriber Identity (TSI),
- TETRA Management Identity (TMI),
- Network Layer SAP Addresses (NSAP) und
- Short Subscriber Identity (SSI),
- Mobile Network Identity (MNI).

Die TSI besteht aus den drei Teilen: Mobile Country Code (MCC), der die Länderkennung beinhaltet, Mobile Network Code (MNC), welcher das betreffende TETRA-Netz bezeichnet, und der SSI, die den Teilnehmer identifiziert. Wenn eine Verbindung innerhalb des Heimatnetzes aufgebaut werden soll, wird nur die SSI als Adresse benutzt. Dadurch verringert sich die Signalisierungsdatenmenge.

Die TMI wird für Verwaltungsfunktionen der Vermittlungsschicht genutzt. Die NSAP wird für die Adressierung von externen Netzen außerhalb von TETRA eingesetzt und ist optional. Es kann damit z. B. eine Verbindung in das Integrated Services Digital Network (ISDN) hergestellt werden.

Mobilfunkgeräte können analog zum GSM in Fahrzeugen installiert oder portabel bzw. handportabel ausgeführt sein. Alle im Abs. 2.4, S. 11, aufgeführten Standarddienste können mit einer MS genutzt werden. Zusatzdienste werden vom Netzbetreiber angeboten oder müssen mitgebucht werden, damit die MS sie benutzen kann.

2.5.1.2 Drahtgebundene Feststation

Die drahtgebundene Feststation (Line Station, LS) ist im Prinzip aufgebaut wie die Mobilstation, aber mit der Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur über das ISDN verbunden. Zum Beispiel wird ein Fuhrparkunternehmer in seiner Firma eine LS benutzen, welche die Zentrale für sein Netz darstellt. Die LS bietet die gleichen Funktionen und Dienste der MS an.

2.5.1.3 Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur

Die Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur (Switching and Management Infrastructure, SwMI) stellt die lokale Steuerungseinheit des TETRA-Systems dar. Sie beinhaltet BSen, welche die Kommunikation zwischen MS und LS über das ISDN herstellen und unterhalten. Die SwMI erledigt die nötigen Steueraufgaben, teilt die Kanäle zu und vermittelt Verbindungen. Sie führt die Authentifizierung durch, beinhaltet die erforderlichen Datenbanken wie die Heimatdatenbank (Home Data Base, HDB) mit Rufnummer, Gerätenummer, abonnierten Basis- und Zusatzdiensten der einzelnen Teilnehmer des Heimatnetzes und der Besuchsdatenbank (Visited Data Base, VDB) mit Informationen über Besucher im Netz, die sie aus deren HDB kopiert. Eine weitere Aufgabe der SwMI ist die Gebührenabrechnung.

2.5.2 Schnittstellen des TETRA-Systems

2.5.2.1 Teilnehmerschnittstelle der Mobilstation

Die TETRA-MS wird als *Mobile Termination* (MT), vgl. Abb. 2.2 bezeichnet. Sie hat die Funktion der Funkkanalbetriebsmittel- und Mobilitätsverwaltung, der Sprach- und Datendecodierung bzw. -codierung, der Übertragungssicherung sowie der Steuerung des Datenflusses. Folgende Ausführungen werden eingesetzt:

Mobile Termination Type 0 (MT0): Besitzt die oben genannten Funktionen mit Unterstützung von nichtstandardisierten Schnittstellen, die Endgerätefunktionen enthalten, vgl. Abb. 2.2.

Mobile Termination Type 2 (MT2): Unterstützt ebenfalls die genannten Funktionen und hat eine R_T -Schnittstelle für ein Endgerät nach dem TETRA-Standard (TE2), vgl. Abb. 2.2.

Das Endgerät (*Terminal Equipment Type 2*, TE2) ist direkt dem Teilnehmer zugänglich und entspricht den vergleichbaren Funktionsgruppen des GSM- oder ISDN-Konzeptes (WALKE, 2001b). Am Bezugspunkt U_m liegt die Funkschnittstelle, die den Zugang mit Hilfe von Verkehrs- und Signalisierungskanälen unterstützt.

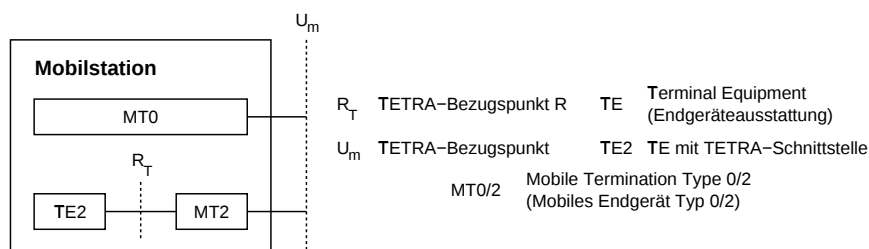
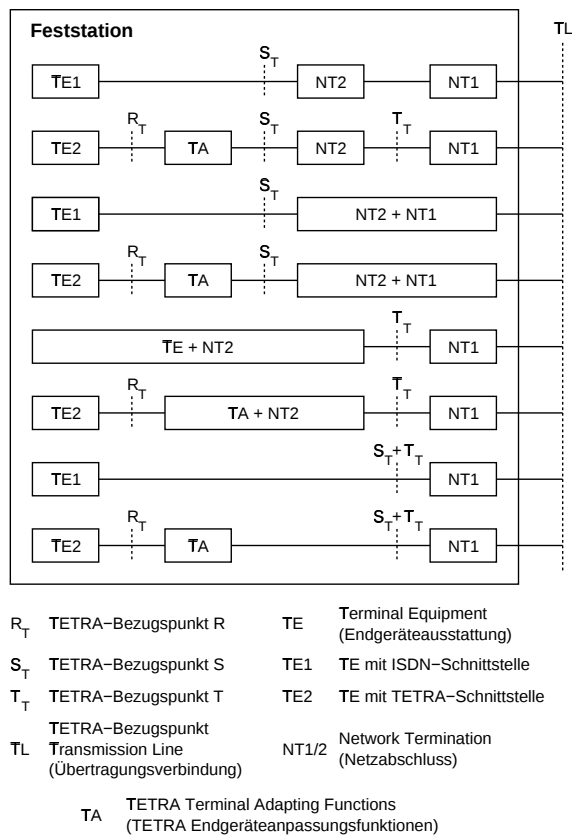


Abbildung 2.2: Netzanschlüsse der Mobilstationen mit den Bezugspunkten R_T und U_m

2.5.2.2 Teilnehmerschnittstelle der Feststation

Die im Folgenden erläuterten Netzanschlüsse sind in Abb. 2.3, S. 17, dargestellt.

**Abbildung 2.3:** Netzabschlüsse der drahtgebundenen Feststation

Die drahtgebundene Feststation (LS) hat eine Netzabschlussfunktionsgruppe (Network Termination, NT), da sie über die Transmission Line (TL)-Schnittstelle mit dem Festnetz mittels einer ISDN-Leitung verbunden ist, und, wie in Abb. 2.3 dargestellt, eine Endgerätefunktionsgruppe (Terminal Equipment, TE). Die NT ist in zwei Ausführungen vorgesehen und enthält die in der ITU-T-Empfehlung I.411 (ITU, 1993a) definierten Funktionen:

Network Termination Type 1 (NT1): Die Funktionen der Funktionsgruppe NT und spezielle Funktionen der TL-Schnittstelle und u. U. der

NT2-Schnittstelle unterstützt dieser Netzabschluss.

Network Termination Type 2 (NT2): Unterstützt ebenfalls die Funktionen einer oder eventuell mehrerer NTs und eine Schnittstelle zu den Funktionsgruppen TETRA-*Terminal Adapting Functions* (TA) und *Terminal Equipment Type 1* (TE1).

Die TE-Funktionsgruppe ist in zwei Ausführungen vorhanden, von denen TE1 eine ISDN-Schnittstelle und TE2 eine TETRA-spezifische Schnittstelle *Terminal Adapting Functions* (TA) enthält. Beide Ausführungen unterstützen die Mensch-Maschine-Schnittstelle (*Man Machine Interface*, MMI). Die TA-Funktionsgruppe ist für eine Datenratenanpassung sowie für die Flusssteuerung zuständig. In der vorliegenden Version hat sie Schnittstellen zu einer TE2- und zu einer NT2-Funktionsgruppe.

2.5.2.3 Die Funkschnittstelle

Abs. 2.6.2 behandelt die Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m .

2.6 Der Protokollstapel Voice plus Data

2.6.1 Aufbau des Protokollstapels Voice plus Data

Der Protokollstapel der Funkschnittstelle (*Air Interface*, AI) umfasst drei OSI-konforme Schichten, vgl. Abb. 2.4, S. 19: die Bitübertragungsschicht, die für V+D und PDO identisch ist, die Sicherungsschicht, die in *Medium Access Control* (MAC) und *Logical Link Control* (LLC) aufgeteilt ist, sowie die Netzschicht (*Network Layer*, N), die in mehrere Teilschichten aufgeteilt ist und Verwaltungsdienste für BSen und MSen anbietet.

Auf der MAC-Teilschicht setzen zwei Protokollstapel auf: die Benutzerebene (*User Plane*), welche für den nicht adressierten Informationstransport zuständig ist, und die Steuerebene (*Control Plane*) für adressierte Signalisierung.

2.6.2 Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m

Wie in Abb. 2.1, S. 14, dargestellt, liegt die Funkschnittstelle U_m zwischen der MS und der SwMI.

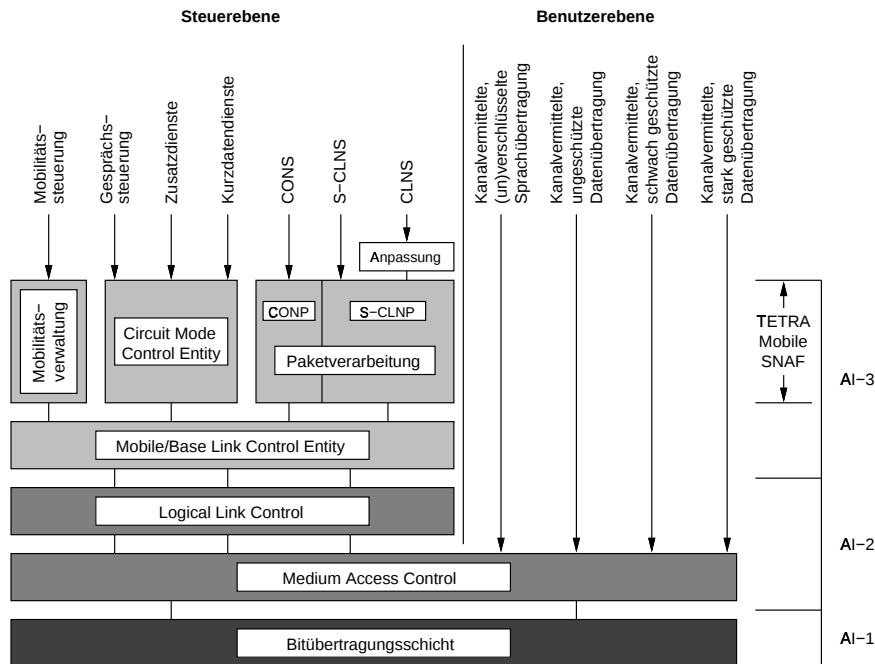


Abbildung 2.4: Architektur des V+D-Protokollstapels

2.6.2.1 Die Multiplex-Strukturen

Analog zum GSM wird auch im TETRA-Standard eine Kombination aus Frequenzmultiplex (*Frequency Division Multiplex*, FDM) und Zeitmultiplex (*Time Division Multiplex*, TDM) angewendet, wobei Vielfachzugriff der Mobilstationen im Zeitbereich verwendet wird (*Time Division Multiple Access*, TDMA), vgl. Abb. 2.5, S. 20. Diese Verfahren spielen neben der Sprachcodierung und der Modulation eine wichtige Rolle.

Das TETRA-System benutzt ein Zellarkonzept, wobei ein gegebenes Versorgungsgebiet in Zellen eingeteilt und in deren Zentrum eine SwMI installiert wird. Die MS kann den Empfangspegel des ihr zugeteilten FDM-Kanals messen. Unterschreitet er eine gewisse Schranke, wird ein Zellwechselverfahren (*Cell Reselect*) eingeleitet, das das Gespräch oder die Datenübertragung mit kurzzeitiger Unterbrechung von maximal 300 ms auf eine

andere Zelle umleitet.

Das Zellwechselverfahren ist in verschiedenen Versionen im Standard vorgesehen, wobei die Grundversion obligatorisch für alle MSen ist. Die darauf aufbauenden Versionen sind optional und tragen zum schnelleren Wechsel der Zelle bei. Dabei muss nicht zwingend der FDM-Kanal gewechselt werden. Es gibt im TETRA-System keine echte Handoverfunktion, weil die Benutzer der MSen im Normalfall keinen großen Aktionsradius haben (z. B. ein Taxifuhrpark).

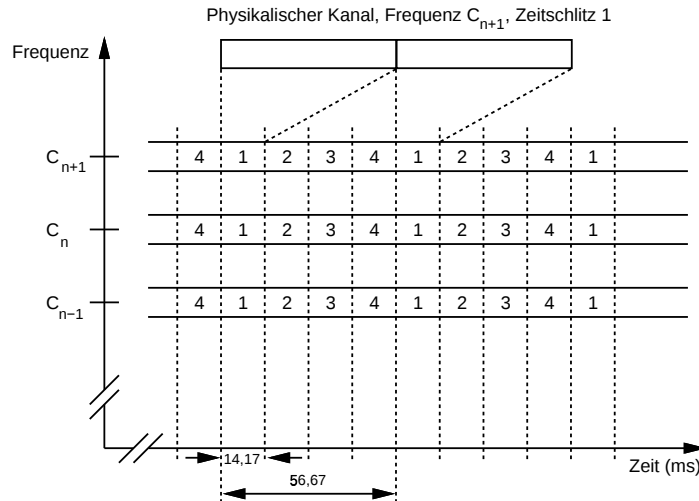


Abbildung 2.5: Realisierung der physikalischen Kanäle mittels FDM und TDM

2.6.2.1.1 Frequenzmultiplex-Struktur

Dem TETRA-Netz sind laut Empfehlung des *European Radiocommunications Committee* (ERC) der *European Conference of Postal and Telecommunications Administration* (CEPT) mehrere Frequenzbänder europaweit zugeteilt worden, vgl. Tab. 2.1, S. 9 (CEPT, 1992).

Die jeweiligen Frequenzbänder für UL und DL sind gleich breit. Der Trägerfrequenzabstand beträgt 25 kHz und jedes UL- und DL-Band ist in N Trägerfrequenzen aufgeteilt. Um eine Störung außerhalb des Bandes zu vermeiden, wird ein G kHz breites Band an jedem Rand des Bandes

angefügt. N und G ergeben sich dann aus der Gesamtbreite des Bandes. Man kann somit folgende Formel für die Berechnung der Trägerfrequenzen angeben. Für die Frequenzen F_{ul} der ULs und den entsprechenden F_{dl} der DLs gilt:

$$\begin{aligned} F_{ul}(c) &= F_{ul,min} + 0,001 \cdot G \\ &\quad + 0,025 \cdot (c - 0,5) \text{ MHz} \quad \text{für } c = 1, \dots, N, \\ F_{dl}(c) &= F_{ul}(c) + D. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dabei ist D der konstante Duplexabstand zwischen der UL- und der DL-Trägerfrequenz. $F_{ul,min}$ ist die Grenzfrequenz am unteren Rand des jeweiligen Frequenzbandes. In Abb. 2.6 ist beispielhaft die Frequenzaufteilung für den dem Militär und den BOS zugewiesenen Frequenzbereich 380 MHz bis 400 MHz dargestellt, vgl. Tab. 2.1, S. 9.

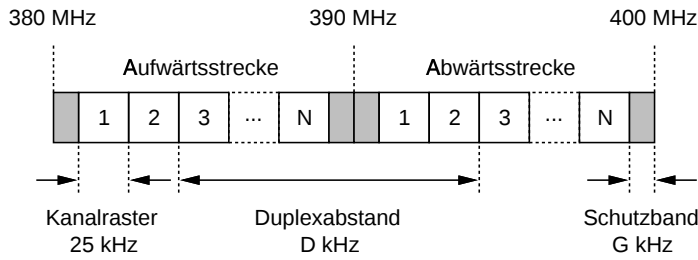


Abbildung 2.6: Frequenzaufteilung beispielhaft für den Bereich 380 MHz bis 400 MHz

2.6.2.1.2 Zeitmultiplex-Struktur

Wie in Abb. 2.5, S. 20, zu erkennen, wird mittels des TDM-Verfahrens auf jeder Trägerfrequenz die Zeitachse in 4 Zeitschlitze (*Timeslot*) der Dauer 14,17 ms entsprechend 510 bit eingeteilt. Ein periodischer Zeitschlitz realisiert einen physikalischen TDM-Kanal, auf den ein logischer Kanal, vgl. Abs. 2.6.2.2, S. 24, abgebildet wird, vgl. Abs. 2.6.2.3, S. 27. Er wird durch seine Trägerfrequenz und den in Abständen von 56,67 ms wiederkehrenden Zeitschlitz charakterisiert.

In Abb. 2.7, S. 22, ist die TDMA-Struktur für das V+D-System zu sehen. Sie setzt sich aus Hyper-, Multi- und TDMA-Rahmen sowie den Zeit-

schlitzen und Teilzeitschlitzen zusammen, die nur beim UL-Verkehr auftreten. Ein Teilzeitschlitz (*Subslot*) besteht aus 255 bit und dauert 7,08 ms. Zwei Teilzeitschlitze bilden zusammen einen Zeitschlitz und werden von 1–2 durchnummeriert (*Subslot Number*, SSN). Jeweils vier Zeitschlitze werden zu einem TDMA-Rahmen (*Frame*) zusammengefasst und hier von 1–4 durchnummeriert (*Timeslot Number*, TN). Ein TDMA-Rahmen hat eine Länge von 56,67 ms. 18 zyklisch nummerierte Rahmen (*Frame Number*, FN) werden zu einem Multirahmen (*Multiframe*) zusammengefasst, der eine Länge von 1,02 s hat.

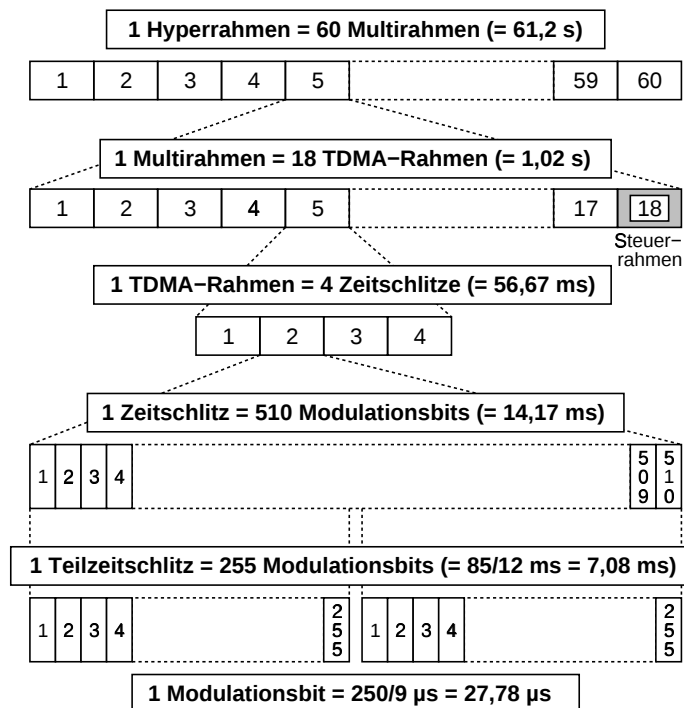


Abbildung 2.7: TDMA-Struktur des *Voice plus Data*-Systems

Der jeweils 18. Rahmen eines Multirahmens ist für die Signalisierungskanäle reserviert und wird *Steuerrahmen (Control Frame)* genannt. Es können aber bei Bedarf auch weitere Rahmen für Signalisierung reserviert

werden. Ein Hyperrahmen (*Hyperframe*) besteht aus 60 Multirahmen und stellt mit einer Länge von 61,2 s die größte vorkommende Struktur dar. Die gesamte Rahmenstruktur wird auf der UL um zwei Zeitschlitze gegenüber der DL verzögert, damit die MS nicht gleichzeitig senden und empfangen muss. Bei der MS erfolgt die Rahmenausrichtung adaptiv abhängig von der Signalausbreitungsverzögerung.

Ein Bündel (*Burst*) ist ein auf eine Trägerfrequenz aufmoduliertes Datenpaket, vgl. Abb. 2.8. Es stellt bei V+D den physikalischen Inhalt eines Zeitschlitzes bzw. physikalischen Kanals dar. Man unterscheidet drei Kanaltypen:

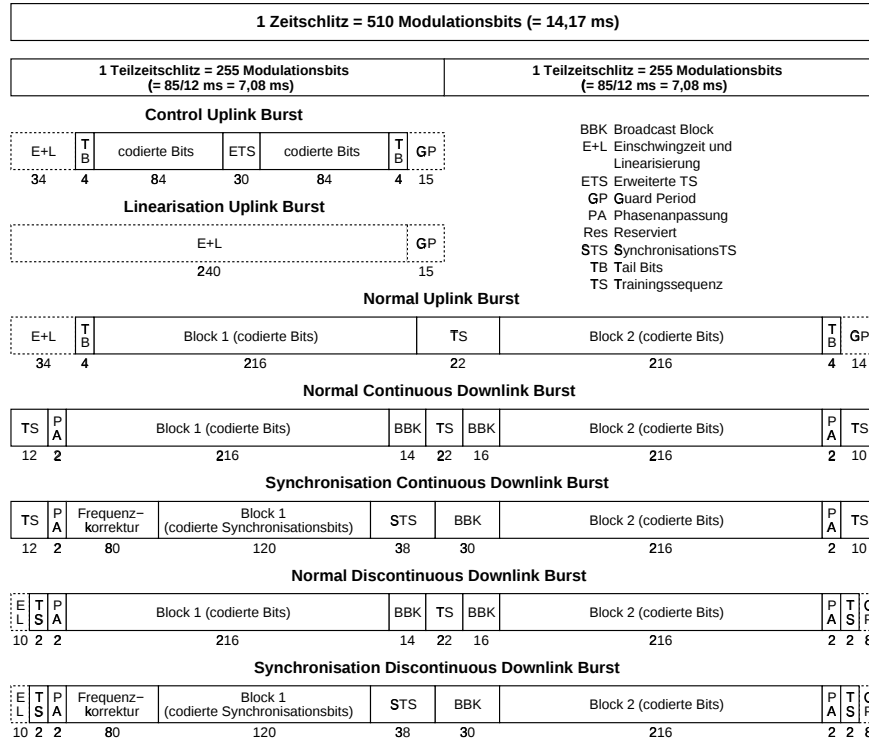


Abbildung 2.8: V+D-Abwärts- und Aufwärtsstreckenbündel

- Der physikalische Steuerkanal (*Control Physical Channel*, CP), der exklusiv die Steuerkanaldaten überträgt,
- der physikalische Verkehrskanal (*Traffic Physical Channel*, TP), auf den die logischen Sprach- und Datenkanäle abgebildet werden, und
- der nicht belegte physikalische Kanal (*Unallocated Physical Channel*, UP), der keiner MS zugeteilt ist und der Versendung von Rundsende- und Dummy-Nachrichten dient.

Ein bestehender physikalischer Kanal benutzt in aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen jeweils den gleichen Zeitschlitz. Abb. 2.8, S. 23, gibt einen Überblick über die im Folgenden weiter erläuterte Büschelstruktur.

Im Standard sind drei verschiedene UL-Büschel definiert. Der *Control Uplink Burst* (CB), der anhand seiner erweiterten Einschwingphase erkannt wird, der *Linearisation Uplink Burst* (LB), der den Mobilstationen die Gelegenheit gibt, ihren Sender zu linearisieren, und der *Normal Uplink Burst* (NUB), der nach dem Initialisierungsprozess für die Übertragung der Steuer- und Verkehrsnachrichten genutzt wird. Während die ersten beiden Büschel nur einen Teilzeitschlitz belegen, nimmt der letzte einen ganzen Zeitschlitz in Anspruch. Dazu werden die nach der Kanalcodierung erhaltenen Multiplex-Blöcke in zwei verschiedene Blöcke, *Block Number 1* (BKN1) und *Block Number 2* (BKN2), aufgeteilt.

Weiterhin gibt es vier DL-Büschel: Den *Normal Continuous Downlink Burst* (NDB), den *Synchronisation Continuous Downlink Burst* (SB) sowie den *Normal* und den *Synchronisation Discontinuous Downlink Burst*, die alle einen ganzen Zeitschlitz belegen. Grund für diese Unterscheidung ist, dass die BS zwischen zwei Betriebsarten wählen kann: kontinuierliche Übertragung (*Continuous Transmission Mode*) und diskontinuierliche Übertragung im Zeitscheibenverfahren (*Time Sharing Mode*).

2.6.2.2 Logische Kanäle

Ein logischer Kanal ist als logischer Kommunikationsweg zwischen zwei oder mehr Teilnehmern definiert und bildet die Schnittstelle zwischen den kommunizierenden Protokollinstanzen und dem Funkteilsystem. Die Zeitschlitz bzw. die entsprechenden physikalischen Kanäle werden von den logischen Kanälen genutzt, um die Daten der logischen Kanäle zu übertragen. Da im TETRA-Standard vier Zeitschlitz pro Rahmen definiert werden, können auch vier logische Kanäle gleichzeitig auf einer Trägerfrequenz bestehen.

Es werden zwei Kategorien von logischen Kanälen definiert:

- Verkehrskanäle und
- Steuerkanäle.

Die Verkehrskanäle (Traffic Channel, TCH) dienen der Übertragung von Sprache und Daten bei kanalvermittelter Verbindung. Über die Steuerkanäle (Control Channel, CCH) werden die Signalisierungsnachrichten und Datenpakete übertragen. Im Folgenden werden die logischen Kanäle erläutert.

2.6.2.2.1 Verkehrskanäle (Traffic Channels, TCHs)

Es gibt vier verschiedene Verkehrskanäle, die für Sprach- und Datendienste geeignet sind. Der TCH/S (S für *Speech*) dient der Sprachübertragung. Für die Datenübertragung sind die Kanäle TCH/7,2, TCH/4,8 und TCH/2,4 zuständig. Sie bieten dem Namen nach eine Nettobitrate von 7,2 kbit/s, 4,8 kbit/s oder 2,4 kbit/s. Die unterschiedlichen Nettobitraten entstehen durch unterschiedlich aufwendige Fehlerschutzverfahren, vgl. Abs. 2.6.4.1.1, S. 34. Der Sprachcodec liefert eine Datenrate von 4567 bit/s und nutzt daher den TCH/4,8. Es werden 8000 Abtastwerte pro Sekunde jeweils zu 16 bit quantisiert und im Pulse Code Modulation (PCM)-Format als Eingabe verwendet. Mit Hilfe des Algorithmus Algebraic Code-Excited Linear Predictive (ACELP) (AKAIWA, 1997; STEELE und HANZO, 1999; VARY et al., 1998) werden aus 240 Abtastwerten für 30 ms Sprache 137 bit-Sprachrahmen erzeugt.

2.6.2.2.2 Signalisierkanäle (Control Channels, CCHs)

Zur Übertragung der Signalisierungs- und Paketdatennachrichten stehen sechs verschiedene Steuerkanäle zur Verfügung.

Associated Control Channel (ACCH): Der ACCH ist ein einem TCH zugeordneter Steuerkanal. Es wird zwischen zwei Typen von ACCHs abhängig von der Benutzung des Verkehrskanals unterschieden: der Fast Associated Control Channel (FACCH) und der Slow Associated Control Channel (SACCH). Wird der zugeordnete Verkehrskanal nicht für Verkehrsübertragungen genutzt, dann steht dieser Kanal in allen Rahmen (1–18) für Signalisierungen zur Verfügung und wird als FACCH bezeichnet. Wenn jedoch über den Kanal Verkehrsübertragungen stattfinden, dann steht dieser Kanal nur im 18. Rahmen für Signalisierungen zur Verfügung und wird SACCH genannt. Für einen

nur in einer Richtung (UL oder DL) für Verkehrsübertragungen genutzten bidirektionalen TCH steht in der einen Richtung ein SACCH und in der anderen ein FACCH zur Verfügung. Sind während einer Verkehrsübertragung Signalisierungsdaten zu übertragen, wird der Stealing Channel (STCH) verwendet. Die logischen Kanäle FACCH und SACCH werden auf den Signalling Channel (SCH) abgebildet.

Broadcast Control Channel (BCCH): Der BCCH ist ein unidirektionaler DL-Kanal, der von allen MSen allgemein genutzt wird. Es existieren zwei Kategorien von BCCHs. Der Broadcast Network Channel (BNCH) liefert Netzinformationen und der Broadcast Synchronisation Channel (BSCH) liefert Informationen für Zeit- und Verschlüsselungssynchronisation.

Linearisation Channel (LCH): Der LCH wird von den MSen und BSen genutzt, um ihre Sender zu linearisieren. Auch hier existieren zwei Arten: Der Common Linearisation Channel (CLCH) für die UL der MSen und der Basestation Linearisation Channel (BLCH) für die DL.

Signalling Channel (SCH): Der SCH wird von allen MSen geteilt, kann aber Informationen für nur eine oder eine Gruppe von MSen enthalten. Die TETRA-Systemfunktionen erfordern mindestens einen SCH pro BS. Es gibt drei Kategorien von SCHs, die von der Länge der Nachricht abhängen. Der bidirektionale Full Size Signalling Channel (SCH/F) belegt immer einen ganzen Zeitschlitz und die unidirektionalen Half Size Uplink Signalling Channel (SCH/HU) und Half Size Downlink Signalling Channel (SCH/HD) belegen immer einen halben Zeitschlitz bzw. einen Teilzeitschlitz.

Access Assignment Channel (AACH): Der AACH stellt eine schmalbandige Inbandsignalisierung in jedem Broadcast Block (BBK) eines DL-Zeitschlitzes dar und enthält Angaben über die Zuweisung der nächsten UL- und DL-Zeitschlitz auf dem entsprechenden Funkkanal, vgl. Abb. 2.8, S. 23.

Stealing Channel (STCH): Der STCH ist ein bidirektionaler Kanal, der mit einem TCH assoziiert ist. Er stiehlt einen Teil der Kapazität des TCH, um Steuerinformationen zu übertragen. Im Halbduplexmodus ist der STCH ein unidirektionaler Kanal und ist gleichgerichtet mit dem betreffenden TCH. Der STCH wird bei Signalisierung mit hoher Priorität, z. B. beim Zellwechselverfahren (*Cell Reselect*), genutzt.

2.6.2.3 Abbildung der logischen Kanäle auf physikalische Kanäle

Im unteren Teil der MAC-Schicht werden physikalische Kanäle auf logische Kanäle abgebildet, vgl. Tab. 2.3, S. 28. Im Folgenden werden wichtige Aspekte der Tabelle erläutert. Der BCCH und der CLCH werden auf den Steuerrahmen (18. Rahmen eines Multirahmens) eines physikalischen Steuer- oder Verkehrskanals durch Funktionen der Zeitschlitz- und der Multirahmennummer abgebildet. Dazu gibt es folgenden Algorithmus:

- DL: BNCH, wenn $FN = 18$ und $(MN + TN) \bmod 4 = 1$,
 BSCH, wenn $FN = 18$ und $(MN + TN) \bmod 4 = 3$,
 UL: CLCH, wenn $FN = 18$ und $(MN + TN) \bmod 4 = 3$.

Weiterhin kann die BS den CLCH auf den UL-Teilzeitschlitz 1 und den BLCH auf den DL-Block 2 eines physikalischen Steuerkanals (CP) abbilden. Sie leistet dies auf einer Zeitschlitz-zu-Zeitschlitz-Basis und zeigt es im AACH an. MSen können ihre Sender bei Auftreten eines CLCH auf irgendeinem CP linearisieren, wenn dabei keine Abbildungsvorschriften verletzt werden und der Linearisationsvorgang länger als einen Multirahmen zurückliegt. Der BLCH wird auch auf einen DL-Block 2 abgebildet, wenn im ersten Block ein SCH/HD oder BSCH abgebildet wird. Es kann aber nicht mehr als ein BLCH pro vier Multirahmen auf einem Träger auftreten.

Auf der UL können, falls nicht ein CLCH auf den ersten Teilzeitschlitz abgebildet wird, ein SCH/F oder zwei SCH/HU abgebildet werden. Andernfalls kann nur der zweite Teilzeitschlitz für einen SCH/HU genutzt werden. Auf der DL können ein SCH/F oder zwei SCH/HD abgebildet werden, wenn nicht der zweite Block für einen BNCH genutzt wird.

Die BS zeigt auf dem AACH an, welcher logische Kanaltyp auf dem nächsten UL-Zeitschlitz genutzt wird. Diese Anzeige ist nur einen Rahmen lang und für einen physikalischen Kanal gültig. Auf der DL wird die logische Kanalnummer durch den Typ der *Trainingssequenz* (TS) bestimmt.

Wenn mehrere DL-Verkehrskanäle von einer Verbindung benutzt werden, werden die UL- und DL-SCHs auf den Steuerrahmen (FN 18) und die niedrigste Zeitschlitznummer abgebildet. Für den Fall der Nutzung mehrerer UL-Verkehrskanäle durch eine Verbindung werden die UL- und DL-SCHs ebenfalls auf den Steuerrahmen, aber auf die höchste Zeitschlitznummer abgebildet.

Tabelle 2.3: Abbildung der logischen Kanäle auf die physikalischen Kanäle

Logischer Kanal	Richtung	Burst-typ	SSN/BKN	Physikal. Kanal	FN	TN
BSCH	DL	SB	BKN1	CP, TP UP	18 1 ... 18	$4 - (MN + 1) \bmod 4^{\dagger}$ 1 ... 4
BNCH	DL	NDB	BKN2	CP, TP CP, UP	18 1 ... 18	$4 - (MN + 3) \bmod 4^{\dagger}$ 1 ... 4
AACH	DL	SB o. NDB	BBK	CP, TP o. UP	1 ... 18	1 ... 4 [†]
BLCH	DL	SB o. NDB	BKN2	CP, UP TP	1 ... 18 18	1 ... 4
CLCH	UL	LB	SSN1	CP, TP CP, UP	18 1 ... 18	$4 - (MN + 1) \bmod 4^{\dagger}$ 1 ... 4
SCH/F	DL UL	NDB NUB	BKN1/2	CP	1 ... 18	1 ... 4
SCH/HD	DL	SB o. NDB	BKN1/2	CP, UP TP	1 ... 18 18	1 ... 4
SCH/HU	UL	CB	SSN1/2	CP TP	1 ... 18 18	1 ... 4
TCH	DL UL	NDB NUB	BKN1/2	TP	1 ... 17	1 ... 4
STCH	DL UL	NDB NUB	BKN1/2	TP	1 ... 17	1 ... 4

[†] Abbildung auf den jeweiligen Zeitschlitz ist vorgeschrieben

Logische Verkehrskanäle (TCH) werden auf die Rahmen 1 bis 17 der physikalischen Verkehrskanäle (TP) abgebildet und zwar auf Block 1 und 2. Der STCH kann auf alle für Verkehr erlaubten Rahmen abgebildet werden und stiehlt immer zuerst den ersten Block eines Zeitschlitzes. Dies wird durch eine spezielle TS angezeigt.

2.6.3 Die Bitübertragungsschicht im TETRA-Standard

Die Bitübertragungsschicht bildet die physikalische Funkschnittstelle des TETRA-Systems. Sie generiert die aus einer Reihe von Symbolen bestehenden Büschel, die gesendet und empfangen werden. Sie ist für die im Folgenden detailliert erläuterten Funktionen zuständig:

- Funkorientiert:
 - Modulation bzw. Demodulation,
 - Funkfrequenzcharakteristik,
 - Sende- bzw. Empfangssteuerung,
 - Feinjustierung der Funkparameter,
- Bit- und symbolorientiert: Symbolsynchronisation,
- Büschelbildung:
 - Empfangen und Senden der Daten von und zur MAC-Teilschicht,
 - Slot-Flag-Codierung bzw. -Decodierung,
 - Verschlüsselung und Entschlüsselung.

$\pi/4$ -Differential Quaternary Phase Shift Keying (DQPSK) (PROAKIS, 1995) mit einer Modulationsbitrate von 36 kbit/s (brutto) ist das benutzte Modulationsverfahren.

In Abb. 2.9, S. 30, ist der Ablauf des Modulationsprozesses dargestellt. Die Folge $B(m)$ der zu übertragenden Modulationsbits wird mit einer differentiellen Codierung in eine Folge von Modulationssymbolen $S(k)$ nach folgender Vorschrift abgebildet:

$$\begin{aligned} S(k) &= S(k-1)e^{jD\Phi(k)}, \\ S(0) &= 1. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Die Phasenverschiebung $D\Phi(k)$ hängt wie folgt von $B(m)$ ab:

$B(2k-1)$	$B(2k)$	$D\Phi(k)$
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$+3\pi/4$
0	0	$+\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Aus dieser Definition folgt, dass $S(k)$ acht verschiedene Werte annehmen kann. Das auf die Trägerfrequenz f_c modulierte Signal $s(t)$ lautet:

$$s(t) = \text{Re} \{ s_T(t) e^{j2\pi f_c t + \Phi_0} \}, \quad (2.3)$$

mit Φ_0 als Phasenoffset und $s_T(t)$ als komplexer Hüllkurve des modulierten Signals

$$s_T(t) = \sum_{k=1}^K S(k)g(t - t_k). \quad (2.4)$$

Dabei ist $g(t)$ die inverse Fouriertransformierte des Square Root Raised Cosine (SRRC)-Spektrums (STUEBER, 1996) und K die maximale Anzahl der Symbole.

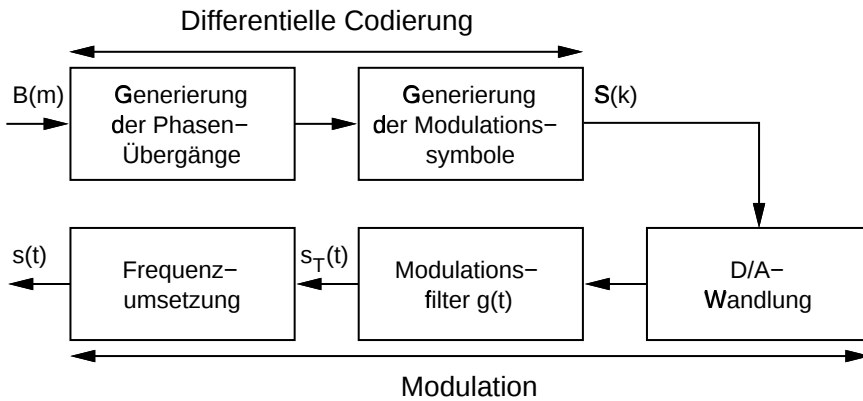


Abbildung 2.9: Blockdiagramm des Modulationsprozesses

Die Sende- und Empfangssteuerung ist für die Auswahl der Frequenzbänder und der Sendeleistungen verantwortlich. Dies geschieht durch Messungen der Empfangsleistungen. Um die Nachbarkanäle so wenig wie möglich zu stören, wird hier die Ausgangsleistung so gesteuert, dass nur sehr kurze Anstiegsrampen bis zum vollen Erreichen der entsprechenden Sendeleistung benötigt werden. Dazu müssen eine Reihe von Grenzwerten eingehalten werden, was durch diese Steuerung sichergestellt wird. Eine Optimierung auf diesem Gebiet wird zu einer Verringerung der Übertragungsfehlerrate führen.

Die Feinjustierung der Funkparameter ermöglicht eine Frequenzkorrektur mittels einer speziellen *Frequency Correction Sequence*, die in einem Synchronisationsbüschel innerhalb des BSCH lokalisiert ist. Damit werden

nur sehr geringe Abweichungen von der Trägerfrequenz erreicht. Dies erfordert zusätzlich eine hohe Genauigkeit des Oszillators der MS. Die Funktion Leistungsregelung (*Power Control*) sorgt u. a. dafür, dass die MS immer die der Entfernung zur BS angepasste Sendeleistung verwendet. Dies wird von der MAC-Teilschicht gesteuert.

Ähnlich wie die Frequenzkorrektur wird durch eine bestimmte TS die Symbolsynchronisation erreicht. Diese TS ist bei der ersten Synchronisation länger als bei bestehenden Verbindungen. Die Informationen für die Synchronisation sind in den Büscheln enthalten. Damit ist die Bitübertragungsschicht in der Lage, die Grenzen der Büschel eindeutig zu erkennen. Damit die MS auch über längere Zeit synchronisiert bleibt, werden nach Beendigung des Synchronisationsvorgangs Zeitgeber (*Timer*) gestartet, die anzeigen, wann der nächste Rahmen, Multirahmen oder Hyperrahmen beginnt bzw. endet. Dies erfordert hohe Genauigkeit der Zeitsteuerung der MS.

Die MS kann damit Anfang und Ende eines Büschels erkennen und nutzt das beim Übertragen von Daten, um die MAC-Protokolldateneinheiten (*Protocol Data Unit*, PDU) auf die Büschel abzubilden, sowie ihre spezifischen Informationen korrekt zu platzieren. Beim Empfang wird dieser Prozess genau umgekehrt. Die spezifischen Informationen der Bitübertragungsschicht werden entfernt und aus dem Büschel wird die MAC-PDU zurückgewonnen und an die MAC-Teilschicht übergeben. Die einzelnen Büscheltypen sind in Abs. 2.6.2.1.2, S. 21, detailliert erläutert.

Das *Slot-Flag* existiert in zwei Versionen und zeigt durch die in den Büscheln enthaltenen TSen an, ob ein ganzer Zeitschlitz (SF=0) oder ein halber Zeitschlitz (SF=1) von den Signalisierdaten belegt wird. Eine weitere Aufgabe ist die Verschlüsselung (*Scrambling*) und Entschlüsselung (*Descrambling*). Die Information über den Verschlüsselungscode wird der empfangenden Station in einer nicht verschlüsselten MAC-PDU durch den sog. Farbcode (*Color Code*) mitgeteilt. Die Verschlüsselung ist ein Teil der Kanalcodierung und wird in Abs. 2.6.4.1.1, S. 34, beschrieben.

2.6.4 Die Sicherungsschicht im TETRA-Standard

In Abb. 2.10 ist die Architektur der Sicherungsschicht des TETRA-Standards V+D dargestellt.

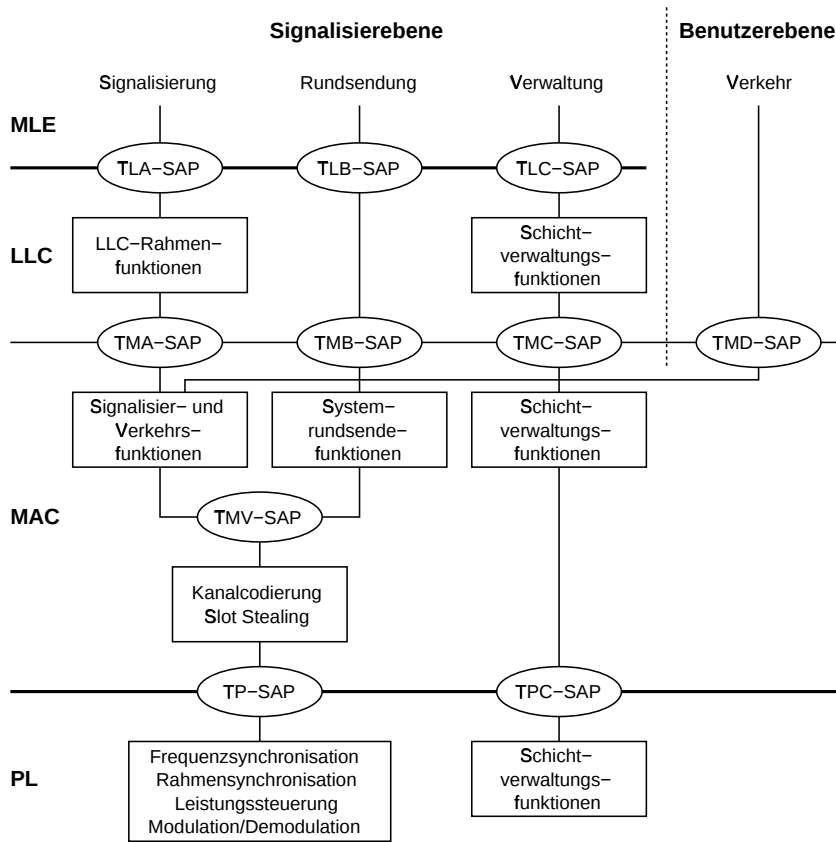


Abbildung 2.10: Architektur der V+D-Sicherungsschicht

Sie gliedert sich in die Teilschichten MAC und LLC, wobei die MAC-Teilschicht am Dienstzugangspunkt *TETRA MAC V-SAP* (TMV-SAP) in eine untere und eine obere aufgeteilt ist. Am oberen Rand der Sicherungsschicht bieten drei Dienstzugangspunkte ihre Dienste der in der Netzschicht

angesiedelten Base Link Control Entity (BLE) bzw. Mobile Link Control Entity (MLE), vgl. Abb. 2.4, S. 19, an: der TETRA LLC A-SAP (TLA-SAP), TETRA LLC B-SAP (TLB-SAP) und der TETRA LLC C-SAP (TLC-SAP). Der TLA-SAP bietet Dienste für den bidirektionalen Transfer von adressierten Signalisierungs- und Datennachrichten an. Der TLB-SAP bietet den nichtadressierten Datentransfer an. Hier werden Rundsendenachrichten mit Systeminformationen unidirektional von der BS an die MSen versendet. Der TLC-SAP ist nur auf Seiten der MS vorhanden und wird für Steuerungs- und Verwaltungsnachrichten verwendet.

Die Teilschichten LLC und MAC korrespondieren über die Dienstzugangspunkte TETRA MAC A-SAP (TMA-SAP), TETRA MAC B-SAP (TMB-SAP) und TETRA MAC C-SAP (TMC-SAP), die über die gleichen Funktionen wie die entsprechenden Service Access Point (SAP)s der LLC-Teilschicht verfügen. Für die Benutzerebene enthält die MAC-Teilschicht einen weiteren TETRA MAC D-SAP (TMD-SAP), über den der Informationstransport bei einer kanalvermittelten Verbindung erfolgt. Die untere und die obere MAC-Teilschicht kommunizieren über den virtuellen TMV-SAP, welcher Dienste für die konkrete Funkübertragung, wie z. B. Kanalcodierung inkl. Bitverwürfelung und Verschränkung über mehrere Blöcke (*Interleaving*) und *Slot Stealing*, anbietet. An der Schnittstelle zur Bitübertragungsschicht bietet der TETRA PL C-SAP (TPC-SAP) – analog zum TLC-SAP und zum TMC-SAP – den Zugang zur lokalen Schichtverwaltung. Über den TETRA PL-SAP (TP-SAP) korrespondiert die untere MAC-Teilschicht mit der Bitübertragungsschicht.

2.6.4.1 Medium Access Control

Die Funktionen der Medium Access Control (MAC)-Teilschicht setzen sich nach Abb. 2.10, S. 32, hauptsächlich aus der Kanalcodierung, der Kanalzugriffssteuerung und der Funkbetriebsmittelverwaltung zusammen, die je nach Übertragungsmodus ihre Dienste an den drei Dienstzugangspunkten TMA-SAP, TMB-SAP und TMC-SAP für den Signalisierungs- und Paketdatenmodus oder an dem TMD-SAP für den Verkehrsmodus anbieten.

Nach dem Aufbau einer kanalvermittelten Sprach- oder Datenübertragungsverbindung, für die der Verkehrsmodus definiert wurde, können Signalisierungsnachrichten mit Hilfe eines *Slot Stealing*-Mechanismus versendet werden.

Eine BS darf kontinuierlich oder diskontinuierlich übertragen. Im letzte-

ren Fall unterbricht die jeweilige BS ihre Übertragung, wenn keine weiteren Informationen zu übertragen sind oder wenn sie denselben Funkkanal zu Signalisierungszwecken mit anderen BSen teilt, die sich ebenfalls im *Time Sharing Mode* befinden. Im Folgenden werden die Funktionen, Datenstrukturen, Dienstelemente und Zustände der MAC-Teilschicht erläutert.

2.6.4.1.1 Kanalcodierung

Die Kanalcodierung erfolgt beim Standard V+D nach dem in Abb. 2.11, S. 35, dargestellten Schema. In MAC-Blöcken enthaltene Informationsbits, Typ-1-Bits genannt, werden von einem (K_2, K_1) -Blockcodierer codiert. Bis auf den AACH, bei dem durch einen verkürzten (30, 14)-Reed-Muller-Code (BOSSERT, 1998; LIN und COSTELLO, 1983) die Typ-2-Bits erzeugt werden, werden in dieser ersten Stufe der Kanalcodierung aus K_1 Typ-1-Bits $b_1(1), b_1(2), \dots, b_1(K_1)$ $K_2 = K_1 + 16$ Typ-2-Bits $b_2(1), b_2(2), \dots, b_2(K_2)$ eines systematischen, zyklischen Blockcodes (SKLAR, 1988) erzeugt. Die Typ-1-Bits werden als Koeffizienten des Polynoms

$$M(X) = \sum_{k=1}^{K_1} b_1(k) X^{k-1} \quad (2.5)$$

behandelt. Für $F(X)$ gelte:

$$F(X) = \left((X^{16} M(X)) \bmod G(X) \right) + \sum_{i=0}^{15} X^i, \quad (2.6)$$

wobei es sich bei allen Operationen um Modulo-2-Operationen handelt, und

$$G(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + X^1 \quad (2.7)$$

das Generatorpolynom des Blockcodes ist. $F(X)$ ist vom Grad 15 mit den Koeffizienten $f(i)$:

$$F(X) = \sum_{i=0}^{15} f(i) X^i. \quad (2.8)$$

Da es sich hier um einen systematischen Blockcode handelt, werden die Codewörter f mit den Typ-1-Informationsbits b_1 zusammen versendet, so dass sich die Typ-2-Bits b_2 zu

$$b_2(k) = \begin{cases} f(k-1) & \text{für } k = 1, 2, \dots, 16, \\ b_1(k-16) & \text{für } k = 17, 18, \dots, K_2 = K_1 + 16 \end{cases} \quad (2.9)$$

ergeben. Da $K_2 \in \{76, 108, 140, 284\} \neq 2^m - 1$ für $m \in \mathbb{N}$, handelt es sich nach [LIN und COSTELLO \(1983\)](#) und [SKLAR \(1988\)](#) bei dem hier verwendeten Blockcode weder um einen Hammingcode noch um einen Bose Chadhuri Hoquenghem (BCH)-Code.

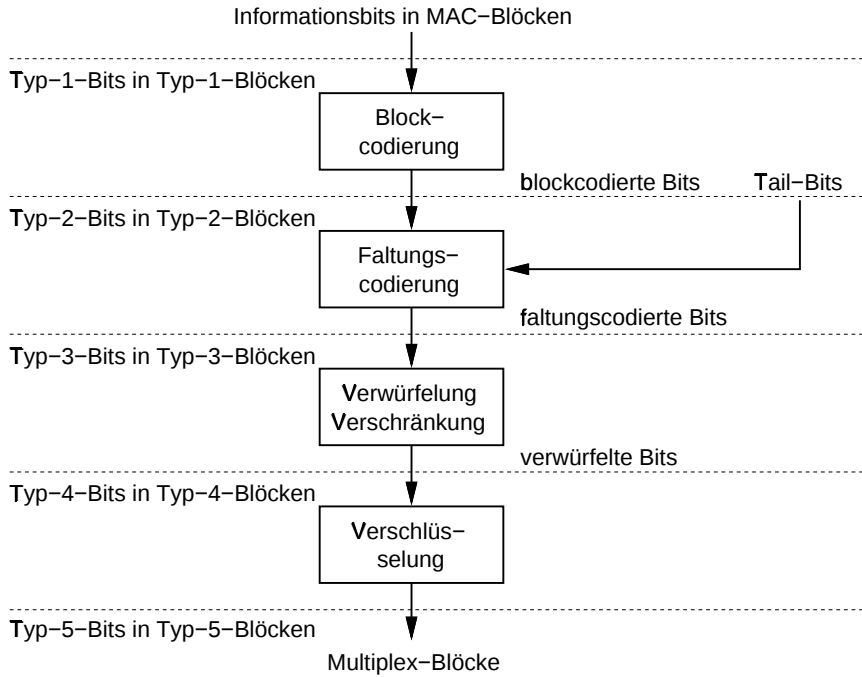


Abbildung 2.11: Schema der TETRA-Kanalcodierung

Die K_2 Typ-2-Bits b_2 werden in der nächsten Stufe der Kanalcodierung von einem $(4, 1, 5)$ -ratenkompatiblen, punktierten Faltungscodierer der Coderate $1/3$ oder $2/3$ zu K_3 Typ-3-Bits b_3 mit $K_3 = t/2 K_2$ und $t \in \{3, 6\}$ codiert. Zuerst wird von einem 16-Zustands-Rate-Compatible Punctured Convolutional (RCPC)-Codierer der Rate $1/4$ aus den Typ-2-Bits $b_2(k)$ die Ausgabe $V(4(k-1) + i)$ berechnet:

$$V(4(k-1) + i) = \sum_{j=0}^4 b_2(k-j)g_{ij}, \quad \begin{array}{ll} i &= 1, 2, 3, 4, \\ k &= 1, 2, \dots, K_2. \end{array} \quad (2.10)$$

Für jedes der 4 Generatorpolynome G_i mit den Koeffizienten g_{ij} gilt:

$$G_i(X) = \sum_{j=0}^4 g_{ij} X^j, \quad \begin{array}{l} g_{ij} \in \{0; 1\}, \\ i = 1, 2, 3, 4. \end{array} \quad (2.11)$$

Sie sind folgendermaßen definiert:

$$\begin{array}{rcll} G_1(X) & = & 1 & + X & & + X^4, \\ G_2(X) & = & 1 & & + X^2 & + X^3 & + X^4, \\ G_3(X) & = & 1 & + X & + X^2 & & + X^4, \\ G_4(X) & = & 1 & + X & & + X^3 & + X^4. \end{array} \quad (2.12)$$

Die Punktierung zu einem 16-Zustands-RCPC-Code der Rate $2/t$ erfolgt durch die Auswahl von $K_3 = t/2 K_2$ Typ-3-Bits aus den 4 K_2 codierten Bits V :

$$b_3(j) = V(k), \quad j = 1, 2, \dots, t/2 K_2, \quad (2.13)$$

mit

$$k = 8 \lfloor j^{-1/t} \rfloor + P \left(j - t \lfloor j^{-1/t} \rfloor \right). \quad (2.14)$$

Bei einer Coderate von $2/3$ lauten die drei Punktierkoeffizienten: $P(1) = 1, P(2) = 2, P(3) = 5$ mit $t = 3$. Bei einer Coderate von $1/3$ lauten die sechs Punktierkoeffizienten: $P(1) = 1, P(2) = 2, P(3) = 3, P(4) = 5, P(5) = 6, P(7) = 7$ mit $t = 6$. Zwei verschiedene, punktierte Faltungscodes, welche vom gleichen Originalcode stammen, heißen ratenkompatibel, wenn alle nicht punktierten, d. h. nicht herausgestrichenen, Bits des hochratigen Faltungscodes auch beim niederratigen enthalten sind. Um den Faltungscodierer nach der Codierung zu initialisieren, werden den Typ-2-Bits b_2 4 sog. *Tail-Bits* mit dem Wert 0 angehängt.

Um büschelartige Übertragungsfehler auszuschalten, werden in einem Block Typ-3-Bits b_3 zu Typ-4-Bits b_4 mittels eines (K, a) -Bitverwürfeler mit $K = K_3$ und z. B. $a = 101$ folgendermaßen verwürfelt, vgl. Abb. 2.12, S. 39:

$$b_4(k) = b_3(i), \quad i = 1, 2, \dots, K = K_3 = K_4, \quad (2.15)$$

mit

$$k = 1 + ((a \cdot i) \bmod K). \quad (2.16)$$

Alternativ ist für 432 bit lange Typ-3-Blöcke eine Verschränkung über N Blöcke in eine Sequenz von Typ-4-Blöcken in zwei Schritten vorgesehen.

Zuerst werden aus Typ-3-Bits b_3 verschränkte Bits $b'_3(m, k)$, Bit k des Blocks m , erzeugt:

$$b'_3(m, k) = b_3(m - j, j + (i \cdot N)), \quad \begin{array}{l} k = 1, 2, \dots, 432, \\ m = 1, 2, \dots, N, \end{array} \quad (2.17)$$

mit

$$\begin{array}{l} j = \lfloor (k - 1)/432/N \rfloor, \\ i = (k - 1) \bmod 432/N. \end{array} \quad (2.18)$$

Die auf diese Weise gewonnenen $B'_3(m)$ Blöcke werden in Typ-4-Blöcke $B_4(m)$ verschränkt:

$$b_4(m, i) = b'_3(m, k) \quad \text{mit} \quad i = 1 + (103 \cdot k) \bmod 432. \quad (2.19)$$

In der letzten Stufe werden schließlich K_4 Typ-4-Bits b_4 zu K_5 Typ-5-Bits b_5 mit Hilfe eines linearen rückgekoppelten Registers verschlüsselt, indem eine Verschlüsselungssequenz p zu b_4 Modulo-2 addiert wird:

$$b_5(k) = b_4(k) + p(k), \quad k = 1, 2, \dots, K_5 = K_4. \quad (2.20)$$

Der Generator der Verschlüsselungssequenz ist durch folgendes Polynom bestimmt:

$$\begin{aligned} c(X) &= \sum_{i=0}^{32} c_i X^i \\ &= 1 + X + X^2 + X^4 + X^5 + X^7 + X^8 + X^{10} + X^{11} + X^{12} + \\ &\quad X^{16} + X^{22} + X^{23} + X^{26} + X^{32}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Die Verschlüsselungssequenz ist gegeben durch:

$$p(k) = \sum_{i=1}^{32} c_i p(k - i), \quad (2.22)$$

die folgendermaßen initialisiert wird:

$$p(k) = \begin{cases} e(1 - k) & \text{für } k = -29, -28, \dots, 0, \\ 1 & \text{für } k = -31, -30. \end{cases} \quad (2.23)$$

Hierbei handelt es sich bei $e(1), e(2), \dots, e(30)$ um einen für die jeweilige Transaktion von der BS festgelegten sog. Farbcode (*Color Code*).

In Abb. 2.12, S. 39, wird die Kanalcodierung abhängig vom verwendeten logischen Kanal bei V+D dargestellt. Es fällt vor allem auf, dass die Synchronisationsdaten des BSCH nicht verschlüsselt werden, da die MSen nach dem Anschalten zuerst in den BSCH hineinhören und zu diesem Zeitpunkt noch keine Absprachen über einen Verschlüsselungscode existieren können. Ferner ist zu beobachten, dass die verschiedenen Übertragungsraten des TCH durch eine Kanalcodierungsdienstgüte unterschiedlicher Qualität erreicht werden, indem beim TCH/2,4 mit einer Rate $r = 1/3$, beim TCH/4,8 mit einer Rate $r = 2/3$ und beim TCH/7,2 überhaupt nicht faltungscodiert wird. Eine Blockcodierung unterbleibt bei allen Varianten des Verkehrskanals.

Da ein Reed-Muller-Blockcodierer nach LIN und COSTELLO (1983) insbesondere für kleine Datenmengen effizient ist, wird dieser auf die lediglich 14 bit breite Access-Assign-PDU des AACHs angewendet. Faltungscodierung und Bitverwürfelung werden für diese kleine Datenmenge nicht mehr durchgeführt.

2.6.4.1.2 Funkbetriebsmittelverwaltung

Diese Funktionen sind teilweise nur in der MS, der BS oder in beiden vorhanden. Sie sollen jederzeit auch ohne Einbeziehung der Netzsicht verfügbar sein. Folgende Funktionen sind u. a. vorgesehen:

- Messung des Paketfehlerverhältnisses (*Message Error Ratio*, MER) und des Bitfehlerverhältnisses (*Bit Error Ratio*, BER) unabhängig oder unter Steuerung der Netzsicht,
- Pfadverlustberechnung durch Überwachung (*Monitoring*) der aktuellen und benachbarten Zellen, Berechnung der Pfadverlustparameter aus Angaben der aktuellen Zelle sowie periodischem Messen (*Scanning*), Bestimmung der Pfadverlustparameter der Nachbarzellen aus dem gemessenen Signalpegel,
- Adressenverwaltung für Einzel-, Gruppen- oder Rundsendeverbindungen – es können zwei Adressen verwendet werden: eine Kopie der *Individual TETRA Subscriber Identity* (ITSI), der *Group TETRA Subscriber Identity* (GTSI) oder ein sog. *Event Label* (EL), die von der MAC-Teilschicht bei bestehenden Verbindungen zur Reduktion des Signalisierungsaufwandes genutzt werden kann –,
- Verwaltung der Leistungsregelung (*Power Control*) in der Bitübertra-

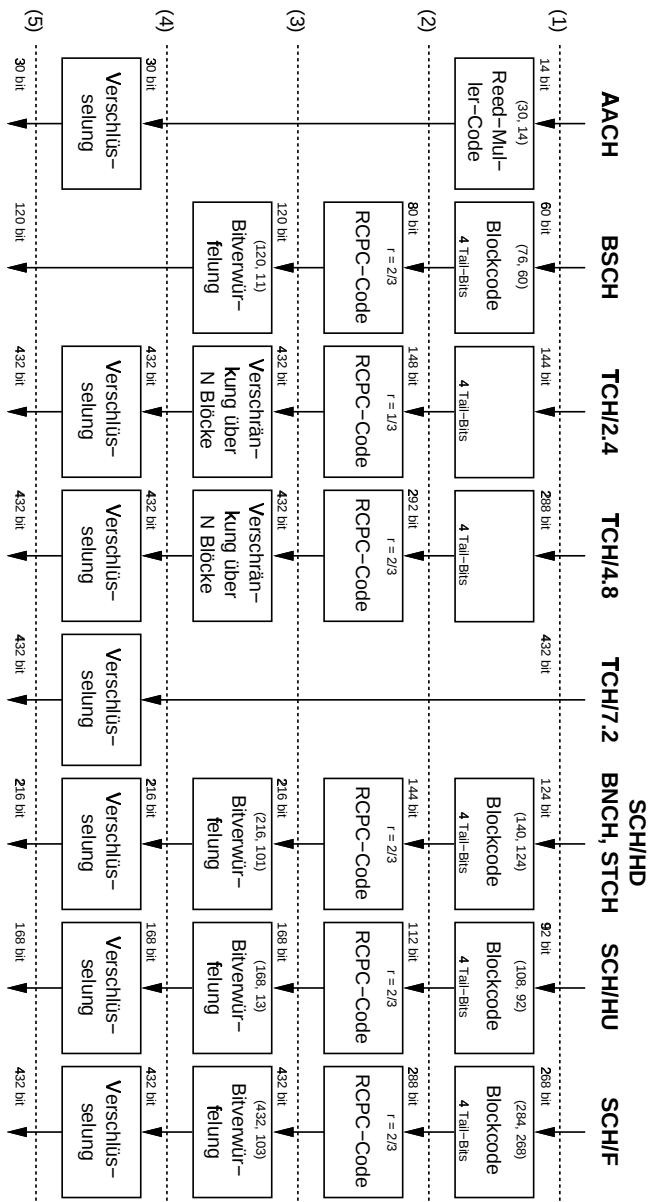


Abbildung 2.12: Struktur der V+D-Kanalcodierung

gungsschicht,

- Einrichtung einer Verbindung durch Verwendung der Angaben Frequenz, Zeitschlitz und Farbcode (*Color Code*) von der MLE und
- Speicherung von Steuerdaten- und Sprachrahmen bis zur Versendung.

2.6.4.1.3 Dienstelemente der MAC-Dienstzugangspunkte

Die Dienstelemente der MAC-Dienstzugangspunkte sind in Anh. A.2, S. 221, näher erläutert.

2.6.4.1.4 Datenstrukturen

In der MAC-Teilschicht sind zwölf verschiedene PDU-Typen definiert. In Tab. 2.4, S. 42, wird die Abbildung dieser PDUs auf die logischen Kanäle von V+D gezeigt.

Access-Assign: Diese 14 bit (netto) breite PDU ist im BBK jedes DL-Zeitschlitzes enthalten und trägt Informationen über den aktuellen Zeitschlitz und die Zugriffsrechte für den um zwei Zeitschlitz verzögerten, mit diesem DL-Zeitschlitz assoziierten UL-Zeitschlitz, vgl. Abb. 2.8, S. 23. Der Inhalt variiert abhängig davon, ob die PDU im 1. bis 17. oder im 18. Rahmen versendet wird.

Access-Define: Der für den Zufallszugriff gültige, spezifische Zugriffscode, die ALOHA-Parameter und die Zugriffsmethode werden von der BS in dieser DL-PDU festgelegt, die einen halben oder ganzen Zeitschlitz belegt und den logischen SCH/HD oder SCH/F-Kanal benutzt. In der Benutzerebene, vgl. Abb. 2.10, S. 32, wird auch der STCH-Kanal belegt.

MAC-Access: Diese PDU wird für den Zufallszugriff verwendet und in Teilzeitschlitzten auf der UL versendet und enthält LLC-Daten. Eine *TETRA MAC-SDU* (TM-SDU) wird ggf. fragmentiert und auf mehrere MAC-Access-PDUs und MAC-Frag-PDUs bzw. MAC-End-HU-PDUs oder MAC-End-PDUs aufgeteilt. Wenn die Nachricht kürzer als die zur Verfügung stehende Zahl Nutzdatenbits ist, werden Füllbits eingefügt. Abhängig davon, ob eine 24 bit breite Schicht-2-Adresse (SSI) für den Erstzugriff oder eine 10 bit breite, von der BS zur Verminderung des Adressverschnitts für diese Transaktion vergebene Adressmarke (EL) verwendet wird, können netto 56 bit bzw. 70 bit Benutzerdaten in dieser PDU transportiert werden. Beginn und Ende einer fragmentierten

TM-SDU werden in der MAC-Access-PDU und in der MAC-End-HU-PDU bzw. MAC-End-PDU angezeigt. Die MAC-Access-PDU wird auf den SCH/HU-Kanal abgebildet.

MAC-End-HU: Diese PDU wird nur auf der UL gesendet und zeigt bei einer Fragmentierung an, dass sie das letzte Fragment enthält. Sie belegt immer nur einen Teilzeitschlitz.

MAC-Data: Zum Transfer von LLC-Daten in ganzen Zeitschlitzten auf der UL oder bei gestohlenem Kanal im ersten und bei Bedarf auch im zweiten Teilzeitschlitz. Im zweiten Teilzeitschlitz kann die MAC-Data-PDU zum Versenden anderer Daten der Steuerebene genutzt werden. Diese PDU kann nur bei reservierter Übertragung benutzt werden. Sowohl bei einer MAC-Access-PDU als auch bei einer MAC-Data-PDU leitet die BS UL-Reservierungswünsche aus den in den PDUs enthaltenen Längenangaben ab. Zusätzlich wird auch eine eventuelle Fragmentierung der Nachricht angezeigt. Abhängig von der Adressierungsart (SSI oder EL) können netto 231 bit oder 245 bit Benutzerdaten versendet werden.

MAC-Resource: Diese PDU wird von der BS zur Übertragung von Nachrichten der Steuerebene auf der DL verwendet. Zusätzlich kann sie einen erfolgreichen Zufallszugriff bestätigen und eventuell Kapazität auf der UL zuweisen. Die maximale Länge der Benutzerdaten beträgt je nach Adressierung und Belegung eines halben oder ganzen Zeitschlitzes 95 bit oder 239 bit. Sowohl bei einer MAC-Data-PDU als auch bei einer MAC-Resource-PDU kann in der Protokollsteuerinformation (*Protocol Control Information*, PCI) angezeigt werden, dass der zweite Teilzeitschlitz gestohlen wird und eine MAC-U-Signal-PDU enthält.

MAC-Frag: Diese PDU wird zum Versand der weiteren Teile fragmentierter Nachrichten der Steuerebene von der LLC-Teilschicht auf der DL und der UL genutzt. Die an die PDU angefügte Kopfinformation ist 4 bit lang und so können 264 Nutzdatenbits verschickt werden.

MAC-Traffic: Sprach- und Datenrahmen kanalvermittelter Verbindungen werden mit dieser PDU versendet. Bis auf die zwei Bits zur Kennzeichnung des PDU-Typs enthält diese PDU ausschließlich Benutzerdaten.

MAC-U-Signal: Ende-zu-Ende-Signalisierungen der Benutzerebene werden mit Hilfe dieser PDU vom TMD-SAP des Senders zum TMD-SAP der Partnerinstanz geleitet. Sie wird immer auf den STCH abgebildet.

Analog zur MAC-Traffic-PDU enthält auch diese PDU bis auf die drei ersten Bits ausschließlich Benutzerdaten. Im dritten Bit wird angezeigt, ob ein oder zwei Teilzeitschlitz gestohlen werden. Wenn auch der zweite Teilzeitschlitz belegt wird, können dort auch LLC-Daten enthalten sein.

MAC-End: Diese PDU belegt entweder einen ganzen Zeitschlitz auf dem SCH/F-Kanal oder – dieses gilt nur für die DL – einen halben auf dem SCH/HD-Kanal. Sie wird mit dem letzten Fragment fragmentierter LLC-Signalisierungsdaten versendet.

Sync: Die BS versendet per Rundsendung unadressiert Sync-PDUs und Sysinfo-PDUs auf den logischen BSCH- und BNCH-Kanälen an die MSen, die daher alle in diesen beiden PDUs enthaltenden Informationen decodieren.

Die Sync-PDU setzt den bei der Kanalcodierung für die Verschlüsselung zuständigen Farbcode fest und enthält die aktuellen Multirahmen-, Rahmen- und Zeitschlitznummern, vgl. Abs. 2.6.2.1.2, S. 21. Ferner teilt sie den MSen mit, ob sie diskontinuierlich oder kontinuierlich überträgt und ob sie sich mit anderen BSen im *Time Sharing Mode* befindet.

Sysinfo: Unter Verwendung der in dieser PDU per Rundsendung von der BS versendeten Parameter berechnen die MSen den Pfadverlust für die aktuelle Zelle. Diese PDU teilt der MS die Trägerfrequenz und das Frequenzband des Hauptorganisationskanals *Main Control Channel* (MCCH) sowie Angaben über die Zellgruppe und die Leistungsregelung mit.

Tabelle 2.4: Abbildung der V+D-MAC-PDUs auf die logischen Kanäle

MAC-PDU	Logische Kanäle	Informationstyp
Access-Assign	AACH	MAC-interne
Access-Define	SCH/HD, SCH/F, STCH	Information
MAC-Access	SCH/HU	TMA-SAP-Information
MAC-End-HU	SCH/HU	
MAC-Data	SCH/F, STCH	
MAC-Resource	SCH/HD, SCH/F, STCH	
MAC-Frag	SCH/HD, SCH/F	
MAC-End	SCH/HD, SCH/F, STCH	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 2.4: Abbildung der V+D-MAC-PDUs auf die logischen Kanäle*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

MAC-PDU	Logische Kanäle	Informationstyp
MAC-Traffic	TCH	TMD-SAP-Information
MAC-U-Signal	STCH	
Sync	BSCH	TMB-SAP-Information
Sysinfo	BNCH	

In Tab. 2.4, S. 42, ist aufgeführt, über welche logischen Kanäle die MAC-PDUs an die untere MAC-Teilschicht zur Kanalcodierung übergeben werden und welche Art von Information in diesen PDUs enthalten ist. Die Daten des STCH werden entweder über den SCH/HU oder SCH/HD übertragen. Außerdem ist die Zuweisung eines ganzen Zeitschlitzes (SCH/F) an den STCH möglich.

2.6.4.1.5 Zustandsdiagramm der Mobilstation

Das MAC-Protokoll der MS kennt sieben Zustände, vgl. Abb. 2.13, S. 44, wobei M0 NULL dem ausgeschalteten Zustand entspricht. Die im Folgenden beschriebenen Zustandsübergänge sind in Tab. 2.5, S. 45, stichpunktartig festgehalten. Nach dem Einschalten (1) wird der Zustand M1 IDLE UNLOCKED eingenommen. Nach dem Ausschalten (2), was in jedem Zustand möglich ist, wird in den Anfangszustand zurückgekehrt. Erst nachdem die MS per Rundsendung von der BS verschickte Sync-PDUs und Sysinfo-PDUs empfangen und eine Zelle hinreichender Qualität gefunden hat, wählt sie diese Zelle aus und informiert die MLE hierüber.

Anschließend wird in den Zustand M2 IDLE LOCKED (3) übergegangen. Falls die MAC-Teilschicht den Verfall der Signalqualität festgestellt und die MLE hierüber benachrichtigt hat, wird sie anschließend von der MLE angewiesen, eine neue Zelle hinreichender Qualität zu finden, und kehrt (4) in den Zustand M1 IDLE UNLOCKED zurück.

Abhängig von den Einstellungen des Benutzers wird nach einer bestimmten Zeit der Inaktivität die MS in einem Energiesparmodus betrieben und der Zustand M3 STAND-BY (5) eingenommen.

Nach dem Ablauf eines Zeitgebers, der entsprechend den Wünschen des Benutzers auf eine Wartezeit zwischen einem und 432 Rahmen (57 ms bis

25,9 s) eingestellt werden kann, wird der Energiesparmodus wieder verlassen und die MS kehrt in den Zustand M2 IDLE LOCKED (6) zurück.

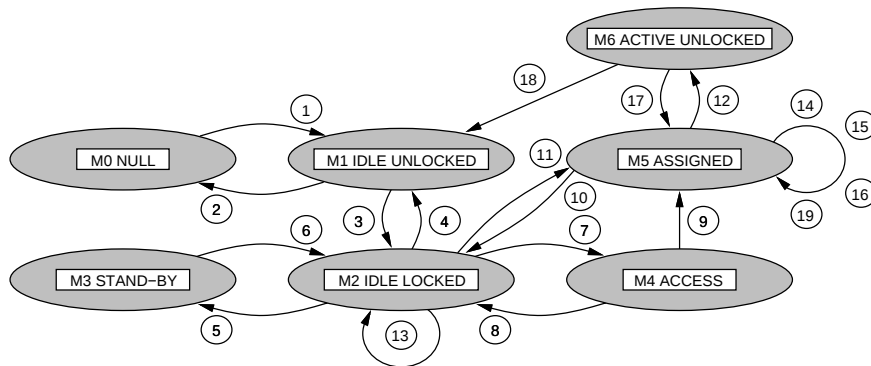


Abbildung 2.13: Zustandsdiagramm der V+D-Mobilstation in der MAC-Teilschicht

In diesem Zustand wird von der MS nur empfangen. Sie überwacht den SCH hinsichtlich der an sie gerichteten Funkruf-Nachrichten der BS und genereller Systemnachrichten. Ferner bereitet sich die MS auf zukünftige Sendeaufträge vor, indem sie über den SCH empfangene Access-Define-PDUs auswertet und den AACH beobachtet. Wenn weder Funkruf-Nachrichten empfangen werden noch Daten zu versenden sind, misst die MS (13) die Signalstärke der benachbarten Zellen und versucht, die gesamten Netzinformationen dieser Zellen zu decodieren.

Erhält die MS eine Funkruf-Nachricht oder Paketdaten von der BS oder führt sie einen Zufallszugriff durch, nimmt sie den aktiven Zustand M4 ACCESS (7) ein und wartet im Falle einer kanalvermittelten Verbindung, bis ihr ein Verkehrskanal (TCH) zugewiesen wurde. In diesem Zustand erfolgt die Übertragung sämtlicher Paketdaten, falls die Verbindung nicht kanalvermittelt ist. Wenn ein Zeitgeber abläuft oder die Übertragung der Paketdaten abgeschlossen ist, wird (8) in den Zustand M2 IDLE LOCKED zurückgekehrt. Nachdem die BS einer MS oder einer Gruppe von MSen exklusiv einen Kanal zugewiesen hat, wird in den Zustand M5 ASSIGNED (9) übergegangen.

Sprach- und Datenrahmen einer kanalvermittelten Verbindung werden in diesem Zustand übertragen. Mit Hilfe des *Slot Stealing*-Mechanismus (15) erfolgt die Ende-zu-Ende-Signalisierung zwischen den Benutzern.

Tabelle 2.5: Zustandsübergänge der V+D-Mobilstation in der MAC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die MS wird eingeschaltet.
2	Die MS wird ausgeschaltet. Dieser Übergang ist von jedem Zustand aus möglich.
3	Zelle mit hinreichender Qualität gefunden, die MLE-Schicht hierüber informiert und diese Zelle ausgewählt.
4	Die MAC-Teilschicht hat die MLE-Schicht über die Verschlechterung der Signalqualität informiert und ist angewiesen worden, in den Suchmodus zurückzukehren.
5	Die MS tritt in den Energiesparmodus ein.
6	Die MS verlässt den Energiesparmodus.
7	Die MS führt einen Zufallszugriff durch oder wird angerufen (Funkruf). In beiden Fällen wird bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals im M4 ACCESS-Zustand gewartet (kanalvermittelte Verbindung).
8	<i>Time-Out</i> oder Ende der Paketdatenübertragung.
9	Die Kanalzuweisung wurde empfangen.
10	Ende der Übertragung (<i>Transmission Trunking</i>) oder des Gesprächs (<i>Message Trunking</i>).
11	Direkte Kanalzuweisung (Gruppenruf oder Gesprächsweiterführung, <i>Transmission Trunking</i>).
12	Signalverlust während eines Gesprächs. MS beginnt Verbindungswiederherstellung nach einer Warteperiode.
13	Absuchen der benachbarten Zellen im M2 IDLE LOCKED-Zustand.
14	Absuchen der benachbarten Zellen im M5 ASSIGNED-Zustand.
15	<i>Slot Stealing</i> -Prozeduren.
16	Sprach- oder Datenübertragung bei <i>Message Trunking</i> .
17	Rückkehr nach kurzzeitigem Signalverlust.
18	Weiterführung der Gesprächswiederherstellungsprozedur.
19	<i>Handover</i> (Gesprächswiederherstellung) in eine benachbarte Zelle.

Analog zum Zustand M2 misst (14) die MS während eines Gesprächs regelmäßig die Signalstärke der benachbarten Zellen und versucht die gesamten Netzinformationen dieser Zellen zu decodieren. Bevorzugt die MS nach Erhalt dieser Informationen eine andere Zelle, fordert sie einen *Handover* (19) an, was zum Aufruf der Gesprächswiederherstellungsprozeduren

(*Fast Call Reestablishment*) führt.

Wenn eine Übertragung (Übertragungsbündelung, *Transmission Trunking*) oder ein Gespräch (Nachrichtenbündelung, *Message Trunking*) beendet wird, geht (10) die MS in den Zustand M2 IDLE LOCKED über. Im Falle eines Gruppenrufs oder der Weiterführung des Gesprächs bei *Transmission Trunking* erfolgt eine direkte Kanaluweisung und die Rückkehr (11) in den Zustand M5 ASSIGNED. Da bei *Message Trunking* der Kanal permanent belegt ist, werden Sendewünsche (16) in diesem Zustand bearbeitet.

Unter Übertragungsbündelung versteht man bei V+D die Methode, einen Verkehrskanal (TCH) nur dann zu belegen, wenn tatsächlich Sprachaktivität vorliegt, und ihn danach augenblicklich wieder freizugeben. Bei Nachrichtenbündelung wird der Verkehrskanal permanent für die gesamte Dauer des Gesprächs belegt, was im Vergleich zur Übertragungsbündelung zu geringerem Protokollverschnitt, aber auch zu geringerem Durchsatz führt.

Verliert die MS den Kontakt zur BS (12), beginnt sie im Zustand M6 ACTIVE UNLOCKED nach einer kurzen Warteperiode mit dem Verbindungswiederaufbau. Nach einer erfolgreichen Wiederherstellung (17) kehrt sie von diesem kurzen Signaleinbruch in den Zustand M5 ASSIGNED zurück. Im anderen Fall (18) nimmt sie den Zustand M1 IDLE UNLOCKED ein und führt den Verbindungsaufbau an dieser Stelle fort.

2.6.4.1.6 Zustandsdiagramm der Basisstation

Für die V+D-BS sind in der MAC-Teilschicht vier Zustände definiert, vgl. Abb. 2.14, S. 47, wobei sich die BS vor dem Einschalten im Zustand B0 NULL befindet. Die im Folgenden beschriebenen Zustandsübergänge sind in Tab. 2.6, S. 47, stichpunktartig festgehalten. Der Übergang in den Zustand B1 ACTIVE erfolgt durch Einschalten (1) der BS. Das Abschalten (2) der BS führt in jedem Zustand zur Rückkehr in den Anfangszustand.

Da die BS für jede Verbindung eine eigene MAC-Protokollinstanz erzeugt, können die Zustände B1 bis B3 von der BS mehrfach gleichzeitig eingenommen werden. An inaktive MSen werden im Zustand B1 ACTIVE Synchronisations- und Systeminformationen (Sync-PDUs und Sysinfo-PDUs) versendet. Außerdem überträgt die BS Zugriffsdefinitionen (Access-Define-PDUs) und Zugriffszuweisungen (Access-Assign-PDUs), damit sich die MSen auf zukünftige Zufallszugriffe vorbereiten können. Datenübertragungsverkehr findet in diesem Zustand jedoch nicht statt.

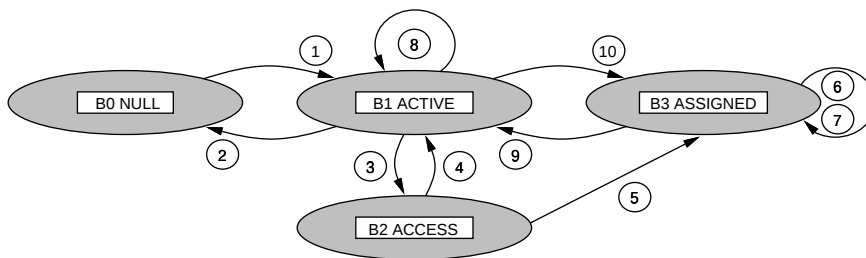


Abbildung 2.14: Zustandsdiagramm der V+D-Basisstation in der MAC-Teilschicht

Tabelle 2.6: Zustandsübergänge der V+D-Basisstation in der MAC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die BS wird eingeschaltet.
2	Die BS wird ausgeschaltet.
3	Erfolgreicher Empfang eines Zufallszugriffs oder Funkrufnachricht an eine MS.
4	<i>Time-Out</i> oder Ende der Paketdatenübertragung.
5	Verkehrskanal (TCH) wird zugewiesen.
6	<i>Slot Stealing</i> im Verkehrsmodus.
7	Versenden einer Sendeerlaubnis (<i>Message Trunking</i>).
8	Versenden einer Sendeerlaubnis (<i>Transmission Trunking</i>).
9	Ende der Übertragung (<i>Transmission Trunking</i>) oder des Gesprächs (<i>Message Trunking</i>).
10	Direkte Zuweisung eines Verkehrskanals (TCH) bei Gruppenruf oder einer bestehenden Verbindung (<i>Transmission Trunking</i>).

Nachdem die BS einen Zufallszugriff einer MS erfolgreich erkannt (3) und empfangen hat, geht sie in den Zustand B2 ACCESS über. Falls die BS mit einer MS eine Verbindung aufbauen will, wird diese informiert (Funkrufnachricht) und es erfolgt ebenfalls der Übergang (3) nach B2. Paketdaten werden zwischen BS und MS in diesem Zustand übertragen. Bei Beendigung dieser Übertragung oder bei Ablauf eines Zeitgebers kehrt die BS in den Zustand B1 ACTIVE (4) zurück.

Hat die MS bei ihrem Zufallszugriff die Zuweisung eines Verkehrskanals angefordert, bestätigt dies die BS und nimmt (5) den Zustand B3 ASSIGNED ein. Sprach- und Datenrahmen werden in diesem Zustand ausgetauscht, wobei Übertragungskapazität zur Ende-zu-Ende-Signalisierung zwischen den Benutzern gestohlen (*Slot Stealing*, 6) werden kann. Im Falle von *Message Trunking* bleibt die Verbindung permanent bestehen, Übertragungswünsche werden in diesem Zustand (7) bestätigt.

Bei Beendigung eines Gesprächs (*Message Trunking*) oder einer Übertragung (*Transmission Trunking*) kehrt die BS in den Zustand B1 ACTIVE (9) zurück, in dem sie weitere Übertragungswünsche bei *Transmission Trunking* bestätigt (8) und einen Verkehrskanal bei einer bereits bestehenden Verbindung direkt zuweist (10). Bei einem Gruppenruf erfolgt ebenfalls eine direkte Kanalzuzuweisung.

2.6.4.1.7 Kanalzugriffssteuerung

Die LLC-Teilschicht kennt zwei Arten von Verbindungstypen, den Advanced Link (AL) und den Basic Link (BL). Die Kanalzugriffssteuerung enthält die Funktionen zur Rahmensynchronisation, die die Rahmennummer innerhalb des Multirahmens erfasst:

- im Falle einer BL-Übertragung Fragmentierung der von der LLC-Teilschicht erhaltenen PDUs in mehrere zu sendende MAC-Dienstdateneinheiten (Service Data Unit, SDU) und empfangsseitige Zusammenstellung (*Reassociation*) der empfangenen Fragmente – in der LLC-Teilschicht erfolgt keine Aufteilung bei einem BL –,
- im Falle einer AL-Übertragung Segmentierung der Dienstdateneinheiten für die LLC-Teilschicht in mehrere LLC-PDUs in der LLC-Teilschicht, die in ihrer Länge einem MAC-Block entsprechen – in der MAC-Teilschicht erfolgt keine Aufteilung bei einem AL –,
- Multiplexen bzw. Demultiplexen der logischen Kanäle sowie Bildung von Multirahmen, die daher explizit gezählt werden, und
- Synchronisation der Multirahmen durch Synchronisationsblöcke der BS, die auf der DL gesendet werden und z. B. Informationen über die gezählten Rahmen enthalten, vgl. Abs. 2.6.4.1.4, S. 40.

Eine wichtige Funktion ist das Zufallszugriffsprotokoll (*Random Access Protocol*) für den Zugriff der MSen auf den Kanal. Die MAC-Teilschicht der MS verwendet beim Erstzugriff ein S-ALOHA-Zugriffsprotokoll, um bei

unaufgeforderter Nachrichtenübertragung Informationen an die BS zu versenden. Bei Informationsanforderung der BS oder bei Bestehen einer reservierten, kanalvermittelten Verbindung nutzt die MS den reservierten Zugriff. Bei geeigneter Wahl der Zugriffsparameter ist es möglich,

- die Kollisionsauflösung der Zugriffe der einzelnen MSen zu steuern,
- für eine bestimmte Verkehrslast die Zugriffsverzögerung zu minimieren und den Durchsatz zu maximieren,
- Protokollinstabilitäten zu vermeiden,
- dynamisch den Zufallszugriff für verschiedene Zugriffsprioritäten oder für ausgewählte Gruppen- und Teilnehmerklassen zu unterbinden und
- gleichzeitig und unabhängig für verschiedene Gruppen- und Teilnehmerklassen eine Verkehrsgüte (*Grade of Service*, GoS) des Zugriffs anzubieten, vgl. Gl. 2.24.

$$\text{GoS} = \frac{\text{Anzahl blockierter Anrufe} + 10 \cdot \text{Anzahl der Verbindungsabbrüche}}{\text{Gesamtanzahl der Verbindungen}} \quad (2.24)$$

2.6.4.1.7.1 Die Parameter des Zufallszugriffsprotokolls

Die BS bietet verschiedenen MSen unter Verwendung von vier sog. *Access Codes* (AC) Möglichkeiten des Zufallszugriffs, die A, B, C oder D genannt werden und wie Prioritäten aufzufassen sind. Der Zugriffscode stellt eine Benutzerdienstkombination dar. Nicht jeder Code muss allen MS zugänglich sein. Nur wenn die Bedingungen für den Zugriff auf einen für einen bestimmten Code zugelassenen Teilzeitschlitz erfüllt sind, ist die MS berechtigt zuzugreifen. Die Einladung zum Zugriff wird den MSen von den BSen mittels zwei verschiedener PDUs mitgeteilt. Die *Access-Define-PDU*, vgl. Tab. 2.7, S. 50, wird in vom Netzbetreiber festgelegten Intervallen versendet und liefert u. a. die Informationen über den Zugriffscode und die Priorität, mit der gesendet werden darf, sowie die Zeitspanne und Anzahl für eine Wiederholung des Zugriffs, vgl. Abs. 2.6.4.1.4, S. 40. Die MSen bestimmen dynamisch ihren Zugriffscode abhängig davon, ob ihre zu versendenden Daten die minimale Priorität (*Minimum Priority*) der *Access-Define-PDU* erfüllen oder nicht. Prioritäten werden abhängig vom gewünschten GoS für die jeweilige Transaktion von den MSen bestimmt.

Tabelle 2.7: Die V+D-Zufallszugriffsparameter der Access-Define-PDU

Parameter	Abk.	Beschreibung	Wertebereich
Access Code		Diese PDU gilt für MSen mit diesem Zugriffscode	A – D
Immediate	IMM	Zufallszugriff nach IMM TDMA-Rahmen 0 → Zugriffszeitpunkt auswürfeln 15 → direkter Zugriff erlaubt	0 – 15
Waiting Time	WT	Erneuter Zufallszugriff nach WT Antwortmöglichkeiten auf der DL	1 – 15
Number of Random Access Transmissions on Uplink	Nu	Gesamtanzahl der erlaubten Zufallszugriffe 0 → kein Zugriff erlaubt	0 – 15
Framelength Factor		Multipliziere Basisrahmenlänge mit 1 oder 4	1, 4
Timeslot Pointer		Bitmuster für die Belegung mit Steuerkanälen	4 bit
Minimum Priority		Zufallszugriff ist nur erlaubt, wenn diese Priorität mindestens erfüllt ist 7 → höchste Priorität; nur Notrufe sind erlaubt	0 – 7

Mit der Access-Assign-PDU, die in jedem DL-Zeitschlitz im logischen Kanal AACH, vgl. Abs. 2.6.2.2.2, S. 25, enthalten ist, werden dann die Zugriffsrechte der MS auf die UL-Zeitschlitzte angezeigt sowie mit dem sog. *Traffic Usage Marker* die Sende- und Empfangserlaubnis des momentanen UL- und DL-Zeitschlitzes. Die Informationen der beiden PDUs werden bis zum Empfang einer Aktualisierung gespeichert.

In Abb. 2.15, S. 52, sind beispielhaft die mit den verschiedenen Zugriffs-codes oder einer Reservierung gekennzeichneten UL-Teilzeitschlitzte dargestellt, die in der Access-Assign-PDU, vgl. Tab. 2.8, S. 51, angezeigt werden.

Die zu den DL-Zeitschlitzten korrespondierenden UL-Zeitschlitzte sind ge-

genüber den DL-Zeitschlitzten um zwei Zeitschlitzte verzögert, so dass eine Access-Assign-PDU auf der DL erst zwei Zeitschlitzte später für die UL den Zugriff regelt. Eine MS, die eine Nachricht versenden möchte, vergleicht zuerst die übertragenen Bedingungen für einen Zugriff mit denen, die ihr erlaubt sind. Wenn ein Zugriff erlaubt ist, verwendet sie dazu die MAC-Access-PDU, welche die zu übertragende Nachricht enthält.

Tabelle 2.8: Die V+D-Zufallszugriffsparameter der Access-Assign-PDU

Parameter	Beschreibung	Wertebereich
Access Field 1 and 2	Zugriffsrechte für einen Teilzeit- schlitz bestehend aus Zugriffscode und Basisrahmenlänge	
Access Code	Zufallszugriff ist für diesen Zugriffs- code erlaubt	A – D
Base Frame- length	Basislänge des Zugriffsrahmens Besondere Werte für „Reser- vierte Übertragung“, „CLCH- Teilzeitschlitz“ und „Laufender Rahmen“	1–6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 32

Ist die Nachricht fragmentiert, wird in der MAC-Access-PDU der BS ein Reservierungswunsch für mehrere Zeitschlitzte mitgeteilt. Die BS antwortet auf die MAC-Access-PDU mit einer MAC-Resource-PDU, in der sie den erfolgreichen Empfang quittiert. Weiterhin wird der MS mitgeteilt, ob und welche Zeitschlitzte reserviert wurden. Diese sind in Abb. 2.15, S. 52, durch ein Kreuz dargestellt. Hat eine MS nach Ablauf eines Zeitgebers noch keine Antwort auf die MAC-Access-PDU erhalten, wiederholt sie den Zufallszugriff.

Der Parameter *Immediate* (IMM) der Access-Define-PDU gibt einen Zeitraum als Vielfaches von TDMA-Rahmen an, um den der erstmalige Zufallszugriff verzögert werden soll, d. h. er gibt an, ob sofortiger Zugriff (*Immediate First Transmission*, IFT) oder verzögerter Zugriff (*Delayed First Transmission*, DFT) zu wählen ist. Als Sonderfall des verzögerten Zugriffs ist die zufällige Auswahl eines Zugriffsplatzes in einem Zugriffsrahmen zu sehen. Die Länge des aktuellen Zugriffsrahmens wird bestimmt, indem die Basisrahmenlänge (*Base Framelength*) der Access-Assign-PDU, vgl. Tab. 2.8,

mit dem Rahmenlängenfaktor (*Framelength Factor*) multipliziert wird, vgl. Tab. 2.7, S. 50.

In der Access-Define-PDU wird die Anzahl der für den Zufallszugriff freigegebenen Zeitschlitz eines Rahmens durch das Zeitschlitzbitmuster (*Timeslot Pointer*) bekannt gegeben, vgl. Tab. 2.7, S. 50. Neben einem *Main Control Channel* (MCCH) können bis zu drei *Secondary Control Channel* (SCCH) definiert werden und bei zwei Teilzeitschlitz pro Zeitschlitz ergeben sich somit bis zu acht Zugriffsmöglichkeiten pro Rahmen. Falls nach *Waiting Time* (WT) Antwortmöglichkeiten die BS den Zugriff noch nicht bestätigt hat – die BS antwortet mit einer einen ganzen Zeitschlitz belegenden MAC-Resource-PDU –, greift die MS erneut zu. Sie greift aber nur unter der Bedingung zu, dass bisher weniger als *Number of Random Access Transmissions on Uplink* (Nu) Versuche stattgefunden haben. Bei Notrufen mit der Priorität 7 sind bis zu $2 \cdot Nu$ Versuche erlaubt.

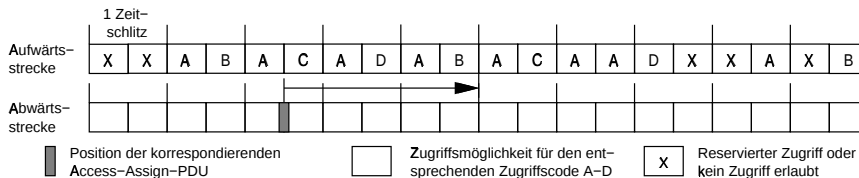


Abbildung 2.15: Zugriffsmethoden des V+D-Zufallszugriffsprotokolls

2.6.4.1.7.2 Die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“

Es existieren zwei unterschiedliche Zugriffsmethoden, um ausgehend von den Zugriffsparametern einen Teilzeitschlitz für den Zufallszugriff auszuwählen: der rollende Zugriffsrahmen (*Rolling Access Frame*) und der diskrete Zugriffsrahmen (*Discrete Access Frame*), vgl. Anh. A.6, S. 230. In Abb. 2.16, S. 53, und Abb. 2.17, S. 54, sind jeweils die Zugriffsmöglichkeiten für eine sendewillige MS auf der UL dargestellt.

Unter der Annahme, es existiere nur ein Zugriffscode und als Zugriffskanal sei nur der MCCH vorgesehen, stellen die eingezeichneten Zeitschlitz jeweils den ersten Zeitschlitz eines TDMA-Rahmens dar. Ein Zeitschlitz bietet bis zu zwei Zugriffsmöglichkeiten – je eine pro Teilzeitschlitz. Bei der Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“, vgl. Abb. 2.16, S. 53, übermittelt die BS mit jeder Access-Assign-PDU die Basisrahmenlänge für je-

den Teilzeitschlitz, vgl. Tab. 2.8, S. 51. Wenn eine MS einen Zufallszugriff durchführt, greift sie gleichverteilt auf einen Teilzeitschlitz innerhalb der zugewiesenen Rahmenlänge zu. Bei dieser Methode kann die Größe des Zugriffsrahmens für jeden Teilzeitschlitz variiert werden.

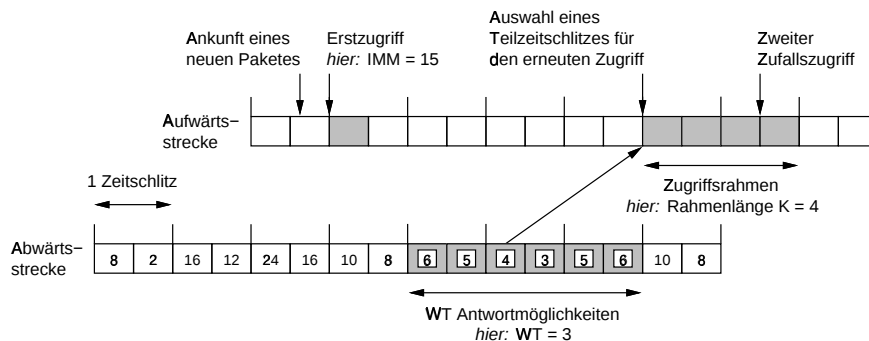


Abbildung 2.16: Die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ des V+D-Zufallszugriffsprotokolls

2.6.4.1.7.3 Die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“

Bei der Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“, vgl. Abb. 2.17, S. 54, müssen die sendewilligen MSen solange warten, bis der aktuelle Zugriffsrahmen beendet wurde, d. h. bis der Basisrahmenlänge in der Access-Assign-PDU wieder ein Zahlenwert zugewiesen wird, vgl. Tab. 2.8, S. 51. Ansonsten zeigt die BS mit dem Wert „laufender Zugriffsrahmen“ oder „reservierte Übertragung“ als Basisrahmenlänge einen nicht beendeten Zugriffsrahmen an. In Abb. 2.17, S. 54, ist dieser Fall mit einem „x“ gekennzeichnet. Alle MSen, deren Wartezeit während des letzten Zugriffsrahmens abgelaufen ist, wählen gleichverteilt zu Beginn eines neuen eine Zugriffsmöglichkeit aus. Auf diese Weise werden die sendewilligen MSen auf diskrete Zugriffsrahmen synchronisiert und es kann Übertragungskapazität auf dem vom MCCH mitgenutzten ersten Zeitschlitz pro Rahmen reserviert werden.

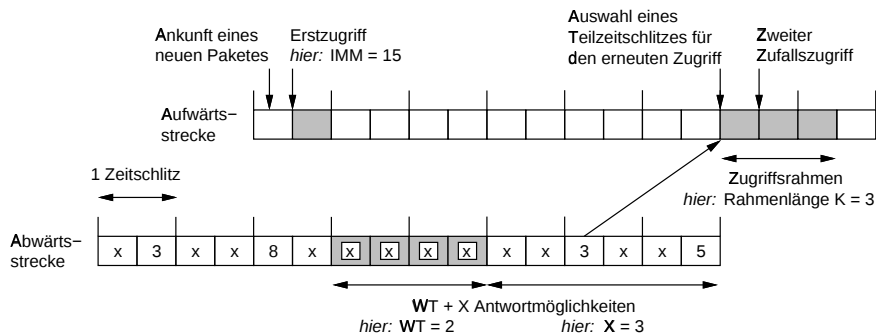


Abbildung 2.17: Die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ des V+D-Zufallszugriffsprotokolls

2.6.4.2 Logical Link Control

2.6.4.2.1 Überblick und Funktionen der Teilschicht LLC

Das *Logical Link Control* (LLC)-Protokoll von V+D stellt zwei Arten von Verbindungstypen, den *Basic Link* (BL) und den *Advanced Link* (AL), über den TLA-SAP zur Verfügung, vgl. Abb. 2.10, S. 32. Bei beiden Verbindungsarten ist eine bestätigte oder eine unbestätigte Datenübertragung möglich. Ein BL stellt einen bidirektionalen, verbindungslosen Pfad zwischen einer oder mehreren MSen und einer BS dar und ist nach der Synchronisation von MS und BS sofort verfügbar. Im Gegensatz hierzu ist der AL entweder als ein bidirektionaler, verbindungsorientierter Pfad zwischen einer MS und einer BS oder als ein unidirektionaler Pfad von einer BS zu mehreren MSen definiert. Der AL bietet eine bessere Dienstgüte (*Quality of Service*, QoS) als der BL an und setzt immer einen Verbindungsaufbau voraus. Im Vergleich zum BL, der nur die Verwendung eines erweiterten Fehlerschutzes (*Frame Check Sequence*, FCS) zur Minimierung der Anzahl der nicht erkannten fehlerhaften Nachrichten vorsieht, wird die bessere Dienstgüte des AL durch Flusststeuerung, Segmentierung der Schicht-2-Dienstdateneinheiten, einen Fenstermechanismus, der die Versendung mehrerer SDUs erlaubt, ohne auf die Bestätigung der vorhergehenden SDU warten zu müssen, und die Möglichkeit zur Auswahl verschiedener Durchsätze erreicht. Eine FCS wird beim AL grundsätzlich benutzt.

Die LLC-Teilschicht einer MS unterstützt bis zu vier ALs gleichzeitig, die jeweils durch einen eigenen Verbindungsendpunktbezeichner (*Connection Endpoint Identifier*, CEP-Id) unterschieden werden. Jeder dieser CEP-Ids wird mit den von der MAC-Teilschicht verwendeten Zeitschlitzten assoziiert. Für jeden AL und jeden kanalvermittelten Dienst existiert ein BL, der die jeweilige Anzahl reservierter Zeitschlitzte des korrespondierenden ALs oder leitungsvermittelten Dienstes benutzen kann.

Die Übertragungsart einer LLC-Verbindung ist unabhängig von den anderen LLC-Verbindungen einer N-Verbindung, z. B. kann im PzM-Betrieb von einer MS zu mehreren anderen MSen die sendende MS einen AL zur BS, die BS hingegen unbestätigte BLs zu den empfangenden MSen verwenden.

2.6.4.2.2 Dienstelemente der LLC-Dienstzugangspunkte

Die Dienstelemente der LLC-Dienstzugangspunkte sind in Anh. A.3, S. 223, näher erläutert.

2.6.4.2.3 Datenstrukturen

Die Protokolldateneinheiten der LLC-Teilschicht werden LLC-Rahmen genannt und sind abhängig vom verwendeten Verbindungstyp, AL oder BL, definiert.

2.6.4.2.3.1 Basic Link

Die Dienstdateneinheiten der von der MLE empfangenen Dienstelemente werden beim BL nicht in der LLC-Teilschicht sondern in der MAC-Teilschicht fragmentiert und mit einem LLC-Kopf und optional mit einer Prüfsumme (FCS) versehen, vgl. Abs. 2.6.4.1.7, S. 48. Während der bestätigte Dienst nur für die PzP-Kommunikation vorgesehen ist, kann der unbestätigte Dienst auch für eine PzM-Kommunikation verwendet werden. Für den BL wurden folgende PDUs spezifiziert:

BL-ADData: Dieser Rahmen wird bei einer verbindungslosen Übertragung für die Bestätigung eines empfangenen Rahmens und zum Senden von SDUs, die von der MLE versendet wurden und bestätigt werden sollen, benutzt. Es darf erst wieder eine BL-ADData-PDU nach Bestätigung durch eine BL-ADData-PDU oder durch eine BL-Ack-PDU der zuletzt versandten PDU gesendet werden.

BL-Data: Dieser Rahmen wird für die bestätigte, verbindungslose Übertragung verwendet und enthält die zu übertragene SDU der MLE. Ein erneuter BL-Data-Rahmen darf erst wie bei der BL-ADData-PDU nach Bestätigung des zuletzt versandten gesendet werden.

BL-UDData: Für die unbestätigte, verbindungslose Übertragung wird dieser Rahmen eingesetzt, um Daten der MLE zu versenden. Hier können mehrere Rahmen hintereinander gesendet werden, da nicht auf Bestätigung gewartet werden muss.

BL-Ack: Der Empfang einzelner BL-Data-PDUs wird mit diesem Rahmen bestätigt. Falls eine Nachricht der MLE vorliegt, kann der BL-Ack-Rahmen auch Informationen der Schicht 3 beinhalten.

2.6.4.2.3.2 Advanced Link

Bei einer Übertragung über einen AL darf die Schicht-2-SDU länger als bei einer BL-Übertragung sein, da die LLC-Teilschicht Segmentierung als Dienstgüteparameter für einen AL anbietet, vgl. Abs. 2.6.4.1.7, S. 48. Im Gegensatz zu der beim BL verwendeten Fragmentierung in der MAC-Teilschicht, wird bei der LLC-Segmentierung jedem Segment eine Nummer zugeteilt, um die Reihenfolge der Segmente beim Empfänger zu erkennen. Zusätzlich kann durch die Nummerierung ein verlorengegangenes Segment vom Empfänger angefordert werden, so dass nicht die vollständige Nachricht wiederholt werden muss. Die Dienste des BL stehen ebenfalls zur Verfügung. Für den AL sind folgende PDUs definiert:

AL-Setup: Jeder AL setzt einen Verbindungsaufbau voraus. Dieser Rahmen wird bei der Einrichtung eines ALs sowohl für eine unbestätigte als auch eine bestätigte Übertragung verwendet und enthält die zu verhandelnden Dienstgüteparameter (QoS). Die gerufene Gegenstelle bestätigt den Verbindungsaufbau und bei bestätigter Übertragung die Annahme der QoS ebenfalls mit einem AL-Setup-Rahmen. Wenn sie die QoS-Parameter nicht erfüllen kann, sendet sie ihre QoS-Parameter, die dann von der rufenden Stelle durch einen erneuten AL-Setup-Rahmen bestätigt werden müssen.

AL-Data: Dieser Rahmen wird für die bestätigte Übertragung von Schicht-3-Informationen benutzt. Er enthält jeweils ein Segment der *TETRA LLC SDU* (TL-SDU) und alle bis auf das letzte Segment werden mit dieser PDU gesendet. Der Fenstermechanismus des ALs erlaubt, meh-

rere TL-SDUs zu versenden, bevor auf eine Bestätigung einer vollständig empfangenen TL-SDU gewartet werden muss. Zur Flusssteuerung wird das Fenster jedoch nicht verwendet.

AL-Data-AR: (*Acknowledge Request*, AR). Dieser Rahmen hat dieselbe Bedeutung wie der AL-Data-Rahmen. Zusätzlich wird die andere Seite aufgefordert, unverzüglich eine Bestätigung zurückzusenden.

AL-Final: Dieser Rahmen zeigt der Partnerinstanz an, dass das in diesem Rahmen enthaltene Segment das letzte der zu übertragenden TL-SDU ist.

AL-Final-AR: Analog zu den PDUs AL-Final und AL-Data-AR enthält dieser Rahmen das letzte zu übertragende Segment und fordert zusätzlich eine Bestätigung an.

AL-UData: Nach dem Aufbau einer Verbindung mit unbestätigter Übertragung wird diese PDU für den unidirektionalen Informationsaustausch benutzt. Es wird jeweils ein Segment der TL-SDU bis auf das letzte der gesamten Nachricht mit dieser PDU gesendet. Die Segmente werden nummeriert, so dass der Empfänger ein verlorengegangenes Segment bemerkt.

AL-UFinal: Dieser Rahmen übermittelt dem Empfänger das letzte Segment einer unbestätigten Übertragung. Es wird also nur als Abschluss einer oder mehrerer AL-UData-PDUs verwendet.

AL-Ack: Wurde eine Bestätigung angefordert oder hat sich das Fenster geschlossen, werden alle als fehlerlos empfangenen TL-SDU-Segmente hiermit bestätigt. Ein AL-Ack-Rahmen impliziert somit auch eine Aufforderung, selektiv nicht bestätigte Segmente erneut zu versenden.

AL-RNR: (*Receiver Not Ready*, RNR). Zu jedem Zeitpunkt kann der Empfänger als Flusssteuerung diesen Rahmen versenden. Der AL-RNR-Rahmen ersetzt den AL-Ack-Rahmen, wenn der Empfänger zeitweise nicht in der Lage ist, neue PDUs zu empfangen. Die als fehlerhaft markierten Segmente dürfen jedoch weiterhin versendet werden. Erst nach Erhalt eines AL-Ack-Rahmens oder nach dem Ablauf eines Zeitgebers, der bei Erhalt des AL-RNR-Rahmens gestartet wurde, dürfen neue Rahmen gesendet werden.

AL-Disc: Um einen AL mit bestätigter oder unbestätigter Übertragung auszulösen, wird ein AL-Disc-Rahmen verwendet. Im Falle bestätigter Übertragung antwortet der Empfänger ebenfalls mit einem AL-Disc-Rahmen.

2.6.4.2.4 Zustandsdiagramme

Die Zustände in der LLC-Teilschicht sind im Standard für den BL nur sehr oberflächlich und für den AL nicht widerspruchsfrei erläutert, so dass nicht mit Sicherheit verlässliche Angaben gemacht werden können.

2.6.4.2.4.1 Basic Link

Für den BL gibt es in der LLC-Teilschicht nur zwei Zustände der bestätigten Datenübertragung, die nach Synchronisation zwischen MS und BS eingenommen werden können. Sonst befindet sich die LLC-Teilschicht im IDLE-Zustand, vgl. Abb. 2.18. Die einzelnen Zustandsübergänge sind in Tab. 2.9 aufgeführt.

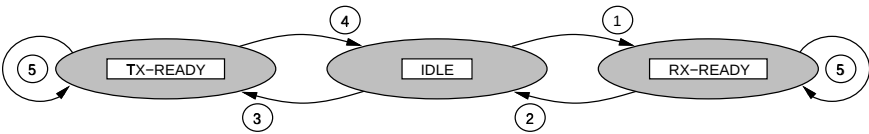


Abbildung 2.18: Zustandsdiagramm des Basic Links in der V+D-LLC-Teilschicht

Tabelle 2.9: Zustandsübergänge des Basic Links in der V+D-LLC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die LLC-Teilschicht erhält ein TL-DATAreq-Service Primitive (SP) von der MLE.
2	Es wird in den Ausgangszustand zurückgekehrt, nachdem alle Daten versendet wurden.
3	Die LLC-Teilschicht erhält ein TMA-UNITDATAind-SP von dem TMA-SAP.
4	Die empfangenen Daten werden an die MLE weitergeleitet.
5	TL-REPORTind-SPs der LLC-Teilschicht informieren die MLE.

Im TX-READY-Zustand können durch ein TL-DATAreq-SP Nachrichten verschickt und durch ein TL-REPORTind-SP Aktionen während der Übertragung angezeigt werden. Die Bestätigung der Gegenstelle wird durch ein TL-DATAresp-SP angezeigt.

Der Zustand RX-READY wird von der empfangenden Station eingenom-

men; auch hier werden mit dem TL-REPORTind-SP die Aktionen während des Empfangsvorganges der MLE mitgeteilt. Mit dem TL-DATAind-SP wird die eingehende Nachricht angezeigt und mit dem TL-DATAconf-SP bestätigt.

Zustände für den unbestätigten Datentransfer sind nicht im Standard enthalten.

2.6.4.2.4.2 Advanced Link

In Abb. 2.19, S. 61, ist eine Übersicht über die Zustände der LLC-Teilschicht im AL gegeben, die im Folgenden erläutert wird. Die einzelnen Zustandsübergänge sind zusätzlich in Tab. 2.10 aufgeführt.

Von jedem Zustand aus kann durch ein TL-CONNECTreq-SP in den Zustand WAIT-OUT-CONNECTED gewechselt werden (1). Dazu wird eine AL-Setup-PDU generiert, die der Gegenstelle den Verbindungswunsch mitteilt. Durch ein TL-REPORTind-SP werden die Aktionen des Verbindungsaufbaus der MLE angezeigt. Kommt eine Verbindung nicht zustande, was durch verschiedene AL-Setup-PDUs und durch die AL-Disc-PDU vermittelt wird, wird in den Zustand IDLE übergegangen (2) und die MLE hierüber mit einem TL-REPORTind-SP informiert. Wird die Verbindung erfolgreich aufgebaut, wechselt die LLC-Teilschicht in den Zustand CONNECTED (8), nachdem ein TL-CONNECTconf-SP an die MLE versendet wurde.

Tabelle 2.10: Zustandsübergänge des Advanced Links in der V+D-LLC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die LLC-Teilschicht erhält ein TL-CONNECTreq-SP von der MLE.
2	Ein Verbindungsaufbau ist derzeit nicht möglich und wird der MLE mit einem TL-REPORTind-SP angezeigt.
3	Die LLC-Teilschicht informiert die MLE über den Verbindungsaufbau.
4	Die LLC-Teilschicht erhält von der Partnerinstanz einen Verbindungsaufbauwunsch und teilt dies der MLE mit einem TL-CONNECTind-SP mit.
5	Die Verbindung kann nicht aufgebaut werden. Die MLE wird mit einem TL-REPORTind-SP hierüber informiert.
6	TL-REPORTind-SPs informieren die MLE über den Verbindungsaufbau.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 2.10: Zustandsübergänge des Advanced Links in der V+D-LLC-Teilschicht*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Übergang	Aktion
7a	Die MLE ist mit dem Verbindungsaufbau einverstanden und sendet ein TL-CONNECTresp-SP zur Bestätigung.
7b	Die MLE ist mit den QoS-Parametern der Partnerinstanz nicht einverstanden und sendet mit einem TL-CONNECTresp-SP ihre QoS-Parameter.
8	Die die Verbindung initiiierende LLC-Teilschicht hat die positive Bestätigung der Gegenstelle erhalten und meldet der MLE dies durch ein TL-CONNECTconf-SP . Die Verbindung ist damit eingerichtet.
9	In diesem Zustand wird jegliche Datenübertragung vollzogen und die MLE mit einem TL-REPORTind-SP informiert.
10	Am Ende der Datenübertragung oder von jedem anderen Zustand aus wird durch ein TL-DISCONNECTreq-SP eine Verbindungsauslösung eingeleitet.
11	Die den Wunsch zur Verbindungsauslösung erhaltende Partnerinstanz beginnt mit der Verbindungsauslösung und sendet ein TL-DISCONNECTind-SP zur MLE.
12	Die die Verbindungsauslösung initiiierende Partnerinstanz erwartet eine Auslösungsbestätigung, um danach die MLE mit einem TL-DISCONNECTconf-SP hierüber zu informieren. Die zur Auslösung aufgeforderte Partnerinstanz beendet die Verbindung ihrerseits, indem sie die angeforderte Bestätigung versendet.
13	Eine Verbindung kann z. B. im Falle einer Störung immer lokal, d. h. innerhalb eines Endgerätes, durch ein TL-RELEASEreq-SP abgebrochen werden.

Erhält die LLC-Teilschicht im Zustand IDLE eine AL-Setup-PDU mit einem Verbindungsaufbauwunsch, dann teilt sie dies durch ein **TL-CONNECTind-SP** der MLE mit und wechselt in den Zustand WAIT-IN-CONNECT (4). Von hier wird bei erfolgreichem Verbindungsaufbau mit einem **TL-CONNECTresp-SP** in den Zustand CONNECTED gewechselt (7a). Wenn die Verbindung mit anderen QoS-Parametern aufgebaut werden soll, wird ein **TL-CONNECTresp-SP** mit dieser Meldung generiert, in den Zustand WAIT-OUT-CONNECTED übergegangen und wie oben beschrieben fortgefahren (7b). Falls aufgrund nicht zu vereinbarender QoS-Parameter

oder sonstiger Störungen keine Verbindung zustande kommt, wird durch das TL-DISCONNECTreq-SP in den Zustand WAIT-DISCONNECTED gewechselt (10). Schlägt der Zugriff auf den Kanal fehl, zeigt die LLC-Teilschicht dies mit dem TL-REPORTind an und geht in den IDLE-Zustand über (5).

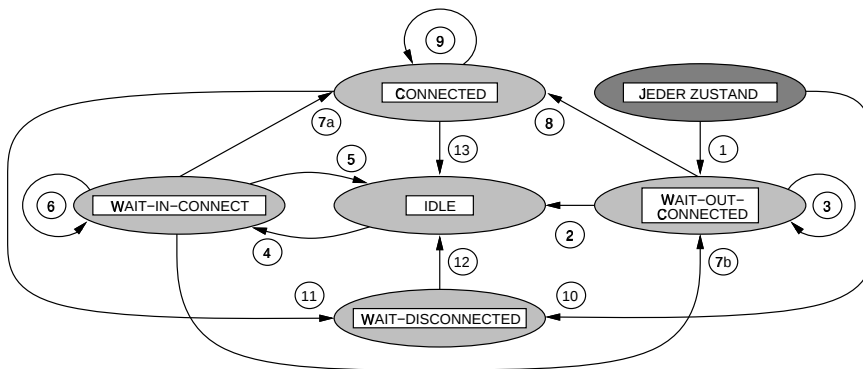


Abbildung 2.19: Zustandsdiagramm des Advanced Links in der V+D-LLC-Teilschicht

Wenn die sendende LLC-Teilschicht ein TL-DISCONNECTreq-SP erhält, wird von jedem außer dem IDLE-Zustand in den WAIT-DISCONNECTED-Zustand gewechselt und zwar durch Versenden einer AL-Disc-PDU (10). Bei einer im Zustand CONNECTED anormal, d. h. nicht von der LLC-Teilschicht initiiert, unterbrochenen Verbindung (angezeigt durch das TL-REPORTind-SP), wird mittels eines internen TL-RELEASEreq-SPs der IDLE-Zustand eingenommen (13). Der Zustand CONNECTED besteht wiederum aus mehreren Unterzuständen:

AL-TX-READY: Die MS ist zum bestätigten Sendevorgang bereit.

AL-RX-READY: Die MS ist zum bestätigten Empfangsvorgang bereit.

AL-UNACK-READY: Die MS ist bereit, unbestätigte Daten zu empfangen bzw. zu senden.

2.7 Der Protokollstapel Packet Data Optimised

Der Protokollstapel PDO, vgl. Abb. 2.20, S. 62, realisiert erstmals in einem europäischen Standard ein Konzept für den statistischen Mehrfachbetrieb

(*Multiplexing*) von Paketen vieler Datenquellen auf Funkkanäle unter der Steuerung der entsprechenden BS.

Man spricht von periodenorientierter Planung der Nutzung von Übertragungskapazität der einzelnen logischen Kanäle, wobei je Periode auf der DL die für Übertragungen auf der UL zugelassenen MSen explizit benannt werden und jede Periode Zeitschlitz für den wahlfreien Zugriff von MSen enthält, die in der nächsten Periode übertragen wollen. Dieses Konzept ist der kanalorientierten Übertragung überlegen, wenn pro Übertragungsereignis nur wenige Daten vorliegen.

Der Protokollstapel PDO besteht aus drei Schichten: der Bitübertragungsschicht (*Physical Layer*, PL), die PDO und V+D gemein ist, den Teilschichten *Logical Link Control* (LLC) und *Medium Access Control* (MAC) der Sicherungsschicht (*Data Link Layer*, DL) und den Netz- und Mobilstationsverwaltungsdiensten der Netzschicht (*Network Layer*, N).

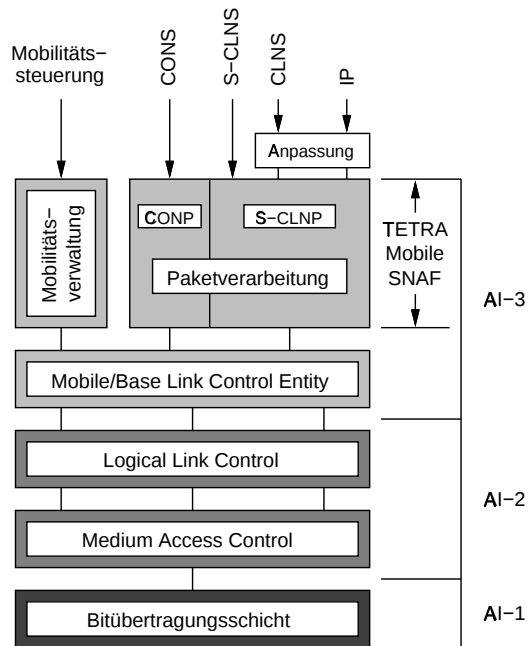


Abbildung 2.20: Architektur des PDO-Protokollstapels

Die Dienste der Netzschiicht lassen sich in verbindungslose und verbindungsorientierte Dienste aufteilen: Der verbindungsorientierte Dienst von TETRA basiert auf dem Standard CONS *International Standards Organisation* (ISO)-8348. Bei den verbindungslosen Diensten wird zwischen einem TETRA-spezifischen verbindungslosen Dienst (*Specific Connectionless Network Service*, S-CLNS), dem CLNS ISO-8348 und dem verbindungslosen Dienst des *Internet Protocol* (IP) unterschieden. Für letztere erfolgt dann eine Anpassung an TETRA. Der verbindungslose Dienst nach ISO bzw. IP wird angeboten, um Interworking mit X.25- oder X.75-Paketdatennetzen bzw. mit dem Internet zu ermöglichen.

Die Mobilitätsverwaltung (*Mobility Management*, MM) sieht u. a. die Registrierung der MSen bei der BS und die schnelle Gesprächswiederherstellung (*Fast Call Reestablishment*) vor. Die MLE stellt die unterste Teilschicht der Netzschiicht dar. Alle Informationen der Sicherungsschiicht gelangen nur durch die MLE zu höheren Schichten, damit die funkspezifischen Aspekte der Sicherungs- und Bitübertragungsschiicht so transparent wie möglich erscheinen. Zu den Aufgaben der MLE gehören die Zellenauswahl und die Rundsendung von Systeminformationen. Nachfolgend werden die Teilschichten LLC und MAC der Sicherungsschiicht ausführlich erklärt.

2.7.1 Architektur der Sicherungsschiicht

Laut Abb. 2.21, S. 64 bietet die Sicherungsschiicht der MLE ihre Dienste an drei verschiedenen SAPs an: *TETRA LLC A-SAP* (TLA-SAP), TLB-SAP und TLC-SAP. Am TLA-SAP werden die für eine Datenübertragung notwendigen Dienste angeboten. Über den TLB-SAP erfolgen ausschließlich die Versendung (Basisstation) und der Empfang (Mobilstation) von Rundsendenachrichten. Lediglich auf Seiten der MS findet der für lokale Steuernachrichten, insbesondere Kanalverwaltungsfunktionen, zuständige TLC-SAP Verwendung.

2.7.1.1 Logical Link Control

Das LLC-Protokoll ist ein Schicht-2-Protokoll für die PDO-Funkschnittstelle (*Air Interface*, AI). Jede Schicht-2-Instanz dient zur Verbindung einer BS mit einer MS oder einer Gruppe von MSen. Falls eine MS Verbindungen mit mehreren BSen einrichten möchte, sind entsprechend viele Instanzen nötig. Die LLC-Teilschicht fügt den Diensten des TLB-SAPs und des TLC-SAPs keine weitere Funktionalität hinzu.

Die drei Dienste bestätigte und unbestätigte PzP-Datenübertragung und unbestätigte PzM-Datenübertragung werden am TLA-SAP angeboten. Der letztere Dienst ist jedoch nur in Richtung BS $\rightarrow$ MS verfügbar, da ein PzM-Dienst in die andere Richtung bereits in der Schicht 3 existiert.

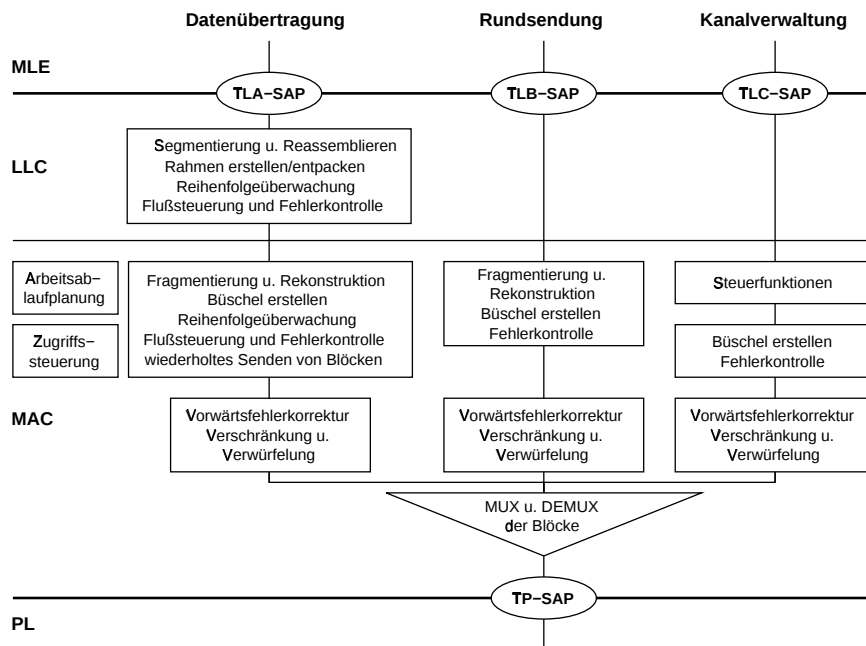


Abbildung 2.21: Architektur der PDO-Sicherungsschicht

Als Link Access Protocol for TETRA (LAP.T) werden die LLC-Teil-schichtfunktionen bezeichnet. Das Protokoll ist einseitig gesteuert (*unbalanced*); eine Instanz des Protokolls bietet immer nur einen Dienst für eine unidirektionale Übertragung an. Sowohl für die UL als auch die DL kann das Protokoll verwendet werden. Für eine bidirektionale Verbindung sind zwei Instanzen erforderlich.

Der unbestätigte und der bestätigte Dienst bieten die Funktionen Endpunktadressierung, Segmentierung, Reihung und optional erweiterter Fehlerschutz mit Hilfe einer FCS an. Zusätzlich sieht der bestätigte Dienst eine Flussteuerung vor.

2.7.1.1.1 Datenstrukturen

LAP.T verwendet als LLC-Rahmen bezeichnete PDUs. Mit Hilfe von LLC-Dienstelementen (*Service Primitive*, SP) versendet die MLE Schnittstellendateneinheiten (*Interface Data Unit*, IDU) zur LLC-Teilschicht. Die in diesen IDUs enthaltenen Dienstdateneinheiten (*Service Data Unit*, SDU) werden in mehrere Segmente aufgeteilt und auf die Körper der logischen LLC-Rahmen abgebildet, vgl. Abb. 2.22. Von empfangenen LLC-Rahmen werden in richtiger Reihenfolge die LLC-Körper zu SDUs für die Schicht 3 zusammengesetzt (*reassembliert*). Die Parameter der PCI der Schicht 3 werden zusammen mit eigenen LLC-Parametern im Kopf jedes Rahmens abgelegt. Wenn von der MLE verlangt, wird an den LLC-Körper eine FCS als erweiterter Fehlerschutz angehängt.

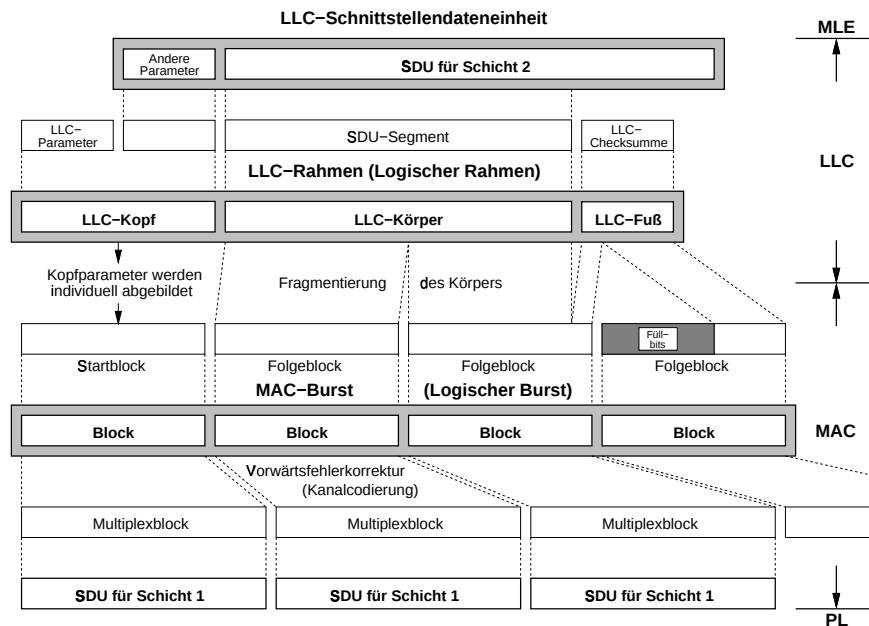


Abbildung 2.22: Datenstrukturen der PDO-Sicherungsschicht

Die Elemente der LLC-Rahmen werden als ein Satz interner Parameter an die MAC-Teilschicht weitergereicht bzw. von ihr empfangen und erscheinen hinterher als explizite Elemente in einer oder mehreren MAC-PDUs.

LAP.T ist eine vereinfachte Version des *Link Access Protocol D-Channel* (LAPD) des ISDN (SIEGMUND, 1996). Um Funktionen der MAC-Teilschicht nicht in der LLC-Teilschicht zu wiederholen, wurde ein vereinfachtes Protokoll gewählt. Die LLC-Teilschicht kennt folgende Rahmentypen:

Acknowledged Information (AI): Es werden ausschließlich bei bestätigter Übertragung AI-Rahmen verwendet. Ferner werden diese Rahmen nur von der Sendeseite versendet. Sie beinhalten Informationen der Schicht 3 und werden sequentiell nummeriert. Außerdem werden AI-Rahmen zur Rücksetzung der Verbindung in einen definierten Anfangszustand benutzt.

Receiver Ready (RR): Mit Hilfe von RR-Rahmen, die keine Schicht-3-Informationen enthalten, wird der Empfang bzw. die Bereitschaft zum Empfang von AI-Rahmen angezeigt. Ferner kann von der Empfangsseite die Rücksetzung der Verbindung bestätigt oder angefordert werden.

Unacknowledged Information (UI): UI-Rahmen werden nur bei unbestätigter Übertragung und auf Aufforderung der MLE verwendet. Sie enthalten Schicht-3-Informationen und dürfen ohne Benachrichtigung des Senders verloren gehen.

2.7.1.1.2 Dienstelemente des LLC-Dienstzugangspunktes

Die Dienstelemente der LLC-Dienstzugangspunkte sind in Anh. A.4, S. 227, näher erläutert.

2.7.1.1.3 Zustandsdiagramm

In LAP.T sind vier Zustände definiert, vgl. Abb. 2.23, S. 67, wobei UNCONNECTED der Anfangszustand einer LAP.T-Instanz ist. Die Zustände beziehen sich nur auf die bestätigte Übertragung; unbestätigte Übertragung ist in jedem Zustand erlaubt. Die bestätigte Übertragung findet nur im Zustand CONNECTED statt, während die anderen Zustände Teil des Verbindungsaufbaus sind.

2.7.1.1.3.1 Verbindungsaufbau

Wenn ein TL-CONNECTreq-SP empfangen wurde, wird ein Verbindungsaufbau vom Sender eingeleitet. Ein AI-Rahmen mit einer Aufforderung zur Verbindungseinrichtung wird versendet und es folgt ein Übergang nach CONNECT EXPECTED (1), vgl. Tab. 2.11, S. 68.

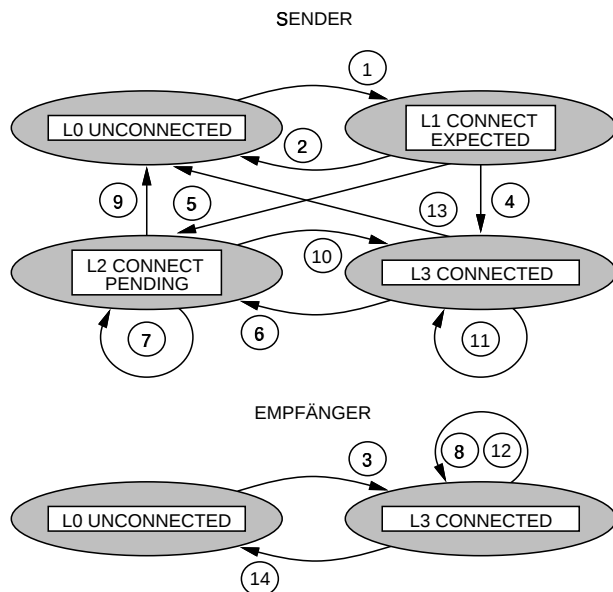


Abbildung 2.23: Zustandsdiagramm der PDO-LLC-Teilschicht

Falls der zugehörige Zeitgeber abläuft (*Time Out*), wird in den Ausgangszustand zurückgekehrt (2) und die MLE mit einem negativen TL-CONNECTconf-SP unterrichtet. Der Empfänger beantwortet diesen AI-Rahmen mit einem RR-Rahmen, informiert anschließend die MLE mit einem TL-CONNECTind-SP und nimmt den Zustand CONNECTED ein (3).

Wenn der Sender diesen RR-Rahmen empfängt, geht er ebenfalls in den Zustand CONNECTED (4) über. Ein positives TL-CONNECTconf-SP versendet er außerdem bei diesem Übergang. Falls die Verbindung durch einen RR-Rahmen des Empfängers oder durch ein TL-CONNECTreq-SP zurückgesetzt wird und noch unbestätigte AI-Rahmen ausstehen, erfolgt ein Über-

gang in den Zustand CONNECT PENDING (5, 6, 7). Der Übergang 6 von L3 nach L2 kann auch durch ein weiteres TL-DATAreq-SP ausgelöst werden. Es wird jeweils ein neuer AI-Rahmen gesendet, der die Rücksetzung der Verbindung bestätigt (RR-Rahmen) oder anfordert (TL-CONNECTreq, TL-DATAreq).

Tabelle 2.11: Zustandsübergänge der PDO-LLC-Teilschicht

Übergang	Aktionen des Senders
1	TL-CONNECTreq von der MLE $\Rightarrow$ AI-Rahmen an Empfänger
2	Kein RR-Rahmen empfangen (<i>Time Out</i>) $\Rightarrow$ negatives TL-CONNECTconf an die MLE
4	RR-Rahmen empfangen $\Rightarrow$ positives TL-CONNECTconf an die MLE
5, 6, 7	TL-CONNECTreq oder weiteres TL-DATAreq (nur 6) von der MLE oder Rücksetzanforderung vom Empfänger (RR-Rahmen) $\Rightarrow$ AI-Rahmen mit Rücksetzanforderung bzw. -bestätigung an Empfänger
9	Kein RR-Rahmen empfangen $\Rightarrow$ negatives TL-DATAconf bzw. TL-CONNECTconf an die MLE
10	RR-Rahmen empfangen $\Rightarrow$ positives TL-CONNECTconf an MLE oder mit Übertragung beginnen
11	TL-DATAreq von der MLE $\Rightarrow$ Datenübertragung mit Flusssteuerung
13	Bestätigung des letzten AI-Rahmens oder keinen RR-Rahmen empfangen (<i>Time Out</i>) $\Rightarrow$ positives oder negatives TL-DATAconf an die MLE
Übergang	Aktionen des Empfängers
3	AI-Rahmen empfangen $\Rightarrow$ Bestätigung (RR-Rahmen) an den Sender, TL-CONNECTind an die MLE
8	Rücksetzanforderung bestätigen oder anfordern (RR-Rahmen) $\Rightarrow$ TL-CONNECTind an die MLE
12	Bestätigung empfangener Daten (RR-Rahmen)
14	Letzte Bestätigung versendet $\Rightarrow$ TL-DATAind an MLE oder keinen AI-Rahmen empfangen (<i>Time Out</i>)

Der Empfänger bestätigt eine Rücksetzanforderung mit einem RR-Rahmen (8) und sendet ein TL-CONNECTind-SP zur MLE. Erhält der Sen-

der keine Bestätigung (*Time Out*), geht er in den Ausgangszustand UN-CONNECTED über (9) und informiert die MLE hierüber mit einem negativen TL-DATAconf- bzw. TL-CONNECTconf-SP. Im anderen Falle kehrt er in den Zustand CONNECTED zurück (10) und versendet ggf. ein positives TL-CONNECTconf-SP.

2.7.1.1.3.2 Bestätigte Datenübertragung

Durch ein TL-DATAreq-SP aufgefordert, versendet die Sendeseite segmentierte Schicht-3-SDUs in mehreren AI-Rahmen (11), die von der Empfangsseite durch RR-Rahmen bestätigt werden (12). Zur Flusssteuerung wird ein Fenster der maximalen Größe 3 verwendet. Vollständig empfangene Schicht-3-SDUs werden der MLE durch ein TL-DATAind-SP angezeigt. Auf der Sendeseite wird der Erfolg oder der Misserfolg einer Übertragung der MLE durch ein TL-DATAconf-SP übermittelt. Wird vergeblich auf einen AI- oder RR-Rahmen gewartet (*Time Out*) oder wurde der letzte Rahmen einer Übertragung empfangen bzw. bestätigt, kehrt die jeweilige LAP.T-Instanz in den Anfangszustand zurück (13, 14).

2.7.1.2 Medium Access Control

MAC- und MLE-Teilschicht tauschen über den TLB-SAP und den TLC-SAP Informationen für die Rundsende- und lokalen Kanalverwaltungsfunktionen aus. Zwischen den Teilschichten LLC und MAC wird keine formale Dienstgrenze festgelegt; weder SPs noch SAPs sind hierfür definiert. Die MAC-Teilschicht empfängt LLC-Rahmen bestehend aus Kopf, Körper und Fuß, vgl. Abb. 2.22, S. 65. Diese drei Teile werden in logischen MAC-Büscheln (MAC-PDUs) übertragen. Ein MAC-Büschel besteht aus einem Startblock (*Presiding Block*) und zwischen 0 bis 40 anschließenden Folgeblöcken (*Following Block*), wobei die Parameter des LLC-Kopfes auf den Startblock, der LLC-Körper und der LLC-Fuß auf die Folgeblöcke abgebildet werden. Der MAC-Büschel korrespondiert mit einer kontinuierlichen Funkübertragung. Die einzelnen Blöcke eines MAC-Büschels werden abhängig von seinem Typ über zwei logische Kanäle, Master Block Channel (MBCH) und Normal Block Channel (NBCH), der Kanalcodierung zugeführt, vgl. Abs. 2.7.1.2.7, S. 82. Abhängig vom logischen Kanal werden die Blöcke mit systematischer Redundanz (Forward Error Correction, FEC) versehen und verschlüsselt. Diese so veränderten Multiplex-Blöcke werden als SDUs an

die Bitübertragungsschicht weitergereicht.

Eine Transaktion ist eine verbundene Folge von Funkübertragungen und entspricht der Übertragung eines LLC-Rahmens. Auf der UL können aufeinanderfolgende Transaktionen miteinander verbunden werden, so dass ein erneuter Zufallszugriff für jeden weiteren LLC-Rahmen entfällt. Als kleinste Transaktion gilt die Übertragung eines einzigen MAC-Büschels. Jedoch treten längere Transaktionen auf, wenn mehrere Büschel entweder aufgrund der Segmentierung der Schicht-2-SDU oder aufgrund der erneuten Versendung von fehlerhaft übertragenen Blöcken erforderlich sind. 24 bit breite Schicht-2-Adressen (SSI) werden für jede Transaktion verwendet. Zur Verringerung des Adressverschnitts vergibt die BS 10 bit breite Adressmarken (EL), die in den jeweiligen MAC-Büscheln anstelle der SSI benutzt werden. ELs gelten immer nur für eine Transaktion.

Eine BS kann mehrere UL- und DL-Trägerfrequenzen verwenden, wobei asymmetrischer Betrieb, d. h. ungleiche Anzahl von UL- und DL-Trägerfrequenzen, möglich ist.

2.7.1.2.1 Dienstelemente der MAC-Dienstzugangspunkte

Die Dienstelemente der MAC-Dienstzugangspunkte sind in Anh. A.5, S. 228, näher erläutert.

2.7.1.2.2 Interne logische Kanäle

Die internen logischen Kanäle der MAC-Teilschicht sind nur innerhalb dieser Teilschicht sichtbar und jeweils für eine bestimmte Art von Information zuständig. Es wurden drei logische Kanäle für die DL und zwei für die UL definiert:

Master Control Channel (MCCH): Dieser DL-Kanal überträgt Systeminformationen. Jede MS hört zuerst diesem Kanal zu, wenn sie sich im Bereich einer neuen BS aufhält. Der MCCH dient auch dazu, die MS auf den ACCH zu lenken.

Access Control Channel (ACCH): Dieser DL-Kanal enthält alle Zugriffssteuerinformationen, die sich in UL-Steuerinformationen für den Zufallszugriff und DL-Steuerinformationen für die Initiierung von DL-Datentransfer und die Definition der Zeitintervalle der Energiesparmodi unterteilen lassen.

Downlink Traffic Channel (DTCH): Über diesen DL-Kanal werden DL-Daten und Antworten auf UL-Daten versendet.

Random Access Channel (RACH): Jede nicht reservierte UL-Datenübertragung erfolgt über diesen UL-Kanal.

Uplink Traffic Channel (UTCH): UL-Daten und Antworten auf DL-Daten werden reserviert über diesen UL-Kanal übertragen.

2.7.1.2.3 Datenstrukturen

Folgende PDUs sind für die MAC-Teilschicht vorgesehen:

Access Announce (AA): Die AA-PDU definiert Beginn, Ende und weitere sich kurzfristig ändernde Parameter des Zufallszugriffs.

Access Parameters (AP): Sich längerfristig ändernde Zufallszugriffsparameter werden in der AP-PDU definiert.

Downlink Data Type 1 (DD1): Die BS verwendet eine DD1-PDU als erste PDU zur Datenübertragung, wenn noch keine *Downlink Transfer* (DT)-Adressmarke zugewiesen wurde.

Downlink Data Type 2 (DD2): Die DD2-PDU wird für alle weiteren DL-Datenübertragungen einer Transaktion verwendet.

Downlink Response Type 1 (DR1): Die DR1-PDU wird als Antwort auf *Uplink Data Type 1* (UD1)-PDUs verwendet, wenn noch keine *Uplink Transfer* (UT)-Adressmarke reserviert wurde.

Downlink Response Type 2 (DR2): Als Antwort auf *Uplink Data Type 2* (UD2)-PDUs werden DR2-PDUs versendet.

Downlink Response Type 3 (DR3): Eine DR3-PDU bedeutet eine negative Bestätigung und eine Aufforderung zur erneuten Versendung fehlerhafter Blöcke, wenn nicht alle Blöcke einer UD1-PDU empfangen wurden.

System Information Type 1 (SIN1): Mit SIN1-PDUs werden von der BS regelmäßig per Rundsendung unverschlüsselte Systeminformationen versendet.

System Information Type 2 (SIN2): Mit SIN2-PDUs werden von der BS weitere Systeminformationen verschlüsselt versendet.

Uplink Data Type 1 (UD1): Eine UD1-PDU ist die erste PDU für den Zufallszugriff, wenn noch keine UT-Adressmarke zugewiesen wurde.

Uplink Data Type 2 (UD2): Wenn eine UT-Adressmarke zugewiesen wurde, benutzt die MS UD2-PDUs für alle weiteren reservierten Übertra-

gungen dieser Transaktion.

Uplink Response (UR): Eine UR-PDU stellt eine Antwort auf DL-Daten dar.

Wake Up (WU): WU-PDUs definieren die Länge der Zeitintervalle, während derer MSen in den batterieschonenden Energiesparmodi *Low Duty Mode* (LOD) und *Very Low Duty Mode* (VLD) verharren dürfen.

Tab. 2.12 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den Protokolldateneinheiten (PDU) der MAC-Teilschicht, den internen logischen Kanälen und den logischen Kanälen, über die der Kanalcodierung zu codierende Blöcke zugeführt werden. Die Abbildung erfolgt von links nach rechts; z. B. wird die SIN1-PDU auf den internen logischen Kanal MCCH und dieser auf den logischen Kanal MBCH abgebildet. Die codierten Blöcke werden danach über die DL übertragen.

Tabelle 2.12: Abbildung der PDO-MAC-PDUs auf die logischen Kanäle

PDU	Interner logischer Kanal	Logischer Kanal für Kanalcodierung	Richtung
SIN1 SIN2 AP AA WU DD1 DD2 DR1 DR2 DR3 UD1 UD2 UR	MCCH ACCH DTCH RACH UTCH	MBCH NBCH	DL UL

2.7.1.2.4 Zufallszugriffsprotokoll

Wie in Abb. 2.24, S. 73, zu erkennen, wird die DL in 150 Teilbüschel aufgeteilt, wobei jeweils im ersten Teilbüschel eine SIN1-PDU versendet wird. In

größeren zeitlichen Abständen versendet die BS AP-PDUs, in der die sich nur längerfristig ändernden Parameter des Zufallszugriffsprotokolls definiert werden. Abhängig von der in den Teilbüscheln auf der DL verwendeten TS gilt das Besetztzeichen, das sog. *Busy Flag* (BF), als gesetzt oder nicht. In der AP-PDU wird festgelegt, ob dieses Besetztzeichen zu beachten ist und somit das verwendete Zufallszugriffsverfahren DSMA (BF wird benutzt) oder S-ALOHA mit Paketreservierung (BF wird nicht benutzt) lautet, vgl. Tab. 2.13, S. 74.

Der Zeitraum, in dem ein Zufallszugriff erlaubt ist, wird Zugriffsfenster (*Access Window*) genannt. Ein Zugriffsfenster wird in mehrere Zugriffsperioden (*Access Period*), z. B. in vier wie in Abb. 2.24, unterteilt, wobei die Länge einer einzelnen Zugriffsperiode (*Access Period Length*, APL) in der AP-PDU festgesetzt wird. Durch eine AA-PDU wird der Beginn eines Zugriffsfensters definiert, indem der Parameter *Common Linearisation Time* (CLT) für die Dauer, die den MSen zur Linearisierung ihrer Verstärker eingeräumt wird, und ein zusätzlicher Versatz (*Start of Reservation*, SOR) übergeben werden. Das Ende eines Zugriffsfensters wird durch die Anzahl der Zugriffsperioden (*Number of Access Periods*, NAP), vgl. Tab. 2.14, S. 75, festgelegt.

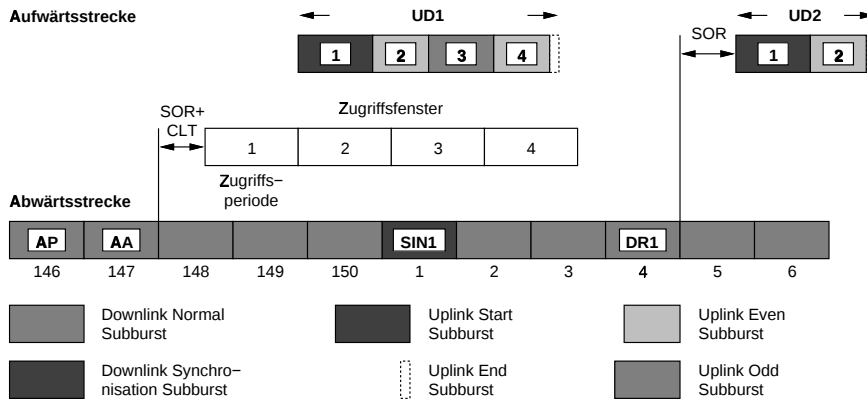


Abbildung 2.24: Zugriffsmethode des PDO-Zufallszugriffsprotokolls

Tabelle 2.13: Die PDO-Zufallszugriffsparameter der AP-PDU

Parameter	Abk.	Beschreibung	Wertebereich
Access Period Length	APL	Länge einer Zugriffsperiode des nächsten Zugriffsfensters	1 – 255 (0,44 – 113,3 ms)
Max Data	MD	Maximale Anzahl von UD1-PDU-Blöcken	1 – 41 Blöcke
Busy Flag	BF	DSMA oder S-ALOHA	Ja/Nein
Max Access Retries	MAR	Maximale Anzahl von Wiederholungen des Zufallszugriffs	1 – 250

Der Zufallszugriff einer MS funktioniert folgendermaßen: Eine sendewillige MS wählt gleichverteilt über das Zugriffsfenster eine Zugriffsperiode aus, wenn das Zugriffsfenster noch geschlossen ist, d. h. nicht begonnen hat, und die von ihr für diese Transaktion zugewiesene Priorität die minimal erlaubte Priorität für dieses Zugriffsfenster nicht unterschreitet.

Entsteht der Sendewunsch der MS während eines geöffneten Zugriffsfensters, wird unter Erfüllung der Prioritätsbedingung die unmittelbar nächste Zugriffsperiode ausgewählt. Entstehen die Sendewünsche während offener Zugriffsfenster ebenfalls gleichverteilt, ist die Auswahl der unmittelbar nächsten Zugriffsperiode gerechtfertigt.

Der einzige Unterschied zwischen DSMA und S-ALOHA liegt bei PDO darin, dass bei DSMA ein Zugriffsfenster auf jeden Fall als geschlossen gilt, wenn das BF gesetzt ist. Um den Wettbewerb zu verringern und den Durchsatz zu erhöhen, setzt die BS das BF, sobald sie den ersten erfolgreichen Zufallszugriff einer MS in einer definierten Zugriffsperiode eines Zugriffsfensters erkannt hat.

Hat nun eine MS erfolgreich eine Zugriffsperiode ausgewählt, darf sie abhängig vom Parameter *Max Data* (MD) der AP-PDU, der die Anzahl der maximal erlaubten Blöcke einer UD1-PDU definiert, nicht nur ihren Reservierungswunsch für die UL sondern auch Daten ($MD > 1$) übertragen. Eine MS beginnt immer am Anfang einer Zugriffsperiode zu senden; es besteht jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen der Länge einer Zugriffsperiode und der Länge einer UD1-PDU. Eine UD1-PDU darf sogar in andere Zugriffsperioden oder in reservierten UL-Verkehr anderer MSen hineinrei-

chen. Eine sinnvolle Festlegung der Parameter bleibt der BS bzw. der SwMI überlassen. Falls MD zu 1 gesetzt wird, können nur Reservierungswünsche und keine zusätzlichen Daten versendet werden. Dieser Zufallszugriffsmechanismus führt zu statistischem Mehrfachbetrieb (*Multiplexing*) und einer variablen Büschelstruktur auf der UL.

Tabelle 2.14: Die PDO-Zufallszugriffsparameter der AA-PDU

Parameter	Abk.	Beschreibung	Wertebereich
Number of Access Periods	NAP	Anzahl der Zugriffsperioden des nächsten Zugriffsfensters	1 - 255
Retry Delay	RD	Nach RD Zugriffsfenstern ist eine Wiederholung erlaubt	0 - 15
Direct Priority	DP	Minimale Priorität für den direkten Zugriff während eines offenen Fensters	0 - 15
Priority 1	Prio1	Minimale Priorität der oberen Prioritätsklasse	0 - 15
Priority 2	Prio2	Minimale Priorität der unteren Prioritätsklasse	0 - 15
Minimum random number for Prio1	MinRand1	Linker Rand des Zugriffsbereichs für Transaktionen hoher Priorität	1 - 255 < MaxRand1
Maximum random number for Prio1	MaxRand1	Rechter Rand des Zugriffsbereichs für Transaktionen hoher Priorität	1 - 255 > MinRand1
Minimum random number for Prio2	MinRand2	Linker Rand des Zugriffsbereichs für Transaktionen niedriger Priorität	1 - 255 < MaxRand2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 2.14: Die PDO-Zufallszugriffsparameter der AA-PDU*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Parameter	Abk.	Beschreibung	Wertebereich
Maximum random number for Prio2	MaxRand2	Rechter Rand des Zugriffsbereichs für Transaktionen niedriger Priorität	1 - 255 > MinRand2

Auf eine UD1-PDU antwortet die BS bei erfolgreichem Empfang aller Blöcke mit einer DR1-PDU, bei nur teilweise erfolgreichem Empfang mit einer DR3-PDU, die die Liste der fehlerhaft empfangenen Blöcke enthält. Falls noch nicht alle Daten mit der UD1-PDU versendet oder die UD1-PDU nur teilweise empfangen wurde, erfolgt bis zum Ende der Transaktion reservierter UL-Transfer mit Hilfe von UD2-PDUs, die wiederum mit DR2-PDUs quittiert werden.

Anhand des Parameters Retry Delay (RD) der AA-PDU ermittelt die jeweilige MS, wieviele AA-PDUs sie abwarten soll, bis sie ihren letzten noch nicht bestätigten Zufallszugriff wiederholen darf. Der Parameter Max Access Retries (MAR) der AP-PDU setzt fest, wieviele Zugriffswiederholungen durchgeführt werden dürfen.

2.7.1.2.4.1 Prioritätsgesteuerter Zufallszugriff

Bevor eine MS einen Zufallszugriff durchführt, weist sie der bevorstehenden Transaktion eine Priorität $p \in [0; 15]$ nach vordefinierten Regeln zu. Diese sind jedoch nicht Teil des PDO-Standards und dem jeweiligen Betreiber überlassen.

Im Falle eines geschlossenen Zugriffsfensters vergleicht die MS diese Priorität p mit den Parametern Priority 1 (Prio1) und Priority 2 (Prio2). Falls $p \geq Prio1$ wählt die MS gleichverteilt eine Zugriffsperiode aus dem Bereich $ap \in [MinRand1; MaxRand1]$. Falls $Prio1 < p \leq Prio2$, dann wird eine Zugriffsperiode aus dem Bereich $ap \in [MinRand2; MaxRand2]$ ausgewählt. Falls die MS ihrer Transaktion eine zu niedrige Priorität zugewiesen hat ($p < Prio2$) oder eine zu große Zugriffsperiode ausgewürfelt wurde ($ap > NAP$), dann ist das Zugriffsfenster geschlossen. Der Zustand $ap > NAP$ kann dann eintreten, wenn zumindest der rechte Rand eines auszuwürfelnden Prioritätsbereichs aus dem Zugriffsfenster herausragt, d. h.

$MaxRand1 > NAP$ und bzw. oder $MaxRand2 > NAP$.

Im Falle eines offenen Zugriffsfensters greift die MS in der unmittelbar nächsten Zugriffsperiode zu, falls $p \geq DP$.

2.7.1.2.5 Zustandsdiagramm der Mobilstation

Das MAC-Protokoll der MS kennt acht Zustände, vgl. Abb. 2.25, wobei START nach dem Anschalten der Anfangszustand der MS ist. In Tab. 2.15, S. 78, sind die Zustandsübergänge der MS in der MAC-Teilschicht zusammengefasst.

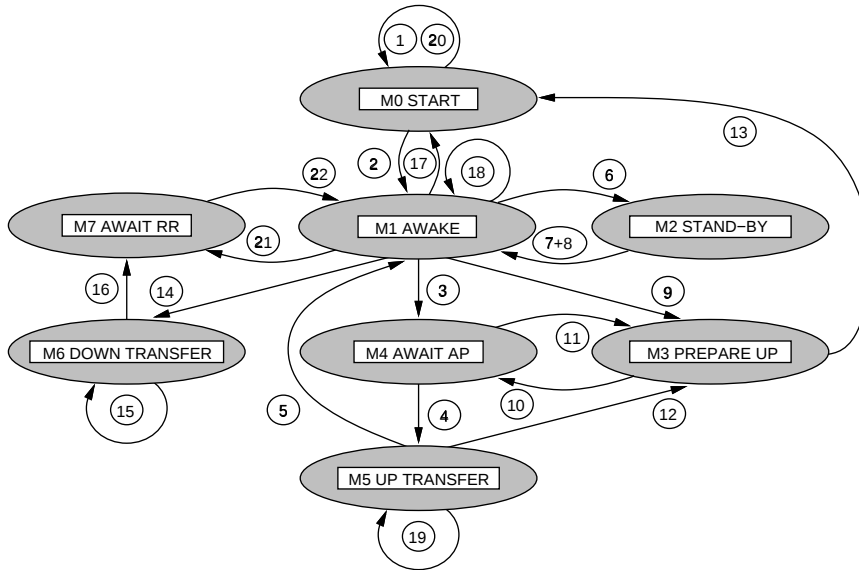


Abbildung 2.25: Zustandsdiagramm der PDO-Mobilstation in der MAC-Teilschicht

Erst nachdem Systeminformationen in Form der SIN1- und SIN2-PDUs empfangen wurden (1, 20), darf die MS nach dem Erhalt der AP-PDU (2), in der sich nur längerfristig ändernde Parameter für den Zufallszugriff definiert sind, in den Zustand AWAKE übergehen. Falls eine MS im LOD- oder VLD-Modus betrieben wird, nimmt sie nach dem Empfang einer WU-PDU den Zustand STAND-BY ein (6). In der WU-PDU wird definiert, wann die MS

wieder aufwachen soll und ob für sie zu einem bestimmten Zeitpunkt eine DL-Datenübertragung geplant ist. Ist der Zeitpunkt eingetreten (7), eine neue WU-PDU zu empfangen, oder beginnt die DL-Datenübertragung (8), kehrt die MS in den Zustand **AWAKE** zurück.

Die drei Zustände **PREPARE UP**, **AWAIT AP** und **UP TRANSFER** sind einer UL-Übertragung zugeordnet. Empfängt die LLC-Teilschicht ein **TL-CONNECTreq**- oder **TL-DATAreq-SP** von der MLE-Teilschicht am TLA-SAP und übergibt sie anschließend einen Rahmen an die MAC-Teilschicht, wechselt diese abhängig davon, ob ein offenes Zugriffsfenster existiert (3) oder nicht (9), in den Zustand **AWAIT AP** oder **PREPARE UP**. Befindet sich die MS im letzteren Zustand und erhält sie eine AA-PDU, wechselt sie in den Zustand **AWAIT AP** (10) und kehrt unmittelbar wieder zurück (11), wenn das Fenster bereits geschlossen ist oder das Zufallszugriffsprotokoll keine Zugriffsperiode des Fensters ausgewählt hat.

Wurde keine AA-PDU empfangen (*Time Out*), nimmt die MS wieder den Anfangszustand **START** ein (13). Hat die MS jedoch den Zustand **AWAIT AP** erreicht und beginnt die ausgewählte Zugriffsperiode, führt die MS ihren Zufallszugriff durch, versendet eine UD1-PDU und geht in den Zustand **UP TRANSFER** (4) über. In diesem Zustand verharrt die MS, solange sie noch Antworten (DR1-, DR2- oder DR3-PDUs) erwartet und weitere Daten zu senden hat (19). Die UL-Übertragung ist abgeschlossen, wenn die letzte Bestätigung erhalten wurde (5). Wird jedoch eine noch ausstehende Bestätigung nicht empfangen, versucht die MS einen neuen Zufallszugriff durchzuführen (12). Die MAC-Teilschicht informiert die LLC-Teilschicht über den Erfolg der gesamten Transaktion.

Tabelle 2.15: Zustandsübergänge der PDO-Mobilstation in der MAC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die MS empfängt eine SIN1-PDU.
2	Die MS empfängt eine AP-PDU.
3	Die MS empfängt ein TL-CONNECTreq- oder TL-DATAreq-SP und es existiert ein offenes Zugriffsfenster.
4	Die ausgewählte Zugriffsperiode beginnt.
5	Die MS empfängt die letzte Bestätigung für diese Transaktion.
6	Eine LOD- oder VLD-MS empfängt eine WU-PDU.
7	Der Zeitpunkt, eine neue WU-PDU zu empfangen, ist eingetreten.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 2.15: Zustandsübergänge der PDO-Mobilstation in der MAC-Teilschicht*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Übergang	Aktion
8	Der in einer WU-PDU definierte Zeitpunkt, DL-Daten zu empfangen, ist eingetreten.
9	Die MS empfängt ein TL-CONNECTreq- oder ein TL-DATAreq-SP, und es existiert kein offenes Zugriffsfenster.
10	Die MS empfängt eine AA-PDU.
11	Das Zugriffsfenster ist geschlossen.
12	<i>Time Out.</i> Keine Antwort auf UL-Daten.
13	<i>Time Out.</i> Keine AA-PDU empfangen.
14	Die MS empfängt eine DD1-PDU.
15	Die MS empfängt eine DD2-PDU.
16	Die MS empfängt die letzte DD2-PDU für diese Transaktion.
17	<i>Time Out.</i> Keine AA- oder Daten-PDU empfangen.
18	Die MS empfängt eine AA-PDU.
19	Die MS empfängt eine DR1-, DR2- oder DR3-PDU und hat weitere reservierte Daten zu senden.
20	Die MS empfängt eine SIN2-PDU.
21	Die MS empfängt eine DD1-PDU, die die letzte für diese Transaktion ist.
22	Die MAC-Teilschicht empfängt einen RR-Rahmen von der LLC-Teilschicht.

Die beiden letzten Zustände DOWN TRANSFER und AWAIT RR sind der DL-Übertragung vorbehalten. Auf den Empfang einer DD1-PDU hin wechselt die MS abhängig davon, ob die empfangene PDU die einzige der Transaktion ist (14) oder ob noch weitere DD2-PDUs folgen (21), vom Zustand AWAKE in einen der beiden Zustände DOWN TRANSFER oder AWAIT RR. Solange noch nicht die letzte Bestätigung zu versenden ist, verharrt die MS im Zustand DOWN TRANSFER und bestätigt eingegangene DD1- und DD2-PDUs (15). Ist jedoch die letzte DD2-PDU der Transaktion empfangen worden, wird in den Zustand AWAIT RR gewechselt (16), von der LLC-Teilschicht ein RR-Rahmen angefordert und nach dessen Erhalt in einer UR-PDU versendet. Nach Abschluss der DL-Transaktion kehrt die MS in den Zustand AWAKE (22) zurück.

In diesem Zustand verarbeitet sie eingehende AA-PDUs (18) und kehrt

in den Anfangszustand zurück (17), falls weder eine AA-PDU empfangen noch eine UL- oder DL-Transaktion begonnen wurde.

2.7.1.2.6 Zustandsdiagramm der Basisstation

Für das MAC-Protokoll der BS sind fünf Zustände, vgl. Abb. 2.26, mit zehn Zustandsübergängen definiert, vgl. Tab. 2.16, S. 81, wobei IDLE der nach dem Anschalten eingenommene Anfangszustand ist. Da die BS für jede Verbindung eine eigene Instanz des MAC-Protokolls erzeugt, können alle fünf Zustände von der BS mehrfach gleichzeitig eingenommen werden.

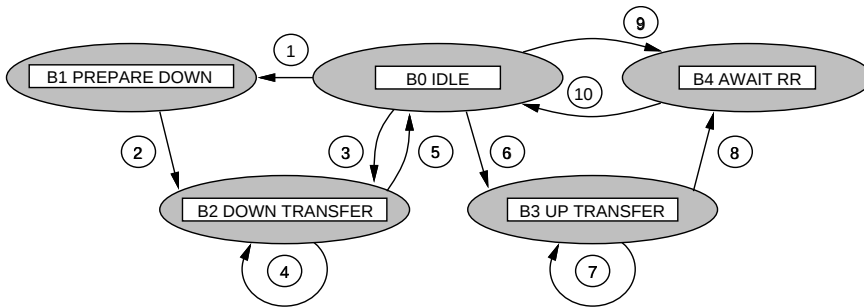


Abbildung 2.26: Zustandsdiagramm der PDO-Basisstation in der MAC-Teilschicht

Die Zustände PREPARE DOWN und DOWN TRANSFER sind der DL-Datenübertragung zugeordnet. Empfängt die LLC- von der MLE-Teilschicht ein TL-CONNECTreq- oder TL-DATAreq-SP am TLA-SAP und übergibt sie anschließend einen Rahmen an die MAC-Teilschicht, wechselt die BS abhängig davon, ob die adressierte MS im VLD-, LOD- (1) oder *Normal Mode* (NOR)-Modus (3) betrieben wird, entweder in den Zustand PREPARE DOWN oder DOWN TRANSFER. Beim Übergang in den Zustand PREPARE DOWN versendet die BS eine WU-PDU, in der sie den Startzeitpunkt der DL-Übertragung zur adressierten MS definiert.

Tritt dieser Zeitpunkt ein, wird eine DD1-PDU an die adressierte MS versendet, und es erfolgt ein Übergang (2) in den Zustand DOWN TRANSFER. Falls der Umweg, die MS aufwecken zu müssen, nicht notwendig war (3), wird die DD1-PDU sofort versendet. Solange noch weitere Daten mit Hilfe von DD2-PDUs zu versenden sind und noch nicht die letzte Bestätigung

(UR-PDU) eingegangen ist, verbleibt die BS im Zustand DOWN TRANSFER (4). Erst wenn die DL-Transaktion beendet wurde, d. h. die letzte UR-PDU empfangen wurde, kehrt sie in den Anfangszustand (5) zurück.

Tabelle 2.16: Zustandsübergänge der PDO-Basisstation in der MAC-Teilschicht

Übergang	Aktion
1	Die BS empfängt ein TL-CONNECTreq- oder TL-DATAreq-SP, und die adressierte MS befindet sich im LOD- oder VLD-Modus.
2	<i>Time Out.</i> Der in der WU-PDU definierte Zeitpunkt aufzuwachen, ist eingetreten.
3	Die BS empfängt ein TL-CONNECTreq- oder TL-DATAreq-SP, und die adressierte MS befindet sich im NOR-Modus.
4	Die BS empfängt eine UR-PDU, die nicht die letzte für diese Transaktion ist.
5	Die BS empfängt die letzte UR-PDU für diese Transaktion.
6	Die BS empfängt eine UD1-PDU, die nicht die letzte für diese Transaktion ist.
7	Die BS empfängt eine DD2-PDU, die nicht die letzte für diese Transaktion ist.
8	Die BS empfängt die letzte UD2-PDU für diese Transaktion.
9	Die BS empfängt die letzte UD1-PDU für diese Transaktion.
10	Die MAC-Teilschicht empfängt einen RR-Rahmen von der LLC-Teilschicht.

Die Zustände UP TRANSFER und AWAIT RR wurden für die UL-Übertragung definiert. Empfängt die BS eine UD1-PDU, die den Reservierungswunsch für eine weitere UL-Übertragung enthält, oder wurde die UD1-PDU nur teilweise empfangen, versendet sie eine mit einer Reservierung versehene DR1- bzw. DR3-PDU und nimmt (6) den Zustand UP TRANSFER ein. Solange noch nicht die letzte UD2-PDU empfangen wurde, antwortet die BS mit normalen DR2-PDUs und bleibt im Zustand UP TRANSFER (7).

Erst nach Erhalt der letzten UD2-PDU fordert (8) die MAC- von der LLC-Teilschicht einen RR-PDU-Rahmen an, wartet auf diesen im Zustand AWAIT RR, antwortet der MS mit einer den empfangenen RR-PDU-Rahmen enthaltenen DR2-PDU und kehrt anschließend in den Anfangszustand IDLE (10) zurück. Falls eine UL-Transaktion nur aus einer empfangenen UD1-PDU besteht, fordert die MAC-Teilschicht sofort einen RR-PDU-Rahmen

von der LLC-Teilschicht an und geht (9) vom Zustand IDLE in den Zustand B4 AWAIT RR über.

2.7.1.2.7 Kanalcodierung

In Abb. 2.27 ist die vierstufige Struktur der PDO-Kanalcodierung dargestellt. Alle MAC-PDUs außer der SIN1-PDU sind 124 bit breit und werden nach Tab. 2.12, S. 72, auf den logischen Kanal NBCH abgebildet.

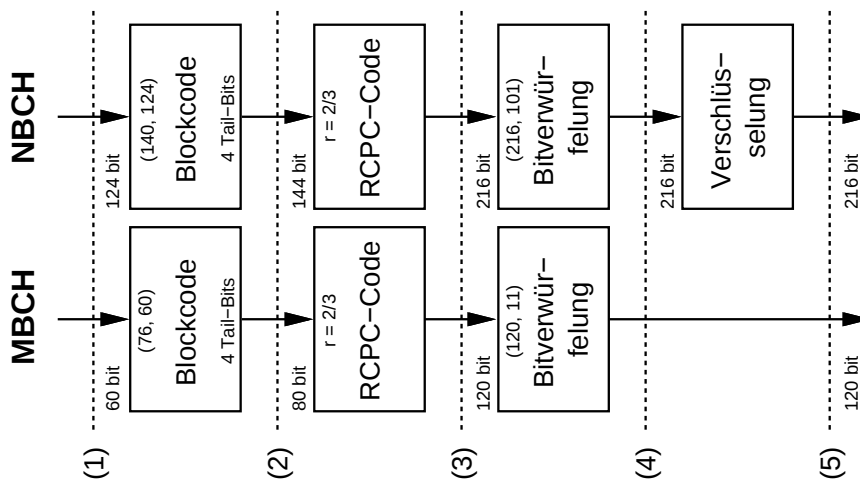


Abbildung 2.27: Struktur der PDO-Kanalcodierung

Von den 124 bit eines NBCH-Blocks sind 4 bit reserviert, die u. a. die Information enthalten, ob es sich um einen Start- oder Folgeblock handelt. Ein Folgeblock kann demnach 8 byte Nutzdaten enthalten. Die codierten und verschlüsselten Multiplex-Blöcke der Breite 216 bit werden als SDUs an die Bitübertragungsschicht weitergereicht.

Eine SIN1-PDU ist nur 60 bit breit, wird auf den Kanal MBCH abgebildet und nicht verschlüsselt, weil neue MSen als erstes in den MBCH hineinhören und zu diesem Zeitpunkt noch keine Verabredung über eine Verschlüsselung existieren kann. Auch diese 120 bit breiten Multiplex-Blöcke werden an die Schicht 1 weitergereicht.

Die einzelnen Stufen der PDO-Kanalcodierung, vgl. Abb. 2.27, S. 82, verlaufen analog zur V+D-Kanalcodierung, vgl. Abs. 2.6.4.1.1, S. 34.

2.7.2 Bündelstruktur

Ein Bündel (*Burst*) ist bei PDO eine auf eine Trägerfrequenz aufmodulierte Datenmenge bestimmter Länge, die sich aus mehreren Teilbündeln (*Subbursts*) zusammensetzt.

2.7.2.1 Abwärtsstrecke

Auf der Abwärtsstrecke sendet die BS kontinuierlich Teilbündel der Länge 240 bit, wobei jeder 150. ein die Multiplex-Blöcke des MBCH enthaltender *Downlink Synchronisation Subburst* ist. Ansonsten werden die Multiplex-Blöcke des NBCH in *Downlink Normal Subbursts* übertragen, vgl. Abb. 2.28, S. 84.

Ein Modulationsbit dauert $1/36 \text{ ms} \approx 27,78 \mu\text{s}$. Daraus ergibt sich, dass ein Abwärtsstreckenteilbündel 6,67 ms dauert und nach 1,00 s jeweils ein *Downlink Synchronisation Subburst* gesendet wird.

2.7.2.2 Aufwärtsstrecke

Besteht ein MAC-Bündel aus N Blöcken, so wird er auf der Aufwärtsstrecke in einem *Uplink Start Subburst* (250 bit $\hat{=}$ 6,94 ms), $\lfloor N/2 \rfloor$ *Uplink Even Subbursts* (238 bit $\hat{=}$ 6,61 ms) und $\lfloor N-1/2 \rfloor$ *Uplink Odd Subbursts* (216 bit $\hat{=}$ 6,00 ms) übertragen, vgl. Abb. 2.29, S. 85. Ein Aufwärtsstreckenbündel wird mit einem *Uplink End Subburst* (4 bit $\hat{=}$ 111,1 μs) abgeschlossen.

Da die Aufwärtsstrecke zeitvariabel betrieben wird, kennt der PDO-Standard keine synchronen Zeitkanäle für die UL. Der Beginn einer Reservierung auf der UL bezieht sich auf das Ende des *Downlink Normal Subbursts*, der die Reservierung beinhaltet. Durch den übertragenen Parameter SOR ist die Anzahl der abzuwartenden Modulationsbits gegeben, vgl. Abb. 2.24, S. 73.

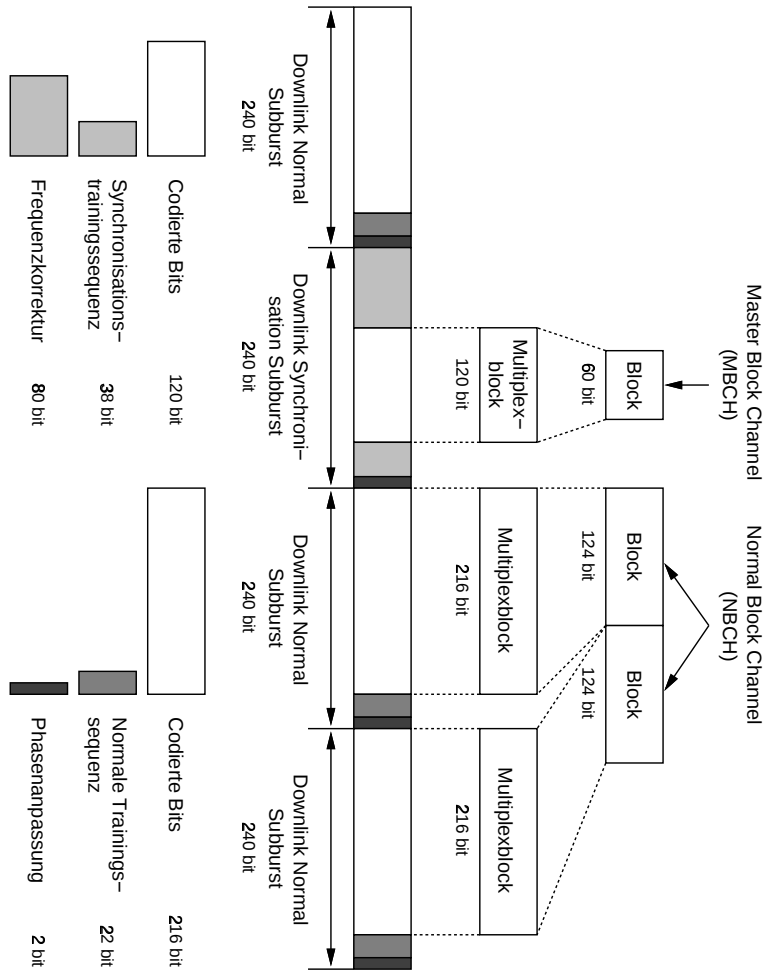


Abbildung 2.28: Struktur der PDO-Abwärtsstreckenbündel

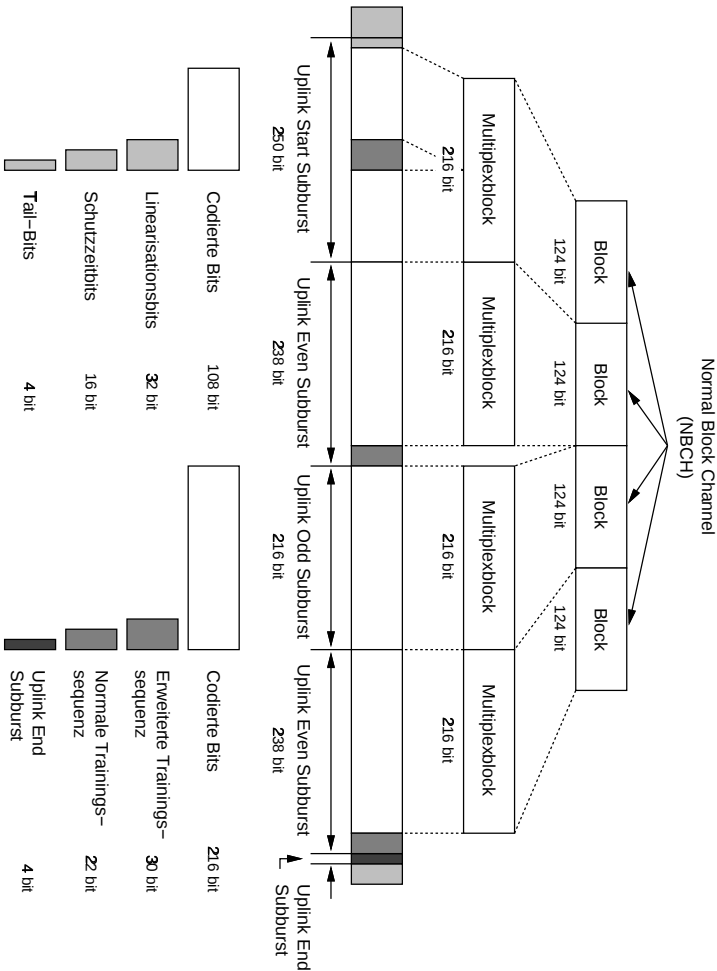


Abbildung 2.29: Struktur der PDO-Aufwärtsstreckenbuschel

Der objektorientierte Softwareentwurf von Kommunikationssystemen unter Verwendung von SDL

Inhalt

3.1 Anforderungsanalyse	88
3.2 Systemanalyse	90
3.3 Systementwurf	91
3.4 Objektentwurf	92
3.5 Implementierung	93
3.6 Leistungsbewertung von SDL-Spezifikationen	93

Schlüsselwörter

FDT, SDL, SOMT, Booch, OMT, OOSE, MSC, Zustandsautomat, Zustandsübergangsdiagramm, hierarchische Zerlegung, Benutzungsfall, CORBA, IDL, ATS, TTCN, Testsuite, Konformitätsüberprüfung, ASN.1, C, C++, Java, SPEET, funktionale und nicht funktionale Analyse

Protokolle komplexer Kommunikationssysteme werden mit Hilfe von formalen Beschreibungstechniken (*Formal Description Technique*, FDT) spezifiziert. Durch FDTs wird sichergestellt, dass die Beschreibungen der Kommunikationsprotokolle syntaktisch und semantisch eindeutig sind und dass Implementierungen dieser Protokolle unabhängig vom Hersteller kompatibel sind, Interoperabilität also möglich ist. Die Übereinstimmung mit einem Standard wird durch vorgegebene Tests eines formal spezifizierten Protokolls bzgl. der Implementierung gewährleistet (*Conformance Testing*) (KNIGHTSON, 1993).

Im Telekommunikationsbereich hat sich die Beschreibungssprache *Specification and Description Language* (SDL) (ELLSBERGER et al., 1997; ITU, 1993c; OLSEN et al., 1994) durchgesetzt. Ein Vergleich von HOGREFE (1989) ergibt, dass SDL im Gegensatz zu anderen FDTs einerseits durch dedizierte Sprachelemente den objektorientierten Softwareentwurf direkt unterstützt und dass die leicht erlernbare grafische Notation von SDL selbstdokumen-

tierend und besonders wartungsfreundlich ist. Letzteres ist bei großen Softwareprojekten von entscheidender Bedeutung. Von allen standardisierten FDTs wird SDL praktisch mit Abstand am Häufigsten eingesetzt.

Folgende fünf von Software-Werkzeugen vollständig unterstützte Phasen (Ek, 1998) stellen den objektorientierten Softwareentwurf von Kommunikationssystemen unter Verwendung von SDL (*SDL-oriented Object Modeling Technique*, SOMT) dar, vgl. Abb. 3.1, S. 89:

1. Anforderungsanalyse,
2. Systemanalyse,
3. Systementwurf,
4. Objektentwurf und
5. Implementierung.

Die ersten beiden Phasen sind von den objektorientierten Modellierungsmethoden von BOOCH (1994) (Booch-Methode), RUMBAUGH et al. (1991) (*Object Modeling Technique*, OMT) und JACOBSON et al. (1992) (*Object-Oriented Software Engineering*, OOSE) inspiriert worden. Eine Vereinigung dieser Modellierungsmethoden stellt die sich gerade in der Entwicklung befindende *Unified Modeling Language* (UML) (BOOCH et al., 1997) dar.

3.1 Anforderungsanalyse

Diese erste Phase wird nach Ek (1998) in die zwei Aktivitäten Problemanalyse und Systemanforderungsanalyse aufgeteilt.

Während der Problemanalyse konzentriert man sich darauf, den Problembereich zu verstehen, in dem das zu erstellende System eingesetzt werden soll. Die Systemanforderungsanalyse dient dazu, das zu erstellende System aus Benutzersicht zu beschreiben. Aus Benutzersicht die Anforderungen zu beschreiben, bedeutet keine Kenntnisse über den internen Aufbau des Systems zu haben, so dass Wünsche an das System unabhängig von einer möglichen Implementierbarkeit formuliert werden können.

Das Ergebnis der Anforderungsanalyse wird in einem ersten Schritt textuell in nicht formaler Sprache festgehalten und besteht aus funktionalen Anforderungen und nicht-funktionalen, wie z.B. erwartetes Leistungsverhalten, Sicherheit, Verfügbarkeit, etc.

Bereits in dieser Phase können Benutzungsfälle des Systems angelehnt an OOSE-Benutzungsfälle von JACOBSON et al. (1992) (*Use Cases*) in Form von Nachrichtenflussdiagrammen (*Message Sequence Chart*, MSC) (ITU, 1993b) erstellt werden. Als Benutzer kommen Menschen, andere Systeme

oder Hardware in Betracht.

In einem Datenlexikon wird die Bedeutung aller während der Anforderungsanalyse erstellten Konzepte definiert, so dass Entwickler und Kunden über ein gemeinsames Vokabular verfügen.

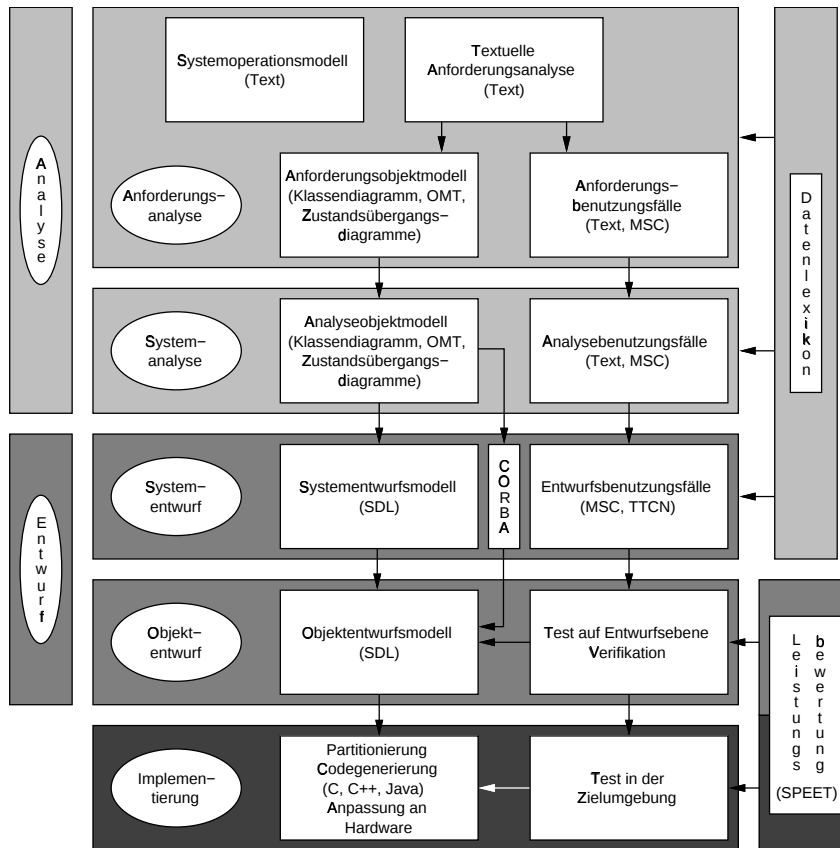


Abbildung 3.1: Die fünf Phasen des SDL-orientierten Softwareentwurfs

Ein weiterer Schritt der Anforderungsanalyse besteht nun darin, ein Anforderungsobjektmodell in der OMT-Notation zu erstellen. Dieses Objektmodell soll die Konzepte, die während der Anforderungsanalyse gefunden wurden, und die Beziehungen zwischen diesen Konzepten dokumentieren.

Es werden insbesondere die logische Struktur der Daten und Informationen und der Kontext, in dem sich das System befindet, einschließlich der Benutzer des Systems beschrieben.

Zustandsübergangsdiagramme (*State Charts*) können in HARELS Notation (BOOCH et al., 1997; HAREL und GERY, 1997; HAREL et al., 1990) im Objektmodell verwendet werden, um das Verhalten wichtiger Objekte auf hoher Abstraktionsebene zu beschreiben.

Schließlich können die elementaren Kommunikationsereignisse der Anforderungsbenutzungsfälle in einem Systemoperationsmodell ausführlich beschrieben werden. Dieses Modell erlaubt in strukturierter textueller Form eine detailliertere Definition der Kommunikationsereignisse im Vergleich zum Datenlexikon oder dem Anforderungsobjektmodell und ist der Fusionsmethode von COLEMAN et al. (1994) entlehnt.

3.2 Systemanalyse

Während die Anforderungsanalyse anstrebt, das zu lösende Problem und die Systemanforderungen zu formulieren, versucht man in der zweiten Phase, der Systemanalyse, ein abstraktes Verständnis des Systems und der Konzepte zu erlangen, um eine Lösung der Probleme und Aufgaben der Anforderungsanalyse beschreiben zu können.

Systemanalyse bedeutet, die logische Architektur des Systems, sowie die zu verwendenden Daten, Algorithmen und Schnittstellen zu bestimmen.

Hierzu wird entsprechend der OMT das Anforderungsobjektmodell aus der Innensicht des Systems zu einem Analyseobjektmodell verfeinert. Um die Konsistenz dieses Objektmodells, das die statische Sicht auf die Zerlegung des Systems bietet, zu überprüfen, werden die Benutzungsfälle der Anforderungsanalyse zu Benutzungsfällen der Systemanalyse erweitert, um die dynamische Sicht auf das Verhalten des Systems zu definieren.

Nach HARELS Notation (BOOCH et al., 1997; HAREL und GERY, 1997; HAREL et al., 1990) werden mit Zustandsübergangsdiagrammen der Zustandsraum, die Zustandsübergänge auslösenden Ereignisse und die aus diesen Übergängen resultierenden Aktionen modelliert. Diese Diagramme stellen eine Sicht auf das dynamische Verhalten eines einzigen Objekts oder eines ganzen Systems dar.

3.3 Systementwurf

Der Übergang von der Systemanalyse zum Systementwurf ist ein kreativer Prozess. Die Trennung zwischen Systemanalysemodell und Systementwurfsmodell verläuft zwischen der Entscheidung, welche logische Architektur und welche wichtigsten Konzepte zu dem System gehören sollen – dies ist Aufgabe der Systemanalyse – und wie die reale Architektur auszusehen hat – dies ist Aufgabe des Systementwurfs.

Falls die Analyse ergeben hat, dass verschiedene Komponenten in einem verteilten System zu erstellen sind, d. h. verschiedene SDL-Systeme laufen auf verschiedenen Maschinen in einem möglicherweise heterogenen Netz, besteht das Problem der Schnittstellendefinition und Kommunikation zwischen diesen Komponenten. In diesem Fall kann von einer *Common Object Request Broker Architecture* (CORBA)-Netzumgebung (SIEGEL, 1996) Gebrauch gemacht und der Systementwurf in der CORBA-spezifischen Schnittstellendefinitionssprache (*Interface Definition Language*, IDL) durchgeführt werden.

LOFTUS et al. (1997) haben ein Verfahren vorgestellt, wie aus einem OMT-Modell der Systemanalyse Schnittstellenbeschreibungen in IDL generiert werden können, die wiederum zur Generierung von SDL-Spezifikationen für die Objektentwurfsphase herangezogen werden. Wird CORBA nicht benutzt, erfolgt nach MITSCHLE-THIEL (2001) auch der Systementwurf der Architektur in SDL.

Parallel zur Definition der Architektur werden die Benutzungsfälle der Systemanalyse zu einem Granularitätsgrad verfeinert, der ausreicht, das Verhalten der Komponenten innerhalb der Systemarchitektur zu beschreiben. Die MSCs der Benutzungsfälle sind dann Quelle für Modul- und Systemtests der Objektentwurfsphase.

Weitergehend als MSCs sind wie folgt beschrieben spezifizierte Benutzungsfälle in *Tree and Tabular Combined Notation* (TTCN) (ISO/IEC, 1992; KNIGHTSON, 1993). Mit TTCN, einer Sprache zur Beschreibung von abstrakten Testsuiten (*Abstract Test Suite*, ATS), ist es möglich, Randbedingungen für komplexe Datenstrukturen zu beschreiben, auf alternative Ergebnisse eines Benutzungsfalles zu reagieren und das erwartete Ergebnis zu definieren.

3.4 Objektentwurf

Im Objektentwurf wird die Definition des Systems vervollständigt. Hierbei werden Aspekte der Wiederverwendung, der Vererbung und der generischen Formalisierung durch Muster berücksichtigt. Alle Details der SDL-Spezifikation werden ausformuliert; Daten, Schnittstellen und Algorithmen werden vollständig beschrieben. Komplexere Datenstrukturen werden in SDL in der *Abstract Syntax Notation One* (ASN.1) (ITU, 1994, 1995; STEEDMAN, 1993) spezifiziert.

Die Klassen des Analyseobjektmodells werden auf entsprechende SDL-Konzepte abgebildet. Die Zustandsübergangsdiagramme der Analysephase und die Benutzungsfälle des Systementwurfs werden herangezogen, um das Verhalten der Komponenten des SDL-Systems zu spezifizieren.

Ein großer Vorteil von SDL ist, dass aufgrund der vollständigen SDL-Beschreibung der zu erstellenden Systeme diese bereits früh in der Entwurfsphase getestet werden können. Tests der Implementierung können sich dann auf die Integration in der Zielumgebung konzentrieren. Drei Arten von Testmethoden werden verwendet:

1. Im manuellen oder Stapelbetrieb wird ein SDL-Simulator verwendet. Diese Testmethode kann nur ein grober Vortest sein.
2. Nach dem Algorithmus von HOLZMANN (1991) kann unter Verwendung einer Erreichbarkeitsanalyse im Zustandsraum die Vollständigkeit und die Konsistenz der Interaktionen in einem verteilten System überprüft werden. Konkret wird die Konsistenz der MSC-Benutzungsfälle mit der SDL-Spezifikation getestet.
3. EK et al. (1997) und BOCHMANN et al. (1997) haben Methoden und Werkzeuge vorgestellt, mit denen TTCN-Testsuiten automatisch aus MSC- und SDL-Spezifikationen erzeugt werden. Die dritte Testmethode besteht nun aus einer Erweiterung der ersten Methode, nämlich TTCN-Testfälle mit Hilfe eines Werkzeuges gegen SDL-Simulationen laufen zu lassen.

Wenn alle Benutzungsfälle spezifiziert wurden und die endgültige Systemarchitektur anhand aller Benutzungsfälle verifiziert wurde, ist die Objektentwurfsphase abgeschlossen.

3.5 Implementierung

In der Implementierungsphase wird das entworfene SDL-System zuerst partitioniert, d. h. die Teile des Systems, die als eigenständige Programme auf einem Computer oder in einem verteilten System eingesetzt werden sollen, werden identifiziert.

Anschließend übersetzt ein Codegenerator die SDL-Spezifikation in eine nicht formale, prozedurale Programmiersprache wie z. B. C ([KERNIGHAN und RITCHIE, 1989](#)), C++ ([STROUSTRUP, 1997](#)) oder Java ([ARNOLD und GOSLING, 1996](#)). In der Zielumgebung wird der generierte Code zusammen mit dem SDL-Laufzeitsystem und den Funktionen zur Kommunikation des Systems mit der Umgebung gebunden. Schließlich wird die Implementierung des Systems in der Zielumgebung in einer vom Benutzer definierten Weise anwendungsspezifisch getestet.

3.6 Leistungsbewertung von SDL-Spezifikationen

Im vorhergehenden Abschnitt wurde der Softwareentwurf der funktionalen Aspekte eines Kommunikationssystems unter Zuhilfenahme von SDL beschrieben. Leistungsbewertung ist noch nicht Teil des SDL-Standards, es wird aber erwartet, dass sie in einer der nächsten Versionen der SDL-Empfehlung Z.100 ([ITU, 1993c](#)) enthalten sein wird. Die Leistungsbewertung eines SDL-Systems wird folgende Aspekte umfassen müssen:

- die Unterstützung verschiedener Entwurfsphasen,
- die Lastdefinition für SDL-Systeme,
- die Definition der Struktur, der Konfiguration und der Wiederverwendbarkeit derjenigen Maschinen, auf denen das SDL-System ablaufen wird bzw. von denen das SDL-System Dienste anfordert,
- die Definition der leistungsbezogenen Eigenschaften von Kanälen und
- die Spezifikation der Leistungsanforderungen.

Verschiedene Vorschläge wurden bisher veröffentlicht, um SDL um den Aspekt der Leistungsbewertung zu erweitern: [ROUX \(1998\)](#) schlägt Erweiterungen in Form von Kommentaren zur Benutzung mit dem SDL-Werkzeug ObjectGEODE vor, um gewichtete zeitliche Verzögerungen für SDL-Aktionen des Objektentwurfsmodells einzuführen, vgl. Abb. 3.1, S. 89. Das EaSySim-II-Werkzeug von [GERLICH \(1998\)](#) stellt globale SDL-Prozeduren zur Verfügung, um den Betriebsmittelverbrauch zu definieren. [MÜLLER-](#)

CLOSTERMANN und DIEFENBRUCH (1998) schlagen in Bezug auf die Definition von Maschinen eine Erweiterung des SDL-Sprachstandards vor. Diese Maschinen bieten Dienste und Betriebsmittel den diese anfordernden SDL-Prozessen an. Verkehrslast wird in dedizierten SDL-Prozessen spezifiziert. Um die Leistungsanforderungen zu beschreiben, wird temporale Logik verwendet.

Diese drei Lösungen können verwendet werden, um das nicht-funktionale Verhalten eines SDL-Systems entsprechend Abb. 3.1, S. 89, auf Entwurfsebene zu testen. Es wird jedoch dem Benutzer überlassen, die zu dem jeweiligen Betriebsmittelverbrauch korrespondierende Zeitspanne zu definieren. Aus diesem Grund kann die Leistungsbewertung auf Entwurfsebene nur eine grobe Abschätzung sein.

Mit der SPEET-Umgebung (BÖHMER, 1996; STEPPLER, 1998a; STEPPLER und LOTT, 1997), vgl. Kap. 6, S. 137, ist es möglich, das Leistungsverhalten eines SDL-Systems auf Entwurfsebene und dessen Implementierung in der Zielumgebung auf Implementierungsebene in einer detaillierteren Form vorherzusagen, vgl. Abb. 3.1, S. 89.

Kollisionsauflösung und Reservierungszuteilung

Inhalt

4.1 Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei S-ALOHA	96
4.1.1 Exponentieller Backoff-Algorithmus	96
4.1.2 Stochastische Annäherung	98
4.1.3 Pseudo-Bayes-Algorithmus	99
4.1.4 MMSE-Algorithmus	100
4.1.5 Splitting-Algorithmus	101
4.2 Übersicht über Abfertigungsstrategien	105
4.3 Optimale Abfertigungsstrategie für TETRA-Systeme	107

Schlüsselwörter

S-ALOHA, Sendergebnis, Kollisionen, Zugriffsrahmen, Zugriffsfenster, Auftragsüberhang, FIFO, FCFS, LIFO, LCFS, HOL, SPT, RR, PREHOL, SRPT

Die beiden Protokollstapel von TETRA, V+D und PDO, definieren weder Algorithmen für die Auflösung von Kollisionen beim Zufallszugriff, d. h. beim Wettbewerb um Betriebsmittel, noch Strategien für die Reservierungszuteilung von Betriebsmitteln.

In diesem Kapitel sollen aus der Literatur bekannte Algorithmen zur Kollisionsauflösung vorgestellt werden, die mit der Absicht entwickelt wurden, das S-ALOHA-Verfahren zu stabilisieren und dabei gleichzeitig Durchsatz und Paketverzögerung zu optimieren.

Es werden zunächst einfache Verfahren vorgestellt, die jeweils den letzten Zeitschlitz auswerten und aufgrund dieser Auswertung die Zugriffswahrscheinlichkeit für sendebereite MSen für den nächsten Zeitschlitz neu bestimmen. Anschließend werden aufwendigere Algorithmen vorgestellt, die die Sendewahrscheinlichkeit aufgrund eines Schätzverfahrens für den Auftragsüberhang (*Backlog*) bzw. die Anzahl der kollidierten MSen ermitteln. Abschließend wird auf einen Algorithmus eingegangen, der ohne Schätzverfahren Kollisionen auflöst, indem die Anzahl der Zugriffsberechtigten begrenzt wird (STEPPLER und BÜTER, 1997).

Da beim Zufallszugriff von TETRA die Parameter des Zufallszugriffsprotokolls zentral von einer BS bestimmt werden, können Algorithmen zur Kollisionsauflösung nicht angewendet werden, bei denen die sendenden MSen aufgrund einer Rückmeldung des Kanals dezentral über ihr weiteres Vorgehen entscheiden.

Für jeden Algorithmus werden ferner die notwendigen Anpassungen an die Parameter der beiden Protokollstapel V+D und PDO vorgestellt.

Schließlich werden aus der Literatur bekannte Abfertigungsstrategien vorgestellt und überlegt, welche Anforderungen an eine optimale Abfertigungsstrategie für TETRA-Systeme zu stellen sind.

4.1 Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei S-ALOHA

4.1.1 Exponentieller Backoff-Algorithmus

Bei Backoff-Algorithmen wird der Zugriffskanal so gesteuert, dass aufgrund von i Kollisionen die Zugriffswahrscheinlichkeit eines Teilnehmers zu $p = 1/2^i$ bestimmt wird. Bei einem Zugriffsrahmen oder -fenster bestehen demnach 2^i Zugriffsmöglichkeiten. Die Absicht dieses Algorithmus ist, bei steigender Anzahl von Kollisionen den jeweiligen Zugriffsrahmen zu vergrößern, da eine Zunahme von Kollisionen als Anzeichen für ein erhöhtes Verkehrsaufkommen gewertet wird. Bei absinkender Kollisionsanzahl wird dynamisch die Anzahl der Zugriffsmöglichkeiten verringert, um bei einer gleichverteilten Auswahl einer der Zugriffsmöglichkeiten eine niedrige Paketverzögerung zu erzielen.

Voice plus Data

Nach der von [JEONG und JEON \(1995\)](#) vorgestellten Methode wird abhängig vom Sendergebnis des letzten Zeitschlitzes k iterativ die Sendewahrscheinlichkeit $p(k+1)$ eines Teilnehmers im nächsten Zeitschlitz $k+1$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$ bestimmt. Für das Sendergebnis gelte, dass I_0 den Wert 1 annimmt, wenn der Zeitschlitz k leer war, und ansonsten den Wert 0. I_1 (erfolgreiche Übertragung eines Teilnehmers) und I_c (Kollision von mindestens zwei Teilnehmern) werden analog bestimmt.

Wenn die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ benutzt wird, vgl. [Abb. 2.16](#), [S. 53](#), dann kann die Anzahl K der Zeitschlitzte eines Zugriffsrahmens mit jedem DL-Zeitschlitz geändert werden. Die Sendewahrscheinlich-

keit eines Teilnehmers im nächsten Zeitschlitz wird folgendermaßen iterativ bestimmt:

$$p(k+1) = \min \left\{ p_{\max}; p(k) \left(\frac{1}{q} I_0 + I_1 + q I_c \right) \right\}, \quad (4.1)$$

wobei $0 < p_{\max} \leq 1$, $0 < q \leq 1$ und $p(0) \stackrel{!}{=} 1$. Von [JEONG und JEON \(1995\)](#) wird gezeigt, dass für $p_{\max} \stackrel{!}{=} 1$ und $q \stackrel{!}{=} 1/2$ das S-ALOHA-Verfahren stabilisiert wird. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass auch neu generierte Pakete nur mit einer Wahrscheinlichkeit p versendet werden, das Zugriffverfahren also im DFT-Modus betrieben wird. Somit muss für den Parameter der Access-Define-PDU $IMM \stackrel{!}{=} 0$ gelten, vgl. [Tab. 2.7, S. 50](#). Jede MS greift mit der Wahrscheinlichkeit $p(k+1)$ zu und wählt gleichverteilt einen der $K(k+1)$ Zeitschlitz des Zugriffsrahmens aus. Daher lässt sich dynamisch die Länge des nächsten Zugriffsrahmens zu

$$K(k+1) = \min \left\{ K_{\max}; \frac{1}{p(k+1)} \right\} \quad (4.2)$$

mit $K_{\max} \stackrel{!}{=} 128$ bestimmen. Die Zugriffsrahmenlänge K ist das Produkt des Rahmenlängenfaktors, vgl. [Tab. 2.7, S. 50](#), mit der Basisrahmenlänge, vgl. [Tab. 2.8, S. 51](#), und ist somit durch deren Wertebereiche begrenzt ($1 \leq K \leq 128$).

Wenn die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ benutzt wird, vgl. [Abb. 2.17, S. 54](#), dann wird die Länge des nächsten Zugriffsrahmens erst nach Ende des aktuellen Rahmens festgelegt. Die Länge wird analog zum rollenden Zugriffsrahmen berechnet.

Packet Data Optimised

Bei PDO können die Zugriffsparameter nicht pro Zeitschlitz sondern nur pro Zugriffsfenster verändert werden, da die Parameter einer AA-PDU, vgl. [Tab. 2.14, S. 75](#), für alle Zugriffsperioden eines Zugriffsfensters gültig sind.

Der an PDO angepasste exponentielle Backoff-Algorithmus wertet separat beide Prioritätsbereiche, vgl. [Abs. 2.7.1.2.4.1, S. 76](#), eines Zugriffsfensters aus. $I_{0,pr}$ sei bei PDO die Anzahl leerer Zugriffsperioden des letzten Zugriffsfensters des Prioritätsbereichs $pr \in \{1; 2\}$, so dass im Gegensatz zu V+D $I_{0,pr}$ keine binäre Information darstellt. $I_{1,pr}$ und $I_{c,pr}$ werden analog

berechnet. Bei NAP_{pr} Zugriffsperioden, vgl. Tab. 2.14, S. 75, pro Prioritätsbereich eines Zugriffsfensters gelte:

$$NAP_{pr} = I_{0,pr} + I_{1,pr} + I_{c,pr}. \quad (4.3)$$

Abgeleitet von Gl. 4.1, S. 97, ergibt sich die Sendewahrscheinlichkeit pro Teilnehmer und Prioritätsbereich für das Zugriffsfenster $k + 1$ zu

$$p_{pr}(k + 1) = \min \left\{ p_{\max}; \frac{p_{pr}(k)}{NAP_{pr}(k)} \left(\frac{1}{q} I_{0,pr} + I_{1,pr} + q I_{c,pr} \right) \right\}. \quad (4.4)$$

Wie in Tab. 2.14, S. 75, beschrieben beträgt die maximale Anzahl von Zugriffsperioden eines Zugriffsfensters $NAP_{\max} = 255$. Die Gesamtanzahl der Zugriffsperioden entspricht der Summe der Zugriffsperioden der beiden Prioritätsbereiche, die wie folgt berechnet werden:

$$NAP_1(k + 1) = \min \left\{ NAP_{\max}; \frac{1}{p_1(k + 1)} \right\}, \quad (4.5)$$

$$NAP_2(k + 1) = \min \left\{ NAP_{\max} - NAP_1(k + 1); \frac{1}{p_2(k + 1)} \right\}, \quad (4.6)$$

$$NAP(k + 1) = \sum_{pr=1}^2 NAP_{pr}(k + 1). \quad (4.7)$$

Die im Folgenden beschriebenen Algorithmen „Stochastische Annäherung“, „Pseudo-Bayes“ und „MMSE“ verwenden ebenfalls Gl. 4.2, S. 97, bzw. Gl. 4.5 bis Gl. 4.7, um die Länge des nächsten Zugriffsrahmens bzw. -fensters zu berechnen.

4.1.2 Stochastische Annäherung

Eine verallgemeinerte Form der Gl. 4.1, S. 97, wird von HAJEK und LOON (1982) vorgestellt, wobei versucht wird, das dynamische Verhalten der aus neuen und kollidierten Aufträgen resultierenden Verkehrslast von den Veränderungen des Auftragsüberhangs zu entkoppeln.

Voice plus Data

Die Sendewahrscheinlichkeit wird folgendermaßen mit $p(0) \stackrel{!}{=} 1$ abgeschätzt:

$$p(k + 1) = \min \left\{ p_{\max}; p(k) (a_0 I_0 + a_1 I_1 + a_c I_c) \right\} \quad (4.8)$$

mit

$$\begin{aligned} (a_0; a_1; a_c) &= \left(\left(e^{\frac{1-2/e}{1-1/e}} \right)^\gamma; 1; \left(e^{\frac{-1/e}{1-1/e}} \right)^\gamma \right) \\ &\approx (1,519^\gamma; 1; 0,559^\gamma). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Nach HAJEK wird der Durchsatz maximiert, wenn $p_{\max} = 1-\lambda/2-\lambda$. CUNNINGHAM (1990) setzt für die größtmögliche Ankunftsrate $\lambda = 1/e$ die obere Schranke zu $p_{\max} = 0,387$ und zeigt, dass $\gamma = 0,3$ optimal für den IFT- und den DFT-Modus ist.

Packet Data Optimised

Die Sendewahrscheinlichkeit nach Gl. 4.8, S. 98, angepasst an PDO ergibt sich zu:

$$p_{pr}(k+1) = \min \left\{ p_{\max}; \frac{p_{pr}(k)}{NAP_{pr}(k)} (a_0 I_{0,pr} + a_1 I_{1,pr} + a_c I_{c,pr}) \right\}. \quad (4.10)$$

4.1.3 Pseudo-Bayes-Algorithmus

Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Algorithmen schätzt der Pseudo-Bayes-Algorithmus von RIVEST (1987) die Anzahl aktiver, d. h. sendender, Teilnehmer im nächsten Zeitschlitz ab. Für diese Abschätzung wird die bayessche Formel (BRONSTEIN und SEMENDJAJEW, 1996) angenähert.

Voice plus Data

Sei $\hat{N}(k+1)$ der Schätzwert für die Anzahl der aktiven Teilnehmer und $\hat{\lambda}(k+1)$ der Schätzwert für die Ankunftsrate neuer Pakete im Zeitschlitz $k+1$. Der Pseudo-Bayes-Algorithmus ergibt sich mit $\hat{N}(0) \stackrel{!}{=} 1$ zu:

$$\hat{N}(k+1) = \max \left\{ \hat{\lambda}(k); \hat{N}(k) + \hat{\lambda}(k) - I_0 - I_1 + 1/e - 2 I_c \right\}. \quad (4.11)$$

Da die Ankunftsrate $\hat{\lambda}$ ebenfalls unbekannt ist, schlägt RIVEST basierend auf Simulationsergebnissen folgende Näherungsformel vor, um mit $\hat{\lambda}(0) \stackrel{!}{=} 0,5$ die Ankunftsrate zu ermitteln:

$$\hat{\lambda}(k+1) = 0,995 \hat{\lambda}(k) + 0,005 I_1. \quad (4.12)$$

Abschließend wird die Sendewahrscheinlichkeit im nächsten Zeitschlitz mit $p_{\max} \stackrel{!}{=} 1$ zu:

$$p(k+1) = \min \left\{ p_{\max}; \frac{1}{\hat{N}(k+1)} \right\}. \quad (4.13)$$

Packet Data Optimised

Um an PDO angepasst zu werden, müssen Gl. 4.11, S. 99, bis Gl. 4.13 jeweils auf einen Prioritätsbereich des Zugriffsfensters $k+1$ angewendet werden:

$$\begin{aligned} \hat{N}_{pr}(k+1) &= \max \left\{ \hat{\lambda}_{pr}(k); \right. \\ &\quad \left. \hat{N}_{pr}(k) + \hat{\lambda}_{pr}(k) - I_{0,pr} - I_{1,pr} + 1/e^{-2} I_{c,pr} \right\}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\hat{\lambda}_{pr}(k+1) = 0,995 \hat{\lambda}_{pr}(k) + 0,005 I_{1,pr}, \quad (4.15)$$

$$p_{pr}(k+1) = \min \left\{ p_{\max}; \frac{1}{\hat{N}_{pr}(k+1)} \right\}. \quad (4.16)$$

4.1.4 MMSE-Algorithmus

Der Algorithmus Minimum Mean Squared Error (MMSE) (THOMOPOULOS, 1988) schätzt den Auftragsüberhang (*Backlog*) $\hat{B}(k+1)$, d. h. die Anzahl kollidierter Teilnehmer, so ab, dass $|B(k+1) - \hat{B}(k+1)|^2$ minimiert wird.

Voice plus Data

Der Schätzwert $\hat{B}(k+1)$ wird wiederum benutzt, um die Sendewahrscheinlichkeit $p(k+1)$ des Zeitschlitzes $k+1$ mit $p_{\max} \stackrel{!}{=} 0,5$ und Parameter α zu bestimmen:

$$\begin{aligned} p(k+1) &= \min \left\{ p_{\max}; \frac{\alpha}{\hat{B}(k+1)} \right\} \\ &= \min \left\{ p_{\max}; \frac{1 - \hat{\lambda}(k+1)}{\hat{B}(k+1)} \right\}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Der Auftragsüberhang wird mit $\hat{B}(0) = B_{\min} \stackrel{!}{=} 0$ folgendermaßen iterativ berechnet:

$$\hat{B}(k+1) = \max \left\{ B_{\min}; \hat{B}(k) - \frac{\alpha}{\hat{\lambda}(k) + \alpha} I_1 + \frac{\hat{\lambda}(k)}{1 - \frac{\hat{\lambda}(k) + \alpha}{e^{\hat{\lambda}(k) + \alpha} - 1}} I_c \right\}. \quad (4.18)$$

THOMOPOULOS zeigt, dass der maximale Durchsatz bei $\alpha = 1 - \hat{\lambda}(k)$ erreicht wird. Somit kann Gl. 4.18 reduziert werden zu:

$$\hat{B}(k+1) = \max \left\{ B_{\min}; \hat{B}(k) - (1 - \hat{\lambda}(k)) I_1 + 2,392 I_c \right\}. \quad (4.19)$$

Die Ankunftsrate neuer Pakete wird ebenfalls mit $\hat{\lambda}(0) = \lambda_0 \stackrel{!}{=} 0,3 \in [0; 1/e]$ zu

$$\hat{\lambda}(k+1) = \frac{1}{k+1} \left(\hat{B}(k+1) + \sum_{i=0}^k I_1(i) + \lambda_0 \right) \quad (4.20)$$

abgeschätzt.

Packet Data Optimised

Um an PDO angepasst zu werden, müssen Gl. 4.17, S. 100, bis Gl. 4.20 jeweils auf einen Prioritätsbereich des Zugriffsfensters $k+1$ angewendet werden:

$$p_{pr}(k+1) = \min \left\{ p_{\max}; \frac{1 - \hat{\lambda}_{pr}(k+1)}{\hat{B}_{pr}(k+1)} \right\}, \quad (4.21)$$

$$\hat{B}_{pr}(k+1) = \max \left\{ B_{\min}; \hat{B}_{pr}(k) + \frac{(\hat{\lambda}_{pr}(k) - 1) I_{1,pr} + 2,392 I_{c,pr}}{NAP_{pr}(k)} \right\}, \quad (4.22)$$

$$\hat{\lambda}_{pr}(k+1) = \frac{1}{k+1} \left(\hat{B}_{pr}(k+1) + \sum_{i=0}^k \frac{I_{1,pr}(i)}{NAP_{pr}(i)} + \lambda_0 \right). \quad (4.23)$$

4.1.5 Splitting-Algorithmus

Im Gegensatz zu den in Abs. 4.1.1, S. 96, bis Abs. 4.1.4, S. 100, vorgestellten Algorithmen halten Splitting-Algorithmen, z. B. Baumalgorithmen (BERTSEKAS und GALLAGER, 1992; CAPETANAKIS, 1979), dadurch die Stabilität

des S-ALOHA-Verfahrens aufrecht, indem ohne komplexe Schätzprozeduren Untermengen der teilnehmenden MSen mit Sendeerlaubnis definiert werden.

Voice plus Data

Ein V+D-Baumalgorithmus funktioniert folgendermaßen: Wenn ein Teilnehmer ein neues Paket zu übertragen wünscht, weist er der bevorstehenden Transaktion gleichverteilt eine Priorität $p \in [0; 7]$ zu.

Entsprechend Abb. 4.1 beginnt nach einer Kollision in einem normalen Zugriffsrahmen ($k = 1$) mit minimaler Priorität $p_{\min} = 0$, vgl. Tab. 2.7, S. 50, die Kollisionsauflösungsphase (*Collision Resolution Period*, CRP). Hierzu wird der Prioritätsbereich des bisherigen Zugriffsrahmens $k = 1$ auf zwei neue Zugriffsrahmen jeweils zur Hälfte aufgeteilt ($k = 2$ bzw. $k = 3$). Wenn in einem dieser beiden neuen Zugriffsrahmen wiederum MSen miteinander kollidieren, dann wird der jeweilige Zugriffsrahmen erneut in entsprechende Prioritätsbereiche aufgeteilt.

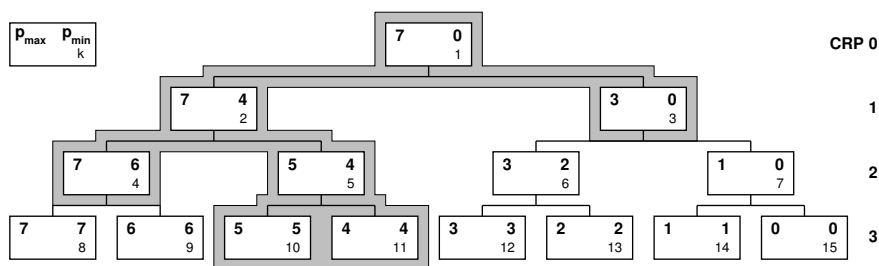


Abbildung 4.1: Splitting-Algorithmus angepasst an V+D

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Prioritäten kann eine CRP nur aus drei Ebenen bestehen, vgl. Abb. 4.1. Falls sich eine Kollision in einem ein Blatt des Kollisionsauflösungsbaumes darstellenden Zugriffsrahmen ereignet, z. B. in $k = 11$, dann muss dieser Zugriffsrahmen solange wiederholt werden, bis keine Kollision mehr auftritt.

Die in Abb. 4.1 schattierten Zugriffsrahmen symbolisieren einen möglichen dynamischen Pfad in einem CRP-Baum. Auf der dritten CRP-Ebene existieren in diesem Beispiel nur die Zugriffsrahmen $k = 10$ und $k = 11$.

Eine CRP endet, wenn in allen Zugriffsrahmen einer CRP-Ebene keine Kollision stattfindet. Es wird mit normalen Zugriffsrahmen der Ebene 0 fortgefahren.

Das Hauptproblem dieses Splitting-Algorithmus besteht in der Behandlung neuer Pakete, die während einer CRP eintreffen. Den gegebenen Parametersatz der Access-Define-PDU, vgl. Tab. 2.7, S. 50, vorausgesetzt könnte ein Paket mit einer Priorität $p \geq 4$ sofort übertragen werden, wenn es während des Zugriffsrahmens $k = 3$ generiert wurde, aber ein während des Zugriffsrahmens $k = 2$ generiertes Paket mit einer Priorität $p \leq 3$ könnte erst im darauffolgenden Zugriffsrahmen $k = 3$ übertragen werden.

Damit höhere Prioritäten innerhalb einer CRP-Ebene nicht bevorzugt behandelt werden, ist in der Access-Define-PDU ein neuer Parameter $p_{\max}$ für die maximal in einem Zugriffsrahmen erlaubte Priorität einzuführen. Eine MS muss solange mit dem Zugriff warten, bis $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$ gilt. Als generelles Manko bleibt weiterhin das Problem bestehen, dass u. U. bis zum Ende einer CRP gewartet werden muss, bevor erstmalig zugegriffen werden darf.

Packet Data Optimised

Bei PDO funktioniert der Splitting-Algorithmus, vgl. Abb. 4.2, S. 104, folgendermaßen: Einer bevorstehenden Transaktion wird gleichverteilt eine Priorität $p \in [0; 15]$ zugewiesen. Ein normales Zugriffsfenster ($k = 1$) ist in zwei Prioritätsbereiche aufgeteilt. Hierbei wird zufällig im ersten Bereich zugegriffen, falls $p \geq \text{Prio1} \stackrel{!}{=} 8$, ansonsten im zweiten Bereich, d. h. $p \geq \text{Prio2} \stackrel{!}{=} 0$.

Im Falle einer Kollision beginnt die Kollisionsauflösungsphase und der betroffene Prioritätsbereich wird in zwei Hälften aufgeteilt, wobei der erste (zweite) Prioritätsbereich des neuen Zugriffsfensters (*hier*: $k = 2$ bzw. $k = 3$) mit der linken (rechten) Hälfte des alten Prioritätsbereichs korrespondiert. Wenn in einem der neuen Prioritätsbereiche wiederum MSen miteinander kollidieren, dann wird der jeweilige Prioritätsbereich erneut aufgeteilt.

Analog zu V+D existieren bei PDO ebenfalls nur drei CRP-Ebenen aufgrund der begrenzten Anzahl an Prioritäten. Kollisionen in Blättern des CRP-Baumes werden auch hier aufgelöst, indem das jeweilige Zugriffsfenster solange wiederholt wird, bis keine Kollision mehr auftritt.

Damit kollidierte Pakete nicht in Zugriffsfenstern derselben CRP-Ebene erneut versendet werden, wird der Parameter RD jedes Zugriffsfensters, vgl. Tab. 2.14, S. 75, auf diejenige Anzahl von abzuwartenden Zugriffsfenstern gesetzt, die auf derselben CRP-Ebene nach dem aktuellen Fenster stattfinden werden. Zum Beispiel ist für das Zugriffsfenster $k = 2$ der Parameter $RD = 1$, weil es ein Zugriffsfenster $k = 3$ derselben CRP-Ebene gibt, das dem Fenster $k = 2$ folgt. Falls sich eine Kollision nur im ersten Prioritätsbereich des Zugriffsfensters $k = 1$ ereignete, würde Fenster $k = 3$ nicht existieren und für das Fenster $k = 2$ wäre $RD = 0$ zu setzen. Die in Abb. 4.2 schattierten Zugriffsfenster symbolisieren einen solchen möglichen dynamischen Pfad in einem CRP-Baum.

Eine CRP endet auch hier, wenn in allen Zugriffsfenstern einer CRP-Ebene keine Kollision stattfindet. Es wird mit normalen Zugriffsfenstern der Ebene 0 fortgefahren.

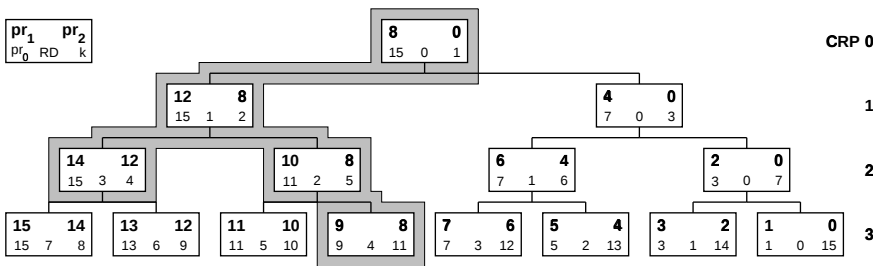


Abbildung 4.2: Splitting-Algorithmus angepasst an PDO

Auch bei PDO liegt das Hauptproblem dieses Algorithmus in der Behandlung neuer Pakete, die während einer CRP eintreffen. Den gegebenen Parametersatz der AA-PDU, vgl. Tab. 2.14, S. 75, vorausgesetzt könnte ein Paket mit einer Priorität $p \geq 8$ sofort übertragen werden, wenn es während des Zugriffsfensters $k = 3$ generiert wurde, aber ein während des Zugriffsfensters $k = 2$ generiertes Paket mit einer Priorität $p \leq 7$ könnte erst im darauffolgenden Zugriffsfenster $k = 3$ übertragen werden.

Damit höhere Prioritäten innerhalb einer CRP-Ebene nicht bevorzugt behandelt werden, ist in der AA-PDU ein neuer Parameter $Prio0$ einzuführen. Ein Teilnehmer mit einer oberhalb von $Prio0$ eingestufteten Transaktion darf nicht im ersten Prioritätsbereich dieses Fensters zugreifen. Ferner sollte

$DP \stackrel{!}{=} Prio2$ gelten, damit jederzeit während eines offenen Fensters zugegriffen werden darf.

4.2 Übersicht über unterbrechende und nicht unterbrechende Abfertigungsstrategien

Abfertigungsstrategien dienen der Zuteilung von Betriebsmitteln an Aufträge, bei TETRA also der Zuteilung von Kanalkapazität an Reservierungswünsche. Die Abfertigungsstrategie legt dabei fest, in welcher Reihenfolge die wartenden Aufträge abgearbeitet werden und bestimmt, ob und wann die Bearbeitung unterbrochen werden darf (SCHMICKLER, 1991).

Man kann zwischen unterbrechenden (*preemptive*) und nicht unterbrechenden (*non-preemptive*) Strategien unterscheiden. Nicht unterbrechende Strategien treffen nur nach Beendigung eines Auftrags eine Entscheidung. Unterbrechende Strategien können während der Abarbeitung eines Auftrags eine neue Entscheidung treffen und den aktuellen Auftrag zugunsten eines anderen verdrängen. Die unterbrechenden Strategien können weiter eingeteilt werden in ankunftsabhängig und ankunftsunabhängig unterbrechende Strategien, d. h. es kann beispielsweise bei jeder Ankunft oder in festen Zeitabständen ein Auftrag aus dem System verdrängt werden (SILBERSCHATZ et al., 1998; TANENBAUM, 1994).

Zur Entscheidung über die Reihenfolge der zu bearbeiteten Aufträge werden häufig Prioritäten vergeben, um die unterschiedlichen Optimierungsziele zu erreichen, es gibt verschiedene Arten von Prioritäten:

- Externe Prioritäten
werden dem Auftrag (z. B. durch den Anwender) zugewiesen. Statische Prioritäten sind dabei unveränderlich, dynamische Prioritäten ändern sich nach bestimmten Regeln, i. a. abhängig von der Wartezeit.
- Interne Prioritäten
werden von der Abfertigungsstrategie ermittelt, um die Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen mit der gleichen externen Priorität festzulegen. Die internen Prioritäten berücksichtigen beispielsweise die Ankunftszeit, die Bedienzeit bzw. die Restbedienzeit, die schon erhaltene Bedienzeit oder die Systemlast.

Im Folgenden werden die wichtigsten Abfertigungsstrategien kurz erläutert (GÖRG, 1983).

First In First Out (FIFO): Die Aufträge werden entsprechend der Reihenfolge ihres Eintreffens (zeitgerecht) vollständig abgearbeitet. Diese Strategie ist auch unter dem Namen *First Come First Serve* (FCFS) bekannt.

Last In First Out (LIFO): Diese Warteprozedur arbeitet die Aufträge, die zuletzt eingetroffen sind (zeitungerecht), ohne Unterbrechung ab. Diese Strategie ist auch unter dem Namen *Last Come First Serve* (LCFS) bekannt.

Zufällige Bearbeitungsreihenfolge (RANDOM): Nach der Fertigstellung eines Auftrags wird bei dieser nicht unterbrechenden Strategie der nächste zufällig ausgewählt. Dies geschieht i. a. nach einer Gleichverteilung.

Head Of Line Priority (HOL): Dieses Verfahren setzt externe Prioritäten voraus. Nach Beendigung eines Auftrags wird der Auftrag mit der höchsten Priorität ausgewählt. Innerhalb einer Priorität wird zeitgerecht (FIFO) verfahren.

Shortest Processing Time (SPT): Diese Strategie setzt die Kenntnis der Bedienzeit voraus und ist auch unter dem Namen *Shortest Job First* (SJF) bekannt. Die einzelnen Aufträge werden ohne Unterbrechung abgearbeitet. Nach Beendigung wird der Auftrag mit der kürzesten Bediendauer abgefertigt. Unter allen nicht unterbrechenden Strategien ist dies die optimale Strategie bzgl. der mittleren Durchlaufzeit unter der Voraussetzung, dass keine Kenntnisse über zukünftige Ankunftszeiten und Bediendauern vorliegen.

Round Robin (RR): Ein Auftrag wird, falls er nicht vorher terminiert, jeweils nach einer festen Zeit, der sog. Zeitscheibe, unterbrochen. Alle wartenden Aufträge, sowohl unterbrochene, als auch neu hinzugekommene, werden nach dem FIFO-Prinzip zyklisch abgefertigt.

Preemptive Head Of Line Priority (PREHOL): Analog zum HOL-Verfahren wird auch hier anhand externer Prioritäten entschieden. Zusätzlich wird bei der Ankunft eines Auftrags mit hoher Priorität ein Auftrag mit niedriger Priorität unterbrochen. Innerhalb einer Prioritätsstufe entscheidet auch hier wieder das FIFO-Prinzip über die Bearbeitungsreihenfolge.

Shortest Remaining Processing Time (SRPT): Diese Strategie, die auch unter dem Namen *Shortest Remaining Service Time* (SRST) bekannt ist, fertigt ankunftsabhängig und unterbrechend jeweils den Auftrag mit der kürzesten Bedienzeit bzw. Restbedienzeit bevorzugt ab. Diese

Strategie ist unter allen denkbaren Abfertigungsstrategien bzgl. der mittleren Durchlaufzeit optimal.

4.3 Optimale Abfertigungsstrategie für TETRA-Systeme

Sowohl beim Protokollstapel V+D als auch bei PDO gilt grundsätzlich Folgendes: Es werden entweder keine oder externe Prioritäten verwendet. Einmal zugewiesene Übertragungskapazität kann von der BS nicht wieder eingezogen werden. Sprachverbindungen können jedoch von Seiten der SwMI ausgelöst werden. Unterbrechungen von Paketdatenübertragungen sind generell nicht möglich. Begrenzt durch Zeitgeber der MAC-Teilschichten der beiden Protokollstapel können jedoch zeitliche Verzögerungen der Paketdatenübertragung von der BS vorgenommen werden (PDO und BL bei V+D).

Die gesamte und auch die verbleibende Bedienzeit ist nicht bekannt, da entweder in der letzten übertragenen PDU weiterer Reservierungsbedarf angemeldet werden kann (PDO oder BL bei V+D) oder ein Übertragungskanal für eine Verbindung auf unbestimmte Zeit reserviert wurde (AL- oder kanalvermittelte Sprach- oder Datenverbindung bei V+D).

Für kanalvermittelte Sprachverbindungen gelten harte zeitliche Randbedingungen (< 300 ms) bzgl. des Gesprächsaufbaus, da PTT-Betrieb möglich sein soll, vgl. Tab. 2.1, S. 9. Ferner ist das typische Datenaufkommen in einem TETRA-Szenarium durch viele kurze Datenübertragungen gekennzeichnet, vgl. Tab. B.1, S. 237, so dass sich der Zufallszugriff und die Reservierungszuteilung sehr stark auf die gesamte Verweilzeit eines Auftrages im System bzw. auf den Gesprächsaufbau auswirken.

Die Abfertigungsstrategien RANDOM und SPT müssen mindestens einen Zugriffsrahmen (V+D) bzw. ein Zugriffsfenster (PDO) abwarten, damit aus genügend Reservierungswünschen ausgewählt werden kann. Dies wirkt sich jedoch zeitlich negativ auf die Dauer des Zufallszugriffs aus (SCHUMANN, 1998). Ferner kann bei SPT nur von einer teilweise bekannten Bedienzeit ausgegangen werden.

Da Unterbrechungen größtenteils nicht möglich sind, die Bedienzeit nicht bekannt ist und harte zeitliche Randbedingungen für den das Auftragsvolumen dominierenden Sprachdienst existieren, ergibt sich für TETRA ohne externe Prioritäten FIFO und mit externen Prioritäten HOL als die optimale Abfertigungsstrategie.

Analyse der Funkbetriebsmittel

Inhalt

5.1 S-ALOHA-Systeme mit endlicher Teilnehmerzahl	109
5.2 Durchsatz, Auftragsüberhang und Paketverzögerung	113
5.3 Abschätzung der Wiederholrate	115
5.4 Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff	118
5.5 Wartewahrscheinlichkeit bei TETRA-Systemen	122
5.6 Abschätzung der Bediendauer	125
5.7 Maximale Teilnehmerzahl bei reservierter Übertragung	131
5.8 Zusammenfassung	135

Schlüsselwörter

Slotted-ALOHA, Durchsatz, Paketverzögerung, Auftragsüberhang, Markoff-Kette, Senderate, Wiederholrate, rollender und diskreter Rahmen, Zugriffsperiode, Zugriffsfenster, Bediendauer, Wartewahrscheinlichkeit

Ausgehend von einem Modell für die Ermittlung des mittleren Durchsatzes und der mittleren Paketverzögerung eines S-ALOHA-Systems bei endlicher Teilnehmerzahl und einem Modell für die Berechnung der Wartewahrscheinlichkeit in einem TETRA-System wird die mögliche bedienbare maximale Teilnehmerzahl bei TETRA-Systemen abgeschätzt.

5.1 Modell zur Ermittlung von Leistungskenngrößen eines S-ALOHA-Systems mit endlicher Teilnehmerzahl

In dem zur Ermittlung des mittleren Durchsatzes und der mittleren Paketverzögerung verwendeten Modell eines S-ALOHA-Systems mit endlicher Teilnehmerzahl erzeugen N identische MSen Pakete pro Zeitschlitz und MS gemäß einer Poisson-Verteilung mit einem auf einen Zeitschlitz normierten Mittelwert λ ($1/zs$). Die erzeugten Pakete werden unmittelbar übertragen (*Immediate First Transmission*, IFT). Erneute Sendeveruche sind in λ nicht enthalten. Somit stellt λ die Senderate dar, mit der eine MS pro Zeitschlitz ein Paket erzeugt, wenn sie das vorhergehende erfolgreich übertragen

hat. Das gesamte Quellverkehrsaufkommen an erzeugten Paketen $N\lambda$ aller MSen zusammen entspricht im stationären Gleichgewicht dem Durchsatz S (1/zs).

Es wird weiterhin angenommen, dass ein früher kollidiertes, in einer MS gepuffertes Paket mit der Rate μ in allen auf den ersten Übertragungsversuch folgenden Zeitschlitz bis zur erfolgreichen Übertragung wiederholt wird. Die Wartezeit τ_w ist somit geometrisch verteilt. Die Wahrscheinlichkeit, dass k Zeitschlitz gewartet wird, ist $\mu(1-\mu)^{k-1}$. Der Erwartungswert der Wartezeit ergibt sich somit zu:

$$E[\tau_w] = \bar{\tau}_w = \sum_{k=1}^{\infty} \mu k (1-\mu)^{k-1} = 1/\mu \text{ (1/zs)}. \quad (5.1)$$

Die Dauer für die Übertragung eines wiederholten Paketes (ein Zeitschlitz) ist in dieser Wartezeit mit eingeschlossen.

Der Zustand eines S-ALOHA-Systems kann vollständig durch die Anzahl der sich im Zustand „*kollidiert*“ befindenden MSen beschrieben werden.

Im Zustand i sind i früher kollidierte Pakete in i MSen gepuffert. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass diese i MSen blockiert sind und während dieser Zeit keine neuen Pakete generieren. Tatsächlich ist es jedoch bei V+D möglich, z. B. während einer AL-Übertragung ein Datenpaket zusätzlich über den BL zu versenden, vgl. Abs. 2.6.4.2.1, S. 54.

In Anh. B, S. 237, sind zehn verschiedene TETRA-Szenarien beschrieben, die als Grundlage für Abschätzungen typischen Verkehrsaufkommens von TETRA-Systemen in diesem Kapitel herangezogen werden.

Aufgrund der niedrigen Ankunftsrate pro MS in den einzelnen Szenarien ist ein weiterer Übertragungswunsch während einer bestehenden Verbindung jedoch relativ selten, so dass dieser Fall vernachlässigt werden kann.

Jede kollidierte MS entscheidet nach einer zufälligen Wartezeit selbst, wann sie das gepufferte Paket überträgt. Mit der Wahrscheinlichkeit μ wird dies im gegenwärtigen Zeitschlitz versucht, mit der Wahrscheinlichkeit $1-\mu$ wird der gegenwärtige Zeitschlitz ausgelassen. Neben dem aus wiederholten Paketen mit im Mittel $i\mu$ Paketen pro Zeitschlitz resultierendem Verkehr erzeugen die $N-i$ nicht blockierten MSen weiterhin Pakete mit einer mittleren Senderate von $(N-i)\lambda$ Paketen pro Zeitschlitz.

Die Zufallsvariable „*Zahl der gepufferten Pakete im System*“ ist diskret und ändert sich in jedem Zeitschlitz, da neue Pakete kollidieren und kollidierte erfolgreich übertragen werden können. Die Zufallsvariable kann in

jedem Zustand i zwischen 1 und $N - i$ zunehmen, da in jedem Zeitschlitz mehrere Pakete gleichzeitig kollidieren und damit mehrere MSen gleichzeitig blockiert werden können, vgl. Abb. 5.1.

Da pro Zeitschlitz immer nur ein früher kollidiertes Paket erfolgreich übertragen werden kann, erfolgt in der in Abb. 5.1 dargestellten Markoff-Kette (FAHRMEIER et al., 1981; PAPOULIS, 1991) in diesem Fall jeweils nur ein Übergang in den vorhergehenden Zustand. Ein Übergang von Zustand 0 nach Zustand 1 ist nicht möglich, da ein neu erzeugtes Paket mit mindestens einem weiteren Paket kollidieren muss und so direkt der Zustand 2 erreicht wird.

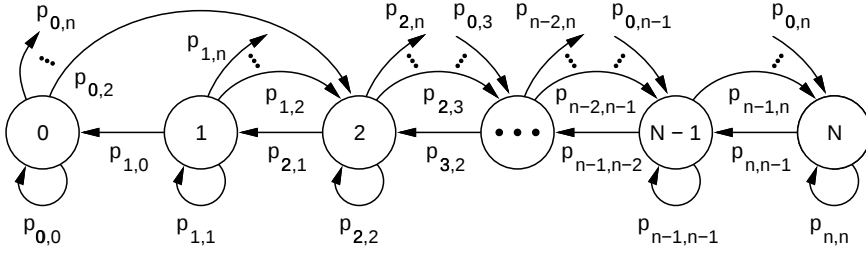


Abbildung 5.1: Zustandsdiagramm eines S-ALOHA-Systems mit endlicher Teilnehmerzahl

Zur Analyse dieser Markoff-Kette werden die Übergangswahrscheinlichkeiten

$$p_{i,j} = P\{n(t+1) = j \mid n(t) = i\}$$

benötigt. Bezeichnet man mit s die Zahl neu erzeugter Pakete der $N-i$ nicht blockierten MSen und mit g die Zahl wiederholter Übertragungen blockierter Stationen, dann ergeben sich folgende Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$p_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{für } j \leq i-2, \\ P\{s=0\} \cdot P\{g=1\} & \text{für } j = i-1, \\ 1 - \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n p_{i,k} & \text{für } j = i, \\ P\{s=1\} \cdot P\{g \geq 1\} & \text{für } j = i+1, \\ P\{s=j-i\} & \text{für } j \geq i+2 \end{cases} \quad (5.2)$$

mit $i, j \in \mathbb{N}_0 \wedge 0 \leq i, j \leq N$ und

$$\begin{aligned} P\{s = 0\} &= (1 - \lambda)^{N-i}, \\ P\{s = 1\} &= (N - i) \lambda (1 - \lambda)^{N-i-1}, \\ P\{s = j - i\} &= \binom{N-i}{j-i} \lambda^{j-i} (1 - \lambda)^{N-j}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} P\{g = 1\} &= i \mu (1 - \mu)^{i-1}, \\ P\{g = 0\} &= (1 - \mu)^i, \\ P\{g \geq 1\} &= 1 - (1 - \mu)^i. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Aus den Übergangswahrscheinlichkeiten ergeben sich die Zustandswahrscheinlichkeiten $p(i)$ der Markoff-Kette mit

$$p(i) \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^N p_{i,k} = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^N p(k) p_{k,i} \quad \text{und} \quad \sum_{i=0}^N p(i) = 1. \quad (5.5)$$

Hieraus lassen sich die Leistungskenngrößen Durchsatz und Paketverzögerung berechnen. Den mittleren Durchsatz $\bar{S}$ erhält man, indem man den Durchsatz $S(i)$ jedes Zustandes mit den Zustandswahrscheinlichkeiten $p(i)$ wichtet. In jedem Zustand gibt es jeweils zwei Ereignisse, die einen Beitrag zum Durchsatz liefern: Ein neu erzeugtes oder ein zurückgelegtes Paket ist erfolgreich, wenn in dem betrachteten Zeitschlitz nur jeweils genau ein Paket übertragen wird. Mit den Wahrscheinlichkeiten für die beiden Ereignisse erhält man den Durchsatz für den Zustand i :

$$S(i) = P\{s = 1\} \cdot P\{g = 0\} + P\{s = 0\} \cdot P\{g = 1\}. \quad (5.6)$$

Mit Gl. 5.3 und Gl. 5.4 ergibt sich hieraus

$$S(i) = (N - i) \lambda (1 - \lambda)^{N-i-1} (1 - \mu)^i + (1 - \lambda)^{N-i} i \mu (1 - \mu)^{i-1} \quad (5.7)$$

und damit für den mittleren Durchsatz $\bar{S}$

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^N S(i) p(i). \quad (5.8)$$

Die mittlere Anzahl der sich im Zustand „kollidiert“ befindenden MSen, der sog. Auftragsüberhang (*Backlog*) $\bar{B}$, ergibt sich zu:

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^N i p(i). \quad (5.9)$$

Über LITTLEs Lehrsatz (KLEINROCK, 1975) kann nun die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ ermittelt werden:

$$\bar{D} = \frac{\bar{B}}{\bar{S}}. \quad (5.10)$$

5.2 Durchsatz, Auftragsüberhang und Paketverzögerung in Abhängigkeit von Sende- und Wiederholrate

In Abb. 5.2, S. 114, ist der mittlere Durchsatz $\bar{S}$ in Abhängigkeit von der Senderate λ und der Wiederholrate μ entsprechend dem in Abs. 5.1, S. 109, vorgestellten Modell für $N = 10$ MSen dargestellt.

Im Vergleich zu Abb. 5.2, S. 114, zeigt sich für $N = 100$ MSen in Abb. 5.3, S. 114, dass nur bei sehr niedrigen Wiederholraten $\mu < 0,1$ ein akzeptabler Durchsatz erzielbar ist. Dies bedeutet, dass mit steigendem N nur bei geringen Wiederholraten $\mu \rightarrow 0$ ein sinnvoller Betriebspunkt gefunden werden kann.

Der maximale Durchsatz von S-ALOHA-Systemen mit unendlicher Teilnehmerzahl liegt bei $1/e = 36,8\%$ (KLEINROCK, 1975). Größere Durchsätze sind bei endlicher Teilnehmerzahl durchaus möglich.

In Abb. 5.4, S. 116, ist der mittlere Durchsatz $\bar{S}$ bei $N = 10$ MSen und einer Wiederholrate $\mu = 0,25$ in Abhängigkeit von der Senderate λ dargestellt. Im stabilen Betrieb ist die Senderate λ zum Durchsatz $\bar{S}$ proportional.

Mit größeren Senderaten $\lambda \rightarrow 1$ konvergiert der Durchsatz $\bar{S}$ jedoch nicht gegen 0, was bei einer Zunahme an Kollisionen vielleicht zu erwarten wäre, da im Modell davon ausgegangen wurde, dass eine kollidierte MS keine neuen Pakete generiert.

Charakteristisch für den in Abb. 5.5, S. 116, dargestellten mittleren Auftragsüberhang $\bar{B}$ bei $N = 10$ MSen und einer Wiederholrate $\mu = 0,25$ in Abhängigkeit von der Senderate λ ist die Tatsache, dass $\bar{B}$ sprunghaft bei einem niedrigen Schwellenwert λ_0 in den gesättigten Bereich ($\bar{B} \lesssim N$) übergeht.

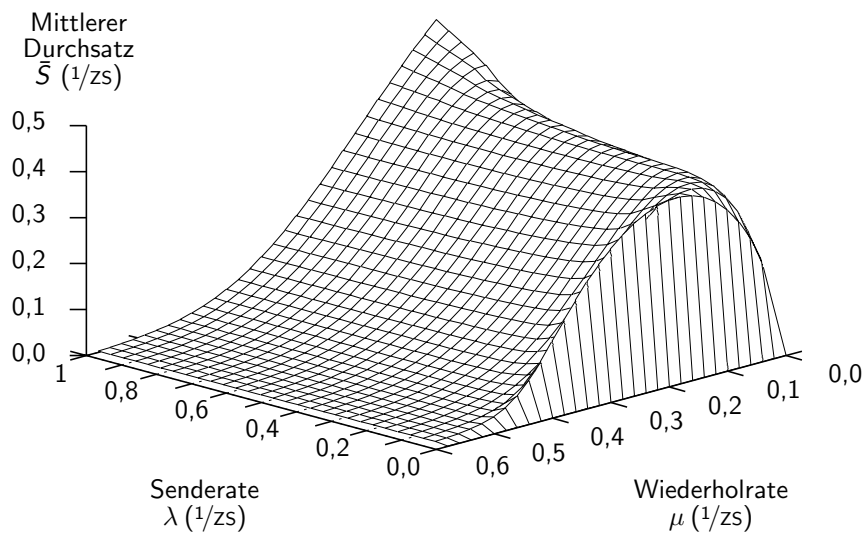


Abbildung 5.2: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}$ bei $N = 10$ Mobilstationen

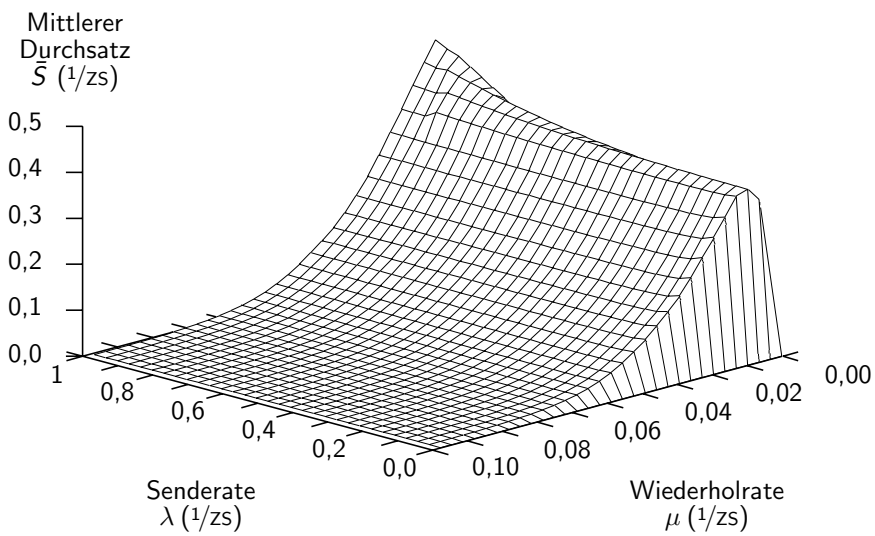


Abbildung 5.3: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}$ bei $N = 100$ Mobilstationen

Jenseits dieses Schwellenwertes λ_0 ist ein stabiler Betrieb in Bezug auf Durchsatz und Paketverzögerung, vgl. Abb. 5.6, S. 116, nicht mehr möglich.

5.3 Abschätzung der Wiederholrate

5.3.1 Abschätzung der Wiederholrate bei Voice plus Data

Der V+D-Zufallszugriffsparameter WT ist als die Anzahl der Antwortmöglichkeiten einer BS auf einen Zufallszugriff einer MS definiert, die die jeweilige MS abwarten muss, bevor sie ihren vorhergehenden Zufallszugriff als fehlgeschlagen bewerten und einen erneuten Versuch durchführen darf.

Hierzu wählt die MS gleichverteilt einen von K Zeitschlitzten des nächsten Zugriffsrahmens aus, vorausgesetzt die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ wird verwendet, vgl. Abb. 2.16, S. 53. Der Erwartungswert der Wartezeit $\tau_{w,rf}$ ergibt sich somit zu:

$$E[\tau_{w,rf}] = \bar{\tau}_{w,rf} = WT + K/2 \text{ (ZS)}. \quad (5.11)$$

Unter der begründeten Annahme (KLEINROCK und LAM, 1975; LAM, 1974), dass die Leistungskenngrößen Durchsatz $\bar{S}$ und Paketverzögerung $\bar{D}$ bei S-ALOHA-Systemen nur in Bezug auf den Mittelwert und nicht auf die gesamte Verteilungsfunktion der Wartezeit empfindlich sind, können Gl. 5.1, S. 110, und Gl. 5.11 gleichgesetzt werden:

$$1/\mu_{rf} = WT + K/2. \quad (5.12)$$

Unter Berücksichtigung der Wertebereiche $1 \text{ ZS} \leq WT \leq 15 \text{ ZS}$ und $1 \text{ ZS} \leq K \leq 128 \text{ ZS}$, vgl. Tab. 2.7, S. 50, u. Tab. 2.8, S. 51, ergibt sich mit Gl. 5.12 folgender Wertebereich für die Wiederholrate:

$$\begin{aligned} \mu_{rf,\min} &= \frac{2}{2WT_{\max} + K_{\max}} = 1/79 \text{ } 1/\text{ZS} \leq \mu_{rf} \leq \\ \mu_{rf,\max} &= \frac{2}{2WT_{\min} + K_{\min}} = 2/3 \text{ } 1/\text{ZS}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Benutzt die BS jedoch die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“, vgl. Abb. 2.17, S. 54, dann können nach Verstreichen von WT Antwortmöglichkeiten noch X Zeitschlitzte vor einem neuen Zugriffsrahmen folgen, so dass für den Erwartungswert der Wartezeit $\tau_{w,df}$ mit $X \in \mathbb{N}_0$ gilt:

$$E[\tau_{w,df}] = \bar{\tau}_{w,df} = WT + K + X \text{ (ZS)}. \quad (5.14)$$

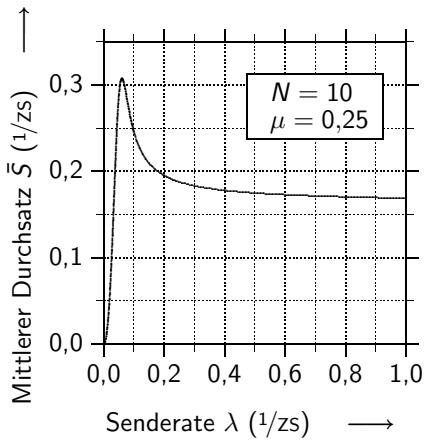


Abb. 5.4: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei $N = 10$ und $\mu = 0,25$

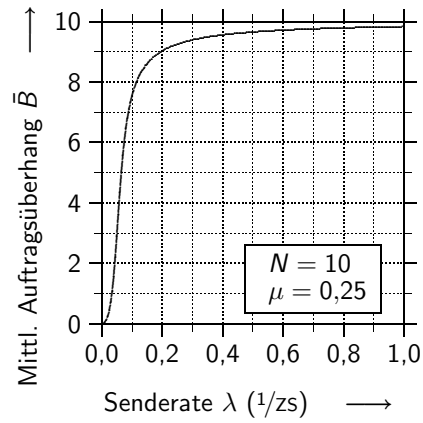


Abb. 5.5: Mittlerer Auftragsüberhang $\bar{B}(\lambda)$ bei $N = 10$ und $\mu = 0,25$

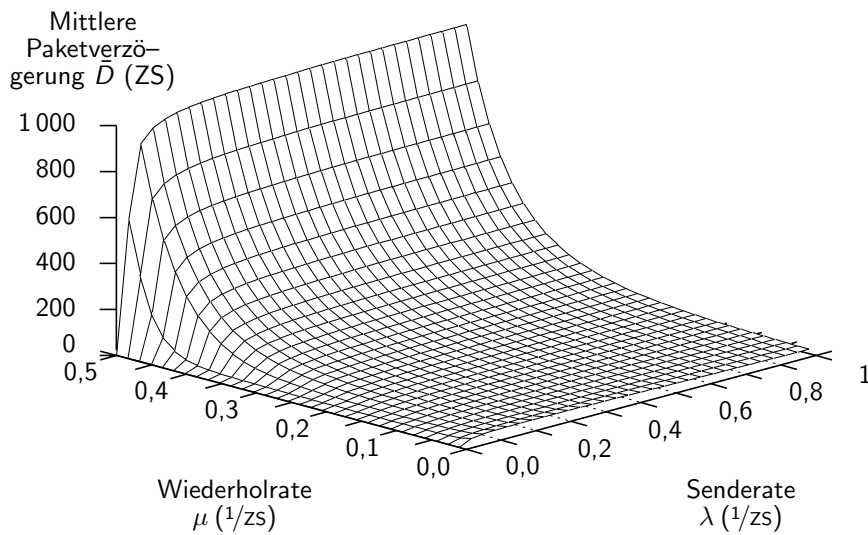


Abbildung 5.6: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ bei $N = 10$ Mobilstationen

Werden Gl. 5.1, S. 110, und Gl. 5.14, S. 115, gleichgesetzt, so ergibt sich für die Wiederholrate:

$$1/\mu_{df} = WT + K + X. \quad (5.15)$$

Für den Wertebereich der Wiederholrate erhält man analog zu Gl. 5.13, S. 115:

$$\begin{aligned} \mu_{df,\min} &= \frac{1}{WT_{\max} + K_{\max} + X_{\max}} = \\ &\lim_{X \rightarrow \infty} \frac{1}{143 + X} = 0^{1/zs} \leq \mu_{df} \leq \\ \mu_{df,\max} &= \frac{1}{WT_{\min} + K_{\min} + X_{\min}} = 1/2^{1/zs}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.3.2 Abschätzung der Wiederholrate bei Packet Data Optimised

Bei PDO existiert auf der Aufwärtsstrecke keine feste Zeitschlitzstruktur, vgl. Abb. 2.24, S. 73. Für den Zufallszugriff werden jedoch Zugriffsfenster mit NAP gleich großen Zugriffsperioden verwendet, vgl. Tab. 2.14, S. 75. Die zeitliche Länge τ_{ap} einer Zugriffsperiode ist zu

$$\tau_{ap} = 8 \cdot APL \cdot \tau_s \quad (5.17)$$

definiert, wobei der Parameter APL in der AP-PDU, vgl. Tab. 2.13, S. 74, von der BS gesetzt wird. Da sich ein Symbol aus zwei Modulationsbits zusammensetzt, entspricht die Symboldauer τ_s der doppelten Modulationsbitdauer τ_m , d. h. $\tau_s = 2\tau_m = 1/18$ ms, vgl. Abs. 2.7.2, S. 83.

Neben dem Zufallszugriff können abhängig von den Einstellungen der AP-PDU $MD - 1$ Folgeblöcke für die Nutzdatenübertragung verwendet werden, vgl. Tab. 2.13, S. 74. Mit Abs. 2.7.2.2, S. 83, und dem Parameter MD ergibt sich die maximale zeitliche Länge einer UD1-PDU, so dass sich unter Berücksichtigung der Wertebereiche nur die in Tab. 5.1, S. 118, aufgeführten Kombinationen der Parameter MD und APL für den Zufallszugriff eignen. Diese verhindern, dass UD1-PDUs in nachfolgende Zugriffsperioden oder nachfolgenden reservierten Verkehr hineinragen – dies wäre z. B. bei der Kombination $MD = 40$ und $APL = 16$ der Fall.

Nach Ablauf eines Zugriffsfensters mit NAP Zugriffsperioden schließt sich eine Phase für reservierte Übertragungen der Länge R ($1/zp$) mit $R \in$

$\mathbb{R}_0^+$ an. Somit gilt für den Erwartungswert der Wartezeit $\tau_{w,ap}$:

$$E[\tau_{w,ap}] = \bar{\tau}_{w,ap} = NAP + R \text{ (ZP)}. \quad (5.18)$$

Werden Gl. 5.1, S. 110, und Gl. 5.18 gleichgesetzt, so ergibt sich für die Wiederholrate:

$$1/\mu_{ap} = NAP + R. \quad (5.19)$$

Unter Berücksichtigung des Wertebereiches $1 \text{ ZP} \leq NAP \leq 255 \text{ ZP}$, vgl. Tab. 2.14, S. 75, ergibt sich mit Gl. 5.19 folgender Wertebereich für die Wiederholrate:

$$\begin{aligned} \mu_{ap,\min} &= \frac{1}{NAP_{\max} + R_{\max}} = \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{255 + R} &= 0^{1/\text{ZP}} \leq \mu_{ap} \leq \\ \mu_{ap,\max} &= \frac{1}{NAP_{\min} + R_{\min}} = 1^{1/\text{ZP}}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Tabelle 5.1: Sinnvolle Kombinationen der PDO-Zufallszugriffsparameter MD und APL

MD	1	2	3	4	5	6	7	8
APL	16	31	47	61	77	92	107	122
τ_{ap} (ms)	7,11	13,78	20,89	27,11	34,22	40,89	47,56	54,22
MD	9	10	11	12	13	14	15	16
APL	137	152	168	182	198	213	228	243
τ_{ap} (ms)	60,89	67,55	74,67	80,89	88,00	94,67	101,33	108,00

5.4 Maximale Anzahl von teilnehmenden Mobilstationen beim Zufallszugriff

Für das Szenarium 10 mit der größten angenommenen Verkehrslast, vgl. Anh. B, S. 237, sollen sowohl für die beiden V+D-Zugriffsmethoden „rollender“ und „diskreter Zugriffsrahmen“ als auch für die PDO-Zugriffsmethode die maximale Anzahl der beim Zufallszugriff teilnehmenden MSen ermittelt

werden. Die Gesamtankunftsrate $\lambda_t = 24,1 \text{ 1/h}$ des untersuchten Szenariums entspricht der Summe der Teilankunftsrate für Sprach- und Datenübertragungsaufträge:

$$\lambda_t = \lambda_s + \lambda_{sd} + \lambda_{md}. \quad (5.21)$$

Es sind drei Arten von Aufträgen zu bedienen: Sprachaufträge (Ankunftsrate λ_s , Bedienrate ε_s), Aufträge zur Übertragung von Daten kurzer Länge (100 byte, Ankunftsrate λ_{sd} , Bedienrate ε_{sd}) und mittlerer Länge (2 Kbyte, Ankunftsrate λ_{md} , Bedienrate ε_{md}).

5.4.1 Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff bei Voice plus Data

Entsprechend Abb. 2.15, S. 52, bestehen in jedem Zeitschlitz des MCCHs, d. h. im ersten Zeitschlitz eines Rahmens, zwei Zufallszugriffsmöglichkeiten. Wenn die BS nur einen Zugriffscode verwendet, dann stehen zwei Zufallszugriffsmöglichkeiten pro Rahmen zur Verfügung. Somit ergibt sich die auf einen Zeitschlitz normierte Senderate $\lambda = 2 \lambda_t$. Werden alle vier Zugriffs-codes verwendet, dann gibt es eine Zugriffsmöglichkeit alle zwei Rahmen. Somit gilt $\lambda = 8 \lambda_t$.

Der MCCH darf nur den ersten Zeitschlitz eines Rahmens belegen. Die Zufallszugriffsmöglichkeiten können jedoch um bis zu drei jeweils einen Zeitschlitz belegende SCCHs erweitert werden. Stehen alle Zeitschlitz eines Rahmens für den Zufallszugriff zur Verfügung, teilt sich die Gesamtankunftsrate auf die beiden Teilzeitschlitz eines Zeitschlitzes auf und es gilt $\lambda = \lambda_t/2$.

Aus Abb. 5.3, S. 114, Abb. 5.6, S. 116, und Gl. 5.12, S. 115, bzw. Gl. 5.15, S. 117, kann abgeleitet werden, dass bei minimaler Wiederholrate und gleichzeitig maximalem Zugriffsrahmen die maximale Anzahl von Benutzern getragen werden kann.

In Abb. 5.7, S. 120, ist die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ und in Abb. 5.8, S. 120, der mittlere Durchsatz $\bar{S}$ in Abhängigkeit von der Teilnehmeranzahl bei der Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ und einer minimalen Wiederholrate $\mu_{rf,\min} = 1/79 \text{ 1/ZS}$, vgl. Gl. 5.13, S. 115, dargestellt.

Laut Anh. B, S. 237, ist eine mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w = 4 \text{ s}$ im zehnten Szenarium für einen Gesprächsaufbau vorgesehen. Dies entspricht einer maximal erlaubten Paketverzögerung von $\bar{D}_{4\text{s}} = 282 \text{ ZS}$. Bei einer alternativen mittleren Wartezeit $\bar{\tau}_w = 10 \text{ s}$, wie sie in anderen Szenarien angegeben ist, ergibt sich $\bar{D}_{10\text{s}} = 705 \text{ ZS}$.

Analog zum Verhalten des Auftragsüberhangs in Abb. 5.5, S. 116, nimmt auch die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ in Abb. 5.7 bei rollendem Zugriffsrahmen infolge des starken Anstiegs des Auftragsüberhangs sprunghaft zu. Die eingezeichneten Schwellenwerte der Teilnehmerzahl stellen das Maximum an MSen dar, die gleichzeitig bei gegebener Ankunftsrate $\lambda_t = 24,1 \text{ 1/h}$ und maximaler Zugriffsrahmenlänge, d. h. minimaler Wiederholrate $\mu_{rf,\min}$, per Zufallszugriff miteinander konkurrieren können, ohne die zulässige Paketverzögerung $\bar{D}_{4s}$ bzw. $\bar{D}_{10s}$ zu überschreiten. In Abb. 5.8 ist ferner das Verhalten des mittleren Durchsatzes $\bar{S}$ bei rollendem Zugriffsrahmen dargestellt. Auch hier ist der Einbruch des Durchsatzes bei sprunghaftem Anstieg des Auftragsüberhangs charakteristisch.

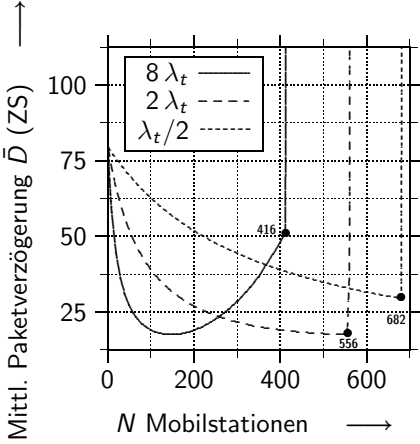


Abb. 5.7: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei rollendem Zugriffsrahmen

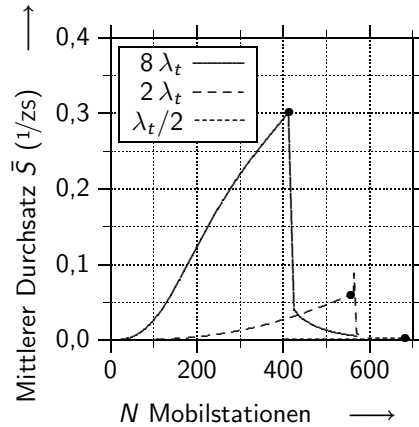


Abb. 5.8: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei rollendem Zugriffsrahmen

Bei einem diskreten Zugriffsrahmen kann nur jeweils zu Beginn desselben gleichverteilt eine Zugriffsmöglichkeit ausgewählt werden. Die in Bezug auf die verwendeten Zugriffscode gewichteten und auf einen Zeitschlitz normierten Ankunftsrate $8\lambda_t$, $2\lambda_t$ und $\lambda_t/2$ sind, da ein Zufallszugriff nur nach $WT + K$ Zeitschlitz erfolgen kann, vgl. Gl. 5.15, S. 117 – hier sei $X = 0$ angenommen –, mit dem der minimalen Wiederholrate $\mu_{df,\min} \stackrel{X=0}{=} 1/143 \text{ 1/zs}$ entsprechenden Wichtungsfaktor zu multiplizieren.

In Abb. 5.9 und Abb. 5.10 sind die den maximalen Paketverzögerungen $\bar{D}_{4s}$ bzw. $\bar{D}_{10s}$ entsprechenden Teilnehmerzahlen bei diskretem Zugriffsrahmen eingezeichnet.

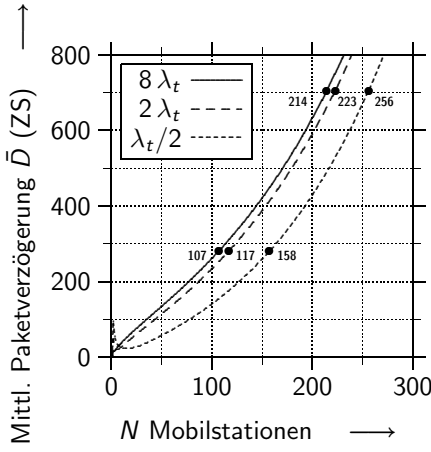


Abb. 5.9: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei diskretem Zugriffsrahmen

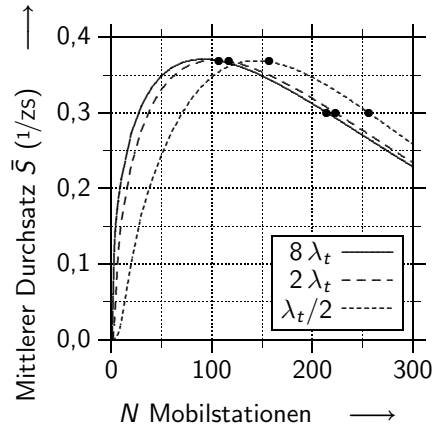


Abb. 5.10: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei diskretem Zugriffsrahmen

5.4.2 Maximale Teilnehmerzahl beim Zufallszugriff bei Packet Data Optimised

Bei PDO ist zwar keine feste Zeitschlitzstruktur für den UL definiert, aber der Zufallszugriff erfolgt in Zugriffsfenstern, die in Zugriffsperioden konstanter Länge eingeteilt sind.

Entsprechend Tab. 5.1, S. 118, seien hier ausschließlich für den Zufallszugriff zu verwendende Zugriffsperioden zu untersuchen, d. h. mit einer UD1-PDU werden nur der Reservierungswunsch und keine weiteren Daten übertragen und somit gilt $MD = 1$, $APL = 16$ und mit Gl. 5.17, S. 117, $\tau_{ap} = 7,11$ ms. Wenn ferner angenommen wird, dass die gesamte Trägerfrequenz für den Zufallszugriff verwendet wird, d. h. $R = 0$ in Gl. 5.19, S. 118, dann ergeben sich die maximal zulässigen, auf eine Zugriffsperiode normierten Paketverzögerungen zu $\bar{D}_{4s} = 563$ ZP und $\bar{D}_{10s} = 1407$ ZP.

Um die maximale Teilnehmerzahl zu ermitteln, wird bei minimaler Wiederholrate $\mu_{ap,min} \stackrel{R=0}{=} 1/255 \text{ 1/ZP}$ die Gesamtankunftsrate λ_t mit dem Faktor $NAP_{\max} = 255$ gewichtet, da hier eine MS analog zum diskreten Zugriffsrahmen bei V+D immer nur zu Beginn eines Zugriffsfensters gleichverteilt eine Zugriffsperiode auswählen kann. Ferner sei angenommen, dass eine MS nicht während eines offenen Zugriffsfensters zugreifen kann, d. h. der Parameter DP der AA-PDU, vgl. Tab. 2.14, S. 75, erlaubt keinen direkten Zugriff, es gelte $DP = 15$ und Prioritäten größer als 14 werden nicht vergeben.

In Abb. 5.11 und Abb. 5.12 sind die den maximalen Paketverzögerungen $\bar{D}_{4s}$ bzw. $\bar{D}_{10s}$ entsprechenden Teilnehmerzahlen beim PDO-Zufallszugriff eingezeichnet.

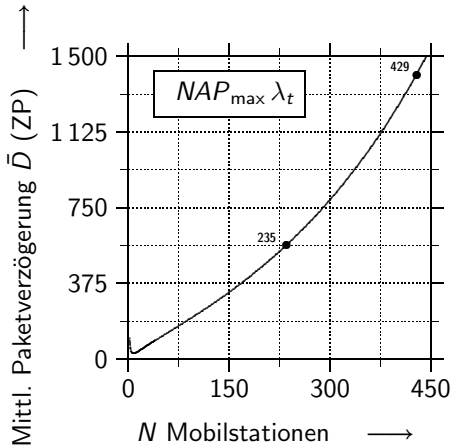


Abb. 5.11: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei maximalem Zugriffsfenster

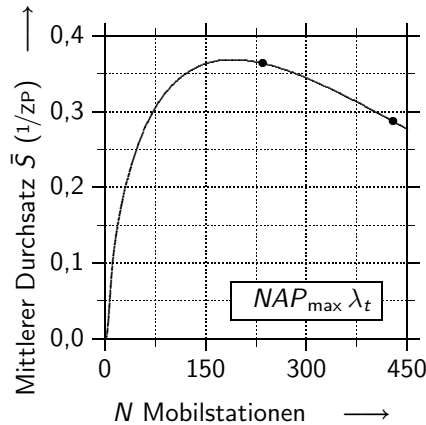


Abb. 5.12: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei maximalem Zugriffsfenster

5.5 Modell zur Ermittlung der Wartewahrscheinlichkeit bei TETRA-Systemen

TETRA-Systeme sind Wartesysteme. Wenn eine MS einen Übertragungswunsch per Zufallszugriff erfolgreich an die BS abgesetzt hat, dann reagiert

die BS hierauf auf zwei mögliche Arten:

1. Die SwMI kann die angeforderten Betriebsmittel sofort zur Verfügung stellen. Deswegen wird die MS hierüber von der BS sofort informiert.
2. Andernfalls teilt die BS der MS mit, dass der Zufallszugriff zwar erfolgreich verlaufen sei, sie aber warten müsse, bis ihr die angeforderten Betriebsmittel zugeteilt werden können. Bei V+D wird zu diesem Zweck die MAC-Resource-PDU, vgl. Abs. 2.6.4.1.4, S. 40, verwendet, mit der die BS die MS explizit auffordert, auf eine zukünftige Reservierungsmittelteilung zu warten. Bei PDO wird der MS mit Hilfe der DR1-PDU, vgl. Abs. 2.7.1.2.3, S. 71, mitgeteilt, dass keine Betriebsmittel zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund muss die MS einen erneuten Zufallszugriff durchführen.

Um die Wartewahrscheinlichkeit p_w für eine MS, d. h. die Wahrscheinlichkeit, alle Bediener belegt vorzufinden, und um die damit verbundene mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ pro MS zu ermitteln, wird eine Markoff-Kette verwendet. Diese modelliert ein Wartesystem mit M Bedienern und N Nutzern (MSen) (KLEINROCK, 1975). Unter Bedienern werden in diesem Zusammenhang Zeitschlitz (V+D) bzw. Blöcke (PDO) für die reservierte Übertragung verstanden. In Abb. 5.13 sind die möglichen Zustände und Zustandsübergänge dargestellt.

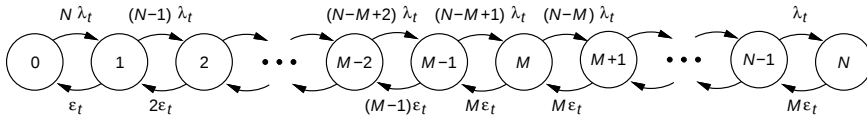


Abbildung 5.13: Zustandsübergänge der Nutzdatenübertragung

Nach Gl. 5.21, S. 119, ist λ_t die Gesamtankunftsrate aller Aufträge pro MS. Die mittlere Bedienrate ε_t pro Auftrag ergibt sich folgendermaßen:

$$\varepsilon_t = (\lambda_s \varepsilon_s + \lambda_{sd} \varepsilon_{sd} + \lambda_{md} \varepsilon_{md}) / \lambda_t. \quad (5.22)$$

Für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit p_k im Zustand k gilt mit $k \in \mathbb{N}_0 \wedge 0 \leq k \leq N$

$$p_k = \begin{cases} p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{(N-i) \lambda_t}{(i+1) \varepsilon_t} & \text{für } 0 \leq k \leq M-1, \\ p_0 \prod_{i=0}^{M-1} \frac{(N-i) \lambda_t}{(i+1) \varepsilon_t} \prod_{i=M}^{k-1} \frac{(N-i) \lambda_t}{M \varepsilon_t} & \text{für } M \leq k \leq N. \end{cases} \quad (5.23)$$

Dies lässt sich zusammenfassen zu

$$p_k = \begin{cases} p_0 \left(\frac{\lambda_t}{\varepsilon_t} \right)^k \binom{N}{k} & \text{für } 0 \leq k \leq M-1, \\ p_0 \left(\frac{\lambda_t}{\varepsilon_t} \right)^k \binom{N}{k} \frac{k!}{M!} M^{M-k} & \text{für } M \leq k \leq N. \end{cases} \quad (5.24)$$

Ferner gilt die Vollständigkeitsbedingung:

$$\sum_{k=0}^N p_k = 1. \quad (5.25)$$

Mit Gl. 5.24 und Gl. 5.25 kann nun die Aufenthaltswahrscheinlichkeit p_0 im Zustand 0 ermittelt werden:

$$p_0 = \left(1 + \sum_{k=1}^{M-1} \left(\frac{\lambda_t}{\varepsilon_t} \right)^k \binom{N}{k} + \sum_{k=M}^N \left(\frac{\lambda_t}{\varepsilon_t} \right)^k \binom{N}{k} \frac{k!}{M!} M^{M-k} \right)^{-1} \quad (5.26)$$

Die Wartewahrscheinlichkeit p_w für eine MS setzt sich aus den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten derjenigen Zustände zusammen, in denen neu eintreffende Aufträge alle Bediener belegt vorfinden:

$$p_w = \sum_{k=M}^N p_k. \quad (5.27)$$

Die aktuelle Anzahl an Aufträgen in der Warteschlange ergibt sich aus der Zustandsnummer abzüglich der Anzahl der Bediener. Die mittlere Warteschlangenlänge $\bar{N}_q$ entspricht der Summe der wartenden Aufträge gewichtet

mit den jeweiligen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten:

$$\bar{N}_q = \sum_{k=M+1}^N (k - M) p_k. \quad (5.28)$$

Nach LITTLE'S Lehrsatz (KLEINROCK, 1975) entspricht die mittlere Anzahl an Aufträgen in einem Wartesystem dem Produkt aus der mittleren Ankunftsrate von neuen Aufträgen mit der mittleren Verweilzeit im System. Angewendet auf die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ pro MS ergibt sich die Summe der Quotienten aus Warteschlangenlänge und Ankunftsrate:

$$\bar{\tau}_w = \sum_{k=M+1}^N \frac{(k - M) p_k}{(N - k + 1) \lambda_t}. \quad (5.29)$$

5.6 Abschätzung der Bediendauer

5.6.1 Abschätzung der Bediendauer bei Voice plus Data

Als Bediendauer wird die gesamte Dauer der Übertragung eines Auftrages definiert. Bei Sprachübertragungen wird eine kanalvermittelte Verbindung realisiert, d. h. es wird ein Zeitschlitz für die Dauer des Gesprächs exklusiv reserviert. Aus diesem Grund entspricht die mittlere Bediendauer β_s von Sprachaufträgen der mittleren Gesprächsdauer der in Anh. B, S. 237, aufgeführten Szenarien.

Über eine BL-Verbindung sollen maximal 133 byte = 1064 bit übertragen werden. Die mittlere Paketdatenlänge von Kurzdatennachrichten wird in allen zu untersuchenden Szenarien mit 100 byte = 800 bit angegeben.

Neben einer MAC-Access-PDU mit einem Nutzdatenanteil von 56 bit bei SSI-Adressierung, vgl. Abs. 2.6.4.1.4, S. 40, sind noch n_{sd} MAC-Frag-PDUs reserviert zu übertragen. Für ein 100 byte-Paket ergibt sich n_{sd} hiermit zu:

$$n_{sd} = \left\lceil \frac{800 \text{ bit} - 56 \text{ bit}}{264 \text{ bit}} \right\rceil = 3. \quad (5.30)$$

Wenn die Betriebsmittel für eine reservierte Übertragung zur Verfügung stehen, d. h. es können Zeitschlitze für die jeweilige MS mit Hilfe einer MAC-Resource-PDU reserviert werden, dann erfolgt die Übertragung innerhalb eines Multirahmens.

Die $n_{sd} = 3$ zu reservierenden Zeitschlitzze können gleichverteilt über einen Multirahmen belegt werden. Es wird immer ein Zeitschlitz pro Rahmen reserviert, so dass sich für die minimale Bediendauer

$$\beta_{sd,\min} = 2 \text{ Rahmen} + 1 \text{ ZS} = 9 \text{ ZS} = 127,5 \text{ ms} \quad (5.31)$$

ergibt und für die maximale Bediendauer:

$$\beta_{sd,\max} = 16 \text{ Rahmen} + 1 \text{ ZS} = 65 \text{ ZS} = 920,83 \text{ ms}. \quad (5.32)$$

Somit erhält man für die mittlere Bediendauer von 100 byte-Paketen:

$$\bar{\beta}_{sd} = \frac{\beta_{sd,\max} + \beta_{sd,\min}}{2} = 37 \text{ ZS} = 524,17 \text{ ms}. \quad (5.33)$$

Die mit Hilfe von AL-SETUP-PDUs beim Verbindungsaufbau verhandelten QoS-Parameter Durchsatz und maximale LLC-Segmentgröße beeinflussen unmittelbar die Bediendauer einer AL-Übertragung. Der Durchsatz kann zwischen der maximal verfügbaren Datenrate und $1/32$ -stel davon variiert werden. Die Segmentgröße l_{seg} liegt in dem Bereich $[32; 4096]$ byte.

Neben einer AL-Setup- und einer AL-Disc-PDU zur Einrichtung bzw. Auslösung einer AL-Verbindung werden für eine AL-Übertragung eines Datenpaketes mittlerer Länge $l_{md} = 2048 \text{ byte} = 16384 \text{ bit}$ insgesamt $n_{\text{AL-Data}}$ AL-Data-PDUs und eine AL-Final-PDU benötigt.

Die PCI eines AL-Data-Rahmens beträgt $l_{\text{AL-Data}} = 17 \text{ bit}$. Ferner wird angenommen, dass bei einem AL-Final-Rahmen zusätzlich 32 bit für eine FCS aufgewendet werden und somit $l_{\text{AL-Final}} = 49 \text{ bit}$ gilt. Ein AL-Data- oder AL-Final-Rahmen werden in der MAC-Teilschicht auf eine MAC-Data-PDU und mehrere MAC-Frag-PDUs abgebildet. Bei SSI-Adressierung können in einer MAC-Data-PDU $l_{\text{MAC-Data}} = 231 \text{ bit}$ Nutzdaten übertragen werden. Jeweils $l_{\text{MAC-Frag}} = 264 \text{ bit}$ können in den sich anschließenden MAC-Frag-PDUs versendet werden.

Bei maximaler Segmentgröße $l_{seg,\max} = 4096 \text{ byte}$ kann ein Datenpaket mittlerer Größe l_{md} vollständig in einem AL-Final-Rahmen übertragen werden, so dass $n_{\text{AL-Data}} = 0$ gilt. Hieraus ergibt sich die minimale benötigte Anzahl an Zeitschlitzzen $n_{md,\min}$ für die AL-Übertragung eines Datenpaketes der Länge l_{md} zu:

$$n_{md,\min} = 2 + \left\lceil \frac{l_{md} + l_{\text{AL-Final}} - l_{\text{MAC-Data}}}{l_{\text{MAC-Frag}}} \right\rceil = 64 \text{ ZS}. \quad (5.34)$$

Bei minimaler Segmentgröße $l_{seg,min} = 32$ byte wird ein Datenpaket mittlerer Größe l_{md} in $n_{AL-Data} + 1$ Segmente aufgeteilt, wobei

$$n_{AL-Data} = \left\lceil \frac{l_{md}}{l_{seg,min}} \right\rceil - 1 = 63 \text{ ZS} \quad (5.35)$$

gilt. Jedes Segment wird auf eine MAC-Data-PDU und eine MAC-Frag-PDU abgebildet. Somit ergibt sich die maximale benötigte Anzahl an Zeitschlitzzen $n_{md,max}$ für die AL-Übertragung eines Datenpaketes der Länge l_{md} zu:

$$n_{md,max} = 2 + 2(n_{AL-Data} + 1) = 130 \text{ ZS}. \quad (5.36)$$

Bei maximalem Durchsatz wird pro Multirahmen jeweils ein Zeitschlitz in den ersten 17 der 18 Rahmen für eine AL-Übertragung reserviert. Für $n_{md,min}$ benötigte Zeitschlitzze beträgt die Bediendauer $\beta_{md,min}$:

$$\beta_{md,min} = 3 \text{ Multirahmen} + 12 \text{ Rahmen} + 1 \text{ ZS} = 265 \text{ ZS} = 3,754 \text{ s}. \quad (5.37)$$

Die maximale und die mittlere Bediendauer $\beta_{md,max}$ und $\bar{\beta}_{md}$ ergeben sich analog. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von den möglichen Durchsätzen in Tab. 5.2, S. 128, dargestellt. Ebenfalls ist in dieser Tabelle die mittlere Nettodatenrate $\bar{v}_{md} = l_{md}/\bar{\beta}_{md}$ für die Übertragung eines Datenpaketes mittlerer Länge über eine AL-Verbindung aufgeführt.

Der einzige Grund, nicht ständig die maximale Segmentlänge zu benutzen, liegt darin, dass bei fehlerhafter Übertragung das gesamte Segment erneut übertragen werden muss und u. U. die Bediendauer dynamisch größer als bei kleineren Segmentlängen wird. Eine erneute Übertragung von einzelnen, fehlerhaft übertragenen MAC-PDUs, auf die der jeweilige LLC-Rahmen abgebildet wurde, ist bei V+D nicht vorgesehen.

5.6.2 Abschätzung der Bediendauer bei Packet Data Optimised

Es soll an dieser Stelle auch die Möglichkeit erörtert werden, einen paketierten Sprachdienst in PDO zu implementieren. Da bei PDO auf der UL keine feste Zeitschlitzstruktur vorgesehen ist, aber bei Sprachübertragung in konstanten Zeitabständen Übertragungskapazität zur Verfügung stehen muss, kann durch eine virtuelle Zeitschlitzstruktur paketierte Sprachübertragung ermöglicht werden. Dies bedeutet, die BS muss den Parameter Reservierte Blöcke (RB) der DR1-, DR2- oder DR3-PDUs für die reservierte

Übertragung mit UD2-PDUs so dimensionieren, dass bei einer wiederkehrenden Zeitschlitzstruktur die Ausgangsrate des TETRA-Sprachcodecs in Höhe von $4\,567 \text{ bit/s}$ bedient werden kann, vgl. Abs. 2.6.2.2.1, S. 25.

Tabelle 5.2: Bediendauern einer AL-Verbindung unter Variation der Dienstgüteparameter Durchsatz und Segmentgröße

Durchsatz	$\beta_{\text{md,min}}$		$\beta_{\text{md,max}}$		$\bar{\beta}_{\text{md}}$		$\bar{v}_{\text{md}}$
	(ZS)	(s)	(ZS)	(s)	(ZS)	(s)	(bit/s)
1	265	3,754	545	7,721	405	5,738	2 855,600
$1/2$	565	8,004	1 165	16,504	865	12,254	1 337,033
$1/4$	1 093	15,484	2 325	32,938	1 709	24,211	676,717
$1/8$	2 261	32,031	4 669	66,144	3 465	49,088	333,771
$1/16$	4 597	65,124	9 349	132,444	6 973	98,784	165,857
$1/32$	9 205	130,404	18 709	265,044	13 957	197,724	82,863

Eine UD2-PDU bestehend aus RB Blöcken dauert mit $RB \in \mathbb{N} \wedge 2 \leq RB \leq 41$, vgl. Abs. 2.7.2.2, S. 83:

$$\beta_{\text{UD2}} = \left(254 + 238 \lfloor RB/2 \rfloor + 216 \lfloor RB-1/2 \rfloor \right) / 36 \text{ ms.} \quad (5.38)$$

Aufgrund der festen Dauer eines DL-Büschels beträgt die Dauer einer DD2-PDU, vgl. Abs. 2.7.2.1, S. 83:

$$\beta_{\text{DD2}} = (240 RB) / 36 \text{ ms.} \quad (5.39)$$

Sowohl in einer UD2- als auch in einer DD2-PDU können

$$l_{\text{UD2/DD2}} = 120 (RB - 1) \text{ bit} \quad (5.40)$$

übertragen werden. In [DEMPSEY et al. \(1993\)](#); [ITU \(1996\)](#) sind Messungen mit dem Ergebnis durchgeführt worden, dass bei paketierter Sprachübertragung eine Ende-zu-Ende-Verzögerung zwischen zwei MSen für $\tau_{e \leftrightarrow e} \leq 250 \text{ ms}$ tolerierbar ist, ohne die Qualität der Sprachverbindung für die Benutzer spürbar zu beeinträchtigen. Nach [KOSTAS et al. \(1998\)](#) sind tolerierbare Ende-zu-Ende-Verzögerungen stark benutzer- und anwendungsspezifisch und können u. U. auch im Bereich 300 ms–800 ms akzeptiert werden.

Zum Vergleich sei angeführt, dass bei V+D laut ETR 395-1, vgl. [Anh. A, S. 219](#), die Ende-zu-Ende-Verzögerung $\tau_{e \leftrightarrow e} = 207,2 \text{ ms}$ beträgt. Nachdem $\tau_{sf} = 30 \text{ ms}$ Sprache abgetastet und pulscodemoduliert wurde, werden

weitere $\tau_{dsp} = 30$ ms für die Codierung der Sprachinformationen zu einem Sprachrahmen veranschlagt. Zu Synchronisationszwecken wird vor der eigentlichen Übertragung $\tau_{sync} = 5$ ms gewartet. Da im 18. Rahmen eines Multirahmens, dem Steuer- und Signalisierahmen, vgl. Abb. 2.7, S. 22, keine Sprachübertragung möglich ist und da die UL gegenüber der DL um zwei Zeitschlitzte verzögert ist, beträgt die Übertragungsdauer zwischen einem Sprachpaket des 17. Rahmens auf der UL und dem auf der DL weitergeleiteten Paket im 1. Rahmens des sich anschließenden Multirahmens $\tau_t = 7 \text{ ZS} = 99,17$ ms. Ansonsten beträgt $\tau_t = 3 \text{ ZS} = 42,5$ ms. Für die Demodulierung eines Bündels auf der Empfängerseite werden $\tau_{dem} = 10$ ms und für die Decodierung eines Sprachrahmens $\tau_{dec} = 3$ ms veranschlagt. In einem V+D-Bündel werden zwei Sprachrahmen übertragen. Somit ergibt sich die Ende-zu-Ende-Verzögerung zu:

$$\tau_{e \leftrightarrow e} = 2\tau_{sf} + \tau_{dsp} + \tau_{sync} + \tau_t + \tau_{dem} + \tau_{dec} = 207,2 \text{ ms.} \quad (5.41)$$

Um die Parameter eines PDO-Sprachdienstes zu dimensionieren, sind in Tab. 5.3, S. 130, in Abhängigkeit von der Anzahl der reservierten Blöcke RB pro PDU die Anzahl der sich in konstanten Zeitabständen τ_Δ wiederholenden virtuellen Zeitschlitzte, d. h. Bedienplätze, M pro Trägerfrequenz f_c , die Bediendauer $\beta_{UD2/DD2}$ der jeweiligen PDU und die Nettodatenrate v pro Bedienplatz sowohl für die Auf- als auch die Abwärtsstrecke dargestellt.

Um die Ende-zu-Ende-Verzögerung $\tau_{e \leftrightarrow e}$ analog zu Gl. 5.41 zu berechnen, wurde angenommen, dass zwischen der Übertragung der UD2-PDU und der die Sprachrahmen weiterleitenden DD2-PDU jeweils bis zum Ende des virtuellen UL-Rahmens gewartet wird. Somit ergibt sich:

$$\tau_t = \beta_{UD2} + \tau_\Delta + \beta_{DD2}. \quad (5.42)$$

Werden Sprachrahmen zuerst auf der DL übertragen und dann auf der UL weitergeleitet, ergibt sich bei geändertem τ_Δ die Ende-zu-Ende-Verzögerung $\tau_{e \leftrightarrow e}$ analog. Ein netzseitig initiiertes Direkturf (*Direct Mode*, DM), vgl. Abs. 2.4, S. 11, kann als Beispiel hierfür aufgeführt werden, bei welchem die weiterleitende MS als Vermittlungsstelle für ein andere MS dient, die sich außerhalb des Empfangsbereiches der BS befindet.

Der Tabelle kann entnommen werden, dass bei $RB = 5$ und $M = 3$ unter Berücksichtigung der Datenrate des TETRA-Sprachcodecs von $4\,567 \text{ bit/s}$ die verfügbare Bandbreite am Besten ausgenutzt und eine tolerierbare Ende-zu-Ende-Verzögerung erzielt werden kann.

Um die mittlere Zufallszugriffszeit zu minimieren und um eine maximale Anzahl von Benutzern in der Zufallszugriffsphase tragen zu können, sei im Folgenden entsprechend Tab. 5.1, S. 118, $MD = 1$ und $APL = 16$ angenommen, d. h. beim Zufallszugriff wird mit einer UD1-PDU nur der Reservierungswunsch aber keine Nutzdaten übertragen.

Tabelle 5.3: Mögliche Parameter eines PDO-Sprachdienstes

RB	M/f	$I_{UD2/DD2}$ (bit)	$\beta_{UD2/DD2}$ (ms)	τ_{Δ} (ms)	$\tau_{e \leftrightarrow e}$ (ms)	v/M (bit/s)
Aufwärtsstrecke						
3	2	240	19,67	19,67	167,34	6 101,70
4	2	360	26,28	26,28	184,45	6 849,89
5	2	480	32,28	32,28	205,89	7 435,46
5	3	480	32,28	64,56	238,17	4 956,97
6	2	600	38,89	38,89	225,78	7 714,29
6	3	600	38,89	77,78	264,67	5 142,86
7	2	720	44,89	44,89	244,45	8 019,80
7	3	720	44,89	89,78	289,34	5 346,53
8	2	840	51,50	51,50	264,33	8 155,34
Abwärtsstrecke						
3	2	240	20,00	20,00	167,67	6 000,00
4	2	360	23,89	23,89	182,06	7 534,88
5	2	480	33,33	33,33	206,94	7 200,00
5	3	480	33,33	66,67	240,27	4 800,00
6	2	600	40,00	40,00	226,89	7 500,00
6	3	600	40,00	80,00	266,89	5 000,00
7	2	720	46,67	46,67	246,23	7 714,29
7	3	720	46,67	93,33	292,90	5 142,86
8	2	840	53,33	53,33	266,16	7 875,00

Nach Gl. 5.38, S. 128, ergibt sich die Bediendauer einer 100 byte langen Kurzdatennachricht, die bei $RB = 5$ in $n_{sd} = \lceil 8 \cdot 100/480 \rceil = 2$ UD2-PDUs zu übertragen ist, zu:

$$\beta_{sd} = n_{sd} \beta_{UD2}(RB = 5) + (n_{sd} - 1) \tau_{\Delta}(RB = 5, M = 3) = 129,11 \text{ ms.} \quad (5.43)$$

Analog beträgt die Bediendauer einer 2 Kbyte langen Nachricht mittlerer

Länge, die in $n_{md} = \lceil 8 \cdot 2048 / 480 \rceil = 35$ UD2-PDUs aufgeteilt wird:

$$\beta_{md} = n_{md} \beta_{UD2}(RB = 5) + (n_{md} - 1) \tau_{\Delta}(RB = 5, M = 3) = 3,32 \text{ s.} \quad (5.44)$$

5.7 Maximale Anzahl teilnehmender Mobilstationen bei reservierter Übertragung

5.7.1 Sprach- und Datenübertragung bei Voice plus Data

Anhand der in Abs. 5.6.1, S. 125, abgeschätzten Bediendauern für typische Ankunftsdaten von Sprach- und Paketdaten anwendungen entsprechend dem zehnten Szenarium in Anh. B, S. 237, ist in Abb. 5.14 die Wartewahrscheinlichkeit p_w nach Gl. 5.27, S. 124, in Abhängigkeit von der Anzahl der teilnehmenden MSen dargestellt, wobei die Anzahl der Bediener M variiert wird.

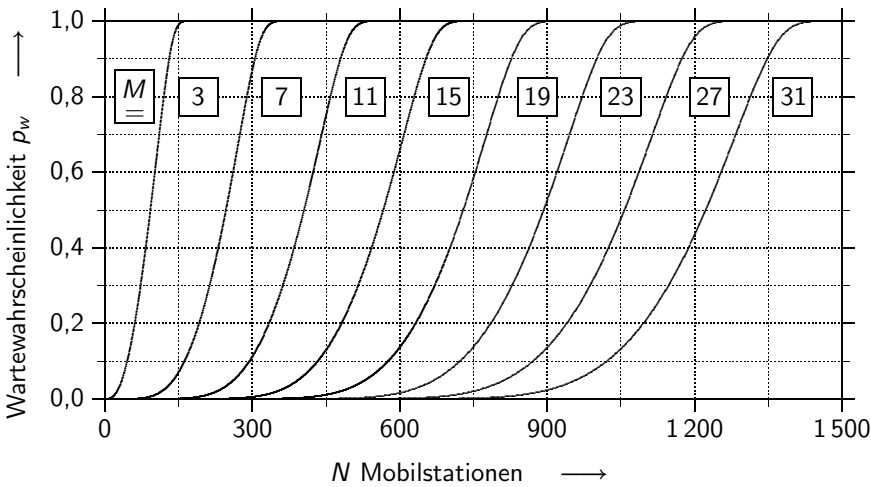


Abbildung 5.14: Wartewahrscheinlichkeit p_w bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern

Hierbei wurde angenommen, dass insgesamt ein MCCH und ein Zugriffscode verwendet werden. Auf der Trägerfrequenz mit dem MCCH stehen drei Bediener, d. h. drei Zeitschlitz, zur Verfügung. Mit jeder weiteren Frequenz

stehen vier weitere Bediener zur Verfügung, so dass sich der Frequenzbedarf

$$n_f = M+1/4 \quad (5.45)$$

ergibt. In die Verkehrsgüte (GoS) gehen gewichtet die Anzahl der nicht zustande gekommenen und der abgebrochenen Verbindungen mit ein, vgl. Gl. 2.24, S. 49. Im zehnten Szenarium ist eine Verkehrsgüte von 5 %, bei anderen Szenarien, die sich vor allem durch ein niedrigeres Verkehrsaufkommen auszeichnen, von 3 % vorgeschlagen. Die Anzahl von MSen, denen Kapazität zur reservierten Übertragung zugewiesen werden soll, stellt bei einer Wartewahrscheinlichkeit $p_w = 3\%$ bzw. 5 % somit die absolute Obergrenze teilnehmender MSen für eine Verkehrsgüte gleicher Größe dar. Diese Obergrenzen teilnehmender MSen sind bei GoS = 3 % bzw. 5 % in Abb. 5.15 eingezeichnet. Diese Abbildung stellt einen Ausschnitt des unteren Wertebereiches von p_w von Abb. 5.14, S. 131, dar.

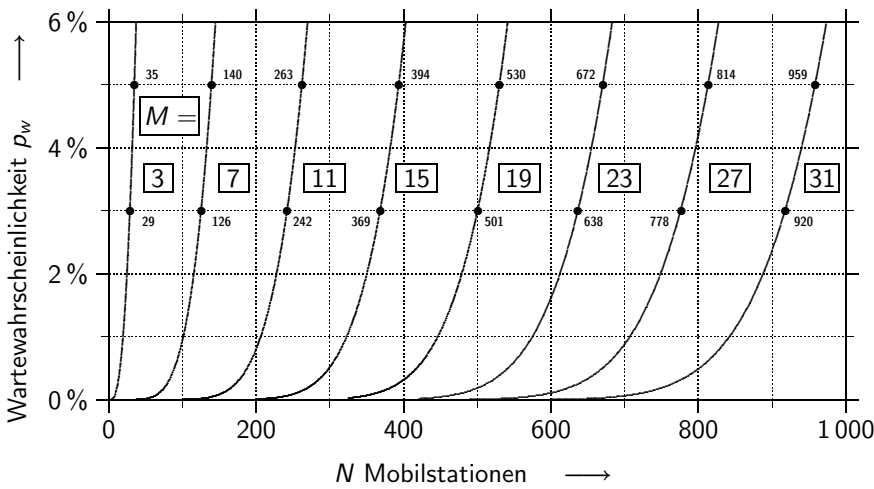


Abbildung 5.15: Wartewahrscheinlichkeit p_w bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern (Ausschnitt)

Entsprechend Gl. 5.29, S. 125, ist in Abb. 5.16, S. 133, die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ pro MS im Falle des zehnten Szenariums in Abhängigkeit von der Anzahl der teilnehmenden MSen dargestellt. Analog zu den durch dieses Szenarium bedingten zulässigen mittleren Paketverzögerungen $\bar{D}_{4s} = 282$ ZS

für $\bar{\tau}_w = 4\text{ s}$ und $\bar{D}_{10\text{ s}} = 705\text{ ZS}$ für $\bar{\tau}_w = 10\text{ s}$ in Abb. 5.7, S. 120, ist in Abb. 5.16 ebenfalls bei vorgegebener mittlerer Wartezeit $\bar{\tau}_w$ die jeweils zugeordnete Anzahl an teilnehmenden MSen eingezeichnet. Zusätzlich ist die Anzahl der MSen für die laut Tab. 2.1, S. 9, geforderte Verbindungsaufbauzeit für kanalvermittelte Übertragungen $\bar{\tau}_w = 300\text{ ms} \approx 21\text{ ZS}$ eingetragen.

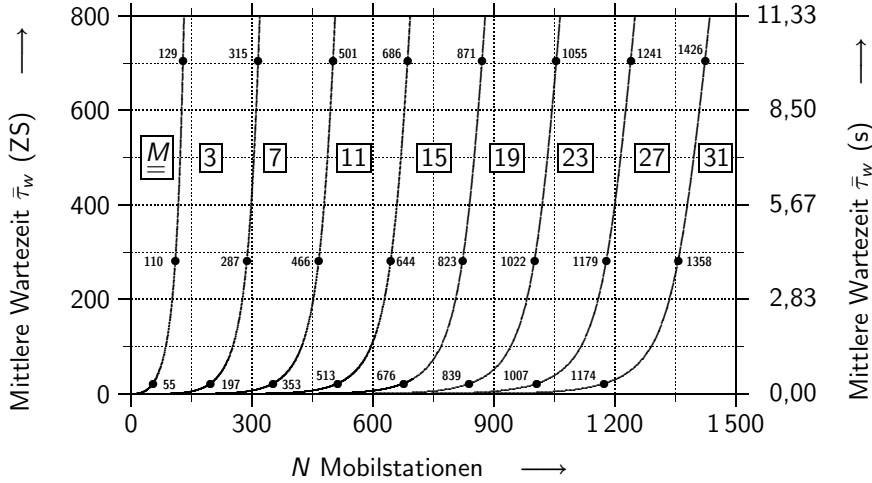


Abbildung 5.16: Mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern

5.7.2 Sprach- und Datenübertragung bei Packet Data Optimised

Basierend auf den in Abs. 5.6.2, S. 127, abgeschätzten Bediendauern für typische Ankunftsrate von Sprach- und Paketdaten anwendungen entsprechend dem zehnten Szenarium in Anh. B, S. 237, ist in Abb. 5.17, S. 134, die Wartewahrscheinlichkeit p_w nach Gl. 5.27, S. 124, in Abhängigkeit von der Anzahl der teilnehmenden MSen dargestellt, wobei die Anzahl der Bediener M , d. h. die Anzahl der Zeitschlitze einer virtuellen Rahmenstruktur, variiert wird.

Um einen paketierten Sprachdienst möglichst effizient in PDO implementieren zu können, wurde die Länge eines virtuellen Zeitschlitzes zu $RB = 5$ Blöcken festgesetzt mit drei wiederkehrenden Zeitschlitzen pro Frequenz.

Da angenommen wurde, dass eine Frequenz für den Zufallszugriff reserviert ist, vgl. Abs. 5.4.2, S. 121, berechnet sich der Frequenzbedarf zu:

$$n_f = M + 3/3. \quad (5.46)$$

Da wie in Abs. 5.7.1, S. 131, beschrieben die Wartewahrscheinlichkeit als Obergrenze für die Verkehrsgüte angesehen werden kann, ist für $\text{GoS} = 3\%$ und $\text{GoS} = 5\%$ jeweils die bedienbare Anzahl von MSen unter Variation der zur Verfügung stehenden Bediener M in Abb. 5.18, S. 135, eingezeichnet. Diese Abbildung stellt einen Ausschnitt des unteren Wertebereiches von p_w von Abb. 5.17 dar.

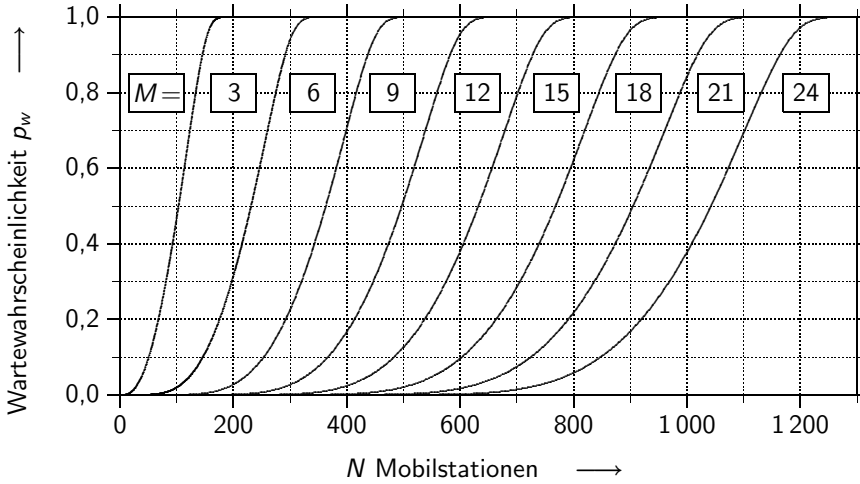


Abbildung 5.17: Wartewahrscheinlichkeit p_w bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern

Entsprechend Gl. 5.29, S. 125, ist in Abb. 5.19, S. 136, die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ pro MS im Falle des zehnten Szenariums, vgl. Anh. B, S. 237, in Abhängigkeit von der Anzahl der teilnehmenden MSen dargestellt. Nach Tab. 5.3, S. 130, beträgt für $RB = 5$ und $M = 3$ die Dauer eines virtuellen Zeitschlitzes auf der Abwärtsstrecke $\beta_{DD2} = 33,33$ ms. Somit ergibt sich die zulässige mittlere Wartezeit des zehnten Szenariums zu $\bar{\tau}_w = 4 \text{ s} = 120 \text{ ZS}$. Bei einer alternativen mittleren Wartezeit, wie sie in anderen Szenarien angegeben ist, ergibt sich $\bar{\tau}_w = 10 \text{ s} = 300 \text{ ZS}$. Für diese beiden mittleren

Wartezeiten ist in Abb. 5.19, S. 136, die jeweils zugeordnete Anzahl an teilnehmenden MSen eingezeichnet. Zusätzlich ist die Anzahl der MSen für die laut Tab. 2.1, S. 9, geforderte Verbindungsaufbauzeit für kanalvermittelte Übertragungen $\bar{\tau}_w = 300 \text{ ms} = 9 \text{ ZS}$ eingetragen.

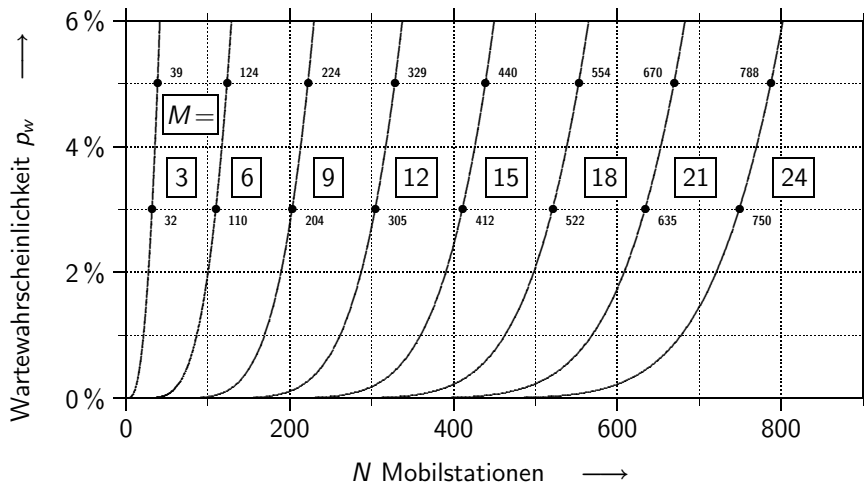


Abbildung 5.18: Wartewahrscheinlichkeit p_w bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern (Ausschnitt)

5.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zuerst ein Markoffmodell eines S-ALOHA-Systems bei endlicher Teilnehmerzahl entwickelt, um den mittleren Durchsatz und die mittlere Paketverzögerung in einer typischen Verkehrslastsituation zu ermitteln. Unter vorgegebenen Toleranzgrenzen für die Paketverzögerung wurde ferner die maximale Anzahl der Teilnehmer beim Zufallszugriff bestimmt. Bei V+D ist generell das Zugriffsverfahren „rollender Zugriffsrahmen“ dem Verfahren „diskreter Zugriffsrahmen“ vorzuziehen.

Ferner wurde ein Zustandsmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe die Wartewahrscheinlichkeit für neue Aufträge im System abgeschätzt und für vorgegebene Verkehrsgütern die maximale Anzahl bedienbarer Teilnehmer bei

reservierter Übertragung angegeben werden kann. Um V+D und PDO miteinander vergleichen zu können, wurde für PDO untersucht, inwiefern ein Echtzeit-Sprachdienst auf Paketdatenbasis implementiert werden kann. Da ein paketvermittelter Sprachdienst bei PDO grundsätzlich mehr Vermittlungsinformationen pro PDU im Vergleich zur kanalvermittelten Sprachübertragung bei V+D benötigt, ist der Frequenzbedarf n_f bei PDO, vgl. Gl. 5.46, S. 134, größer als bei V+D, vgl. Gl. 5.45, S. 132, und somit kann ein PDO-Sprachdienst nicht so effizient wie ein V+D-Sprachdienst implementiert werden. Dieses kann nur geändert werden, wenn ein neuer Sprachcodec entwickelt wird, dessen Sprachrahmen an die Bündelstruktur von PDO angepasst sind.

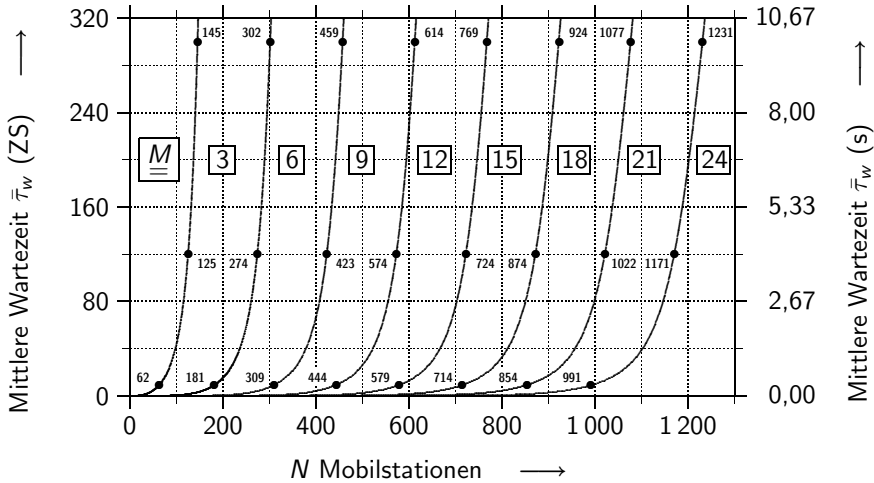


Abbildung 5.19: Mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern

Bei V+D können bei einem MCCH, einem Zugriffscode und typischer Verkehrslast 556 MSen, vgl. Abb. 5.7, S. 120, auf $n_f = 6$ Frequenzen mit $M = 23$ Bedienern, vgl. Abb. 5.14, S. 131, getragen werden. Bei PDO können vornehmlich begrenzt durch den Zufallszugriff bei typischer Sprach- und Paketdatenverkehrslast, vgl. Abb. 5.11, S. 122, 225 MSen auf $n_f = 4$ Frequenzen mit $M = 12$ Bedienern, vgl. Abb. 5.17, S. 134, bedient werden. Wenn keine Sprachdaten sondern nur Paketdaten entsprechend dem zehnten Szenarium, vgl. Anh. B, S. 237, versendet werden, dann wird bei $n_f = 2$ die maximale Anzahl teilnehmender MSen sowohl bei V+D als auch bei PDO ausschließlich durch den Zufallszugriff begrenzt.

Die Entwicklungsumgebung SPEET

Inhalt

6.1 Der zweifach rekursive Produktentwicklungszyklus	138
6.2 Die Werkzeugkomponenten von SPEET	141
6.3 Verkehrslastgeneratoren	143
6.4 Übertragungsmodelle	146
6.5 Hardwareemulation	147
6.6 Statistische Auswertung	149
6.7 Zusammenfassung	153

Schlüsselwörter

SDL, MSC mit zeitlichen Randbedingungen, WWW, FTP, SMTP, Telnet, MPEG, Sprache, Hata-Okumura, Walfisch-Ikegami, Intel 8051, Siemens SAB 80C166/67, Motorola 680x0, LRE, Batch-Means

Ziel der Entwicklungsumgebung *SDL Performance Evaluation Environment and Tools* (SPEET) ist der Entwurf und die Leistungsbewertung komplexer, formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme in einer frühen Phase ihrer Entwicklung mit Hilfe von Simulation und Emulation.

Ferner bietet SPEET die Möglichkeit, das Verhalten formal spezifizierter Systeme unter Echtzeit-Bedingungen in Bezug auf Leistung, verbrauchten Speicherplatz, etc. zu untersuchen. Hinreichende Informationen zur Dimensionierung des Zielprozessorsystems werden durch die statistische Auswertung zur Verfügung gestellt.

Ferner wird das Zielprozessorsystem entsprechend emuliert. Aus diesen Gründen stellt SPEET eine neue Lösung für Softwareentwickler dar, die die frühzeitige Abschätzung sowohl des realen Leistungsverhaltens von Kommunikationssystemen als auch der erforderlichen Betriebsmittel ermöglicht.

Bisher basierte der Entwurf von Systemsoft- und Hardware ausschließlich auf der Erfahrung der jeweiligen Entwickler. Mit Hilfe von SPEET können Kommunikationssysteme mit einem dedizierten Werkzeug entworfen werden, wobei die Möglichkeit besteht, die Implementierung des formal spezifizierten Systems auf einer virtuellen Hardware zu simulieren, das Verhalten unter verschiedenen Lastszenarien zu untersuchen und die Hardware-

anforderungen vorherzusagen.

In Abs. 6.1 wird von SPEET der zweifach rekursiver Produktentwicklungszyklus und seine Interaktion mit anderen *Computer Aided Software Engineering* (CASE)-Werkzeugen erläutert. Der anschließende Abs. 6.2, S. 141, beschreibt detailliert die einzelnen SPEET-Werkzeugkomponenten.

Die Implementierung einer SDL-Spezifikation kann mit Hilfe verschiedener Verkehrslastgeneratoren, d. h. Sprach- und Paketdatengeneratoren, mit Last beaufschlagt werden. Abs. 6.3, S. 143, veranschaulicht die charakteristischen Eigenschaften dieser Generatoren und zeigt, wie ein Lastmix auf einfache Weise spezifischen Implementierungen zugewiesen werden kann.

Das Ziel der SPEET-Umgebung ist, das Leistungsverhalten von Kommunikationssystemen zu bewerten. Daher muss eine realistische Lösung auch ein Modell der physikalischen Übertragung der Signale in Fest- und Mobilfunknetzen beinhalten. Diese Übertragungsmodelle werden in Abs. 6.4, S. 146, erläutert.

Um zu überprüfen, ob eine formale Spezifikation implementiert für eine bestimmte Zielhardware vom Benutzer definierte Echtzeit-Bedingungen einhält, stellt SPEET verschiedene Hardwareemulatoren zur Verfügung, die in Abs. 6.5, S. 147, vorgestellt werden.

Statistische Leistungsbewertung ist nur dann glaubwürdig, wenn den Methoden der Sammlung, Untersuchung und Bewertung statistischer Daten vertraut werden kann. In Abs. 6.6, S. 149, wird der von SPEET verwendete statistische Auswertungsalgorithmus beschrieben.

6.1 Der zweifach rekursive Produktentwicklungszyklus

SPEET erweitert die in Abb. 3.1, S. 89, dargestellte objektorientierte Softwareentwurfsmethodik um einen zweifach rekursiven Produktentwicklungszyklus, vgl. Abb. 6.1, S. 140.

Der erste rekursive Produktentwicklungszyklus besteht aus folgenden Schritten:

1. Ein formal in SDL spezifiziertes Kommunikationssystem der Objektentwurfsphase, vgl. Abs. 3.4, S. 92, wird zum Testen auf der Entwurfsebene implementiert, indem automatisch generierter C- oder C++-Quelltext unter demselben Betriebssystem kompiliert wird, auf dem SPEET läuft, d. h. UNIX oder Windows NT, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 1.

2. Vor der Codegenerierung und der Compilierung kann der Benutzer Messpunkte in die Spezifikation einfügen. Mit deren Hilfe können zusätzliche Informationen über das Objektentwurfsmodell durch einen stochastischen Simulationslauf der zuvor compilierten Implementierung erhalten werden, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 2.
3. Diese Kenntnisse werden aus den Ergebnissen der statistischen Auswertung gewonnen, indem die an den benutzerdefinierten Messpunkten während eines Simulationslaufs ermittelten Daten gesammelt und ausgewertet werden, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 3.
4. Der Benutzer verwendet dann diese Erkenntnisse zur Verbesserung der Spezifikation seines Systems, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 4.

Um das Leistungsverhalten einer Implementierung für ein Echtzeit-Prozessorsystem bewerten zu können, reicht es nicht aus, die Spezifikation auf Entwurfsebene zu verifizieren. Deswegen stellt SPEET einen zweiten rekursiven Produktentwicklungszyklus zur Verfügung:

5. Analog zu Schritt 1 wird automatisch generierter C- bzw. C++-Quelltext einer SDL-Spezifikation mit vor der Generierung eingefügten Messpunkten compiliert. Jedoch wird jetzt im Gegensatz zu Schritt 1 der Quelltext für ein Echtzeit-Prozessorsystem crosscompiliert, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 5.
6. Bevor dieses Zielprozessorsystem emuliert wird, kann es entsprechend den Wünschen des Benutzers konfiguriert werden, z. B. können Größe und Typ des wahlfreien Zugriffsspeichers (*Random Access Memory*, RAM) oder die Taktfrequenz eingestellt werden, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 6.
7. Wiederum erhält man Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit der Spezifikation anhand der an den Messpunkten ermittelten Daten, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 7. Auf diese Weise können die Hardwareanforderungen des Zielprozessorsystems verlässlich vorausgesagt werden, z. B. die erforderliche Taktfrequenz oder der erforderliche Speicher. Diese Erkenntnisse wirken sich nicht nur auf den Entwurf des Zielprozessorsystems, sondern auch auf die entsprechende Spezifikation, vgl. Abb. 6.1, S. 140, Pfeil 4, aus.

Messwerte durch stochastische Simulation schon vor einer konkreten Implementierung für ein Zielprozessorsystem zu erfassen, ist dann sinnvoll, wenn die logische Korrektheit von Algorithmen überprüft, Zeitspannen im

Simulationszeitmodell oder Zustände von Systemvariablen ermittelt werden sollen. Ein Beispiel hierfür ist der Zufallszugriff eines Mobilfunkprotokolls: durch Simulation kann untersucht werden, wie lange mehrere Benutzer in einer Wettbewerbsphase im Mittel um das Übertragungsmedium konkurrieren müssen, bis ein erfolgreicher Zufallszugriff gelingt. In einer sich anschließenden Hardwareemulation kann dann zusätzlich der additive Beitrag zur zeitlichen Verzögerung durch die Implementierung des Zufallszugriffsprotokolls auf einer konkreten Rechnerplattform ermittelt werden.

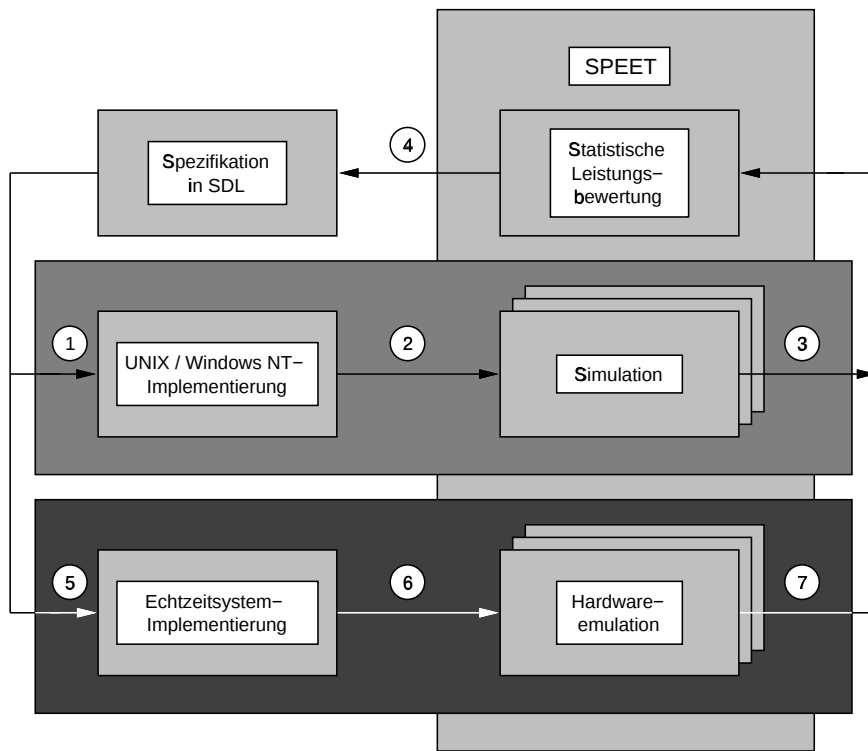


Abbildung 6.1: Der zweifach rekursive Produktentwicklungszyklus von SPEET

6.2 Die Werkzeugkomponenten von SPEET

Die modulare Struktur von SPEET ist in Abb. 6.2 dargestellt. Das Laufzeitsystem besteht aus einem UNIX- bzw. Windows NT-Prozess, der aus den Implementierungen eines oder mehrerer SDL-Systeme, den Verkehrslastgeneratoren, Übertragungsmodellen und Hardwareemulatoren besteht.

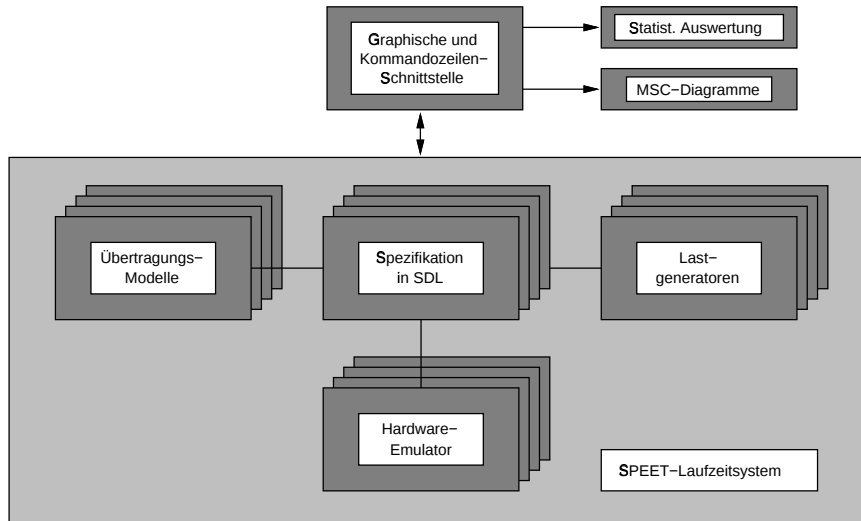


Abbildung 6.2: Die Werkzeugkomponenten von SPEET

Die SPEET-Simulation bzw. -Emulation kann über zwei Arten von Benutzerschnittstellen gesteuert werden: eine kommandozeilenorientierte und eine grafische. Letztere erlaubt die Ausgabe von Ergebnissen der statistischen Auswertung und von MSCs zu Testzwecken. Beide Schnittstellen können an das Laufzeitsystem während der Ausführung der Simulation bzw. Emulation angekoppelt bzw. abgekoppelt werden.

Auf diese Weise kann der Benutzer jedesmal dann eine Verbindung mit der laufenden Simulation über die Benutzerschnittstellen herstellen, wenn er den Zustand der Simulation abfragen oder die Ergebnisse der statistischen Auswertung visualisieren lassen will. Danach kann er die Benutzerschnittstelle wieder von der Simulation abkoppeln, damit die Simulation nicht aufgrund des ansonsten ständig notwendigen Informationsaustausches

zwischen *Graphical User Interface* (GUI) und Laufzeitsystem verlangsamt wird.

Abb. 6.3 zeigt ein typisches SPEET-Szenarium: ein Mobilfunksystem bestehend aus einer BS und mehreren MSen. Das System A entspricht der SDL-Spezifikation des Protokollstapels der MSen und das System B der Spezifikation der BS.

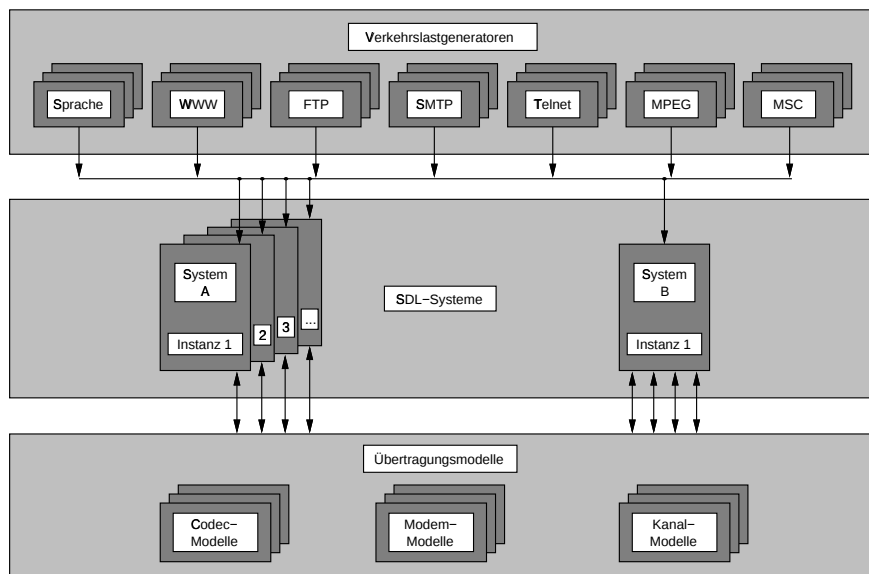


Abbildung 6.3: Ein typisches SPEET-Szenarium

Wenn ein SPEET-Szenarium konfiguriert wird, definiert der Benutzer zuerst die Anzahl verschiedener SDL-Systeme und danach die Anzahl der Instanzen pro SDL-System. Für jede Instanz oder Gruppe von Instanzen entscheidet er daraufhin, ob sie simuliert oder emuliert werden soll. Im letzteren Fall ist zusätzlich das Zielprozessorsystem zu konfigurieren. Auf diese Weise können mehrere Emulationen vollständig verschiedener und unabhängiger Prozessorsysteme und mehrere Simulationen parallel zur gleichen Zeit in einem UNIX- bzw. Windows NT-Prozess durchgeführt werden.

Ferner kann jeder Instanz eines SDL-Systems oder Gruppe von Instanzen ein Verkehrslastmix zugeordnet werden. Dieser Mix besteht aus einem

oder mehreren Verkehrslastgeneratoren für Sprach-, Paketdaten-, Audio- und Videoanwendungen. Die Benutzungsfälle der Systementwurfsphase, vgl. Abs. 3.3, S. 91, können in Form von MSCs mit zeitlichen Randbedingungen versehen ebenfalls als Lastgeneratoren eingesetzt werden.

Schließlich können Instanzen verschiedener SDL-Systeme, z. B. eine MS und eine BS, miteinander verbunden und die charakteristischen Eigenschaften des Übertragungsmediums konfiguriert werden. Das zu konfigurierende Übertragungsmodell passt mit Hilfe von Modellen für die *Modulation und Demodulation* (Modem) die zu übertragenden Signale an das Verhalten der physikalischen Kanäle an. Falls nicht bereits in den Protokollstapeln spezifiziert, kann mit den Modellen zur Kanalcodierung (*Coder und Decoder*, Codec) von Vorwärtsfehlerkorrektur (*Forward Error Correction*, FEC) und Fehlererkennung Gebrauch gemacht werden.

In Abb. 6.3, S. 142, sind beispielhaft alle MSen mit einer BS verbunden. Jede dieser Verbindungen kann separat konfiguriert werden.

6.3 Verkehrslastgeneratoren

Wie in Abb. 6.3, S. 142, dargestellt besteht ein Verkehrslastmix aus den Instanzen eines oder mehrerer der folgenden sieben Verkehrslastgeneratortypen, wobei die Lastmixe jeweils einer Instanz bzw. Gruppe von Instanzen von SDL-Systemen zugewiesen werden:

1. *World Wide Web* (WWW) (BERNERS-LEE et al., 1996),
2. *File Transfer Protocol* (FTP) (POSTEL und REYNOLDS, 1985),
3. *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) (POSTEL, 1982),
4. Telnet (POSTEL und REYNOLDS, 1983),
5. Konversationssprache (BRADY, 1969),
6. Video und Audio im *Moving Picture Experts Group* (MPEG) 1- und 2-Format (MITCHELL et al., 1997) und
7. Lastbeschreibungen im MSC-Format (ITU, 1993b) als Benutzungsfälle der Systementwurfsphase, vgl. Abs. 3.3, S. 91.

Diese Verkehrslastgeneratoren wurden entwickelt, damit neue Kommunikationsprotokolle mit ihrer Hilfe evaluiert und verifiziert werden können. Aus diesem Grund müssen die Modelle der Verkehrslastgeneratoren unabhängig von Protokollen unterliegender Schichten sein, d. h. ein Generator sollte sich oberhalb der Anwendungsschicht (Schicht 7, *Application Layer*)

des OSI-Referenzmodells befinden. Dieses Postulat wird nur von den letzten vier Generatoren (4.–7.) erfüllt. Bei den IP-Diensten (1.–3.) müssen die OSI-Schichten fünf bis sieben ebenfalls berücksichtigt werden.

Verkehrslast ist bei SPEET durch die Zwischenankunftszeit und die Größe der PDUs an der Dienstgrenze zwischen den OSI-Schichten vier und fünf definiert. Deswegen sind alle Verkehrslastgeneratoren unabhängig von den netzorientierten Schichten (OSI-Schichten 1.–4.) und einige sind vollständig unabhängig von allen OSI-Schichten (Generatoren 4.–7.). Der MSC-Verkehrslastgenerator ist nur dann von unterliegenden OSI-Schichten unabhängig, wenn in dem jeweiligen MSC kein Signalaustausch mit unterliegenden Schichten stattfindet, z. B. haben Signale an die OSI-Schicht 3 selbstverständlich auch eine Abhängigkeit von unteren Schichten zur Folge.

Die folgenden Parameter sind charakteristisch für eine Sitzung einer Anwendung: Sitzungsdauer, Gesamtmenge der übertragenen Daten, Verteilung und Dauer der Aktivitäts- und Inaktivitätsphasen, Anzahl der Verbindungen pro Sitzung, Anzahl der übertragenen Objekte pro Sitzung, Verteilung der Objektgrößen, Richtung der Übertragung (bidirektional oder unidirektional) und die Zieladressen der Verbindungen.

Die Größe und Zwischenankunftszeit einer PDU hängt von dem jeweiligen Typ der Anwendung ab. SPEET unterscheidet zwischen von unterliegenden OSI-Schichten abhängigen und unabhängigen Anwendungen. Die PDU-Größen von IP-Diensten wie WWW, FTP und SMTP können in einer großen Bandbreite von wenigen Bytes bis zu mehreren Megabytes variieren. PDUs letzterer Größe müssen segmentiert werden und sind deswegen von Flusssteuerungsmechanismen unterliegender OSI-Schichten abhängig.

Von unterliegenden OSI-Schichten unabhängige Anwendungen hängen andererseits entweder nur vom Benutzer ab, z. B. die Generatoren für Sprache und Telnet – die PDU-Größen solcher Anwendungen sind relativ klein und deswegen besteht keine Notwendigkeit, diese PDUs in unteren Schichten zu segmentieren –, oder sie sind Echtzeit-Anwendungen, z. B. der MPEG-Generator, die von den unterliegenden Schichten eine garantierte Bitrate erwarten und Flusssteuerungsmechanismen der unterliegenden Schichten ignorieren.

Der Sprachgenerator modelliert Gesprächssequenzen und Pausen eines Sprechers in einer Konversation nach [BRADY \(1969\)](#). Die Verkehrslastgeneratoren der IP-Dienste basieren auf Langzeitmessungen ([ARLITT und WILLIAMSON, 1997](#); [PAXSON, 1994](#)). Die statistischen Eigenschaften von MPEG-Video- und -Audio-Verkehr werden mit Hilfe von Markoff-Ketten

nachgebildet. Diese Markoff-Ketten werden parametrisiert, indem Fernsehsendungen und Kinofilme auf ihre für MPEG relevanten Eigenschaften hin analysiert werden (ROSE, 1995).

Schließlich können MSCs mit zeitlichen Randbedingungen (*Time Constraints*) verwendet werden, um formale Spezifikationen unter Last zu setzen und um sie auszutesten, vgl. Abb. 6.4.

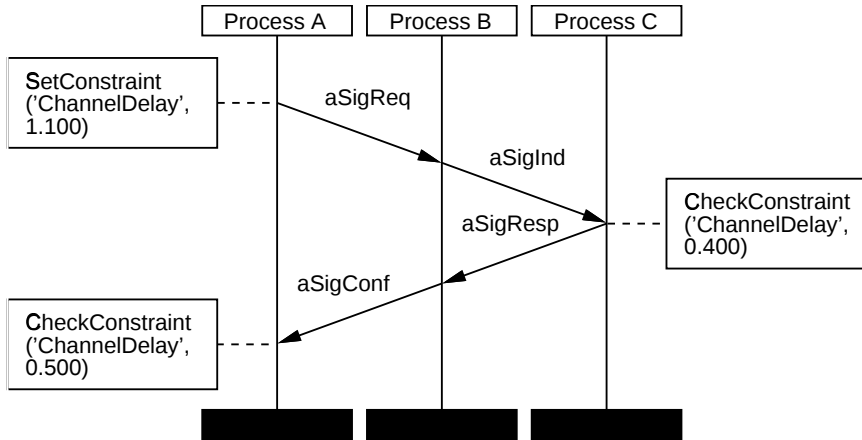


Abbildung 6.4: MSC mit zeitlichen Randbedingungen

Eine zeitliche Randbedingung wird in einem MSC folgendermaßen definiert und überprüft: Jedes Kommentarsymbol, das Text der Form „SetConstraint(CharString, Duration)“ beinhaltet und mit einem Eingabe- oder Ausgabesymbol verbunden ist, definiert eine zeitliche Randbedingung. Diese wird durch den CharString-Parameter identifiziert. Der optionale Duration-Parameter kann dazu verwendet werden, die Versendung eines Signales um eine feste Zeitspanne zu verzögern. Anschließend können Kommentarsymbole, die Text der Form „CheckConstraint(CharString, Duration)“ beinhalten, verwendet werden, um herauszufinden, ob die seit der Definition der Randbedingung – identifiziert durch den CharString-Parameter – vergangene Zeit den Wert des zweiten Parameters vom Typ Duration überschreitet oder nicht.

Eine zeitliche Randbedingung kann mehrmals und an verschiedenen Stellen innerhalb eines MSC-Diagramms nach ihrer Definition überprüft wer-

den. Abhängig von den Einstellungen des Benutzers wird dieser informiert, wenn eine zeitliche Randbedingung nicht erfüllt ist. MSCs ohne zeitliche Randbedingungen können selbstverständlich auch benutzt werden, um SDL-Systeme unter Last zu setzen. **SetConstraint** redefiniert stets eine vorhergehende zeitliche Randbedingung gleichen Namens.

6.4 Übertragungsmodelle

Die Verbindung von Kommunikationsobjekten ist durch Übertragungsmodelle charakterisiert. Die Übertragungsmodelle von SPEET setzen sich aus Modellen für die Kanalcodierung und Decodierung (Codec-Modelle), für die Modulation und Demodulation (Modem-Modelle) und für die physikalischen Kanäle zusammen, vgl. Abb. 6.5.

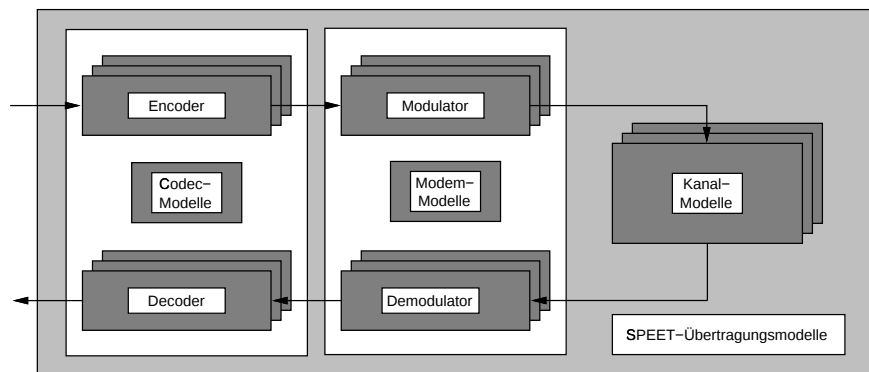


Abbildung 6.5: Die Übertragungsmodelle von SPEET

Falls nicht bereits in dem zu untersuchenden Kommunikationsprotokoll formal spezifiziert, werden zur Fehlerreduktion auf den Übertragungswegen FEC und Fehlererkennung in den Codec-Modellen zur Verfügung gestellt.

Bei Festnetzen gestaltet sich das Übertragungsmodell als sehr einfach, da das Kanalverhalten sich während der Datenübertragung nicht ändert und in den meisten Fällen keine Modulation der Trägerfrequenz notwendig ist.

Andererseits müssen bei Mobilfunkkanälen die übertragenen Signale an das Kanalverhalten mittels Modulation angepasst werden. Dies wird bei

SPEET mit Hilfe von *Modulator und Demodulator* (Modem)-Modellen erreicht. Diese bilden den Einfluss des Funkkanals auf das Modulationsverfahren nach und berücksichtigen hierbei Dämpfung, Zeitdispersion und den Dopplereffekt. Diese Effekte wirken sich auf das Bitfehlerverhältnis (*Bit Error Ratio*, BER) aus, die das Ergebnis dieses Modells darstellt und für die Leistungsbewertung des zu testenden Protokolls herangezogen wird. Die benötigten Informationen in Bezug auf das statistische Verhalten des Funkkanals liefern die die Funkkanalausbreitung beschreibenden Kanalmodelle.

Für eine realistische Simulation der BER ist es von hoher Bedeutung, die Funkkanalausbreitung nachzubilden. Es wurden für das SPEET-Werkzeug Methoden entwickelt, die die Eigenschaften eines Funkkanals unter Berücksichtigung der wichtigsten physikalischen Effekte nachbilden.

Die schnell veränderliche Amplitude des ausgesendeten Signales aufgrund von Mehrwegeausbreitung, auch als schneller Schwund bezeichnet, wird mit einer Rayleigh-Verteilung modelliert. Im Falle einer Sichtverbindung (*Line Of Sight*, LOS) zwischen Sender und Empfänger wird eine Rice-Verteilung verwendet. Die langsame Veränderung der Signalstärke in Folge von Abschattungen, auch als Langzeitschwund bezeichnet, kann mit einer Log-Normal-Verteilung beschrieben werden. Die Mittelwerte und Varianzen der Verteilungsfunktionen werden messtechnisch ermittelt und sind abhängig von der Morphologie und der Topographie des Ausbreitungsszenariums.

Die in SPEET verwendeten Werte für die mittlere Dämpfung basieren auf den Modellen von COST-231-WALFISH-IKEGAMI ([EUROPEAN COMMUNITIES, 1991](#)) und HATA-OKUMURA ([HATA, 1980](#)). Für sehr kurze Entfernungen und Sichtverbindungen zwischen Sender und Empfänger wird Freiraumausbreitung angesetzt. Abhängig von der Frequenz, der Pfadlänge und den Eigenschaften des Übertragungsmediums und des Antennenaufbaus wird das passende Modell ausgewählt. Folgende Parameter bestimmen hierbei das zeitvariante Verhalten der Dämpfung: Trägerfrequenz, Topographie, Morphologie, Antennenhöhe und Pfadlänge. Beim COST-231-WALFISH-IKEGAMI-Modell finden zusätzlich die Parameter Höhe der Dächer, Richtung und Breite der Straßen und der Abstand zwischen Gebäuden Verwendung. Ferner werden zusätzlich Beugungseffekte berücksichtigt.

6.5 Hardwareemulation

Zu den Hauptzielen von SPEET zählt die Leistungsbewertung von formal spezifizierten Systemen unter Echtzeit-Bedingungen.

Aus diesem Grund stellt SPEET verschiedene Emulatoren für Microcontroller-Systeme zur Verfügung, wie z. B. Intel 8051 (INTEL, 1994), Siemens SAB 80C166/67 (SIEMENS, 1990), Motorola MC680x0 (BREY, 1992), etc.

Nachdem der Benutzer eine Untermenge der zu emulierenden Instanzen von SDL-Systemen, wie in Abs. 6.2, S. 141, beschrieben, bestimmt hat, kann das Zielprozessorsystem konfiguriert werden. In Abb. 6.6 sind die Komponenten eines typischen Prozessorsystems beispielhaft aufgeführt.

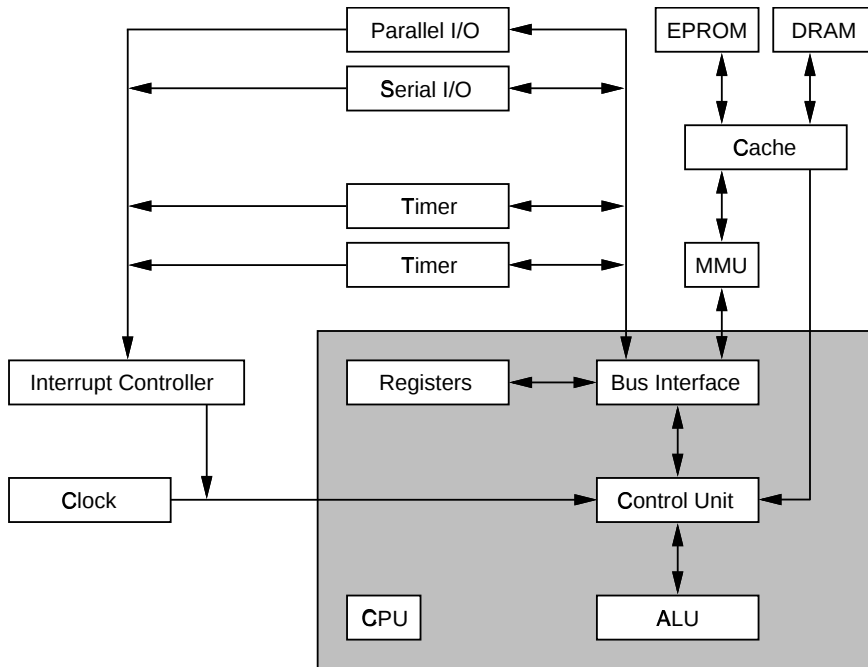


Abbildung 6.6: Komponenten eines Beispielsprozessorsystems

Nachdem eine zentrale Recheneinheit (*Central Processing Unit*, CPU) ausgewählt wurde, können weitere Komponenten hinzugefügt und parametrisiert werden, z. B. der Typ der RAM-Bausteine – dynamisch oder statisch – und deren Zugriffs- und Zykluszeit.

Da mehrere Emulationen parallel in einem Windows NT- oder UNIX-Prozess durchgeführt werden können, vgl. Abs. 6.2, S. 141, kann dieselbe

Hardwarekonfiguration für eine Serie von Leistungsbewertungen herangezogen werden, z.B. kann der Parameter „Taktfrequenz“ variiert werden. Andererseits können auch verschiedene Hardwarekonfigurationen verwendet werden, um die Leistungsfähigkeit der SDL-Spezifikation auf verschiedenen Prozessorsystemen zu vergleichen.

Im Gegensatz zu reinen Hardware-Lösungen können Emulationen mit unrealistischen Parametern durchgeführt werden, z.B. ein 8051-Microcontroller mit einer Taktfrequenz von 1 GHz. Ferner kann die Hardwarekonfiguration ohne Probleme verändert werden, z.B. kann die Größe des RAMs ohne Weiteres von 1 MB auf 100 MB erhöht werden. Diese Eigenschaften erlauben dem Benutzer, Flaschenhälse des Prozessorsystems leichter aufzudecken.

Der Ablauf der Hardwareemulation erfolgt ereignisorientiert. Die Anzahl der verbrauchten CPU-Zyklen wird für jeden einem Ereignis entsprechenden Maschinenbefehl berechnet. Ferner wird der Befehl ausgeführt, z.B. Speicherplätze werden ausgelesen, Register werden verändert, etc. Das nächste Ereignis, d. h. der nächste Befehl, findet statt, nachdem die erforderliche Anzahl von CPU-Zyklen abgelaufen ist. Jede Komponente des Prozessorsystems ist eine Ereignisbehandlungsroutine, z.B. die RAM-Bausteine, Multiplexer, Code- und Datencaches, etc. Eine zentrale Ereignissteuerung kontrolliert den Ablauf der Emulation und versendet Ereignisse an die adressierten Ereignisbehandlungsroutinen. Für jede Komponente des Prozessorsystems ist eine möglichst realitätsnahe Emulation beabsichtigt.

6.6 Statistische Auswertung

SCHREIBER und GÖRG haben einen neuen Algorithmus zur Analyse korrelierter Zufallssequenzen vorgestellt, um die stationäre Verteilungsfunktion $F(x)$ zu erhalten (GÖRG, 1997; SCHREIBER, 1988; SCHREIBER und GÖRG, 1996). Dieser Algorithmus steuert systematisch die Anzahl der benötigten Eingabewerte einer Simulation mit Hilfe einer Formel, die von dem gewünschten minimalen Wert $F_{\min}$ von $F(x)$, dem benutzerdefinierten maximalen relativen Fehler $d_{\max}$ pro $F(x)$ -Intervall und dem gemessenen Korrelationskoeffizienten $\bar{\rho}(x)$ abhängt. Korrelierte Zufallssequenzen sind typisch für Simulationen von Kommunikationssystemen. Aus diesem Grund ist dieser Algorithmus besser für die statistische Analyse formal spezifizierter Systeme geeignet als konventionelle Auswertungsmethoden wie

z. B. Batch-Means, bei der eine aus n Versuchen gewonnene Gesamtsequenz in m Teilsequenzen (*Batches*) gleicher Länge $b = n/m$ so aufgeteilt wird, dass die Summenzufallswerte u. U. fälschlicherweise als quasi-ideal und quasi-normalverteilt angenommen werden können (BRATLEY et al., 1983; LAW und KELTON, 1991). Nichtsdestotrotz bietet SPEET beide Methoden, *Limited Relative Error* (LRE) und Batch-Means an.

Damit das Leistungsverhalten einer formalen Spezifikation analysiert werden kann, müssen die auszuwertenden Zufallssequenzen von der Spezifikation selbst erzeugt werden. Aus diesem Grund sollte der Benutzer in der Lage sein, Messpunkte

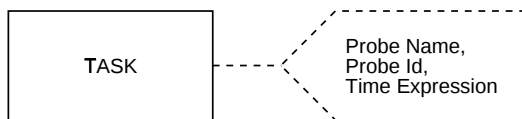


Abbildung 6.7: Grafische Repräsentation des neuen Messpunktsymbols

direkt in die Spezifikation einzubauen, wobei diese keine Auswirkung auf die Semantik der Spezifikation haben sollten. Eine sehr benutzerfreundliche Möglichkeit, Messpunkte in eine formale SDL-Spezifikation einzubauen, besteht in einem neuen Messpunktsymbol, das an normale SDL-Symbole wie ein Kommentarsymbol angeschlossen wird, d. h. die Verbindungslinie ist gestrichelt, vgl. Abb. 6.7 (STEPPLER, 1998b). Ein oder mehrere Messpunktsymbole können an jedes SDL-Symbol angeschlossen werden, an das auch Kommentarsymbole angeschlossen werden können.

Der Benutzer kann vier verschiedene SDL-Ausdrücke innerhalb dieses neuen Messpunktsymbols spezifizieren:

```

Probe(CharString, Real)
Probe(CharString, Integer)
Probe(CharString, Duration)
Probe(CharString, Natural, Time)
  
```

Das Laufzeitsystem von SPEET wertet diese Messpunkte aus. Die Parameter haben folgende Bedeutung: Normale Messpunkte haben zwei Parameter; Zeitmesspunkte haben drei Parameter.

Der erste Parameter beschreibt stets den Namen eines Messpunktes. Alle mit Hilfe der Messpunkte zur statistischen Auswertung gesendeten Daten, die alle mittels des `CharString`-Parameters gleich bezeichnet wurden, gehören zum selben Satz von statistischen Daten.

Bei normalen Messpunkten stellt der zweite Parameter den statistisch

zu untersuchenden Eingabewert dar. Dieser Parameter kann vom Typ Real, Duration oder Integer sein.

Zeitmesspunkte können zur Messung von Zeitspannen herangezogen werden. Der zweite Parameter vom Typ Natural ist ein Identitätskennzeichen der Messung. Wenn der Benutzer ein Messpunktsignal mit demselben Namen und demselben Identitätskennzeichen zum zweiten Mal zum Laufzeitsystem sendet, wird die Differenz der beiden dritten Parameter vom Typ Time statistisch ausgewertet. Der Name bestimmt wiederum den entsprechenden Satz von statistischen Daten. Indem Identitätskennzeichen verwendet werden, ist es möglich, mehrere parallele Messungen gleichzeitig durchzuführen. Das vereinfachte OSI-Netzschichtprotokoll in Abb. 6.8, S. 152, stellt beispielhaft die Verwendung des neuen Messpunktsymbols dar. Die textuelle Repräsentation (*Phrase Representation*, PR) der grafischen (*Graphical Representation*, GR) in Abb. 6.8, S. 152, lautet folgendermaßen:

```
State wait;

Input  T_DATAreq(t_pdu)
Probe('T-PDU Delay', t_pdu!id, Now);
Task   n_pdu!sdu := t_pdu
Probe('T-PDU Length', t_pdu!length);
Output N_DATAreq(n_pdu);
Nextstate -;

Input  N_DATAconf(n_pdu);
Task   t_pdu := n_pdu!sdu;
Output T_DATAconf(t_pdu)
      Probe('T-PDU Delay', t_pdu!id, Now);
Nextstate -;
```

Jedesmal wenn das Signal T_DATAreq empfangen wird, wird das Messsignal Probe('T-PDU Delay', t_pdu!id, Now) zur statistischen Auswertung gesendet und die Messung wird gestartet. Der Leser möge annehmen, dass die Transportschicht-PDU t_pdu und die Netzschicht-PDU n_pdu Objekte eines abstrakten Datentypen (*Abstract Data Type*, ADT) PDU seien und dass jede PDU eindeutig durch die Variable id gekennzeichnet sei. Ferner sei anzunehmen, dass die Variable length die Länge einer PDU in bit beschreibe. Die Variable sdu beinhaltet die Dienstdateneinheit (*Service Data Unit*, SDU) jeder PDU, d. h. die PDU der jeweiligen darüberliegenden Schicht.

Wenn die Netzschicht-Partnerinstanz den Empfang von `n_pdu` bestätigt hat, empfängt die Netzschicht das Signal `N_DATAconf`. Die Messung der Übertragungsverzögerung, die nach dem Empfang von `T_DATAreq` gestartet wurde, wird jetzt beendet, indem `Probe('T-PDU Delay', t_pdu ! id, Now)` zum Laufzeitsystem gesendet wird. Der zweite Messpunkt `Probe('T-PDU Length', t_pdu ! length)` wird verwendet, um die mittlere Länge aller PDUs zu messen.

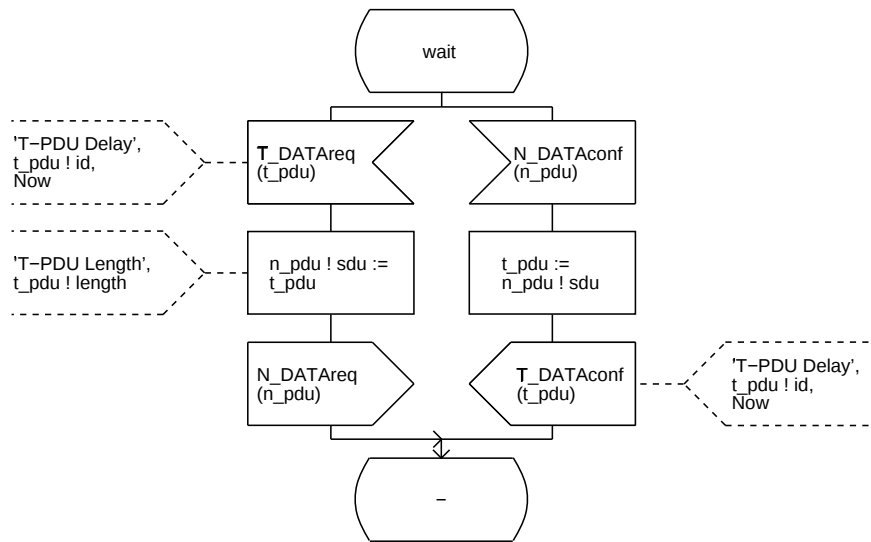


Abbildung 6.8: Beispielhafte Benutzung des neuen Messpunktsymbols

Das Ende einer Simulation bzw. Emulation ist dann erreicht, wenn die Abbruchkriterien aller Messpunkte erfüllt sind, d. h. eine für eine statistisch gesicherte Aussage hinreichend große Anzahl von Zufallswerten wurde ausgewertet. Im Gegensatz zu Batch-Means hängt das Abbruchkriterium beim LRE-Algorithmus von der gemessenen Korrelation ab. Nichtsdestotrotz kann zusätzlich eine maximale Zeitschranke als Abbruchkriterium angegeben werden, obwohl statistisch gesicherte Aussagen in diesem Fall nicht garantiert werden können.

6.7 Zusammenfassung

Der objektorientierte Softwareentwurf unter Verwendung von formalen Methoden ist durch SPEET um die Leistungsbewertung von formal in SDL spezifizierten Kommunikationssystemen erweitert worden. Insbesondere kann die Erfüllung von Echtzeit-Anforderungen vor der Implementierung für ein Zielprozessorsystem in SPEET überprüft werden. Zu diesem Zweck stellt SPEET folgende Funktionen zur Verfügung:

- die stochastische Verkehrssimulation mehrerer SDL-Systeme,
- die Emulation mehrerer SDL-Systeme implementiert für Echtzeit-Prozessorsysteme,
- verschiedene Verkehrslastgeneratoren für Sprach-, Paketdaten-, Audio- und Videoanwendungen,
- Modelle zur Codierung, Modulation und physikalischen Übertragung von Signalen zwischen SDL-Systemen und
- die statistische Auswertung von während einer Simulation bzw. Emulation generierten Messdaten.

Die Simulationsklassenbibliothek SPEETCL

Inhalt

7.1 Programmtechnische Konzepte	155
7.2 Klassenhierarchie	157
7.3 Ereignisorientierte Simulation	158
7.4 Ausnahmefehlerbehandlung	158
7.5 Persistenz	159
7.6 Softwarequalitätssicherung	162

Schlüsselwörter

Baumstruktur, Laufzeittypüberprüfung, RTTI, Typumwandlung, Exception Handling, Speicherverwaltung, Referenzzähler, Lastgeneratoren, Übertragungsmodelle, Zufallszahlengeneratoren, statistische Auswertung, LRE, Verteilungsfunktionen, Purify, ClearCase, Sniff+

Die in C++ geschriebene Klassenbibliothek *SDL Performance Evaluation Environment and Tools Class Library* (SPEETCL) basiert auf der *Communication Networks Class Library* (CNCL) (JUNIOUS et al., 1998) und stellt die programmtechnische Grundlage des SPEET-Werkzeuges, vgl. Kap. 6, S. 137, und des die SPEET-Methodik verwendenden TETRA-Simulators dar, vgl. Kap. 10, S. 193. Eine vollständige Beschreibung der Klassenhierarchie befindet sich im Anh. C, S. 245.

7.1 Programmtechnische Konzepte

Die SPEETCL ist durch folgende Konzepte charakterisiert:

- Die Klassenhierarchie der SPEETCL ist baumartig gestaltet, d. h. alle Klassen sind von einer obersten Basisklasse abgeleitet, vgl. Abs. 7.2, S. 157.
- Alle Objekte der SPEETCL verfügen über eine interne Laufzeittypinformation (*Run-Time Type Information*, RTTI), so dass auch eine sichere Typumwandlung (*Safe Type Cast*) zur Laufzeit möglich ist.
- Diese interne RTTI kann ferner dazu verwendet werden, indirekt über den Objekttyp Objekte zu erzeugen.

- Entsprechend Abs. 7.4, S. 158, ist der für die SPEETCL gewählte Mechanismus, Fehler abzufangen, die Ausnahmefehlerbehandlung (*Exception Handling*).
- Ein typischer Programmierfehler liegt vor, wenn Arbeitsspeicher belegt wird, ohne ihn nach der Benutzung wieder freizugeben oder ihn mehrfach freizugeben. Die Laufzeiteffizienz kann hierunter bei länger andauernden Programmläufen erheblich leiden. Um dieses Problem zu beheben, sieht die SPEETCL eine halbautomatische Speicherverwaltung über Referenzzähler vor. Jedes Objekt hat einen Referenzzähler. Wenn dieses Objekt von einem anderen benutzt wird, wird der Zähler erhöht. Nach der Benutzung wird der Zähler wieder erniedrigt. Ein Objekt löscht sich selbst, wenn es von keinem anderen mehr benutzt wird, d. h. der Referenzzähler wird zu Null gesetzt.
- Die SPEETCL stellt neben allgemeinen Behälterklassen, die jedes SPEETCL-Objekt beinhalten können, wie z. B. Hashtabellen, doppelt verkettete Listen, Schlangen, Stapel, etc., auch Klassen für elementare Datenstrukturen und -typen zur Verfügung, wie z. B. Felder, Zeichenketten, etc.
- Neben diesen allgemeinen Klassen sieht die SPEETCL Klassen für die ereignisorientierte, stochastische Simulation vor. Hierzu gehören Klassen für die Verwaltung der Ereignisse, die ereignisorientierte Simulationssteuerung, vgl. Abs. 7.3, S. 158, aber auch Zufallszahlengeneratoren. Es stehen lineare Kongruenz- und Fibonacci-Generatoren (RICHTER, 1992) zur Verfügung. Diese liefern eine binäre Gleichverteilung. In weiteren Klassen sind Transformationsvorschriften implementiert, um aus diesen Gleichverteilungen beliebige kontinuierliche und diskrete Verteilungen zu generieren.
Nach dem in Abs. 6.6, S. 149, beschriebenen LRE- oder dem Batch-Means-Verfahren können während einer Simulation erfasste Messwerte statistisch ausgewertet werden. Eine einfache Momentenauswertung steht auch zur Verfügung.
Ferner sind die in Abs. 6.3, S. 143, vorgestellten Verkehrslastgeneratoren und die in Abs. 6.4, S. 146, aufgeführten Übertragungsmodelle in der SPEETCL implementiert.
- Die SPEETCL ist eine persistente Klassenbibliothek, vgl. Abs. 7.5, S. 159, d. h. der gesamte Zustandsraum einer auf der SPEETCL basierenden Anwendung kann dauerhaft in einer Datei gespeichert werden.
- Schließlich verfügt die SPEETCL über ein SDL-Laufzeitsystem, auf

das der Codegenerator *SDL2SPEETCL* SDL-Spezifikationen abbildet und das in Kap. 8, S. 163, näher erläutert wird.

7.2 Klassenhierarchie

In Abb. 7.1 sind die wichtigsten Basisklassen der SPEETCL in der Notation von [BOOCH \(1994\)](#) dargestellt.

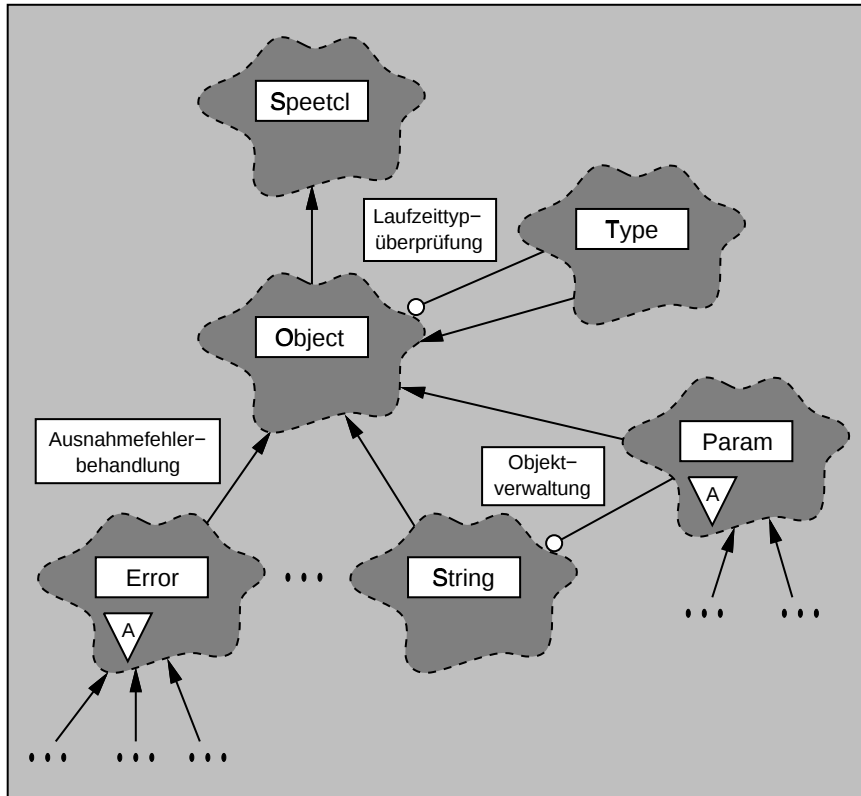


Abbildung 7.1: Die Basisklassen der SPEETCL

Dabei ist die baumartige Struktur mit der Wurzel *Speetcl* klar erkennbar. Diese Klasse enthält nur statische Methoden und Variablen, die der

Verwaltung der Klassenbibliothek dienen.

Von der Klasse `Speetcl` ist die eigentliche Basisklasse `Object` abgeleitet. Diese Klasse beinhaltet die dynamischen Aspekte einer SPEETCL-Klasse, z. B. die Laufzeittypüberprüfung, die sichere Typumwandlung, die Ausgabe eines Objekts oder das Referenzzählersystem. Alle SPEETCL-Klassen müssen diese Methoden implementieren und sind direkt oder indirekt von der Klasse `Object` abgeleitet.

Da die Programmiersprache C++ lange Zeit keine RTTI ermöglichte (STROUSTRUP, 1997) und verfügbare Compiler den neuen C++-Standard noch nicht vollständig unterstützen, stellt die SPEETCL ein eigenes Verfahren zur Laufzeittypüberprüfung bereit. Hierzu dient die Klasse `Type`. Ein Objekt dieser Klasse wird für jede SPEETCL-Klasse angelegt. Neben Laufzeittypüberprüfung ist es zusätzlich möglich, indirekt über die pro SPEETCL-Klasse eindeutigen `Type`-Objekte neue Objekte der jeweiligen Klasse zu erzeugen. Damit verknüpft ist die Klasse `Param`, die der optionalen Übergabe von Parametern bei der indirekten Objekterzeugung dient. Jede normale SPEETCL-Klasse, wie z. B. die Klasse `String` für den Umgang mit Zeichenketten, verfügt somit über eine einheitliche Schnittstelle zur Initialisierung.

7.3 Ereignisorientierte Simulation

Die ereignisorientierte Simulation der SPEETCL, vgl. Abb. 7.2, S. 160, funktioniert folgendermaßen: Ereignisbehandlungsroutinen kommunizieren miteinander über Ereignisse. Diese *EventHandler* stellen die programmtechnische Lösung erweiterter endlicher Zustandsautomaten (*Extended Finite State Machine*, EFSM) dar. Wenn ein Ereignis versendet werden soll, dann trägt die zentrale Ereignissteuerung (*EventScheduler*) dieses Ereignis in die globale Ereignisliste für den jeweiligen Ereigniszeitpunkt ein. Da zwischen den eingetragenen Ereignissen nicht notwendigerweise äquidistante Zeitabstände liegen müssen, verläuft die Simulationszeit i. d. R. nicht linear.

7.4 Ausnahmefehlerbehandlung

Die eleganteste Methode, in C++ auf Fehler während des Programmablaufs zu reagieren, ist die Ausnahmefehlerbehandlung (*Exception Handling*), die Teil des neuen C++-Standards (STROUSTRUP, 1997) und in der SPEETCL implementiert ist, vgl. Abb. 7.3, S. 160.

Die am Weitesten verbreitete Fehlerbehandlungsmethode ist, auf Fehler gar nicht zu reagieren. Besser, aber auch sehr mühsam, ist es, nach jeder Aktion die Korrektheit derselben zu überprüfen und dann ggf. eine globale Fehlerbehandlungsroutine aufzurufen. Dies war z. B. in der Vorgängerbibliothek CNCL (JUNIUS et al., 1998) realisiert.

Wenn ein Fehler während des Programmablaufs auftritt, wird bei der Ausnahmefehlerbehandlung der SPEETCL ein Objekt einer den Typ des Fehlers charakterisierenden Klasse abgeleitet von der abstrakten Basisklasse `Error` an eine benutzerdefinierte Fehlerbehandlungsroutine weitergeleitet. Der Benutzer kann dann selber entscheiden, wie auf den Fehler zu reagieren ist.

7.5 Persistenz

Die SPEETCL ist eine persistente Klassenbibliothek, d. h. der gesamte Zustand einer SPEETCL-Anwendung kann in benutzerdefinierten Zeitabständen kontinuierlich während des Programmablaufs in einer Datei abgespeichert werden. Genau von diesem abgespeicherten Zustand aus kann die Abarbeitung des Programms zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgenommen werden. Zeitersparnis ist der große Vorteil der Persistenz:

- Bei lange andauernden Simulationen, z. B. mehrere Tage, muss, falls aufgrund von externen Einflüssen, z. B. Stromausfall, oder aus administrativen Gründen der Rechner, auf dem die Simulation abläuft, neugestartet werden muss, nicht die ganze Simulation von vorne wiederholt werden, sondern kann an dem zuletzt abgespeicherten Zustand fortgesetzt werden.
- Auch wenn in einer SPEETCL-Anwendung nach längeren Zeiträumen Fehler auftreten, können diese Fehler schneller reproduziert werden, wenn beim zuletzt abgespeicherten Zustand die Fehlersuche beginnen kann.
- Ferner ist Persistenz für die statistische Auswertung seltener Ereignisse von Bedeutung. Wenn ein seltenes Ereignis auftritt, wird bei den sog. *Repetitive Simulation Trials After Reaching Threshold* (RESTART)-Verfahren mehrfach im zuletzt abgespeicherten Zustand in der Hoffnung wieder aufgesetzt, Stichproben seltener Ereignisse in kürzerer Zeit zu generieren und somit die Gesamtsimulationslänge zu reduzieren. Die SPEETCL ist auf die Anwendung des *RESTART/LRE*-

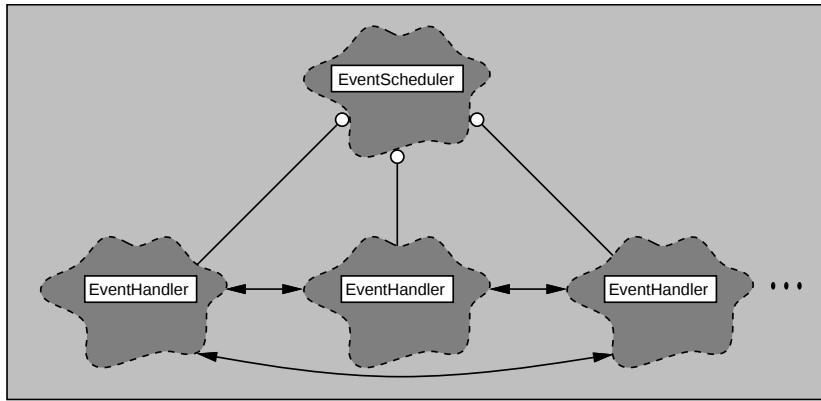


Abbildung 7.2: Die Klassen der ereignisorientierten Simulation

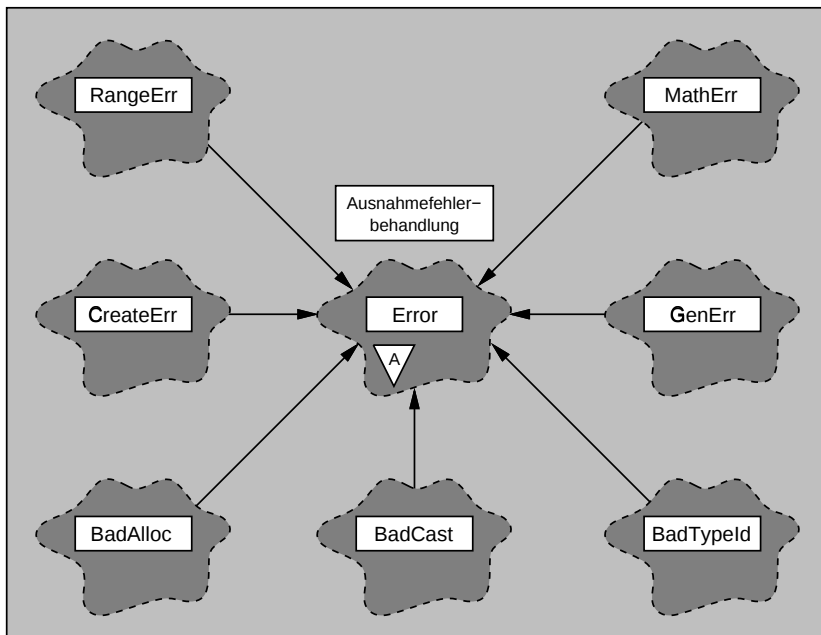


Abbildung 7.3: Die Klassen für die Ausnahmefehlerbehandlung

Verfahrens nach GÖRG (1997) vorbereitet.

Persistenz ist in der SPEETCL folgendermaßen implementiert: Von jeder normalen SPEETCL-Klasse existiert eine persistente Version, die ausschließlich die persistente Funktionalität der normalen Klasse hinzufügt, vgl. Abb. 7.4.

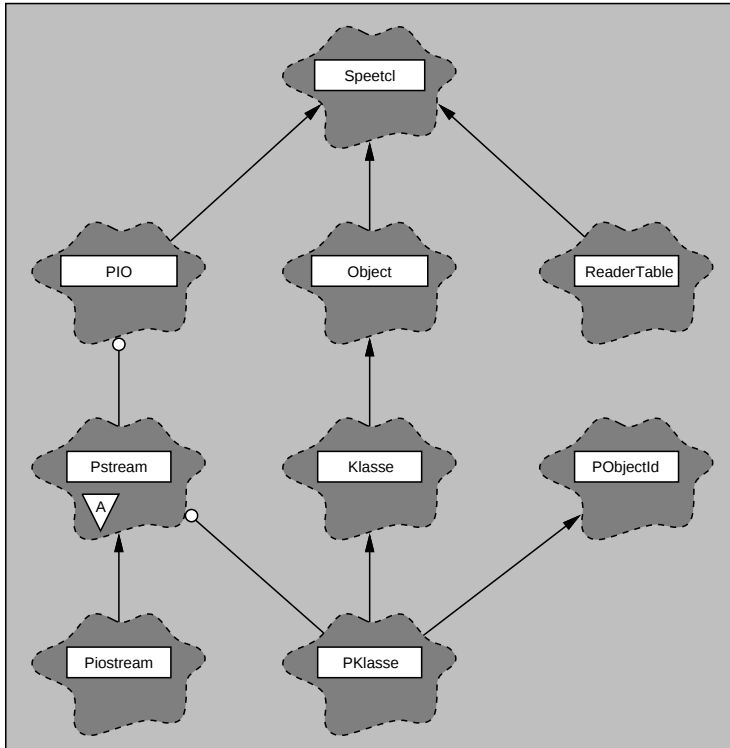


Abbildung 7.4: Einbindung persistenter Klassen in die Klassenhierarchie der SPEETCL

Jede persistente Klasse besitzt über die Klasse `PObjectId` eine eindeutige Identifikationsnummer. Beim Abspeichern des eigenen Zustands mit Hilfe der Klasse `Pstream` wird von der Klasse `PIO` das Format der abzuspeichernden Datei bestimmt. Die Klasse `ReaderTable` verwaltet die Liste

aller abgespeicherten bzw. eingelesenen Objekte. Durch die Identifikationsnummern wird sichergestellt, dass kein Objekt mehrmals abgespeichert bzw. eingelesen wird.

7.6 Softwarequalitätssicherung

Von elementarer Bedeutung für die Wartbarkeit und somit die Lebensdauer der Klassenbibliothek sind einheitliche Programmierrichtlinien ([STEPPLER et al., 1997](#)) für den gesamten Softwareentwicklungsprozess. Durch Hilfsmittel zur Generierung neuer Klassen und deren Dokumentation wird die Einhaltung dieser Richtlinien unterstützt.

Für jede SPEETCL-Klasse existiert ein Testprogramm, das die Funktionalität der jeweiligen Klasse und die Interaktion mit anderen Klassen überprüft. Wenn eine Klasse geändert wird, kann man auf diese Weise leicht Seiteneffekte, d. h. Auswirkungen auf die Konsistenz der Klassenbibliothek, erkennen.

Das Werkzeug *Purify* ([RATIONAL, 1998b](#)) wurde zur automatisierten Softwarequalitätssicherung eingesetzt, mit dessen Hilfe Laufzeitfehler wie Speicherlecks, Bereichsüberschreitungen bei Feldern, das Lesen und Beschreiben von nicht initialisiertem Speicher, etc. aufgedeckt werden können.

Als Versionsverwaltungswerkzeug wird *ClearCase* ([RATIONAL, 1998a](#)) verwendet. *ClearCase* stellt ein umfassendes Konfigurationsverwaltungssystem dar. Verschiedene Varianten eines sich in der Entwicklung befindenden Softwaresystems können mit diesem Werkzeug verwaltet werden. Abhängig von benutzerdefinierten Versionsspezifikationen können ganze Systeme oder einzelne Programme kompiliert werden. Es besteht die Möglichkeit, die Einhaltung von Entwicklungsrichtlinien automatisch zu erzwingen, indem neue Versionen nur dann erstellt werden können, wenn diesen Richtlinien entsprochen wird.

Das Werkzeug *Sniff+* ([WIND, 1998](#)) wurde als Softwareentwicklungsumgebung eingesetzt. Mit diesem Werkzeug können hauptsächlich aus Quelltexten bestehende Projekte definiert werden. Diese Projekte werden dann verwendet, um auf einfache Weise Softwaresysteme zu erstellen und Abhängigkeiten zwischen den Quelltexten, z. B. eine Vererbungsbeziehung zwischen zwei Klassen, zu visualisieren. Ferner bietet *Sniff+* eine grafische Oberfläche für die Dokumentation und die beispielsweise auf *ClearCase* beruhende Versions- und Konfigurationsverwaltung.

Automatische Codegenerierung von SDL nach C++

Inhalt

8.1 Entwurfsziele für einen SDL→C++-Codegenerator	163
8.2 Leistungsumfang des Codegenerators	164
8.3 Das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL	167

Schlüsselwörter

Objektorientierte Spezifikation, SDL-92 und -96, SPEETCL-Klassen als ADTs, ereignisorientierte Simulation

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten (STEPPLER et al., 1998) und im Folgenden vorgestellten Codegenerator können syntaktisch und semantisch korrekte SDL-Spezifikationen im PR-Format nach C++ konvertiert werden, vgl. Abs. 8.2, S. 164. Hierbei werden SDL-Sprachelemente auf Konzepte der in Kap. 7, S. 155, vorgestellten Klassenbibliothek SPEETCL abgebildet, vgl. Abs. 8.3, S. 167.

8.1 Entwurfsziele für einen SDL→C++-Codegenerator

Bevor der Codegenerator erstellt wurde, wurden aufgrund der Erfahrung mit existierenden SDL→C-Codegeneratoren (EK, 1998) folgende Anforderungen an einen zu entwerfenden SDL→C++-Codegenerator und an das Laufzeitsystem, auf das der generierte Code abgebildet werden soll, gestellt:

- Der SDL-Sprachumfang ist möglichst vollständig abzudecken. Selten benutzte Sprachelemente wurden bei der Implementierung jedoch ausgelassen. Der abgedeckte Sprachumfang ist in Abs. 8.2, S. 164, erläutert.
- Der durch bestimmte SDL-Sprachkonstrukte (`None` und `Any`) in eine Spezifikation eingeführte Nicht-Determinismus ist zu unterstützen. Ferner sollen über Kanäle übertragene Signale eine zufällige Verzögerung erfahren können.

Hierzu werden quasi-ideale Zufallsgeneratoren benötigt, vgl. Anh. C, S. 245. Diese werden zusammen mit der gesamten Funktionalität der SPEETCL über ADTs in SDL zur Verfügung gestellt.

- Der Codegenerator sollte unnötige Compilationsdurchgänge verhindern.

Dieses Problem tritt dann auf, wenn der Codegenerator jedesmal alle zu erzeugenden Quelltexte unabhängig davon, ob sich der jeweilige Quelltext seit dem letzten Generierungsvorgang auch geändert hat, neu generiert. Deswegen erzeugt der Codegenerator dann und nur dann eine neue Quelltextdatei, wenn diese noch nicht existiert oder sich die neue von der alten in mindestens einem Byte unterscheidet.

- Der generierte Quelltext sollte zur einfachen Fehlersuche lesbar sein. Da formal spezifizierte Protokollstapel i. d. R. zusammen mit nicht formalen Codeteilen in einer Simulation ablaufen sollen, ist eine Fehlersuche nicht nur auf SDL-Symbolebene sondern auch vielfach auf Implementierungsebene durchzuführen. Deswegen erzeugt der Codegenerator den den Programmierrichtlinien der SPEETCL entsprechenden Quelltext (STEPPLER et al., 1997), vgl. Abs. 7.6, S. 162.

- Die Simulation einer nach C++ übersetzten SDL-Spezifikation soll stabil laufen und speicher- und laufzeiteffizient durchgeführt werden können.

Aus diesem Grund unterstützen der von dem Codegenerator erzeugte Quelltext und das SDL-Laufzeitsystem die halbautomatische Speicherverwaltung der SPEETCL, vgl. Abs. 7.1, S. 155. Ferner ist der generierte Quelltext automatisch persistent, vgl. Abs. 7.5, S. 159, so dass Simulationen problemlos im zuletzt abgespeicherten Zustand wieder aufgenommen werden können.

- Schließlich sollen nicht nur der Codegenerator sondern auch der erzeugte Quelltext plattformübergreifend verwendbar sein.

Dies ist implizit gegeben, indem die Programmierrichtlinien der Klassenbibliothek SPEETCL vom Codegenerator eingehalten werden.

8.2 Leistungsumfang des Codegenerators

Der Codegenerator arbeitet in drei Phasen: In der ersten werden eventuell vorhandene Makros expandiert, in der zweiten wird die im PR-Format vorliegende SDL-Spezifikation in ein generisches internes Format übersetzt

und anschließend in der dritten Phase wird der auf dem SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL basierende Quelltext ausgegeben. Insgesamt werden folgende SDL-Konzepte unterstützt:

- Makros werden zu Beginn der Übersetzung expandiert.
- Die objektorientierten Sprachelemente von SDL-92 werden unterstützt (ELLSBERGER et al., 1997; ITU, 1993c; OLSEN et al., 1994), indem Pakete (*Package*), Systemtypen (*System Type*), Blocktypen (*Block Type*), Prozesstypen (*Process Type*) und redefinierbare Prozeduren (*Redefined Procedure*, *Finalized Procedure*) auf die in Anh. C, S. 245, aufgeführten C++-Klassen des SDL-Laufzeitsystems der SPEETCL abgebildet werden. Diese Typen können spezialisiert werden, d. h. virtuelle Typen können redefiniert werden. Ferner sind virtuelle Transitionen innerhalb von Prozesstypen und Prozeduren erlaubt.
- Block- und Kanalunterstrukturen (*Block Substructure*, *Channel Substructure*) werden in mehrere Blöcke zerlegt.
- Prozeduren dürfen Zustände beinhalten. Entfernte, d. h. in anderen Prozessen definierte, Prozeduren können aufgerufen werden (*Remote Procedure Call*).
- Ebenfalls können in anderen Prozessen definierte Variablen ausgelesen werden (*Export*, *Import*, *View*).
- Neben den meisten vordefinierten Datentypen (**Boolean**, **Character**, **Charstring**, **Integer**, **Natural**, **Real**, **PID**, **Duration** und **Time**) können folgende ADTs verarbeitet werden: Literal-Datentypen, d. h. ausschließlich aus Literalen bestehende ADTs, Strukturen (*Struct*) und auf dem Feldgenerator basierende ADTs (*Array*).
- Es ist ferner möglich, C++-Klassen in eine SDL-Spezifikation mit einzubinden, indem für die jeweilige Klasse eine ADT-Schnittstelle in Form einer PR-Datei definiert wird. Die Operatoren dieses ADTs entsprechen dann den Methoden der C++-Klasse. Auf diese Weise steht die gesamte Funktionalität der SPEETCL, vgl. Kap. 7, S. 155, insbesondere die Behälterklassen und die Zufallszahlengeneratoren zusammen mit den Verteilungen, in SDL zur Verfügung.
- Schließlich ist es möglich, den dynamischen Pfad einer ablaufenden SDL-Implementierung in Form eines MSCs (ITU, 1993b) zu protokollieren.

Folgende Sprachkonstrukte werden bisher nicht unterstützt:

- Bisher können Typen nicht mit Hilfe von formalen Kontextparametern parametrisiert werden.
- ADTs können nicht spezialisiert werden, d. h. eine Vererbungshierarchie kann nicht erstellt werden.

SDL bietet ferner die algebraische Definition von ADTs über Axiome an. Weil diese Definitionen auch logische Abhängigkeiten innerhalb eines ADTs beschreiben, ist es nicht ohne Weiteres möglich, solche Definitionen auf einfache Datenstrukturen in einer prozeduralen Programmiersprache wie C, C++ oder Java abzubilden. Aus diesem Grund ignoriert der Codegenerator solche Definitionen. Die möglichen Zahlenbereiche der C++-Implementierungen der vordefinierten Datentypen **Integer**, **Natural**, **Duration** und **Time** werden ferner durch den jeweiligen Compiler und den jeweiligen Prozessor beschränkt.

ADTs dürfen nicht auf Mengen (*Powerset*) oder anderen vor- oder benutzerdefinierten Generatoren beruhen (Ausnahme: *Array*).

Schließlich ist es nicht möglich, komplexe Daten in einer ASN.1-Notation zu definieren.

- Dienste (*Service*) und Diensttypen (*Service Type*) dürfen nicht benutzt werden und sind durch Prozesse zu ersetzen.
- Signale dürfen nicht durch Untermengen von Signalen verfeinert werden (*Signal refinement*). Somit können Signalthierarchien nicht erstellt werden.
- Spontane Transitionen (*Spontaneous Transition*), d. h. die Ausführung einer Transition ohne dass ein Aktivierungsimpuls, also Eingangssignal, vorliegt, und Aktivierungsbedingungen, d. h. ein boolescher Ausdruck, in Kombination mit einem Eingangssignal (*Enabling Condition*) oder ohne Eingangssignal (*Continuous Signal*), werden nicht unterstützt. Ebenfalls ist der vorrangige Empfang eines bestimmten Signales in einem Zustand nicht erlaubt (*Priority Input*).
- Schließlich ist es nicht möglich, durch vordefinierte Parameter bedingt Untermengen einer Spezifikation (*Select*) oder optionale Transitionsstränge (*Alternative*) zum Zeitpunkt der Codegenerierung auszuwählen.

8.3 Das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL

In Abb. 8.1 ist die ereignisorientierte Ablaufsteuerung des SDL-Laufzeitsystems abgebildet. Sie stellt eine Spezialisierung der allgemeinen Ablaufsteuerung der SPEETCL dar, vgl. Abs. 7.3, S. 158.

Der Codegenerator bildet ein SDL-System auf die entsprechende C++-Klasse des SDL-Laufzeitsystems der SPEETCL ab. Diese Klasse entspricht einer Ereignisbehandlungsroutine (*EventHandler*) im Sinne der ereignisorientierten Simulation der SPEETCL. SDL-Signale sind spezialisierte Ereignisse. Die SDL-Prozesse eines SDL-Systems tauschen diese Signale in einem zweistufigen Verfahren miteinander aus, indem diese über das zugehörige SDL-System in die globale Ereignisliste der zentralen Ereignissteuerung (*EventScheduler*) eingetragen werden. Wenn ein Signal zum gegebenen Zeitpunkt eintritt, dann versendet die Ereignissteuerung dieses an das zuständige System. Anschließend wird das Signal vom System zum adressierten Prozess weitergeleitet.

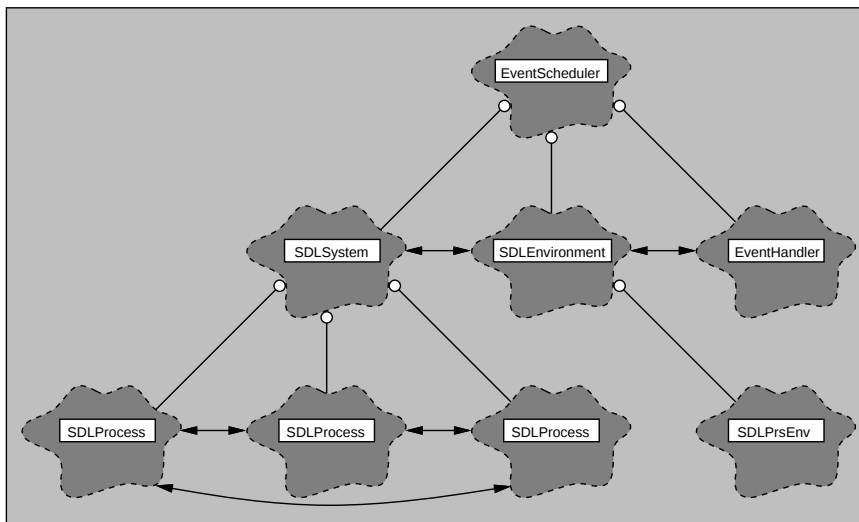


Abbildung 8.1: Das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL

Es können mehrere Instanzen eines SDL-Systems oder verschiedener SDL-Systeme in einer Simulation parallel zueinander ablaufen. Neben die-

sen Systemen gibt es eine weitere die *Umgebung* dieser Systeme nachbildende Ereignisbehandlungsroutine (*SDLEnvironment*). Der zu diesem Umgebungssystem gehörende Prozess (*SDLPrsEnv*) ist von *SDLProcess* abgeleitet, wird vom Codegenerator als Muster mitgeliefert und ist vom Benutzer manuell anzupassen. Prozesse verschiedener Instanzen von SDL-Systemen können – soweit sie in der Spezifikation über einen Kanal an die Umgebung angeschlossen sind – nur über den vom Benutzer zu erweiternden Prozess der Umgebung miteinander kommunizieren. Normale Ereignisbehandlungsroutinen können ebenfalls nur über die Umgebung mit einzelnen Prozessen der instantiierten SDL-Systeme kommunizieren.

Das Modell für Übertragungsfehler bei TETRA

Inhalt

9.1 Störeinflüsse auf den Mobilfunkkanal	170
9.2 Modell des Mobilfunkkanals	178
9.3 Modell eines TETRA-Empfängers	182
9.4 Fehlermusterdateien für TETRA-Pakete	185
9.5 Paketfehler für versch. Zellgruppengrößen und Signalstörabstände	188

Schlüsselwörter

Rauschen, Pfadverlust, Laufzeitspreizung, Abschattung, Schwund, Gleichkanalstörung, Mehrwegeausbreitung, Dopplerverschiebung, Kanalcodierung, TETRA-Kanaltypen, Breitbandkanal, Gilbert, Fritchman, BER, MER

Um untersuchen zu können, wie sich TETRA-Systeme bei gestörter Übertragung in einem mehrzellularen Netz verhalten, wird in diesem Kapitel beschrieben, auf welche Weise Fehlermusterdateien zur Protokolle-mulation hergestellt wurden. Mit Hilfe dieser Fehlermusterdateien werden in Kap. 10, S. 193, Übertragungsfehler auf Pakete-bene nachgebildet und das Verhalten der Kollisionsauflösungs-algorithmen und der Reservierungszutei-lungsstrategien, vgl. Kap. 4, S. 95, bei gestörter Übertragung untersucht.

Nachdem kurz in Abs. 9.1, S. 170, auf die Einflüsse eingegangen wurde, die störend auf eine Mobilfunkübertragung wirken, wird in Abs. 9.2, S. 178, ein diese Einflüsse berücksichtigendes Modell des Mobilfunkkanals vorgestellt. Basierend auf diesem Kanalmodell wird ein Modell für einen TETRA-Empfänger entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, auf analyti-schem Wege Bitfehlerverhältnisse (*Bit Error Ratio*, BER) zu berechnen, die durch einen Vergleich mit den Ergebnissen von SORBARA (1995) validiert werden können. Anschließend werden in Abs. 9.4, S. 185, Fehlermuster-dateien beschrieben, die das Paketfehlerverhältnis (*Message Error Ratio*, MER) oberhalb der Kanalcodierung nachbilden. Einige typische Eigen-schaften dieser MERs sind in Abs. 9.5, S. 188, dargestellt. Vollständige MER- und BER-Tabellen sind in Anh. D, S. 261, aufgeführt.

9.1 Störeinflüsse auf den Mobilfunkkanal

9.1.1 Rauschen, Pfadverlust, Abschattung, Bewegung und Mehrwegeausbreitung

Der Mobilfunkkanal ist ein nichtlinearer Kanal mit zeitabhängigen Übertragungseigenschaften. In Tab. 9.1 sind die Effekte aufgeführt, die zu berücksichtigen sind, um einen Mobilfunkkanal zu modellieren (DAVID und BENKNER, 1996).

Tabelle 9.1: Beschreibung der Eigenschaften von Mobilfunkkanälen

Ursache	Effekt	Abhängig von
Verschieden	Rauschen	
Pfadverlust	Signaldämpfung	Frequenz, Weg, Ausbreitungs Umgebung
Abschattung	Langsamer Schwund	Morphologie, Topographie
Bewegung	Dopplerverschiebung (Frequenzdispersion)	Geschwindigkeit
Mehrwegeausbreitung	Schneller Schwund, Zeitdispersion	Morphologie, Topographie

Ausgehend von statistischen Untersuchungen des Signalverlaufs werden diese Effekte durch verschiedene Kenngrößen beschrieben. Der Signalpegel eines Empfangssignals schwankt langsam um einen mittleren Pegel, der dem durch Pfadverlust verminderten Sendepiegel entspricht. Zusätzlich sind diesen langsamen Schwankungen schnelle Schwankungen überlagert.

Mit Rauschen bezeichnet man die Gesamtheit der verschiedensten, nicht näher beschreibbaren Störeinflüsse. Die meisten Störungen im für TETRA relevanten Frequenzbereich von 350 MHz bis 1 GHz beruhen im Wesentlichen auf Industrierauschen (*Man Made Noise*) (DAVID und BENKNER, 1996; JAKES, 1974). Dabei handelt es sich meistens um impulsförmige Störungen, verursacht durch elektrische Motoren oder Schaltvorgänge. Einen kleineren Anteil am gesamten Rauschen haben kosmische und atmosphärische Rauschquellen. Falls die Anzahl der voneinander unabhängigen Rauschquellen hinreichend groß ist, kann die Amplitude des Rauschsignals $n(t)$, das

die Summe aller Störsignale darstellt, als gaußverteilt angenommen werden. Das Verhältnis von Signal- zu Rauschleistung wird als Signalstörabstand S/N (*Signal to Noise Ratio*) bezeichnet.

Der Pfadverlust (*Pathloss*) L_p ist als das Verhältnis von Empfangsleistung P_r zur Sendeleistung P_s definiert:

$$L_p = 10 \log \frac{P_r}{P_s} \quad (\text{dB}). \quad (9.1)$$

Basierend auf von OKUMURA in und um Tokyo durchgeführten Feldstärkemessungen leitete HATA (1980) empirisch folgende Vorhersageformeln ab:

$$L_p = \begin{cases} A + B \log d & \text{für stark bebaute Gebiete,} \\ A + B \log d - K_r & \text{für schwach bebaute Gebiete,} \\ A + B \log d - Q_r & \text{für offenes Gelände,} \end{cases} \quad (9.2)$$

wobei für die Funktionen A , B , K_r und Q_r gelte:

$$\begin{aligned} A &= 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - \\ &\quad (1,1 \log f_c - 0,7) h_m - (1,56 \log f_c - 0,8), \\ B &= 44,9 - 6,55 \log h_b, \\ K_r &= 2 ((\log(f_c/28))^2 + 5,4) \quad \text{und} \\ Q_r &= 4,78 (\log f_c)^2 - 18,33 \log f_c + 40,94. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Hierbei muss die Entfernung d zwischen MS und BS im Bereich 1 km–20 km, die Trägerfrequenz f_c im Bereich 100 MHz–1 500 MHz, die Antennenhöhe der BS h_b im Bereich 30 m–200 m und die der MS (h_m) im Bereich 1 m–20 m liegen (CÁTEDRA und PÉREZ-ARRIAGA, 1999).

Die Wellenausbreitung im Mobilfunkkanal ändert sich mit der Zeit, da bei Bewegung der MS oder der Hindernisse in Folge von Abschattungen entsprechend der Bebauungsstruktur durch Berge, Bäume, Häuser, etc. neue Empfangssituationen entstehen. Die Grundamplitude eines über einen Mobilfunkkanal übertragenen Signals schwankt mit einer niedrigen Frequenz um den mittleren Pfadverlust L_p . Diese im Vergleich zur Symboldauer relativ langsame Veränderung wird als langsamer Schwund (*Long-Term Fading*) bezeichnet und gehorcht einer Log-Normal-Verteilung (LEE, 1997). Er liegt typischerweise im Bereich 4 dB–8 dB (DAVID und BENKNER, 1996).

Zwischen Sender und Empfänger existieren aufgrund von Streuung, Reflexion und Beugung an Hindernissen in der räumlichen Umgebung beliebig

viele Ausbreitungswege für die elektromagnetischen Wellen. Selbst wenn kein Abschattungsschwund vorhanden ist, schwankt die Empfangsfeldstärke eines Mobilfunksignals stark in Abhängigkeit vom Empfangsort, der Zeit und der Frequenz. Dieser Effekt wird schneller Schwund (*Short-Term Fading*) bzw. Mehrwegeschwund (*Multi-Path Fading*) genannt. Am Ort des Empfängers überlagern sich sehr viele verschieden starke und durch die Laufzeit unterschiedlich verzögerte Komponenten desselben Signals (RAP-PAPORT, 1995).

Ein über einen Kanal mit Mehrwegeausbreitung übertragener Impuls erscheint am Empfangsort als Überlagerung von einzelnen Feldkomponenten mit unterschiedlichen Laufzeiten und wird somit zeitlich gedehnt; es tritt Zeitdispersion auf. Ein Maß für die bei einer bestimmten Kanalimpulsantwort $h(t)$ entstehende Impulsaufweitung ist die Laufzeitspreizung (*Delay Spread*), die als das zweite Moment des Verzögerungsleistungsprofil (*Power Delay Profile*) $P(t) = |h(t)|^2$ definiert ist:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{P_0} \int_0^\infty \tau^2 P(\tau) d\tau - \left(\frac{1}{P_0} \int_0^\infty \tau P(\tau) d\tau \right)^2} \quad (\text{s}), \quad (9.4)$$

wobei $P_0 = \int_0^\infty P(\tau) d\tau$ der gesamten empfangenen Energie für einen Impuls entspricht.

Bewegt sich ein Empfänger mit der Geschwindigkeit v relativ zum Sender, wobei α der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und der Ausbreitungsrichtung der Funkwellen ist, so kommt es aufgrund des Dopplereffektes zu einer Frequenzverschiebung (Frequenzdispersion) des Signals um die Dopplerfrequenz:

$$f_d = v/\lambda \cos \alpha. \quad (9.5)$$

Empfängt die MS aufgrund von Mehrwegeausbreitung eine große Zahl von Signalkomponenten aus verschiedenen Richtungen, so wird das Leistungsdichtespektrum des gesendeten Signals mit dem sogenannten Dopplerspektrum $S(f, f_d)$ gespreizt (JAKES, 1974).

9.1.2 Gleichkanalstörungen

Um eine Versorgung sowohl flächendeckend als auch für große Teilnehmerzahlen zu gewährleisten, wird das Sendegebiet in Zellen aufgeteilt, die jeweils durch eine BS bedient werden. Es darf dabei in jeder Zelle nur ein Teil der insgesamt verfügbaren Frequenzkanäle benutzt werden. Durch geeignete Aufteilung der Frequenzen auf die benachbarten Zellen können Nachbarkanalstörungen (*Adjacent-Channel Interference*, ACI) aus den angrenzenden Zellen vermieden werden. Da die Gesamtübertragungsbandbreite jedoch begrenzt ist, müssen die Frequenzbänder in weiter entfernten Zellen wiederverwendet werden (Frequenzwiederholung, *Frequency Reuse*).

Im Allgemeinen geht man bei der Beschreibung der Zellen von einer idealen hexagonalen Zellform aus, was jedoch, durch topographische und morphologische Umstände bedingt, nur annähernd den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht. In der Realität haben die einzelnen Funkzellen eine sehr unregelmäßige Gestalt.

In zellular aufgebauten Mobilfunknetzen mit statischer Frequenzvergabe wird die größte Menge zusammenhängender Zellen, in denen keine Trägerfrequenz mehrfach verwendet wird, Zellgruppe bzw. *Cluster* genannt. Da die Zellgruppen das gesamte Versorgungsgebiet abdecken müssen, sowie durch die hexagonale Geometrie bedingt, ergeben sich nur bestimmte mögliche Zellgruppengrößen (*Clustergrößen*) N_c (JUNG, 1997):

$$N_c = i^2 + j^2 + ij \quad \text{mit} \quad i, j \in \mathbb{N}_0 \wedge i \geq j \wedge i + j \neq 0. \quad (9.6)$$

Die möglichen Zellgruppengrößen $N_c \leq 31$ sind in Tab. 9.2 angegeben.

Tabelle 9.2: Mögliche Zellgruppengrößen $N_c \leq 31$ hexagonaler Zellen im Falle vollständig flächendeckender Pflasterung

i	1	1	2	2	3	2	3	4	3	4	5	3	4	5
j	0	1	0	1	0	2	1	0	2	1	0	3	2	1
C	1	3	4	7	9	12	13	16	19	21	25	27	28	31

Je kleiner die Zellgruppengröße ist, desto mehr Frequenzen stehen pro Zelle zur Verfügung. Allerdings werden die Frequenzen dann auch in geringerer Entfernung wiederverwendet und es entstehen verstärkt Gleichkanalstörungen (*Co-Channel Interference*, CCI). Abb. 9.1, S. 174, zeigt die

Verteilung der Frequenzen und die Gleichkanalzellen bei einer Zellgruppengröße von $N_c = 7$. Der Abstand D zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Gleichkanalzellen bezogen auf den Zellradius R wird Verminderungsfaktor q der Gleichkanalstörung (*Co-Channel Interference Reduction Factor*) genannt und ist einzig von der Zellgruppengröße N_c abhängig (JUNG, 1997; LEE, 1993):

$$q = D/R = \sqrt{3N_c}. \quad (9.7)$$

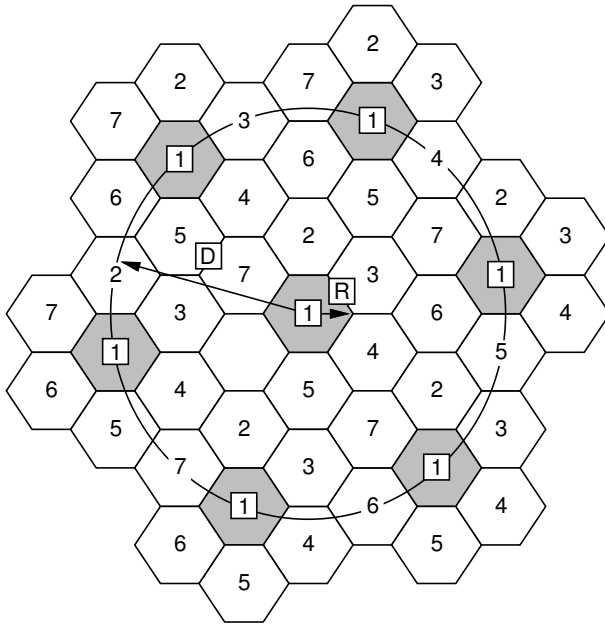


Abbildung 9.1: Ausschnitt eines Zellnetzes mit regelmäßigen Sechsecken und Frequenzwiederholung bei Zellgruppengröße $N_c = 7$

Aufgrund der Frequenzwiederholung stört die von den Gleichkanalzellen ausgehende Interferenzleistung die Nutzverbindung in der betrachteten Zelle. Das Verhältnis der empfangenen Leistung des Nutzsignals C bezogen auf die Interferenzleistung I wird mit Gleichkanalstörabstand bezeichnet

(Carrier to Interference Ratio):

$$C/I = 10 \log \frac{P_s}{P_i} \quad (\text{dB}). \quad (9.8)$$

Im Gegensatz zum thermischen Rauschen, bei dem man den Signalstörabstand S/N vergrößern kann, indem die Sendeleistung P_s heraufgesetzt wird, ist dies beim Gleichkanalstörabstand C/I nicht möglich, weil damit einhergehend auch die Interferenzleistung P_i in gleichem Maße erhöht wird.

Wenn man von einem zellularen System mit regelmäßiger Struktur und gleichen Ausbreitungsbedingungen in den Zellen ausgeht, so ist der Gleichkanalstörabstand C/I unabhängig von der Sendeleistung P_s und nur eine Funktion der Entfernungen zwischen den Sendern und dem Empfänger.

Zunächst werde die Situation betrachtet, dass es nur eine Gleichkanalzelle gibt. Sei der Abstand vom Empfänger zum gewünschten Sender r und zum störenden Sender d , so ergibt sich mit Gl. 9.1, S. 171, und Gl. 9.8:

$$C/I = 10 \log \frac{P_s 10^{-L_p(r)/10}}{P_s 10^{-L_p(d)/10}} = L_p(d) - L_p(r). \quad (9.9)$$

Nach dem HATA-OKUMURA-Modell zur Vorhersage des Pfadverlustes, vgl. Gl. 9.2, S. 171, und mit einer angenommenen Antennenhöhe der BS $h_b = 30$ m ergibt sich:

$$\begin{aligned} C/I &= B(\log d - \log r) = (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d/r \\ &= 35,22 \log d/r. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Da man einen ausreichenden Gleichkanalstörabstand im gesamten Zellgebiet garantieren möchte, ist es sinnvoll, vom ungünstigsten Fall auszugehen, bei dem der Abstand r für die Nutzverbindung maximal und der Abstand d vom gestörten Empfänger zum störenden Sender minimal ist. Dies ist in Abb. 9.2, S. 176, sowohl für die UL als auch die DL dargestellt. Für diesen Fall gilt für den Gleichkanalstörabstand nach Gl. 9.9 und Gl. 9.7, S. 174:

$$C/I = L_p(d = D - R) - L_p(r = R) = L_p(D - R/R) = L_p(q - 1). \quad (9.11)$$

Im Folgenden sei die Situation betrachtet, dass mehrere der bis zu sechs nächsten Gleichkanalzellen zur selben Zeit aktiv sind und somit störende Interferenzleistung von ihnen ausgeht. Um die aktuelle Situation in Abhängigkeit von der Position der MS und je nachdem, wieviele und welche

der Nachbarn gerade stören, zu bewerten, müßte man die entsprechenden Abstände d_{N_i} bestimmen und den resultierenden Gleichkanalstörabstand berechnen.

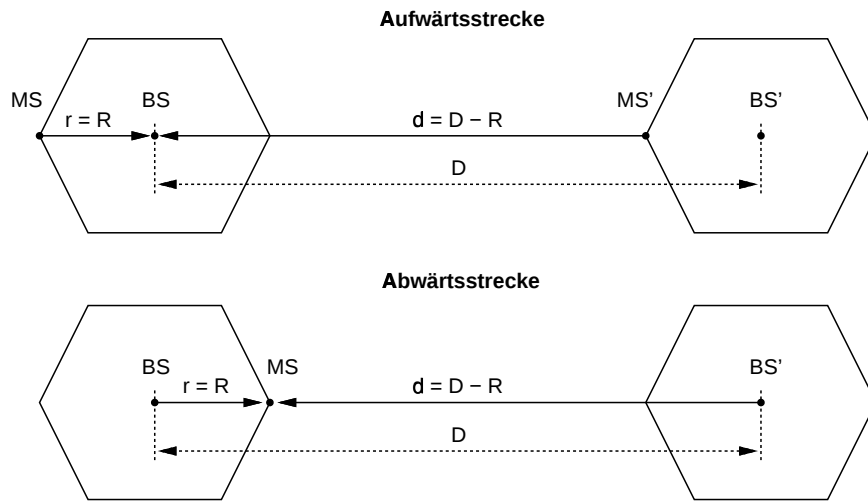


Abbildung 9.2: Geometrie des ungünstigsten Falles bei einer gestörten Übertragung auf der Aufwärts- und der Abwärtsstrecke

Es wird nun davon ausgegangen, dass der Abstand d_{N_i} zu den einzelnen Störern sich zu $d = D - R$ ergibt, was der Vorstellung entspricht, daß die Geometrie die gleiche wie bei der Betrachtung einer einzelnen störenden Nachbarzelle bleibt, aber dass die Interferenzleistung sich entsprechend erhöht. Diese Situation ist in der Realität jedoch nur auf der UL zu erreichen, falls die störenden MSen sich alle im gleichen Abstand zur gestörten BS befinden. Für die DL ist es nicht möglich, dass die gestörte MS zu allen störenden BSen den gleichen Abstand einnimmt, wenn man von der Zellmitte einmal absieht. Diese Abschätzung muss getroffen werden, da im Hinblick auf die Simulation weder eine Aussage über den momentanen Aufenthaltsort der MSen, noch über die Lage der gerade aktiven Zellen gemacht wird. Der Gleichkanalstörabstand in Abhängigkeit von der Zahl der gleichzeitig aktiven Nachbarn N_i ergibt sich demnach zu:

$$C/I = 10 \log \frac{P_s 10^{-L_p(r=R)/10}}{\sum_{N_i=1}^6 P_s 10^{-L_p(d_{N_i}=D-R)/10}} = L_p(q-1) - 10 \log N_i \quad (9.12)$$

mit $N_i \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq N_i \leq 6$. Nach dem HATA-OKUMURA-Modell, vgl. Gl. 9.10, S. 175, ergibt sich dann bei einer Antennenhöhe der BS $h_b = 30$ m:

$$C/I = 35,22 \log(\sqrt{3 N_c} - 1) - 10 \log N_i. \quad (9.13)$$

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 9.3 für den Fall maximaler Störleistung bei $N_i = 6$ Störern in Abhängigkeit von der Zellgruppengröße N_c dargestellt. Man erkennt, dass bei Zellgruppengrößen $N_c < 16$ der laut ETS 300 392-2, vgl. Anh. A, S. 219, geforderte minimale Gleichkanalstörabstand $C/I = 19$ dB nicht eingehalten werden kann, eine beliebige Steigerung der Zellgruppengröße $N_c > 31$ aber auch keinen nennenswerten Zugewinn beim Gleichkanalstörabstand liefert. Zellgruppengrößen $N_c < 16$ können nur erzielt werden, wenn die Zellen sektorisiert werden.

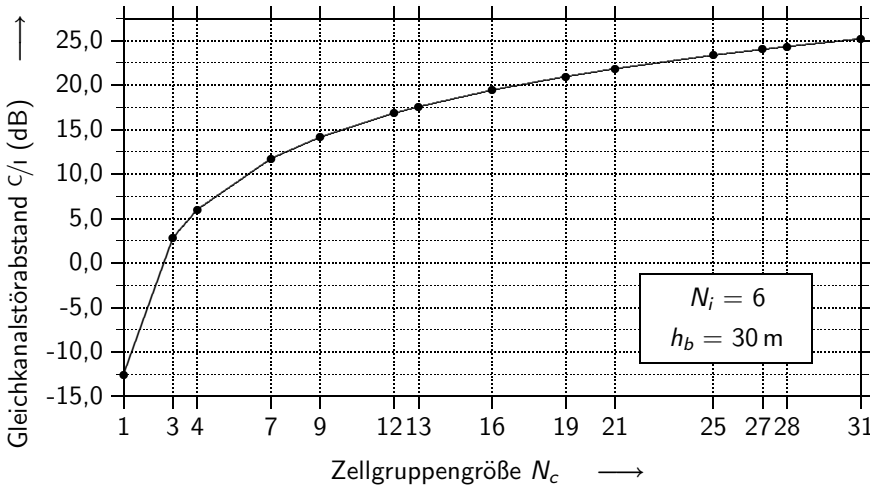


Abbildung 9.3: Gleichkanalstörabstand C/I in Abhängigkeit von der Zellgruppengröße N_c im geometrisch ungünstigsten Fall bei $N_i = 6$ Störern und BS-Antennenhöhe $h_b = 30$ m

9.2 Modell des Mobilfunkkanals

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Eigenschaften des Mobilfunkkanals wirken sich im Allgemeinen negativ auf die Übertragungsqualität und damit auf die BER aus. Das verwendete Kanalmodell bestimmt, wie an Hand der Kanaleigenschaften die BER zu berechnen ist.

Ein Kanal, der Mehrewegeausbreitung aufweist, hat keine ideale, d. h. frequenzunabhängige, Übertragungsfunktion (KAMMEYER, 1996) und wird als Breitbandkanal bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass innerhalb einer genügend schmalen Bandbreite, der sog. Kohärenzbandbreite (LEE, 1993), die Teilwellen des Empfangssignals gleiches Amplituden- und Phasenverhalten aufweisen, kann innerhalb dieser Bandbreite die Übertragungsfunktion als ideal angenommen werden; der Kanal wird dann als Schmalbandkanal bezeichnet. Im Folgenden werden Modelle für im Tiefpassbereich beschriebene Schmal- und Breitbandkanäle vorgestellt.

Die Stoßantwort eines Schmalbandkanals kann nach PARSONS (1992) mit $h(t) = \delta(t) (x(t) + j y(t))$ bezeichnet werden, wobei $x(t)$ und $y(t)$ als statistisch unabhängige, gaußverteilte Zufallsvariablen gleicher Leistung σ^2 mit einem dem Dopplerspektrum $S(f, f_d)$ entsprechendem Leistungsdichtespektrum angenommen werden können. Dominiert bei der Ausbreitung kein Ausbreitungspfad, dann gehorcht die Amplitude einer Rayleigh-Verteilung, ansonsten einer Rice-Verteilung (DAVID und BENKNER, 1996).

Bei der Modellierung des frequenzselektiven Breitbandkanals muss im Gegensatz zum Schmalbandkanal die durch Zeitdispersion verursachte gegenseitige Beeinflussung benachbarter Symbole berücksichtigt werden. Dieser als *Intersymbolinterferenz* (ISI) bezeichnete Effekt ergibt eine Erhöhung der BER und kann im Extremfall dazu führen, dass kein Empfang mehr möglich ist.

Für die Realisation eines Breitband-Kanalmodells wird nun angenommen, dass die Kanalstoßantwort diskret und jeder Wert der Stoßantwort aus der Interferenz aller in einem kleinen Zeitraum interferierender Teil-Signalkomponenten entstanden sei (KAMMEYER, 1996).

Die zunächst beliebig vielen Ausbreitungswege werden dadurch auf wenige Pfade reduziert, die sich jeweils wie Schmalbandkanäle verhalten (JAKES, 1974). Der Effekt der Laufzeitspreizung wird durch Verzögerung der einzelnen Signalkomponenten um die mittlere Verzögerungszeit τ_j der N_{ts} Pfade der Sendesignalausbreitung bzw. der N_{tc} Pfade der Gleichkanalstörung modelliert, vgl. Abb. 9.4, S. 179.

Das Sendesignal, die komplexe Hüllkurve $s_T(t) = s_{Tr}(t) + j s_{Ti}(t)$, vgl. Gl. 2.4, S. 30, mit ihrer Inphasekomponente $s_{Tr}(t)$ und ihrer Quadraturkomponente $s_{Ti}(t)$ (LÜKE, 1995), gelangt über verschiedene Pfade als $r_T(t) = r_{Tr}(t) + j r_{Ti}(t)$ zum Empfänger.

Die in Abs. 9.1.2, S. 173, vorgestellten CCIs werden im Kanalmodell berücksichtigt, indem alle Gleichkanalstörer durch eine Signalquelle $c_T(t) = c_{Tr}(t) + j c_{Ti}(t)$ nachgebildet werden. Dieses Signal $c_T(t)$ wird mit unbestimmter Phase relativ zum Sendesignal $s_T(t)$ über eine beliebige Anzahl von Pfaden übertragen, die jeweils als Schmalbandkanal mit Verzögerungsglied realisiert sind (LIU und FEHER, 1991).

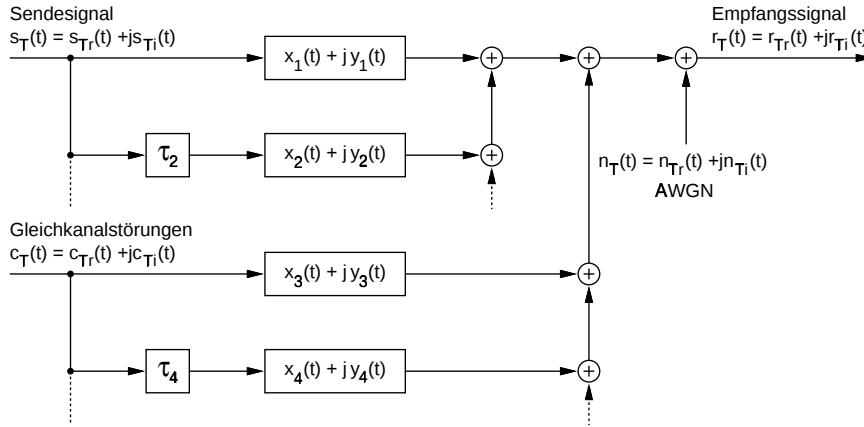


Abbildung 9.4: Modell für einen Breitbandkanal mit Gleichkanalstörungen und additivem, weißem gaußischem Rauschen

Auf die Summe aller Sende- und Gleichkanalsignalphade wirkt im Bandpassbereich additives, weißes gaußisches Rauschen (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN) $n_T(t) = n_{Tr}(t) + j n_{Ti}(t)$. Das endgültige Empfangssignal $r_T(t)$ genügt bei einer Abtastperiode T folgender Gleichung:

$$\begin{aligned}
 r_{Tr}(t) = & \sum_{j=1}^{N_{ts}} x_j(t) s_{Tr}(T - \tau_j) - y_j(t) s_{Ti}(T - \tau_j) + \\
 & \sum_{j=N_{ts}+1}^{N_{ts}+N_{tc}} x_j(t) c_{Tr}(T - \tau_j) - y_j(t) c_{Ti}(T - \tau_j) + \\
 & n_{Tr}(t),
 \end{aligned} \tag{9.14}$$

$$\begin{aligned}
r_{Ti}(t) = & \sum_{j=1}^{N_{ts}} x_j(t) s_{Ti}(T - \tau_j) + y_j(t) s_{Tr}(T - \tau_j) + \\
& \sum_{j=N_{ts}+1}^{N_{ts}+N_{tc}} x_j(t) c_{Ti}(T - \tau_j) + y_j(t) c_{Tr}(T - \tau_j) + \\
& n_{Ti}(t).
\end{aligned} \tag{9.15}$$

In [EUROPEAN COMMUNITIES \(1989\)](#) wurden verschiedene Kanaltypen nach ihrer Morphologie und Topographie klassifiziert:

Rural Area (RA): ländliche, nicht hügelige Gebiete ohne große Hindernisse ($0,08 \mu\text{s} \leq S_d \leq 0,12 \mu\text{s}$),

Typical Urban (TU): städtische, nicht hügelige Gebiete ($0,9 \mu\text{s} \leq S_d \leq 1,1 \mu\text{s}$),

Bad Urban (BU): städtische, hügelige Gebiete ($2,3 \mu\text{s} \leq S_d \leq 2,7 \mu\text{s}$) und

Hilly Terrain (HT): bergiges Gelände ($4,8 \mu\text{s} \leq S_d \leq 5,2 \mu\text{s}$).

Hierbei ist das Verzögerungsleistungsprofil $P(t)$ abhängig vom jeweiligen Kanaltyp wie folgt definiert:

$$P(t) = \begin{cases} e^{-9,2t} & \text{für } 0 \mu\text{s} \leq t \leq 0,7 \mu\text{s}, \quad (\text{RA}) \\ 0 & \text{sonst,} \\ e^{-t} & \text{für } 0 \mu\text{s} \leq t \leq 7 \mu\text{s}, \quad (\text{TU}) \\ 0 & \text{sonst,} \\ e^{-t} & \text{für } 0 \mu\text{s} \leq t \leq 5 \mu\text{s}, \quad (\text{BU}) \\ 0,5 e^{5-t} & \text{für } 5 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \mu\text{s}, \\ 0 & \text{sonst,} \\ e^{-3,5t} & \text{für } 0 \mu\text{s} \leq t \leq 2 \mu\text{s}, \quad (\text{HT}) \\ 0,1 e^{15-t} & \text{für } 15 \mu\text{s} \leq t \leq 20 \mu\text{s}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \tag{9.16}$$

Die in Gl. 9.4, S. 172, definierte Laufzeitspreizung wird mit obigen Verzögerungsleistungsprofilen für das Breitbandkanalmodell in Abb. 9.4, S. 179, mit N_{ts} Pfaden und $P_0 = \sum_{j=1}^{N_{ts}} P(\tau_j)$ folgendermaßen berechnet:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{P_0} \sum_{j=1}^{N_{ts}} \tau_j^2 P(\tau_j) - \left(\frac{1}{P_0} \sum_{j=1}^{N_{ts}} \tau_j P(\tau_j) \right)^2} \quad (\text{s}). \tag{9.17}$$

Entsprechend ETS 300 392-2, vgl. Anh. A, S. 219, sind in Tab. 9.3 die Kanalparameter für TETRA aufgeführt. Es werden nur $N_{ts} = 2$ Pfade berücksichtigt. In Bezug auf den Kanaltyp bezeichnet „x“ die mittlere Geschwindigkeit der MSen in km/h. Die in dieser Arbeit verwendeten Kanaltypen sind TU50, BU50, HT200 und RA200. Die angegebenen mittleren Leistungen der jeweiligen Pfade sind auf die mittlere Leistung des ersten, unverzögerten Pfades ($\tau_1 = 0$) normiert. Die zu den verschiedenen Schwundprozessen gehörigen Dopplerspektren S_{Ry} für Rayleigh-Schwund und S_{Ri} für Rice-Schwund sind mit der maximalen Dopplerfrequenz $f_{d,max} = f_d(\alpha = 0)$, vgl. Gl. 9.5, S. 172, wie folgt definiert:

$$S_{Ry}(f, f_{d,max}) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{f_{d,max}^2 - f^2}} & \text{für } |f| < f_{d,max}, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (9.18)$$

$$S_{Ri}(f, f_{d,max}) = 1/2 S_{Ry}(f, f_{d,max}) + 1/2 \delta(f - 0,7 f_{d,max}) \quad (9.19)$$

mit den zugehörigen Autokorrelationsfunktionen (AKF)

$$\varphi_{Ry}(t) = J_0(2\pi f_{d,max} t), \quad (9.20)$$

$$\varphi_{Ri}(t) = 1/2 J_0(2\pi f_{d,max} t) + 1/2 e^{j2\pi 0,7 f_{d,max} t}, \quad (9.21)$$

wobei $J_0(x)$ die besselsche Funktion erster Gattung nullter Ordnung bezeichnet (BRONSTEIN und SEMENDJAJEW, 1996; STUEBER, 1996).

Tabelle 9.3: Die Kanalparameter für TETRA

Kanaltyp	Pfad Nr. N_{ts}	Verzögerungszeit τ_j [μs]	Mittlere normierte Leistung (dB)	Schwundprozess	Laufzeit-spreizung S_d [μs]
RA x	1	0	0	Rice	0
TU x	1	0	0	Rayleigh	0,408
	2	5	-22,3		
BU x	1	0	0	Rayleigh	2,357
	2	5	-3,0		
HT x	1	0	0	Rayleigh	4,211
	2	15	-8,6		

9.3 Modell eines TETRA-Empfängers

9.3.1 Filtern, Entzerren, Abtasten und Entscheiden

Ziel der Entwicklung eines Empfängermodells für das TETRA-System ist die analytische Bestimmung der BER von ungeschützten Bits in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Mobilfunkkanals sowie den Eigenschaften des Filters, des Entzerrers und des Abtasters.

Um den Träger des empfangenen Bandpasssignals $r(t)$ zu entfernen, werde ein differentieller, kohärenter und optimaler Basisbandempfänger benutzt (LEE, 1997; LIU und FEHER, 1989; MEYR et al., 1997). Dabei werde das Bandpasssignal zunächst mit einer Referenzschwingung multipliziert, die der Frequenz der Trägerfrequenz entsprechen muss, und anschließend mit einem SRRC-Tiefpass $g(t)$ gefiltert (Optimalfilter, *Matched Filter*), so dass man die Inphase- und Quadraturkomponente des empfangenen und gefilterten Signals $u_T(t)$ im äquivalenten Tiefpassbereich erhält (LÜKE, 1995):

$$u_T(t) = (r_{Tr}(t) + j r_{Ti}(t)) * g(t) = u_{Tr}(t) + j u_{Ti}(t). \quad (9.22)$$

Ferner sei angenommen, dass ein adaptiver Entzerrer in der Lage sei, die beim zeitdispersiven Mobilfunkkanal auftretenden ISIen dadurch zu eliminieren, dass die Amplituden der verzögerten und somit unerwünschten Signalkomponenten stark gedämpft werden. Abschließend sei angenommen, dass das empfangene Signal zu den Zeitpunkten $t = nT$ abgetastet werde und ΔT die Verzögerung des Empfangssignals bezeichne.

9.3.2 Bestimmung des Bitfehlerverhältnisses

Bei allen *Differential Phase Shift Keying* (DPSK)-Modulationsverfahren steckt die Information in der Phasendifferenz zweier aufeinanderfolgender Signale. Um das BER mathematisch formulieren zu können, ist es daher notwendig, die empfangenen Phasen zu einem Zeitpunkt t_0 und zu einem Zeitpunkt $t_0 + T$ zu betrachten, wobei T die Symboldauer darstellt. Geht man von Übertragungsstörungen aus, deren Amplituden im äquivalenten Tiefpassbereich für den Real- und Imaginärteil jeweils gaußverteilt und mittelwertfrei sind, kann man die empfangenen Inphase- und Quadraturkomponenten ebenfalls als gaußverteilt annehmen (LEE, 1997).

Diese können für die Zeitpunkte $t_0 \stackrel{!}{=} 0$ und $t_0 + T$ mit einer vierdimen-

sionalen Verbundverteilungsdichte beschrieben werden ([PROAKIS, 1995](#)):

$$p(\mathcal{X}) = \frac{1}{4\pi^2 \sqrt{\det \mathcal{M}}} e^{-1/2 \mathcal{X}^T \mathcal{M}^{-1} \mathcal{X}}, \quad (9.23)$$

wobei für den Vektor $\mathcal{X}^T = (u_{Tr}(0) \ u_{Ti}(0) \ u_{Tr}(T) \ u_{Ti}(T))$ gelte und $\mathcal{M}$ die Kovarianzmatrix sei, die die Korrelation der vier Variablen beschreibt:

$$\begin{aligned} \mathcal{M} &= \begin{pmatrix} E[u_{Tr}^2(0)] & E[u_{Tr}(0) u_{Ti}(0)] & E[u_{Tr}(0) u_{Tr}(T)] & E[u_{Tr}(0) u_{Ti}(T)] \\ E[u_{Ti}(0) u_{Tr}(0)] & E[u_{Ti}^2(0)] & E[u_{Ti}(0) u_{Tr}(T)] & E[u_{Ti}(0) u_{Ti}(T)] \\ E[u_{Tr}(T) u_{Tr}(0)] & E[u_{Tr}(T) u_{Ti}(0)] & E[u_{Tr}^2(T)] & E[u_{Tr}(T) u_{Ti}(T)] \\ E[u_{Ti}(T) u_{Tr}(0)] & E[u_{Ti}(T) u_{Ti}(0)] & E[u_{Ti}(T) u_{Tr}(T)] & E[u_{Ti}^2(T)] \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \sigma_{13}^2 & \sigma_{14}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \sigma_{23}^2 & \sigma_{24}^2 \\ \sigma_{31}^2 & \sigma_{32}^2 & \sigma_{33}^2 & \sigma_{34}^2 \\ \sigma_{41}^2 & \sigma_{42}^2 & \sigma_{43}^2 & \sigma_{44}^2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9.24)$$

Ist $\mathcal{M}$ bekannt, dann kann das BER p_{BER} für ein $\pi/4$ -DQPSK-Verfahren wie folgt berechnet werden ([LIU und FEHER, 1991](#)):

$$p_{BER} = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{16} \sum_{m=0}^3 \left(\frac{g(\Theta_m) \cos(\Theta_m)}{\sqrt{1-h(\Theta_m)^2}} + \frac{h(\Theta_m) \sin(\Theta_m)}{\sqrt{1-g(\Theta_m)^2}} \right) \quad (9.25)$$

mit $\Theta_m = (2m+1)\pi/4$ für $m \in \mathbb{N}_0 \wedge m \leq 3$ und

$$g(\Theta_m) = \frac{\sigma_{13}^2}{\sigma_{11} \sigma_{33}} \quad \text{und} \quad h(\Theta_m) = \frac{\sigma_{14}^2}{\sigma_{11} \sigma_{33}}. \quad (9.26)$$

Es kann nach einiger Rechnung gezeigt werden, dass die nach Gl. 9.26 benötigten Erwartungswerte σ_{ij} , d. h. die benötigten Elemente der Kovarianzmatrix, folgenden Gleichungen genügen ([SEIDENBERG, 1997](#); [LIU und FEHER, 1991](#)):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^2 &= \sum_{j=1}^{N_{ts}} \sigma_j^2 \left(2 \cos(\Theta_m) \varphi_{gg}(-\tau_j) \varphi_{gg}(-T - \tau_j) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT) \right) + \sigma_3^2 + \sigma_n^2 \sigma_3^2 + \sigma_n^2, \end{aligned} \quad (9.27)$$

$$\sigma_{13}^2 = \sum_{j=1}^{N_{ts}} \varphi_{xx}(T) \left(\cos(\Theta_m) (\varphi_{gg}^2(-\tau_j) + \right. \quad (9.28)$$

$$\left. \varphi_{gg}(-\tau_j + T) \varphi_{gg}(-\tau_j - T) \right) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT) \Big) + \\ \varphi_{xx}(T) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT - \Delta T) + \varphi_{nn}(T),$$

$$\sigma_{14}^2 = \sum_{j=1}^{N_{ts}} \varphi_{xx}(T) \sin(\Theta_m) (\varphi_{gg}^2(-\tau_j) - \quad (9.29)$$

$$\left. \varphi_{gg}(-\tau_j + T) \varphi_{gg}(-\tau_j - T) \right) + \\ \varphi_{xx}(T) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT - \Delta T),$$

$$\sigma_{33}^2 = \sum_{j=1}^{N_{ts}} \sigma_j^2 \left(2 \cos(\Theta_m) \varphi_{gg}(-\tau_j) \varphi_{gg}(T - \tau_j) + \quad (9.30)$$

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT) \right) + \sigma_3^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau_j - kT - \Delta T) + \sigma_n^2.$$

Hierbei sei angenommen, dass ein idealer Filter verwendet werde und somit keine Frequenz- und Phasenfehler auftreten. $\varphi_{gg}(t)$ ist die Autokorrelationsfunktion (AKF) des SRRC-Filters, wobei der sog. *Roll-Off*-Faktor α die Flankensteilheit und die überschüssige Bandbreite des Tiefpasses bestimmt ([AKAIWA, 1997](#); [STUEBER, 1996](#)):

$$\varphi_{gg}(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \frac{\cos(\alpha \pi t/T)}{1 - (2\alpha t/T)^2}. \quad (9.31)$$

Ferner gelte mit [LIU und FEHER \(1991\)](#):

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \varphi_{gg}^2(-\tau - kT - \Delta T) = 1 - \alpha/4 \left(1 - \cos(2\pi(\tau + \Delta T)/T) \right). \quad (9.32)$$

Für die AKF des Schmalbandkanals $\varphi_{xx}(t)$ gilt zum Zeitpunkt T : $\varphi_{xx}(T) = E[x_i(0) x_i(T)] = E[y_i(0) y_i(T)]$. Sie entspricht im unverzögerten Fall der

AKF $\varphi_{Ry}(t)$, vgl. Gl. 9.20, S. 181, die zum Dopplerspektrum $S_{Ry}(f, f_{d,max})$ gehört, und im verzögerten Fall der zu $S_{Ri}(f, f_{d,max})$ gehörenden AKF $\varphi_{Ri}(t)$, vgl. Gl. 9.21, S. 181. Es werden insgesamt zwei Pfade für das Ausbreitungsverhalten des Sendesignals verwendet ($N_{ts} \stackrel{!}{=} 2$). Außerdem wird angenommen, dass die Verzögerung der CCIs $\Delta T \in [0; T]$ gleichverteilt ist. Aus der Überlegung $\int_0^T \cos(2\pi(\tau_j + \Delta T)/T) d\Delta T = 0$ ergibt sich, dass CCIs unabhängig von einer Verzögerung τ_j sind und somit durch ein einziges Schmalbandkanalmodell nachgebildet werden können ($N_{tc} \stackrel{!}{=} 1$). σ_j^2 bezeichnet für $1 \leq j \leq N_{ts} = 2$ die jeweilige Sendeleistung P_s der einzelnen Pfade nach Tab. 9.3, S. 181, und σ_3^2 die nach Gl. 9.1, S. 171, pfadverlustbehaftete Empfangsleistung P_r beim gleichkanalgestörten Empfänger. Schließlich gilt für die AKF $\varphi_{nn}(t)$ des AWGN-Rauschsignals mit der Rauschleistung σ_n^2 :

$$\varphi_{nn}(t) = \sigma_n^2 \varphi_{gg}(t). \quad (9.33)$$

9.4 Fehlermusterdateien für TETRA-Pakete

Die Kanalausbreitungseigenschaften werden zur Laufzeit der Simulation, vgl. Kap. 10, S. 193, an Hand im Voraus erstellter Fehlermusterdateien berücksichtigt. Diese beziehen sich dabei auf die Übertragung einzelner Blöcke oberhalb der Kanalcodierung, vgl. Abs. 2.6.4.1.1, S. 34, und Abs. 2.7.1.2.7, S. 82, und gestatten demnach eine Aussage darüber, ob ein ganzer Block erfolgreich übertragen wurde oder verworfen werden muss.

Mit Gl. 9.25, S. 183, kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der einzelne ungeschützte Bits fehlerhaft übertragen werden. Es ist aber noch keine Aussage darüber möglich, wie diese Fehler typischerweise in einem Block verteilt sind. Nachdem ein mit Hilfe von Messungen parametrisiertes Fehlerverteilungsmodell vorgestellt wurde, vgl. Abs. 9.4.1, wird die gesamte Kanalcodierung nachgebildet, um schließlich das MER zu erhalten, vgl. Abs. 9.4.2, S. 187.

9.4.1 Modell für die Verteilung von Fehlerbüschellängen bei TETRA

GILBERT (1960) hat ein Fehlermodell mit Gedächtnis basierend auf einer zweigliedrigen Markoff-Kette entwickelt, mit dessen Hilfe Korrelationen auftretender Bitfehler nachgebildet werden können. Dieses Modell ist von FRITCHMAN (1967) auf $N_f + N_e$ Zustände erweitert worden, wobei N_f der

Anzahl fehlerfreier und N_e der Anzahl fehlerbehafteter Zustände entspricht. Nach CHOUINARD et al. (1988) reicht es aus, zur Modellierung realer, digitaler Kanäle, deren Fehlerverhalten anhand von Messungen ausgewertet wurde, nur Zustandsübergänge in den Ausgangszustand oder in den Zustand einer anderen Gruppe zu betrachten, d. h. Zustandswechsel innerhalb derselben Gruppe sind nicht erlaubt, vgl. Abb. 9.5. Weiterhin wird nur ein Fehlerzustand benötigt ($N_e \stackrel{!}{=} 1$), da sich die experimentell ermittelten Verteilungen der Büschellängen i. d. R. durch eine einzige Exponentialfunktion beschreiben lassen.

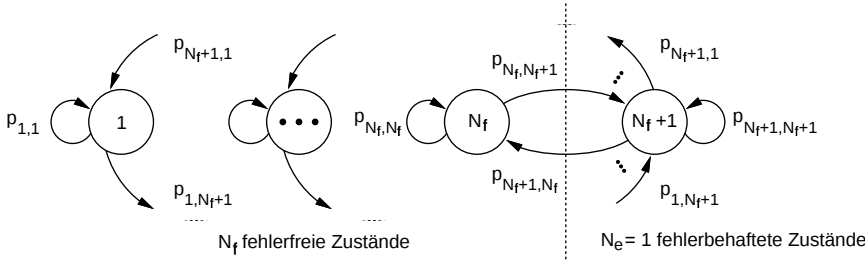


Abbildung 9.5: Vereinfachtes Bitfehlermodell nach Fritchman mit N_f fehlerfreien und $N_e = 1$ fehlerbehafteten Zuständen

SEMMAR et al. (1991) haben im für TETRA relevanten Frequenzbereich experimentell die Verteilung der Fehlerbüschellängen bei DQPSK-Modulation ermittelt und obiges Modell entsprechend parametrisiert. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass $2/3$ aller beobachteten Bitfehler innerhalb von Büscheln auftreten und dass trotz stark variierender BERs bei unterschiedlichen Kanaltypen die Verteilungen der Fehlerbüschellängen sehr ähnlich für das jeweilige Modulationsverfahren sind und somit das Modulationsverfahren als maßgebend für die Verteilung der Fehlerbüschellängen angesehen werden kann. SEMMAR et al. (1991) haben für die Rückkehrwahrscheinlichkeit in den Fehlerzustand $p_{N_f+N_e, N_f+N_e} = 0,3$ im Falle der DPSK-Modulation gemessen.

Ausgehend von der mit Hilfe von Gl. 9.25, S. 183, berechneten Wahrscheinlichkeit für Bitfehler p_{BER} und dem für DPSK-Modulation parametrisierten Bitfehlermodell nach FRITCHMAN (1967) werden im Folgenden

Fehlerbüschellängen mit einer zweigliedrigen Markoff-Kette mit $N_f = 1$ und $N_e = 1$ modelliert, wobei für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Fehlerzustand $P(1) = p_{BER}$ und für die Rückkehrwahrscheinlichkeit in den Fehlerzustand $p_{11} = 0,3$ gelten.

9.4.2 Ermittlung des Paketfehlerverhältnisses

Abb. 9.6 zeigt schematisch, auf welche Weise das MER und das BER zur späteren Verwendung während einer Simulation in Form von Fehlermusterdateien bestimmt wurden.

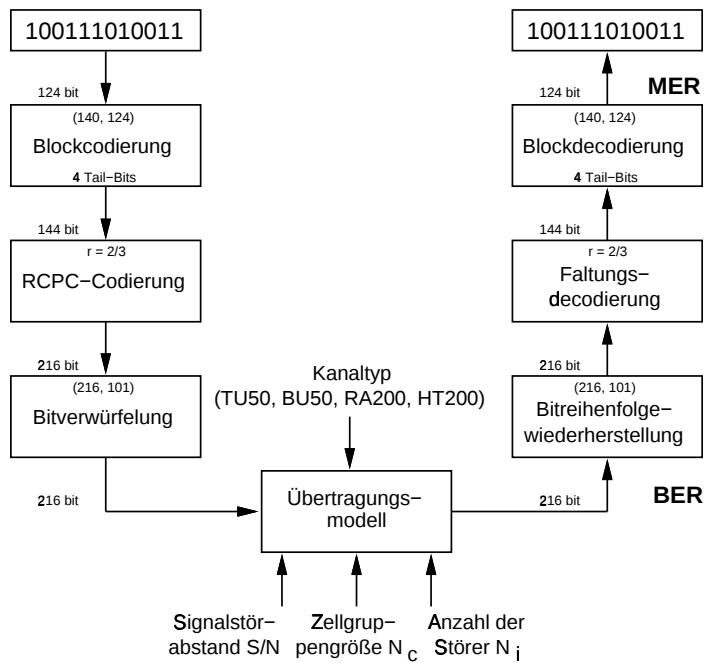


Abbildung 9.6: Schematische Vorgehensweise zur Bestimmung des Paketfehlerverhältnisses (MER)

Nach Abs. 2.6.4.1.1, S. 34, entsprechen die über den jeweiligen Kanal zu übertragenden Bits den aus Typ-1-Bits durch Kanalcodierung entstandenen Typ-5-Bits. Um das MER ermitteln zu können, muss der gesam-

te Fehlerschutz von TETRA nachgebildet werden. Zu diesem Zweck wurden basierend auf der Klassenbibliothek SPEETCL, vgl. Kap. 7, S. 155, die Funktionseinheiten Blockcodierung und -decodierung, Faltungscodierung und Punktierung, Faltungsdecodierung, Bitverwürfelung und Bitreihenfolgewiederherstellung erstellt. Ferner wurde das in der SPEETCL implementierte Übertragungsmodell zur Ermittlung des BERs, vgl. Abs. C.10, S. 253, verwendet.

Als Parameter gehen in das Übertragungsmodell das verwendete Kanalmodell (TU50, BU50, HT200 oder RA200), die Zellgruppengröße N_c , die Anzahl der Störer N_i und der Signalstörabstand S/N ein. Die Fehlermusterdatei und damit das MER werden bestimmt, indem 124 bit breite Pakete mit zufälligem, gleichverteiltem Inhalt kanalcodiert werden und danach mit Fehlerbüscheln aufgrund von AWGN und CCIs gestört werden. Abschließend wird das Ergebnis der Kanaldecodierung „Paket fehlerhaft bzw. nicht fehlerhaft übertragen“ in der Fehlermusterdatei gespeichert. Somit können Fehlermusterdateien bei V+D für die logischen Kanäle SCH/HD, BNCH oder STCH, vgl. Abb. 2.12, S. 39, und bei PDO für den logischen Kanal NBCH, vgl. Abb. 2.27, S. 82, erstellt werden.

9.5 Paketfehler für verschiedene Zellgruppengrößen und Signalstörabstände

Das Paketfehlerverhältnis (*Message Error Ratio*, MER) ist für die vier Kanaltypen TU50, BU50, RA200 und HT200 unter Variation der Zellgruppengröße N_c und des Signalstörabstandes S/N bei $N_i = 0-6$ Gleichkanalstörern simulativ ermittelt worden. Die exakten Ergebnisse befinden sich in Anh. D, S. 261.

Folgende Simulationsparameter wurden hierbei verwendet: Trägerfrequenz $f_c = 400$ MHz, Symbolrate $1/T = 18$ kHz, keine Abtast- und Frequenzfehler, optimale Entzerrung, Gleichkanalverzögerung $\Delta T = T/2$, Roll-Off-Faktor $\alpha = 0,35$, Antennenhöhe der MS $h_m = 1,5$ m und der BS $h_b = 30$ m.

In den Abbn. 9.7 bis 9.10, S. 190, ist das MER in Abhängigkeit von der Anzahl der Gleichkanalstörer für die vier Kanaltypen bei verschiedenen Zellgruppengrößen N_c ohne Rauschen dargestellt. Der Kanal HT200 zeichnet sich als schlechtesten Kanal durch ein hohes MER von über 2 % aus. Etwas günstiger verhält sich der Kanal BU50, bei dem das MER zwischen 0,1 % und 1,0 % für die für TETRA relevanten Zellgruppengrößen $N_c \geq 16$ liegt,

vgl. Abs. 9.1.2, S. 173. Ebenfalls für $N_c \geq 16$ weisen die Kanäle TU50 und RA200 das geringste Fehlerverhalten auf; das MER liegt stets unter 1 %.

Diese Reihenfolge der Kanäle in Bezug auf ihre Übertragungsqualität war zu erwarten, wie ein Vergleich der Kanalparameter zeigt, vgl. Tab. 9.3, S. 181. Beim Kanal HT200 treten nach langer Verzögerungszeit noch Echos mit hoher Signalenergie auf. Die mittlere Verzögerung des zweiten Pfades ist bei BU50 und TU50 gleich, jedoch sind die reflektierten Signalkomponenten beim Kanal BU50 wegen der dichten Bebauung viel schwächer gedämpft als beim Kanal TU50. Der Kanal RA200 ist sehr günstig, da Sichtkontakt zur BS besteht und es aufgrund der fehlenden Hindernisse zu keinen Reflexionen kommt.

In den Abb. 9.7 bis 9.10, S. 190, sieht man deutlich den wesentlichen Einfluss der Zellgruppengröße auf das MER. Dieser nimmt aufgrund Gl. 9.13, S. 177, mit steigendem N_c ab, so dass die einzelnen Kurven für größere Zellgruppengrößen enger beieinander liegen.

In den Abb. 9.11 bis 9.14, S. 191, ist bei konstanter Zellgruppengröße $N_c = 21$ der Einfluss des Rauschens für die vier Kanaltypen dargestellt. Wie in den vorhergehenden Abbildungen zeigen die Kanäle TU50 und RA200 bzw. BU50 und HT200 ähnliches Fehlerverhalten. Bei den ersten beiden Kanälen wird bereits bei einem Signalstörabstand $S/N = 50$ dB die gleiche Übertragungsqualität erreicht wie ohne Rauschen. Im Gegensatz hierzu ist bei den ungünstigeren Kanaltypen BU50 und HT200 der Einfluss des Rauschens weitaus stärker bemerkbar; hier ist bei $S/N = 50$ dB der Idealfall noch lange nicht erreicht.

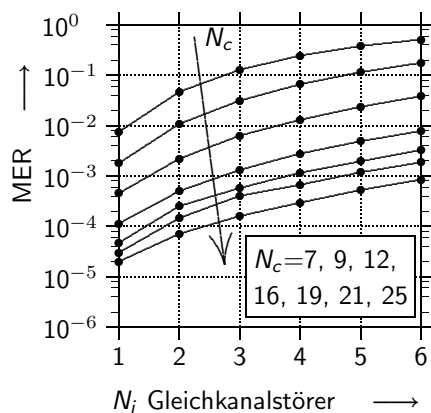


Abb. 9.7: MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal TU50

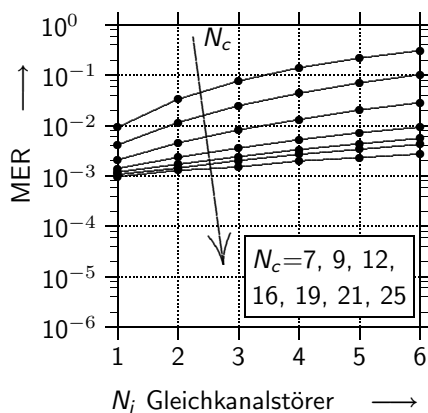


Abb. 9.8: MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal BU50

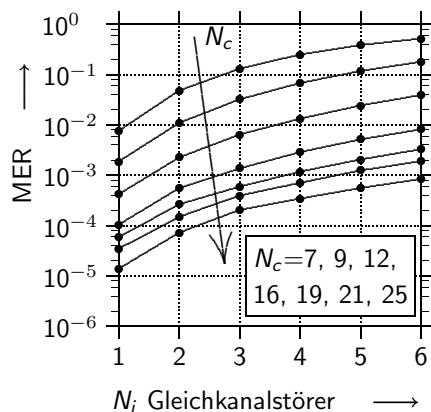


Abb. 9.9: MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal RA200

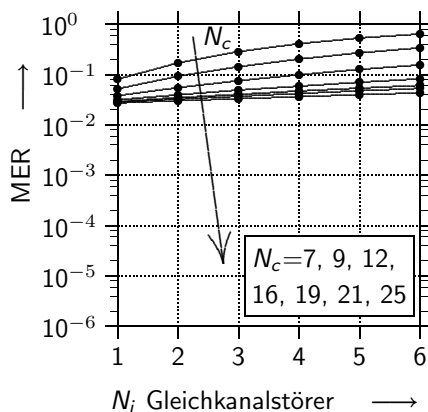


Abb. 9.10: MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal HT200

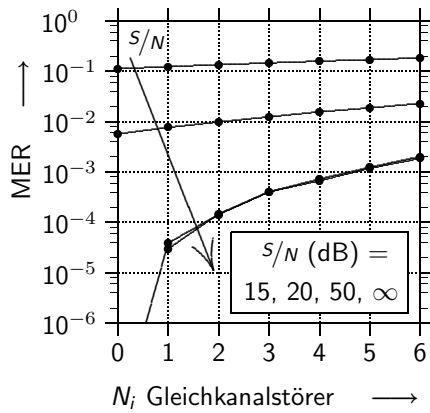


Abb. 9.11: MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal TU50

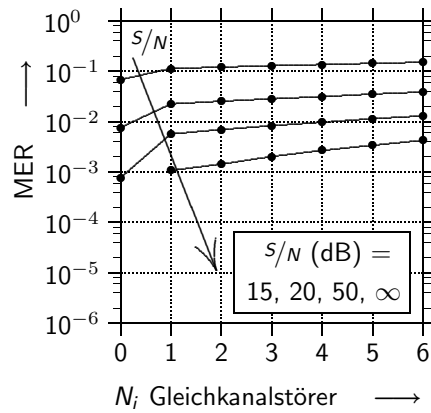


Abb. 9.12: MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal BU50

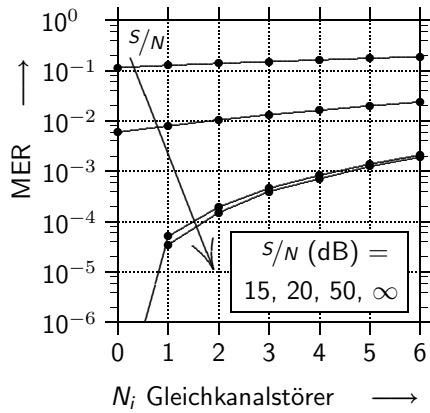


Abb. 9.13: MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal RA200

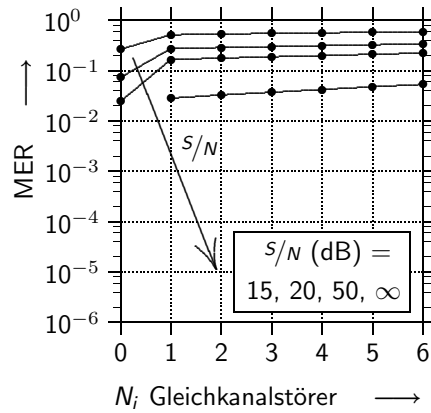


Abb. 9.14: MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal HT200

Leistungsbewertung mit dem TETRA-Simulator

Inhalt

10.1 Simulatorenbau	193
10.2 Simulative Untersuchung des Protokollstapels V+D	195
10.3 Simulative Untersuchung des Protokollstapels PDO	206

Schlüsselwörter

Ring von Gleichkanalstörern, Fehlermusterdateien, Protokollstapel, SDL, C++, LRE

Die Leistungskenngrößen der TETRA-Protokollstapel, wie z. B. Durchsatz, Paketverzögerung, Verkehrsgüte und Gesprächsaufbauzeit, etc., können erheblich optimiert werden, indem die Parameter des Zufallszugriffs und der reservierten Übertragung, ein adaptiver Algorithmus zur Kollisionsauflösung und eine optimale Abfertigungsstrategie geeignet gewählt werden. Nachdem der Aufbau des TETRA-Mobilfunksimulators vorgestellt wurde, werden die Leistungskenngrößen der beiden TETRA-Protokollstapel V+D und PDO simulativ untersucht.

10.1 Simulatorenbau

In Abb. 10.1, S. 194, ist der Aufbau des stochastischen, ereignisorientierten TETRA-Simulators dargestellt, mit dessen Hilfe die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Simulationsergebnisse erzielt wurden. Die zentrale Simulationssteuerung verwaltet, generiert und löscht alle Komponenten des Simulators (STEPPLER, 1995), die über eine Konfigurationsdatei parametrisiert werden können. Entsprechend der SPEET-Methodik, vgl. Kap. 6, S. 137, sind beide TETRA-Protokollstapel, V+D, vgl. Abs. 2.6, S. 18, und PDO, vgl. Abs. 2.7, S. 61, sowohl für die BS als auch die MS formal in SDL spezifiziert worden. Entsprechend dem in Abb. 9.1, S. 174, dargestellten Ausschnitt eines Zellnetzes erlaubt der Simulator, Kenngrößen der Protokollstapel in einer Zelle abhängig vom dynamischen Verhalten

der Protokollstapel der sich in einem Ring von bis zu sechs Gleichkanalstörzellen befindenden MSen und BSen (BUSSEL et al., 1997) zu ermitteln. Die MSen werden anhand der in der Konfigurationsdatei bestimmten Verkehrslastszenarien, vgl. Anh. B, S. 237, mit Last bestehend aus Sprach- und Datenaufträgen beaufschlagt. Die Instanzen der MSen einer Zelle kommunizieren mit der zugehörigen BS über mehrere jeweils einer Frequenz zugeordnete Aufwärts- und Abwärtsstrecken. Als Übertragungsmodell werden die in Abs. 9.4, S. 185, vorgestellten Fehlermusterdateien verwendet, so dass die Simulationen paketfehlerorientiert oberhalb der Kanalcodierung, vgl. Abs. 2.6.4.1.1, S. 34, erfolgen.

Aus diesem Grund ist die Sicherungsschicht der Protokollstapel zwar vollständig, aber erst oberhalb der Kanalcodierung spezifiziert. Da das Hauptaugenmerk der Untersuchungen auf dieser Schicht liegt, wurden die Netzschicht und die Bitübertragungsschicht nur soweit spezifiziert, als dass sie der Kommunikation mit der Sicherungsschicht dienen.

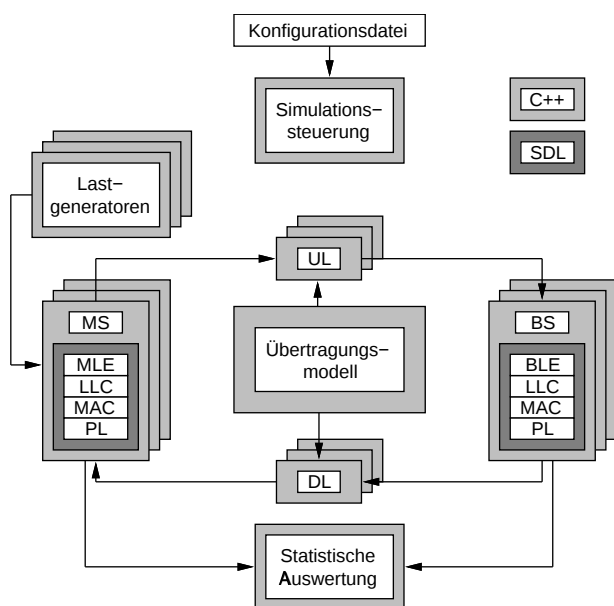


Abbildung 10.1: Aufbau des TETRA-Simulators

Wenn über die UL oder die DL ein Bündel übertragen wird, dann können andere MSen in den bis zu sechs Gleichkanalzellen dieses Bündel teilweise oder vollständig mit Gleichkanalstörungen überlagern. Abhängig von der Anzahl der aktiven Gleichkanalstörzellen wird die entsprechende Fehlermusterdatei ausgewählt.

Die formal in SDL spezifizierten Protokollstapel werden mit dem in Kap. 8, S. 163, vorgestellten Codegenerator auf das SDL-Laufzeitsystem der C++-Simulationsklassenbibliothek SPEETCL, vgl. Kap. 7, S. 155, abgebildet und zur Laufzeit emuliert. Jede einzelne Komponente des TETRA-Simulators ist eine Ereignisbehandlungsroutine im Sinne der SPEETCL, vgl. Abs. 7.3, S. 158.

Mit der in Abs. 6.6, S. 149, beschriebenen Methode sind in die formal spezifizierten Protokollstapel Messpunkte eingefügt worden. Dynamisch zur Laufzeit wertet der LRE-Algorithmus die gemessenen Zufallssequenzen aus. Als Messwerte werden hierbei nur diejenigen herangezogen, die in der inneren, von sechs Gleichkanalzellen umgebenen Zelle ermittelt werden, um Verfälschungen zu vermeiden.

10.2 Simulative Untersuchung der Parameter des Zufallszugriffs und der reservierten Übertragung beim Protokollstapel Voice plus Data

In Tab. 10.1, S. 196, sind die maßgeblichen Parameter für die mit dem TETRA-V+D-Simulator ermittelten Simulationsergebnisse aufgeführt. Die Abkürzungen für die einzelnen Parameter entsprechen – soweit vorhanden – den im TETRA-Standard, vgl. Anh. A, S. 219, aufgeführten Bezeichnungen für Konstanten und Zeitgeber.

Da für die in den Simulationen verwendeten V+D-Verbindungsarten kanalvermittelte Sprache (*Circuit Mode Voice*), Paketdatenübertragung mittlerer Größe über den AL und kleiner Größe über den BL jeweils separat die charakteristischen Kenngrößen wie Durchsatz, Paketverzögerung, Verkehrsgüte, Gesprächsaufbauzeit, etc. gemessen wurden, sind die Kenngrößen gleichen Typs pro Verbindungsart gemäß der im Folgenden aufgeführter Vorschrift zu jeweils einer gewichteten Kenngröße zusammengefasst worden, um einen Gesamtvergleich der einzelnen Simulationsläufe zu ermöglichen.

Der Beitrag einer Verbindungsart zu einer bestimmten Kenngröße ist durch den Betriebsmittelverbrauch bestimmt. Der Wichtungsfaktor richtet

sich demnach nach der verbrauchten Übertragungskapazität, die von der gemessenen Häufigkeit und der gemessenen Dauer der Übertragung abhängig ist.

Tabelle 10.1: Parameter der V+D-Simulationen

Bezeichnung	Abk.	Wert
Allgemeine Parameter		
Reservierungszuteilung		FIFO
Anzahl der Mobilstationen pro Zelle		1 000
Anzahl der Zellen		7
Anzahl der Trägerfrequenzen		3, 4, 8 [†]
Kanalmodell		Ungestört [†] , TU50, BU50, HT200, RA200
Zellgruppengröße	N_c	Ungestört [†] , 16, 19, 21, 25
Signalstörabstand	S/N	∞ [†] , 19 dB
Gesamtankunftsrate	λ_t	24,1 1/h = 0,047 1/Ts [†] ,
	λ'_t	20,5 1/h = 0,040 1/Ts
Parameter für Sprachverbindungen		
Art der Gesprächsbündelung		Nachrichtenbündelung
Wartezeit für Gesprächsaufbau auf Seiten des gerufenen Teilnehmers	T.301	2 s [†] , 5 s, 10 s
Wartezeit für Gesprächsaufbau auf Seiten des rufenden Teilnehmers	T.302	2 s [†] , 5 s, 10 s
Wartezeit für Gesprächsinitialisierung auf Seiten des rufenden Teilnehmers	T.303	2 s [†] , 5 s, 10 s
Wartezeit für Gesprächsabbau auf Seiten des rufenden Teilnehmers	T.308	2 s [†] , 5 s, 10 s
Maximale Gesprächslänge	T.310	120 s
Maximale Dauer der Sendeerlaubnis	T.311	120 s
Wartezeit für Gesprächsabbau auf Seiten der SwMI	T.321	45 s
Gruppengröße bei bestätigtem Gruppenruf		10 Teilnehmer
Advanced Link-Parameter		
Maximale Anzahl von Verbindungsaufbauwiederholungen	N.262	5

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 10.1: Parameter der V+D-Simulationen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Bezeichnung	Abk.	Wert
Maximale Anzahl von Verbindungsabbauwiederholungen	N.263	5
Maximale Länge der TL-SDU	N.271	256 byte
Fenstergröße	N.272	3
Maximale Anzahl von TL-SDU-Sendewiederholungen	N.273	5
Maximale Anzahl von Segment-Sendewiederholungen	N.274	15
Wartezeit für Verbindungsaufbau	T.261	9 Rahmen
Wartezeit für Verbindungsabbau	T.263	9 Rahmen
Basic Link-Parameter		
Maximale Länge der TL-SDU	N.251	1064 bit
Maximale Anzahl von TL-SDU-Sendewiederholungen	N.252	5
Wartezeit bis zur Sendewiederholung	T.251	9 Rahmen
Wartezeit für Bestätigungen	T.252	9 Rahmen
Wartezeit für Fragmente	T.202	9 Rahmen
Maximale Anzahl von Fragmenten pro PDU		9
Parameter des Zufallszugriffs		
Wartezeit für den Zufallszugriff	T.205	$2^\dagger$, 5, 10 Multirahmen
Wartezeit für den reservierten Zugriff	T.206	$36^\dagger$, 90, 180 Rahmen
Keine Verzögerung des ersten Zufallszugriffs	IMM	15
Erneuter Zufallszugriff nach <i>WT</i>	WT	5, 10, $15^\dagger$
Antwortmöglichkeiten auf der DL		
Gesamtanzahl der erlaubten Zufallszugriffe	Nu	5, 10, $15^\dagger$

[†] Dieser Wert stellt den verwendeten dar, wenn es in den Abbildungen nicht anders ausgewiesen ist.

Sei $\bar{\varepsilon}_{cm}$ die mittlere Verbindungsdauer für kanalvermittelte Sprache, $N_{cm,suc}$ bzw. $N_{cm,ftd}$ die Anzahl der erfolgreichen bzw. fehlgeschlagenen Verbindungseinrichtungen und werde eine fehlgeschlagene Verbindungsein-

richtung mit einer pauschalen Verbindungsdauer von $\bar{\varepsilon}_{cm, fld} = 30$ s bewertet, dann kann der Wichtungsfaktor $\hat{\omega}_{cm}$ für Sprachverbindungen folgendermaßen berechnet werden:

$$\hat{\omega}_{cm} = \frac{N_{cm, suc} \bar{\varepsilon}_{cm} + N_{cm, fld} \bar{\varepsilon}_{cm, fld}}{N_{cm, suc} + N_{cm, fld}}. \quad (10.1)$$

Mit dem TETRA-Simulator werden Szenarien für den schlechtest möglichen Fall (*Worst Case*) untersucht. Die schlechtest mögliche zeitliche Verkettung der Zeitgeber T.301 – T.308, vgl. Tab. 10.1, S. 196, führt bei aufgrund von zu geringer Kapazität oder zu schlechter Funkversorgung fehlgeschlagenen Verbindungseinrichtungen zu einem $\bar{\varepsilon}_{cm, fld} = 30$ s andauernden Betriebsmittelverbrauch, d. h. einer Reservierung eines Übertragungskanals. Analog zu Gl. 10.1 können die Wichtungsfaktoren $\hat{\omega}_{al}$ mit $\bar{\varepsilon}_{al, fld} = 15$ s für den AL und $\hat{\omega}_{bl}$ mit $\bar{\varepsilon}_{bl, fld} = 10$ s für den BL ermittelt werden. Die gewichtete Verkehrsgüte $\hat{G}$ ergibt sich dann folgendermaßen:

$$\hat{G} = \frac{G_{cm} \hat{\omega}_{cm} + G_{al} \hat{\omega}_{al} + G_{bl} \hat{\omega}_{bl}}{\hat{\omega}_{cm} + \hat{\omega}_{al} + \hat{\omega}_{bl}}, \quad (10.2)$$

wobei G_{cm} , G_{al} und G_{bl} die gemessenen Verkehrsgüten für die jeweiligen Verbindungsarten sind. Analog zu Gl. 10.2 können der gewichtete Durchsatz $\hat{S}$, die gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}$ und die gewichtete Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}$ bestimmt werden.

In Abb. 10.2, S. 199, ist der gewichtete Durchsatz $\hat{S}$, in Abb. 10.3, S. 199, die gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}$ für die in Abs. 4.1, S. 96, vorgestellten Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei S-ALOHA unter Variation der Verkehrslast dargestellt.

Ein angebotener Verkehr mit der Gesamtankunftsrate $\lambda_t = 24,1$ 1/h, vgl. Gl. 5.21, S. 119, lag allen Simulationen entsprechend dem Flughafenszenarium 10 mit der größten angenommenen Verkehrslast, vgl. Anh. B, S. 237, zu Grunde.

Besteht das Verkehrsangebot ausschließlich aus Paketdaten kurzer und mittlerer Länge, wird also Übertragungskapazität nur für kurze Zeit (ca. < 2–5 s) benötigt, dann begrenzt nicht die verfügbare Übertragungskapazität, sondern der Zufallszugriff mit dem gewählten Algorithmus der Kollisionsauflösung das System. Aus Gl. 5.21, S. 119, mit $\lambda_t = 24,1$ 1/h = 0,047 1/TS ergibt sich die um Sprachaufträge reduzierte Gesamtankunftsrate λ'_t zu:

$$\lambda'_t = \lambda_t - \lambda_s = \lambda_{sd} + \lambda_{md} = 20,5$$
 1/h = 0,040 1/TS. (10.3)

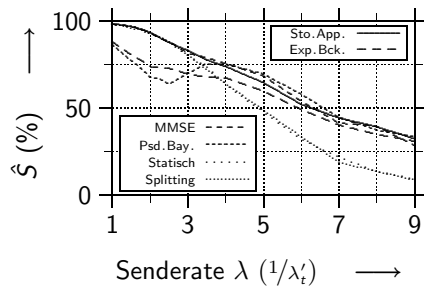


Abb. 10.2: V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen

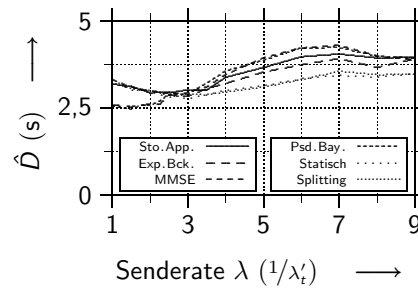


Abb. 10.3: V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen

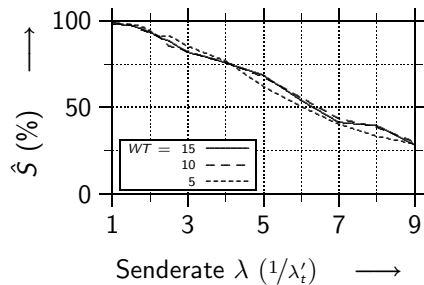


Abb. 10.4: V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $WT = 5, 10, 15$

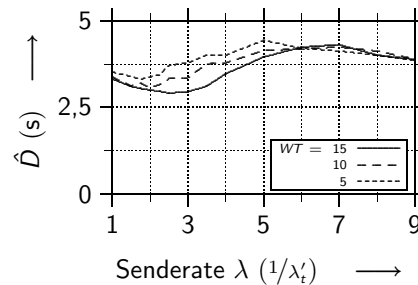


Abb. 10.5: V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $WT = 5, 10, 15$

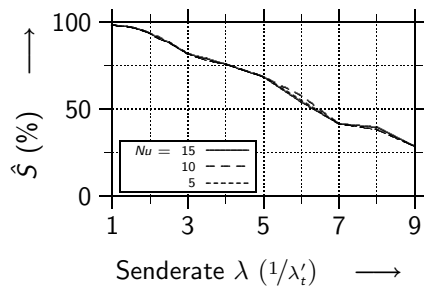


Abb. 10.6: V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $Nu = 5, 10, 15$

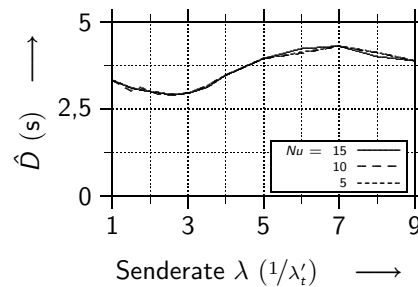


Abb. 10.7: V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $Nu = 5, 10, 15$

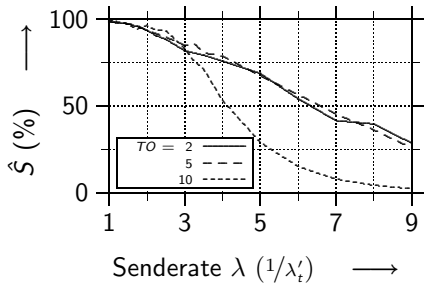


Abb. 10.8: V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 2, 5, 10$

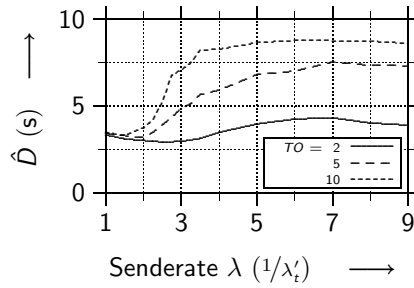


Abb. 10.9: V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 2, 5, 10$

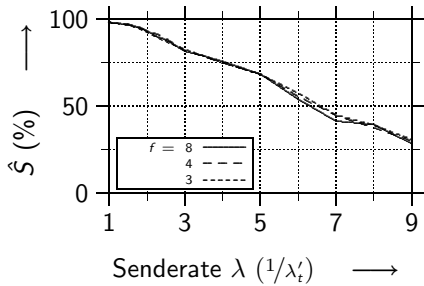


Abb. 10.10: V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$

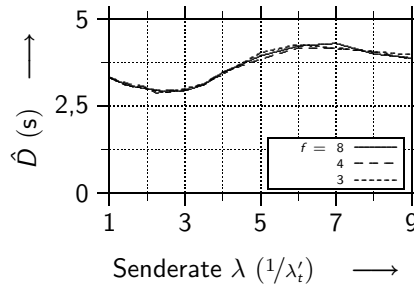


Abb. 10.11: V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$

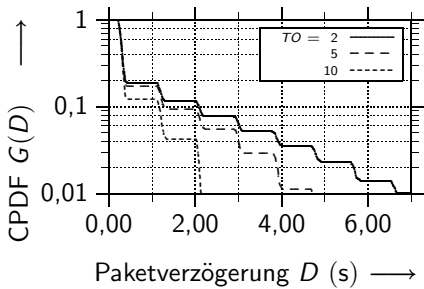


Abb. 10.12: V+D: CPDF der BL-Paketverzögerung D für $TO = 2, 5, 10$ und $\lambda/\lambda_t = 1$

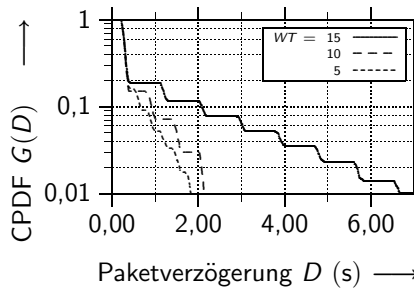


Abb. 10.13: V+D: CPDF der BL-Paketverzögerung D für $WT = 5, 10, 15$ und $\lambda/\lambda_t = 1$

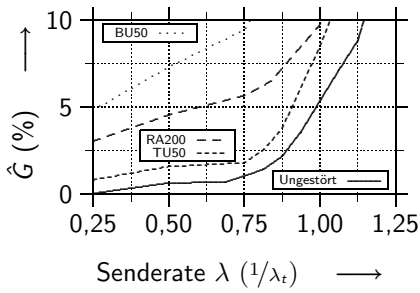


Abb. 10.14: V+D: Gew. Verkehrsgüte $\hat{G}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Kanaltypen

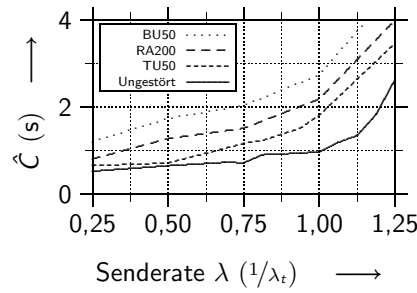


Abb. 10.15: V+D: Gew. Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}(\lambda)$ bei MMSE mit ver. Kanaltypen

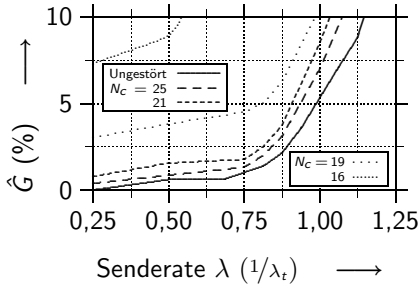


Abb. 10.16: V+D: Gewichtete Verkehrsgüte $\hat{G}(\lambda)$ bei MMSE mit versch. Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50

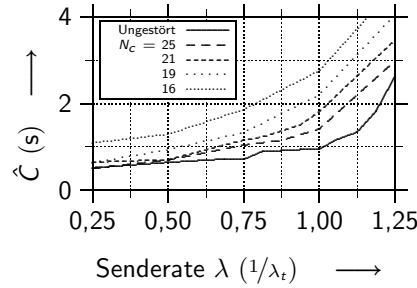


Abb. 10.17: V+D: Gewichtete Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}(\lambda)$ bei MMSE mit versch. Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50

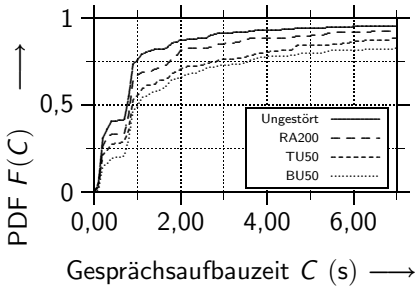


Abb. 10.18: V+D: PDF der Gesprächsaufbauzeit C für verschiedene Kanaltypen und $\lambda/\lambda_t = 1$

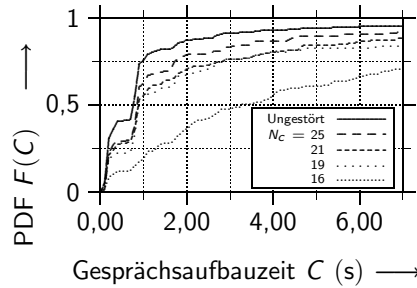


Abb. 10.19: V+D: PDF der Gesprächsaufbauzeit C für versch. Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50 und $\lambda/\lambda_t = 1$

In den beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass der exponentielle Back-off- und der Pseudo-Bayes-Algorithmus bei Senderaten $\lambda/\lambda_t < 3$ auf Kosten des Durchsatzes die Paketverzögerung optimieren. Da bei Paketdatenübertragungen der Durchsatz bedeutender als die Paketverzögerung ist, wird für die weiteren Betrachtungen der MMSE-Algorithmus verwendet. Er weist in Bezug auf den Durchsatz durchgängig das beste Verhalten auf. Wenn die Länge des Zugriffsrahmens nicht dynamisch angepasst wird, sondern statisch auf einen Wert parametrisiert wird, können nur für eine bestimmte Verkehrslastsituation Durchsatz und Paketverzögerung gleichzeitig optimiert werden. In Abb. 10.2, S. 199, ist die feste Größe des Zugriffsrahmens im Falle statischer Kollisionsauflösung auf den vom MMSE-Algorithmus bei $\lambda/\lambda_t = 1$ optimierten Wert gesetzt worden. Selbst in diesem Fall verschlechtert sich der Durchsatz bei statischer Kollisionsauflösung im Vergleich zum MMSE-Algorithmus mit steigender Senderate um bis zu 20 %. Hieraus kann ohne Einschränkung die Notwendigkeit eines Algorithmus zur Kollisionsauflösung abgeleitet werden.

Der Splitting-Algorithmus für V+D, vgl. Abs. 4.1.5, S. 101, setzt nicht nur voraus, dass der TETRA-Standard in Bezug auf die Access-Define-PDU, vgl. Tab. 2.7, S. 50, erweitert wird und somit eine reale Implementierung als unwahrscheinlich gilt, sondern auch dass diskrete anstatt rollende Zugriffsrahmen, vgl. Abs. 2.6.4.1.7.2, S. 52, zu verwenden sind. Diskrete Zugriffsrahmen wirken sich grundsätzlich nachteilig auf die maximal bedienbare Anzahl von teilnehmenden Mobilstationen beim Zufallszugriff aus, vgl. Abs. 5.4, S. 118. Zusätzlich vergrößert sich die Paketverzögerung, da die Zeitspanne zwischen dem Entstehen des erstmaligen Zugriffswunsches und der tatsächlichen erfolgreichen Quittierung des Zufallszugriffs dadurch verlängert wird, dass auf den Beginn des nächsten diskreten Zugriffsrahmens und im Falle von Kollisionen auf das Ende von bis zu sieben weiteren gewartet werden muss. Aus diesen Gründen sind Splitting-Algorithmen für V+D grundsätzlich nicht geeignet.

In den Abbn. 10.4, S. 199, bis 10.9, S. 200, sind die wichtigsten Parameter des V+D-Zufallszugriffs variiert worden: die Wartezeit WT bis zum erneuten Zufallszugriff gemessen in Antwortmöglichkeiten auf der DL, die Gesamtanzahl der erlaubten Zufallszugriffe Nu und die Zeitgeber TO (T.205, T.206, T.30x), vgl. Tab. 10.1, S. 196. In den Abbildungen sind der gewichtete Durchsatz $\hat{S}$ und die gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}$ dargestellt. Hierbei wurde jeweils der Kollisionsauflösungsalgorithmus MMSE verwendet. Mit steigender Wartezeit WT kann die Paketverzögerung ver-

bessert werden, so dass $WT = 15$ als optimaler Wert erscheint. WT hat jedoch keinen Einfluss auf den Durchsatz. Allgemein sollte WT größer als der Zeitgeber $T_{.202}$, der maximalen Zeitspanne zwischen zwei Fragmenten, gewählt werden, da Kapazitätsanforderungen i. d. R. fragmentiert über den BL übertragen werden und bei höherer Auslastung und zu niedrig eingestelltem Zeitgeber $T_{.202} < WT$ der Zufallszugriff wiederholt wird, obwohl keine Kollision oder ein Übertragungsfehler vorlagen. Dies führt dann zu einer erhöhten Paketverzögerung, vgl. Abb. 10.5, S. 199.

Ohne Einfluss sowohl auf den Durchsatz als auch auf die Paketverzögerung ist der Parameter Nu , vgl. Abbn. 10.6 u. 10.7, S. 199. Bevor die Gesamtanzahl der erlaubten Zufallszugriffe erreicht ist und somit der Parameter Nu das Systemverhalten beeinflussen könnte, laufen die Zeitgeber TO ab, solange sie mit sinnvollen, d. h. vom Benutzer tolerierten Zeitspannen belegt sind. In den Abbn. 10.8 u. 10.9, S. 200, sind der Durchsatz und die Paketverzögerung unter Variation der Zeitgeber TO zwischen 2 s und 10 s dargestellt. Während für $TO = 2$ s und $TO = 5$ s der gleiche Durchsatz erzielt werden kann, bricht dieser für größere Senderaten $\lambda/\lambda'_i > 3$ stark ein. Zeitgeber $TO < 2$ s verschlechtern den Durchsatz, Zeitgeber $TO > 10$ s verschlechtern sowohl den Durchsatz als auch die Paketverzögerung. Für ein reines mit Paketdatenaufträgen kurzer oder mittlerer Länge beaufschlagtes V+D-System stellt $TO = 2$ s die beste Wahl dar.

Typische auf dem Markt verfügbare Sende-Empfangeinheiten (*Transceiver*) einer TETRA-Basisstation können vier Trägerfrequenzen gleichzeitig verwenden. Die Abbn. 10.10 u. 10.11, S. 200, zeigen deutlich, dass der Durchsatz und die Paketverzögerung nicht beeinflusst werden, wenn die Anzahl der Trägerfrequenzen f zwischen 3 bis 8 variiert wird. Somit reicht eine Sende-Empfangeinheit vollkommen für ein System aus, das ausschließlich mit Paketdatenaufträgen belastet wird.

Für den Normalbetriebspunkt des Verkehrsangebots $\lambda/\lambda'_i = 1$ entsprechend dem Flughafenszenarium 10, vgl. Anh. B, S. 237, ist in den Abbn. 10.12 u. 10.13, S. 200, die komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (*Complementary Probability Distribution Function*, CPDF) $G(D)$ der Paketverzögerung D für BL-Paketdatenübertragungen unter Verwendung des MMSE-Kollisionsauflösungsalgorithmus und unter Variation der Zeitgeber TO bzw. der Wartezeit WT dargestellt. Für dieses Verkehrsangebot sind 80 % aller Paketdatenübertragungen über den *Basic Link* unabhängig von der Wahl der Zeitgeber TO . Sind die Zeitgeber auf einen kleinen Wert $TO = 2$ s gesetzt, führen häufigere Abläufe dieser Zeitgeber (*Time Outs*)

im Vergleich zu $TO = 5$ s oder $TO = 10$ s dazu, dass erneute Zufallszugriffe mit entsprechender Wartezeit häufiger gestartet werden. Dies erklärt die Treppenfunktion für $TO = 2$ s. Für $TO = 5$ s und $TO = 10$ s laufen die Zeitgeber entsprechend seltener ab, so dass der Effekt der zeitlichen Dehnung durch erneute Zufallszugriffe geringer ausfällt. Dieser Effekt ist auch ein Grund dafür, dass für $TO = 2$ s im Unterschied zu $TO = 10$ s bei höherem Verkehrsangebot $\lambda/\lambda_c > 3$ die Bedienung neuer büschelartig auftretender Übertragungswünsche zeitlich besser verteilt, die Übertragungskapazität des Mobilfunksystems effizienter ausgenutzt und ein höherer Durchsatz erzielt wird, vgl. Abb. 10.8, S. 200. Der Effekt der zeitlichen Dehnung kann nicht nur durch die Zeitgeber TO , sondern auch durch die Wartezeit WT beeinflusst werden. Diese ist definiert als die Anzahl an Antwortmöglichkeiten auf der DL, nach der ein erneuter Zufallszugriff durchgeführt wird, vgl. Tab. 2.7, S. 50. Je kleiner WT gewählt wird, umso kürzer sind die Zeitabstände zwischen zwei Zufallszugriffen und umso schmaler sind die Treppen in Abb. 10.13, S. 200.

Im Folgenden werden nicht nur mit Paketdatenaufträgen, sondern auch mit Sprachaufträgen beaufschlagte V+D-Systeme betrachtet. Die Sprachaufträge umfassen bestätigte Gruppenrufe mit bis zu zehn Teilnehmern, PzP-Kommunikation zwischen zwei mobilen Teilnehmern oder einem mobilen Teilnehmer und dem Festnetz und Rundfunkrufe entsprechend dem Verkehrslastszenarium Nr. 10 in Tab. B.1, S. 237.

In den Abbn. 10.14 bis 10.17, S. 201, sind die gewichtete Verkehrsgüte $\hat{G}$ und die gewichtete Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}$ unter Berücksichtigung von Gleichkanalstörungen und Rauschen bei verschiedenen Kanaltypen und Zellgruppengrößen dargestellt.

Da das V+D-System auch mit Sprachaufträgen beaufschlagt wird und somit im Gegensatz zu einem ausschließlich mit Paketdatenaufträgen belasteten System Übertragungskapazität in erheblichem Umfang benötigt, sind gemäß der Analyse in Abb. 5.15, S. 132, bei 1 000 Teilnehmern mindestens $f = 8$ Trägerfrequenzen mit $M = 31$ Verkehrskanälen zu verwenden, um eine noch akzeptable Verkehrsgüte zu erzielen. Wenn das System am Rande seiner Übertragungskapazität betrieben wird, kann es u. U. zu größeren Paketverzögerungen und somit auch größeren Gesprächsaufbauzeiten kommen. Zu niedrig gewählte Zeitgeber $TO \leq 5$ s haben dann eine katastrophale Auswirkung auf die Verkehrsgüte. Aus diesen Gründen sind die Zeitgeber $TO = 10$ s gesetzt worden. Hierbei wird berücksichtigt, dass sich für eine Senderate $\lambda/\lambda_c > 3$ Durchsatz und Paketverzögerung erheblich

verschlechtern, vgl. Abbn. 10.8 u. 10.9, S. 200. Dies kann jedoch toleriert werden, da sich für solche Senderaten keine akzeptablen Verkehrsgüten oder Gesprächsaufbauzeiten mehr erzielen lassen.

Gegenüber dem ungestörten Fall können für die Kanaltypen RA200, TU50 und BU50 durchaus akzeptable Verkehrsgüten $\hat{G} \leq 5\%$ für eine Senderate $\lambda/\lambda_t \leq 0,8$ erzielt werden. Wie aus den MER in den Abbn. 9.11 bis 9.14, S. 191, ersichtlich ist eine Übertragung beim Kanaltyp HT200 generell nicht möglich. Gemäß Tab. 2.1, S. 9, soll innerhalb von < 300 ms ein kanalvermitteltes Gespräch aufgebaut werden. Selbst im ungestörten Fall kann laut Abb. 10.15, S. 201, für eine niedrige Auslastung $\lambda/\lambda_t = 0,25$ dieses Ziel nicht vollständig erreicht werden. Für $M = 31$ Zeitschlitze und $N = 1000$ Teilnehmer erweist sich das Resultat der analytischen Betrachtung der mittleren Wartezeit $\bar{\tau}_w$ in Abb. 5.16, S. 133, als leicht optimistischer als das simulative Ergebnis der Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}$. Um die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ zu berechnen, wurde die mittlere Bediendauer von Sprachaufträgen $\bar{\beta}_s$ der mittleren Gesprächsdauer gleichgesetzt, vgl. Abs. 5.6.1, S. 125. Der Zeitbedarf des der Reservierungszuteilung vorangegangenen Zufallszugriffs wurde hierbei nicht berücksichtigt. Somit kann die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ als obere Schranke für die Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}$ im ungestörten Fall angesehen werden. Es ist entsprechend Abb. 10.15, S. 201, von einer Gesprächsaufbauzeit $0,5\text{ s} \leq \hat{C} \leq 1,5\text{ s}$ auch für den gestörten Fall auszugehen. In einem TETRA-Netz mit sechs berücksichtigten Gleichkanalzellen pro Zelle, vgl. Abb. 9.1, S. 174, sind Zellgruppengrößen $N_c \geq 21$ notwendig, um eine Verkehrsgüte und eine Gesprächsaufbauzeit in der Nähe des ungestörten Falls erreichen zu können. Da bei den simulativen Untersuchungen Nachrichtenbündelung verwendet und ferner von der ungünstigsten Geometrie bei gestörter Übertragung ausgegangen wurde, vgl. Abb. 9.2, S. 176, sind die Ergebnisse als der schlechtest mögliche Fall (*Worst Case*) anzusehen.

Für den Normalbetriebspunkt des Verkehrsangebots $\lambda/\lambda_t = 1$ entsprechend dem Flughafenszenarium 10, vgl. Anh. B, S. 237, ist in den Abbn. 10.18 u. 10.19, S. 201, die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (*Probability Distribution Function*, PDF) $F(C)$ der Gesprächsaufbauzeit C unter Verwendung des MMSE-Kollisionsauflösungsalgorithmus für verschiedene Kanaltypen bzw. für verschiedene Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50 dargestellt. Für dieses Verkehrsangebot sind selbst im ungestörten Fall weniger als 40 % aller Gespräche innerhalb von 300 ms und weniger als 75 % innerhalb von 1 s aufgebaut. Im Hochlastbetrieb des Szenariums 10 ist bei gestörter Übertragung davon auszugehen, dass im schlechtest möglichen Fall ab-

hängig vom Kanaltyp nur 20 %–35 % aller Gespräche innerhalb von 300 ms und 50 %–70 % innerhalb von 1 s aufgebaut werden. Laut den Abbn. 10.17 u. 10.19, S. 201, sind Zellgruppengrößen $N_c > 16$ zwingend erforderlich, um akzeptable Gesprächsaufbauzeiten erzielen zu können. Typischerweise wird daher die Zellgruppengröße in flächendeckenden TETRA-Mobilfunknetzen zu $N_c = 21$ gewählt.

10.3 Simulative Untersuchung der Parameter des Zufallszugriffs und der reservierten Übertragung beim Protokollstapel Packet Data Optimised

In Tab. 10.2, S. 207, sind die maßgeblichen Parameter für die mit dem TETRA-PDO-Simulator ermittelten Simulationsergebnisse aufgeführt. Die Abkürzungen für die einzelnen Parameter entsprechen – soweit vorhanden – den im TETRA-Standard, vgl. Anh. A, S. 219, aufgeführten Bezeichnungen für Konstanten und Zeitgeber.

Im Unterschied zu den simulativen Untersuchungen des V+D-Protokollstapels wird bei PDO nicht zwischen verschiedenen Verbindungsarten unterschieden, um Paketdaten mittlerer Größe und kleiner Größe zu übertragen, so dass die charakteristischen Kenngrößen wie Durchsatz, Paketverzögerung, etc. lediglich gemittelt werden und nicht einer Wichtung analog zu Gl. 10.2, S. 198, zugeführt werden müssen, um einen Gesamtvergleich der einzelnen Simulationsergebnisse zu ermöglichen.

Da paketierte Sprachübertragungen bei PDO nicht ohne wesentliche Änderungen des PDO-Sprachcodecs möglich sind, vgl. Abs. 5.6.2, S. 127, besteht bei den simulativen Untersuchungen des PDO-Protokollstapels das Verkehrsangebot ausschließlich aus Paketdaten kurzer und mittlerer Länge. Somit ergibt sich aus der Gesamtankunftsrate gemäß Gl. 5.21, S. 119, mit $\lambda_t = 24,1 \text{ 1/h} = 0,119 \text{ 1/AP}$ die um Sprachaufträge reduzierte Gesamtankunftsrate λ'_t zu:

$$\lambda'_t = \lambda_t - \lambda_s = \lambda_{sd} + \lambda_{md} = 20,5 \text{ 1/h} = 0,101 \text{ 1/AP}. \quad (10.4)$$

In Abb. 10.20, S. 210, ist der mittlere Durchsatz $\bar{S}$, in Abb. 10.21, S. 210, die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ für die in Abs. 4.1, S. 96, vorgestellten Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei S-ALOHA unter Variation der Verkehrslast dargestellt.

Analog zu den bei V+D in den Abbn. 10.2 u. 10.3, S. 199, untersuchten Kollisionsauflösungsalgorithmen weist der MMSE-Algorithmus in Bezug auf den Durchsatz durchgängig das beste Verhalten auf. Für Senderaten $\lambda/\lambda_t' < 4$ liegt bei PDO der Durchsatz bis zu 15% höher im Vergleich zu V+D. Wird die Senderate auf $\lambda/\lambda_t' > 4$ gesteigert, kann trotz optimierter Paketdatenübertragung kein wesentlich besserer Durchsatz als bei V+D festgestellt werden. Der S-ALOHA-Zufallszugriff begrenzt bei sehr hohem Verkehrsangebot den Durchsatz für beide Protokollstapel, bevor die optimierte Reservierungszuteilung von PDO sich auswirken kann.

Tabelle 10.2: Parameter der PDO-Simulationen

Bezeichnung	Abk.	Wert
Allgemeine Parameter		
Reservierungszuteilung		FIFO
Anzahl der Mobilstationen pro Zelle		2 500
Anzahl der Zellen		7
Anzahl der Trägerfrequenzen		3, 4, 8 [†]
Kanalmodell		Ungestört [†] , TU50, BU50, HT200, RA200
Zellgruppengröße	N_c	Ungestört [†] , 16, 19, 21, 25
Signalstörabstand	S/N	19 dB
Gesamtankunftsrate	λ_t	$20,5 \text{ }^1/\text{h} = 0,10 \text{ }^1/\text{TP}$
LLC-Parameter		
Wartezeit für Bestätigung eines AI-Rahmens	T.254	5 s, 20 s [†] , 30 s
Maximale Bruttosegmentlänge	N.251	512 byte
Maximale Fenstergröße	N.252	3
MAC-Parameter		
Maximale Anzahl an Sendewiederholungen des gleichen MAC-Blocks	N.206	3
Maximale Anzahl an Folgeblöcken in einem MAC-Büschel	N.222	40
Zeitintervall, in dem eine AP-PDU von der BS zu versenden ist		5 s, 20 s [†] , 30 s
Wartezeit bis zum Beginn einer Zugriffsperiode	T.201	5 s, 20 s [†] , 30 s

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 10.2: Parameter der PDO-Simulationen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Bezeichnung	Abk.	Wert
Wartezeit für eine Bestätigung	T.202	5 s, 20 s [†] , 30 s
Wartezeit bis zum nächsten Zufallszugriff	T.204	5 s, 20 s [†] , 30 s
Wartezeit für den Empfang einer AA-PDU	T.205	5 s, 20 s [†] , 30 s
Parameter der AP-PDU		
Länge einer Zugriffsperiode	APL	16 · 8 Symbole
Maximale Größe eines MAC-Büschels in einer Zugriffsperiode	MD	1 Block
Besetzzeichen-Modus (<i>Busy-Flag</i>)		S-ALOHA
Maximale Anzahl von Wiederholungen des Zufallszugriffs	MAR	3, 10, 25 [†]
Parameter der AA-PDU		
Verzögerung der Zugriffswiederholung um <i>RD</i> Zugriffsfenster	RD	1 s, 5 s, 15 s [†]
Minimale Priorität für den direkten Zugriff während eines offenen Fensters	DP	0

[†] Dieser Wert stellt den verwendeten dar, wenn es in den Abbildungen nicht anders ausgewiesen ist.

Wenn die Länge des Zugriffsfensters nicht dynamisch angepasst, sondern statisch auf einen Wert parametrisiert wird, können nur für eine bestimmte Verkehrslastsituation Durchsatz und Paketverzögerung gleichzeitig optimiert werden. In Abb. 10.20, S. 210, ist die feste Länge des Zugriffsfensters im Falle statischer Kollisionsauflösung auf den vom MMSE-Algorithmus bei $\lambda/\lambda_c = 1$ optimierten Wert gesetzt worden. Selbst in diesem Fall verschlechtert sich der Durchsatz bei statischer Kollisionsauflösung im Vergleich zum MMSE-Algorithmus mit steigender Senderate um bis zu 25 % und somit noch stärker als beim entsprechenden Vergleich bei V+D.

Der Splitting-Algorithmus für PDO, vgl. Abs. 4.1.5, S. 101, setzt voraus, dass der TETRA-Standard in Bezug auf die AA-PDU, vgl. Tab. 2.14, S. 75, erweitert wird und somit eine reale Implementierung als unwahrscheinlich gilt. Wenn analog zum Fall statischer Kollisionsauflösung die Größe des

Zugriffsfensters auf den vom MMSE-Algorithmus bei $\lambda/\lambda_t = 1$ optimierten Wert festgesetzt wird, tritt bei höheren Senderaten ein signifikant schlechterer Durchsatz als beim MMSE-Algorithmus auf, weil der Baum der Kollisionsauflösungsphase, vgl. Abb. 4.2, S. 104, nur über drei Ebenen verfügt und in den Blättern dieses Baumes Zugriffsfenster verwendet werden, deren Größe nicht an die aktuelle Verkehrslast angepasst wird. Zusätzlich vergrößert sich die Paketverzögerung, da die Zeitspanne zwischen dem Entstehen des erstmaligen Zugriffswunsches und der tatsächlichen erfolgreichen Quitting des Zufallszugriffs dadurch verlängert wird, dass auf den Beginn des nächsten Zugriffsfensters und im Falle von Kollisionen auf das Ende von bis zu sieben weiteren gewartet werden muss. Aus diesen Gründen sind Splitting-Algorithmen für PDO grundsätzlich nicht geeignet.

In den Abb. 10.22, S. 210, bis 10.27, S. 211, sind die wichtigsten Parameter des PDO-Zufallszugriffs variiert worden: die maximale Anzahl von Wiederholungen des Zufallszugriffs MAR , die Verzögerung der Zugriffswiederholung um RD Zugriffsfenster und die Zeitgeber TO (T.201–T.205, T.254), vgl. Tab. 10.2, S. 207. In den Abbildungen sind der mittlere Durchsatz $\bar{S}$ und die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ dargestellt. Hierbei wurde jeweils der Kollisionsauflösungsalgorithmus MMSE verwendet. Mit steigender maximaler Anzahl an Zufallszugriffswiederholungen MAR können sowohl der mittlere Durchsatz als auch die mittlere Paketverzögerung für Senderaten $\lambda/\lambda_t < 4$ leicht verbessert werden. Für $MAR > 25$ treten keine Verbesserungen mehr auf.

Die Verzögerung der Zugriffswiederholung RD beeinflusst für niedrige Senderaten $\lambda/\lambda_t < 4$ den mittleren Durchsatz und die mittlere Paketverzögerung nicht, vgl. Abb. 10.25 u. 10.25, S. 210. Bei hohen Senderaten $\lambda/\lambda_t > 4$ können mit $RD \geq 5$ erneute Zufallszugriffe zeitlich so entzerrt werden, dass im Vergleich zu $RD = 1$ der Durchsatz um bis zu 25 % höher liegt. Da für den Maximalwert von $RD = 15$ zusätzlich die Paketverzögerung für $\lambda/\lambda_t > 4$ die niedrigste ist, wurde für alle weiteren Untersuchungen dieser Wert verwendet.

Zeitgeber $TO > 20$ s zeigen für Senderaten $\lambda/\lambda_t > 3$ ein deutlich besseres Verhalten bzgl. des Durchsatzes im Vergleich zu $TO = 5$ s, vgl. Abb. 10.26, S. 211. Da bei reiner, nicht zeitkritischer Paketdatenübertragung der Durchsatz bedeutender als die Paketverzögerung ist, erscheint der Zeitgeber parametrisiert zu $TO = 20$ s als geeigneter Kompromiss zwischen Durchsatz und Paketverzögerung, vgl. Abb. 10.26, S. 211.

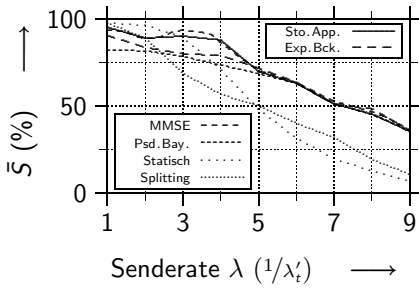


Abb. 10.20: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen

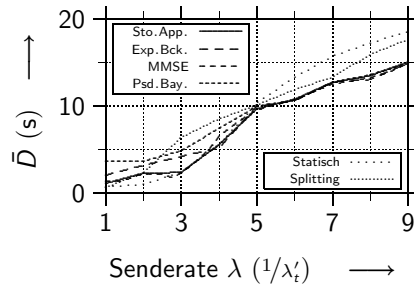


Abb. 10.21: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen

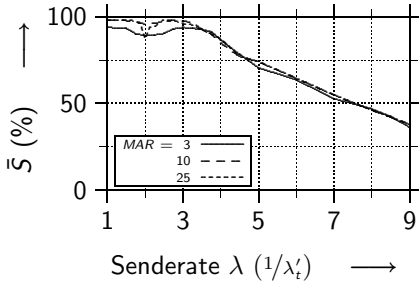


Abb. 10.22: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $MAR = 3, 10, 25$

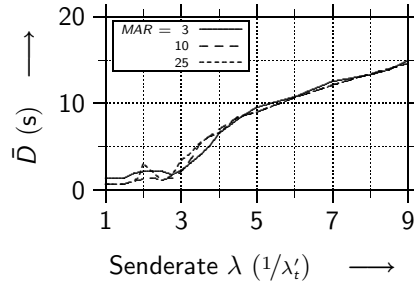


Abb. 10.23: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $MAR = 3, 10, 25$

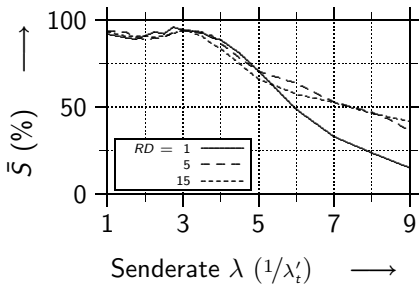


Abb. 10.24: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $RD = 1, 5, 15$

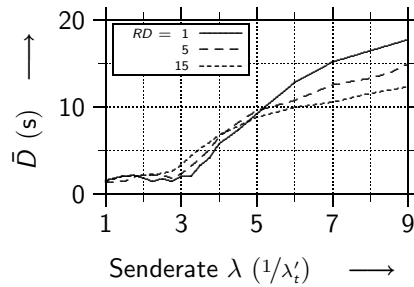


Abb. 10.25: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $RD = 1, 5, 15$

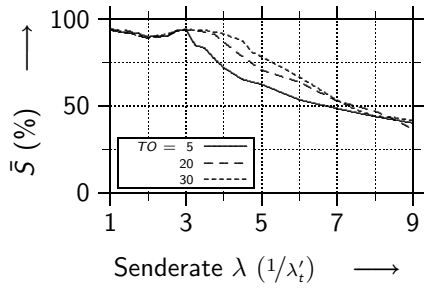


Abb. 10.26: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 5, 20, 30$

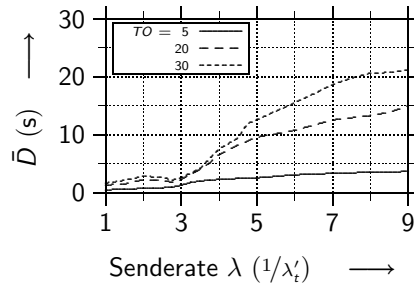


Abb. 10.27: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 5, 20, 30$

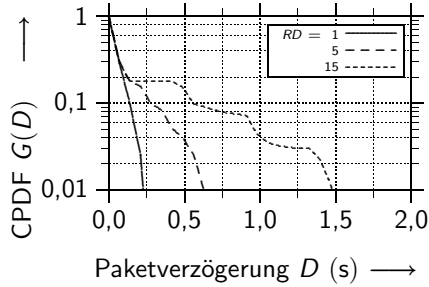


Abb. 10.28: PDO: CPDF der Paketverzögerung D für $RD = 1, 5, 15$ und $\lambda/\lambda'_t = 1$

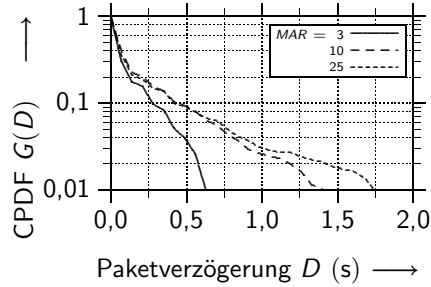


Abb. 10.29: PDO: CPDF der Paketverzögerung D für $MAR = 3, 10, 25$ und $\lambda/\lambda'_t = 1$

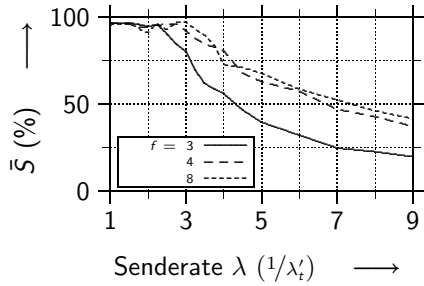


Abb. 10.30: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$

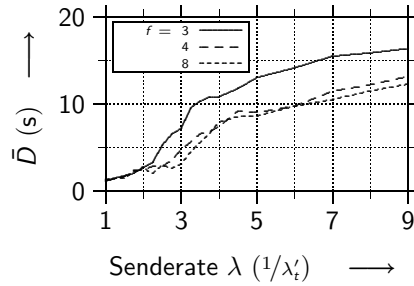


Abb. 10.31: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$

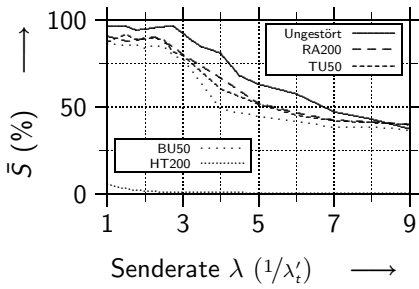


Abb. 10.32: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Kanaltypen

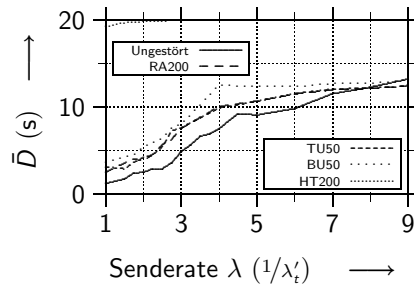


Abb. 10.33: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Kanaltypen

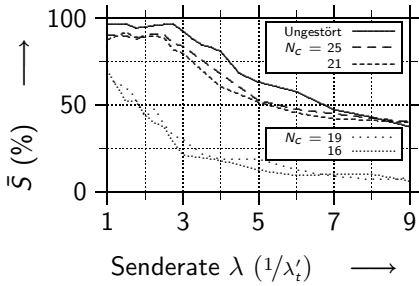


Abb. 10.34: PDO: Mittl. Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50

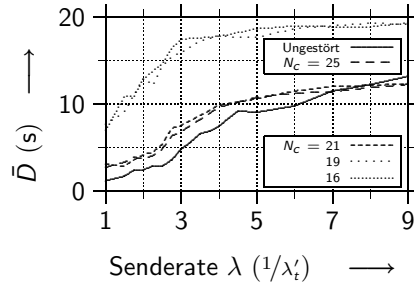


Abb. 10.35: PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50

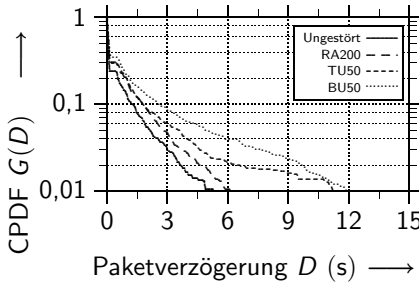


Abb. 10.36: PDO: CPDF der Paketverzögerung D für verschiedene Kanaltypen und $\lambda/\lambda'_t = 1$

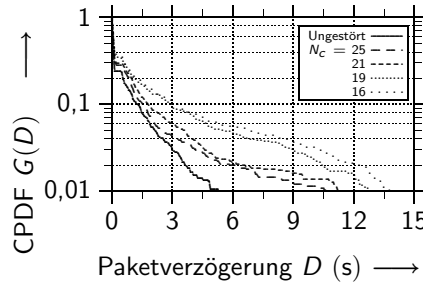


Abb. 10.37: PDO: CPDF der Paketverzögerung D für versch. Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50 und $\lambda/\lambda'_t = 1$

Für den Normalbetriebspunkt des Verkehrsangebots $\lambda/\lambda_t = 1$ entsprechend dem Flughafenszenarium 10, vgl. Anh. B, S. 237, ist in den Abbn. 10.28 u. 10.29, S. 211, die CPDF $G(D)$ der Paketverzögerung D unter Verwendung des MMSE-Kollisionsauflösungsalgorithmus und unter Variation der Parameter RD bzw. MAR dargestellt. Für dieses Verkehrsangebot sind 80 % aller Paketdatenübertragungen unabhängig von der Wahl des Parameters Retry Delay (RD), der die Anzahl abzuwartender Zugriffsfenster angibt, bevor ein Zufallszugriff wiederholt werden darf, vgl. Tab. 2.14, S. 75. Mit steigendem RD kann eine zeitliche Dehnung erzielt werden, d. h. die Bedienung neuer büschelartig auftretender Übertragungswünsche kann zeitlich besser verteilt werden. Dieser Effekt ist bei höherem Verkehrsangebot $\lambda/\lambda_t > 5$ einsetzbar, um den Durchsatz zu steigern, vgl. Abb. 10.24, S. 210. Ebenfalls kann eine zeitliche Dehnung der Bedienung von Übertragungswünschen und somit ein besserer Durchsatz erzielt werden, indem die maximal erlaubte Anzahl an Wiederholungen des Zufallszugriffs MAR , vgl. Tab. 2.13, S. 74, erhöht wird. Dies gilt jedoch nur für ein Verkehrsangebot $\lambda/\lambda_t < 4$, da ansonsten bei höherem Verkehrsangebot andere Effekte, wie z. B. der Ablauf der Zeitgeber TO , den Parameter MAR in seiner Auswirkung überlagern, vgl. Abb. 10.22, S. 210.

Bei V+D ergaben die Abbn. 10.10 u. 10.11, S. 200, dass eine typischerweise vier Trägerfrequenzen unterstützende Sende-Empfangseinheit (*Transceiver*) einer TETRA-Basisstation vollkommen für ein System ausreicht, das ausschließlich mit kleinen und mittleren Paketdatenaufträgen belastet wird. Für PDO sind in den Abbn. 10.30 u. 10.31, S. 211, der Durchsatz und die Paketverzögerung dargestellt, wobei die Anzahl f der Trägerfrequenzen, die gleichzeitig von einem Hauptorganisationskanal MCCH verwaltet werden, variiert wurde. Analog zu V+D reicht auch hier eine Sende-Empfangseinheit aus.

In den Abbn. 10.32, S. 212, bis 10.35, S. 212, sind der mittlere Durchsatz $\bar{S}$ bzw. die mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ unter Berücksichtigung von Gleichkanalstörungen und Rauschen bei verschiedenen Kanaltypen und Zellgruppengrößen dargestellt. Gegenüber dem ungestörten Fall können für die Kanaltypen RA200, TU50 und BU50 durchaus akzeptable Ergebnisse erzielt werden. Wie aus den MER in den Abbn. 9.11 bis 9.14, S. 191, ersichtlich ist eine Übertragung beim Kanaltyp HT200 generell nicht möglich. In einem TETRA-Netz mit sechs berücksichtigten Gleichkanalzellen pro Zelle, vgl. Abb. 9.1, S. 174, sind Zellgruppengrößen $N_c \geq 21$ notwendig, um einen Durchsatz und eine Paketverzögerung in der Nähe des ungestörten Falls

erreichen zu können.

Für den Normalbetriebspunkt des Verkehrsangebots $\lambda/\lambda'_i = 1$ entsprechend dem Flughafenszenarium 10, vgl. Anh. B, S. 237, ist in den Abbn. 10.36 u. 10.37, S. 212, die CPDF $G(D)$ der Paketverzögerung D unter Verwendung des MMSE-Kollisionsauflösungsalgorithmus für verschiedene Kanaltypen bzw. für verschiedene Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50 dargestellt. Für dieses Verkehrsangebot sind 70 % aller Paketdatenübertragungen nahezu unabhängig vom Kanaltyp und von der Zellgruppengröße.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Leistungskenngrößen der TETRA-Protokollstapel, wie z. B. Durchsatz, Paketverzögerung, Verkehrsgüte, Gesprächsaufbauzeit, etc., können erheblich optimiert werden, indem die Parameter des Zufallszugriffs und der reservierten Übertragung, ein adaptiver Algorithmus zur Kollisionsauflösung und eine optimale Abfertigungsstrategie geeignet gewählt werden.

Um mit einem stochastischen, ereignisorientierten Mobilfunksimulator auf Basis der emulierten TETRA-Protokolle diese Parameter, Algorithmen und Strategien untersuchen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit der objektorientierte Softwareentwurf von komplexen Telekommunikationssystemen um den Aspekt der Leistungsbewertung mit Hilfe der SPEET-Methode erweitert, vgl. Kap. 6, S. 137. Die TETRA-Protokollstapel V+D und PDO wurden formal in SDL spezifiziert, vgl. Abs. 10.1, S. 193, mit dem Codegenerator $SDL \rightarrow SPEETCL$, vgl. Kap. 8, S. 163, auf die SDL-Laufzeitumgebung der C++-Simulationsklassenbibliothek SPEETCL, vgl. Kap. 7, S. 155, abgebildet und in den auf der SPEETCL basierenden TETRA-Mobilfunksimulator integriert. Das Verhalten eines TETRA-Empfängers bei von Rauschen und Gleichkanalstörungen hervorgerufenen Übertragungsfehlern wird im Simulator durch Fehlermusterdateien auf der Verbindungsebene (*Link Level*) berücksichtigt, vgl. Kap. 9, S. 169.

Sowohl für V+D als auch für PDO erweist sich der MMSE-Algorithmus, vgl. Abs. 4.1.4, S. 100 als zur Kollisionsauflösung am Besten geeignet. Splitting-Algorithmen sind hierzu generell ungeeignet, vgl. Abs. 4.1.5, S. 101. Werden externe Prioritäten verwendet, ist HOL die optimale Abfertigungsstrategie, ansonsten FIFO, vgl. Abs. 4.3, S. 107. Paketierte Sprachverbindungen sind in PDO zwar grundsätzlich denkbar, erfordern aber einen neuen auf die Struktur der PDUs bei PDO abgestimmten Codec, vgl. Abs. 5.6.2, S. 127.

In Hochlastszenarien wurde unter Berücksichtigung von Gleichkanalstörungen ermittelt, welche Bedeutung die Parameter des TETRA-Zufallszugriffs haben und wie sich an TETRA angepasste Kollisionsauflösungsalgo-

rithmen und Reservierungszuteilungsstrategien auf Verkehrs- und Dienstgüte, insbesondere auf Durchsatz, Paketverzögerung und Gesprächsaufbauzeit auswirken. Innerhalb von < 300 ms soll ein kanalvermitteltes Gespräch aufgebaut werden. Selbst im ungestörten Fall kann für eine niedrige Auslastung dieses Ziel nicht erreicht werden. Es ist hingegen von einer Gesprächsaufbauzeit $0,5 \text{ s} \leq \hat{C} \leq 1,5 \text{ s}$ auch für den gestörten Fall auszugehen. In einem TETRA-Netz mit sechs benachbarten Gleichkanalzellen pro Zelle sind Zellgruppengrößen $N_c \geq 21$ notwendig, um eine Verkehrsgüte und eine Gesprächsaufbauzeit in der Nähe des ungestörten Falls erreichen zu können, vgl. Abs. 10.2, S. 195.

Ausgehend von einem Modell für die Ermittlung des mittleren Durchsatzes und der mittleren Paketverzögerung eines S-ALOHA-Systems bei endlicher Teilnehmerzahl und einem Modell für die Berechnung der Wartewahrscheinlichkeit in einem TETRA-System wurde die mögliche bedienbare maximale Teilnehmerzahl bei TETRA-Systemen abgeschätzt. Diese Abschätzung wurde verwendet, um die simulativen Ergebnisse zu verifizieren.

Neben den simulativen und analytischen Untersuchungen bzgl. der Kollisionsauflösung und der Reservierungszuteilung bei TETRA-Systemen sind ferner als Hauptergebnisse dieser Arbeit die SPEET-Werkzeuge und der TETRA-Mobilfunksimulator zu nennen. Mit den SPEET-Werkzeugen liegt eine neue Methodik vor, Leistungsbewertungen komplexer, formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme zu ermöglichen. Aufbauend auf der SPEET-Methodik kann der TETRA-Mobilfunksimulator zur Konfiguration und Parametrisierung zukünftiger und bestehender TETRA-Netze eingesetzt werden.

Ausblick

Das ETSI hat begonnen, *TETRA Release 2* zu standardisieren. Dies geschieht mit dem Ziel, im Vergleich zum in Kap. 2, S. 5, beschriebenen *TETRA Release 1*-System eine höhere Bruttodatenrate von bis zu 360 kbit/s und eine verbesserte Sprachqualität durch neue Sprachcodecs zu erzielen. Ferner sollen die Reichweite von TETRA-Funkzellen auf bis zu 200 km erweitert, multimediale Anwendungen abhängig vom Aufenthaltsort eingeführt und Interworking mit den Mobilfunksystemen *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) (WALKE et al., 2001) und GSM, insbesondere mit dem neuen GSM-Paketdatendienst *General Packet Radio*

Service (GPRS), ermöglicht werden.

Im nordatlantischen Projekt Mobility for Emergency and Safety Applications (MESA) ergreifen die nordamerikanische Standardisierungsorganisation Telecommunications Industry Association (TIA) und das europäische ETSI die Initiative, hochmobile Breitbandkommunikation für BOS mit Bitraten $> 2^{\text{Mbit/s}}$ global zu standardisieren. In diesem Projekt werden die nordamerikanischen Standardisierungsbemühungen der Association of Police Communications Officials (APCO) beim Projekt P34 und die des ETSI beim internen TETRA-Nachfolgestandard Digital Advanced Wireless Service (DAWS) zusammengeführt.

Zukünftige Arbeiten sollten sich darauf konzentrieren, wie TETRA-Systeme mit obigen Mobilfunksystemen ko-existieren können und wie sich ferner neue, breitbandigere Datendienste auf die Leistungskenngrößen sowohl von *TETRA Release 2* oder MESA als auch anderer Mobilfunksysteme auswirken.

TETRA-Standard

Inhalt

A.1	TETRA-Zusatzdienste	219
A.2	Dienstelemente der V+D-MAC-Dienstzugangspunkte	221
A.3	Dienstelemente der V+D-LLC-Dienstzugangspunkte	223
A.4	Dienstelemente des PDO-LLC-Dienstzugangspunktes	227
A.5	Dienstelemente der PDO-MAC-Dienstzugangspunkte	228
A.6	Die Dokumente des TETRA-Standards	230

Schlüsselwörter

Zusatzdienste, LLC- und MAC-Dienstzugangspunkte

Das Technische Komitee *Radio Equipment and Systems* (RES) 06 des *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) hat den *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA)-Standard erstellt und verabschiedet. In den folgenden Abschnitten werden zuerst die für TETRA definierten Zusatzdienste, anschließend die Dienstelemente für die Teilschichten LLC und MAC der beiden Protokollstapel V+D und PDO erläutert. Abschließend sind die einzelnen Dokumente des TETRA-Standards vollständig aufgeführt.

A.1 TETRA-Zusatzdienste

Es werden folgende Zusatzdienste in TETRA angeboten:

- Indirekter Zugang zu öffentlichen Telefonnetzen (*Public Switched Telephone Network*, PSTN), dem ISDN und Nebenstellenanlagen (*Private Branch Exchange*, PBX) über ein *Gateway*,
- *List Search Call* (LSC), bei dem die Teilnehmer oder Gruppen anhand der Reihenfolge von Eintragungen in einer Liste angerufen werden,
- *Include Call* (IC), um bei bestehendem Gespräch durch Wahl einer Rufnummer einen weiteren Teilnehmer in die bestehende Verbindung mit einzubeziehen,

- Rufweiterleitung und Rufumleitung – in jedem Fall (Call Forwarding Unconditional, CFU), wenn das gerufene Gerät besetzt ist (Call Forwarding Busy, CFB), wenn der Teilnehmer nicht antwortet (Call Forwarding on No Replay, CFNRy) oder wenn er nicht erreichbar ist (Call Forwarding on Not Reachable, CFNRc),
- Rufeinschränkung bzw. -sperre für ankommende bzw. abgehende Gespräche, Barring of Incoming Calls (BIC) bzw. Barring of Outgoing Calls (BOC),
- Call Authorized by Dispatcher (CAD), bei dem auf Antrag eine bestimmte Rufart ermöglicht wird, eine bestimmte Benutzergruppe zugelassen oder bestimmte Benutzungsgebiete reserviert werden,
- Call Report (CR) ermöglicht das Hinterlegen der Nummer des rufenden Teilnehmers beim gerufenen Teilnehmer für einen späteren Rückruf,
- Rufnummernidentifikation (Calling Line Identification Presentation (CLIP), Conected Line Identification Presentation (COLP)); diese Funktion kann mit Calling/Conected Line Identification Restriction (CLIR) unterbunden werden; außerdem ist auch Teilnehmeridentifikation möglich (Talking Party Identification, TPI);
- Call Waiting (CW) zeigt dem belegten Teilnehmer an, wer in der Zwischenzeit angerufen hat,
- Call Hold (CH) ermöglicht einem kommunizierenden Teilnehmer, sein Gespräch zugunsten eines anderen zu unterbrechen und das unterbrochene Gespräch später weiterzuführen,
- Short Number Addressing (SNA) ermöglicht einem Benutzer, einen Teilnehmer über eine Kurzwahlnummer anzurufen; die Umsetzung von Kurzwahl- zu Teilnehmernummer übernimmt die TETRA-Infrastruktur (SwMI),
- Prioritätenruf (Priority Call, PC) bietet die bevorzugte Abfertigung beim Gesprächsaufbau,
- Prioritätenruf mit Unterbrechung (Pre-emptive Priority Call, PPC) bietet die bevorzugte Abfertigung beim Gesprächsaufbau, wobei in Kauf genommen wird, dass eine andere Verbindung hierfür abgebrochen wird,
- durch den Dienst Zugangspriorität (Access Priority, AP) wird sichergestellt, dass auch im Falle eines überlasteten Netzes zugegriffen werden kann,

- Advice of Charge (AoC) ist ein Dienst, durch welchen dem Teilnehmer die anfallenden Gebühren vor, während oder am Ende eines Gesprächs angezeigt werden,
- diskretes Abhören (Discrete Listening, DL) eines Gesprächs durch eine autorisierte Person,
- Ambience Listening (AL) ermöglicht, ohne Kenntnisnahme des Endgerätenutzers die Umgebungsgeräusche zu einer autorisierten Überwachungsstelle zu übertragen,
- dynamische Gruppennummerzuweisung (Dynamic Group Number Assignment, DGNA),
- Transfer of Control (ToC) ermöglicht es dem Initiator einer Mehrpunktverbindung, die Kontrolle über das Gespräch an einen anderen Teilnehmer der Verbindung weiterzugeben,
- Area Selection (AS) erlaubt einem berechtigten Benutzer, die Zelle für den Verbindungsaufbau auszuwählen bzw. dem zur Zeit bedienten Teilnehmer, die Zelle zu bestimmen,
- Late Entry (LE) ist eine Einladung an mögliche Teilnehmer einer Mehrpunktverbindung, in eine bestehende Verbindung eingebunden zu werden.

Eine komplette Zusammenstellung sowie die ausführliche Definition und Beschreibung der Zusatzdienste ist in den Serien 10 bis 12 des Standards V+D (European Telecommunication Standard (ETS) 300 392-10 bis -12) enthalten, vgl. Anh. A.6, S. 230.

A.2 Dienstelemente der V+D-MAC-Dienstzugangspunkte

Von den LLC-Verbindungstypen BL und AL wird der TMA-SAP für die Übertragung von Signalisierungs- und Paketdateninformationen benutzt, vgl. Abb. 2.10, S. 32. Dazu stehen fünf Dienstelemente (Service Primitive, SP) zur Verfügung.

Mit dem TMA-UNITDATAreq-SP fordert die LLC-Teilschicht die MAC-Teilschicht auf, LLC-Rahmen zu versenden. An dieser Schnittstelle werden diese LLC-Rahmen TETRA MAC-SDU (TM-SDU) genannt.

Das TMA-UNITDATAind-SP wird von der MAC-Teilschicht verwendet, um empfangene Nachrichten zu übergeben.

Mit dem TMA-CANCELreq-SP kann ein TMA-UNITDATAreq-SP gelöscht werden, welches von der LLC-Teilschicht versendet wurde.

Mit dem TMA-RELEASEind-SP kann eine AL-Verbindung unterbrochen werden, wenn die MAC-Teilschicht einen Kanal freigibt und alle ALs auf diesem Kanal stillschweigend unterbrochen werden.

Mit einem TMA-REPORTind-SP zeigt die MAC-Teilschicht den oberen Schichten Informationen über den Zustand von Dienstanforderungen an. Beim Initialisierungsprozess wird mit diesem SP angezeigt, ob der Verbindungsaufbau erfolgreich war und die Partnerinstanz den Empfang der Nachricht bestätigt hat. Die bei diesen Prozessen auftretenden Fehler, wie z. B. fehlgeschlagener Zufallszugriff, werden ebenfalls mit diesem SP an die höheren Schichten gemeldet.

Der TMB-SAP führt den Transfer von nichtadressierten Rundsendenachrichten durch, die Informationen zur Netz- oder Systemorganisation enthalten. In diesem Fall existieren in der LLC-Teilschicht keine speziellen, den TMB-SAP betreffenden Funktionen, so dass Dienstanforderungen am TLB-SAP direkt auf TMB-SAP-Anforderungen und umgekehrt abgebildet werden. Deshalb existieren an diesen beiden SAPs auch dieselben Dienstelemente.

In gleicher Weise werden die Informationen für die lokale Schichtverwaltung über den TMC-SAP übertragen. Es gibt in der LLC-Teilschicht keine TLC-SAP betreffenden Funktionen, so dass Dienstanforderungen am TLC-SAP direkt auf TMC-SAP-Anforderungen und umgekehrt abgebildet werden.

Bei einer kanalvermittelten Sprach- oder Datenverbindung werden die Sprach- oder Datenrahmen der MAC-Teilschicht über den TMD-SAP übergeben, der die Schnittstelle zwischen dem TETRA-Sprachcodec und der MAC-Teilschicht bildet. Sprachrahmen dürfen verschlüsselte oder unverschlüsselte Sprache enthalten; die in ihnen enthaltene Information ist für die MAC-Teilschicht irrelevant. Zur Ende-zu-Ende-Signalisierung zwischen den Benutzern des kanalvermittelten Dienstes können einzelne Zeitschlitz bzw. Teilzeitschlitz gestohlen werden. Abhängig davon, ob ein Zeitschlitz Sprach-, Daten- oder Signalisierinformationen enthält und ob ein ganzer oder ein halber Zeitschlitz gestohlen wurde, erfolgt eine entsprechend angepasste Kanalcodierung. Mit dem TMD-UNITDATAreq-SP und dem TMD-UNITDATAind-SP werden empfangene bzw. zu versendende Sprach- oder Datenrahmen übergeben. Mit Hilfe des TMD-REPORTind-SP wird der MAC-Dienstbenutzer über den Status der laufenden Übertragung informiert.

A.3 Dienstelemente der V+D-LLC-Dienstzugangspunkte

Der TLA-SAP wird für die adressierte Datenübertragung und für die Steuerung der Datenübertragungsverfahren der Schicht 2 verwendet. Jede unabhängige Instanz eines Dienstes wird durch einen separaten Verbindungsendpunkt (*Connection Endpoint*, CEP) am TLA-SAP repräsentiert. Es können bis zu vier AL-Instanzen von einer MS gleichzeitig unterhalten werden. Der Informationsfluss ist von der MS zur BS und umgekehrt sowie innerhalb einer MS bzw. BS möglich.

Am TLA-SAP stehen die in Tab. A.1, S. 224, aufgeführten Dienstelemente zur Verfügung, die teilweise von beiden oder nur einem der Verbindungstypen BL oder AL genutzt werden. Die Einrichtung und Unterhaltung einer bestätigten Verbindung (AL) geschieht folgendermaßen: Mit einem TL-CONNECTreq-SP wird der Vorgang eingeleitet und durch ein TL-CONNECTind-SP bei der Gegenstelle angezeigt, die wiederum ein TL-CONNECTresp-SP zurückschickt, welches mit einem TL-CONNECTconf-SP der einleitenden Stelle Informationen über den Verbindungsaufbau anzeigt.

Für die bestätigte Datenübertragung stehen die Dienstelemente TL-DATAreq, TL-DATAconf und TL-DATAind zur Verfügung, welche für BL und AL getrennt definiert sind. Beim BL existiert hier zusätzlich das TL-DATAresp-SP, mit dem auf eine Nachricht mit einer Bestätigung oder einer neuen Nachricht geantwortet werden kann und das nicht bestätigt wird. Die unbestätigte Nachrichtenübertragung wird mittels der Dienstelemente TL-UNITDATAreq, TL-UNITDATAind und TL-UNITDATAconf durchgeführt, wobei letzteres nur optional ist und lediglich die erfolgreiche Versendung anzeigt, vgl. Tab. A.1, S. 224.

Die Auslösung eines ALs wird mit einem TL-DISCONNECTreq-SP eingeleitet, mit einem TL-DISCONNECTind-SP der Gegenstelle angezeigt und mit einer Bestätigung der Gegenstelle in Form eines TL-DISCONNECTconf-SPs beendet. Eine Verbindung, die z. B. anormal unterbrochen wurde, kann mit den Dienstelementen TL-RELEASEreq und TL-RELEASEind lokal in der MS bzw. BS beendet werden. Das TL-REPORTind-SP wird intern zur Information der MLE über den Status der von ihr ausgelösten Prozesse genutzt.

Die Dienstelemente des TLB-SAPs und des TLC-SAPs sind in Tab. A.2, S. 225, zusammengestellt. Am TLB-SAP der BS fordert die MLE-Teilschicht die BS mit den SPs TL-SYNCreq und TL-SYSINFOreq auf, Synchronisations- und Systeminformationen für die Zellenauswahl der MS an die MS zu versenden. Die SPs TL-SYNCind und TL-SYSINFOind am TLB-SAP

der MS werden in der MS benutzt, um die empfangenen Daten von der LLC- an die MLE-Teilschicht weiterzuleiten.

Tabelle A.1: Dienstelemente des V+D-Dienstzugangspunktes TLA

Dienstelement	Verbindungsart	Beschreibung
TL-CANCELreq	BL, AL	Aufforderung, eine Übertragung abubrechen, bevor sie überhaupt stattgefunden hat
TL-CONNECTreq TL-CONNECTconf TL-CONNECTind TL-CONNECTresp	AL	Versenden und Empfang der für die Einrichtung bzw. Unterhaltung einer Verbindung notwendigen Parameter
TL-DATAreq TL-DATAconf TL-DATAind TL-DATAresp	BL	Versenden und Empfang von Daten mit Bestätigung
TL-DATAreq TL-DATAconf TL-DATAind	AL	Versenden und Empfang von Daten mit Bestätigung
TL-DISCONNECTreq TL-DISCONNECTconf TL-DISCONNECTind	AL	Auslösung einer Verbindung zwischen zwei korrespondierenden AL-Instanzen
TL-RELEASEreq TL-RELEASEind	BL, AL	Interne Auslösung einer Verbindung ohne die Gegenstelle davon zu informieren
TL-REPORTind	BL, AL	Meldung an die MLE über den Status einer von der MLE ausgelösten Aktion
TL-UNITDATAreq TL-UNITDATAconf TL-UNITDATAind	BL, AL	Versenden und Empfang von Daten ohne Bestätigung

Die Dienstelemente des TLC-SAPs sind für die Steuerung einer Verbindung zuständig. So wird durch die SPs TL-CONFIGUREreq und TL-

CONFIGUREconf die Schicht 2 anhand der gewählten Zellenparameter und des Zustandes der MS konfiguriert.

Mit dem TL-MEASUREMENTind-SP wird den höheren Schichten die Qualität einer Verbindung durch Ergebnisse aus Messungen und der durch *Monitoring* bzw. *Scanning* bestimmten Parameter der Nachbarzellen angezeigt, vgl. Abs. 2.6.4.1.2, S. 38.

Tabelle A.2: Dienstelemente der V+D-Dienstzugangspunkte TLB und TLC

Dienstelement	SAP	Beschreibung
TL-SYNCreq TL-SYNCind	TLB	Rundsendung von Synchronisationsparametern für die Zellenauswahl
TL-SYSINFOreq TL-SYSINFOind		Rundsendung von Systeminformationen für die Zellenauswahl
TL-CONFIGUREreq TL-CONFIGUREconf	TLC	Konfiguration der Schicht 2 anhand gegebener Zellparameter
TL-MEASUREMENTind		Meldung der Messergebnisse über die Qualität einer Verbindung
TL-MONITOR-LISTreq		Aufforderung, die Pfadverluste einer bestimmten Anzahl von Kanälen zu ermitteln
TL-MONITORind		Meldung der Messergebnisse über die Pfadverluste dieser Kanäle
TL-REPORTind		Meldung an die MLE über den Status einer von der MLE ausgelösten Aktion
TL-SCANreq TL-SCANconf TL-SCAN-REPORTind		Untersuchung eines bestimmten Kanals
		Regelmäßige Meldung der Signalqualität eines Kanals und der aktuellen Zellparameter nach Abschluss der Untersuchung des Kanals
TL-SELECTreq TL-SELECTconf TL-SELECTind TL-SELECTresp		Auswahl eines bestimmten Kanals für die Funkübertragung

Durch das TL-MONITOR-LISTreq-SP wird der *Monitoring*-Vorgang auf alle in einer Liste aufgeführten Kanäle angewendet und durch das TL-MONITORind-SP das Ergebnis für einen Kanal angezeigt. Das Dienstelement TL-REPORTind wird wie am TLA-SAP verwendet. Mit den SPs TL-SCANreq und TL-SCANconf wird der *Scanning*-Vorgang eines Kanals gestartet und durch das TL-SCAN-REPORTind-SP das Ergebnis mitgeteilt. Mit dem TL-SELECTreq-SP und dem TL-SELECTconf-SP wird die von der MLE an die MAC-Teilschicht versendete Aufforderung zur Kanalwahl bzw. zum Kanalwechsel ausgeführt sowie durch die MAC-Teilschicht der MLE mit Hilfe der SPs TL-SELECTind und TL-SELECTresp der von der BS geforderte Kanalwechsel mitgeteilt.

In Tab. A.3 sind alle Dienstelemente der LLC- und der MAC-Teilschicht zusammengefasst und zueinander in Beziehung gestellt.

Tabelle A.3: Zuordnung von V+D-LLC- zu MAC-Dienstelementen

LLC-SAP	LLC-Dienstelement	MAC-Dienstelement	MAC-SAP
TLA	TL-CONNECTreq	TMA-UNITDATAreq	TMA
	TL-CONNECTresp		
	TL-DATAreq		
	TL-DATAresp		
	TL-DISCONNECTreq		
	TL-UNITDATAreq		
	TL-CONNECTind	TMA-UNITDATAind	
	TL-CONNECTconf		
	TL-DATAind		
	TL-DATAconf		
	TL-DISCONNECTind		
	TL-DISCONNECTconf		
	TL-UNITDATAind		
	TL-CANCELreq	TMA-CANCELreq	
	TL-RELEASEreq	—	
	TL-RELEASEind	—	
	TL-REPORTind	TMA-REPORTind	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.3: Zuordnung von V+D-LLC- zu MAC-Dienstelementen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

LLC-SAP	LLC-Dienstelement	MAC-Dienstelement	MAC-SAP
TLB	TL-SYNCreq	TMB-SYNCreq	TMB
	TL-SYNCind	TMB-SYNCind	
	TL-SYSINFOreq	TMB-SYSINFOreq	
	TL-SYSINFOind	TMB-SYSINFOind	
TLC	TL-CONFIGUREreq	TMC-CONFIGUREreq	TMC
	TL-CONFIGUREconf	TMC-CONFIGUREconf	
	TL-MEASUREMENTind	TMC-MEASUREMENTind	
	TL-MONITORind	TMC-MONITORind	
	TL-MONITOR-LISTreq	TMC-MONITOR-LISTreq	
	TL-REPORTind	TMC-REPORTind	
	TL-SCANreq	TMC-SCANreq	
	TL-SCANconf	TMC-SCANconf	
	TL-SCAN-REPORTind	TMC-SCAN-REPORTind	
	TL-SELECTreq	TMC-SELECTreq	
	TL-SELECTconf	TMC-SELECTconf	
	TL-SELECTind	TMC-SELECTind	
—	—	TMD-REPORTind	TMD
	—	TMD-UNITDATAreq	
	—	TMD-UNITDATAind	

A.4 Dienstelemente des PDO-LLC-Dienstzugangspunktes

Der TLA-SAP, vgl. Abb. 2.21, S. 64, wird für die adressierte Datenübertragung und für die Steuerung der Datenübertragungsprozeduren der Schicht 2 verwendet. Jede unabhängige Instanz eines Dienstes wird durch einen separaten Verbindungsendpunkt (CEP) am TLA-SAP repräsentiert.

Alle TLA-SAP-SPs korrespondieren mit unidirektionalen Transaktionen, vgl. Tab. A.4, S. 228. Die TETRA-LLC-CONNECT-Dienstelemente werden für die Einrichtung einer unidirektionalen Verbindung (BS → MS oder MS → BS) verwendet. Eine Verbindung muss eingerichtet worden

sein, bevor sie benutzt wird. Die TL-DATA-Dienstelemente werden für alle unidirektionalen Datenübertragungen über diese Verbindung benutzt. Die genannten Dienstelemente werden für die bestätigte, verbindungsorientierte PzP-Übertragung benötigt. Bei verbindungsloser, unbestätigter PzP- oder PzM-Übertragung werden die TL-UNITDATA-Dienstelemente verwendet. Da keine Verbindung vorliegt, dürfen sie zu jedem Zeitpunkt versendet werden.

Tabelle A.4: Dienstelemente des PDO-Dienstzugangspunktes TLA

Dienstelement	Beschreibung
TL-CONNECTreq	Aufforderung an Schicht 2, eine Verbindung neu oder wieder einzurichten für eine bestätigte Übertragung
TL-CONNECTconf	Bestätigung der Einrichtung einer Verbindung
TL-CONNECTind	Meldung an Schicht 3, dass eine Verbindung eingerichtet wurde
TL-DATAreq	Aufforderung an Schicht 2, eine bestätigte Nachricht zu übertragen
TL-DATAconf	Meldung an Schicht 3, ob das Versenden der bestätigten Nachricht erfolgreich verlaufen ist
TL-DATAind	Weiterreichung einer empfangenen, bestätigten Nachricht an Schicht 3
TL-UNITDATAreq	Aufforderung an Schicht 2, eine unbestätigte Nachricht zu versenden
TL-UNITDATAind	Weiterreichung einer empfangenen und unbestätigten Nachricht an Schicht 3

A.5 Dienstelemente der PDO-MAC-Dienstzugangspunkte

Über den TLB-SAP werden auf Seiten der BS von der MLE- zur MAC-Teilschicht Systeminformationen mit Hilfe der Dienstelemente TL-BROADCAST-1 und TL-BROADCAST-2 weitergeleitet, die als Rundsendeinformation in SIN1- oder SIN2-PDUs versendet werden. Auf Seiten der MS werden die in diesen MAC-Büscheln enthaltenen Informationen zur MLE gesendet, vgl. Tab. A.5, S. 229.

Tabelle A.5: Dienstelemente der PDO-Dienstzugangspunkte TLB und TLC

Dienstelement	SAP	Beschreibung
TL-BROADCAST-1req	TLB	Aufforderung zur Versendung einer SIN1-PDU. Das Versenden wird bis zum Eintreffen einer neuen Aufforderung in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt.
TL-BROADCAST-1conf		Bestätigung der Verarbeitung einer SIN1-PDU.
TL-BROADCAST-1ind		Weiterreichung einer empfangenen SIN1-PDU(MS).
TL-BROADCAST-2req		Aufforderung zur Versendung einer SIN2-PDU.
TL-BROADCAST-2conf		Bestätigung der Verarbeitung einer SIN2-PDU.
TL-BROADCAST-2ind		Weiterreichung einer empfangenen SIN2-PDU(MS).
TL-SCANreq	TLC	Aufforderung auf Seiten der MS, einen Funkkanal zu untersuchen und die Messergebnisse an Schicht 3 zu melden.
TL-SCANconf		
TL-SERVINGind		Meldung der Messergebnisse für die aktuelle Zelle.
TL-MONITORreq		Aufforderung auf Seiten der MS, die Signalqualität einer Liste von Funkkanälen zu überprüfen und die Messergebnisse an die Schicht 3 zu melden.
TL-MONITORind		
TL-SELECTreq	TLC	Aufforderung auf Seiten der MS, einen definierten Funkkanal auszuwählen und die Auswahl zu bestätigen.
TL-SELECTconf		
TL-ADDLISTreq		Aufforderung auf Seiten der MS, die mitgelieferten Adressen für das Verlassen des Energiesparmodus zu berücksichtigen.

Über den TLC-SAP tauschen die MLE- und die MAC-Teilschicht der MS Kanalverwaltungsinformationen aus, vgl. Tab. A.5. Mit Hilfe der TL-SCAN-SPs wird die Untersuchung von Funkkanälen und die Berichterstattung der Messergebnisse durchgeführt. Regelmäßig informiert die MAC- die MLE-Teilschicht über die Messergebnisse der aktuellen Zelle unter Verwendung des TL-SERVINGind-SPs. Ist die MLE-Teilschicht an der Signalqua-

lität anderer Funkkanäle interessiert, überreicht sie der MAC-Teilschicht eine entsprechende Liste und erhält danach die Signalqualitätsmessungen der jeweiligen Funkkanäle zurück (TL-MONITOR). Hat sich die MLE für einen Funkkanal entschieden, teilt sie dies der MAC-Teilschicht mit, die den Erfolg der Kanalauswahl zurückmeldet (TL-SELECT).

Eine MS kann in den drei Modi *Normal Mode* (NOR), *Low Duty Mode* (LOD) und *Very Low Duty Mode* (VLD) betrieben werden. Im NOR-Modus hört sie der BS ständig zu. Die beiden anderen Energiesparmodi unterscheiden sich nur durch die Größe der Zeitintervalle, nach denen die MS der BS wieder zuhört. In einer regelmäßig von der BS versendeten WU-PDU werden diese Zeitintervalle definiert. Wenn eine MS senden will, geht sie sofort in den NOR-Modus über. Mit Hilfe des TL-ADDLISTreq-SPs teilt die MLE- der MAC-Teilschicht mit, auf welche in den WU-PDUs aufgeführten MAC-Adressen sie reagieren soll.

A.6 Die Dokumente des TETRA-Standards

Ein von dem ETSI verabschiedetes Dokument wird *European Telecommunication Standard* (ETS) genannt. Ein *ETSI Technical Report* (ETR) basiert auf Studien des ETSIs und ist ein rein informatives Dokument, das entweder die Benutzung oder Anwendung eines ETSs begleitet oder eine noch unfertige Vorstufe eines ETS darstellt. In Tab. A.6 sind die einzelnen ETS- und ETR-Dokumente des TETRA-Standards aufgeführt. Sie können über <http://www.etsi.org> bestellt werden.

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards

	ETS	Titel
V+D	300 392-1	General network design
	300 392-2	Air Interface (AI)
	Inter-working at the Inter-System Interface (ISI)	
	300 392-3-1	General design
	300 392-3-2	Additional Network Functions Individual Call (ANF-ISIIC)
	300 392-3-3	Additional Network Feature Group Call (ANF-ISIGC)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	ETS	Titel
V+D	300 392-3-5	Additional Network Functions Mobility Management (ANF-ISIMM)
	300 392-4-1	Gateways basic operation – Public Switched Telephone Network (PSTN)
	300 392-5	Peripheral Equipment Interface (PEI)
	300 392-6	Line Connected Station (LS)
	300 392-7	Security
	300 392-9	General requirements for supplementary services
	Supplementary Services Stage 1	
	300 392-10-01	Call identification
	300 392-10-02	Call report
	300 392-10-03	Talking party identification
	300 392-10-04	Call diversion
	300 392-10-05	List search call
	300 392-10-06	Call authorized by dispatcher
	300 392-10-07	Short number addressing
	300 392-10-08	Area selection
	300 392-10-09	Access priority
	300 392-10-10	Priority Call (PC)
	300 392-10-11	Call waiting
	300 392-10-12	Call hold
	300 392-10-13	Call completion to busy subscriber
	300 392-10-14	Late entry
	300 392-10-15	Transfer of control
	300 392-10-16	Pre-emptive priority call
	300 392-10-17	Include call
	300 392-10-18	Barring of outgoing calls
	300 392-10-19	Barring of incoming calls
	300 392-10-20	Discreet listening
	300 392-10-21	Ambience listening
	300 392-10-22	Dynamic group number assignment
	300 392-10-23	Call completion on no reply
	300 392-10-24	Call retention

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	ETS	Titel
V+D	Supplementary Services Stage 2	
	300 392-11-03	Talking Party Identification (TPI)
	300 392-11-06	Call Authorized by Dispatcher (CAD)
	300 392-11-09	Access Priority (AP)
	300 392-11-10	Priority Call (PC)
	300 392-11-14	Late Entry (LE)
	300 392-11-16	Pre-emptive Priority Call (PPC)
	300 392-11-18	Barring of Outgoing Calls (BOC)
	300 392-11-19	Barring of Incoming Calls (BIC)
	300 392-11-21	Ambience Listening (AL)
	300 392-11-22	Dynamic Group Number Assignment (DGNA)
	Supplementary Services Stage 3	
	300 392-12-03	Talking Party Identification (TPI)
	300 392-12-06	Call Authorized by Dispatcher (CAD)
	300 392-12-06	Call Authorized by Dispatcher (CAD)
	300 392-12-09	Access Priority (AP)
	300 392-12-10	Priority Call (PC)
	300 392-12-14	Late Entry (LE)
	300 392-12-16	Pre-emptive Priority Call (PPC)
	300 392-12-18	Barring of Outgoing Calls (BOC)
	300 392-12-19	Barring of Incoming Calls (BIC)
	300 392-12-21	Ambience Listening (AL)
	300 392-12-22	Dynamic Group Number Assignment (DGNA)
	300 392-13	SDL model of the Air Interface (AI)
	300 392-14	Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) proforma specification
PDO	300 393-1	General network design
	300 393-2	Air Interface (AI)
	300 393-3	Inter-working
	300 393-4	Gateways
	300 393-5	Terminal equipment interface
	300 393-6	Line connected stations
	300 393-7	Security

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	ETS	Titel
PDO	300 393-8	Management services
	300 393-9	Performance objectives
	300 393-10	SDL model of the Air Interface (AI)
	300 393-11	Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) proforma specification
V+D u. PDO	Conformance testing specification	
	300 394-1	Radio
	<i>Protocol testing specification</i>	
	300 394-2-1	Test suite structure and test purposes
	300 394-2-2	Abstract Test Suite (ATS) for Network (NWK) layer
	300 394-2-3	Abstract Test Suite (ATS) for Logical Link Control (LLC)
	300 394-2-4	Abstract Test Suite (ATS) for Medium Access Control (MAC)
	<i>Security</i>	
	300 394-5-1	Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) proforma specification
	300 394-5-2	Protocol testing specification for TETRA security
	300 394-5-3	Abstract Test Suite (ATS)
TETRA	Speech codec for full-rate traffic channel	
	300 395-1	General description of speech functions
	300 395-2	TETRA codec
	300 395-3	Specific operating features
DM	300 395-4	Codec conformance testing
	Technical requirements for Direct Mode Operation (DMO)	
	300 396-1	General network design
	300 396-2	Radio aspects
	300 396-3	Mobile Station to Mobile Station (MS-MS) Air Interface (AI) protocol
	300 396-4	Repeater type 1
	300 396-5	Gateways

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	ETS	Titel
DM	300 396-6	Security
	300 396-8-1	Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) proforma specification Mobile Station to Mobile Station (MS-MS) Air Interface (AI) protocol
TETRA	300 812	Security aspects: Subscriber Identity Module to Mobile Equipment (SIM-ME) interface
	ETR	Titel
V+D	086-1	Voice plus Data (V+D) systems
PDO	086-2	Packet Data Optimised (PDO) systems
TETRA	086-3	Security aspects
V+D	120	Open channel
DM	265	Technical requirements specification for Direct Mode (DM)
TETRA	292	Technical requirements specification – Network management
	Air Interface (AI) layer 2 and 3 protocol validation	
V+D	293-1	Validation of SDL models for Voice plus Data (V+D)
PDO	293-2	Validation of SDL models for Packet Data Optimized (PDO)
V+D u. DMO	294	Mobile Station (MS) Man Machine Interface (MMI)
TETRA	295	User requirements for Subscriber Identity Module (SIM)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	ETR	Titel
V+D	Designers' guide	
	300-1	Overview, technical description and radio aspects
	300-2	Radio channels, network protocols and service performance
	300-4	Network management
	300-5	Guidance on numbering and addressing
	346	Air Interface (AI) layer 2 and 3 protocol validation – Validation of test suites
	EN	Titel
TETRA	300 827	Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM) Electromagnetic Compatibility (EMC) standard for Terrestrial Trunked Radio (TETRA) and ancillary equipment
	301 040	Security: Lawful Interception (LI) interface
	EG	Titel
	201 040	Security: Lawful Interception (LI) interface – Feasibility study report
	TS	Titel
	101 040	Security: Lawful Interception (LI) interface
	TR	Titel
	Human Factors (HF)	
	<i>European harmonization of network generated tones</i>	
	101 041-1	A review and recommendations
	101 041-2	Listing and analysis of European, World and Standardized tones

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.6: Die Dokumente des TETRA-Standards*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

	TR	Titel
TETRA	Security Algorithms Group of Experts (SAGE)	
	101 052	Rules for the management of the TETRA standard authentication and key management algorithm set TAA1
	101 053-1	Rules for the management of the TETRA standard encryption algorithm TEA1
	101 053-2	Rules for the management of the TETRA standard encryption algorithm TEA2
	101 156	Technical requirements specification for Digital Advanced Wireless Service (DAWS)
	TBR	Titel
	035	Emergency access

TETRA-Szenarien

In [ETSI \(1991\)](#) werden zehn verschiedene TETRA-Szenarien vorgestellt, die die Grundlage für den Vergleich von simulativen Untersuchungen bilden sollen. In [Tab. B.1](#) werden die typischen Einsatzgebiete von TETRA durch entsprechende Szenarien beschrieben. Es werden in der Regel kreisförmige Szenarien vorausgesetzt (Ausnahme: Autobahnszenarium 3), die z. T. aus Zonen mit besonderen morphologischen Eigenschaften oder mit besonderen Teilnehmerdichten bestehen. In [Tab. B.1](#) ist das erwartete Verkehrsaufkommen pro Teilnehmer für Sprach- und Datenübertragungen aufgeführt. Unter mittlerer Wartezeit wird hierbei die Zeit von der Wahl der jeweiligen Teilnehmernummer bis zum vollzogenen Gesprächsaufbau verstanden. Die Ankunftsrate von Sprachverbindungen wird mit $\lambda_s = A/\bar{\beta}_s$ berechnet, wobei A dem Angebot von Sprachverbindungen, d. h. der Sprachaktivität, in Erlang und $\bar{\beta}_s$ der mittleren Bediendauer, d. h. der mittleren Gesprächsdauer, entspricht.

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
1	Öffentliches Netz einer europäischen Stadt mittlerer Dichte	
	Geländetyp	TU
	Abgedeckte Fläche	1 500 km ²
	Teilnehmerdichte	5 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	normalverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	50 % : 50 %
	Geschwindigkeit	3–80 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 3 %
	Sprachaktivität	A = 12,5 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 30 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 20 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 1,5 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 60 %

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 20 %
		OC ⁴ = 0 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 20 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,0 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	λ_{ld} = 0,5 1/h
2	Öffentliches Netz in europäischen Ballungsgebieten (Zone 2) bestehend aus Ringautobahnen (Zone 1) und Städten hoher Dichte (Zone 1)	
	<u>Zone 1</u>	
	Geländetyp	BU
	Abgedeckte Fläche	1 000 km ²
	Teilnehmerdichte	10 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	50 % : 50 %
	Geschwindigkeit	3–80 km/h
	<u>Zone 2</u>	
	Geländetyp	TU
	Abgedeckte Fläche	5 000 km ²
	Teilnehmerdichte	1 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	normalverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	30 % : 70 %
	Geschwindigkeit	3–80 km/h
	<u>Zone 1 und 2</u>	
	Verkehrsgüte	GoS = 3 %
	Sprachaktivität	A = 12,5 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 30 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 20 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 1,5 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 60 %
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 20 %
		OC ⁴ = 0 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 20 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,0 1/h

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld} = 0,5 \text{ 1/h}$
3	Öffentliches Netz auf Städte verbindenden Autobahnen	
	Geländetyp	HT
	Abgedeckte Fläche	$L_{\text{änge}}: 60 \text{ km}$
	Teilnehmerdichte	$hier: 20 \text{ 1/km}$
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	0 % : 100 %
	Geschwindigkeit	3–150 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 3 %
	Sprachaktivität	A = 12,5 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s = 30 \text{ s}$
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w = 20 \text{ s}$
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s = 1,5 \text{ 1/h}$
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 60 %
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 20 %
		OC ⁴ = 0 %
	Kurzdattennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd} = 20 \text{ 1/h}$
	Mitteldattennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md} = 0,0 \text{ 1/h}$
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld} = 0,5 \text{ 1/h}$
4	Öffentliches Netz in ländlicher Gegend mit Dörfern und kleineren Städten	
	Geländetyp	HT
	Abgedeckte Fläche	10 000 km ²
	Teilnehmerdichte	$0,3 \text{ 1/km}^2$
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	5 % : 95 %
	Geschwindigkeit	3–100 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 3 %
	Sprachaktivität	A = 12,5 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s = 30 \text{ s}$
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w = 20 \text{ s}$
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s = 1,5 \text{ 1/h}$
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 60 %

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 20 %
		OC ⁴ = 0 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 20 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,0 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,5 1/h
5	Öffentliches Netz in einem Gewerbegebiet für mehrere Industrieunternehmen	
	Geländetyp	BU
	Abgedeckte Fläche	50 km ²
	Teilnehmerdichte	70 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	80 % : 20 %
	Geschwindigkeit	3–50 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 3 %
	Sprachaktivität	A = 12,5 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 30 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 20 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 1,5 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 60 %
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 20 %
		OC ⁴ = 0 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 20 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,0 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,5 1/h
6	Stadtweites Privatnetz für Gerätebenutzer verschiedener Gesellschaften (Elektrizitätswerke, Wasserwerke, städtische Behörden)	
	Geländetyp	TU, BU
	Abgedeckte Fläche	1 500 km ²
	Teilnehmerdichte	1 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	50 % : 50 %

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
	Geschwindigkeit	3–80 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 5 %
	Sprachaktivität	A = 6 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 30 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 10 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 0,72 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 35 %
		MM ² = 5 %
		AG ³ = 40 %
		OC ⁴ = 20 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 5 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,5 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,0 1/h
7	Privatnetz in ländlicher Gegend für Gerätebenutzer verschiedener Gesellschaften (Elektrizitätswerke, Wasserwerke, etc.)	
	Geländetyp	RA, HT
	Abgedeckte Fläche	10 000 km ²
	Teilnehmerdichte	0,1 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	5 % : 95 %
	Geschwindigkeit	3–120 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 5 %
	Sprachaktivität	A = 6 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 30 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 10 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 0,72 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 35 %
		MM ² = 5 %
		AG ³ = 40 %
		OC ⁴ = 20 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 5 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,5 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,0 1/h

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
8	Stadtweites Privatnetz (Zone 2) für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) (Polizei, Feuerwehr, etc.) mit Ballungspunkten wegen Unfällen, Veranstaltungen, etc. (Zone 1)	
	<u>Zone 1</u>	
	Geländetyp	BU
	Abgedeckte Fläche	500 km ²
	Teilnehmerdichte	2 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	80 % : 20 %
	Geschwindigkeit	3–80 km/h
	<u>Zone 2</u>	
	Geländetyp	BU
	Abgedeckte Fläche	2 000 km ²
	Teilnehmerdichte	0,5 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	30 % : 70 %
	Geschwindigkeit	3–150 km/h
	<u>Zone 1 und 2</u>	
	Verkehrsgüte	GoS = 5 %
	Sprachaktivität	A = 12 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 20 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 4 s
	Sprachankunftsrate	λ_s = 2,16 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 30 %
		MM ² = 10 %
		AG ³ = 50 %
		OC ⁴ = 10 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 10 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 1,0 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,0 1/h

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
9	Privatnetz in ländlicher Gegend mit Dörfern und kleineren Städten für Sicherheitsdienste	
	Geländetyp	RA, HT
	Abgedeckte Fläche	10 000 km ²
	Teilnehmerdichte	0,1 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	gleichverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	0 % : 100 %
	Geschwindigkeit	3–150 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 5 %
	Sprachaktivität	A = 12 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 20 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 4 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 2,16 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 30 %
		MM ² = 10 %
		AG ³ = 50 %
		OC ⁴ = 10 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 10 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 1,0 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,0 1/h
10	Privates Betriebsfunknetz eines Flughafens	
	Geländetyp	BU
	Abgedeckte Fläche	50 km ²
	Teilnehmerdichte	50 1/km ²
	Teilnehmerverteilung	normalverteilt
	Verhältnis Handys zu Fahrzeuge	80 % : 20 %
	Geschwindigkeit	3–50 km/h
	Verkehrsgüte	GoS = 5 %
	Sprachaktivität	A = 20 mE
	Mittlere Gesprächsdauer	$\bar{\beta}_s$ = 20 s
	Mittlere Wartezeit	$\bar{\tau}_w$ = 4 s
	Sprachankunftsrate	$\bar{\lambda}_s$ = 3,6 1/h
	Sprachverbindungstyp	MF ¹ = 20 %
		MM ² = 20 %
		AG ³ = 50 %

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle B.1: TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Nr.	Beschreibung	Parameterwert
		OC ⁴ = 10 %
	Kurzdatennachrichten 100 byte	$\bar{\lambda}_{kd}$ = 20 1/h
	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte	$\bar{\lambda}_{md}$ = 0,5 1/h
	Langdatennachrichten 10 Kbyte	$\bar{\lambda}_{ld}$ = 0,0 1/h

¹ PzP-Ruf MS zu Festnetz (*Mobile Station To Fixed Network Call*, MF)² PzP-Ruf MS zu MS (*Mobile Station To Mobile Station Call*, MM)³ Bestätigter PzM-Gruppenruf (*Acknowledged Group Call*, AG)⁴ PzM-Rundfunkruf (*Open Channel Call*, OC)

Die SPEETCL-Klassenhierarchie

Inhalt	
C.1	Basisklassen 245
C.2	Felder 246
C.3	Ausnahmefehlerbehandlung 247
C.4	Allgemeine Behälter und Iteratoren 247
C.5	Ereignisorientierte Simulationssteuerung 249
C.6	Zufallszahlengeneratoren 249
C.7	Wahrscheinlichkeitsverteilungen 249
C.8	OSI-Referenzmodell 250
C.9	Lastgeneratoren 251
C.10	Übertragungsmodelle 253
C.11	Codec-Modelle 254
C.12	Modem-Modelle 254
C.13	Kanalmodelle 255
C.14	SDL-Laufzeitsystem 256
C.15	Statistische Auswertung 257
C.16	Persistenz 259
C.17	Verschiedenes 259

In der Klassenbibliothek (*SDL Performance Evaluation Environment and Tools Class Library*, SPEETCL) werden folgende elementaren Datentypen verwendet: char, byte, int16, uint16, int32, uint32, bool, float32 und double64. Hierbei kennzeichnen die Endziffern die verwendete Bitanzahl und stellen die ersten sechs Datentypen jeweils die vorzeichenbehaftete bzw. -lose Variante für die gleiche Bitbreite dar.

In der unten aufgeführten Liste sind die einzelnen Klassen und ihre Funktionen aufgeteilt in Aufgabengebiete aufgeführt. Die mit dem Buchstaben „P“ beginnenden Klassen fügen entsprechend Abb. 7.4, S. 161, ausschließlich die persistente Funktionalität ihren Basisklassen hinzu.

C.1 Basisklassen

Speetcl: Basisklasse mit statischen Funktionen zur Fehlerbehandlung.

Object: Basisklasse mit halbautomatischer Speicherverwaltung über Referenzzähler und mit Vergleichsoperatoren.

Param: Basisparameterklasse verwendet für die indirekte Objekterzeugung.

Type: Für jede Klasse der SPEETCL existiert eine globale Instanz von **Type** als Laufzeittypinformation.

C.2 Felder

Array: Basisklasse eindimensionaler Felder.

ArrayBool, PArrayBool: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs bool.

ArrayChar, PArrayChar: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs char.

ArrayByte, PArrayByte: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs byte.

ArrayInt16, PArrayInt16: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs int16.

ArrayUInt16, PArrayUInt16: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs uint16.

ArrayInt32, PArrayInt32: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs int32.

ArrayUInt32, PArrayUInt32: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs uint32.

ArrayFloat32, PArrayFloat32: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs float32.

ArrayDouble64, PArrayDouble64: Eindimensionales Feld für Elemente des Typs double64.

ArrayObject, PArrayObject: Eindimensionales Feld für beliebige Instanzen einer von **Object** abgeleiteten Klasse. Somit können alle SPEETCL-Klassen in Feldern dieses Typs verwaltet werden.

Array2: Basisklasse zweidimensionaler Felder.

Array2Bool, PArray2Bool: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs bool.

Array2Char, PArray2Char: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs char.

Array2Byte, PArray2Byte: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs byte.

Array2Int16, PArray2Int16: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs int16.
Array2UInt16, PArray2UInt16: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs uint16.
Array2Int32, PArray2Int32: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs int32.
Array2UInt32, PArray2UInt32: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs uint32.
Array2Float32, PArray2Float32: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs float32.
Array2Double64, PArray2Double64: Zweidimensionales Feld für Elemente des Typs double64.
Array2Object, PArray2Object: Zweidimensionales Feld für beliebige Instanzen einer von Object abgeleiteten Klasse. Somit können alle SPEETCL-Klassen in Feldern dieses Typs verwaltet werden.

C.3 Ausnahmefehlerbehandlung

Error: Abstrakte Basisklasse mit virtueller Fehlerbehandlungsmethode.
BadAlloc: Bei der Verwendung des new-Operators trat Speicher-mangel auf.
BadCast: Unzulässige Typumwandlung eines Zeigers.
BadTypeld: Die Typbeschreibung einer Klasse ist ungültig.
CreateErr: Die indirekte Objekterzeugung war erfolglos.
GenErr: Generische Fehlermeldung. Es wird eine benutzerdefinierte Zeichenkette ausgegeben.
MathErr: Mathematischer Fehler, z. B. Division durch Null.
RangeErr: Bereichsüberschreitung bei Feldern.

C.4 Allgemeine Behälter und Iteratoren

SLList, PSLList: Einfach verkettete Listen.
DLList, PDLList: Doppelt verkettete Listen.
SLObject, PSLObject: Objekte dieses Typs können in einfach verketteten Listen abgelegt werden.
DLObject, PDLObject: Objekte dieses Typs können in doppelt verketteten Listen abgelegt werden.

SLIterator: Iterator für einfach verkettete Listen.

DLIterator: Iterator für doppelt verkettete Listen.

HashTable: Abstrakte Basisklasse für Hashtabellen.

HashStatic, PHashStatic: Hashtabelle mit statischer Anzahl möglicher Tabelleneinträge, d. h. die Anzahl muss zum Zeitpunkt bekannt sein, wenn das Objekt erzeugt wird.

HashDynamic, PHashDynamic: Eine Hashtabelle mit dynamisch zur Laufzeit änderbarer Anzahl möglicher Tabelleneinträge.

HashEntry, PHashEntry: Objekte dieses Typs können in Hashtabellen abgelegt werden.

HashIterator: Iterator für statische und dynamische Hashtabellen.

Key: Abstrakte Basisklasse für Schlüssel, mit deren Hilfe Objekte in Hashtabellen abgelegt und wiedergefunden werden können. Die abgeleiteten Klassen stellen eine Hashfunktion für den jeweiligen Schlüsseltyp zur Verfügung.

KeyInt32, PKeyInt32: Schlüssel für Hashtabellen, wobei die Hashfunktion Werte des Typs `int32` verarbeitet.

KeyString, PKeyString: Schlüssel für Hashtabellen, wobei die Hashfunktion beliebige Zeichenketten verarbeitet.

Queue: Abstrakte Basisklasse für Warteschlangen.

QueueFIFO, PQueueFIFO: Eine Warteschlange, die die eingegangenen Aufträge nach dem FIFO-Prinzip ausgibt.

QueueLIFO, PQueueLIFO: Eine Warteschlange, die die eingegangenen Aufträge nach dem LIFO-Prinzip ausgibt.

QueuePrioFIFO, PQueuePrioFIFO: Es existieren mehrere parallele FIFO-Warteschlangen. Jede wird mit einer Priorität assoziiert. Der erste Auftrag in der Warteschlange mit der höchsten Priorität wird stets als nächstes ausgegeben.

QueueRandom, PQueueRandom: Warteschlange, die aus den eingegangenen Aufträgen gleichverteilt einen zur Bearbeitung zufällig auswählt.

QueueSPT, PQueueSPT: Warteschlange, die den Auftrag mit der kürzesten Gesamtbearbeitungszeit auswählt (*Shortest Processing Time*, SPT).

Job, PJob: Objekte dieser Klasse können als Aufträge für Warteschlangen nach dem SPT-Prinzip verwendet werden.

C.5 Ereignisorientierte Simulationssteuerung

EventScheduler: Abstrakte Basisklasse der zentralen, ereignisorientierten Simulationssteuerung.

EventHeapScheduler, PEventHeapScheduler: Eine spezielle Simulationssteuerung, die die eingereichten Ereignisse in einer *Heap*-Datenstruktur verwaltet.

Event, PEvent: Instanzen dieser Klasse sind Ereignisse, die mit der Absender- und der Empfängeradresse, dem Eintrittszeitpunkt und den transportierten Daten versehen werden.

EventIterator: Abstrakte Basisklasse für Iteratoren der Ereignisliste.

EventHeapIterator, PEventHeapIterator: Iterator für als *Heap*-Datenstruktur realisierte Ereignislisten.

EventHandler: Abstrakte Basisklasse für zustandsorientierte Ereignisbehandlung.

C.6 Zufallszahlengeneratoren

RNGen: Die Abstrakte Basisklasse für quasi-ideale Zufallszahlengeneratoren mit allgemeiner Schnittstelle zur Ziehung von 32 bit und 64 bit breiten, zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallszahlen ([RICHTER, 1992](#)).

ACGen, PACGen: Additiver Kongruenzgenerator.

LCGen, PLCGen: Linearer Kongruenzgenerator.

MLCGen, PMLCGen: Multiplikativer linearer Kongruenzgenerator.

FiboGen, PFiboGen: Verzögerter Fibonacci-Generator.

TausGen, PTausGen: Tausworthe-Generator.

C.7 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

BaseDis: Die abstrakte Basisklasse für kontinuierliche Verteilungsdichtefunktionen und diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktionen. In den abgeleiteten Klassen wird eine quasi-ideale Gleichverteilung zwischen 0 und 1 der Zufallsgeneratoren auf die jeweilige Verteilungsdichtefunktion bzw. Wahrscheinlichkeitsfunktion abgebildet.

Diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktionen

BinomDis, PBinomDis: Binomialverteilung.

DUniDis, PUniDis: Es werden gleichverteilte ganze Zahlen gezogen, wobei auf die intern gezogene Fließkommazufallszahl die untere Gaußklammeroperation angewendet wird.

GeoDis, PGeoDis: Geometrische Verteilung.

HyGeoDis, PHyGeoDis: Hypergeometrische Verteilung.

IntDis, PIntDis: Es werden gleichverteilte ganze Zahlen gezogen.

PoisDis, PPoisDis: Poisson-Verteilung.

Kontinuierliche Verteilungsdichtefunktionen

BetaDis, PBetaDis: Beta-Verteilung.

DeterDis, PDeterDis: Deterministische Verteilung. Es wird immer ein benutzerdefinierter Wert zurückgegeben.

ErlanDis, PERlanDis: Erlang-k-Verteilung.

HyExpDis, PHyExpDis: Hyperexponentielle Verteilung.

LogNDis, PLogNDis: Log-Normalverteilung.

NExpDis, PNExpDis: Negative Exponentialverteilung.

NormDis, PNormDis: Gaußsche Normalverteilung.

RayliDis, PRayliDis: Rayleigh-Verteilung.

RiceDis, PRiceDis: Rice-Verteilung.

TabDis, PTabDis: Tabellenbasierte Verteilung. Aus einer benutzerdefinierten Tabelle werden gleichverteilt Zufallszahlen gezogen.

ITabDis, PITabDis: Interpolierte Tabellenverteilung. Aus einer benutzerdefinierten Tabelle wird gleichverteilt ein Wert gezogen. Als Zufallszahl wird gleichverteilt ein Wert zwischen dem gezogenen Wert der Tabelle und dem benachbarten, nächstgrößeren Tabelleneintrag zurückgegeben.

DTabDis, PDTabDis: Dirac-Tabellenverteilung. Diese Verteilung liefert denjenigen Wert aus einer benutzerdefinierten Tabelle, die die nächst größere Zahl zur vom Zufallszahlengenerator gelieferten, gleichverteilten Zufallszahl ist.

UniDis, PUniDis: Gleichverteilung mit benutzerabhängigem Definitionsbereich.

C.8 OSI-Referenzmodell

IDU, PIDU: Diese Klasse ist die Basisklasse für Schnittstellendateneinheiten (*Interface Data Unit*, IDU). Jede mit einem Dienstelement versendete IDU beinhaltet neben Schnittstellensteuerinformation (*Interface*

Control Information, ICI) eine Dienstdateneinheit (Service Data Unit, SDU).

ICI, PICI: Schnittstellensteuerinformation, die in Dienstelementen versendet wird.

TransmissionICI, PTransmissionICI: In dieser Klasse ist die Schnittstellensteuerinformation für die Kommunikation mit den Übertragungsmodellen implementiert.

PDU, PPDU: Zur Ende-zu-Ende-Kommunikation zwischen zwei Protokollinstanzen wird diese Klasse für Protokolldateneinheiten (Protocol Data Unit, PDU) herangezogen. Sie beinhaltet Protokollsteuerinformation (Protocol Control Information, PCI) und die Dienstdateneinheit der nächsthöheren Schicht. Eine PDU wird dann als SDU an die nächsttiefere Schicht weitergeleitet.

PCI, PPCI: Die Protokollsteuerinformation, die in Protokolldateneinheiten verwendet wird.

TransmissionPCI, PTransmissionPCI: Die Protokollsteuerinformation für die Kommunikation zwischen den Modulen der Übertragungsmodelle.

C.9 Lastgeneratoren

LoadGenerator: Abstrakte Basisklasse aller Lastgeneratoren.

Audio: Abstrakte Basisklasse aller Audiogeneratoren.

AudioGeneric, PAudioGeneric: Generischer Codec für beliebige Constant Bit Rate (CBR)-Audioquellen.

AudioVAT, PAudioVAT: Nachbildung des Audiocodex des Konferenzwerkzeuges VAT.

Speech: Abstrakte Basisklasse für Sprachlastgeneratoren.

ConSpeaker, PConSpeaker: Sechs-Zustandsmodell nach [BRADY \(1969\)](#) für sechzehn verschiedene Konversationen.

MSSpeaker, PMSSpeaker: Ein Zwei-Zustandsmodell für einen Sprecher ohne Berücksichtigung der Kommunikation mit einem anderen Gesprächspartner („Minisource“-Modell).

FTP, PFTP: Lastgenerator für FTP-Sitzungen mit unidirektionalem Lastaufkommen zur Nachbildung eines FTP-Diensterbringers.

MosaicClient, PMosaicClient: Ein Lastgenerator für WWW-Sitzungen zur Nachbildung eines Dienstnutzers.

MosaicServer, PMosaicServer: In dieser Klasse ist ein Lastgenerator implementiert, um einen Diensterbringer in einer WWW-Sitzung nachzubilden.

SMTP, PSMTTP: Ein Lastgenerator für SMTP-Sitzungen zur Nachbildung eines SMTP-Diensterbringers.

TelnetClient, PTelnetClient: Ein Lastgenerator zur Nachbildung eines Dienstnutzers in einer Telnet-Sitzung.

TelnetServer, PTelnetServer: Lastgenerator, der in einer Telnet-Sitzung einen Diensterbringer nachbildet.

LoadMixAdmin, PLoadMixAdmin: In dieser Klasse ist ein Lastgenerator zur Erzeugung von benutzerdefinierten Lastprofilen implementiert. Diese setzen sich aus den oben beschriebenen Lastgeneratoren zusammen. Die Länge einzelner Sitzungen ist negativ exponentiell verteilt.

AudioGenericParam, PAudioAudioGenericParam: Über diese Parameterklasse können indirekt erzeugte Objekte der Klassen `AudioGeneric` bzw. `PAudioGeneric` konfiguriert werden.

AudioVATParam, PAudioVATParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `AudioVAT` bzw. `PAudioVAT`.

ConSpeakerParam, PConSpeakerParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `ConSpeaker` bzw. `PConSpeaker`.

MSSpeakerParam, PMSSpeakerParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `MSSpeaker` bzw. `PMSpeaker`.

FTPParam, PFTPParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `FTP` bzw. `PFTP`.

MosaicClientParam, PMosaicClientParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `MosaicClient` bzw. `PMosaicClient`.

MosaicServerParam, PMosaicServerParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `MosaicServer` bzw. `PMosaicServer`.

SMTPParam, PSMTTPParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `SMTP` bzw. `PSMTTP`.

TelnetClientParam, PTelnetClientParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen `TelnetClient` bzw.

PTelnetClient.

TelnetServerParam, PTelnetServerParam: Parameterklasse für die Konfiguration indirekt erzeugter Objekte der Klassen TelnetServer bzw. PTelnetServer.

LoadMixEntry, PLoadMixEntry: Lastprofile für die Klasse LoadMixAdmin werden mit Objekten dieser Klasse definiert.

LoadData, PLoadData: Die von den Lastgeneratoren generierte Last. Diese Last ist durch die Zwischenankunftszeit und durch die Paketgröße gekennzeichnet.

C.10 Übertragungsmodelle

Transmission, PTransmission: In dieser Klasse ist die Schnittstelle zu den Übertragungsmodellen implementiert, die aus Codec-, Modem- und Kanalmodellen bestehen. Sie wird mit einer Ini-Datei (vgl. IniFile-Klasse auf S. 259) konfiguriert und stellt eine EFSM dar (vgl. EventHandler-Klasse auf S. 249).

TransmissionInfo, PTransmissionInfo: Konfiguration eines Übertragungsmodells.

Link, PLink: Diese Klasse repräsentiert die physikalische Verbindung zwischen einem Sender und einem Empfänger. Die Entfernung, die aktuelle BER, die aktuelle Ausbreitungsverzögerung und die Übertragungsrate sind charakteristische Eigenschaften einer solchen Verbindung.

KeyCodec, PKeyCodec: Zur Verwaltung von Codec-Modellen in Hashtabellen (vgl. HashTable-Klasse auf S. 248) werden die für ein Codec-Modell spezifischen Informationen in einen auf einer Zeichenkette basierenden Schlüssel umgewandelt (vgl. KeyString-Klasse auf S. 248).

KeyModem, PKeyModem: Analog zur Klasse KeyCodec werden die für ein Modem-Modell spezifischen Informationen in einen auf einer Zeichenkette basierenden Schlüssel umgewandelt, um Modem-Modelle auf einfache Weise in Hashtabellen verwalten zu können.

KeyChannel, PKeyChannel: Analog zur Klasse KeyCodec werden die für ein Kanalmodell spezifischen Informationen in einen auf einer Zeichenkette basierenden Schlüssel umgewandelt, um Kanalmodelle auf einfache Weise in Hashtabellen verwalten zu können.

C.11 Codec-Modelle

Codec: Abstrakte Basisklasse für Codec-Modelle.

Cyclic: Abstrakte Basisklasse für auf zyklischen Blockcodes basierenden Codec-Modellen.

CRC, PCRC: Ein zyklischer Blockcode nach dem Verfahren *Cyclic Redundancy Check* (CRC) (SKLAR, 1988).

RSC, PRSC: Reed-Solomon-Code (SKLAR, 1988).

Null, PNull: Diese Klasse führt keine Codierung der Eingangssequenz durch und gibt sie unverändert wieder aus.

SpaceBER, PSpaceBER: Diese Klasse stellt eine von den Codec-Klassen verwendete Datenstruktur dar, die die Länge der fehlerfreien Abstände und die BER einer Eingangssequenz beinhaltet.

C.12 Modem-Modelle

Transceiver: Abstrakte Basisklasse für Modelle von Sendern und Empfängern. In den abgeleiteten Klassen ist die Berechnung der aktuellen BER zu implementieren.

DPSKTransceiver, PDPSKTransceiver: In dieser Klasse ist ein Sender- und Empfängermodell für das Modulationsverfahren *Differential Phase Shift Keying* (DPSK) implementiert.

Correlator: Abstrakte Basisklasse für Optimalempfänger als Korrelator, der einem Optimalfilter (*Matched Filter*) mit anschließendem Abtaster entspricht.

DPSKCorrelator, PDPSKCorrelator: In dieser Klasse ist ein Korrelator für nach dem DPSK-Verfahren modulierte Signale implementiert.

DPSKCorrelationFilter, PDPSKCorrelationFilter: In dieser Klasse ist ein Korrelationsfilter für DPSK-modulierte Signale implementiert.

RaisedCosineFilter, PRaisedCosineFilter: Diese Klasse stellt ein sog. *Raised Cosine*-Korrelationsfilter zur Verfügung.

RootRaisedCosineFilter, PRootRaisedCosineFilter: In dieser Klasse ist das *Square Root Raised Cosine* (SRRC)-Korrelationsfilter implementiert.

DPSKDecisionStage, PDPSKDecisionStage: Die Entscheidungsstufe eines Empfängers für DPSK-modulierte Signale ist in dieser Klasse implementiert.

PiDQPSKDecisionStage, PPiDQPSKDecisionStage: Diese Klasse ist die Entscheidungsstufe eines Empfängers für $\pi/4$ -DQPSK-modulierte Signale implementiert.

C.13 Kanalmodelle

Fading: Abstrakte Basisklasse für Schwundklassen.

RayleighFading, PRayleighFading: Aufgrund von Mehrwegeausbreitung überlagern sich am Empfangsort einzelne Feldkomponenten des elektromagnetischen Signals mit unterschiedlichen Laufzeiten. Wenn keine LOS besteht und es keine dominante Komponente gibt, dann gehorcht der Mittelwert der Amplitude eines Signals mit schnellem Mehrwegeschwund einer Rayleigh-Verteilung.

LogNormalFading, PLogNormalFading: Abschattungen von elektromagnetischen Signalen an Bergen, Bäumen, Häusern wirken sich als langsamer Schwund aus. Der Mittelwert der Amplitude eines Signals mit Abschattungsschwund ist meistens lognormal verteilt. Hierfür ist diese Klasse zuständig.

PathLoss: Abstrakte Basisklasse für den Pfadverlust der Feldstärke einer elektromagnetischen Welle.

FreeSpace, PFreeSpace: Im freien Raum nimmt die Feldstärke umgekehrt proportional mit der Entfernung zum Sender ab.

HataOkumura, PHataOkumura: Vorhersagemodell von HATA-OKUMURA für den Pfadverlust bei realen Ausbreitungsbedingungen ([HATA, 1980](#)). Es ist beschränkt auf Frequenzen im Bereich 450 MHz – 1,5 GHz, Antennenhöhen von 30 m – 200 m auf der BS-Seite und 1 m – 10 m auf der MS-Seite und Entfernungen zwischen BS und MS von 1 km – 20 km.

WalfischIkegami, PWalfischIkegami: Das Vorhersagemodell für den Pfadverlust bei realen Ausbreitungsbedingungen ist nach WALFISCH-IKEGAMI ([EUROPEAN COMMUNITIES, 1991](#)) entstanden.

PathLossParam: Basisklasse für die Konfigurierung indirekt erzeugter Objekte von PathLoss abgeleiteter Klassen.

HataOkumuraParam, PHataOkumuraParam: Indirekt erzeugte Objekte der Klassen HataOkumura bzw. PHataOkumura können mit dieser Parameterklasse konfiguriert werden.

C.14 SDL-Laufzeitsystem

SDLSystem, PSDLSystem: Die in SDL mit „System“ bezeichnete Hierarchieebene wird vom Codegenerator auf eine von **SDLSystem** abgeleitete Klasse abgebildet.

SDLEnvironment, PSDLEnvironment: Eine Klasse, die die Schnittstelle zwischen den normalen Instanzen von **SDLSystem**-Klassen und nicht auf SDL basierenden Ereignisbehandlungsklassen der ereignisorientierten, stochastischen Simulation darstellt.

SDLProcess, PSDLProcess: Vom Codegenerator wird der Zustandsautomat eines SDL-Prozesses auf eine von **SDLProcess** abgeleitete Klasse abgebildet.

SDLProcessData, PSDLProcessData: Jede **SDLProcess**-Klasse wird mit einer Instanz dieser Klasse assoziiert. Sie verwaltet die verschiedenen Instanzen der jeweiligen SDL-Prozesse und der mit ihnen verbundenen Kommunikationspartner.

SDLProcessDataParam, PSDLProcessDataParam: Indirekt erzeugte Objekte der Klassen **SDLProcessData** bzw. **PSDLProcessData** können mit dieser Parameterklasse konfiguriert werden.

SDLPid, PSDLPid: Der SDL-Datentyp **Pid** wird vom Codegenerator auf diese Klasse abgebildet.

SDLProcessType, PSDLProcessType: Instanzen dieser Klasse werden immer dann im vom Codegenerator erzeugten Quelltext verwendet, wenn statt einer expliziten Adressierung eines Prozesses in der SDL-Spezifikation mit einem **Pid**-Ausdruck der Empfänger implizit adressiert wird.

SDLChannel, PSDLChannel: Diese SDL-Übertragungswege nachbildende Klasse kann die zu übertragenden Signale gemäß einer benutzerdefinierten Verteilung zufällig verzögern.

SDLSignal, PSDLSignal: Die ereignisorientierte Simulation von in C++ implementierten SDL-Spezifikationen erfolgt über Instanzen dieser Klasse.

SDLSignalParam: Parameterklasse für die Konfigurierung indirekt erzeugter Objekte der Klassen **SDLSignal**.

SDLTimer, PSDLTimer: Ein SDL-Zeitgeber wird vom Codegenerator auf eine Instanz dieser Klasse abgebildet.

SDLTimerParam, PSDLTimerParam: Parameterklasse für die Konfigurierung indirekt erzeugter Objekte der Klassen **SDLTimer** bzw. **PSDLTimer**.

MSC, PMSC: Mit dieser Klasse können dynamische Programmpfade zur Laufzeit in Form von Nachrichtenflussdiagrammen (MSCs) protokolliert werden.

C.15 Statistische Auswertung

StatEval: Abstrakte Basisklasse der statistischen Auswertung. Alle Statistikklassen liefern die ersten drei Momente der untersuchten Zufallsfolge, d. h. Mittelwert, Varianz und Schiefe.

PDF, PPDF: Diese Klasse kann verwendet werden, um die Verteilungsfunktion, die komplementäre Verteilungsfunktion und die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer gegebenen zufälligen Folge von Werten auszugeben. Dieser Algorithmus berücksichtigt die Korrelation der eingegebenen Werte in keiner Weise und kann nur verwendet werden, um einen ersten Eindruck von der Verteilung einer Zufallsfolge zu erlangen.

LogEval, PLogEval: Mit dieser Klasse kann die eingegebene Zufallsfolge in einer separaten Datei protokolliert werden. Die eigentliche Auswertung hat dann mit einer anderen Statistikklasse nach dem Programmlauf zu erfolgen.

ProbeText, PProbeText: Mit dem aktuellen Zeitstempel werden benutzerdefinierte Zeichenketten protokolliert. Während eines Simulationslaufes können auf diese Weise vom Benutzer mehrere Systemvariablen miteinander verglichen werden.

Histogram, PHistogram: Bei einer vom Benutzer vorgegebenen Auflösung der Abszisse erstellt diese Klasse ein Histogramm der Eingabewerte.

Moments, PMoments: Mit dieser Klasse können ausschließlich die ersten drei Momente, d. h. Mittelwert, Varianz und Schiefe, der Eingabewerte berechnet werden.

MomTime, PMomTime: Analog zur Klasse **Moments** können die ersten drei Momente der Eingabewerte mit dieser Klasse berechnet werden. Hierbei werden diese Eingabewerte mit dem Zeitintervall vom letzten Eingabezeitpunkt bis zum aktuellen gewichtet.

BatchMns, PBatchMns: Diese Klasse kann verwendet werden, um die Verteilungsfunktion, die komplementäre Verteilungsfunktion und die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer gegebenen zufälligen Folge von Werten auszugeben. Bei der Auswertung kommt das *Batch-Means*-Verfahren (BRATLEY et al., 1983; LAW und KELTON, 1991) zum Tragen.

LRE: Abstrakte Basisklasse für die Auswertung einer zufälligen Folge von Werten nach dem LRE-II-Algorithmus (SCHREIBER, 1988). Hierbei wird die Ordinate in eine benutzerdefinierte Anzahl von Intervallen eingeteilt.

LREF, PLREF: Diese Klasse liefert die Verteilungsfunktion und die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer gegebenen Folge von Werten.

LREG, PLREG: Diese Klasse liefert sowohl die komplementäre Verteilungsfunktion als auch die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer gegebenen Folge von Werten.

DLRE: Abstrakte Basisklasse für die Auswertung einer zufälligen Folge von Werten nach dem LRE-III-Algorithmus (SCHREIBER und GÖRG, 1996). Hierbei wird die Abszisse in eine benutzerdefinierte Anzahl von Intervallen eingeteilt.

DLREF, PDLREF: Diese Klasse liefert die Verteilungsfunktion einer gegebenen Folge von Werten.

DLREG, PDLREG: Diese Klasse liefert die komplementäre Verteilungsfunktion einer gegebenen Folge von Werten.

DLREP, PDLREP: Diese Klasse liefert die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer gegebenen Folge von Werten.

ResultMemory, PResultMemory: Diese Klasse wird in den LRE-Klassen verwendet, um die zu den Intervallen der Ordinate gehörenden, statistisch gesicherten Abszissenwerte abzulegen.

SortingMemory, PSortingMemory: Diese Klasse wird in den LRE-Klassen verwendet, um die noch nicht zur statistischen Berechnung herangezogenen Werte zwischenspeichern.

HistogramParam, PHistogramParam: Indirekt erzeugte Objekte der Klassen Histogram bzw. PHistogram können mit dieser Parameterklasse konfiguriert werden.

C.16 Persistenz

PDataBase: Einfache Programmierschnittstelle, um die persistenten Objekte eines Programms regelmäßig abspeichern zu lassen, einen Neustart basierend auf der letzten Speicherung durchzuführen, über eine IniFile-Konfigurationsdatei Messpunkte und ihre zugehörigen statistischen Auswertungsmethoden zu definieren und ihre Ergebnisse regelmäßig abspeichern zu lassen.

PIO: Diese Klasse definiert das Format, in dem persistente Objekte abgespeichert werden.

PObjectId: Entsprechend Abb. 7.4, S. 161, ist diese Klasse neben `Object` eine Basisklasse jeder persistenten Klasse. Jede Instanz einer persistenten Klasse erhält durch `PIO` eine eindeutige Identifikationsnummer.

Pstream: Abstrakte Basisklasse für persistente Ein- und Ausgabeströme.

Piostream: Klasse für dateibasierte, persistente Ein- und Ausgabeströme.

ReaderTable: Diese Klasse verwaltet die Liste aller abgespeicherten bzw. eingelesenen Objekte. Mit Hilfe der Identifikationsnummern wird sichergestellt, dass kein Objekt mehrmals abgespeichert bzw. eingelesen wird.

C.17 Verschiedenes

Double64, PDouble64: Behälter für Elemente des Typs `double64`. Objekte dieser Klasse können in den Behälterklassen der SPEETCL abgelegt werden.

Int32, PInt32: Behälter für Elemente des Typs `int32`. Objekte dieser Klasse können in den Behälterklassen der SPEETCL abgelegt werden.

String, PString: Klasse für die Verwaltung und Manipulation von Zeichenketten.

Named, PNamed: Basisklasse für normale Klassen, die mit einem Namen zu assoziieren sind.

IniFile, PIniFile: Diese Klasse stellt eine Schnittstelle für Konfigurationsdateien im Ini-Format dar. Mit ihr können Ini-Dateien eingelesen und gespeichert werden und Daten in Form von Zeichenketten oder elementaren Datentypen, wie z.B. `bool` oder `double64`, ausgelesen bzw. angelegt werden.

IniEntry, PIniEntry: Objekte dieser Klasse werden als Daten der Klasse `IniFile` verwendet.

Paket- und Bitfehlerverhältnisse in mehrzellularen Umgebungen

In untenstehender Tab. D.1 sind die Paketfehlerverhältnisse (*Message Error Ratio*, MER) und Bitfehlerverhältnisse (*Bit Error Ratio*, BER) der bei V+D entsprechend Abb. 2.12, S. 39, codierten Kanäle SCH/HD, BNCH oder STCH bzw. des bei PDO entsprechend Abb. 2.27, S. 82, codierten Kanals NBCH im Falle einer fehlerbehafteten Übertragung in Folge von Gleichkanalstörungen und weißem Rauschen aufgeführt. Hierbei werden die Kanaltypen TU50, BU50, RA200 und HT200 für die Zellgruppengrößen $N_c = 16, 19, 21, 25$ und die Signalstörabstände $S/N = \infty, 50, 20, 19, 17, 15$ bei $N_i = 0-6$ Gleichkanalstörern betrachtet.

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in mehrzellularen Umgebungen

N_c	S/N (dB)	(%)	0	1	N_i Gleichkanalstörer					
					2	3	4	5	6	
Kanaltyp TU50										
16	∞	MER	0,000	0,011	0,050	0,132	0,279	0,489	0,780	
		BER	0,000	0,181	0,351	0,519	0,687	0,852	1,015	
50		MER	0,000	0,012	0,056	0,143	0,287	0,505	0,808	
		BER	0,010	0,191	0,361	0,529	0,697	0,864	1,026	
20		MER	0,566	0,930	1,382	1,963	2,660	3,484	4,468	
		BER	0,897	1,075	1,244	1,412	1,577	1,740	1,903	
19		MER	1,026	1,558	2,192	2,922	3,832	4,815	5,981	
		BER	1,120	1,298	1,466	1,634	1,799	1,961	2,124	
18		MER	1,878	2,634	3,506	4,513	5,627	6,881	8,335	
		BER	1,398	1,575	1,745	1,910	2,075	2,237	2,399	
17		MER	3,465	4,553	5,723	6,971	8,466	10,076	11,766	
		BER	1,742	1,920	2,088	2,250	2,416	2,577	2,739	
16		MER	6,344	7,830	9,333	10,988	12,852	14,850	16,907	
		BER	2,165	2,343	2,510	2,672	2,838	3,000	3,162	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N_c	$\frac{s}{N}$ (dB)	(%)	N_i Gleichkanalstörer						
			0	1	2	3	4	5	6
15	MER	BER	11,170	13,080	15,141	17,337	19,541	21,828	24,200
			2,687	2,863	3,028	3,191	3,355	3,516	3,675
19	∞	MER	0,000	0,005	0,025	0,058	0,116	0,194	0,329
			0,000	0,130	0,250	0,370	0,488	0,605	0,723
50	MER	BER	0,000	0,004	0,023	0,061	0,124	0,205	0,327
			0,010	0,141	0,261	0,380	0,499	0,617	0,733
20	MER	BER	0,566	0,823	1,117	1,422	1,865	2,316	2,836
			0,897	1,025	1,145	1,262	1,381	1,497	1,613
19	MER	BER	1,026	1,399	1,783	2,278	2,771	3,385	4,028
			1,120	1,249	1,367	1,487	1,603	1,719	1,835
18	MER	BER	1,878	2,401	3,008	3,584	4,345	5,050	5,903
			1,398	1,524	1,646	1,762	1,881	1,997	2,112
17	MER	BER	3,465	4,218	4,993	5,843	6,761	7,674	8,770
			1,742	1,869	1,987	2,103	2,223	2,335	2,452
16	MER	BER	6,344	7,349	8,413	9,526	10,741	11,967	13,297
			2,165	2,293	2,410	2,528	2,645	2,760	2,873
15	MER	BER	11,170	12,565	13,919	15,393	16,889	18,435	20,012
			2,687	2,813	2,930	3,050	3,161	3,276	3,392
21	∞	MER	0,000	0,003	0,015	0,040	0,067	0,118	0,186
			0,000	0,108	0,207	0,305	0,400	0,498	0,594
50	MER	BER	0,000	0,004	0,014	0,040	0,072	0,124	0,202
			0,010	0,118	0,216	0,314	0,411	0,508	0,605
20	MER	BER	0,566	0,767	0,979	1,240	1,562	1,869	2,287
			0,897	1,005	1,103	1,197	1,292	1,389	1,486
19	MER	BER	1,026	1,330	1,633	1,998	2,398	2,826	3,342
			1,120	1,228	1,324	1,422	1,518	1,613	1,709
18	MER	BER	1,878	2,324	2,763	3,242	3,789	4,356	4,963
			1,398	1,505	1,601	1,698	1,794	1,888	1,986
17	MER	BER	3,465	4,111	4,692	5,361	6,100	6,824	7,643
			1,742	1,846	1,945	2,042	2,137	2,232	2,325
16	MER	BER	6,344	7,115	7,995	8,905	9,784	10,800	11,832
			2,165	2,273	2,368	2,464	2,558	2,651	2,747

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N _c	s/N		N _i Gleichkanalstörer							
	(dB)	(%)	0	1	2	3	4	5	6	
	15	MER	11,170	12,336	13,437	14,587	15,782	17,048	18,274	
		BER	2,687	2,791	2,889	2,983	3,077	3,173	3,265	
	25	∞	MER	0,000	0,002	0,007	0,016	0,030	0,053	0,085
		BER	0,000	0,079	0,149	0,218	0,286	0,356	0,424	
	50	MER	0,000	0,002	0,008	0,016	0,034	0,062	0,089	
		BER	0,010	0,090	0,159	0,229	0,297	0,366	0,434	
	20	MER	0,566	0,710	0,846	1,003	1,204	1,394	1,636	
		BER	0,897	0,975	1,044	1,113	1,182	1,248	1,316	
	19	MER	1,026	1,250	1,470	1,678	1,922	2,178	2,522	
		BER	1,120	1,201	1,267	1,335	1,403	1,472	1,540	
	18	MER	1,878	2,189	2,488	2,819	3,189	3,534	3,920	
		BER	1,398	1,477	1,545	1,613	1,682	1,748	1,816	
	17	MER	3,465	3,916	4,335	4,780	5,260	5,758	6,203	
		BER	1,742	1,819	1,887	1,957	2,022	2,091	2,157	
	16	MER	6,344	6,945	7,490	8,106	8,740	9,376	9,995	
		BER	2,165	2,245	2,312	2,378	2,447	2,513	2,579	
	15	MER	11,170	12,031	12,757	13,618	14,358	15,200	16,059	
		BER	2,687	2,764	2,831	2,900	2,965	3,033	3,098	
Kanaltyp BU50										
16	∞	MER	0,000	0,140	0,235	0,356	0,524	0,722	0,930	
		BER	0,000	0,530	0,643	0,755	0,867	0,978	1,088	
	50	MER	0,077	0,646	0,907	1,174	1,479	1,924	2,334	
		BER	0,417	0,944	1,057	1,170	1,279	1,392	1,502	
	20	MER	0,764	2,465	3,005	3,591	4,218	4,963	5,652	
		BER	1,009	1,532	1,646	1,757	1,867	1,977	2,084	
	19	MER	1,117	3,166	3,770	4,497	5,170	6,007	6,882	
		BER	1,159	1,683	1,794	1,905	2,016	2,125	2,237	
	18	MER	1,722	4,247	4,982	5,740	6,591	7,534	8,533	
		BER	1,347	1,871	1,983	2,092	2,203	2,312	2,423	
	17	MER	2,692	5,875	6,686	7,656	8,619	9,694	10,834	
		BER	1,581	2,103	2,214	2,324	2,435	2,542	2,653	
	16	MER	4,263	8,244	9,287	10,421	11,574	12,846	14,109	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N_c	$\frac{s}{N}$ (dB)	(%)	N_i Gleichkanalstörer						
			0	1	2	3	4	5	6
15		BER	1,874	2,391	2,502	2,615	2,724	2,832	2,941
		MER	6,777	11,887	13,174	14,478	15,816	17,230	18,724
		BER	2,230	2,750	2,861	2,973	3,078	3,190	3,297
19	∞	MER	0,000	0,119	0,171	0,241	0,334	0,435	0,557
		BER	0,000	0,496	0,575	0,655	0,736	0,813	0,891
50		MER	0,077	0,591	0,736	0,936	1,104	1,343	1,561
		BER	0,417	0,910	0,990	1,070	1,149	1,226	1,303
20		MER	0,764	2,319	2,683	3,056	3,444	3,931	4,358
		BER	1,009	1,500	1,581	1,659	1,736	1,814	1,890
19		MER	1,117	3,014	3,439	3,861	4,349	4,843	5,391
		BER	1,159	1,650	1,729	1,807	1,886	1,961	2,040
18		MER	1,722	4,073	4,544	5,074	5,603	6,189	6,819
		BER	1,347	1,836	1,917	1,995	2,072	2,150	2,226
17		MER	2,692	5,601	6,204	6,820	7,426	8,146	8,845
		BER	1,581	2,071	2,149	2,227	2,303	2,380	2,458
16		MER	4,263	7,905	8,657	9,378	10,157	10,995	11,827
		BER	1,874	2,360	2,438	2,516	2,592	2,671	2,747
15		MER	6,777	11,527	12,420	13,303	14,217	15,217	16,118
		BER	2,230	2,718	2,797	2,873	2,952	3,030	3,103
21	∞	MER	0,000	0,107	0,143	0,202	0,268	0,338	0,425
		BER	0,000	0,481	0,547	0,610	0,677	0,740	0,804
50		MER	0,077	0,567	0,695	0,827	0,970	1,141	1,294
		BER	0,417	0,896	0,961	1,026	1,090	1,156	1,219
20		MER	0,764	2,241	2,537	2,828	3,120	3,513	3,864
		BER	1,009	1,486	1,551	1,615	1,679	1,744	1,805
19		MER	1,117	2,961	3,288	3,602	3,994	4,380	4,812
		BER	1,159	1,634	1,702	1,763	1,829	1,892	1,955
18		MER	1,722	3,979	4,343	4,780	5,204	5,647	6,143
		BER	1,347	1,824	1,886	1,952	2,016	2,079	2,142
17		MER	2,692	5,468	5,931	6,446	7,021	7,478	8,118
		BER	1,581	2,057	2,120	2,184	2,248	2,310	2,375
16		MER	4,263	7,829	8,366	9,002	9,655	10,216	10,935

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N _c	s/N (dB)	(%)	N _i Gleichkanalstörer							
			0	1	2	3	4	5	6	
25	15	BER	1,874	2,345	2,409	2,474	2,537	2,597	2,663	
		MER	6,777	11,314	12,056	12,823	13,568	14,291	15,055	
		BER	2,230	2,703	2,768	2,830	2,895	2,960	3,020	
	∞	MER	0,000	0,097	0,129	0,151	0,199	0,231	0,273	
		BER	0,000	0,462	0,509	0,553	0,600	0,645	0,692	
		50	MER	0,077	0,531	0,610	0,699	0,787	0,890	1,001
	20	BER	0,417	0,876	0,924	0,968	1,014	1,060	1,107	
		MER	0,764	2,164	2,372	2,577	2,793	3,004	3,234	
		BER	1,009	1,465	1,512	1,558	1,602	1,649	1,692	
	19	MER	1,117	2,837	3,069	3,286	3,539	3,817	4,061	
		BER	1,159	1,616	1,662	1,707	1,752	1,797	1,844	
		18	MER	1,722	3,834	4,110	4,428	4,728	5,017	5,305
16	17	BER	1,347	1,804	1,848	1,895	1,941	1,985	2,030	
		MER	2,692	5,347	5,657	6,008	6,336	6,727	7,145	
		BER	1,581	2,037	2,084	2,128	2,170	2,218	2,263	
	16	MER	4,263	7,650	8,022	8,466	8,954	9,297	9,768	
		BER	1,874	2,325	2,371	2,418	2,463	2,505	2,550	
		15	MER	6,777	11,138	11,697	12,122	12,694	13,203	13,720
	15	BER	2,230	2,684	2,728	2,775	2,819	2,865	2,908	
		Kanaltyp RA200								
		16	∞	MER	0,000	0,011	0,056	0,137	0,288	0,516
	BER			0,000	0,189	0,361	0,529	0,698	0,864	1,027
	50			MER	0,000	0,014	0,058	0,158	0,312	0,538
	20	BER	0,018	0,207	0,378	0,547	0,713	0,880	1,046	
MER		0,596	0,982	1,466	2,054	2,786	3,616	4,580		
BER		0,909	1,096	1,265	1,434	1,601	1,763	1,927		
19	MER	1,064	1,605	2,266	3,056	3,966	5,011	6,180		
	BER	1,133	1,318	1,490	1,655	1,824	1,987	2,150		
	18	MER	1,968	2,752	3,628	4,669	5,850	7,099	8,579	
17	BER	1,413	1,600	1,768	1,935	2,098	2,262	2,426		
	MER	3,585	4,729	5,883	7,229	8,710	10,314	12,145		
	BER	1,759	1,943	2,110	2,279	2,444	2,603	2,767		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N_c	$\frac{s}{N}$ (dB)	(%)	N_i Gleichkanalstörer						
			0	1	2	3	4	5	6
16	MER		6,438	8,007	9,607	11,392	13,188	15,179	17,323
	BER		2,185	2,368	2,538	2,704	2,865	3,028	3,190
15	MER		11,368	13,492	15,525	17,665	19,968	22,326	24,654
	BER		2,706	2,893	3,056	3,220	3,385	3,547	3,708
19	∞	MER	0,000	0,006	0,027	0,059	0,118	0,206	0,329
		BER	0,000	0,138	0,259	0,379	0,498	0,616	0,735
50	MER		0,000	0,007	0,031	0,066	0,137	0,222	0,346
		BER	0,018	0,156	0,277	0,397	0,516	0,633	0,752
20	MER		0,596	0,865	1,157	1,497	1,936	2,401	2,930
		BER	0,909	1,044	1,166	1,285	1,403	1,519	1,635
19	MER		1,064	1,470	1,875	2,354	2,902	3,474	4,196
		BER	1,133	1,270	1,390	1,509	1,626	1,744	1,859
18	MER		1,968	2,526	3,081	3,729	4,453	5,202	6,097
		BER	1,413	1,549	1,667	1,787	1,902	2,019	2,135
17	MER		3,585	4,372	5,156	5,999	6,974	7,959	9,059
		BER	1,759	1,893	2,012	2,131	2,246	2,364	2,478
16	MER		6,438	7,543	8,649	9,769	10,999	12,265	13,631
		BER	2,185	2,319	2,437	2,555	2,669	2,786	2,902
15	MER		11,368	12,888	14,288	15,729	17,337	18,845	20,480
		BER	2,706	2,842	2,960	3,075	3,194	3,309	3,422
21	∞	MER	0,000	0,003	0,015	0,040	0,071	0,125	0,191
		BER	0,000	0,116	0,215	0,313	0,410	0,508	0,604
50	MER		0,000	0,005	0,019	0,046	0,083	0,139	0,210
		BER	0,018	0,134	0,232	0,331	0,428	0,525	0,622
20	MER		0,596	0,792	1,044	1,327	1,615	1,986	2,360
		BER	0,909	1,024	1,124	1,218	1,315	1,413	1,508
19	MER		1,064	1,403	1,694	2,083	2,490	2,950	3,459
		BER	1,133	1,248	1,346	1,442	1,539	1,636	1,733
18	MER		1,968	2,409	2,882	3,383	3,938	4,523	5,160
		BER	1,413	1,528	1,623	1,721	1,818	1,912	2,009
17	MER		3,585	4,230	4,882	5,555	6,284	7,050	7,883
		BER	1,759	1,872	1,970	2,067	2,161	2,258	2,351

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N_c	$\frac{s}{N}$ (dB)	(%)	N_i Gleichkanalstörer						
			0	1	2	3	4	5	6
16	MER		6,438	7,333	8,246	9,158	10,093	11,068	12,192
	BER		2,185	2,297	2,395	2,490	2,586	2,682	2,778
15	MER		11,368	12,628	13,805	14,995	16,185	17,486	18,772
	BER		2,706	2,820	2,919	3,012	3,107	3,203	3,298
25	∞	MER	0,000	0,001	0,007	0,021	0,034	0,056	0,084
		BER	0,000	0,087	0,157	0,226	0,295	0,365	0,433
50	MER		0,000	0,004	0,011	0,024	0,040	0,062	0,098
		BER	0,018	0,105	0,174	0,244	0,313	0,382	0,451
20	MER		0,596	0,743	0,905	1,053	1,268	1,449	1,692
		BER	0,909	0,994	1,064	1,131	1,202	1,269	1,337
19	MER		1,064	1,300	1,527	1,760	2,014	2,300	2,588
		BER	1,133	1,218	1,288	1,355	1,426	1,493	1,561
18	MER		1,968	2,292	2,605	2,938	3,294	3,637	4,068
		BER	1,413	1,497	1,566	1,634	1,705	1,770	1,839
17	MER		3,585	4,058	4,499	4,930	5,440	5,929	6,410
		BER	1,759	1,843	1,913	1,982	2,048	2,117	2,184
16	MER		6,438	7,144	7,778	8,362	9,042	9,615	10,285
		BER	2,185	2,272	2,339	2,405	2,475	2,540	2,607
15	MER		11,368	12,291	13,107	13,923	14,728	15,626	16,498
		BER	2,706	2,793	2,859	2,926	2,994	3,065	3,130
Kanaltyp HT200									
16	∞	MER	0,000	3,146	3,937	4,896	5,838	6,990	8,176
		BER	0,000	1,679	1,825	1,969	2,109	2,248	2,388
50	MER		2,431	17,276	19,206	21,203	23,271	25,325	27,515
		BER	1,535	3,191	3,333	3,473	3,613	3,750	3,888
20	MER		7,279	28,136	30,378	32,633	34,999	37,192	39,480
		BER	2,287	3,927	4,068	4,208	4,345	4,480	4,618
19	MER		9,029	31,133	33,456	35,721	38,072	40,393	42,549
		BER	2,474	4,115	4,255	4,394	4,531	4,668	4,802
18	MER		11,444	35,014	37,294	39,645	41,950	44,253	46,505
		BER	2,711	4,349	4,486	4,626	4,763	4,899	5,035
17	MER		14,815	39,796	42,131	44,490	46,830	49,060	51,280

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

N_c	$\frac{s}{N}$ (dB)	(%)	N_i Gleichkanalstörer					
			0	1	2	3	4	5
16	BER	3,003	4,634	4,777	4,914	5,051	5,187	5,321
		19,625	45,816	48,069	50,460	52,611	54,841	56,984
		3,364	4,990	5,129	5,270	5,403	5,543	5,675
15	MER	26,396	53,142	55,418	57,514	59,542	61,686	63,597
		3,816	5,431	5,570	5,706	5,843	5,980	6,112
19	∞	MER	0,000	2,905	3,469	4,030	4,690	5,357
		BER	0,000	1,636	1,739	1,840	1,939	2,043
50	MER	2,431	16,742	18,045	19,488	20,940	22,268	23,708
		BER	1,535	3,149	3,247	3,349	3,451	3,547
20	MER	7,279	27,525	29,035	30,625	32,217	33,835	35,471
		BER	2,287	3,887	3,984	4,084	4,181	4,280
19	MER	9,029	30,398	32,178	33,762	35,339	36,985	38,571
		BER	2,474	4,069	4,173	4,271	4,370	4,466
18	MER	11,444	34,278	35,955	37,580	39,203	40,841	42,443
		BER	2,711	4,305	4,404	4,501	4,600	4,696
17	MER	14,815	39,103	40,788	42,360	44,047	45,657	47,262
		BER	3,003	4,589	4,692	4,787	4,886	4,984
16	MER	19,625	45,115	46,794	48,405	49,987	51,579	53,061
		BER	3,364	4,950	5,049	5,144	5,244	5,338
15	MER	26,396	52,367	54,033	55,599	57,098	58,550	60,012
		BER	3,816	5,388	5,488	5,584	5,681	5,777
21	∞	MER	0,000	2,821	3,271	3,694	4,195	4,746
		BER	0,000	1,617	1,702	1,785	1,867	1,949
50	MER	2,431	16,521	17,607	18,669	19,783	20,959	22,139
		BER	1,535	3,132	3,213	3,294	3,375	3,455
20	MER	7,279	27,227	28,543	29,742	31,071	32,321	33,748
		BER	2,287	3,870	3,950	4,028	4,110	4,187
19	MER	9,029	30,145	31,406	32,785	34,121	35,519	36,789
		BER	2,474	4,053	4,133	4,214	4,298	4,378
18	MER	11,444	33,925	35,322	36,714	38,039	39,460	40,688
		BER	2,711	4,285	4,368	4,449	4,531	4,610
17	MER	14,815	38,846	40,200	41,441	42,889	44,162	45,531

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle D.1: Paket- und Bitfehlerverhältnisse in einer mehrzellularen Umgebung*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

N _c	s _{/N} (dB)	(%)	N _i Gleichkanalstörer						
			0	1	2	3	4	5	6
25	16	BER	3,003	4,576	4,655	4,734	4,815	4,896	4,975
		MER	19,625	44,854	46,160	47,490	48,775	50,102	51,404
	15	BER	3,364	4,933	5,013	5,092	5,170	5,252	5,327
		MER	26,396	52,149	53,462	54,789	55,888	57,132	58,417
		BER	3,816	5,371	5,451	5,533	5,608	5,689	5,767
		∞	MER	0,000	2,717	3,022	3,297	3,626	3,968
	BER		0,000	1,593	1,654	1,711	1,771	1,829	1,886
	50	MER	2,431	16,149	16,964	17,724	18,474	19,280	20,011
		BER	1,535	3,106	3,164	3,223	3,278	3,336	3,392
	20	MER	7,279	26,784	27,796	28,674	29,545	30,459	31,378
		BER	2,287	3,845	3,904	3,960	4,014	4,072	4,129
	19	MER	9,029	29,837	30,710	31,638	32,577	33,622	34,442
		BER	2,474	4,032	4,087	4,144	4,201	4,260	4,314
	18	MER	11,444	33,496	34,543	35,477	36,418	37,341	38,334
		BER	2,711	4,258	4,322	4,375	4,434	4,489	4,545
	17	MER	14,815	38,395	39,424	40,341	41,245	42,256	43,144
		BER	3,003	4,549	4,609	4,665	4,723	4,779	4,830
	16	MER	19,625	44,418	45,305	46,333	47,206	48,153	49,149
BER		3,364	4,909	4,963	5,022	5,076	5,134	5,190	
15	MER	26,396	51,868	52,662	53,582	54,473	55,369	56,224	
	BER	3,816	5,350	5,405	5,460	5,514	5,572	5,628	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Die Architektur des TETRA-Systems	14
2.2	Netzabschlüsse der Mobilstationen mit den Bezugspunkten R_T und U_m	16
2.3	Netzabschlüsse der drahtgebundenen Feststation	17
2.4	Architektur des V+D-Protokollstapels	19
2.5	Realisierung der physikalischen Kanäle mittels FDM und TDM	20
2.6	Frequenzaufteilung beispielhaft für den Bereich 380 MHz bis 400 MHz	21
2.7	TDMA-Struktur des <i>Voice plus Data</i> -Systems	22
2.8	V+D-Abwärts- und Aufwärtsstreckenbüschel	23
2.9	Blockdiagramm des Modulationsprozesses	30
2.10	Architektur der V+D-Sicherungsschicht	32
2.11	Schema der TETRA-Kanalcodierung	35
2.12	Struktur der V+D-Kanalcodierung	39
2.13	Zustandsdiagramm der V+D-Mobilstation in der MAC- Teilschicht	44
2.14	Zustandsdiagramm der V+D-Basisstation in der MAC-Teil- schicht	47
2.15	Zugriffsmethoden des V+D-Zufallszugriffsprotokolls	52
2.16	Die Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ des V+D- Zufallszugriffsprotokolls	53
2.17	Die Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ des V+D- Zufallszugriffsprotokolls	54
2.18	Zustandsdiagramm des Basic Links in der V+D-LLC-Teil- schicht	58
2.19	Zustandsdiagramm des Advanced Links in der V+D-LLC- Teilschicht	61
2.20	Architektur des PDO-Protokollstapels	62
2.21	Architektur der PDO-Sicherungsschicht	64
2.22	Datenstrukturen der PDO-Sicherungsschicht	65
2.23	Zustandsdiagramm der PDO-LLC-Teilschicht	67

2.24	Zugriffsmethode des PDO-Zufallszugriffsprotokolls	73
2.25	Zustandsdiagramm der PDO-Mobilstation in der MAC-Teil- schicht	77
2.26	Zustandsdiagramm der PDO-Basisstation in der MAC-Teil- schicht	80
2.27	Struktur der PDO-Kanalcodierung	82
2.28	Struktur der PDO-Abwärtsstreckenbüschel	84
2.29	Struktur der PDO-Aufwärtsstreckenbüschel	85
3.1	Die fünf Phasen des SDL-orientierten Softwareentwurfs . . .	89
4.1	Splitting-Algorithmus angepasst an V+D	102
4.2	Splitting-Algorithmus angepasst an PDO	104
5.1	Zustandsdiagramm eines S-ALOHA-Systems mit endlicher Teilnehmerzahl	111
5.2	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}$ bei $N = 10$ Mobilstationen	114
5.3	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}$ bei $N = 100$ Mobilstationen	114
5.4	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei $N = 10$ und $\mu = 0,25$	116
5.5	Mittlerer Auftragsüberhang $\bar{B}(\lambda)$ bei $N = 10$ und $\mu = 0,25$	116
5.6	Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}$ bei $N = 10$ Mobilstationen . .	116
5.7	Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei rollendem Zugriffsrah- men	120
5.8	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei rollendem Zugriffsrahmen . .	120
5.9	Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei diskretem Zugriffsrah- men	121
5.10	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei diskretem Zugriffsrahmen . .	121
5.11	Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(N)$ bei maximalem Zugriffs- fenster	122
5.12	Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(N)$ bei maximalem Zugriffsfenster . .	122
5.13	Zustandsübergänge der Nutzdatenübertragung	123
5.14	Wartewahrscheinlichkeit p_w bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern	131
5.15	Wartewahrscheinlichkeit p_w bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern (Ausschnitt)	132

5.16	Mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ bei V+D in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31$ Bedienern	133
5.17	Wartewahrscheinlichkeit p_w bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern	134
5.18	Wartewahrscheinlichkeit p_w bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern (Ausschnitt)	135
5.19	Mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ bei PDO in Abhängigkeit von der Teilnehmerzahl bei $M = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$ Bedienern	136
6.1	Der zweifach rekursive Produktentwicklungszyklus von SPEET	140
6.2	Die Werkzeugkomponenten von SPEET	141
6.3	Ein typisches SPEET-Szenarium	142
6.4	MSC mit zeitlichen Randbedingungen	145
6.5	Die Übertragungsmodelle von SPEET	146
6.6	Komponenten eines Beispielprozessorsystems	148
6.7	Grafische Repräsentation des neuen Messpunktsymbols	150
6.8	Beispielhafte Benutzung des neuen Messpunktsymbols	152
7.1	Die Basisklassen der SPEETCL	157
7.2	Die Klassen der ereignisorientierten Simulation	160
7.3	Die Klassen für die Ausnahmefehlerbehandlung	160
7.4	Einbindung persistenter Klassen in die Klassenhierarchie der SPEETCL	161
8.1	Das SDL-Laufzeitsystem der SPEETCL	167
9.1	Ausschnitt eines Zellnetzes mit regelmäßigen Sechsecken und Frequenzwiederholung bei Zellgruppengröße $N_c = 7$	174
9.2	Geometrie des ungünstigsten Falles bei einer gestörten Übertragung auf der Aufwärts- und der Abwärtsstrecke	176
9.3	Gleichkanalstörabstand C/I in Abhängigkeit von der Zellgruppengröße N_c im geometrisch ungünstigsten Fall bei $N_i = 6$ Störern und BS-Antennenhöhe $h_b = 30$ m	177

9.4	Modell für einen Breitbandkanal mit Gleichkanalstörungen und additivem, weißem gaußischem Rauschen	179
9.5	Vereinfachtes Bitfehlermodell nach Fritchman mit N_f fehlerfreien und $N_e = 1$ fehlerbehafteten Zuständen	186
9.6	Schematische Vorgehensweise zur Bestimmung des Paketfehlerverhältnisses (MER)	187
9.7	MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal TU50	190
9.8	MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal BU50	190
9.9	MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal RA200	190
9.10	MER für verschiedene Zellgruppengrößen ohne Rauschen beim Kanal HT200	190
9.11	MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal TU50	191
9.12	MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal BU50	191
9.13	MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal RA200	191
9.14	MER für verschiedene S/N bei Zellgruppengröße $N_c = 21$ beim Kanal HT200	191
10.1	Aufbau des TETRA-Simulators	194
10.2	V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen	199
10.3	V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen	199
10.4	V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $WT = 5, 10, 15$	199
10.5	V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $WT = 5, 10, 15$	199
10.6	V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $Nu = 5, 10, 15$	199
10.7	V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $Nu = 5, 10, 15$	199
10.8	V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 2, 5, 10$	200

10.9	V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 2, 5, 10$	200
10.10	V+D: Gewichteter Durchsatz $\hat{S}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$	200
10.11	V+D: Gewichtete Paketverzögerung $\hat{D}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$	200
10.12	V+D: CPDF der BL-Paketverzögerung D für $TO = 2, 5, 10$ und $\lambda/\lambda_t = 1$	200
10.13	V+D: CPDF der BL-Paketverzögerung D für $WT = 5, 10, 15$ und $\lambda/\lambda_t = 1$	200
10.14	V+D: Gewichtete Verkehrsgüte $\hat{G}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Kanaltypen	201
10.15	V+D: Gewichtete Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Kanaltypen	201
10.16	V+D: Gewichtete Verkehrsgüte $\hat{G}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50	201
10.17	V+D: Gewichtete Gesprächsaufbauzeit $\hat{C}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiedenen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50	201
10.18	V+D: PDF der Gesprächsaufbauzeit C für verschiedene Kanaltypen und $\lambda/\lambda_t = 1$	201
10.19	V+D: PDF der Gesprächsaufbauzeit C für verschiedene Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50 und $\lambda/\lambda_t = 1$	201
10.20	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen	210
10.21	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei verschiedenen Algorithmen	210
10.22	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $MAR = 3, 10, 25$	210
10.23	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $MAR = 3, 10, 25$	210
10.24	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $RD = 1, 5, 15$	210
10.25	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $RD = 1, 5, 15$	210
10.26	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 5, 20, 30$	211
10.27	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $TO = 5, 20, 30$	211

10.28	PDO: CPDF der Paketverzögerung D für $RD = 1, 5, 15$ und $\lambda/\lambda'_t = 1$	211
10.29	PDO: CPDF der Paketverzögerung D für $MAR = 3, 10, 25$ und $\lambda/\lambda'_t = 1$	211
10.30	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE für $f = 3, 4, 8$	211
10.31	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE für $f =$ $3, 4, 8$	211
10.32	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiede- nen Kanaltypen	212
10.33	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE mit ver- schiedenen Kanaltypen	212
10.34	PDO: Mittlerer Durchsatz $\bar{S}(\lambda)$ bei MMSE mit verschiede- nen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50	212
10.35	PDO: Mittlere Paketverzögerung $\bar{D}(\lambda)$ bei MMSE mit ver- schiedenen Zellgruppengrößen N_c beim Kanal TU50	212
10.36	PDO: CPDF der Paketverzögerung D für verschiedene Ka- naltypen und $\lambda/\lambda'_t = 1$	212
10.37	PDO: CPDF der Paketverzögerung D für verschiedene Zell- gruppengrößen N_c beim Kanal TU50 und $\lambda/\lambda'_t = 1$	212

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Technische Daten des Bündelfunksystems TETRA	9
2.2	Träger- und Teledienste für V+D und PDO im TETRA-Standard	13
2.3	Abbildung der logischen Kanäle auf die physikalischen Kanäle	28
2.4	Abbildung der V+D-MAC-PDUs auf die logischen Kanäle	42
2.5	Zustandsübergänge der V+D-Mobilstation in der MAC-Teilschicht	45
2.6	Zustandsübergänge der V+D-Basisstation in der MAC-Teilschicht	47
2.7	Die V+D-Zufallszugriffparameter der Access-Define-PDU	50
2.8	Die V+D-Zufallszugriffparameter der Access-Assign-PDU	51
2.9	Zustandsübergänge des Basic Links in der V+D-LLC-Teilschicht	58
2.10	Zustandsübergänge des Advanced Links in der V+D-LLC-Teilschicht	59
2.11	Zustandsübergänge der PDO-LLC-Teilschicht	68
2.12	Abbildung der PDO-MAC-PDUs auf die logischen Kanäle	72
2.13	Die PDO-Zufallszugriffparameter der AP-PDU	74
2.14	Die PDO-Zufallszugriffparameter der AA-PDU	75
2.15	Zustandsübergänge der PDO-Mobilstation in der MAC-Teilschicht	78
2.16	Zustandsübergänge der PDO-Basisstation in der MAC-Teilschicht	81
5.1	Sinnvolle Kombinationen der PDO-Zufallszugriffparameter MD und APL	118
5.2	Bediendauern einer AL-Verbindung	128
5.3	Mögliche Parameter eines PDO-Sprachdienstes	130
9.1	Beschreibung der Eigenschaften von Mobilfunkkanälen	170

9.2	Mögliche Zellgruppengrößen $N_c \leq 31$ hexagonaler Zellen im Falle vollständig flächendeckender Pflasterung	173
9.3	Die Kanalparameter für TETRA	181
10.1	Parameter der V+D-Simulationen	196
10.2	Parameter der PDO-Simulationen	207
A.1	Dienstelemente des V+D-Dienstzugangspunktes TLA	224
A.2	Dienstelemente der V+D-Dienstzugangspunkte TLB und TLC	225
A.3	Zuordnung von V+D-LLC- zu MAC-Dienstelementen	226
A.4	Dienstelemente des PDO-Dienstzugangspunktes TLA	228
A.5	Dienstelemente der PDO-Dienstzugangspunkte TLB und TLC	229
A.6	Die Dokumente des TETRA-Standards	230
B.1	TETRA-Szenarien – Allgemeine Daten und Verkehrsaufkommen	237
D.1	Paket- und Bitfehlerverhältnisse in mehrzellularen Umgebungen	261
E.1	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	287

GLOSSAR

Kursiv geschriebene Wörter mit vorangestellten Pfeilen verweisen auf Einträge des Glossars.

Abschattung: Die Wellenausbreitung im Mobilfunkkanal ändert sich mit der Zeit, da bei Bewegung des mobilen Teilnehmers oder der Hindernisse in Folge von Abschattungen entsprechend der Bebauungsstruktur durch Berge, Bäume, Häuser, etc. neue Empfangssituationen entstehen.

→ *Schwund*

Advanced Link: Bei V+D ist der AL entweder ein bidirektionaler, verbindungsorientierter Pfad zwischen zwei LLC-Instanzen einer MS und einer BS oder ein unidirektionaler Pfad zwischen einer BS und mehreren MSen. Ein AL bietet sowohl einen bestätigten als auch einen unbestätigten Dienst, Flusssteuerung mit Hilfe eines gleitenden Fensters, Segmentierung und die Auswahl zwischen mehreren Durchsätzen an. Stets wird ein erweiterter Fehlerschutz mittels einer FCS verwendet und ein Verbindungsaufbau benötigt.

→ *Basic Link*

Basic Link: Bei V+D ist der BL ein bidirektionaler, verbindungsloser Pfad zwischen einer oder mehreren MSen und einer BS. Ein BL bietet sowohl einen bestätigten als auch einen unbestätigten Dienst und einen erweiterten Fehlerschutz (FCS) an. Nach der Synchronisation zwischen MS und BS ist er sofort verfügbar.

→ *Advanced Link*.

Blockcode: Bei binären (n,k) -Blockcodes werden k bit breite Nachrichten auf n bit redundant erweitert, damit der Empfänger die Parität überprüfen und somit Fehler erkennen oder sogar korrigieren kann.

Ein Blockcode gilt als *linear*, wenn die Codiervorschrift des Blockcodes n bit breite Codewörter vorsieht, die den Null-Vektor beinhalten und deren beliebige Summe wieder gültige Codewörter ergibt.

Bei einem *systematischen* Blockcode wird eine k bit breite Nachricht so auf ein n bit breites Codewort abgebildet, dass die ersten k bit des Codewortes der ursprünglichen Nachricht exakt entsprechen. Die

übrigen $n - k$ bit dienen der Paritätsüberprüfung.

Ein *zyklischer* Blockcode ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes Codewort wieder ein gültiges Codewort ergibt, wenn alle seine Bits um eine Position nach rechts verschoben werden und das neue erste Bit dem ursprünglich letzten entspricht, wenn es also zyklisch ergänzt wird. Zyklische Blockcodes können algebraisch einfach mit Hilfe von Generatorpolynomen erzeugt werden.

Die im TETRA-System verwendeten Blockcodes sind binär, linear, systematisch und zyklisch.

→ *Faltungscodes*

Dienstgüte: Dienstgüte (*Quality of Service*, QoS) ist ein Qualitätsmaß eines Funknetzes, wobei im Gegensatz zur → *Verkehrsgüte* nur eine Verbindung bzw. ein Dienst des Funknetzes betrachtet wird. Zu typischen Dienstgüte-Parametern gehören der garantierte Durchsatz und der Umfang des Fehlerschutzes. Beim Verbindungsaufbau wird i. d. R. die jeweilige Dienstgüte unter den Kommunikationspartnern ausgehandelt. Beispielhaft sei hier der Verbindungsaufbau beim V+D-Verbindungstyp AL mit Hilfe der AL-Setup erwähnt, vgl. Abs. 2.6.4.2.3.2, S. 56.

→ *Verkehrsgüte*

Erlang: Erlang (E) wird als Pseudo-Einheit verwendet, um die Sprachaktivität eines oder mehrerer Sprecher zu charakterisieren. Erlang ist definiert als das Produkt aus der mittleren Anzahl von Gesprächen und der mittleren Gesprächsdauer in einem Betrachtungszeitraum. Wenn in einer Stunde im Mittel ein Gespräch von einer mittleren Dauer von 6 min geführt wird, dann liegt die Sprachaktivität bei $(1 \cdot 6 \text{ min})/60 \text{ min} = 0,1 \text{ E}$.

Faltungscodes: Bei binären (n, k, K) -Faltungscodes werden k bit Nachrichten auf n bit redundant erweitert. Sie werden durch $k \cdot K$ -stufige Schieberegister realisiert. Die Einwirktiefe K (*Constraint Length*) bestimmt die Anzahl von k bit Verschiebungen, über die ein einzelnes Bit die Ausgabe des Faltungscodierers beeinflussen kann. Jeweils ein Generatorpolynom bestimmt die Verknüpfung der $k \cdot K$ Schieberegister zu einem Bit des n bit breiten Codewortes.

→ *Blockcode*, → *Punktierung*

Frequenzdispersion: Bewegt sich ein Empfänger relativ zum Sender, so kommt es aufgrund des Dopplereffektes zu einer Frequenzverschiebung (Frequenzdispersion) des Signals um die Dopplerfrequenz.

→ *Zeitdispersion*, → *Schwund*

Funkschnittstelle: Als Funkschnittstelle (*Air Interface*, AI) wird der Teil eines Mobilfunksystems bezeichnet, der alle für die Funkübertragung benötigten Hard- und Softwarekomponenten enthält.

Interoperabilität: Dies ist die Fähigkeit eines Endgerätes, herstellerunabhängig Dienste einer gegebenen Infrastruktur unter Verwendung des jeweiligen Protokolls in Anspruch zu nehmen.

→ *Interworking*

Interworking: Dies ist die Fähigkeit einer gegebenen Infrastruktur mit einer anderen Infrastruktur unter Verwendung des jeweils standardisierten Intersystem-Interworking-Protokolls nicht bedeutungslose Informationen auszutauschen.

→ *Interoperabilität*

Laufzeitspreizung: Ein Maß für die bei einer bestimmten Kanalimpulsantwort $h(t)$ entstehende Impulsaufweitung ist bei einem zeitdispersiven Kanal die Laufzeitspreizung (*Delay Spread*), die als das zweite Moment des Verzögerungsleistungsprofil (*Power Delay Profile*) $P(t) = |h(t)|^2$ definiert ist.

→ *Zeitdispersion*, → *Frequenzdispersion*, → *Schwund*

Mehrfachbetrieb: Beim Mehrfachbetrieb (*Multiplexing*) wird ein im begrenzten Umfang zur Verfügung stehendes Übertragungsmedium von den Benutzern im Gegensatz zum → *Vielfachzugriff* nach einer vorherigen, statischen Einteilung mehrfach genutzt.

→ *S-ALOHA*, → *Übertragung*, → *Vielfachzugriff*

Mehrwegeausbreitung: Vgl. schneller → *Schwund*.

Morphologie: Die Morphologie eines Mobilfunkszenariums beschreibt sowohl die Bebauungsstruktur als auch die Verteilung der Geländetypen innerhalb des Szenariums.

→ *Topographie*

MSC: *Message Sequence Chart* (MSC) ist die von der *International Telecommunication Union* (ITU) standardisierte Spezifikationssprache von Nachrichtenflussdiagrammen für einzelne Benutzungsfälle (*Use Cases*) eines Telekommunikationssystems.

→ *SDL*, → *TTCN*, → *UML*

Nachrichtenbündelung: Unter Nachrichtenbündelung (*Message Trunking*) versteht man bei V+D die Methode, einen Verkehrskanal permanent für die gesamte Dauer des Gesprächs zu belegen, was im Vergleich zur → *Übertragungsbündelung* zu geringerem Protokollverschnitt, aber

auch zu geringerem Durchsatz führt.

→ *Übertragungsbündelung*, → *Quasi-Übertragungsbündelung*

$\pi/4$ -DQPSK: Das TETRA-System benutzt das $\pi/4$ -differentielle, quaternäre Phasenumtastverfahren ($\pi/4$ -*Differential Quaternary Phase Shift Keying*, $\pi/4$ -DQPSK) zur Modulation. In Abs. 2.6.3, S. 29, ist seine Funktionsweise erläutert.

Pfadverlust: Der Pfadverlust (*Pathloss*) L_p ist als das Verhältnis von Empfangsleistung P_r zur Sendeleistung P_s definiert.

→ *Schwund*

Punktierung: Werden einzelne Bits eines faltungscodierten Codewortes systematisch herausgestrichen, dann nennt man diesen Vorgang Punktierung. Zwei verschiedene, punktierte → *Faltungscodes*, welche vom gleichen Originalcode stammen, heißen ratenkompatibel, wenn alle nicht punktierten, d. h. nicht herausgestrichenen, Bits des hochrätigen → *Faltungscodes* auch beim niederrätigen enthalten sind.

→ *Faltungscodes*, → *Blockcode*

Quasi-Übertragungsbündelung: Bei V+D versteht man unter Quasi-Übertragungsbündelung (*Quasi-Transmission Trunking*) die Methode, einen Verkehrskanal (TCH) nur dann zu belegen, wenn im PTT-Betrieb tatsächlich Sprachaktivität vorliegt, und ihn danach im Gegensatz zur reinen → *Übertragungsbündelung* erst nach einer Nachlaufzeit (*Hang Time*) freizugeben. Wenn während der Nachlaufzeit neue Sprachaktivität auftritt, kann der bestehende Kanal wiederverwendet werden und es muss kein neuer Zufallszugriff erfolgen, um den erneuten Kanalbelegungswunsch zu übermitteln. Mit der Wahl der Nachlaufzeit kann ein Kompromiss zwischen Protokollverschnitt (Problem der → *Übertragungsbündelung*) und geringerem Durchsatz (Problem der → *Nachrichtenbündelung*) erzielt werden. Bei einer Nachlaufzeit $ht = 0$ liegt reine → *Übertragungsbündelung* vor, bei $ht \rightarrow \infty$ liegt → *Nachrichtenbündelung* vor.

→ *Übertragungsbündelung*, → *Nachrichtenbündelung*

Rauschen: Mit Rauschen bezeichnet man die Gesamtheit der verschiedensten, nicht näher beschreibbaren Störeinflüsse auf einen Funkkanal.

→ *Schwund*

S-ALOHA: Für die Phase in einem Mobilfunksystem, in dem mehrere unkoordinierte mobile Teilnehmer im gegenseitigen Wettbewerb stehen, um von einer zentralen Steuerung Betriebsmittel in Form von Übertragungskapazität zu erhalten, wird häufig das in den 70-er Jahren an

der Universität von Hawaii – daher der Name – entwickelte Slotted-ALOHA (S-ALOHA)-Verfahren verwendet. Hierbei sendet jeder Teilnehmer seine Betriebsmittelanforderung zu Beginn des nächsten Zeitschlitzes, nachdem der Übertragungswunsch entstanden ist, ohne auf das Verhalten der anderen Teilnehmer zu achten, und startet einen neuen Übertragungsversuch nach einer zufällig gewählten Wartezeit, wenn der letzte Versuch aufgrund einer Kollision nicht quittiert wurde. Unter der Annahme einer poissonverteilten Ankunftsrate und einer sehr großen (unendlichen) Anzahl von mobilen Teilnehmern ($N \gg 1000$) erlaubt dieses Verfahren einen maximalen Durchsatz von 36 % und kann bei einer Ankunftsrate kleiner als dem maximalen Durchsatz stabil betrieben werden.

→ *Mehrfachbetrieb*, → *Übertragung*, → *Vielfachzugriff*

Schwund: Die Grundamplitude eines über einen Mobilfunkkanal übertragenen Signals schwankt mit einer niedrigen Frequenz um den mittleren Pfadverlust L_p . Diese im Vergleich zur Symboldauer relativ langsame Veränderung wird als langsamer Schwund (*Long-Term Fading*) bezeichnet und gehorcht einer Log-Normal-Verteilung. Er liegt typischerweise im Bereich 4 dB–8 dB.

Zwischen Sender und Empfänger existieren aufgrund von Streuung, Reflexion und Beugung an Hindernissen in der räumlichen Umgebung beliebig viele Ausbreitungswege für die elektromagnetischen Wellen. Selbst wenn kein Schwund aufgrund von → *Abschattungen* vorhanden ist, schwankt die Empfangsfeldstärke eines Mobilfunksignals stark in Abhängigkeit vom Empfangsort, der Zeit und der Frequenz. Dieser Effekt wird schneller Schwund (*Short-Term Fading*) bzw. Mehrwegeschwund (*Multi-Path Fading*) genannt. Am Ort des Empfängers überlagern sich sehr viele verschieden starke und durch die Laufzeit unterschiedlich verzögerte Komponenten desselben Signals.

→ *Abschattung*, → *Frequenzdispersion*, → *Laufzeitspreizung*, → *Pfadverlust*, → *Rauschen*, → *Zeitdispersion*

SDL: Die formale Beschreibungstechnik Specification and Description Language (SDL) ist die von der ITU standardisierte Spezifikationssprache für Telekommunikationssysteme. Sie unterstützt durch dedizierte Sprachelemente den objektorientierten Softwareentwurf direkt und ist aufgrund der leicht erlernbaren grafischen Notation selbstdokumentierend und somit besonders wartungsfreundlich. Letzteres ist bei großen Softwareprojekten von entscheidender Bedeutung.

→ [MSC](#), → [TTCN](#), → [UML](#)

Teledienst: Ein Teledienst (*Tele Service*) ist ein Systemdienst, der von einem Endbenutzer über die Mensch-Maschine-Schnittstelle des Endgeräts verwendet wird. Er stellt die gesamte Funktionalität für die Kommunikation zwischen zwei Endbenutzern zur Verfügung und deckt die OSI-Schichten 1 bis 7 ab.

→ [Trägerdienst](#), → [Zusatzdienst](#)

Topographie: Die Topographie eines Mobilfunkszenariums beschreibt die Höhe der Geländetypen innerhalb des Szenariums.

→ [Morphologie](#)

Trägerdienst: Ein Trägerdienst (*Bearer Service*) ermöglicht die Kommunikation zwischen zwei mobilen Netzabschlüssen ([Mobile Termination](#), MT) oder Festnetzabschlüssen ([Network Termination](#), NT). Er beinhaltet jedoch keine Funktionalität bezüglich der Endgeräte, so dass er sich lediglich über die OSI-Schichten 1 bis 3 erstreckt. → [Teledienste](#) bauen grundsätzlich auf → [Trägerdiensten](#) auf, vgl. Abs. 2.5.2, S. 16.

→ [Teledienst](#), → [Zusatzdienst](#)

TTCN: Mit [Tree and Tabular Combined Notation](#) (TTCN), einer Sprache zur Beschreibung von abstrakten Testsuiten ([Abstract Test Suite](#), ATS), ist es weitergehend als bei Benutzungsfällen im → [MSC](#)-Format möglich, Randbedingungen für komplexe Datenstrukturen zu beschreiben, auf alternative Ergebnisse eines Benutzungsfalles zu reagieren und das erwartete Ergebnis zu definieren.

→ [MSC](#), → [SDL](#), → [UML](#)

Übertragung: Eine Übertragung erfolgt *verbindungsorientiert*, wenn vor der eigentlichen Datenübertragung ein Verbindungsaufbau stattfindet. Ist die für den Verbindungsaufbau zu übertragende Datenmenge ungefähr genauso groß wie die eigentlich zu übertragende Datenmenge oder ist die zu übertragende Information von geringer Bedeutung, kann man auf den Verbindungsaufbau verzichten und *verbindungslos* übertragen.

Eine Konsequenz der verbindungslosen Übertragung ist i. d. R. ein geringerer Fehlerschutz im Vergleich zur verbindungsorientierten Übertragung. Daher wird häufig im verbindungslosen Betrieb redundant, d. h. mehrfach hintereinander die gleiche Information übertragen.

Bei beiden Übertragungsarten kann wahlweise *bestätigt* oder *unbestätigt* übertragen werden, d. h. der Sender erwartet eine Antwort des Empfängers oder nicht.

Bei der TETRA-BS wird auf dem DL ferner zwischen kontinuierlicher (*Continuous Transmission Mode*) und diskontinuierlicher Übertragung im Zeitscheibenverfahren (*Time Sharing Mode*) unterschieden. Auf die diskontinuierliche Übertragung wird bei der Planung eines TETRA-Netzes dann zurückgegriffen, wenn frequenzschonend große Flächen mit niedrigem Verkehr abgedeckt werden sollen.

→ *Mehrfachbetrieb*, → *S-ALOHA*, → *Vielfachzugriff*

Übertragungsbündelung: Bei V+D versteht man unter Übertragungsbündelung (*Transmission Trunking*) die Methode, einen Verkehrskanal (TCH) nur dann zu belegen, wenn tatsächlich Sprachaktivität im PTT-Betrieb vorliegt, und ihn danach augenblicklich wieder freizugeben.

→ *Nachrichtenbündelung*, → *Quasi-Übertragungsbündelung*

UML: Die *Unified Modeling Language* ist ein Verfahren der objektorientierten Analyse und des Entwurfs von komplexen Software-Systemen und stellt die Vereinigung der Modellierungsmethoden von *BOOCH* (1994) (Booch-Methode), *RUMBAUGH et al. (1991)* (*Object Modeling Technique*, OMT) und *JACOBSON et al. (1992)* (*Object-Oriented Software Engineering*, OOSE) dar.

→ *MSC*, → *SDL*, → *TTCN*

Verkehrsgüte: Verkehrsgüte (*Grade of Service*, GoS) ist ein Qualitätsmaß eines Funknetzes, wobei alle Verbindungen des Funknetzes als Ganzes betrachtet werden. Die Verkehrsgüte wird als das Produkt aus der Anzahl der blockierten Verbindungswünsche und dem Zehnfachen der Anzahl der Verbindungsabbrüche pro Gesamtanzahl aller Verbindungen berechnet.

→ *Dienstgüte*

Vielfachzugriff: Beim *Vielfachzugriff* (*Multiple Access*) erfolgt die Zuweisung von Übertragungskapazität eines im begrenzten Umfang zur Verfügung stehenden Übertragungsmediums an die Benutzern im Gegensatz zum → *Mehrfachbetrieb* dynamisch.

→ *Mehrfachbetrieb*, → *S-ALOHA*, → *Übertragung*

Zeitdispersion: Ein über einen Kanal mit Mehrwegeausbreitung übertragener Impuls erscheint am Empfangsort als Überlagerung von einzelnen Feldkomponenten mit unterschiedlichen Laufzeiten und wird somit zeitlich gedehnt; es tritt Zeitdispersion auf.

→ *Laufzeitverzerrung*, → *Frequenzdispersion*

Zugriffscodes: Bei V+D bietet die BS verschiedenen MSen unter Verwen-

dung von vier sog. *Access Codes* (AC) Möglichkeiten des Zufallszugriffs, die A, B, C oder D genannt werden und wie Prioritäten aufzufassen sind. Der Zugriffscode stellt eine Benutzerdienstkombination dar. Nicht jeder Code muss allen MSen zugänglich sein. Nur wenn die Bedingungen für den Zugriff auf einen für einen bestimmten Code zugelassenen Teilzeitschlitz erfüllt sind, ist die MS berechtigt zuzugreifen.

→ *Zugriffsrahmen*

Zugriffsfenster: Bei PDO wird der Zeitraum, in dem ein Zufallszugriff erlaubt ist, Zugriffsfenster (*Access Window*) genannt. Ein Zugriffsfenster wird in mehrere Zugriffsperioden (*Access Period*) unterteilt. Jede Zugriffsperiode stellt eine Zugriffsmöglichkeit innerhalb eines Zugriffsfensters dar.

Zugriffsperiode: Vgl. → *Zugriffsfenster*.

Zugriffsrahmen: Bei V+D teilt die BS den MSen kontinuierlich mit, wieviele der zukünftigen Möglichkeiten zum Zufallszugriff auf dem Hauptorganisationskanal (MCCH) und ggf. den Nebenorganisationskanälen (SCCHs) von einer MS berücksichtigt werden sollen, wenn sie den Zeitpunkt ihres Zugriffs zufällig auswählt. Der Zeitraum von der ersten bis zur letzten Zugriffsmöglichkeit wird Zugriffsrahmen genannt.

→ *Zugriffscode*

Zusatzdienst: Zusatzdienste (*Supplementary Services*) verändern oder erweitern → *Träger-* oder → *Teledienste*.

LISTE DER FORMELZEICHEN

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
A	Funkbetriebsmittelanalyse	237	Sprachaktivität (mE)
A	Übertragungsfehler	171	Parameterfunktion des Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodells
a	Kanalcodierung	36	Distanz der Bitverwürfelung der 3. Kanalcodierungsstufe
a_0	Kollisionsauflösung	99	Wichtungsfaktor bei Stochastischer Annäherung für leere Zeitschlitzze bzw. Zugriffsperioden
a_1		99	Wichtungsfaktor bei Stochastischer Annäherung für erfolgreiche Übertragungen
a_c		99	Wichtungsfaktor bei Stochastischer Annäherung für Kollisionen
α		100	Wichtungsfaktor beim MMSE-Algorithmus
α	Übertragungsfehler	172	Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Ausbreitungsrichtung der Funkwellen beim Dopplereffekt
α		184	Roll-Off-Faktor des SRRC-Filters
ap	PDO-Zufallszugriff	76	Zugriffsperiode eines Zugriffsfensters
B	Übertragungsfehler	171	Parameterfunktion des Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodells
$\bar{B}$	Funkbetriebsmittelanalyse	113	Mittlerer Auftragsüberhang
$\hat{B}(k+1)$	Kollisionsauflösung	100	Geschätzter Auftragsüberhang im nächsten Zeitschlitz $k+1$
$B(m)$	$\pi/4$ -DQPSK	29	Modulationsbitfolge

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$B_i(m)$	Kanalcodierung	37	Blöcke der Kanalcodierungsstufe $i = 1, 2, \dots, 5$
B_{min}	Kollisionsauflösung	100	Minimal erlaubter Auftragsüberhang
$\hat{B}_{pr}(k+1)$		101	Geschätzter Auftragsüberhang im Prioritätsbereich pr des nächsten Zugriffsfensters $k+1$
b	Batch-Means	150	Größe aller Teilsequenzen
$b_i(k)$	Kanalcodierung	34	Bits der Kanalcodierungsstufe $i = 1, 2, \dots, 5$
$\bar{\beta}_s$	Funkbetriebsmittelanalyse	125	Mittlere Bediendauer von Sprachaufträgen (s)
β_{DD2}		128	Bediendauer von DD2-PDUs (s)
β_{UD2}		128	Bediendauer von UD2-PDUs (s)
β_{md}		127	Mittlere Bediendauer von Mitteldatenaufträgen (s)
$\beta_{md,min}$		127	Minimale Bediendauer von Mitteldatenaufträgen (s)
$\beta_{md,max}$		127	Maximale Bediendauer von Mitteldatenaufträgen (s)
$\bar{\beta}_{sd}$		126	Mittlere Bediendauer von Kurzdatenaufträgen (s)
$\beta_{sd,min}$		126	Minimale Bediendauer von Kurzdatenaufträgen (s)
$\beta_{sd,max}$		126	Maximale Bediendauer von Kurzdatenaufträgen (s)
C	Übertragungsfehler	174	Leistung des Nutzsignals (mW)
c/I		174	Gleichkanalstörabstand (dB)
$\hat{C}$	Simulation	198	Gewichtete Gesprächsaufbauzeit (s)
$c(X)$	Kanalcodierung	37	Generatorpolynom der Verschlüsselungssequenz der vierten Kanalcodierungsstufe

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$c_T(t)$	Übertragungsfehler	179	Komplexe Einhüllende des Gleichkanalstörsignals im äquivalenten Tiefpassbereich
$c_{Tr}(t)$		179	Inphasekomponente der komplexen Einhüllenden $c_T(t)$
$c_{Ti}(t)$		179	Quadraturkomponente der komplexen Einhüllenden $c_T(t)$
D	Frequenzmultiplex-Struktur	21	Konstanter Duplexabstand zwischen einer UL- und ihrer entsprechenden DL-Trägerfrequenz (MHz)
D	Übertragungsfehler	174	Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Gleichkanalzellen
$\bar{D}$	Funkbetriebsmittelanalyse	113	Mittlere Paketverzögerung (s, ZP, ZS)
$\bar{D}_{4s}$		119	Mittlere Paketverzögerung bei einer mittleren Wartezeit $\bar{\tau}_w = 4s$ (ZP, ZS)
$\bar{D}_{10s}$		119	Mittlere Paketverzögerung bei einer mittleren Wartezeit $\bar{\tau}_w = 10s$ (ZP, ZS)
$\hat{D}$	Simulation	198	Gewichtete Paketverzögerung (s, ZP, ZS)
$D\Phi(k)$	$\pi/4$ -DQPSK	29	Phasenverschiebung
d	Übertragungsfehler	171	Entfernung zwischen MS und BS (km)
d		175	Abstand vom Empfänger zum störenden Sender
d_{N_i}		176	Abstand vom Empfänger zum N_i -ten störenden Sender
$\delta(t)$		178	Diracstoß
$e(k)$	Kanalcodierung	37	Farbcode für die Initialisierung der Verschlüsselungssequenz $p(k)$ der 4. Kanalcodierungsstufe

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$\bar{\varepsilon}_{al, fld}$	Simulation	198	Pauschale mittlere Verbindungsdauer für fehlgeschlagene Verbindungseinrichtungen beim AL (s)
$\bar{\varepsilon}_{bl, fld}$		198	Pauschale mittlere Übertragungsdauer für fehlgeschlagene Übertragungen beim BL (s)
$\bar{\varepsilon}_{cm}$		197	Mittlere Verbindungsdauer für kanalvermittelte Sprache (s)
$\bar{\varepsilon}_{cm, fld}$		198	Pauschale mittlere Verbindungsdauer für fehlgeschlagene Verbindungseinrichtungen bei kanalvermittelter Sprache (s)
ε_{md}	Funkbetriebsmittelanalyse	119	Bedienrate von Mitteldatenaufträgen ($1/s$)
ε_s		119	Bedienrate von Sprachaufträgen ($1/s$)
ε_{sd}		119	Bedienrate von Kurzdatenaufträgen ($1/s$)
ε_t		123	Gesamtbedienrate aller Aufträge ($1/s$)
F_{dl}	Frequenzmultiplex-Struktur	21	DL-Trägerfrequenzen (MHz)
F_{ul}		21	UL-Trägerfrequenzen (MHz)
$F_{ul, min}$		21	UL-Grenzfrequenz am unteren Rand des jeweiligen Frequenzbandes (MHz)
$F(C)$	Simulation	205	Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (PDF) der Gesprächsaufbauzeit C (s)
$F(X)$	Kanalcodierung	34	Polynom des Blockcodes der ersten Stufe der Kanalcodierung
f_c	$\pi/4$ -DQPSK	29	Trägerfrequenz (Hz)
f_d	Übertragungsfehler	172	Dopplerfrequenz (Hz)
$f_{d, max}$		181	Maximale Dopplerfrequenz bei $\alpha = 0$ (Hz)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$f(i)$	Kanalcodierung	34	Koeffizienten des Polynoms $F(X)$
G	Frequenzmultiplex-Struktur	20	Störabstand zwischen zwei Trägerfrequenzen (kHz)
$\hat{G}$	Simulation	198	Gewichtete Verkehrsgüte (GoS)
G_{al}		198	Gemessene Verkehrsgüte (GoS) für AL-Verbindungen
G_{bl}		198	Gemessene Verkehrsgüte (GoS) für BL-Übertragungen
G_{cm}		198	Gemessene Verkehrsgüte (GoS) für kanalvermittelte Sprache
$G(D)$		203	Komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (CPDF) der Paketverzögerung D (s)
$G(X)$	Kanalcodierung	34	Generatorpolynom des Blockcodes der ersten Kanalcodierungsstufe
$G_i(X)$		36	Generatorpolynome des Faltungscodierers der zweiten Kanalcodierungsstufe mit der Ausgabe $V(X)$ und $i = 1, 2, 3, 4$
g	Frequenzmultiplex-Struktur	111	Anzahl wiederholter Pakete
g_{ij}	Kanalcodierung	36	Koeffizienten der Generatorpolynome $G_i(X)$
$g(t)$	$\pi/4$ -DQPSK	30	Inverse Fouriertransformierte des <u>S</u> quare <u>R</u> oot <u>R</u> aised <u>C</u> osine (SRRC)-Spektrums
γ	Kollisionsauflösung	99	Wichtungsexponent bei stochastischer Annäherung
$h(t)$	Übertragungsfehler	172	Kanalimpulsantwort
h_b		171	Antennenhöhe der BS beim Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodell

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
h_m	Übertragungsfehler	171	Antennenhöhe der MS beim Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodell
ht	Sprachübertragung	282	Nachlaufzeit (<i>Hang Time</i>) bei Quasi-Übertragungsbündelung
I	Übertragungsfehler	174	Interferenzleistung (mW)
I_0	Kollisionsauflösung	96	Sendeergebnis: Leerer Zeitschlitz
$I_{0,pr}$		97	Sendeergebnis: Anzahl leerer Zugriffsperioden im Prioritätsbereich pr
I_1		96	Sendeergebnis: Erfolgreiche Übertragung im letzten Zeitschlitz
$I_{1,pr}$		96	Sendeergebnis: Anzahl erfolgreicher Übertragungen im Prioritätsbereich pr
I_c		96	Sendeergebnis: Kollision im letzten Zeitschlitz
$I_{c,pr}$		96	Sendeergebnis: Anzahl der Kollisionen im Prioritätsbereich pr
$J_0(x)$	Übertragungsfehler	181	Besselsche Funktion erster Gattung nullter Ordnung
K	Funkbetriebsmittelanalyse	115	Anzahl der Zugriffsmöglichkeiten in einem Zugriffsrahmen
K	Kanalcodierung	280	Einwirktiefe (<i>Constraint Length</i>) eines Faltungscodierers
K	$\pi/4$ -DQPSK	30	Maximale Anzahl an Modulationsymbolen
K_i	Kanalcodierung	34	Bitanzahl der Kanalcodierungsstufe $i = 1, 2, \dots, 5$
K_r	Übertragungsfehler	171	Parameterfunktion des Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodells
k	Kanalcodierung	279	Eingangswortbreite eines Block- bzw. Faltungscodierers (bit)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
L_p	Übertragungsfehler	171	Pfadverlust
$l_{\text{AL-Data}}$	Funkbetriebsmittelanalyse	126	Länge der PCI eines AL-Data-Rahmens (bit)
$l_{\text{AL-Final}}$		126	Länge der PCI eines AL-Final-Rahmens (bit)
$l_{\text{MAC-Data}}$		126	Länge der SDU einer MAC-Data-PDU (bit)
$l_{\text{MAC-Frag}}$		126	Länge der SDU einer MAC-Frag-PDU (bit)
$l_{\text{UD2/DD2}}$		128	Länge der SDU einer UD2- oder DD2-PDU (bit)
l_{md}		126	Länge eines Mitteldatenauftrages (byte)
l_{seg}		126	LLC-Segmentgröße bei V+D (byte)
$l_{seg,min}$		127	Minimale LLC-Segmentgröße bei V+D (byte)
$l_{seg,max}$		126	Maximale LLC-Segmentgröße bei V+D (byte)
λ		109	Senderate ($1/zs$)
λ	Kollisionsauflösung	99	Ankunftsrate neuer Aufträge
λ_0	Funkbetriebsmittelanalyse	113	Schwellenwert der Senderate, ab dem $\bar{B}$ gesättigt ist ($1/zs$)
λ_0	Kollisionsauflösung	101	Angenommener Initialwert der Ankunftsrate neuer Aufträge
λ_{sd}	Funkbetriebsmittelanalyse	119	Ankunftsrate von Kurzdatenaufträgen ($1/s$)
λ_{ld}		238	Ankunftsrate von Langdatenaufträgen ($1/s$)
λ_{md}		119	Ankunftsrate von Mitteldatenaufträgen ($1/s$)
λ_s		119	Ankunftsrate von Sprachaufträgen ($1/s$)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
λ_t	Funkbetriebsmittelanalyse	119	Gesamtankunftsrate aller Aufträge ($1/s$)
$\hat{\lambda}(k+1)$	Kollisionsauflösung	99	Geschätzte Ankunftsrate neuer Aufträge im nächsten Zeitschlitz $k+1$
$\hat{\lambda}_{pr}(k+1)$		100	Geschätzte Ankunftsrate neuer Aufträge im nächsten Zugriffsfenster $k+1$
M	Funkbetriebsmittelanalyse	123	Anzahl der Bediener
$\mathcal{M}$	Übertragungsfehler	183	Kovarianzmatrix
$M(X)$	Kanalcodierung	34	Polynom mit K_1 Typ-1-Bits $b_1(k)$ als Koeffizienten
m	Batch-Means	150	Anzahl der Teilsequenzen
μ	Funkbetriebsmittelanalyse	110	Wiederholrate ($1/zs$)
μ_{ap}		118	Wiederholrate beim Zufallszugriff in einer Zugriffsperiode bei PDO ($1/zp$)
$\mu_{ap,max}$		118	Maximum der Wiederholrate μ_{ap} ($1/zp$)
$\mu_{ap,min}$		118	Minimum der Wiederholrate μ_{ap} ($1/zp$)
μ_{df}		117	Wiederholrate bei der Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ ($1/zs$)
$\mu_{df,max}$		117	Maximum der Wiederholrate μ_{df} ($1/zs$)
$\mu_{df,min}$		117	Minimum der Wiederholrate μ_{df} ($1/zs$)
μ_{rf}		115	Wiederholrate bei der Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ ($1/zs$)
$\mu_{rf,max}$		115	Maximum der Wiederholrate μ_{rf} ($1/zs$)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$\mu_{rf,min}$	Funkbetriebsmittelanalyse	115	Minimum der Wiederholrate μ_{rf} ($1/zs$)
N	Frequenzmultiplex-Struktur	20	Anzahl der Trägerfrequenzen in einem UL- oder DL-Band
N	Funkbetriebsmittelanalyse	109	Teilnehmeranzahl von MSen
N_c	Übertragungsfehler	173	Zellgruppengröße (<i>Clustergröße</i>)
$N_{cm,flt}$	Simulation	197	Anzahl der fehlgeschlagenen Verbindungseinrichtungen bei kanalvermittelter Sprache
$N_{cm,suc}$		197	Anzahl der erfolgreichen Verbindungseinrichtungen bei kanalvermittelter Sprache
N_e	Übertragungsfehler	186	Anzahl fehlerbehafteter Zustände beim FRITCHMAN-Modell
N_f		185	Anzahl fehlerfreier Zustände beim FRITCHMAN-Modell
N_i		176	Anzahl der Gleichkanalstörer [1; 6]
N_{tc}		178	Anzahl der Pfade der Gleichkanalstörung
N_{ts}		178	Anzahl der Pfade der Sendesignalausbreitung
$\hat{N}(k+1)$	Kollisionsauflösung	99	Geschätzte Anzahl aktiver Teilnehmer im nächsten Zeitschlitz $k+1$
$\hat{N}_{pr}(k+1)$		100	Geschätzte Anzahl aktiver Teilnehmer im Prioritätsbereich pr des nächsten Zugriffsfensters $k+1$
$\bar{N}_q$	Funkbetriebsmittelanalyse	124	Mittlere Warteschlangenlänge
NAP_{max}	Kollisionsauflösung	98	Maximale Anzahl von Zugriffsperioden eines Zugriffsfensters
NAP_{pr}		98	Anzahl von Zugriffsperioden im Prioritätsbereich pr
n	Batch-Means	150	Anzahl der Versuche

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
n	Kanalcodierung	279	Ausgangswortbreite eines Block- bzw. Faltungscodierers (bit)
$n(t)$	Übertragungsfehler	170	Rauschsignal
$n_{\text{AL-Data}}$	Funkbetriebsmittelanalyse	126	Anzahl der MAC-Frag-PDUs bei V+D-Kurzdatenaufträgen
n_f		132	Anzahl benötigter Trägerfrequenzen f_c
n_{md}		131	Anzahl von Zeitschlitzten für PDO-Mitteldatenaufträge
$n_{md,min}$		126	Minimale Anzahl von Zeitschlitzten für V+D-Mitteldatenaufträge
$n_{md,max}$		127	Maximale Anzahl von Zeitschlitzten für V+D-Mitteldatenaufträge
n_{sd}		125	Anzahl der MAC-Frag-PDUs bzw. UD2-PDUs bei Kurzdatenaufträgen
$n_T(t)$	Übertragungsfehler	179	Komplexe Einhüllende des Rauschsignals im äquivalenten Tiefpassbereich
$n_{Tr}(t)$		179	Inphasekomponente der komplexen Einhüllenden $n_T(t)$
$n_{Ti}(t)$		179	Quadraturkomponente der komplexen Einhüllenden $n_T(t)$
$\hat{\omega}_{al}$	Simulation	198	Wichtungsfaktor für AL-Verbindungen
$\hat{\omega}_{bl}$		198	Wichtungsfaktor für BL-Übertragungen
$\hat{\omega}_{cm}$		198	Wichtungsfaktor für kanalvermittelte Sprache
$P(g)$	Funkbetriebsmittelanalyse	112	Wiederholwahrscheinlichkeit von g kollidierten Paketen
$P(k)$	Kanalcodierung	36	Punktierkoeffizienten
$P(s)$	Funkbetriebsmittelanalyse	112	Ankunftswahrscheinlichkeit von s neuen Paketen

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$P(t)$	Übertragungsfehler	172	Verzögerungsleistungsprofil
$P(1)$		187	Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Fehlerzustand
P_0		172	Empfangene Energie für einen Impuls
P_r		171	Empfangsleistung
P_s		171	Sendeleistung
$Prio0$	Kollisionsauflösung	104	Maximal erlaubte Priorität im ersten Prioritätsbereich beim PDO-Zufallszugriff
Φ_0	$\pi/4$ -DQPSK	30	Phasenoffset
p	PDO-Zufallszugriff	76	Priorität der nächsten Transaktion
p_{BER}	Übertragungsfehler	183	Bitfehlerwahrscheinlichkeit
p_{max}	Kollisionsauflösung	97	Maximale Sendewahrscheinlichkeit
p_{max}		103	Maximal erlaubte Priorität beim V+D-Zufallszugriff
p_{min}		102	Minimal erlaubte Priorität beim V+D-Zufallszugriff
$p(i)$	Funkbetriebsmittelanalyse	112	Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Zustand i
$p(k)$	Kanalcodierung	37	Verschlüsselungssequenz der vierten Kanalcodierungsstufe
$p(k+1)$	Kollisionsauflösung	96	Sendewahrscheinlichkeit im nächsten Zeitschlitz $k+1$
$p_{pr}(k+1)$		98	Sendewahrscheinlichkeit im Prioritätsbereich pr des nächsten Zugriffsfensters $k+1$
p_k	Funkbetriebsmittelanalyse	124	Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Zustand k
$p_{i,j}$		111	Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand i nach Zustand j

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
p_v	Wartesystem	6	Verlustwahrscheinlichkeit
p_w	Funkbetriebsmittelanalyse	123	Wartewahrscheinlichkeit
$p(\mathcal{X})$	Übertragungsfehler	183	Vierdimensionale Verbundverteilungsdichte der Elemente des Empfangsvektors $\mathcal{X}$
pr	Kollisionsauflösung	97	Prioritätsbereich eines Zugriffsfensters
$\varphi_{Ri}(t)$	Übertragungsfehler	185	Zum Rice-Dopplerspektrum $S_{Ri}(f, f_{d,max})$ gehörende AKF
$\varphi_{Ry}(t)$		185	Zum Rayleigh-Dopplerspektrum $S_{Ry}(f, f_{d,max})$ gehörende AKF
$\varphi_{gg}(t)$		184	AKF des SRRC-Filters
$\varphi_{nn}(t)$		185	AKF des AWGN-Rauschsignals
$\varphi_{xx}(t)$		184	AKF des Schmalbandkanals
Q_r		171	Parameterfunktion des Hata-Okumura-Pfadverlustvorhersagemodells
q	Kollisionsauflösung	97	Wichtungsfaktor beim exponentiellen Backoff-Algorithmus
q	Übertragungsfehler	174	Verminderungsfaktor der Gleichkanalstörung
R	Funkbetriebsmittelanalyse	117	Zeitbereich reservierter Übertragung bei PDO (ZP)
R	Übertragungsfehler	174	Zellradius
r	Kanalcodierung	38	Rate des Faltungscodierers der zweiten Kanalcodierungsstufe
r	Übertragungsfehler	175	Abstand vom Empfänger zum gewünschten Sender
$r_T(t)$		179	Komplexe Einhüllende des Empfangssignals im äquivalenten Tiefpassbereich
$r_{Tr}(t)$		179	Inphasekomponente der komplexen Einhüllenden $r_T(t)$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$r_{Ti}(t)$	Übertragungsfehler	179	Quadraturkomponente der komplexen Einhüllenden $r_T(t)$
S	Funkbetriebsmittelanalyse	110	Durchsatz (1/zs)
$\bar{S}$		112	Mittlerer Durchsatz (1/zs)
$\hat{S}$	Simulation	198	Gewichteter Durchsatz (%)
$S(f, f_d)$	Übertragungsfehler	172	Dopplerspektrum (Hz)
$S_{Ri}(f, f_d)$		181	Dopplerspektrum bei Rice-Schwund (Hz)
$S_{Ry}(f, f_d)$		181	Dopplerspektrum bei Rayleigh-Schwund (Hz)
$S(i)$	Funkbetriebsmittelanalyse	112	Durchsatz im Zustand i (1/zs)
$S(k)$	$\pi/4$ -DQPSK	29	Modulationssymbol
S_d	Übertragungsfehler	172	Laufzeitspreizung (s)
S/N		171	Signalstörabstand (dB)
s	Funkbetriebsmittelanalyse	111	Anzahl neu erzeugter Pakete
$s(t)$	$\pi/4$ -DQPSK	29	Moduliertes Signal
$s_T(t)$	Übertragungsfehler	30	Komplexe Einhüllende des modulierten Signals $s(t)$ im äquivalenten Tiefpassbereich
$s_{Tr}(t)$		179	Inphasekomponente der komplexen Einhüllenden $s_T(t)$
$s_{Ti}(t)$		179	Quadraturkomponente der komplexen Einhüllenden $s_T(t)$
σ^2		178	Leistung des Realteils $x(t)$ und des Imaginärteils $y(t)$ der Kanalstoßantwort $h(t)$
σ_{ij}		183	Elemente der Kovarianzmatrix $\mathcal{M}$
T		182	Symboldauer (s)
ΔT		182	Verzögerung des Empfangssignals (s)
Θ_m		183	Phasenwinkel

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
t	Übertragungsfehler	182	Abtastzeitpunkt (s)
τ_{ap}	Funkbetriebsmittelanalyse	117	Dauer einer Zugriffsperiode (s)
τ_{dec}		129	Verarbeitungszeit für die Decodierung eines Sprachrahmens (s)
τ_{Δ}		129	Zeitabstand zwischen zwei virtuellen Zeitschlitten (s)
τ_{dem}		129	Verarbeitungszeit für die Demodulierung eines Sprachrahmens (s)
τ_{dsp}		129	Verarbeitungszeit für die Codierung eines Sprachrahmens (s)
$\tau_{e \leftrightarrow e}$		128	Ende-zu-Ende-Verzögerung (s)
τ_j	Übertragungsfehler	178	Mittlere Verzögerungszeit eines Signalausbreitungspfades (s)
τ_m	Funkbetriebsmittelanalyse	117	Dauer eines Modulationsbits (s)
τ_s		117	Dauer eines Symbols (s)
τ_{sf}		128	Dauer eines Sprachrahmens (s)
τ_{sync}		129	Synchronisationswartezeit (s)
τ_t		129	Übertragungszeit (s)
τ_w		110	Wartezeit (s)
$\bar{\tau}_w$		110	Mittlere Wartezeit (s)
$\tau_{w,ap}$		118	Wartezeit bis zum Zufallszugriff in einer Zugriffsperiode bei PDO (ZP)
$\bar{\tau}_{w,ap}$		118	Mittlere Wartezeit bis zum Zufallszugriff in einer Zugriffsperiode bei PDO (ZP)
$\tau_{w,rf}$		115	Wartezeit bei der Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ (ZS)
$\bar{\tau}_{w,rf}$		115	Mittlere Wartezeit bei der Zugriffsmethode „rollender Zugriffsrahmen“ (ZS)
$\tau_{w,df}$		115	Wartezeit bei der Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ (ZS)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle E.1: Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen*Fortsetzung von der vorhergehenden Seite*

Formelzeichen	Bereich	Siehe Seite	Bedeutung
$\bar{\tau}_{w,df}$	Funkbetriebsmittelanalyse	115	Mittlere Wartezeit bei der Zugriffsmethode „diskreter Zugriffsrahmen“ (ZS)
$u_T(t)$	Übertragungsfehler	182	Komplexe Einhüllende des auf der Empfangsseite gefilterten Empfangssignals im äquivalenten Tiefpassbereich
$u_{Tr}(t)$		182	Inphasekomponente der komplexen Einhüllenden $u_T(t)$
$u_{Ti}(t)$		182	Quadraturkomponente der komplexen Einhüllenden $u_T(t)$
$V(k)$	Kanalcodierung	35	Ausgegebene Bitsequenz des 16-Zustands-RCPC-Faltungscodierers der Kanalcodierungsstufe 2
v	Übertragungsfehler	172	Geschwindigkeit (km/h)
v	Funkbetriebsmittelanalyse	129	Nettodatenrate (bit/s)
$\bar{v}_{md}$		127	Mittlere Nettodatenrate bei Mitteldatenaufträgen (bit/s)
X		115	Antwortmöglichkeiten nach Ablauf eines diskreten Zugriffsrahmens (ZS)
$\mathcal{X}$	Übertragungsfehler	183	Empfangsvektor
$x(t)$		178	Realteil der Kanalstoßantwort $h(t)$
$y(t)$		178	Imaginärteil der Kanalstoßantwort $h(t)$

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AA	<u>A</u> ccess <u>A</u> nnounce	AMPS	<u>A</u> merican <u>M</u> obile
AACH	<u>A</u> ccess <u>A</u> ssignment <u>C</u> hannel		<u>P</u> hone <u>S</u> ervice
ABMT	<u>A</u> achener <u>B</u> eiträge zur <u>M</u> obil- und <u>T</u> elekommunikation	ANF-ISIIC	<u>A</u> dditional <u>N</u> etwork <u>F</u> unctions <u>ISI</u> <u>I</u> ndividual <u>C</u> all
AC	<u>A</u> ccess <u>C</u> ode	ANF-ISIMM	<u>A</u> dditional <u>N</u> etwork <u>F</u> unctions <u>ISI</u> <u>M</u> obility
ACCH	<u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel		<u>M</u> anagement
ACCH	<u>A</u> ssociated <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel	ANSI	<u>A</u> merican <u>N</u> ational <u>S</u> tandards <u>I</u> nstitute
ACELP	<u>A</u> lgebraic <u>C</u> ode- <u>E</u> xcited <u>L</u> inear <u>P</u> redictive	AoC	<u>A</u> dvice of <u>C</u> harge
ACI	<u>A</u> djacent- <u>C</u> hannel <u>I</u> nterference	AP	<u>A</u> ccess <u>P</u> arameters
ACM	<u>A</u> ssociation for <u>C</u> omputing <u>M</u> achinery	AP	<u>A</u> ccess <u>P</u> riority
ADT	<u>A</u> bstract <u>D</u> ata <u>T</u> ype	APCO	<u>A</u> ssociation of <u>P</u> olice <u>C</u> ommunications <u>O</u> fficials
AEÜ	<u>A</u> rchiv für <u>E</u> lektronik und <u>Ü</u> bertragungstechnik	APL	<u>A</u> ccess <u>P</u> eriod <u>L</u> ength
AG	<u>A</u> cknowledged <u>G</u> roup <u>C</u> all	AR	<u>A</u> cknowledge <u>R</u> equest
AI	<u>A</u> ir <u>I</u> nterface	ARQ	<u>A</u> utomatic <u>R</u> epeat <u>R</u> equest
AI	<u>A</u> cknowledged <u>I</u> nformation	AS	<u>A</u> rea <u>S</u> election
AKF	<u>A</u> utokorrelationsfunk- <u>t</u> ion	ASN.1	<u>A</u> bstract <u>S</u> yntax <u>N</u> otation <u>O</u> ne
AL	<u>A</u> dvanced <u>L</u> ink	ASST	<u>A</u> achen <u>S</u> ymposium on <u>S</u> ignal <u>T</u> heory
AL	<u>A</u> mbience <u>L</u> istening	ATM	<u>A</u> synchronous <u>T</u> ransfer <u>M</u> ode
		ATS	<u>A</u> bstract <u>T</u> est <u>S</u> uite
		AWGN	<u>A</u> dditive <u>W</u> hite <u>G</u> aussian <u>N</u> oise
		BCCH	<u>B</u> roadcast <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel

BBK	<u>B</u> roadcast <u>B</u> lock	CCI	<u>C</u> o- <u>C</u> hannel
BCH	<u>B</u> ose <u>C</u> hadhuri <u>H</u> oquenghem		<u>I</u> nterference
BER	<u>B</u> it <u>E</u> rror <u>R</u> atio	CDMA	<u>C</u> ode <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
BF	<u>B</u> usy <u>F</u> lag	CEP	<u>C</u> onnection <u>E</u> ndpoint
BIC	<u>B</u> arring of <u>I</u> ncoming <u>C</u> alls	CEP-Id	<u>C</u> onnection <u>E</u> ndpoint <u>I</u> dentifier
BKN	<u>B</u> lock <u>N</u> umber	CEPT	<u>E</u> uropean <u>C</u> onference of <u>P</u> ostal and <u>T</u> elecommunications Administration
BKN1	<u>B</u> lock <u>N</u> umber <u>1</u>		
BKN2	<u>B</u> lock <u>N</u> umber <u>2</u>		
BL	<u>B</u> asic <u>L</u> ink	CFB	<u>C</u> all <u>F</u> orwarding <u>B</u> usy
BLCH	<u>B</u> asestation <u>L</u> inearisation <u>C</u> hannel	CFNRc	<u>C</u> all <u>F</u> orwarding on <u>N</u> ot <u>R</u> eachable
BLE	<u>B</u> ase <u>L</u> ink Control <u>E</u> ntity	CFNRy	<u>C</u> all <u>F</u> orwarding on <u>N</u> o <u>R</u> eply
BNCH	<u>B</u> roadcast <u>N</u> etwork <u>C</u> hannel	CFU	<u>C</u> all <u>F</u> orwarding <u>U</u> nconditional
BNF	<u>B</u> ackus- <u>N</u> aur- <u>F</u> orm	CH	<u>C</u> all <u>H</u> old
BOC	<u>B</u> arring of <u>O</u> utgoing <u>C</u> alls	CLCH	<u>C</u> ommon <u>L</u> inearisation <u>C</u> hannel
BOS	<u>B</u> ehörden und <u>O</u> rganisationen mit <u>S</u> icherheitsaufgaben	CLIP	<u>C</u> alling <u>L</u> ine <u>I</u> dentification <u>P</u> resentation
BPSK	<u>B</u> inary <u>P</u> hase <u>S</u> hift <u>K</u> eying	CLIR	<u>C</u> alling/Connected <u>L</u> ine <u>I</u> dentification <u>R</u> estriction
BS	<u>B</u> asisstation	CLNP	<u>C</u> onnectionless <u>N</u> etwork <u>P</u> rotocol
BSCH	<u>B</u> roadcast <u>S</u> ynchronisation <u>C</u> hannel	CLNS	<u>C</u> onnectionless <u>N</u> etwork <u>S</u> ervice
BU	<u>B</u> ad <u>U</u> rban	CLT	<u>C</u> ommon <u>L</u> inearisation <u>T</u> ime
CAD	<u>C</u> all <u>A</u> uthorized by <u>D</u> ispatcher	CMCE	<u>C</u> ircuit <u>M</u> ode <u>C</u> ontrol <u>E</u> ntity
CASE	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>S</u> oftware <u>E</u> ngineering	CMOS	<u>C</u> omplementary <u>M</u> etal <u>O</u> xide <u>S</u> emiconductor
CB	<u>C</u> ontrol Uplink <u>B</u> urst		
CBR	<u>C</u> onstant <u>B</u> it <u>R</u> ate		
CCH	<u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel		

CNCL	<u>C</u> ommunication <u>N</u> etworks <u>C</u> lass <u>L</u> ibrary	DD1	<u>D</u> ownlink <u>D</u> ata Type <u>1</u>
Codec	<u>C</u> oder und <u>D</u> ecoder	DD2	<u>D</u> ownlink <u>D</u> ata Type <u>2</u>
COLP	<u>C</u> onected <u>L</u> ine <u>I</u> dentification <u>P</u> resentation	DEMUX	<u>D</u> emultiplex <u>e</u> r
CONP	<u>C</u> onnection <u>O</u> riented <u>N</u> etwork <u>P</u> rotocol	DFT	<u>D</u> elayed <u>F</u> irst <u>T</u> ransmission
CONS	<u>C</u> onnection <u>O</u> riented <u>N</u> etwork <u>S</u> ervice	DGAPS	<u>D</u> esign of <u>G</u> eneric and <u>A</u> daptive <u>P</u> rotocol <u>S</u> oftware
CORBA	<u>C</u> ommon <u>O</u> bject <u>R</u> equest <u>B</u> roker <u>A</u> rchitecture	DGNA	<u>D</u> ynamic <u>G</u> roup <u>N</u> umber <u>A</u> ssignment
COST	<u>E</u> uropean <u>C</u> ooperation in the Field of <u>S</u> cientific and <u>T</u> echnical Research	DECT	<u>D</u> igital <u>E</u> nhanced <u>C</u> ordless <u>T</u> elecommunication
CP	<u>C</u> ontrol <u>P</u> hysical <u>C</u> hannel	DL	<u>D</u> ownlink
CPDF	<u>C</u> omplementary <u>P</u> robability <u>D</u> istribution <u>F</u> unction	DL	<u>D</u> ata <u>L</u> ink Layer
CPU	<u>C</u> entral <u>P</u> rocessing <u>U</u> nit	DL	<u>D</u> iscrete <u>L</u> istening
CR	<u>C</u> all <u>R</u> eport	DM	<u>D</u> irect <u>M</u> ode
CRC	<u>C</u> yclic <u>R</u> edundancy <u>C</u> heck	DMO	<u>D</u> irect <u>M</u> ode <u>O</u> peration
CRP	<u>C</u> ollision <u>R</u> esolution <u>P</u> eriod	DP	<u>D</u> irect <u>P</u> riority
CW	<u>C</u> all <u>W</u> aiting	DPSK	<u>D</u> ifferential <u>P</u> hase <u>S</u> hift <u>K</u> eying
D/A	<u>D</u> igital/ <u>A</u> nalog	DQPSK	<u>D</u> ifferential <u>Q</u> uaternary <u>P</u> hase <u>S</u> hift <u>K</u> eying
DAWS	<u>D</u> igital <u>A</u> dvanced <u>W</u> ireless <u>S</u> ervice	DR1	<u>D</u> ownlink <u>R</u> esponse Type <u>1</u>
DBPSK	<u>D</u> ifferential <u>B</u> inary <u>P</u> hase <u>S</u> hift <u>K</u> eying	DR2	<u>D</u> ownlink <u>R</u> esponse Type <u>2</u>
DCS	<u>D</u> igital <u>C</u> ommunication	DR3	<u>D</u> ownlink <u>R</u> esponse Type <u>3</u>
		DSMA	<u>D</u> ata <u>S</u> ense <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
		DT	<u>D</u> ownlink <u>T</u> ransfer
		DTCH	<u>D</u> ownlink <u>T</u> raffic <u>C</u> hannel

EFSM	<u>E</u> xtended <u>F</u> inite <u>S</u> tate <u>M</u> achine	FEC	<u>F</u> orward <u>E</u> rror <u>C</u> orrection
EG	<u>E</u> TSI <u>G</u> uide	FIFO	<u>F</u> irst <u>I</u> n <u>F</u> irst <u>O</u> ut
EL	<u>E</u> vent <u>L</u> abel	FN	<u>F</u> rame <u>N</u> umber
EMC	<u>E</u> lectromagnetic <u>C</u> ompatibility	FTP	<u>F</u> ile <u>T</u> ransfer <u>P</u> rotocol
EN	<u>E</u> uropean <u>S</u> tandard	GoS	<u>G</u> rade of <u>S</u> ervice
EPMCC	<u>E</u> uropean <u>P</u> ersonal <u>M</u> obile <u>C</u> ommunications <u>C</u> onference	GPRS	<u>G</u> eneral <u>P</u> acket <u>R</u> adio <u>S</u> ervice
ERC	<u>E</u> uropean <u>R</u> adiocommunications <u>C</u> ommittee	GR	<u>G</u> raphical <u>R</u> epresentation
ERM	<u>E</u> lectromagnetic <u>C</u> ompatibility and <u>R</u> adio <u>S</u> pectrum <u>M</u> atters	GSM	<u>G</u> lobal <u>S</u> ystem for <u>M</u> obile <u>C</u> ommunication
ES	<u>E</u> TSI <u>S</u> tandard	GTSI	<u>G</u> roup <u>T</u> ETRA <u>S</u> ubscriber <u>I</u> dentify
ETR	<u>E</u> TSI <u>T</u> echnical <u>R</u> eport	GUI	<u>G</u> raphical <u>U</u> ser <u>I</u> nterface
ETS	<u>E</u> uropean <u>T</u> elecommunication <u>S</u> tandard	HIPERLAN	<u>H</u> igh <u>P</u> erformance <u>L</u> AN
ETSI	<u>E</u> uropean <u>T</u> elecommunications <u>S</u> tandards <u>I</u> nstitute	HDB	<u>H</u> ome <u>D</u> ata <u>B</u> ase
FACCH	<u>F</u> ast <u>A</u> ssociated <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel	HF	<u>H</u> uman <u>F</u> actors
FCFS	<u>F</u> irst <u>C</u> ome <u>F</u> irst <u>S</u> erve	HOL	<u>H</u> ead <u>O</u> f <u>L</u> ine Priority
FCS	<u>F</u> rame <u>C</u> heck <u>S</u> equence	HT	<u>H</u> illy <u>T</u> errain
FDM	<u>F</u> requency <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiplex	HTTP	<u>H</u> ypertext <u>T</u> ransfer <u>P</u> rotocol
FDMA	<u>F</u> requency <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess	IC	<u>I</u> nclude <u>C</u> all
FDT	<u>F</u> ormal <u>D</u> escription <u>T</u> echnique	ICI	<u>I</u> nterface <u>C</u> ontrol <u>I</u> nformation
		IDL	<u>I</u> nterface <u>D</u> efinition <u>L</u> anguage
		IDU	<u>I</u> nterface <u>D</u> ata <u>U</u> nit
		IEEE	<u>I</u> nstitute of <u>E</u> lectrical and <u>E</u> lectronics <u>E</u> ngineers
		IFT	<u>I</u> mmEDIATE <u>F</u> irst <u>T</u> ransmission
		IMM	<u>I</u> mmEDIATE
		IP	<u>I</u> nternet <u>P</u> rotocol

IS	<u>I</u> nterim <u>S</u> tandard	MAR	<u>M</u> ax <u>A</u> ccess <u>R</u> etries
ISDN	<u>I</u> ntegrated <u>S</u> ervices <u>D</u> igital <u>N</u> etwork	MaxRand1	<u>M</u> aximum <u>R</u> andom Number for Priority 1
ISI	<u>I</u> nter- <u>S</u> ystem <u>I</u> nterface	MaxRand2	<u>M</u> aximum <u>R</u> andom Number for Priority 2
ISI	<u>I</u> ntersymbolinterferenz		
ISO	<u>I</u> nternational <u>S</u> tandards <u>O</u> rganisation	MBCH	<u>M</u> aster <u>B</u> lock <u>C</u> hannel
		MCC	<u>M</u> obile <u>C</u> ountry <u>C</u> ode
ITSI	<u>I</u> ndividual <u>T</u> ETRA <u>S</u> ubscriber <u>I</u> dentify	MCCH	<u>M</u> ain <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel
		MCCH	<u>M</u> aster <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel
ITG	<u>I</u> nformationstechnische <u>G</u> esellschaft	MD	<u>M</u> ax <u>D</u> ata
ITU	<u>I</u> nternational <u>T</u> elecommunication <u>U</u> nion	MDTRS	<u>M</u> obile <u>D</u> igital <u>T</u> runked <u>R</u> adio <u>S</u> ystem
ITU-T	<u>T</u> elecommunication Standardization Sector of <u>I</u> TU	ME	<u>M</u> obile <u>E</u> quipment
		MER	<u>M</u> essage <u>E</u> rror <u>R</u> atio
LAN	<u>L</u> ocal <u>A</u> rea <u>N</u> etwork	MESA	<u>M</u> obility for <u>E</u> mergency and <u>S</u> afety <u>A</u> pplications
LAP.T	<u>L</u> ink <u>A</u> ccess <u>P</u> rotocol for <u>T</u> ETRA	MExE	<u>M</u> obile <u>E</u> xecution <u>E</u> nvironment
LAPD	<u>L</u> ink <u>A</u> ccess <u>P</u> rotocol <u>D</u> -Channel	MF	<u>M</u> obile Station To <u>F</u> ixed Network Call
LB	<u>L</u> inearisation Uplink <u>B</u> urst	MinRand1	<u>M</u> inimum <u>R</u> andom Number for Priority 1
LCFS	<u>L</u> ast <u>C</u> ome <u>F</u> irst <u>S</u> erve	MinRand2	<u>M</u> inimum <u>R</u> andom Number for Priority 2
LCH	<u>L</u> inearisation <u>C</u> hannel		
LE	<u>L</u> ate <u>E</u> nter	MLE	<u>M</u> obile <u>L</u> ink Control <u>E</u> ntity
LI	<u>L</u> awful <u>I</u> nterception		
LIFO	<u>L</u> ast <u>I</u> n <u>F</u> irst <u>O</u> ut	MM	<u>M</u> obility <u>M</u> anagement
LLC	<u>L</u> ogical <u>L</u> ink <u>C</u> ontrol	MM	<u>M</u> obile Station To
LOD	<u>L</u> ow <u>D</u> uty Mode		<u>M</u> obile Station Call
LOS	<u>L</u> ine <u>O</u> f <u>S</u> ight	MMI	<u>M</u> an <u>M</u> achine <u>I</u> nterface
LRE	<u>L</u> imited <u>R</u> elative <u>E</u> rror		
LS	<u>L</u> ine Station	MN	<u>M</u> ultiframe <u>N</u> umber
LSC	<u>L</u> ist <u>S</u> earch <u>C</u> all	MNC	<u>M</u> obile <u>N</u> etwork <u>C</u> ode
MAC	<u>M</u> edium <u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol	MNI	<u>M</u> obile <u>N</u> etwork <u>I</u> dentify

Modem	<u>M</u> odulator und <u>D</u> emodulator	NUB	<u>N</u> ormal <u>U</u> plink <u>B</u> urst
MPEG	<u>M</u> oving <u>P</u> icture <u>E</u> xperts <u>G</u> roup	NWK	<u>N</u> etwork
MPT	<u>M</u> inistry of <u>P</u> ost and <u>T</u> elecommunication	OC	<u>O</u> pen <u>C</u> hannel <u>C</u> all
MSC	<u>M</u> essage <u>S</u> equence <u>C</u> hart	OFDM	<u>O</u> rthogonal <u>F</u> requency <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiplexing
MMSE	<u>M</u> inimum <u>M</u> ean <u>S</u> quared <u>E</u> rror	OMT	<u>O</u> bject <u>M</u> odeling <u>T</u> echnique
MS	<u>M</u> obilstation	OOSE	<u>O</u> bject- <u>O</u> riented <u>S</u> oftware <u>E</u> ngineering
MT	<u>M</u> obile <u>T</u> ermination	OSA	<u>O</u> pen <u>S</u> ervice <u>A</u> rchitecture
MT0	<u>M</u> obile <u>T</u> ermination Type 0	OSI	<u>O</u> pen <u>S</u> ystems <u>I</u> nterconnection
MT2	<u>M</u> obile <u>T</u> ermination Type 2	PAMR	<u>P</u> ublic <u>A</u> ccess <u>M</u> obile <u>R</u> adio
MUX	<u>M</u> ultiplexer	PBX	<u>P</u> rivate <u>B</u> ranch <u>E</u> xchange
N	<u>N</u> etwork Layer	PC	<u>P</u> riority <u>C</u> all
NAP	<u>N</u> umber of <u>A</u> ccess <u>P</u> eriods	PCI	<u>P</u> rotocol <u>C</u> ontrol <u>I</u> nformation
NBCH	<u>N</u> ormal <u>B</u> lock <u>C</u> hannel	PCM	<u>P</u> ulse <u>C</u> ode <u>M</u> odulation
NDB	<u>N</u> ormal Continuous <u>D</u> ownlink <u>B</u> urst	PDC	<u>P</u> acific <u>D</u> igital <u>C</u> ellular
NNTP	<u>N</u> etwork <u>N</u> ews <u>T</u> ransfer <u>P</u> rotocol	PDF	<u>P</u> ortable <u>D</u> ocument <u>F</u> ormat
NSAP	<u>N</u> etwork Layer <u>SAP</u> Addresses	PDF	<u>P</u> robability <u>D</u> istribution <u>F</u> unction
NOR	<u>N</u> ormal Mode	PDN	<u>P</u> ublic <u>D</u> ata <u>N</u> etwork
NT	<u>N</u> etwork <u>T</u> ermination	PDO	<u>P</u> acket <u>D</u> ata <u>O</u> ptimised
NT1	<u>N</u> etwork <u>T</u> ermination Type 1	PDU	<u>P</u> rotocol <u>D</u> ata <u>U</u> nit
NT2	<u>N</u> etwork <u>T</u> ermination Type 2	PEI	<u>P</u> eripheral <u>E</u> quipment <u>I</u> nterface
nöbL	<u>n</u> ichtöffentlicher <u>b</u> eweglicher <u>L</u> andfunk	PHS	<u>P</u> ersonal <u>H</u> andyphone <u>S</u> ystem
Nu	<u>N</u> umber of Random Access Transmissions on Uplink	PICS	<u>P</u> rotocol <u>I</u> mplementation

	<u>C</u> onformance <u>S</u> tatement	RESTART	<u>R</u> epetitive <u>S</u> imulation <u>T</u> rials <u>A</u> fter <u>R</u> eaching <u>T</u> hreshold
PL	<u>P</u> hysical <u>L</u> ayer		
PMR	<u>P</u> rofessional <u>M</u> obile <u>R</u> adio	RFC	<u>R</u> equest <u>F</u> or <u>C</u> omments
PMR	<u>P</u> rivate <u>M</u> obile <u>R</u> adio	RNR	<u>R</u> eceiver <u>N</u> ot <u>R</u> eady
PPC	<u>P</u> re-emptive <u>P</u> riority <u>C</u> all	RR	<u>R</u> eceiver <u>R</u> eady
PR	<u>P</u> hrase <u>R</u> epresentation	RR	<u>R</u> ound <u>R</u> obin
PREHOL	<u>P</u> reemptive <u>H</u> ead <u>O</u> f <u>L</u> ine Priority	RTTI	<u>R</u> un- <u>T</u> ime <u>T</u> ype <u>I</u> nformation
Prio1	<u>P</u> riority <u>1</u>	RWTH	<u>R</u> heinisch- <u>W</u> estfälische <u>T</u> echnische <u>H</u> ochschule
Prio2	<u>P</u> riority <u>2</u>	S-ALOHA	<u>S</u> lotted- <u>A</u> LOHA
PSTN	<u>P</u> ublic <u>S</u> witched <u>T</u> elephone <u>N</u> etwork	S-CLNP	<u>S</u> pecific <u>C</u> onnectionless <u>N</u> etwork <u>P</u> rotocol
PTT	<u>P</u> ush-to- <u>T</u> alk	S-CLNS	<u>S</u> pecific <u>C</u> onnectionless <u>N</u> etwork <u>S</u> ervice
PzM	<u>P</u> unkt-zu- <u>M</u> ehrpunkt	SACCH	<u>S</u> low <u>A</u> ssociated <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel
PzP	<u>P</u> unkt-zu- <u>P</u> unkt	SAGE	<u>S</u> ecurity <u>A</u> lgorithms <u>G</u> roup of <u>E</u> xperts
QAM	<u>Q</u> uadrature <u>A</u> mplitude <u>M</u> odulation	SAP	<u>S</u> ervice <u>A</u> ccess <u>P</u> oint
QoS	<u>Q</u> uality of <u>S</u> ervice	SB	<u>S</u> ynchronisation Continuous Downlink <u>B</u> urst
QPSK	<u>Q</u> uaternary <u>P</u> hase <u>S</u> hift <u>K</u> eying	SCCH	<u>S</u> econdary <u>C</u> ontrol <u>C</u> hannel
RA	<u>R</u> ural <u>A</u> rea	SCH	<u>S</u> ignalling <u>C</u> hannel
RACH	<u>R</u> andom <u>A</u> ccess <u>C</u> hannel	SCH/F	<u>F</u> ull Size <u>S</u> ignalling <u>C</u> hannel
RAM	<u>R</u> andom <u>A</u> ccess <u>M</u> emory	SCH/HD	<u>H</u> alf Size <u>D</u> ownlink <u>S</u> ignalling <u>C</u> hannel
RB	<u>R</u> eservierte <u>B</u> löcke	SCH/HU	<u>H</u> alf Size <u>U</u> plink <u>S</u> ignalling <u>C</u> hannel
RCPC	<u>R</u> ate- <u>C</u> ompatible <u>P</u> unctured <u>C</u> onvolutional	SDL	<u>S</u> pecification and <u>D</u> escription <u>L</u> anguage
RD	<u>R</u> etry <u>D</u> elay	SDU	<u>S</u> ervice <u>D</u> ata <u>U</u> nit
RegTP	<u>R</u> egulierungsbehörde für <u>T</u> elekommunikation und <u>P</u> ost		
RES	<u>R</u> adio <u>E</u> quipment and <u>S</u> ystems		

SIM	<u>S</u> ubscriber <u>I</u> dentit <u>y</u> <u>M</u> odule	SSMP	<u>S</u> pecific <u>S</u> emi- <u>M</u> arkov <u>P</u> rocess
SIN1	<u>S</u> ystem <u>I</u> nformation Type 1	SSN	<u>S</u> ubslot <u>N</u> umber
SIN2	<u>S</u> ystem <u>I</u> nformation Type 2	STCH	<u>S</u> tealing <u>C</u> hannel
SJF	<u>S</u> hortest <u>J</u> ob <u>F</u> irst	SwMI	<u>S</u> witching and <u>M</u> anagement <u>I</u> nfrastructure
SMTP	<u>S</u> imple <u>M</u> ail <u>T</u> ransfer <u>P</u> rotocol	TA	<u>T</u> erminal <u>A</u> dapting Functions
SNA	<u>S</u> hort <u>N</u> umber <u>A</u> ddressing	TAA1	<u>T</u> ETRA Standard <u>A</u> uthentication <u>A</u> lgorithm 1
SNAF	<u>S</u> ub- <u>N</u> etwork <u>A</u> ccess Functions	TBR	<u>T</u> echnical Basis for <u>R</u> egulation
SOMT	<u>S</u> DL-oriented <u>O</u> bject <u>M</u> odeling <u>T</u> echnique	ToC	<u>T</u> ransfer of <u>C</u> ontrol
SOR	<u>S</u> tart of <u>R</u> eservation	TCH	<u>T</u> raffic <u>C</u> hannel
SP	<u>S</u> ervice <u>P</u> rimitive	TCP	<u>T</u> ransmission <u>C</u> ontrol <u>P</u> rotocol
SPE	<u>S</u> oftware <u>P</u> erformance <u>E</u> ngineering	TDM	<u>T</u> ime <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiplex
SPEET	<u>S</u> DL <u>P</u> erformance <u>E</u> valuation <u>E</u> nvironment and <u>T</u> ools	TDMA	<u>T</u> ime <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
SPEETCL	<u>S</u> DL <u>P</u> erformance <u>E</u> valuation <u>E</u> nvironment and <u>T</u> ools <u>C</u> lass <u>L</u> ibrary	TE	<u>T</u> erminal <u>E</u> quipment
SPT	<u>S</u> hortest <u>P</u> rocessing <u>T</u> ime	TE1	<u>T</u> erminal <u>E</u> quipment Type 1
SRPT	<u>S</u> hortest <u>R</u> emaining <u>P</u> rocessing <u>T</u> ime	TE2	<u>T</u> erminal <u>E</u> quipment Type 2
SRST	<u>S</u> hortest <u>R</u> emaining <u>S</u> ervice <u>T</u> ime	TEA1	<u>T</u> ETRA Standard <u>E</u> ncryption <u>A</u> lgorithm 1
SRRC	<u>S</u> quare <u>R</u> oot <u>R</u> aised <u>C</u> osine	TEA2	<u>T</u> ETRA Standard <u>E</u> ncryption <u>A</u> lgorithm 2
SSI	<u>S</u> hort <u>S</u> ubscriber <u>I</u> dentit <u>y</u>	TEI	<u>T</u> ETRA <u>E</u> quipment <u>I</u> dentit <u>y</u>
		TETRA	<u>T</u> errestrial <u>T</u> runked <u>R</u> adio

TIA	<u>T</u> elecommunications <u>I</u> ndustry <u>A</u> ssociation	UI	<u>U</u> nacknowledged <u>I</u> nformation
TL	<u>T</u> ransmission <u>L</u> ine	UL	<u>U</u> p <u>l</u> ink
TL-SDU	<u>T</u> ETRA <u>L</u> LC <u>S</u> DU	UML	<u>U</u> nified <u>M</u> odeling <u>L</u> anguage
TLA-SAP	<u>T</u> ETRA <u>L</u> LC <u>A</u> - <u>SAP</u>	UMTS	<u>U</u> niversal <u>M</u> obile <u>T</u> elecommunication <u>S</u> ystem
TLB-SAP	<u>T</u> ETRA <u>L</u> LC <u>B</u> - <u>SAP</u>	UP	<u>U</u> nallocated <u>P</u> hysical <u>C</u> hannel
TLC-SAP	<u>T</u> ETRA <u>L</u> LC <u>C</u> - <u>SAP</u>	UR	<u>U</u> p <u>l</u> ink <u>R</u> esponse
TM-SDU	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC- <u>S</u> DU	UT	<u>U</u> p <u>l</u> ink <u>T</u> ransfer
TMA-SAP	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC <u>A</u> - <u>SAP</u>	UTCH	<u>U</u> p <u>l</u> ink <u>T</u> raffic <u>C</u> hannel
TMB-SAP	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC <u>B</u> - <u>SAP</u>		
TMC-SAP	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC <u>C</u> - <u>SAP</u>		
TMD-SAP	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC <u>D</u> - <u>SAP</u>		
TMI	<u>T</u> ETRA <u>M</u> anagement <u>I</u> dentify		
TMV-SAP	<u>T</u> ETRA <u>M</u> AC <u>V</u> - <u>SAP</u>	UTRAN	<u>U</u> MTS <u>T</u> errestrial <u>R</u> adio <u>A</u> ccess <u>N</u> etwork
TN	<u>T</u> imeslot <u>N</u> umber	V+D	<u>V</u> oice plus <u>D</u> ata
TP	<u>T</u> raffic <u>P</u> hysical <u>C</u> hannel	VBR	<u>V</u> ariable <u>B</u> it <u>R</u> ate
TP-SAP	<u>T</u> ETRA <u>P</u> L- <u>SAP</u>	VDB	<u>V</u> isited <u>D</u> ata <u>B</u> ase
TPC-SAP	<u>T</u> ETRA <u>P</u> L <u>C</u> - <u>SAP</u>	VDE	<u>V</u> erband der <u>E</u> lektrotechnik <u>E</u> lektronik <u>I</u> nformationstechnik
TPI	<u>T</u> alking <u>P</u> arty <u>I</u> dentification		
TR	ETSI <u>T</u> echnical <u>R</u> eport	VHE	<u>V</u> irtual <u>H</u> ome <u>E</u> nvironment
TS	<u>T</u> rainingssequenz	VLD	<u>V</u> ery <u>L</u> ow <u>D</u> uty Mode
TS	ETSI <u>T</u> echnical <u>S</u> pecification	WLAN	<u>W</u> ireless <u>L</u> ocal <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
TSI	<u>T</u> ETRA <u>S</u> ubscriber <u>I</u> dentify	WT	<u>W</u> aiting <u>T</u> ime
TTCN	<u>T</u> ree and <u>T</u> abular <u>C</u> ombined <u>N</u> otation	WU	<u>W</u> ake <u>U</u> p
TU	<u>T</u> ypical <u>U</u> rban	WWW	<u>W</u> orld <u>W</u> ide <u>W</u> eb
UD1	<u>U</u> p <u>l</u> ink <u>D</u> ata Type <u>1</u>	ZS	<u>Z</u> eitschlitz
UD2	<u>U</u> p <u>l</u> ink <u>D</u> ata Type <u>2</u>	ZP	<u>Z</u> ugriffsperiode

VERZEICHNIS UNVERÖFFENTLICHTER QUELLEN

Dieses Quellenverzeichnis verweist im Gegensatz zum Literaturverzeichnis auf unveröffentlichte Dokumente. Größtenteils besteht es aus Verweisen auf Diplom- und Studienarbeiten, die maßgeblichen Anteil an dieser Dissertation haben und vom Autor am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze betreut wurden, während diese Dissertation erstellt wurde.

BRINKMANN (1997) – AXEL BRINKMANN. *Modelling of MPEG-4 Video Coders for Optimization of Real-Time Encoding*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Mai 1997.

In dieser Diplomarbeit wird ein MPEG-4-Videocodex modelliert, der als Grundlage für einen MPEG-4-Lastgenerator dient. Zur Ausgaberratenanpassung wird ein Vorhersagemodell basierend auf einem neuronalen Netz entwickelt.

BÜTER (1997) – MICHAEL BÜTER. *Entwicklung und Bewertung von Reservierungszuteilungs- und Kollisionauflösungsalgorithmen für den Protokollstapel Packet Data Optimised des Bündelfunksystems TETRA*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Februar 1997.

In dieser Diplomarbeit werden Kollisionauflösungsalgorithmen, die das Sendeergebnis des letzten Zeitschlitzes auswerten, d. h. leerer Zeitschlitz, erfolgreiche Übertragung oder Kollision, auf PDO angepasst und ausgewertet.

CORNELSEN (1995) – HOLGER CORNELSEN. *Konzeptionierung und Entwurf einer C++-Basisklassenbibliothek*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Dezember 1995.

In dieser Studienarbeit wird das Grundgerüst der C++-Simulationsklassenbibliothek SPEETCL entwickelt. Insbesondere werden eine Ausnahmefehlerbehandlung und Laufzeittypüberprüfung implementiert.

CORNELSEN (1996) – HOLGER CORNELSEN. *Entwicklung und Implementierung von Lastgeneratoren für multimediale Sprach-, Audio- und Paketdaten Anwendungen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, November 1996.

In dieser Diplomarbeit werden Lastgeneratoren für Konversationssprache und Paketdatengeneratoren für die *Transmission Control Protocol* (TCP)/IP-Dienste WWW, SMTP, Telnet und FTP entwickelt, validiert und in der SPEETCL implementiert.

ERGEZINGER (1996) – JENS ERGEZINGER. *Persistente Objekte für die Klassenbibliothek SPEETCL*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juni 1996.

In dieser Studienarbeit wird die ereignisorientierte C++-Simulationsklassenbibliothek SPEETCL um Persistenz erweitert. Ferner wird die automatische Generierung von persistenten Klassen ermöglicht.

KEHREN (1996) – DIETER KEHREN. *Untersuchung der Langzeitkorrelation von MPEG-Videosequenzen*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Dezember 1996.

In dieser Studienarbeit wird der MPEG-1-Lastgenerator aus **QUASCHIK (1996)** dahingehend optimiert, dass die Langzeitkorrelation von MPEG-1-Videosequenzen besser berücksichtigt wird. Hierzu werden hierarchische Markoff-Modelle verwendet, die anhand von Filmvorlagen parametrisiert werden.

KRAUSE (1996) – VOLKER KRAUSE. *Entwicklung und Bewertung von Reservierungszuteilungs- und Kollisionsauflösungsalgorithmen für das Bündelfunksystem TETRA*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, November 1996.

In dieser Diplomarbeit werden Kollisionsauflösungsalgorithmen, die das Sendeergebnis des letzten Zeitschlitzes auswerten, d. h. leerer Zeitschlitz, erfolgreiche Übertragung oder Kollision, auf V+D angepasst und ausgewertet.

KÜTTING (1997) – BERND KÜTTING. *Simulativer und analytischer Leistungsvergleich von Paketdatendiensten des Bündelfunksystems TETRA und des Mobilfunksystems GSM*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juni 1997.

In dieser Diplomarbeit werden der GSM-Paketdatendienst GPRS und TETRA V+D analytisch anhand von Markoff-Modellen und simulativ mit Hilfe des TETRA-Simulators und eines GPRS-Simulators verglichen.

KUYPERS (1998) – DIRK KUYPERS. *Simulative und analytische Leistungsbewertung von Kollisionsauflösungsalgorithmen und Reservierungszuteilungsstrategien für den Protokollstapel Packet Data Optimised des Bündelfunksystems TETRA im mehrzellularen Umfeld*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Oktober 1998.

In dieser Diplomarbeit werden anhand von Fehlermusterdateien für Gleichkanalstörungen aus bis zu sechs benachbarten Zellen das Verhalten von Reservierungszuteilungsstrategien und Kollisionsauflösungsalgorithmen für PDO untersucht.

LÖTTNER (1997) – MICHAEL LÖTTNER. *Leistungsbewertung von Reservierungszuteilungsstrategien für den Protokollstapel Packet Data Optimised*

des Bündelfunksystems TETRA. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Oktober 1997.

In dieser Diplomarbeit werden Reservierungszuteilungsstrategien für den Protokollstapel PDO untersucht. Ferner werden Lastgeneratoren für den simulativen Vergleich von TETRA-Systemen vorgestellt.

LUEG (1997) – JÜRGEN LUEG. *Automatische Konvertierung von C++-Klassen in abstrakte Datentypen der formalen Beschreibungssprache SDL*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Februar 1997.

In dieser Studienarbeit wird ein Werkzeug entwickelt, mit dessen Hilfe abstrakte Datentypen von SPEETCL-Klassen automatisch erstellt werden können. Somit steht der Leistungsumfang der SPEETCL unter SDL zur Verfügung.

LUEG (1998) – JÜRGEN LUEG. *Ermittlung realer Messwerte in einem ATM-LAN und Entwicklung eines ATM-Lastgenerators für multimediale Dienste*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Januar 1998.

In dieser Diplomarbeit wird ein Lastgenerator für *Asynchronous Transfer Mode* (ATM)-Hintergrundlast entwickelt. Der Lastgenerator basiert auf Messungen in einem ATM-Netz mit 1200 Benutzern und wird mit Hilfe eines *Specific Semi-Markov Process* (SSMP) modelliert.

MATSCHKE (1995) – JENS MATSCHKE. *Formale Spezifikationssprachen zur Beschreibung von Kommunikationsprotokollen: Estelle, LOTOS und SDL – Einführung, Vergleich und Bewertung*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Dezember 1995.

In dieser Studienarbeit werden die formalen Sprache Estelle, LOTOS und SDL miteinander verglichen, inwiefern sie die Leistungsbewertung von Kommunikationssystemen unterstützen.

QUASCHIK (1996) – DIETER QUASCHIK. *Entwurf und Implementierung eines Lastgenerators für Multimedia-Anwendungen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juli 1996. Zitat auf S. 314.

In dieser Diplomarbeit wird ein Lastgenerator für Video- und Audio-Anwendungen im MPEG-1-Format entwickelt. Durch reale Filmvorlagen parametrisierte Markoff-Ketten bilden eine *Variable Bit Rate* (VBR)-Videoquelle und eine CBR-Audioquelle nach.

RECKER (1997) – STEPHAN RECKER. *Entwicklung und Bewertung von Kollisionsauflösungs- und prioritätengesteuerten Reservierungszuteilungsalgorithmen für den Protokollstapel Voice + Data des Bündelfunksystems TETRA*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikations-

netze, Mai 1997.

In dieser Diplomarbeit werden analytische Modelle zur Ermittlung der Kenngrößen Durchsatz, Paketverzögerung, Auftragsüberhang und Wartewahrscheinlichkeit eines TETRA-Systems vorgestellt, um die maximal bedienbare Anzahl von Teilnehmern abzuschätzen. Abschließend werden Reservierungszuteilungsstrategien für V+D untersucht.

RIEDE (1996) – KLAUS RIEDE. *SDL-Spezifikation und Leistungsbewertung der Kanalzugriffs- und Sicherungsprotokolle von TETRA Voice + Data*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Februar 1996.

In dieser Diplomarbeit wurde der ereignisorientierte und stochastische TETRA-Simulator um eine objektorientierte Spezifikation des V+D-Sicherungsschicht erweitert.

SCHUMANN (1997) – THORSTEN SCHUMANN. *Validierung der Zufallszahlengeneratoren und Verteilungsfunktionen der Klassenbibliothek SPEETCL*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Februar 1997.

In dieser Studienarbeit werden mit Hilfe von χ^2 - und Kolmogoroff-Smirnoff-Tests die Zufallszahlengeneratoren und die diskreten und stetigen Verteilungsfunktionen der SPEETCL validiert.

SCHUMANN (1998) – THORSTEN SCHUMANN. *Simulative und analytische Leistungsbewertung von dienstabhängigen, prioritätengesteuerten Reservierungszuteilungsalgorithmen für den Protokollstapel Voice + Data des Bündelfunksystems TETRA im mehrzellularen Umfeld*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juni 1998. Zitat auf S. 107.

In dieser Diplomarbeit werden Fehlermusterdateien für Gleichkanalstörungen aus bis zu sechs benachbarten Zellen entwickelt. Ferner wird das Verhalten von Reservierungszuteilungsstrategien und Kollisionsauflösungsalgorithmen basierend auf diesen Fehlermodellen für V+D untersucht.

SEIDENBERG (1997) – PETER SEIDENBERG. *Entwicklung eines Empfängermodells für das Bündelfunksystem TETRA unter Berücksichtigung der Funkkanaleigenschaften*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, April 1997. Zitat auf S. 183.

In dieser Diplomarbeit wurde ein TETRA-Empfängermodell zur Berechnung der Bitfehlerverhältnis ungeschützter Bits entwickelt. Dieses Modell stützt sich auf ein Kanalmodell, das neben der Mehrwegeausbreitung der Funkwellen, auch Gleichkanalstörungen, additives weisses gaußsches Rauschen sowie die Bewegung des Empfängers berücksichtigt.

SEIDENBERG (1996) – STEFAN SEIDENBERG. *Entwurf und Realisierung eines universellen, objektorientierten Prozessorsystem-Emulators zur Leistungsbewertung von Telekommunikationsprotokollen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, April 1996.

In dieser Diplomarbeit wurde ein objektorientierter Prozessorsystem-Emulator entwickelt, um u. a. die Einhaltung von Echtzeit-Bedingungen formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme crosscompiliert für bestimmte Zielhardware überprüfen zu können. Prototypisch wurde der Prozessor Intel 8051 implementiert.

STEPPLER (1993) – MARTIN STEPPLER. *Objektverwaltung der CNCL*. Studienarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juli 1993.

In dieser Studienarbeit werden dynamische und statische Hashtabellen mit verschiedenen Hashfunktionen in die Simulationsklassenbibliothek CNCL implementiert.

STEPPLER (1994) – MARTIN STEPPLER. *Leistungsbewertung des Vielfachzugriffsprotokolls des Bündelfunksystems TETRA*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, November 1994.

In dieser Diplomarbeit wurde ein ereignisorientierter, stochastischer TETRA-Simulator in C++ erstellt. Die Sicherungsschicht der Protokollstapel V+D und PDO wurde formal in SDL spezifiziert und mit Hilfe eines ebenfalls entwickelten Code-Generators in den Simulator eingebunden.

STEPPLER et al. (1997) – MARTIN STEPPLER, MATTHIAS LOTT, STEFAN BÖHMER und UWE MÖLLER. *SPEET-Projekthandbuch*. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Oktober 1997. Zitat auf S. 162, 164.

Neben einer umfassenden Beschreibung des SPEET-Werkzeuges beinhaltet dieses Projekthandbuch allgemeine Richtlinien für die Programmierung in C++ und die Spezifizierung in SDL. Ferner werden die Konzepte der SPEETCL ausführlich vorgestellt.

STEPPLER et al. (1998) – MARTIN STEPPLER, WOLFGANG OLZEM und CHRISTIAN LAMPE. *SDL2SPEETCL – SDL-PR to C++ Code Generation Using the SPEETCL*. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, September 1998. Zitat auf S. 163.

Dieses Handbuch beschreibt die Abbildung von SDL-Konzepten auf entsprechende C++-Klassen der SPEETCL. Insbesondere wird umfassend erläutert, wie SDL-Spezifikationen in die ereignisgesteuerte Simulationsstruktur der SPEETCL eingebunden und abstrakte Datentypen verwendet werden können.

WALKE et al. (1998) – BERNHARD WALKE, MARTIN STEPPLER, PETER SEIDENBERG und STEFAN MANGOLD. *Exemplarische Netzplanung für einen bundesweiten Bündelfunkdienst auf TETRA-Basis – Technische und lizenzrelevante Randbedingungen sowie Abschätzung des Mengengerüsts*.

Technischer Bericht, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, April 1998. Zitat auf S. [10](#).

Diese unveröffentlichte Studie untersucht beispielhaft für bis zu zwei bundesweite TETRA-Netzbetreiber die Entwicklung des Mengengerüstes aller Netzkomponenten über einen Zeitraum von zehn Jahren.

LITERATURVERZEICHNIS

AKAIWA (1997) – YOSHIHIKO AKAIWA. *Introduction to Digital Mobile Communication*. John Wiley & Sons, Oktober 1997, ISBN 0-471-17545-5. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 25, 184.

Nach einer allgemeinen Definition von digitalen Mobilfunksystemen beschreibt der Autor die mathematische Analyse von Signalen und Rauschen, die Grundelemente digitaler Kommunikationssysteme (Codierung und Pulsformung, Signalerkennung und Synchronisation), die Eigenschaften des Mobilfunkkanals (Pfadverlust, Schwund und Gleichkanalstörungen) und verschiedene Modulationstechniken. Ferner werden Diversitätstechniken, Fehlerkorrektur- und Sprachcodierungsverfahren erörtert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anhand realer Mobilfunkgeräte und -systeme (Mobitex, *Digital Enhanced Cordless Telecommunication* (DECT), *Personal Handyphone System* (PHS) und GSM) vertieft.

ARLITT und WILLIAMSON (1997) – MARTIN F. ARLITT und CAREY L. WILLIAMSON. *Internet Web Servers: Workload Characterization and Performance Implications*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 5, Nr. 5, S. 631–645, Oktober 1997, ISSN 1063-6692. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 144.

In diesem Artikel werden WWW-Server anhand ihrer Verkehrslast charakterisiert basierend auf sechs verschiedenen Messungen im Bereich von einer Woche bis zu einem Jahr. Schwerpunkte der Untersuchungen sind hierbei die Verteilung der Dokumenttypen und -größen, das Dokumentauswahlverhalten und die geographische Verteilung der Herkunft der Anforderungen. Es werden zehn gemeinsame Merkmale für WWW-Verkehrslast identifiziert und mögliche Leistungsverbesserungen vorgeschlagen.

ARNOLD und GOSLING (1996) – KEN ARNOLD und JAMES GOSLING. *The Java Programming Language*. The Java Series. Addison-Wesley, 1996, ISBN 0-201-63455-4. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden. Zitat auf S. 93.

Dieses Buch gibt einen Überblick über die objektorientierten Konzepte der Programmiersprache Java und erläutert die einzelnen Sprachkonstrukte. Insbesondere wird auf Ausnahmefehlerbehandlung, Zeichenketten, Multithreading, Multitasking und die Standard-Java-Bibliotheken eingegangen.

BERNERS-LEE et al. (1996) – TIM BERNERS-LEE, R. FIELDING und H. FRYSTYK. *Hypertext Transfer Protocol (HTTP) 1.0*. Network Working

Group, Request For Comments (RFC) 1945, Mai 1996. Dieses Dokument ist unter <http://www.rfc-editor.org> frei verfügbar. Zitat auf S. 143.

Dieser Internet-Standard definiert ein Kommunikationsprotokoll der Anwendungsschicht für verteilte Informationssysteme. Das Protokoll ist generisch, zustandslos und objektorientiert und kann durch seine Erweiterbarkeit für vielfältige Aufgaben eingesetzt werden. Vor allem erlaubt *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) die Übertragung von Daten unabhängig von deren Typ.

BERTSEKAS und GALLAGER (1992) – DIMITRI BERTSEKAS und ROBERT GALLAGER. *Data Networks*. Prentice-Hall, 2. Auflage, 1992, ISBN 0-13-201674-5. Dieses Buch kann unter <http://www.prenhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 101.

Nach einer Einführung in den schichtenorientierten Aufbau von Netzarchitekturen werden PzP-Protokolle ausführlich behandelt. Anschließend werden in diesem Buch Wartemodelle für Datennetze und die Kommunikation per Vielfachzugriff umfassend erläutert. Zum Ende beschreiben die Autoren die Vermittlung und die Flusssteuerung in Datennetzen.

BÖHMER (1996) – STEFAN BÖHMER. *Entwurf eines ATM-basierten Fun-knetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung*, Band 5 der *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (ABMT)*. Verlag der Augustinus Buchhandlung, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juli 1996, ISBN 3-86073-384-2. Diese Dissertation kann unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de> bestellt werden. Zitat auf S. 94.

Im ersten Teil dieser Dissertation wird eine verkehrstheoretische Leistungsanalyse und eine Verifizierung derselben mit Hilfe stochastischer Simulation von ATM-basierten Multi-Hop-Netzen durchgeführt. Im zweiten Teil wird eine Softwareentwurfsmethodik für die Leistungsbewertung formal in SDL spezifizierter Kommunikationsprotokolle implementiert für dedizierte Zielhardware vorgestellt.

BOCHMANN et al. (1997) – GREGOR VON BOCHMANN, A. PETRENKO, O. BELLAL und S. MAGUIRAGA. *Automating the process of test derivation from SDL specifications*. In *Tagungsband des 8. SDL-Forums '97* (CAVALLI und SARMA, 1997), S. 261–276. Dieser Tagungsband kann unter <http://www.elsevier.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 92.

In diesem Tagungsbeitrag wird ein Werkzeug vorgestellt, mit dessen Hilfe Abstrakte Test-Suiten (ATS) in TTCN-Notation halbautomatisch basierend auf SDL-Spezifikationen generiert werden können. Insbesondere wird auf das Problem der Explosion des Zustandsraums eingegangen und eine Testfallgenerierung mit dem Ziel einer vollständigen Fehlerabdeckung im Gegensatz zu einer vollständigen Quelltextabdeckung bevorzugt.

BOOCH (1994) – GRADY BOOCH. *Object-oriented analysis and design with*

applications. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 2. Auflage, 1994, ISBN 0-8053-5340-2. Unter <http://www.awl.com> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 88, 157, 285.

BOOCH stellt in diesem Buch eine einheitliche Notation für den objektorientierten Softwareentwurf vor. Diese Notation berücksichtigt die BOOCH-Notation und andere weitverbreitete Methoden. Zu den Zielen dieses Buches gehört, Verständnis für die fundamentalen Konzepte des Objektmodells zu erzeugen und anhand von realistischen Beispielen den objektorientierten Softwareentwurf mit Hilfe dieser Notation zu erläutern.

BOOCH et al. (1997) – GRADY BOOCH, IVAR JACOBSON und JAMES RUMBAUGH. *The Unified Modeling Language (UML) for Object-Oriented Development*. UML Document Set 1.1, Rational Software Corporation, September 1997. Dieses Dokument ist frei verfügbar unter <http://www.rational.com/uml>. Zitat auf S. 88, 90.

In UML sind die Methoden Booch, OMT und OOSE zu einer einheitlichen Entwurfsmethodik zusammengefasst. Diese Dokumentsammlung bildet die Grundlage für den zukünftigen UML-Standard.

BOSSERT (1998) – MARTIN BOSSERT. *Kanalcodierung*. Reihe Informationstechnik. Teubner-Verlag, 2. Auflage, Juli 1998, ISBN 3-519-16143-5. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.teubner.de>. Zitat auf S. 34.

In diesem Buch werden umfassend alle mit der Kanalcodierung zusammenhängenden Bereiche erläutert. Nach einer Einführung von Grundbegriffen und der Theorie der Galois-Felder stellt BOSSERT Blockcodes (Reed-Solomon-, BCH-, Reed-Muller-Codes, etc.), deren Eigenschaften und zugehörige Decodierverfahren vor. Daran schließen sich Faltungscode und deren Decodierverfahren, z. B. der Viterbi-Algorithmus, an. Das Buch endet mit Kapiteln über verallgemeinerte Codeverkettung und codierte Modulation.

BRADY (1969) – PAUL T. BRADY. *A Model for Generating On-Off Speech Patterns in Two-Way Conversation*. *The Bell System Technical Journal*, Bd. 48, Nr. 9, S. 2445–2472, September 1969, ISSN 0005-8580. Zitat auf S. 143, 144, 251.

BRADY stellt in diesem Zeitschriftenbeitrag ein Sechs-Zustands-Modell für die Generierung von Sprachmustern für Telefonkonversationen vor. Mit Hilfe von Poisson-Prozessen werden die Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt. Das Modell wird mit 16 realen Konversationen verglichen und validiert.

BRATLEY et al. (1983) – PAUL BRATLEY, BENNETT L. FOX und LINUS E. SCHRAGE. *A Guide to Simulation*. Springer-Verlag, 1983, ISBN 3-540-90820-X. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.springer.de>.

Zitat auf S. 150, 258.

Dieses Buch führt in die ereignisorientierte, stochastische Simulation ein. Die Autoren verbinden hierbei die mathematische Behandlung von Zufallszahlen, Wahrscheinlichkeitsfunktionen und statistischer Auswertung mit Programmierbeispielen.

BREY (1992) – BARRY B. BREY. *The Motorola Microprocessor Family: 68000, 68008, 68010, 68020, 68030, and 68040: Programming and Interfacing with Applications*. Series in Electronics Technology. Saunders College Publishing, 1992, ISBN 0-03-026423-5. Dieses Buch kann unter <http://www.saunderscollege.com> bestellt werden. Zitat auf S. 148.

In diesem Lehrbuch werden die Mikroprozessoren der „Motorola 68000“-Familie vollständig beschrieben. Die Architektur, die einzelnen Komponenten und die Programmierung inkl. des gesamten Befehlssatzes werden umfassend erläutert.

BRONSTEIN und SEMENDJAJEW (1996) – ILJA N. BRONSTEIN und K.A. SEMENDJAJEW. *Teubner-Taschenbuch der Mathematik*. Teubner-Verlag, 1996, ISBN 3-8154-2001-6. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.teubner.de>. Zitat auf S. 99, 181.

Dieses Standardnachschlagewerk deckt folgende Themengebiete umfassend ab: Formeln und Tabellen, Elementarmathematik, Mathematik auf dem Computer, Differential- und Integralrechnung, Vektoranalysis, gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen, Integraltransformationen, komplexe Funktionentheorie, Algebra und Zahlentheorie, analytische und algebraische Geometrie, Differentialgeometrie, mathematische Logik und Mengentheorie, Variationsrechnung und Optimierung, Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik, Numerik und wissenschaftliches Rechnen und die Geschichte der Mathematik.

BUSSEL et al. (1997) – JEROEN VAN BUSSEL, HANS SCHURER, CORNELIS SLUMP und ERIK K.L. ROSSOU. *Optimum Cell Size for Police Use*. In *Tagungsband der 2. EPMCC '97* (WALKE, 1997), S. 157–163. Weitere Informationen befinden sich unter <http://utelnt.el.utwente.nl/links/TETRA>. Zitat auf S. 194.

In diesem Tagungsbeitrag wird ein Verfahren vorgestellt, um die optimale Zellgröße bei zellularen, mobilen Kommunikationssystemen zu ermitteln. Dieses Verfahren berücksichtigt Zellradien und Zellgruppengrößen und bildet die Signalausbreitung nach dem sog. Egli-Modell nach. Es werden optimale Zellradien und Zellgruppengrößen bei verschiedenen Kanaltypen und unterschiedlicher Zellrandabdeckung präsentiert.

CAPETANAKIS (1979) – JOHN I. CAPETANAKIS. *Tree Algorithms for Packet Broadcast Channels*. *IEEE Transactions on Information Theory*, Bd. IT-25, Nr. 5, S. 505–515, September 1979, ISSN 0018-9448. Bezogen werden kann dieser Artikel über <http://www.itsoc.org>. Zitat auf S. 101.

In diesem Artikel stellt CAPETANAKIS statische und dynamische binäre Baualgorithmen

men vor, um Kollisionen beim Zufallszugriff aufzulösen. Er zeigt, dass ein maximaler Durchsatz von 43 % bei akzeptabler Paketverzögerung ohne Instabilitäten erzielt werden kann und dass das TDMA-Verfahren als ein Sonderfall der Baumalgorithmen angesehen werden kann.

CAVALLI und SARMA (1997) – ANA CAVALLI und AMARDEO SARMA, Hrsg. *Tagungsband des 8. SDL-Forums: SDL '97 – Time for Testing – SDL, MSC and Trends*, Evry, Frankreich, 23.-26. September 1997. Elsevier Science Publishers, ISBN 0-444-82816-8. Dieser Tagungsband kann unter <http://www.elsevier.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 320, 325, 337, 349.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren die Leistungsbewertung formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme, ferner der Test, die Verifizierung und die Validierung dieser Systeme und der Einsatz von MSCs hierbei. In weiteren Beiträgen wird das Zusammenspiel von SDL mit UML, OMT und der CORBA-Sprache IDL erläutert und schließlich werden effektive Codegeneratoren vorgestellt.

CAYLA (1992) – GUY CAYLA. *TETRA – The New Digital Professional Mobile Radio*. In *5th Nordic Seminar on Digital Mobile Radio Communications (DMR V)*, S. 113–118, Helsinki, Finnland, Dezember 1992. Zitat auf S. 12.

Dieser Tagungsbeitrag stellt kurz die technischen Daten, die Dienste und die Protokollstapel V+D, PDO und DM von TETRA vor.

CEPT (1992) – EUROPEAN RADIOCOMMUNICATIONS COMMITTEE (ERC) OF CEPT. *Frequencies for Mobile Digital Trunked Radio Systems*. ERC-Empfehlung T/R 22-05, European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), 1992. Dieses Dokument ist frei erhältlich unter <http://www.ero.dk>. Zitat auf S. 20.

Diese Empfehlung definiert die für TETRA in Europa reservierten Frequenzbänder.

CHOUINARD et al. (1988) – JEAN-YVES CHOUINARD, MICHEL LECOURS und GILLES. Y. DELISLE. *Estimation of Gilbert's and Fritchman's Models Parameters Using the Gradient Method for Digital Mobile Radio Channels*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. VT-37, Nr. 3, S. 158–166, August 1988, ISSN 0018-9545. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 186.

In diesem Artikel wird ein Schätzalgorithmus vorgestellt, mit dessen Hilfe die Parameter der Kanalmodelle von GILBERT (1960) und FRITCHMAN (1967) basierend auf experimentell ermittelten Fehlerverteilungen bestimmt werden können.

COLEMAN et al. (1994) – DEREK COLEMAN, PATRICK ARNOLD, STEPHANIE BODOFF, CHRIS DOLLIN und HELENA GILCHRIST. *Object-Oriented De-*

velopment: The Fusion Method. Prentice-Hall, 1994, ISBN 0-13-338823-9. Dieses Buch kann unter <http://www.prenhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 90.

Dieses Buch stellt eine Methode für den objektorientierten Softwareentwurf als Synthese verschiedener, weit verbreiteter Methoden, OMT, Booch, etc. vor. Der gesamte Softwareentwicklungsprozess von der Anforderungsanalyse, über die Systemanalyse und den -entwurf bis zur Implementierung wird abgedeckt. Insbesondere werden die am weitesten verbreiteten Methoden miteinander verglichen und Methoden vorgestellt, mit deren Hilfe Software wiederverwendet werden kann.

CÁTEDRA und PÉREZ-ARRIAGA (1999) – MANUEL F. CÁTEDRA und JESÚS PÉREZ-ARRIAGA. *Cell Planning for Wireless Communications*. Mobile Communications Series. Artech House Publishers, 1999, ISBN 0-89006-601-9. Unter <http://www.artechhouse.com> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 171.

Dieses Buch beleuchtet die wichtigsten Aspekte des Entwurfs von pico- und micro-zellularen Mobilfunknetzen. Neben den theoretischen Grundlagen in Bezug auf die Beugung und Reflexion von elektromagnetischen Wellen werden Strahlenverfolgungstechniken (*Ray-Tracing*), empirische und semiempirische Pfadverlustvorhersagemodelle und Verfahren für die statische und dynamische Kanalzuweisung bei der Zellplanung behandelt.

CUNNINGHAM (1990) – GEORGE A. CUNNINGHAM. *Delay Versus Throughput Comparisons for Stabilized Slotted ALOHA*. *IEEE Transactions on Communications*, Bd. COM-38, Nr. 11, S. 1932–1934, November 1990, ISSN 0090-6778. Dieser Artikel kann über <http://www.comsoc.org> bezogen werden. Zitat auf S. 99.

In diesem Artikel beschreibt CUNNINGHAM den Kollisionsauflösungsalgorithmus „Stochastische Annäherung“. Eine optimale Parameterwahl in Bezug auf Paketverzögerung und Durchsatz wird für diesen das S-ALOHA-Verfahren stabilisierenden Algorithmus vorgestellt.

DAVID und BENKNER (1996) – KLAUS DAVID und THORSTEN BENKNER. *Digitale Mobilfunksysteme*. Teubner-Verlag, 1996, ISBN 3-519-06181-3. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.teubner.de>. Zitat auf S. 170, 171, 178.

Dieses Buch besteht aus zwei Teilen: In Teil 1 werden die übertragungstechnischen Grundlagen des Funkkanals, zellulare Netze bis hin zu Modulationsverfahren, Codierung und Vielfachzugriffsverfahren behandelt. Der zweite Teil beschreibt, aufbauend auf den Grundlagen des ersten Teils, das weltweit führende Mobilfunksystem GSM und weitere Mobilfunksysteme bis hin zu zukünftigen Systemen.

DEMPSEY et al. (1993) – BERT J. DEMPSEY, JÖRG LIEBEHERR und AL-

FRED C. WEAVER. *A New Error Control Scheme for Packetized Voice over High-Speed Local Area Networks*. In *18th IEEE Local Computer Networks Conference*, S. 91–100, Minneapolis, Minnesota, USA, September 1993. Dieses Dokument ist unter <http://ils.unc.edu/~bert> frei verfügbar. Zitat auf S. 128.

In diesem Tagungsbeitrag wird ein neues Fehlerkorrekturverfahren vorgeschlagen, um verloren gegangene Sprachpakete erneut zu versenden, so dass sie rechtzeitig eintreffen.

DSSOULI et al. (1999) – RACHIDA DSSOULI, GREGOR VON BOCHMANN und YAIR LAHAV, Hrsg. *Tagungsband des 9. SDL-Forums: SDL '99 – The Next Millenium*, Montréal, Québec, Kanada, 21.-25. Juni 1999. Elsevier Science Publishers, ISBN 0-444-50228-9. Dieser Tagungsband kann unter <http://www.elsevier.nl> bestellt werden.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren die Leistungsbewertung formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme, automatisierte Testfallgenerierungen, Erweiterungen der Sprache SDL und das Zusammenspiel von SDL und MSC mit UML.

DUNLOP et al. (1999) – JOHN DUNLOP, DEMESSIE GIRMA und JAMES IRVINE. *Digital Mobile Communications and the TETRA System*. John Wiley & Sons, 1999, ISBN 0-471-98792-1. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden.

Nach einer allgemeinen Einführung in die grundlegenden Prinzipien von digitalen Mobilfunksystemen beschreiben die Autoren die öffentlichen Mobilfunksysteme GSM und DECT. Danach werden die Nutzer von PMR-Systemen vorgestellt, ihre Anforderungen an Dienste eines PMR-Netzes und generell die Unterschiede zwischen PMR-Netzen und öffentlichen, zellularen Mobilfunknetzen beschrieben. Die restlichen Zwei-Drittel des Buches widmen sich dem TETRA-System, seiner Architektur, seinen Komponenten, Diensten, Protokollen und seinen Unterschieden zum GSM-System.

EK (1998) – ANDERS EK. *Telelogic Tau 3.4 Reference Manual – The SOMT Method*. Telelogic, Malmö, Schweden, 1998. Verfügbar ist dieses Dokument unter <http://www.telelogic.com>. Zitat auf S. 88, 163.

In dieser Produktdokumentation wird beschrieben, durch welche Softwarewerkzeuge von Telelogic die fünf Phasen des objektorientierten Softwareentwurfs von Telekommunikationssystemen unter Verwendung von SDL unterstützt werden, d. h. Anforderungsanalyse, Systemanalyse, Systementwurf, Objektentwurf und Implementierung.

EK et al. (1997) – ANDERS EK, JENS GRABOWSKI, DIETER HOGREFE, RICHARD JEROME, BEAT KOCH und MICHAEL SCHMITT. *Towards the Industrial Use of Validation Techniques and Automatic Test Generation Methods for SDL Specifications*. In *Tagungsband des 8. SDL-Forums '97* (CAVALLI und SARMA, 1997), S. 245–259. Dieser Tagungsband kann unter

<http://www.elsevier.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 92.

In diesem Tagungsbeitrag wird ein Werkzeug vorgestellt, mit dessen Hilfe Abstrakte Test-Suiten (ATS) in TTCN-Notation halb- und vollautomatisch basierend auf SDL-Spezifikationen generiert werden können. Insbesondere wird auf das Problem der Explosion des Zustandsraums eingegangen.

ELLSBERGER et al. (1997) – JAN ELLSBERGER, DIETER HOGREFE und AMARDEO SARMA. *SDL - Formal Object-oriented Language for Communicating Systems*. Prentice-Hall, 1997, ISBN 0-13-621384-7. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.prenhall.com>. Zitat auf S. 87, 165.

Dieses Lehrbuch enthält eine umfassende Einführung in die formale Beschreibungssprache SDL. Insbesondere werden die 1992 hinzugefügten Sprachelemente für den objektorientierten Softwareentwurf und die Erweiterungen von 1996 anhand von Beispielen erläutert.

ETSI (1991) – TECHNISCHES KOMITEE RES 06 DES ETSI. *Scenarios for Comparison of Technical Proposals for MDTRS*. Working Document (91) 23, European Telecommunications Standards Institute, Juni 1991. Bestellt werden kann dieses Dokument unter <http://www.etsi.org>. Zitat auf S. 237.

In diesem Arbeitsdokument werden zehn verschiedene TETRA-Szenarien vorgestellt, die die Grundlage für den Vergleich von simulativen Untersuchungen bilden sollen. Es werden das erwartete Verkehrsaufkommen bei Sprache und Daten und weitere Schlüsselparameter wie Geländetyp, abgedeckte Fläche, Teilnehmerdichte, GoS, etc. aufgeführt.

EUROPEAN COMMUNITIES (1989) – COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Digital Land Mobile Radio Communications. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*, Bd. COST 207, 1989, ISBN 92-825-9946-9. Siehe auch <http://www.cordis.lu/cost>. Zitat auf S. 180.

Dieser technische Bericht umfasst die Ergebnisse des *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research* (COST) 207-Projektes: Definition der Eigenschaften frequenzselektiver Schwundprozesse, Messungen von Industrierauschen im 900 MHz-Bereich, Untersuchung von Modulationsmethoden für GSM, adaptive Basisbandentzerrungstechniken, Codes für Vorwärtsfehlerkorrektur und die Spezifizierung eines 13 kbit/s-Sprachcodecs.

EUROPEAN COMMUNITIES (1991) – COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1 800 MHz Bands. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*, Bd. COST 231 TD (91) 73, September 1991. Siehe

auch <http://www.cordis.lu/cost>. Zitat auf S. 147, 255.

In diesem Artikel werden empirisch hergeleitete Formeln für den Pfadverlust bei Signalausbreitung basierend auf Messungen in Stockholm vorgestellt. Diese Formeln gelten für den Frequenzbereich 900–1800 MHz und berücksichtigen Abschattungen durch Gebäude, Beugungen an Gebäudedächern, Streuung und Mehrwegeausbreitung.

FAHRMEIER et al. (1981) – LUDWIG FAHRMEIER, HEINZ KAUFMANN und FRIEDEMANN OST. *Stochastische Prozesse – Eine Einführung in Theorie und Anwendungen*. Carl-Hanser-Verlag, 1981, ISBN 3-446-131411-5. Dieses Buch kann unter <http://www.hanser.de> bestellt werden. Zitat auf S. 111.

Dieses Lehrbuch führt in die wichtigsten Teilgebiete der stochastischen Prozesse ein. Insbesondere werden Markoff-Ketten, diskrete Markoff-Prozesse, Erneuerungsprozesse, Semi-Markoff-Prozesse und stationäre und nicht stationäre Prozesse behandelt. Für die einzelnen Teilgebiete liegen Aufgaben mit Lösungen vor.

FRITCHMAN (1967) – BRUCE D. FRITCHMAN. *A Binary Channel Characterization Using Partitioned Markov Chains*. *IEEE Transactions on Information Theory*, Bd. IT-13, Nr. 2, S. 221–227, April 1967, ISSN 0018-9448. Bezogen werden kann dieser Artikel über <http://www.itsoc.org>. Zitat auf S. 185, 186, 323, 345.

In diesem Artikel charakterisiert FRITCHMAN binäre Kommunikationskanäle mit Hilfe von Markoff-Ketten mit N Zuständen, wobei k Zustände fehlerfreier und $N - k$ Zustände fehlerbehafteter Übertragung zugeordnet werden. Diese Erweiterung des GILBERT-Modells (1960) wird an Hand einiger Messungen verifiziert.

GERLICH (1998) – RAINER GERLICH. *EaSySim II SDL Extensions for Performance Simulation*. In *Tagungsband des „Workshop on Performance and Time in SDL and MSC ’98“* (MITSCHLE-THIEL et al., 1998), S. 41–50. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www7.informatik.uni-erlangen.de>. Zitat auf S. 93.

In diesem Tagungsbeitrag wird das Werkzeug EaSySim II zur Leistungsbewertung von SDL-Spezifikationen vorgestellt. Insbesondere wird über globale SDL-Prozeduren der Betriebsmittelverbrauch den diese Prozeduren verwendenden Prozessen angezeigt.

GILBERT (1960) – E. N. GILBERT. *Capacity of a Burst-Noise Channel*. *The Bell System Technical Journal*, Bd. 39, S. 1253–1265, September 1960, ISSN 0005-8580. Zitat auf S. 185, 323, 327.

In diesem Artikel stellt GILBERT ein Modell für einen durch büschelartiges Rauschen gestörten binären Kanal vor. Hierzu wird eine Markoff-Kette bestehend aus zwei Zuständen, einem Zustand für fehlerbehaftete und einem für fehlerfreie Übertragung, verwendet. Es werden Berechnungsvorschriften für die Zustands- und die Übergangswahrscheinlichkeiten sowie für die Kanalkapazität vorgelegt.

GOOSSENS et al. (1996) – MICHAEL GOOSSENS, FRANK MITTELBACH und ALEXANDER SAMARIN. *Der L^AT_EX-Begleiter*. Addison-Wesley, 1. Auflage, 1996, ISBN 3-89319-646-3. Dieses Buch kann unter <http://www.addison-wesley.de> bestellt werden.

Dieses Buch enthält eine vollständige Beschreibung aller Neuerungen von L^AT_EX 2_ε. Über 150 Erweiterungspakete für Tabellen, Graphiken, Gleitobjekte und höhere Mathematik werden beschrieben. Ferner werden detaillierte Informationen über die Verwendung von PostScript in L^AT_EX und von beliebigen Zeichensätzen mit dem neuen Auswahlmechanismus geliefert. Schließlich wird ausführlich erläutert, wie das Layout von Überschriften, Listen, Seiten, etc. gestaltet und Indizes und Literaturverzeichnisse erzeugt werden können.

GÖRG (1983) – CARMELITA GÖRG. *Warteraum M/G/1: Die SRPT-Optimalstrategie im Vergleich mit der Zeitscheibenstrategie unter Berücksichtigung der Verwaltungszeiten*. Fotodruck J. Mainz GmbH, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juli 1983. Diese Dissertation kann unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de> bestellt werden. Zitat auf S. 105.

In dieser Dissertation wird für den Warteraum M/G/1 eine neuartige Strategie SRPT/CV/CP definiert, in der eine Verwaltungszeit CV und ein Unterbrechungsabstand CP als Parameter vorgegeben werden können. Für diesen Warteraum werden die Formeln für den relativen Durchsatz bzw. die Belastung und die mittlere Durchlaufzeit hergeleitet. Anschließend wird diese Strategie mit den nicht-unterbrechenden Strategien FIFO und SPT und der unterbrechenden RR-Zeitscheibenstrategie verglichen und erhebliche Verbesserungen bei der mittleren Durchlaufzeit insbesondere bei stark streuenden Bediendauern, d. h. gemischten Datenströmen, nachgewiesen.

GÖRG (1997) – CARMELITA GÖRG. *Verkehrstheoretische Modelle und stochastische Simulationstechniken zur Leistungsanalyse von Kommunikationsnetzen*, Band 13 der *Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation (ABMT)*. Verlag der Augustinus Buchhandlung, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Juni 1997, ISBN 3-86073-622-1. Diese Habilitation kann unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de> bestellt werden. Zitat auf S. 149, 161.

In dieser Habilitation wird zuerst eine Übersicht über die Methoden der Leistungsbeurteilung, die zugehörige Modellbildung sowie über Kommunikationsnetze gegeben. Ferner werden implementierte Simulationssysteme, Verkehrsmodelle, Zufallsgeneratoren und statistische Auswertungsmethoden vorgestellt. Diese Techniken werden anhand von Beispielen erläutert. Nach einer Beschreibung allgemeiner Verfahren zur Simulationsbeschleunigung beschäftigt sich der Hauptteil der Habilitation mit einem neuen Verfahren, dem RESTART/LRE-Algorithmus, zur Behandlung seltener Ereignisse.

HAJEK und LOON (1982) – BRUCE HAJEK und TIMOTHY VAN LOON. *De-*

centralized Dynamic Control of a Multiaccess Broadcast Channel. IEEE Transactions on Automatic Control, Bd. AC-27, Nr. 3, S. 559–569, Juni 1982, ISSN 0018-9294. Dieser Artikel kann über <http://www.ieee.org> bezogen werden. Zitat auf S. 98.

In diesem Artikel werden Strategien vorgestellt, um Übertragungsversuche in einem S-ALOHA-System so zu wiederholen, dass das dynamische Verhalten der aus neuen und kollidierten Aufträgen resultierenden Verkehrslast von den Veränderungen des Auftragsüberhangs entkoppelt wird. Das Verhalten des Algorithmus „Stochastische Annäherung“ wird auch bei teilweise unvollständigem Sendeergebnis untersucht.

HAREL und GERY (1997) – DAVID HAREL und ERAN GERY. *Executable Object Modeling with Statecharts. IEEE Computer*, Bd. 30, Nr. 7, S. 31–42, Juli 1997. Bezogen werden kann dieser Artikel über <http://computer.org>. Zitat auf S. 90.

In diesem Artikel wird erläutert, wie Zustandsdiagramme als Teil der sich in der Entwicklung befindenden einheitlichen Modellsprache UML Systemverhalten beschreiben.

HAREL et al. (1990) – DAVID HAREL, HAGI LACHOVER, AMNON NAA-MAD, AMIR PNUELI, MICHAL POLITI, RIVI SHERMAN, AHARON SHTULL-TRAURING und MARK TRAKHTENBROT. *STATEMATE: A Working Environment for the Development of Complex Reactive Systems. IEEE Transactions on Software Engineering*, Bd. SE-16, Nr. 4, S. 403–414, April 1990, ISSN 0098-5589. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 90.

In diesem Artikel wird das STATEMATE-Werkzeug zur Spezifikation, Analyse, Entwurf und Dokumentation komplexer, reaktiver Systeme vorgestellt, wie z. B. eingebetteter Echtzeit-Systeme, Steuer- oder Telekommunikationssysteme.

HATA (1980) – MASA HARU HATA. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. VT-29, Nr. 3, S. 317–325, August 1980, ISSN 0018-9545. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 147, 171, 255.

In diesem Artikel werden empirisch hergeleitete Formeln für den Pfadverlust bei Signalausbreitung basierend auf der Feldstärkenvorhersagemethode von OKUMURA vorgestellt. Diese Formeln gelten für den Frequenzbereich 100–1500 MHz, 1–20 km Entfernung zwischen MS und BS, 30–200 m Antennenhöhe der BS und 1–10 m Antennenhöhe der MS.

HOGREFE (1989) – DIETER HOGREFE. *Estelle, LOTOS und SDL – Standard-Spezifikationssprachen für verteilte Systeme*. Springer-Verlag, 1989, ISBN 3-540-50477-X. Bestellt werden kann dieses Buch unter

<http://www.springer.de>. Zitat auf S. 87.

Dieses Buch gibt eine Einführung in die Spezifikationssprachen Estelle, LOTOS und SDL. Die Sprachen sind Standardsprachen der ISO (Estelle, LOTOS) und des ITU (SDL) zur Spezifikation von Diensten und Protokollen in Kommunikationssystemen. Das Buch stellt die drei Sprachen weitgehend anhand von durchgängigen Beispielen vor, bei denen es sich um Dienste und Protokolle handelt, die den OSI-Konzepten folgen. Das Besondere an dem Buch ist, dass durch die Verwendung identischer Beispiele die drei Sprachen direkt miteinander vergleichbar werden.

HOLZMANN (1991) – GERARD HOLZMANN. *Design and Validation of Computer Protocols*. Prentice-Hall Software Series. Prentice-Hall, 1991, ISBN 0-13-539925-4. Unter <http://www.prenhall.com> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 92.

Dieses Buch spricht im ersten Teil die typischen Probleme des Protokollentwurfs an und präsentiert zehn grundsätzliche Entwurfskriterien. Teil zwei beschreibt Spezifizierungs- und Modellierungstechniken für Protokolle und führt in ein Protokollvalidierungsmodell ein. In Teil drei wird ein Überblick über Methoden der Protokollsynthese, der Konformitätsüberprüfung und manueller und automatisierter Protokollvalidierungstechniken gegeben. Das Buch endet mit einer detaillierten Beschreibung von Werkzeugen für den Protokollentwurf.

INTEL (1994) – INTEL. *MCS 51 Microcontroller Family User's Manual*, Februar 1994. Bestellnr. 272383-002. Dieses Handbuch ist unter <http://www.intel.com> frei verfügbar. Zitat auf S. 148.

In diesem Benutzerhandbuch werden die Microcontroller der „MCS 51“-Familie vollständig beschrieben. Die Architektur, die einzelnen Komponenten und die Programmierung inkl. des gesamten Befehlssatzes werden umfassend erläutert.

ISO/IEC (1992) – ISO/IEC. *Tree and Tabular Combined Notation (TTCN)*. ISO-Standard 9646-3, International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 1992. Dieser Standard kann unter <http://www.iso.ch> bestellt werden. Zitat auf S. 91.

Dieser Standard definiert die Sprache TTCN, mit deren Hilfe Abstrakte Test-Suiten (ATS) insbesondere für OSI-konforme Protokollstapel spezifiziert werden.

ITU (1993a) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *ISDN User-Network Interfaces – Reference Configurations*. ITU-T-Empfehlung I.411, International Telecommunication Union, März 1993a. Dieses Dokument kann unter <http://www.itu.org> bestellt werden. Zitat auf S. 17.

In dieser Empfehlung werden Funktionen und Konfigurationen von ISDN-Netzabschlüssen (Network Termination, NT) und -Endgeräten (Terminal Equipment, TE) und die physikalische Realisierung dieser Referenzkonfigurationen beschrieben.

ITU (1993b) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *Message Sequence Chart (MSC)*. ITU-T-Empfehlung Z.120, International Telecommunication Union, März 1993b. Dieses Dokument kann unter <http://www.itu.org> bestellt werden. Zitat auf S. 88, 143, 165.

Diese Empfehlung entwickelt von der *ITU-T Study Group X* enthält die Definition der Syntax von MSCs in abstrakter, textueller und grafischer Beschreibung und sieht eine informale Beschreibung der MSC-Semantik vor.

ITU (1993c) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *Specification and Description Language (SDL)*. ITU-T-Empfehlung Z.100, International Telecommunication Union, März 1993c. Dieses Dokument kann unter <http://www.itu.org> bestellt werden. Zitat auf S. 87, 93, 165, 331.

Diese Empfehlung entwickelt von der *ITU-T Study Group X* enthält die vollständige Beschreibung der formalen Sprache SDL, insbesondere Benutzungsrichtlinien und eine formale Definition der SDL-Semantik.

ITU (1994) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *Abstract Syntax Notation One (ASN.1)*. ITU-T-Empfehlung X.680-X.699, International Telecommunication Union, Juli 1994. Dieses Dokument kann unter <http://www.itu.org> bestellt werden. Zitat auf S. 92, 331.

Diese Serie von Empfehlungen enthält die vollständige Definition der Standardnotation ASN.1 für Datentypen, ihren Werten und Randbedingungen und sieht eine Fülle von Beispielen und Hinweisen zur Benutzung dieser Notation vor.

ITU (1995) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *SDL Combined with ASN.1 (SDL/ASN.1)*. ITU-T-Empfehlung Z.105, International Telecommunication Union, März 1995. Dieses Dokument kann auch unter <http://www.itu.org> bestellt werden. Zitat auf S. 92.

Diese Empfehlung entwickelt von der *ITU-T Study Group X* enthält die Definition der Syntax für die kombinierte Verwendung von SDL ITU (1993c) und ASN.1 ITU (1994) in Form einer abstrakten und einer textuellen Grammatik und beschreibt exemplarisch die Benutzung.

ITU (1996) – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *One-Way Transmission Time – Transmission Systems and Media: General Recommendations on the Transmission Quality for an Entire International Telephone Connection*. ITU-T-Empfehlung G.114, International Telecommunication Union, Februar 1996. Bestellt werden kann dieses Dokument unter <http://www.itu.org>. Zitat auf S. 128.

Diese Empfehlung spezifiziert Toleranzgrenzen für Sprachübertragungszeiten. Diese werden in typische durch die Verarbeitung in Endgeräten bedingte und durch die

Signalübertragung und -ausbreitung bedingte Verzögerungen aufgeteilt.

JACOBSON et al. (1992) – IVAR JACOBSON, MAGNUS CHRISTERSON, PATRIK JONSSON und GUNNAR OVERGAARD. *Object-Oriented Software Engineering – A Use Case Driven Approach*. Addison-Wesley, 1992, ISBN 0-201-54435-0. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden. Zitat auf S. 88, 285.

JACOBSON beschreibt die von ihm entwickelte objektorientierte Softwareentwurfsmethodik OOSE. Insbesondere wird erläutert, wie Benutzungsfälle ausgehend von einer globalen Sicht des Systems zur Beschreibung desselben herangezogen werden können.

JAKES (1974) – WILLIAM C. JAKES. *Microwave Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 1974, ISBN 0-471-43720-4. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.wiley.com>. Zitat auf S. 170, 172, 178.

Im ersten Teil werden die mit der Signalausbreitung zusammenhängenden Effekte des Mobilfunkkanals erläutert. Neben Interferenzen in Folge von Mehrwegeausbreitungen werden die Langzeitveränderungen des statistisch gemittelten Signals und ferner Antennen und Polarisierungseffekte behandelt. Im zweiten Teil wird zuerst auf Modulationsverfahren, Kanalvielfachzugriff und Industrierauschen eingegangen. Daran schließen sich Betrachtungen über Diversitätstechniken, insbesondere der Raumdiversität, an. Danach werden Kriterien für den Entwurf und die Steuerung eines Mobilfunksystems vorgestellt.

JEONG und JEON (1995) – DONG GEUN JEONG und WHA SOOK JEON. *Performance of an Exponential Backoff Scheme for Slotted-ALOHA Protocol in Local Wireless Environment*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. VT-44, Nr. 3, S. 470–479, August 1995, ISSN 0018-9545. Dieser Artikel kann über <http://www.ieee.org> bezogen werden. Zitat auf S. 96, 97.

In diesem Artikel wird das Leistungsverhalten eines einfachen Kollisionsauflösungsalgorithmus in lokalen Netzen untersucht. Insbesondere wird das Verhalten des Durchsatzes und der Paketverzögerung in Volllast- und Unterlastsituation bewertet.

JUNG (1997) – PETER JUNG. *Analyse und Entwurf digitaler Mobilfunksysteme*. Reihe Informationstechnik. Teubner-Verlag, September 1997, ISBN 3-519-06190-2. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.teubner.de>. Zitat auf S. 173, 174.

In diesem Buch wird zu Beginn der Begriff des digitalen zellularen Mobilfunksystems definiert, indem Anforderungen und Architekturprinzipien angegeben werden. Danach werden die Eigenschaften des Mobilfunkkanals, insbesondere Frequenzselektivität und Zeitvarianz, behandelt. Nachdem anschließend die wesentlichen Grundlagen der Mobilfunkübertragung, u. a. verschiedene Diversitätstechniken und Vielfachzugriffsprinzipien, und empfangenseitige Verfahren zur Kanalschätzung und Prinzipien der adaptiven

kohärenten Datendetektion erörtert wurden, werden die neu erworbenen Erkenntnisse an konkreten Systembeispielen, d. h. GSM und UMTS, vertieft.

JUNIUS et al. (1998) – MARTIN JUNIUS, MARTIN STEPPLER, MICHAEL BÜTER und DIRK PESCH. *Communication Networks Class Library (CNCL)*. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Januar 1998. Die gesamte Klassenbibliothek inklusive Quelltexte und Dokumentation ist frei verfügbar unter <ftp://ftp.comnets.rwth-aachen.de/pub/comnets/CNCL>. Zitat auf S. 155, 159.

Dieses Handbuch beschreibt vollständig alle Klassen der CNCL einschließlich ihrer Methoden. Anwendungsbeispiele und weiterführende Hintergrundinformationen vertiefen das Verständnis.

KAMMEYER (1996) – KARL DIRK KAMMEYER. *Nachrichtenübertragung*. Reihe Informationstechnik. Teubner-Verlag, 2. Auflage, 1996, ISBN 3-519-16142-7. Unter <http://www.teubner.de> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 178.

Dieses Buch gliedert sich in vier Teile. Im ersten wird der Leser in die Theorie komplexer Signale und Systeme und die Eigenschaften von Übertragungskanälen, insbesondere Mobilfunkkanälen, eingeführt. Im zweiten Teil geht der Autor auf die analoge Basisbandübertragung, die Diskretisierung analoger Signale und die adaptive Entzerrung ein. Im dritten Teil stellt KAMMEYER analoge Modulationsformen und die Einflüsse linearer Verzerrungen vor. Im vierten Teil werden schließlich digitale Modulationsformen, die Viterbi-Entzerrung und Code-Multiplex-Systeme behandelt.

KERNER (1993) – HELMUT KERNER. *Rechnernetze nach OSI*. Addison-Wesley, 2. Auflage, 1993, ISBN 3-89319-632-3. Dieses Buch kann unter <http://www.addison-wesley.de> bestellt werden. Zitat auf S. 11.

Dieses Buch erläutert die grundlegenden Konzepte des OSI-Standards. Die vier Teile des Buches bestehen aus einer Einführung in die Architektur des OSI-Referenzmodells, einer Erläuterung der Protokolle der Transportschichten (1 bis 4), der anwendungsorientierten Schichten (5 bis 7) und schließlich von lokalen Netzen.

KERNIGHAN und RITCHIE (1989) – BRIAN KERNIGHAN und DENNIS RITCHIE. *C Programming Language*. Prentice-Hall, 1989, ISBN 0-13-110362-8. Dieses Buch kann unter <http://www.prenhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 93.

Dieses Buch beschreibt vollständig die Programmierung in der von dem ANSI standardisierten Sprache C. Alle Sprachkonstrukte werden von den Entwicklern von C anhand von Beispielen erläutert. Schließlich enthält das Buch eine komplette Beschreibung der Sprachsyntax.

KLEINROCK (1975) – LEONARD KLEINROCK. *Queueing Systems*, Band 1 u. 2. John Wiley & Sons, Januar 1975, ISBN 0-471-49110-1. Dieses Buch

kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 113, 123, 125.

Der erste Band dieses Standardlehrbuchs führt umfassend in die Theorie der Warteschlangen ein. Der zweite Band wendet diese Theorie auf prioritätsgesteuerte Warteschlangen und Reservierungszuteilungsalgorithmen an. Abschließend werden Flusssteuerungsmechanismen von Kommunikationsnetzen untersucht.

KLEINROCK und LAM (1975) – LEONARD KLEINROCK und SIMON SIN-SING LAM. *Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation*. *IEEE Transactions on Communications*, Bd. COM-23, Nr. 4, S. 410–423, April 1975, ISSN 0090-6778. Bezogen werden kann dieser Artikel über <http://www.comsoc.org>. Zitat auf S. 115.

In diesem Artikel formulieren die Autoren ein mathematisches Modell für S-ALOHA-Zufallszugriffsverfahren. Mit diesem Modell beschreiben sie das Stabilitätsverhalten von S-ALOHA und definieren ein Stabilitätsmaß. Numerische Ergebnisse werden präsentiert, die die Beziehung zwischen Stabilität, Durchsatz und Verzögerung darstellen.

KNIGHTSON (1993) – KEITH G. KNIGHTSON. *OSI Protocol Conformance Testing – IS 9646 Explained*. McGraw-Hill, 1993, ISBN 0-07-035134-1. Dieses Buch kann unter <http://www.mcgraw-hill.com> bestellt werden. Zitat auf S. 87, 91.

KNIGHTSON erläutert nach einer Einführung in die grundsätzlichen Prinzipien der Konformitätsüberprüfung die Konzepte des ISO-Standards *Interim Standard* (IS) 9646. Insbesondere geht er ausführlich darauf ein, wie Abstrakte Test-Suiten (ATS) in TTCN zu spezifizieren sind und wie Tests realisiert werden können.

KNUTH (1986) – DONALD E. KNUTH. *The T_EXbook*. Computers and Typesetting Series. Addison-Wesley, 1986, ISBN 0-201-13448-9. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden.

Dies ist die definitive Beschreibung des Satzsystems T_EX vom Autor des Systems selbst. Dieses Buch richtet sich sowohl an Einsteiger als auch an Experten und enthält grundlegende Informationen über den Satz von Dokumenten, Artikeln oder Büchern, die viele mathematische Zeichen und Formeln von hoher typographischer Qualität enthalten sollen.

KOPKA (1996) – HELMUT KOPKA. *L^AT_EX–Einführung*, Band 1. Addison-Wesley, 2. Auflage, 1996, ISBN 3-8273-1025-3. Dieses Buch kann unter <http://www.addison-wesley.de> bestellt werden.

Der erste Band dieses neugegliederten Werks soll den L^AT_EX-Anwender in die Lage versetzen, bereits nach kurzer Einarbeitungszeit eine Vielzahl von Textausgaben in Druckqualität erzeugen zu können. Dies gilt insbesondere für die Herstellung komplexer Tabellen und mathematischer Formeln. Auf die Neuerungen der derzeit gültigen Version 2_ε wird ausführlich eingegangen. Das Werk eignet sich nicht nur als Lehrbuch,

das Anfänger in L^AT_EX einführt, sondern auch als Nachschlagewerk, das geübtere Anwender bei der täglichen Arbeit begleitet.

KOSTAS et al. (1998) – THOMAS J. KOSTAS, MICHAEL S. BORELLA, IKHLAQ SIDHU, GUIDO M. SCHUSTER, JACEK GRABIEC und JERRY MAHLER. *Real-Time Voice over Packet-Switched Networks*. *IEEE Network*, Bd. 12, Nr. 1, S. 18–27, Januar/Februar 1998, ISSN 0890-8044. Dieser Artikel kann über <http://www.comsoc.org> bezogen werden. Zitat auf S. 128.

Am Beispiel des Internets wird in diesem Artikel erläutert, wie ein reines Paketdatennetz um einen Echtzeit-Sprachdienst erweitert werden kann. Insbesondere wird die Dienstgüte eines solchen Dienstes unter Berücksichtigung von Paketverzögerungen und -verlusten untersucht.

KRUSE (1993) – JÖRN KRUSE. *Lizenzierung und Wettbewerb im Mobilfunk*. Springer-Verlag, Oktober 1993, ISBN 3-540-56591-4. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.springer.de>. Zitat auf S. 10.

Der Mobilfunk, der in der Bundesrepublik besonders hohe Wachstumsraten aufweist, ist weiterhin ein stark regulierter Sektor. Das Buch analysiert, wie die Lizenzierungs- und Regulierungspraktiken im Mobilfunk ökonomisch zu bewerten und ob solche ordnungspolitisch überhaupt erforderlich sind. Der Kern des Problems besteht in der Art der Frequenzvergabe. Es wird deutlich gemacht, dass sich zahlreiche staatliche Interventionen erübrigen, wenn die Frequenzen über adäquate Auktionsverfahren vergeben werden. Die Studie zeigt, dass die Skaleneffekte und die Wettbewerbsprobleme enger Märkte im Mobilfunk gravierend sind. Andere Regulierungsziele, wie z. B. die regionale Flächendeckung (Infrastrukturauftrag), sind beim Mobilfunk weniger relevant bzw. ohne wettbewerbsbeschränkende Interventionen erreichbar.

LAM (1974) – SIMON SIN-SING LAM. *Packet Switching in a Multi-Access Broadcast Channel with Applications to Satellite Communication in a Computer Network*. Dissertation, University of California, Los Angeles, 1974. Zitat auf S. 115.

In dieser Dissertation formuliert der Autor ein mathematisches Modell für S-ALOHA-Zufallszugriffsverfahren. Mit diesem Modell beschreibt LAM das Leistungsverhalten stabiler und instabiler Kanäle in Bezug auf Durchsatz, Paketverzögerung und Stabilität. Abschließend stellt er optimale Steuer- und Schätzprozeduren für instabile Kanäle vor.

LAW und KELTON (1991) – AVERILL M. LAW und W. DAVID KELTON. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, 2. Auflage, Januar 1991, ISBN 0-07-100803-9. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.mcgraw-hill.com>. Zitat auf S. 150, 258.

Dieses Buch gibt einen umfassenden Überblick über alle wichtigen Aspekte einer sto-

chastischen, simulativen Untersuchung einschl. der Modellierung, verfügbarer Simulationssprachen, der Validierung und der statistischen Analyse der Ergebnisdaten.

LEE (1993) – WILLIAM C. Y. LEE. *Mobile Communications Design Fundamentals*. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. John Wiley & Sons, 2. Auflage, Januar 1993, ISBN 0-471-57446-5. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 174, 178.

Dieses Lehrbuch liefert die theoretischen Grundlagen für den Entwurf von Mobilfunksystemen. Nachdem die grundlegenden Begriffe einer Mobilfunkumgebung, wie z. B. Schwund, Pfadverlust, etc., definiert wurden, geht LEE genauer auf Vorhersagemodelle für den Pfadverlust, Methoden zur Berechnung und Reduzierung von Schwund ein und beschreibt Funkstörungen in Folge von Rauschen, Gleich- und Nachbarkanalstörungen. Danach werden Konzepte für eine Frequenzplanung und Entwurfsparameter auf Seiten der BS und der MS vorgestellt. Abschließend widmet sich der Autor Vielfachzugriffsverfahren, insbesondere *Code Division Multiple Access* (CDMA), und dem Entwurf von mikrozellularen Systemen.

LEE (1997) – WILLIAM C. Y. LEE. *Mobile Communications Engineering*. McGraw-Hill, 2. Auflage, Oktober 1997, ISBN 0-07-037103-2. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.mcgraw-hill.com>. Zitat auf S. 171, 182.

In diesem Buch stellt LEE alle für die Funkübertragung in Mobilfunksystemen relevanten Aspekte umfassend vor. Hierzu gehören die Themengebiete: Pfadverlustvorhersage, langsamer und schneller Schwund, Mehrwegeausbreitung und Laufzeitspreizung. Danach werden Modulationstechniken und Diversitätsverfahren behandelt. Abschließend analysiert der Autor das Systemleistungsverhalten im Falle von Gleichkanal- und Nachbarkanalstörungen.

LIN und COSTELLO (1983) – SHU LIN und DANIEL J. COSTELLO. *Error Control Coding – Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall Computer Applications in Electrical Engineering Series. Prentice-Hall, Februar 1983, ISBN 0-13-283796-X. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.prenhall.com>. Zitat auf S. 34, 35, 38.

Dieses Buch beschreibt detailliert lineare und zyklische Blockcodes, insbesondere BCH-Codes. Ferner werden Faltungscodes ausführlich erläutert. Fehlererkennung und Fehlerkorrektur bei büschelartigen Fehlern werden eingehend behandelt, ebenso *Automatic Repeat Request* (ARQ)-Strategien. Schließlich werden praktische Anwendungen von Block- und Faltungscodes vorgestellt.

LIU und FEHER (1989) – CHIA-LIANG LIU und KAMILO FEHER. *Noncoherent Detection of $\pi/4$ -QPSK Systems in a CCI-AWGN Combined Interference Environment*. In *1989 IEEE Vehicular Technology Conference*

(VTC), S. 83–94, 1989. Siehe auch <http://www.ieee.org>. Zitat auf S. 182.

In diesem Tagungsbeitrag wird das Leistungsverhalten von $\pi/4$ -Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)-Modems in einer Umgebung mit Gleichkanalstörungen und additivem, weissem gaußischem Rauschen untersucht. Es werden drei verschiedene nicht-kohärente, differentielle Empfangstechniken und Simulationsergebnisse in Bezug auf die zugehörigen BERs vorgestellt.

LIU und FEHER (1991) – CHIA-LIANG LIU und KAMILO FEHER. *Bit Error Rate Performance of $\pi/4$ -DQPSK in a Frequency-Selective Fast Rayleigh Fading Channel*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. VT-40, Nr. 3, S. 558–568, August 1991, ISSN 0018-9545. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 179, 183, 184.

In diesem Artikel wird die Bitfehlerhäufigkeit von $\pi/4$ -DQPSK-Modems analytisch berechnet. Das Übertragungssystem wird als ein frequenzselektiver Kanal mit schnellem Rayleigh-Schwund gestört durch additives, weißes gaußisches Rauschen und Gleichkanalstörungen modelliert. Der Rayleigh-Schwund wird über zwei unabhängige Signalfade nachgebildet. Als Ergebnis wird vorgestellt, dass für die 48 kbit/s - $\pi/4$ -DQPSK bei einer Frequenz von 850 MHz und $C/I < 20 \text{ dB}$ die BER von Gleichkanalstörungen dominiert wird, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit unter 100 Meilen pro Stunde liegt.

LÜKE (1995) – HANS-DIETER LÜKE. *Signalübertragung*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag, 6. Auflage, 1995, ISBN 3-540-58753-5. Dieses Buch kann unter <http://www.springer.de> bestellt werden. Zitat auf S. 179, 182.

Dieses Standardlehrbuch der Signalübertragung führt grundlegend in die Theorie digitaler und analoger Nachrichtenübertragungssysteme ein. Folgende Themen werden behandelt: Determinierte Signale in linearen zeitinvarianten Systemen, die Fourier-Transformation, diskrete Signale und Systeme, Korrelationsfunktionen determinierter Signale, die Systemtheorie der Tiefpass- und Bandpasssysteme, die statistische Signalbeschreibung und Modulationsverfahren.

LOFTUS et al. (1997) – CHRIS LOFTUS, EDEL SHERATT, EURICIO INOCÊNCIO und PAULA VIANNA. *The Unification of OMT, SDL and IDL for Service Creation*. In *Tagungsband des 8. SDL-Forums '97* (CAVALLI und SARMA, 1997), S. 443–458. Dieser Tagungsband kann unter <http://www.elsevier.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 91.

In diesem Tagungsbeitrag wird eine einheitliche Nutzung von OMT, SDL und CORBA-IDL vorgeschlagen. Hierbei wird OMT zur Analyse und zum Objektentwurf eingesetzt und SDL für die Definition von Dienstkomponenten, den detaillierten Signalaustausch und die Zeitinformationen. Im Objektmodell werden Dienstdateneinheiten und Beziehungen zwischen Objekten in IDL beschrieben. IDL-Operationen werden auf SDL-Prozeduren abgebildet unter Berücksichtigung der Tatsache, dass SDL 96 noch keine Ausnahmefehlerbehandlung vorsieht.

MARTEN (1998 bzw. 1999) – MICHAEL MARTEN. *BOS-Funk – Handbuch*

für den Funkdienst bei den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in Deutschland, Band 1 u. 2. Siebel-Verlag, 4. bzw. 6. Auflage, 1998 bzw. 1999, ISBN 3-89632-031-9 bzw. 3-89632-032-7. Bestellt werden können diese Bücher unter <http://www.siebel-verlag.de>. Zitat auf S. 10.

Band 1 informiert gründlich und verständlich über alle Grundlagen des BOS-Funks. Die verschiedenen Anwender, ihre Funkausrüstung und ihre Funkbetriebstechnik werden detailliert vorgestellt. Der technische Aufbau und die Funktion der Funknetze werden ausführlich erläutert. Band 2 beinhaltet ausschließlich Tabellen und Landkarten. Hier findet man alle aktuellen Frequenz-Kanal-Listen und Funkrufnamen der BOS geordnet nach Diensten (Feuerwehr, Polizei, etc.) und nach Bundesländern, Regierungspräsidien, Landkreisen und Städten.

MATHWORKS INC (1997) – THE MATHWORKS INC. *The Student Edition of MATLAB – Version 5, User's Guide*. MATLAB Curriculum Series. Prentice-Hall, 1997, ISBN 0-13-272550-9. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.prenhall.com>.

Dieses Buch liefert eine vollständige Beschreibung der Mathematikumgebung MATLAB. Insbesondere werden über 500 mathematische, ingenieur- und naturwissenschaftliche Funktionen beschrieben. Ferner werden die Steuersprache zusammen mit ihren Datenstrukturen und die Methoden zur Visualisierung von Ergebnissen umfassend behandelt.

MEYR und ASCHEID (1990) – HEINRICH MEYR und GERD ASCHEID. *Digital Communication Receivers – Phase-, Frequency-Locked Loops, and Amplitude Control*, Band 1. John Wiley & Sons, März 1990, ISBN 0-471-50193-X. Unter <http://www.wiley.com> kann dieses Buch bestellt werden.

In diesem Buch werden nicht nur die Grundlagen der Phasen-, Frequenz- und Amplitudenregelung, sondern auch fortgeschrittene Themen wie z. B. die nichtlineare Theorie der Synchronisierung erläutert.

MEYR et al. (1997) – HEINRICH MEYR, MARC MOENECLAËY und STEFAN A. FECHTER. *Digital Communication Receivers – Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing*, Band 2. John Wiley & Sons, Oktober 1997, ISBN 0-471-50275-8. Unter <http://www.wiley.com> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 182.

Dieses Buch behandelt umfassend die theoretischen und praktischen Aspekte der Synchronisierung und der Kanalschätzung aus Sicht der digitalen Signalverarbeitung. Es werden verschiedene Klassen von Übertragungskanälen berücksichtigt: Basisbandübertragung über drahtgebundene oder Glasfasernetze und Bandpassübertragung über Satelliten- oder terrestrische Funkstrecken. Besonderes Augenmerk wird auf die Übertragung über schwundbehaftete Funkkanäle gelegt.

MITCHELL et al. (1997) – JOAN L. MITCHELL, WILLIAM B. PENNEBAKER, CHAD E. FOGG und DIDIER J. LE GALL, Hrsg. *MPEG Video Compression Standard*. Digital Multimedia Standards Series. Chapman and Hall, 1997, ISBN 0-201-54435-0. Dieses Buch kann unter <http://www.chapmanhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 143.

In diesem Buch wird der ISO-Standard IS 11172-2, auch bekannt als *Moving Picture Experts Group* (MPEG) 1, umfassend behandelt. Schwerpunkt bildet hierbei die Videobildkomprimierung. Die Komprimierung von Audiodaten wird gestrichen. Ferner bietet das Buch einen Überblick über die Hauptmerkmale von MPEG 2.

MITSCHELE-THIEL (2001) – ANDREAS MITSCHELE-THIEL. *Systems Engineering with SDL – Developing Performance-Critical Communication Systems*. John Wiley & Sons, Februar 2001, ISBN 0-471-49875-0. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 91.

Dieses Buch schlägt erfahrungsbasierte Lösungen vor, um das Leistungsverhalten komplexer Kommunikationssysteme während der Spezifikation, des Entwurfs und der Implementierung mit SDL zu untersuchen. Ferner werden der komplexe Entwurfsprozess mit Hilfe von SDL, Strategien zur effizienten Implementierung von SDL-Beschreibungen und die neueste Version des SDL-Standards, SDL-2000, vorgestellt.

MITSCHELE-THIEL et al. (1998) – ANDREAS MITSCHELE-THIEL, BRUNO MÜLLER-CLOSTERMANN und RICK REED, Hrsg. *Tagungsband des „Workshop on Performance and Time in SDL and MSC ’98“*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Informatik VII, 17.-19. Februar 1998. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www7.informatik.uni-erlangen.de>. Zitat auf S. 327, 339, 343, 349.

Schwerpunkt dieser Konferenz war die Integration von Leistungsbewertung und Zeit in SDL und MSC. Hierzu wurden SDL- und MSC-basierte Erweiterungen vorgeschlagen. Ferner wurden neue Techniken und Werkzeuge für die Leistungsbewertung formal spezifizierter Kommunikationssysteme vorgestellt.

MÜLLER-CLOSTERMANN und DIEFENBRUCH (1998) – BRUNO MÜLLER-CLOSTERMANN und MARC DIEFENBRUCH. *Queueing SDL: A Language for the Functional and Quantitative Specification of Distributed Systems*. In *Tagungsband des „Workshop on Performance and Time in SDL and MSC ’98“* (**MITSCHELE-THIEL et al., 1998**), S. 17–35. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www7.informatik.uni-erlangen.de>. Zitat auf S. 93.

In diesem Tagungsbeitrag wird eine Erweiterung der Beschreibungssprache SDL vorgestellt: Queueing-SDL. Diese Erweiterung erlaubt, SDL-Spezifikationen um Beschreibungen von leistungsbezogenen Aspekten, d. h. Zeit, Betriebsmittel und Verkehrslast, zu ergänzen. Das Ziel von Queueing-SDL ist die Leistungsbewertung und die zeitliche

Verifikation von komplexen, verteilten System während der Entwurfsphase.

OLSEN et al. (1994) – ANDERS OLSEN, OVE FÆRGEMAND, BIRGER MØLLER-PEDERSEN, RICK REED und J.R.W. SMITH. *Systems Engineering Using SDL-92*. Elsevier Science Publishers, 1994, ISBN 0-444-89872-7. Dieses Buch kann unter <http://www.elsevier.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 87, 165.

In diesem Buch wird neben einer vollständigen Darstellung aller SDL-Sprachelemente insbesondere auf die Methodik eingegangen, wie Telekommunikationssysteme unter Verwendung von SDL entworfen werden können. Zu diesem Zweck wird beschrieben, wie Systeme strukturiert und in Teilkomponenten zerlegt werden können, wobei Wiederverwendungsaspekte und vordefinierte Datentypen berücksichtigt werden. Schließlich wird erläutert, auf welche Weise andere Sprachen zusammen mit SDL verwendet werden können.

PAPOULIS (1991) – ATHANASIOS PAPOULIS. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 3. Auflage, Februar 1991, ISBN 0-07-048477-5. Dieses Buch kann unter <http://www.mcgraw-hill.com> bestellt werden. Zitat auf S. 111.

Dieses Standardlehrbuch führt in grundlegende Konzepte stochastischer Prozesse und typischer Sequenzen von Zufallsvariablen ein und erläutert in besonderem Maße realistische Methoden der spektralen Analyse.

PARSONS (1992) – JOHN DAVID PARSONS. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, 1992, ISBN 0-7273-1316-9. Zitat auf S. 178.

PARSONS legt einen umfassenden Überblick über die Funkausbreitung von Mobilfunkkanälen vor. Folgende Themen werden behandelt: Funkausbreitung in unebenem Gelände und in bebauten Gebieten, Mehrwegeausbreitung, Eigenschaften von Breitbandkanälen, Messtechniken, Industrierauschen und Interferenzen aufgrund eines oder mehrerer Störer.

PAXSON (1994) – VERN PAXSON. *Empirically-Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 2, Nr. 4, S. 316–336, August 1994, ISSN 1063-6692. Dieser Artikel ist frei verfügbar unter <ftp://ftp.ee.lbl.gov/papers/WAN-TCP-models.ps.Z>. Zitat auf S. 144.

In diesem Artikel werden drei Mio. TCP-Verbindungen in fünfzehn Weitverkehrsmessungen untersucht. Es werden analytische Modelle für die typische Verkehrslast von Telnet-, SMTP-, *Network News Transfer Protocol* (NNTP)- und FTP-Verbindungen vorgestellt.

PERNSTEINER (1992) – PETER PERNSTEINER. *Bündelfunk in Deutschland - Neue Wege für die betriebliche Kommunikation*. Franzis-Verlag, 1992,

ISBN 3-7723-4461-5. Dieses Buch kann unter <http://www.franzis.de> bestellt werden. Zitat auf S. 10.

Dieses Buch bietet einen Überblick über die Leistungsmerkmale des Bündelfunks im Allgemeinen und in Deutschland betriebener öffentlicher Bündelfunknetze der Telekom und öffentlicher und privater Bündelfunknetze privater Netzbetreiber im Besonderen.

POSTEL (1982) – JONATHAN B. POSTEL. *Simple Mail Transfer Protocol*. Network Working Group, Request For Comments (RFC) 821, August 1982. Dieses Dokument ist unter <http://www.rfc-editor.org> frei verfügbar. Zitat auf S. 143.

Dieser Internet-Standard definiert das Kommunikationsprotokoll für den Austausch elektronischer Post unabhängig von dem unterliegenden Übertragungssystem.

POSTEL und REYNOLDS (1983) – JONATHAN B. POSTEL und J. REYNOLDS. *Telnet Protocol Specification*. Network Working Group, Request For Comments (RFC) 854, Mai 1983. Unter <http://www.rfc-editor.org> ist dieses frei verfügbar. Zitat auf S. 143.

Dieser Internet-Standard definiert ein bidirektionales Kommunikationsprotokoll, um eine Schnittstelle zwischen Endgeräten und zugehörigen Betriebssystemprozessen zum Austausch von Befehlen und Daten in einem verteilten Netz zu schaffen.

POSTEL und REYNOLDS (1985) – JONATHAN B. POSTEL und J. REYNOLDS. *File Transfer Protocol (FTP)*. Network Working Group, Request For Comments (RFC) 959, Oktober 1985. Unter <http://www.rfc-editor.org> ist dieses frei verfügbar. Zitat auf S. 143.

Dieser Internet-Standard definiert ein bidirektionales Kommunikationsprotokoll, um Computerprogramme und Daten zwischen entfernten Rechnern zuverlässig und effizient auszutauschen.

PRESS et al. (1994) – WILLIAM H. PRESS, SAUL A. TEUKOLSKY, WILLIAM T. VETTERLING und BRIAN P. FLANNERY. *Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2. Auflage, 1994, ISBN 0-521-43108-5. Eine Online-Version dieses Buches ist unter <http://www.nr.com> frei verfügbar.

Dieses Standardlehrbuch stellt umfassend Algorithmen für numerische Problemstellungen zusammen mit deren kommentierten C-Quelltexten dar. Folgende Themen werden behandelt: Lösung linearer Gleichungssysteme, Inter- und Extrapolation, Integration, Funktionsapproximation, Berechnung spezieller Funktionen, Zufallszahlen, Sortieren, Wurzelziehen und nichtlineare Gleichungssysteme, Minimierung und Maximierung von Funktionen, Eigenwertsysteme, schnelle Fouriertransformation, statistische Beschreibung von Daten, gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen.

PROAKIS (1995) – JOHN G. PROAKIS. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 3. Auflage, Februar 1995, ISBN 0-07-051726-6. Dieses Buch kann unter <http://www.mcgraw-hill.com> bestellt werden. Zitat auf S. 10, 29, 183.

Dieses Standardwerk beschreibt umfassend die Analyse und den Entwurf von digitalen Kommunikationssystemen. Zu Beginn wird der Leser in die Wahrscheinlichkeitsrechnung, vor allem in die der stochastischen Prozesse, eingeführt. Ferner werden typische Kanalmodelle, Signal und Systeme klassifiziert. Anschließend werden digitale Modulationstechniken, Kanal- und Quellcodierung, zeitdispersive Signale, Kanalverzerrung, Mehrbenutzerkommunikation und Kanäle mit Mehrwegeausbreitung ausführlich behandelt.

RAPPAPORT (1995) – THEODORE S. RAPPAPORT. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice-Hall, Oktober 1995, ISBN 0-13-375536-3. Unter <http://www.prenhall.com> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 172.

In diesem Standardlehrbuch wird nach einer Einführung in fundamentale Entwurfskriterien von zellularen Mobilfunksystemen besonders auf die Signalausbreitung von Mobilfunksignalen in Bezug auf Pfadverlust und Schwund eingegangen. Danach werden Modulationstechniken, Entzerrung, Diversität, Kanal- und Sprachcodierung erläutert. Ferner wird der Leser in Vielfachzugriffsverfahren und Vernetzungstechniken eingeführt. Abschließend werden die Eigenschaften einer großen Anzahl von Mobilfunkstandards und -systemen, insbesondere von *American Mobile Phone Service* (AMPS), GSM, IS-95, DECT und *Pacific Digital Cellular* (PDC), umfassend beschrieben.

RATIONAL (1998a) – RATIONAL SOFTWARE CORPORATION. *ClearCase – User's Manual*, 1998a. Unter <http://www.rational.com> ist eine Demoversion von *ClearCase* verfügbar. Zitat auf S. 162.

Dieses Handbuch bietet einen breitgefächerten Überblick über das Zusammenspiel der Komponenten von *ClearCase*. Zusammen mit den Handbüchern *Concepts Manual* und *Reference Manual* liegen eine Einführung für Anfänger und ein Nachschlagewerk für erfahrene Benutzer vor.

RATIONAL (1998b) – RATIONAL SOFTWARE CORPORATION. *Purify – User's Guide*, 1998b. Unter <http://www.rational.com> ist eine Demoversion von *Purify* verfügbar. Zitat auf S. 162.

Dieses Handbuch beschreibt vollständig die Arbeitsweise von Software-Werkzeuges Purify zur automatisierten Software-Qualitätssicherung, die Bedeutung der angezeigten Laufzeitfehler und die Anpassungs- und Erweiterungsmöglichkeiten sowohl der graphischen Benutzer- als auch der Anwendungsprogrammierschnittstelle von Purify.

RICHTER (1992) – MANFRED RICHTER. *Ein Rauschgenerator zur Gewinnung quasi-idealer Zufallszahlen für die stochastische Simulation*. Reihe Mathematik. Verlag Dr. Chaled Shaker, RWTH Aachen, Lehrstuhl

für Kommunikationsnetze, 1992, ISBN 3-86111-205-1. Diese Dissertation kann unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de> bestellt werden. Zitat auf S. 156, 249.

Nach einem Überblick über Generatoren für gleichverteilten Zufall wird im Hauptteil dieser Dissertation ein Tabellengenerator vorgestellt, der seine Zufallszahlen aus einer Rauschquelle ableitet.

RIVEST (1987) – RONALD L. RIVEST. *Network Control by Bayesian Broadcast*. *IEEE Transactions on Information Theory*, Bd. IT-33, Nr. 3, S. 323–328, Mai 1987, ISSN 0018-9448. Dieser Artikel kann über <http://www.itsoc.org> bezogen werden. Zitat auf S. 99.

In diesem Artikel beschreibt RIVEST den Algorithmus „Pseudo-Bayes“ zur Auflösung von Kollisionen. Die Anzahl der sendewilligen Teilnehmer wird in diesem Verfahren abgeschätzt. Eine Parameterwahl wird vorgestellt, um die Paketverzögerung und den Durchsatz zu optimieren und das S-ALOHA-Verfahren zu stabilisieren.

ROSE (1995) – OLIVER ROSE. *Simple and Efficient Models for Variable Bit Rate MPEG Video Traffic*. Technischer Bericht 120, Lehrstuhl für Verteilte Systeme (Informatik III), Universität Würzburg, Juli 1995. Dieses Dokument ist frei verfügbar unter <http://www-info3.informatik.uni-wuerzburg.de/TR/tr120.ps.gz>. Zitat auf S. 145.

In diesem Bericht werden zur Leistungsbewertung eines ATM-Netzes, in dem VBR-MPEG-Videosequenzen übertragen werden, Videoverkehrsmodelle vorgestellt. Diese Modelle basieren auf mit typischen Videosequenzen parametrisierten und die Korrelationseigenschaften dieser Sequenzen berücksichtigenden Markoff-Ketten.

ROTHENBACHER et al. (1996) – JOCHEN ROTHENBACHER, MARKUS BREITBACH und MARTIN BOSSERT. *Simulative Untersuchung zur Erkennung von Kollisionen auf einem Vielfachzugriffskanal*. Studienarbeit, Universität Ulm, Abt. Informationstechnik, April 1996.

Zur Messung der aktuellen Verkehrslast steht bei ALOHA-Kanälen i. d. R. nur die Information zur Verfügung, ob der aktuelle Zeitschlitz leer war, eine erfolgreiche Übertragung stattfand oder ob sich eine Kollision ereignete. Zeitvariante Funkkanäle erschweren solche Messungen, so dass u. U. leere Zeitslitze für Kollisionen gehalten werden oder umgekehrt. In dieser Studienarbeit werden die Wahrscheinlichkeiten bestimmt, mit welchen diese Verwechslungen bei TETRA-Empfängern auftreten.

ROUX (1998) – JEAN-LUC ROUX. *SDL Performance Analysis with Object-GEODE*. In *Tagungsband des „Workshop on Performance and Time in SDL and MSC '98“* (MITSCHELE-THIEL et al., 1998), S. 36–40. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www7.informatik.uni-er->

langen.de. Zitat auf S. 93.

In diesem Tagungsbeitrag wird eine Erweiterung des SDL-Werkzeuges ObjectGEO-DE in Bezug auf die Leistungsbewertung von Kommunikationsprotokollen vorgestellt. ROUX schlägt hierzu Erweiterungen in Form von Kommentaren vor, um den Betriebsmittelverbrauch abzuschätzen.

RUMBAUGH et al. (1991) – JAMES RUMBAUGH, MICHAEL BLAHA, WILLIAM PREMERLANI, FREDERICK EDDY und WILLIAM LORENSEN. *Object-Oriented Modeling and Design*. Prentice-Hall, 1991, ISBN 0-13-629841-9. Dieses Buch kann unter <http://www.prenhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 88, 285.

RUMBAUGH stellt eine grafische Notation und eine Methodik für den objektorientierten Softwareentwurf unabhängig von einer Programmiersprache vor. Anhand von Fallstudien objektorientierter, industrieller Anwendungen wird diese neue Methodik beschrieben.

SCHMICKLER (1991) – LEONHARD GERHARD SCHMICKLER. *Einsatzmöglichkeiten der Optimalstrategie SRPT in lokalen Rechnernetzen*. Verlag der Augustinus Buchhandlung, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Januar 1991. Bestellt werden kann diese Dissertation unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de>. Zitat auf S. 105.

In dieser Dissertation wird die praktische Bedeutung der SRPT- bzw. der SRPT/RR-Strategie in lokalen Rechnernetzen mit unterschiedlichen Kanalzugriffsverfahren untersucht. Hierbei werden Verkehrsmodelle verwendet, die Endgeräteverkehr, Dateiübertragungen und Funkrufe berücksichtigen. Es wird gezeigt, dass die Sortierung der Nachrichten in den Warteschlangen und ihre Übertragung auf dem Netz mit längenabhängiger Prioritätenvergabe eine erhebliche Reduktion der mittleren Durchlaufzeit um einen Faktor bis zu 40 gegenüber der FIFO-Abfertigung bringt.

SCHREIBER (1988) – FRIEDRICH SCHREIBER. *Effective Control of Simulation Runs by a New Evaluation Algorithm for Correlated Random Sequences*. *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik (AEÜ)*, Bd. 42, Nr. 6, S. 347–354, November 1988, ISSN 0001-1096. Zitat auf S. 149, 258.

SCHREIBER stellt einen neuen Algorithmus vor, der die Analyse von korrelierten Zufallssequenzen zwecks Gewinnung der stationären Verteilungsfunktion durchführt. Dieser Algorithmus eignet sich zur Kontrolle der bei einer Simulation erforderlichen Versuchszahl mittels einer Formel, die von dem gewünschten Minimalwert der Verteilungsfunktion, von der oberen Grenze des relativen Fehlers und von dem gemessenen mittleren Korrelationskoeffizienten abhängt. Anhand ausgesuchter Beispiele wird gezeigt, dass dieser Algorithmus beliebige korrelierte Sequenzen vom diskreten und bzw. oder kontinuierlichen Typ verarbeiten kann, seltene Ereignisse der Verteilungsfunktion aufdeckt und daher die konventionelle Batch-Means-Methode und andere Methoden ersetzen kann.

SCHREIBER und GÖRG (1996) – FRIEDRICH SCHREIBER und CARMELITA GÖRG. *Stochastic Simulation: A Simplified LRE-Algorithm for Discrete Random Sequences*. *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik (AEÜ)*, Bd. 50, Nr. 4, S. 233–239, Juli 1996, ISSN 0001-1096. Zitat auf S. 149, 258.

Der LRE-Algorithmus III für die statistische Auswertung diskreter Zufallssequenzen liefert die stationäre Verteilungsfunktion und den sog. lokalen Korrelationskoeffizienten, der in ein mittleres quadratisches Fehlermaß zur Steuerung der Simulationslaufzeit eingeht. Indem dieses Fehlermaß anstelle von Konfidenzintervallen verwendet und die Korrelation gemessen wird, ohne zu versuchen, sie zu entfernen, werden die Nachteile der weitverbreiteten Batch-Means-Auswertemethode überwunden.

SEMMAR et al. (1991) – ASSIA SEMMAR, MICHEL LECOURS, JEAN-YVES CHOUINARD und JOHN AHERN. *Characterization of Error Sequences in UHF Digital Mobile Radio Channels*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. VT-40, Nr. 4, S. 769–776, November 1991, ISSN 0018-9545. Dieser Artikel kann über <http://computer.org> bezogen werden. Zitat auf S. 186.

In diesem Artikel werden zur statistischen Charakterisierung der Übertragungsfehler einer Mobilfunkverbindung bei 910 MHz Fehlersequenzen für Nachrichten von 2 s Dauer bei einer Übertragungsrate von 20 kbit/s bzw. 40 kbit/s und einem Kanalaraster von 19,53 kHz im Falle einer *Binary Phase Shift Keying* (BPSK)- bzw. QPSK-Modulation experimentell ermittelt. Hierbei werden FRITCHMAN-Modelle (1967) mit einem Zustand für fehlerhafte Übertragung und zwei bis vier für fehlerfreie entsprechend den Messungen parametrisiert.

SIEBERT und STEPPLER (2001) – MATTHIAS SIEBERT und MARTIN STEPPLER. *Software Engineering in the face of 3/4G Mobile Communication Systems*. In *Tagungsband des 10th ASST 2001* (WALKE, 2001c), S. 89–94. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar.

In diesem Tagungsbeitrag werden der Software-Entwicklungsprozess im Allgemeinen unter Verweis auf die CASE-Umgebung SPEET und die Methoden des Entwurfs generischer und adaptiver Protokoll-Software (*Design of Generic and Adaptive Protocol Software*, DGAPS) im Besonderen vorgestellt.

SIEGEL (1996) – JON SIEGEL. *CORBA Fundamentals and Programming*. John Wiley & Sons, 1996, ISBN 0-471-12148-7. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 91.

Dieses Lehrbuch behandelt zuerst objektorientierte Analyse- und Entwurfsmethoden, vergleicht danach verfügbare Objektanforderungsmakler (*Object Request Broker*) und sieht schließlich ein vollständiges Beispiel für die Kommunikation zwischen einem Benutzer und einem Objekt vor. Komplexere Beispiele mit kaskadierten Objektaufrufen, Vererbung und der Nutzung verschiedener Objektdienste schließen sich an.

SIEGMUND (1996) – GERD SIEGMUND. *Technik der Netze*. R. v. Decker's Verlag, 3. Auflage, 1996, ISBN 3-7685-2495-7. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.huethig.de>. Zitat auf S. 66.

Dieses Buch gibt in verständlicher Form eine umfassende Darstellung der Technik der verschiedensten Kommunikationsnetze, vom analogen Telefonnetz über Euro-ISDN bis hin zu ATM-*Local Area Network* (LAN)-Netzen. Neben den technischen Grundlagen wird ausführlich auf Signalisierungsverfahren, Protokolle und Implementierungen eingegangen. Weitere Schwerpunkte der Darstellung sind die Themen ISDN und Breitband-ISDN, basierend auf ATM-Technik. Zahlreiche Übungen mit Lösungen vertiefen die Erläuterungen.

SIEMENS (1990) – SIEMENS AG, Balanstraße 73, D-81541 München. *Microcomputer Components: SAB 80C166/83C166 – 16-Bit CMOS Single-Chip Microcontrollers for Embedded Control Applications*, 1990. Edition 6.90. Dieses Handbuch kann unter <http://www.siemens.de/semiconductor> bestellt werden. Zitat auf S. 148.

In diesem Benutzerhandbuch werden die Microcontroller der „Siemens SAB 80C166“-Familie vollständig beschrieben. Die Architektur, die einzelnen Komponenten und die Programmierung inkl. des gesamten Befehlssatzes werden umfassend erläutert.

SIEVERING et al. (2001) – PETER SIEVERING, MARTIN STEPPLER und DIRK KUYPERS. *Traffic Performance Evaluation of TETRA and TETRAPOL*. In *Tagungsband des 10th ASST 2001* (WALKE, 2001c), S. 183–188. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar.

In diesem Tagungsbeitrag wird ein neues Konzept vorgestellt, um Bündelfunksysteme miteinander zu vergleichen. Basierend auf diesem Konzept werden die beiden Standards TETRA V+D und TETRAPOL in einem ebenfalls vorgestellten Hochlast-Szenarium miteinander verglichen.

SILBERSCHATZ et al. (1998) – ABRAHAM SILBERSCHATZ, PETER GALVIN und JAMES PETERON. *Operating System Concepts*. Computing Series. Addison-Wesley, 1998, ISBN 0-201-59113-8. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden. Zitat auf S. 105.

Dieses Buch gibt in sieben Kapiteln einen grundsätzlichen Überblick über die Eigenschaften von Betriebssystemen: Überblick über Computersystem- und Betriebssystemstrukturen, Prozessverwaltung, Speicherverwaltung, Ein- und Ausgabesysteme, verteilte Systeme, Sicherheit und abschließend Fallstudien der Betriebssysteme Solaris, Linux und Windows/NT.

SKLAR (1988) – BERNARD SKLAR. *Digital Communications – Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall, 1988, ISBN 0-13-211939-0. Dieses Buch kann unter <http://www.prenhall.com> bestellt werden. Zitat auf S. 34, 35,

254.

Dieses Buch gibt einen umfassenden Überblick über digitale Kommunikationssysteme, wobei folgende einzelne Schritte grundlegend erläutert werden: Quellkodierung, Verschlüsselung, Kanalkodierung, Multiplexen, Modulation, Frequenzspreizung, Synchronisation und Vielfachzugriff.

SMITH (1990) – CONNIE U. SMITH. *Performance Engineering of Software Systems*. The SEI Series in Software Engineering. Addison-Wesley, 1990, ISBN 0-201-53769-9. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden.

In diesem Buch werden *Software Performance Engineering* (SPE)-Werkzeuge und SPE-Methoden vorgestellt. Neben den grundlegenden Faktoren, die das Leistungsverhalten eines Systems beeinflussen, werden Hauptentwurfskriterien vorgestellt. SMITH beschreibt praktische Strategien, wie Messwerte erfasst und validiert werden können. Insbesondere wird auf Mess- und Instrumentierungstechniken hingewiesen, um Flaschenhälse zu identifizieren und quantitative Aussagen zur Bewertung von Entwurfsalternativen zu erhalten. Vielfältige Beispiele und Fallstudien illustrieren diese Techniken für unterschiedlichste Software-Systeme, die von Anwendungs- über Datenverwaltungs- zu Betriebssystemen reichen.

SMITH et al. (1998) – CONNIE U. SMITH, PAUL CLEMENTS und MURRAY WOODSIDE, Hrsg. *Tagungsband des „First International Workshop on Simulation and Performance ’98“*, Sante Fe, Neu-Mexiko, USA, 12.-16. Oktober 1998. The Association for Computing Machinery (ACM), ISBN 1-58113-060-0. Dieser Tagungsband kann unter <http://www.acm.org> bestellt werden (Bestellnummer: 488983). Zitat auf S. 348.

Schwerpunkte dieses Workshops waren Fallstudien und Methodiken für Leistungsbeurteilungen von Softwaresystemen, die Leistungsbewertung von Softwarearchitekturen und die Leistungsbewertung mit Hilfe von Verkehrslastmessungen.

SORBARA (1995) – DAVIDE SORBARA. *TETRASIM: A Simulation Software Package for Analyzing the TETRA Receiver Performance*. In *1995 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, S. 509–513, 1995. Siehe auch <http://www.ieee.org>. Zitat auf S. 169.

In diesem Tagungsbeitrag wird das Simulationswerkzeug TETRASIM vorgestellt, mit dessen Hilfe die Bitfehlerverhältnisse (BER) einiger TETRA-Verkehrskanäle simulativ ermittelt werden können. Ergebnisse liegen für das BER in Abhängigkeit vom Signal-, Gleichkanal- und Nachbarkanalstörabstand für die Verkehrskanäle TCH/7.2 und TCH/4.8 vor.

STEEDMAN (1993) – DOUGLAS STEEDMAN. *Abstract Syntax Notation One (ASN.1): The Tutorial and Reference*. Technology Appraisals, 1993, ISBN 1-871802-06-7. Unter <http://www.techapps.co.uk> kann dieses Buch

bestellt werden. Zitat auf S. 92.

Dieses Buch besteht aus zwei Teilen: Im ersten Teil werden alle Eigenschaften von ASN.1 anhand von Beispielen erläutert. Der zweite Teil beinhaltet eine vollständige Spezifikation der Syntax von ASN.1.

STEELE und HANZO (1999) – RAYMOND STEELE und LAJOS HANZO, Hrsg. *Mobile Radio Communications — Second and Third Generation Cellular and WATM Systems*. John Wiley & Sons, 2. Auflage, Mai 1999, ISBN 0-471-978906-X. Dieses Buch kann unter <http://www.wiley.com> bestellt werden. Zitat auf S. 25.

Dieses Buch beginnt mit den Grundlagen des digitalen Zellularfunks. Danach werden die Eigenschaften des Mobilfunkkanals, Sprachcodierung, Kanalcodierung, quaternäre Frequenzumtastverfahren, Phasenumtastverfahren und Frequenzsprungverfahren erläutert. Abschließend geben die Autoren einen Überblick über das Mobilfunksystem GSM, mobile *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)-basierte Multimediasysteme, Systeme der 3. Generation und drahtlose ATM-Systeme.

STEPPLER (1995) – MARTIN STEPPLER. *TETRIS: A Simulation Tool for TETRA Systems*. In *Tagungsband der 2. ITG-Fachtagung '95* (WALKE, 1995), S. 403–410. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar. Zitat auf S. 193.

In diesem Tagungsbeitrag wird das Simulationswerkzeug TETRIS vorgestellt, mit dessen Hilfe beide TETRA-Protokollstapel, V+D und PDO, auf Basis stochastischer, ereignisorientierter Simulation untersucht werden können.

STEPPLER (1998a) – MARTIN STEPPLER. *Performance Analysis of Communication Systems Formally Specified in SDL*. In *Tagungsband des „First International Workshop on Simulation and Performance '98“* (SMITH et al., 1998), S. 49–62. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar. Zitat auf S. 94.

In diesem Tagungsbeitrag wird zuerst die SDL-orientierte Softwareentwurfsmethodik für Kommunikationssysteme vorgestellt und danach dargelegt, wie der nicht-funktionale, quantitative Entwurf eines SDL-Systems mittels Leistungsanalyse gehandhabt werden kann. Zu diesem Zweck wird schließlich ein neues Werkzeug, *SDL Performance Evaluation Environment and Tools* (SPEET), für die Leistungsanalyse formal in SDL spezifizierter Systeme unter Berücksichtigung von Echtzeit-Bedingungen präsentiert. SPEET ermöglicht die Simulation und Emulation mehrerer formal spezifizierter Systeme zur gleichen Zeit. Diese Systeme können mit Hilfe von Verkehrslastgeneratoren mit Last beaufschlagt werden. Ferner können sie miteinander verbunden werden, wobei die Verbindungen physikalischen Übertragungskanälen entsprechen. Auf einfache Weise können Messpunkte in eine Spezifikation eingebaut werden, wobei die während eines Simulations- bzw. Emulationslaufs generierten Daten statistisch ausgewertet werden. SPEET stellt eine neues *Computer Aided Software Engineering* (CASE)-Werkzeug für die Produktentwicklung unter Verwendung forma-

ler Methoden dar.

STEPPLER (1998b) – MARTIN STEPPLER. *Performance Measurement of SDL Specifications – The New SDL Probe Symbol*. In *Tagungsband des „Workshop on Performance and Time in SDL and MSC ’98“* (MITSCHLE-THIEL et al., 1998), S. 51–55. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar. Zitat auf S. 150.

In diesem Tagungsbeitrag wird eine Erweiterung des SDL-Sprachumfangs in Bezug auf das Einfügen von Messpunkten in eine formale SDL-Spezifikation vorgestellt. Die Syntax der Spracherweiterung wird in *Backus-Naur-Form* (BNF) zur Verfügung gestellt.

STEPPLER (1999) – MARTIN STEPPLER. *Maximum Number of Users Which Can Be Served by TETRA Systems*. In *Tagungsband der European Wireless ’99* (WALKE, 1999), S. 315–320. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar.

In diesem Tagungsbeitrag wird die maximale Anzahl an Teilnehmern abgeschätzt, die gleichzeitig in einem TETRA-V+D-System abhängig vom Zufallszugriff und von der Reservierungszuteilung bedient werden können. Es werden die beiden V+D-Zugriffsmethoden rollender und diskreter Zugriffsrahmen unterschieden, zwei Markoff-Modelle zur Beschreibung von Zufallszugriff und Reservierungszuteilung vorgestellt und ein typisches Verkehrslastszenarium untersucht.

STEPPLER und BÜTER (1997) – MARTIN STEPPLER und MICHAEL BÜTER. *Collision Resolution for TETRA Systems*. In *Tagungsband der 2. EPMCC ’97* (WALKE, 1997), S. 559–565. Dieses Dokument ist unter <http://www.steppler.de> frei verfügbar. Zitat auf S. 95.

In diesem Tagungsbeitrag wird das Zufallszugriffsprotokoll des TETRA-Protokollstapels PDO eingehend erläutert. Anschließend werden verschiedene Kollisionsauflösungsalgorithmen angepasst an die Parameter von PDO vorgestellt und simulativ bewertet.

STEPPLER und LOTT (1997) – MARTIN STEPPLER und MATTHIAS LOTT. *SPEET – SDL Performance Evaluation Tool*. In *Tagungsband des 8. SDL-Forums ’97* (CAVALLI und SARMA, 1997), S. 53–67. Unter <http://www.steppler.de> ist dieses Dokument frei verfügbar. Zitat auf S. 94.

In diesem Tagungsbeitrag wird die Entwicklungsumgebung *SDL Performance Evaluation Environment and Tools* (SPEET) für die Leistungsbewertung formal in SDL spezifizierter Kommunikationssysteme unter Echtzeitbedingungen vorgestellt. SPEET ermöglicht die parallele stochastische Simulation und Emulation mehrerer Systeme, die von Verkehrslastgeneratoren mit Last beaufschlagt werden können. Ferner ist es möglich diese Systeme miteinander zu verbinden, wobei diese Verbindungen physikalischen Kanälen entsprechen. Vom Benutzer in die Spezifikation eingebaute Messpunkte liefern zur Laufzeit Daten, die von SPEET statistisch ausgewertet werden. SPEET erweitert

die Methoden des SDL-orientierten Softwaredesigns um die Leistungsbewertung.

STROUSTRUP (1997) – BJARNE STROUSTRUP. *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley, 3. Auflage, 1997, ISBN 0-201-88954-4. Dieses Buch kann unter <http://www.awl.com> bestellt werden. Zitat auf S. 93, 158.

Basierend auf dem finalen Entwurf für den *American National Standards Institute* (ANSI)/ISO-C++-Standard beschreibt der Entwickler dieser Sprache vollständig die C++-Sprachkonstrukte, die Standardklassenbibliothek und Schlüsselentwurfstechniken. Insbesondere geht er auf folgende Themen ein: Abstrakte Klassen, Klassenhierarchien, Muster, Ausnahmefehlerbehandlung, Namensräume, Laufzeittypüberprüfung, Standardbehälter, Standardalgorithmen, Standard-Zeichenketten, Ein- und Ausgabeströme und numerische Berechnungen.

STUEBER (1996) – GORDON L. STUEBER. *Principles of Mobile Communication*. Kluwer Academic Publishers, 1996, ISBN 0-7923-9732-0. Dieses Buch kann unter <http://www.wkap.nl> bestellt werden. Zitat auf S. 30, 181, 184.

Dieses Buch deckt die Grundlagen für den Entwurf eines Mobilfunksystems ab: Ausbreitungsmodelle, Gleichkanalstörung, Modulationsverfahren, Kanalcodierung, CD-MA, Zellplanung und Kanalzuweisungstechniken.

TANENBAUM (1994) – ANDREW S. TANENBAUM. *Moderne Betriebssysteme*. Hanser Studienbücher der Informatik. Carl-Hanser-Verlag, 1994, ISBN 3-446-17472-9. Dieses Buch kann unter <http://www.hanser.de> bestellt werden. Zitat auf S. 105.

Dieses Standardwerk stellt im ersten Teil die wichtigsten Konzepte und Strukturen klassischer Betriebssysteme dar, insbesondere Prozesse, Dateien, Speicherverwaltung und die Behandlung von Verklemmungen (*Deadlocks*). Der zweite Teil führt grundlegend in die verteilten Betriebssysteme ein.

THOMOPOULOS (1988) – STELIOS C. A. THOMOPOULOS. *A Simple and Versatile Decentralized Control for Slotted ALOHA, Reservation ALOHA, and Local Area Networks*. *IEEE Transactions on Communications*, Bd. COM-36, Nr. 6, S. 662–674, Juni 1988, ISSN 0090-6778. Dieser Artikel kann über <http://www.comsoc.org> bezogen werden. Zitat auf S. 100.

In diesem Artikel beschreibt THOMOPOULOS den Kollisionsauflösungsalgorithmus *Minimum Mean Squared Error* (MMSE). Dieser Algorithmus schätzt den Auftragsüberhang ab. Eine Parameterwahl wird vorgestellt, um die Paketverzögerung und den Durchsatz zu optimieren und das S-ALOHA-Verfahren zu stabilisieren.

VARY et al. (1998) – PETER VARY, ULRICH HEUTE und WOLFGANG HESS. *Digitale Sprachsignalverarbeitung*. Reihe Informationstechnik. Teubner-

Verlag, April 1998, ISBN 3-519-06165-1. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.teubner.de>. Zitat auf S. 25.

Dieses Buch behandelt die einschlägigen Algorithmen der Sprachsignalverarbeitung. Nach den erforderlichen Hintergrundinformationen über die Spracherzeugung und das Gehör werden grundsätzliche Fragen der Signalverarbeitung behandelt (Spektralanalyse und -synthese, statistische Analyse, lineare Prädiktion, Quantisierung und Codierung). Daran schließen sich anwendungsspezifische Verfahren und Algorithmen mit den Themen Codierung, Geräuschreduktion, Kompensation akustischer Echos und Sprachsynthese an. Abschließend widmen sich die Autoren der Frage der Qualitätsbeurteilung.

WALKE (1995) – BERNHARD WALKE, Hrsg. *Tagungsband der 2. ITG-Fachtagung '95 „Mobile Kommunikation“*, Band 135 der *Reihe ITG-Fachbericht*, Neu-Ulm, 26.–28. September 1995. VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2129-5. Unter <http://www.vde-verlag.de> kann dieser Tagungsband bestellt werden. Zitat auf S. 348.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren die Funkausbreitung im Bereich 75 MHz bis 1 800 MHz, adaptive Antennen, die Vielfachzugriffsverfahren CDMA und TDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)-Systeme, Handover-Algorithmen, Funknetzplanung, Verkehrstelematik, Bündelfunk und Sicherheitsarchitekturen.

WALKE (1997) – BERNHARD WALKE, Hrsg. *Tagungsband der 2. EPMCC '97 zusammen mit 3. ITG-Fachtagung „Mobile Kommunikation“*, Band 145 der *Reihe ITG-Fachbericht*, Bonn, 30. September – 2. Oktober 1997. VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2307-7. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www.vde-verlag.de>. Zitat auf S. 322, 349.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren die Mobilfunkstandards GSM, DECT und UMTS, die Funkübertragung im Nahbereich, mobile lokale Netze, mobile Breitbandssysteme, mobiler Satellitenfunk, universelle persönliche Mobilität, intelligente Antennen und mobile Funkssysteme mit dynamischer Kanalvergabe und Vielfachzugriff im Frequenzspektrum.

WALKE (1999) – BERNHARD WALKE, Hrsg. *Tagungsband der European Wireless '99 zusammen mit 4. ITG-Fachtagung „Mobile Kommunikation“*, Band 157 der *Reihe ITG-Fachbericht*, München, 6. – 8. Oktober 1999. VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2490-1. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www.vde-verlag.de>. Zitat auf S. 349.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren die Mobilfunkstandards *High Performance LAN* (HIPERLAN), UMTS, GSM und DECT, selbstorganisierende Ad-Hoc-Netze, mobile lokale Netze (Bluetooth), mobile IP-basierte Breitbandssysteme und mobiler Satellitenfunk.

WALKE (2000) – BERNHARD WALKE. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*,

Band 2 der *Reihe Informationstechnik*. Teubner-Verlag, 2. Auflage, Januar 2000, ISBN 3-519-16431-0. Unter <http://www.teubner.de> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 352.

Dieser zweite von zwei Bänden beschreibt detailliert die jeweiligen Dienste und Protokolle der standardisierten Systeme DECT, TETRA, EUROSIGNAL, CITYRUF und HIPERLAN 1 und der sich noch in der Entwicklung befindenden Funksysteme, wie z. B. drahtlose lokale Netze (HIPERLAN 2, *Wireless Local Area Network* (WLAN) IEEE 802.11), mobile Satellitensysteme, und Universelle Persönliche Kommunikation als mobilitätsunterstützender Dienst des Festnetzes.

WALKE (2001a) – BERNHARD WALKE. *Mobile Radio Networks — Networking, Protocols and Traffic Performance*. John Wiley & Sons, 2. Auflage, November 2001a, ISBN 0-471-49902-1. Unter <http://www.wiley.com> kann dieses Buch bestellt werden.

Dieses Buch ist die englische Übersetzung von **WALKE (2001b)** und **WALKE (2000)**. Zusätzlich befinden sich in diesem Buch die Leistungsanalysen aller beschriebenen Systeme. Diese sind mit Hilfe von ereignisorientierter stochastischer Simulation unter typischer Verkehrslast ermittelt worden.

WALKE (2001b) – BERNHARD WALKE. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*, Band 1 der *Reihe Informationstechnik*. Teubner-Verlag, 3. Auflage, August 2001b, ISBN 3-519-26430-7. Unter <http://www.teubner.de> kann dieses Buch bestellt werden. Zitat auf S. 6, 13, 16, 352.

Dieser erste von zwei Bänden beschreibt detailliert nach einer Einführung in die Grundlagen des Mobilfunks die jeweiligen Dienste und Protokolle der standardisierten Systeme GSM, *Digital Communication System* (DCS) 1800 und UMTS.

WALKE (2001c) – BERNHARD WALKE, Hrsg. *Tagungsband des 10th Aachen Symposium on Signal Theory (ASST) „Algorithms and Software for Mobile Communications“*, Aachen, 20.–21. September 2001c. VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2610-6. Bestellt werden kann dieser Tagungsband unter <http://www.vde-verlag.de>. Zitat auf S. 345, 346.

Schwerpunkte dieser Konferenz waren Mobilfunksysteme der 3. und zukünftiger Generationen, selbstorganisierende Systeme, drahtlose lokale Netze, Kanalschätztechniken, Funkausbreitung, Entzerrung und Codierung, Antennen, Sprach- und Bildverarbeitung und die Leistungsbewertung von Systemen unter Verkehrslast.

WALKE et al. (2001) – BERNHARD WALKE, MARC PETER ALTHOFF und PETER SEIDENBERG. *UMTS - Ein Kurs*. J. Schlembach Fachverlag, August 2001, ISBN 0-470-84557-0. Unter <http://www.schlembach-verlag.de> kann dieses Buch bestellt werden. Unter <http://www.umts-einkurs.de> werden weitergehende Informationen zur Verfügung gestellt. Zitat auf

S. 216.

Das Buch beginnt mit zwei Einführungskapiteln, in denen die Grundlagen der digitalen Nachrichtenübertragung und die grundsätzlichen Effekte in zellularen Mobilfunksystemen beschrieben werden. Es folgen die Themen Standardisierung und Spektrum, UMTS-Systemarchitektur inkl. einer Übersicht über die Protokolle im Core Network, *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN)-Protokollstapel, CDMA-Funkschnittstelle (Prinzip der Datenübertragung, physikalische Schicht, physikalische Kanäle) und schließlich eine Erläuterung der Effekte, z.B. der Funknetzplanung, die zur Komplexität zellulärer CDMA-Netze beitragen. Es folgt eine Beschreibung der Dienste und Dienstarchitekturen. Dabei werden auch Konzepte wie *Virtual Home Environment* (VHE), *Open Service Architecture* (OSA) und *Mobile Execution Environment* (MExE) erklärt. Das Buch schließt mit einem umfassenden Ausblick auf aktuelle Trends und Fragestellungen. Dazu gehören die zu UMTS teilweise in Konkurrenz stehenden WLAN-Systeme. Außerdem werden die kommenden Systeme der vierten Generation, die Risiken für UMTS durch die Diskussion über seine elektromagnetische Verträglichkeit (*Electromagnetic Compatibility*, EMC) sowie die Systemkapazität von UMTS angesprochen.

WATERLOO (1998) – WATERLOO MAPLE INCORPORATED. *Maple V Programming Guide for Release 5*, Springer-Verlag, 3. Auflage, November 1998, ISBN 0-387-98398-8. Bestellt werden kann dieses Buch unter <http://www.springer.de>.

In diesem Buch wird die Programmierschnittstelle der Mathematikumgebung Maple, insbesondere die Formelmanipulationssprache von Maple, vollständig erläutert. Es wird gezeigt, auf welche Weise symbolische und numerische Ausdrücke ausgewertet werden können, welche Datentypen zur Verfügung stehen, inwieweit Maple durch benutzerdefinierte Routinen erweitert werden kann und welche Möglichkeiten existieren, zwei- oder dreidimensionalen Grafiken darzustellen.

WIND (1998) – WIND RIVER GMBH. *Sniff+ – User's Guide and Reference*, 1998. Unter <http://www.windriver.de> ist eine Demoversion von *Sniff+* verfügbar. Zitat auf S. 162.

Dieses Handbuch beschreibt umfassend die generellen Konzepte von Sniff+, d.h. die Definition von und das Arbeiten mit Projekten, die Erstellung von Softwaresystemen, die Versions- und Konfigurationsverwaltung und die Dokumentationsgenerierung.

NAMENSVERZEICHNIS

Fettgedruckte Seitennummern verweisen auf Einträge im Verzeichnis unveröffentlichter Quellen bzw. im Literaturverzeichnis oder auf wichtige Informationen über den Autor oder dessen Publikationen. Normal gesetzte Seitennummern beziehen sich auf Erwähnungen im Text.

A

Ahern, John 345
Akaiwa, Yoshihiko 25, 184, 319
Althoff, Marc Peter 352
Arlitt, Martin F. 144, 319
Arnold, Ken 319
Arnold, Patrick 93, 319, 323
Ascheid, Gerd 338

B

Bellal, O. 320
Benkner, Thorsten 170, 171, 178, 324
Berners-Lee, Tim 143, 319
Bertsekas, Dimitri 101, 320
Blaha, Michael 344
Bochmann, Gregor von . 92, 320, 325
Bodoff, Stephanie 323
Böhmer, Stefan 94, 317, 320
Booch, Grady .. 88, 90, 157, 285, 320, 321
Borella, Michael S. 335
Bossert, Martin 34, 321, 343
Brady, Paul T. 143, 144, 251, 321
Bratley, Paul 150, 258, 321
Breitbach, Markus 343
Brey, Barry B. 148, 322
Brinkmann, Axel 313
Bronstein, Ilja N. 99, 181, 322
Büter, Michael 95, 313, 333, 349

Bussel, Jeroen van 194, 322

C

Capetanakis, John I. 101, 322
Cátedra, Manuel F. 171, 324
Cavalli, Ana .. 320, 323, 325, 337, 349
Cayla, Guy 12, 323
CEPT 20, 323
Chouinard, Jean-Yves . 186, 323, 345
Christerson, Magnus 332
Clements, Paul 347
Coleman, Derek 90, 323
Cornelsen, Holger 313
Costello, Daniel J. 34, 35, 38, 336
Cunningham, George A. 99, 324

D

David, Klaus 170, 171, 178, 324
Delisle, Gilles. Y. 323
Dempsey, Bert J. 128, 324, 325
Diefenbruch, Marc 93, 339
Dollin, Chris 323
Dssouli, Rachida 325
Dunlop, John 325

E

Eddy, Frederick 344
Ek, Anders 88, 92, 163, 325
Ellsberger, Jan 87, 165, 326
Ergezinger, Jens 313, 314

ETSI 237, **326**
 European Communities 147, 180, 255,
326

F

Fahrmeier, Ludwig 111, **327**
 Fechter, Stefan A. **338**
 Feher, Kamilo 179, 182–184, **336**, **337**
 Fielding, R. **319**
 Flannery, Brian P. **341**
 Fogg, Chad E. **339**
 Fox, Bennett L. **321**
 Fritchman, Bruce D. ... 185, 186, 323,
327, **345**
 Frystyk, H. **319**
 Færgemand, Ove **340**

G

Gallager, Robert 101, **320**
 Galvin, Peter **346**
 Gerlich, Rainer 93, **327**
 Gery, Eran 90, **329**
 Gilbert, E. N. 185, 323, **327**
 Gilchrist, Helena **323**
 Girma, Demessie **325**
 Görg, Carmelita .. 105, 149, 161, 258,
328, 344, **345**
 Goossens, Michael **328**
 Gosling, James 93, **319**
 Grabiec, Jacek **335**
 Grabowski, Jens **325**

H

Hajek, Bruce 98, **328**
 Hanzo, Lajos 25, **348**
 Harel, David 90, **329**
 Hata, Masaharu ... 147, 171, 255, **329**
 Hess, Wolfgang **350**
 Heute, Ulrich **350**
 Hogrefe, Dieter ... 87, **325**, **326**, **329**
 Holzmann, Gerard 92, **330**

I

Inocência, Euricio **337**
 Intel 148, **330**
 Irvine, James **325**
 ISO/IEC 91, **330**
 ITU . 17, 87, 88, 92, 93, 128, 143, 165,
330, **331**

J

Jacobson, Ivar 88, 285, **321**, **332**
 Jakes, William C. . 170, 172, 178, **332**
 Jeon, Wha Sook 96, 97, **332**
 Jeong, Dong Geun 96, 97, **332**
 Jerome, Richard **325**
 Jonsson, Patrik **332**
 Jung, Peter 173, 174, **332**
 Junius, Martin 155, 159, **333**

K

Kammeyer, Karl Dirk 178, **333**
 Kaufmann, Heinz **327**
 Kehren, Dieter **314**
 Kelton, W. David 150, 258, **335**
 Kerner, Helmut 11, **333**
 Kernighan, Brian 93, **333**
 Kleinrock, Leonard 113, 115, 123, 125,
333, **334**
 Knightson, Keith G. 87, 91, **334**
 Knuth, Donald E. **334**
 Koch, Beat **325**
 Kopka, Helmut **334**
 Kostas, Thomas J. 128, **335**
 Krause, Volker **314**
 Kruse, Jörn 10, **335**
 Kütting, Bernd **314**
 Kuypers, Dirk **314**, **346**

L

Lachover, Hagi **329**

Lahav, Yair 325
 Lam, Simon Sin-Sing .. 115, 334, 335
 Lampe, Christian 317
 Law, Averill M. 150, 258, 335
 Lecours, Michel 323, 345
 Lee, William C. Y. 171, 174, 178, 182, 336
 LeGall, Didier J. 339
 Liebeherr, Jörg 325
 Lin, Shu 34, 35, 38, 336
 Liu, Chia-Liang .. 179, 182–184, 336, 337
 Löttner, Michael 314
 Loftus, Chris 91, 337
 Loon, Timothy van 98, 328
 Lorensen, William 344
 Lott, Matthias 94, 317, 349
 Lueg, Jürgen 315
 Lüke, Hans-Dieter 179, 182, 337

M

Maguiraga, S. 320
 Mahler, Jerry 335
 Mangold, Stefan 317
 Marten, Michael 10, 337
 MathWorks Inc, The 338
 Matschke, Jens 315
 Meyr, Heinrich 182, 338
 Mitchell, Joan L. 143, 338, 339
 Mitschele-Thiel, Andreas 91, 327, 339, 343, 349
 Mittelbach, Frank 328
 Möller, Uwe 317
 Moeneclaey, Marc 338
 Müller-Clostermann, Bruno .. 93, 339
 Møller-Pedersen, Birger 340

N

Naamad, Amnon 329

O

Olsen, Anders 87, 165, 340
 Olzem, Wolfgang 317
 Ost, Friedemann 327
 Overgaard, Gunnar 332

P

Papoulis, Athanasios 111, 340
 Parsons, John David 178, 340
 Paxson, Vern 144, 340
 Pennebaker, William B. 339
 Pérez-Arriaga, Jesús 171, 324
 Pernsteiner, Peter 10, 340
 Pesch, Dirk 333
 Peteron, James 346
 Petrenko, A. 320
 Pnueli, Amir 329
 Politi, Michal 329
 Postel, Jonathan B. 143, 341
 Premierlani, William 344
 Press, William H. 341
 Proakis, John G. 10, 29, 183, 341, 342

Q

Quaschik, Dieter 314, 315

R

Rappaport, Theodore S. 172, 342
 Rational Software Corporation .. 162, 342
 Recker, Stephan 315
 Reed, Rick 339, 340
 Reynolds, J. 143, 341
 Richter, Manfred 156, 249, 342
 Riede, Klaus 316
 Ritchie, Dennis 93, 333
 Rivest, Ronald L. 99, 343
 Rose, Oliver 145, 343
 Rossou, Erik K.L. 322
 Rothenbacher, Jochen 343

STICHWORTVERZEICHNIS

Fettgedruckte Seitennummern verweisen auf Seiten, die wichtige Informationen über die Einträge enthalten, z. B. die genaue Definition oder eine detaillierte Beschreibung. Normal gesetzte Seitennummern beziehen sich auf Erwähnungen im Text. Kursive Einträge stellen die ausgeschriebene Form von Abkürzungen dar, auf die entsprechend verwiesen wird, vgl. das Abkürzungsverzeichnis auf Seite 303.

A

- AA **71**, **208**
- AACH .. **26**, **27**, **28**, **34**, **38**, **42**, **44**, **50**
Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation siehe ABMT
- Abfertigungsstrategie .. **105**, **193**, **215**
- ABMT **4**
- Abschattung **171**, **279**, **327**
- Abstract Data Type* siehe ADT
- Abstract Syntax Notation One* .. siehe ASN.1
- Abstract Test Suite* siehe ATS
- Abtaster **182**
- Abwärtsstrecke siehe DL
- AC . **40**, **49**, **50–52**, **119**, **120**, **131**, **136**, **286**
- Access Announce* siehe AA
- Access Assignment Channel* siehe AACH
- Access Code* siehe AC
- Access Control Channel* . siehe ACCH
- Access Parameters* siehe AP
- Access Period ... siehe Zugriffsperiode
- Access Period Length* siehe APL
- Access Priority* siehe AP²
- Access Window .. siehe Zugriffsfenster
- ACCH **70**, **72**
- ACCH² **25**
- ACELP **25**
- ACI **173**, **336**
- Acknowledge Request* siehe AR
- Acknowledged Group Call* .. siehe AG
- Acknowledged Information* . siehe AI²
- Additive White Gaussian Noise* . siehe AWGN
- Adjacent-Channel Interference* .. siehe ACI
- Adressmarke siehe EL
- ADT **151**, **164–166**
- Advanced Link* siehe AL
- Advice of Charge* siehe AoC
- AG **244**
- AI **14**, **16**, **18**, **29**, **63**, **207**, **230**, **232–235**, **281**
- AI² **66**, **67–69**
- Air Interface* siehe AI
- AKF **181**, **184**, **185**, **298**
- AL **48**, **54**, **55–59**, **107**, **110**, **126**, **127**, **195**, **198**, **221–224**, **279**, **280**, **290**, **291**, **296**
- AL² **221**, **232**
- Algebraic Code-Excited Linear Predictive* siehe ACELP
- Algorithmus
Exponentieller Backoff .. **96**, **202**,

- MMSE .. 100, 202, 207–209, 350
 Pseudo-Bayes 99, 202, 343
 Splitting 101, 202, 208, 209, 323
 Stochastische Annäherung ... 98, 324, 329
Ambience Listening siehe AL²
American Mobile Phone Service siehe AMPS
American National Standards Institute siehe ANSI
 AMPS 342
 Anforderungsanalyse . 88, 89, 90, 324, 325
 Ankunftsrate . 99, 101, 110, 119, 120, 122, 123, 125, 131, 133, 198, 237, 283
 ANSI 333, 350
 Antennenhöhe 147, 171, 175, 188
 Anwendungsschicht 143
 AoC 221
 AP 71, 207, 208
 AP² 220
 APCO 217
 APL 73, 74, 117, 118, 121, 208
 Application Layer siehe Anwendungsschicht
 AR 57
Area Selection siehe AS
 ARQ 336
 AS 221
 ASN.1 92, 166, 331, 348
Associated Control Channel siehe ACCH²
Association of Police Communications Officials siehe APCO
Asynchronous Transfer Mode ... siehe ATM
 ATM 315, 320, 343, 346, 348
 ATS . 91, 233, 284, 320, 326, 330, 334
 Auftragsüberhang .. 95, 98, 100, 113, 120, 316, 350
 Aufwärtsstrecke siehe UL
 Ausnahmefehlerbehandlung . 156, 158, 313, 319, 337, 350
Autokorrelationsfunktion .. siehe AKF
Automatic Repeat Request siehe ARQ
 AWGN 179, 185, 188, 298
- ## B
- Backlog siehe Auftragsüberhang
Backus-Naur-Form siehe BNF
Bad Urban siehe BU
 Bandbreite 184
Barring of Incoming Calls . siehe BIC
Barring of Outgoing Calls siehe BOC
Base Link Entity siehe BLE
Basestation Linearisation Channel ... siehe BLCH
Basic Link siehe BL
 Basisklasse 157
 Basisrahmenlänge 51, 53, 97
Basisstation siehe BS
 Batch-Means 150, 152, 156, 258, 344, 345
 Baumalgorithmus 323
 BBK 26, 28, 40
 CCCH 26, 27
 BCH 35, 321, 336
 Bebauungsstruktur 279, 281
 Bediendauer 125, 129, 130, 237
 Bedienrate 119, 123
 Bedienstrategie siehe Abfertigungsstrategie
Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben siehe BOS
 Benutzerebene 18, 41
 Benutzungsfall 88, 91, 92, 143
 BER 38, 147, 169, 178, 182, 183, 186–188, 253, 254, 261, 337, 347
 Besetztzeichen siehe BF
 Besselsche Funktion 181

- bestätigt **284**
 Bestätigter Gruppenruf **12**
 Besuchsdatenbank *siehe* VDB
 Betriebsfunk **6, 7**
 Betriebsmittel **123, 125, 282, 283**
 Beugung **147, 171, 283**
 Bezugspunkt U_m **16**
 BF **73, 74, 208**
 BIC **220, 232**
Binary Phase Shift Keying *siehe* BPSK
Bit Error Ratio *siehe* BER
 Bitfehlerverhältnis *siehe* BER
 Bitübertragungsschicht *siehe* PL
 Bitverwürfelung **33, 36, 38, 188**
 BKN1 **24, 28**
 BKN2 **24, 28**
 BKN **28**
 BL . **48, 54, 55, 56, 58, 107, 110, 125, 195, 198, 203, 221, 223, 224, 279, 290, 291, 296**
 BLCH **26, 27, 28**
 BLE **33**
Block Number 1 *siehe* BKN1
Block Number 2 *siehe* BKN2
 Blockcode .. **34, 35, 38, 188, 279, 321, 336**
 linear **279, 336**
 systematisch **34, 279**
 zyklisch **34, 280, 336**
 Bluetooth **351**
 BNCH ... **26, 27, 28, 42, 43, 188, 261**
 BNF **349**
 BOC **220, 232**
 BOS iii, **1, 2, 6–8, 10, 21, 217, 242, 338**
Bose Chadhuri Hoquenghem *siehe* BCH
 BPSK **345**
 Breitbandkanal **178**
Broadcast Block *siehe* BBK
Broadcast Control Channel *siehe* BCCH
 Broadcast Network Channel *siehe* BNCH
 Broadcast Synchronisation Channel .. *siehe* BSCH
 Bruttobitrate **10**
 BS .. **12, 15, 18, 24, 26, 27, 31, 33, 34, 37, 38, 40–44, 46–49, 51–55, 58, 62–64, 70, 71, 73–76, 80, 81, 83, 96, 107, 115, 117, 119, 122, 123, 127, 129, 142, 143, 171, 173, 175–177, 188, 189, 193, 194, 207, 223, 226, 228, 230, 255, 279, 285, 286, 289, 291, 329**
 BSCH **26, 27, 28, 30, 38, 42, 43**
 BU **180, 181, 188, 189, 196, 205, 207, 213, 238, 240, 242, 243, 261**
 Bündelfunksystem **6, 7, 8**
 Bündelstärke **6**
 Bündelungsgewinn **6**
 Büschel **23, 24, 29, 31, 69, 70, 83, 129, 195, 228**
 Büschelstruktur **24, 136**
 Burst *siehe* Büschel
Busy Flag *siehe* BF
- ## C
- C-Netz **10**
 c/I *siehe* Gleichkanalstöörabstand
 CAD **220, 232**
Call Authorized by Dispatcher .. *siehe* CAD
Call Forwarding Busy *siehe* CFB
Call Forwarding on No Reply ... *siehe* CFNRy
Call Forwarding on Not Reachable ... *siehe* CFNRc
Call Forwarding Unconditional . *siehe* CFU
Call Hold *siehe* CH
Call Report *siehe* CR

- Call Waiting* *siehe* CW
Calling Line Identification Presentation *siehe* CLIP
Calling/Connected Line Identification Restriction *siehe* CLIR
 Carrier to Interference Ratio *siehe* Gleichkanalstörabstand
 CASE 138, 345, 348
 CB 24, 28
 CBR 251, 315
 CCH 25
 CCI 173, 174, 179, 185, 188, 195, 204, 213, 314, 316, 319, 336, 337, 350
 CDMA 336, 350, 351, 353
 Cell Reselect *siehe* Zellwechsel
 Central Processing Unit ... *siehe* CPU
 CEP-Id 55
 CEP 223, 227
 CEPT 20
 CFB 220
 CFNRc 220
 CFNRy 220
 CFU 220
 CH 220
 Circuit Mode Voice ... *siehe* Sprache, kanalvermittelt
 CLCH 26, 27, 28, 51
 ClearCase 162
 CLIP 220
 CLIR 220
 CLNS 11, 63
 CLT 73
 Cluster *siehe* Zellgruppe
 Clustergröße .. *siehe* Zellgruppengröße
 CMOS 346
 CNCL 155, 159, 317, 333
 Co-Channel Interference ... *siehe* CCI
 Co-Channel Interference Reduction
 Factor *siehe* Verminderungsfaktor der Gleichkanalstörung
 Code Division Multiple Access .. *siehe* CDMA
 Codec ... 143, 146, 215, 251, 253, 254
 Codegenerator 163–168
 Coder und Decoder *siehe* Codec
 Coderate 35, 36
 Collision Resolution Period *siehe* CRP
 Color Code *siehe* Farbcode
 COLP 220
 Common Linearisation Channel *siehe* CLCH
 Common Linearisation Time ... *siehe* CLT
 Common Object Request Broker Architecture *siehe* CORBA
 Communication Networks Class Library *siehe* CNCL
 Complementary Probability
 Distribution Function ... *siehe* CPDF
 Computer Aided Software Engineering
siehe CASE
 Connected Line Identification
 Presentation *siehe* COLP
 Connection Endpoint *siehe* CEP
 Connection Endpoint Identifier . *siehe* CEP-Id
 Connection Oriented Network Service
siehe CONS
 Connectionless Network Service . *siehe* CLNS
 CONS 11, 63
 Constant Bit Rate *siehe* CBR
 Constraint Length . *siehe* Einwirktiefe
 Continuous Transmission Mode ... 24
 Control Channel *siehe* CCH
 Control Frame ... *siehe* Stellerrahmen
 Control Physical Channel ... *siehe* CP
 Control Plane *siehe* Stellerebene
 Control Uplink Burst *siehe* CB
 CORBA 91, 323, 337
 COST 326

CP **24, 27, 28**
CPDF **203, 213, 214, 291**
CPU **148, 149**
CR **220**
CRC **254**
CRP **102, 103, 104, 209**
CW **220**
Cyclic Redundancy Check . *siehe* CRC

D

Dämpfung **147**
Data Link Layer *siehe* DL²
Data Sense Multiple Access *siehe* DSMA

Datenlexikon **89, 90**
Datennachrichten **13**
Datenratenanpassung **18**
Datenstruktur **2, 5**
DAWS **217, 236**
DCS **352**
DD1 **71**
DD2 **71**
Deadlocks *siehe* Verklemmung
DECT **319, 325, 342, 351, 352**
Delay Spread . *siehe* Laufzeitspreizung
Delayed First Transmission *siehe* DFT

Descrambling .. *siehe* Entschlüsselung
Design of Generic and Adaptive Protocol Software *siehe* DGAPS

DFT **51, 97, 99**
DGAPS **345**
DGNA **221, 232**
Dienstdateneinheit *siehe* SDU
Dienstelement *siehe* SP
Dienstgüte *siehe* QoS, **335**
Dienstzugangspunkt *siehe* SAP
Differential Phase Shift Keying . *siehe* DPSK

Differential Quaternary Phase Shift Keying *siehe* DQPSK

Digital Advanced Wireless Service *siehe* DAWS
Digital Enhanced Cordless Telecommunication *siehe* DECT
Digital Communication System *siehe* DCS
Direct Mode *siehe* DM
Direct Priority *siehe* DP
Direktruf **12**
Discrete Listening *siehe* DL³
DL ... **8, 9, 10, 20, 21, 23, 24, 26–28, 40–42, 48, 50, 51, 62, 64, 70–73, 78–81, 96, 128, 129, 175, 176, 193, 197, 202, 204, 285**
DL² **18, 62, 63, 194**
DL³ **221**
DM **1, 12, 129, 234, 323**
DMO **233, 234**
Dopplereffekt **147, 172, 280**
Dopplerfrequenz **172, 280**
Dopplerspektrum . **172, 178, 181, 185**
Downlink *siehe* DL
Downlink Data Type 1 *siehe* DD1
Downlink Data Type 2 *siehe* DD2
Downlink Normal Subburst **83**
Downlink Response Type 1 *siehe* DR1
Downlink Response Type 2 *siehe* DR2
Downlink Response Type 3 *siehe* DR3
Downlink Synchronisation Subburst .. **83**
Downlink Traffic Channel *siehe* DTCH
Downlink Transfer *siehe* DT
DP **75, 105, 122, 208**
DPSK **182, 186, 254**
DQPSK ... **10, 29, 183, 186, 255, 337**
DR1 **71**
DR2 **71**
DR3 **71**
DSMA **9, 10, 73, 74**
DT **71**

DTCH **71, 72**
 Durchsatz .. iii, **3, 46, 49, 74, 99, 109,**
110, 112, 113, 115, 119, 120,
126, 127, 135, 195, 198, 202–204,
206–209, 213, 215, 216, 280, 282,
283, 316, 323, 335, 343, 350
 Durchsatzes **209**
Dynamic Group Number Assignment .
siehe DGNA

E

EFSM **158, 253**
 EG **235**
 Einwirktiefe **280**
 Einzelruf **12**
 EL **38, 40, 41, 70, 71**
Electromagnetic Compatibility .. *siehe*
 EMC
 elektronische Post **13**
 EMC **235, 353**
 EN **235**
 Endpunktadressierung **64**
 Energiesparmodus . **43, 44, 45, 70, 72,**
229, 230
 Entschlüsselung **31**
 Entzerrer **182**
 Entzerrung **188**
 ERC **20**
 Ereignisbehandlungsroutine **149**
 Ereignissteuerung **149**
 Erlang **280**
 ERM **235**
 Estelle **315, 330**
 ETR **128, 230, 234, 235**
 ETS **177, 181, 221, 230, 231–234**
ETSI Technical Report ... *siehe* ETR
 ETSI **1, 7, 8, 216, 217, 219, 230**
European Conference of Postal and
Telecommunications Administration ..
siehe CEPT
European Cooperation in the Field of

Scientific and Technical Research
siehe COST
European Radiocommunications
Committee *siehe* ERC
European Telecommunication Standard
siehe ETS
European Telecommunications
Standards Institute *siehe* ETSI
Event Label *siehe* EL
 Exception Handling *siehe*
 Ausnahmefehlerbehandlung
 Exponentieller Backoff-Algorithmus ..
siehe Algorithmus
Extended Finite State Machine . *siehe*
 EFSM

F

FACCH **25, 26**
 Faksimile **13**
 Faltungscodierung **10, 35, 36, 38, 188, 280,**
282, 321, 336
 punktiert **35, 36, 282**
 ratenkompatibel **35, 36, 282**
 Farbcode **31, 37, 40, 42**
Fast Associated Control Channel *siehe*
 FACCH
 Fast Call Reestablishment *siehe*
 Gesprächswiederherstellung
 FCFS **106**
 FCS **54, 55, 64, 65, 126, 279**
 FDM **19, 20**
 FDT **87, 88**
 FEC **9, 69, 143, 146, 326**
 Fehlerbüschel **186**
 Fehlererkennung **143, 146, 336**
 Fehlerkorrektur **319, 325, 336**
 Fehlermusterdatei ... **3, 169, 185, 187,**
188, 194, 195
 Fehlerschutz *siehe* FCS
 Fenstermechanismus **54, 56**
 Feststation **15**

- Fibonacci-Generator 156
 FIFO 106, 107, 215, 248, 344
File Transfer Protocol siehe FTP
 Filter 182
 ideales 184
 Matched Filter 182
 Optimalfilter 182
 SRRC-Filter 30, 182, 184
First Come First Serve .. siehe FCFS
First In First Out siehe FIFO
 Flankensteilheit 184
 Flottenmanagement 8
 Flusssteuerung . 18, 54, 57, 64, 68, 69,
 144, 279, 320, 334
 FN 22, 27, 28
 Folgeblock 69, 82, 117
 Following Block siehe Folgeblock
Formal Description Technique .. siehe
 FDT
Forward Error Correction . siehe FEC
 Fragmentierung 40–42, 48, 51, 55, 56
 Frame siehe Rahmen
Frame Check Sequence siehe FCS
Frame Number siehe FN
 Freiraumausbreitung 147
Frequency Division Multiplex ... siehe
 FDM
 Frequency Reuse siehe
 Frequenzwiederholung
 Frequenzband 10, 42
 Frequenzdispersion 172, 280
 Frequenzfehler 184
 Frequenzmultiplex 19
 Frequenzökonomie 6
 Frequenzwiederholung 173, 174
 FTP 143, 144, 251, 313, 340
 Füllbits 40
Full Size Signalling Channel siehe
 SCH/F
 Funkbetriebsmittelverwaltung 33
 Funkruf 44, 45, 47
 Funkschnittstelle siehe AI
 Fusionsmethode 90
- ## G
- Galois-Feld 321
 Gateway 219
General Packet Radio Service ... siehe
 GPRS
 Generatorpolynom 34, 36, 37, 280
 Gesprächsaufbauzeit iii, 195, 198,
 204–206, 215, 216
 Gesprächsweiterführung 45
 Gesprächswiederherstellung ... 45, 63
 Gleichkanalstörabstand . 174, 175–177
 Gleichkanalstörung siehe CCI
 Gleichkanalverzögerung 188
 Gleichkanalzelle ... 174, 175, 205, 213,
 216
*Global System for Mobile
 Communication* siehe GSM
 GoS 198
 GoS 49, 132, 134, 135, 195, 204, 205,
 215, 216, 237–243, 285, 291, 326
 GPRS 217, 314
 GR 151
Grade of Service siehe GoS
Graphical Representation ... siehe GR
Graphical User Interface .. siehe GUI
Group TETRA Subscriber Identity ...
 siehe GTSI
 Gruppenruf 12, 13, 45–48, 204
 GSM 7, 13–16, 19, 216, 314, 319,
 324–326, 333, 342, 348, 351, 352
 GTSI 38
 GUI 142
- ## H
- Half Size Downlink Signalling Channel*
 siehe SCH/HD
Half Size Uplink Signalling Channel ..
 siehe SCH/HU

- Hammingcode 35
 Handover 45, 351
 Hang Time *siehe* Nachlaufzeit
 Hardwareemulator 141, 149
 Hauptorganisationskanal *siehe* MCCH
 HDB 15
Head Of Line Priority *siehe* HOL
 Heimatdatenbank *siehe* HDB
High Performance LAN *siehe*
 HIPERLAN
Hilly Terrain *siehe* HT
 HIPERLAN 351, 352
 HOL 106, 107, 215
Home Data Base *siehe* HDB
 HT 180, 181, 188, 189, 196, 205, 207,
 213, 239, 241, 243, 261
 HTTP 320
 Hüllkurve, komplexe 30, 179
 Hyperframe *siehe* Hyperrahmen
 Hyperrahmen 23, 31
Hypertext Transfer Protocol *siehe*
 HTTP
- I**
- I.411 17
 IC 219
 ICI 251
 IDL 91, 323, 337
 IDU 65, 250
 IEEE 352
 IFT 51, 99, 109
 IMM 50, 51, 197
Immediate *siehe* IMM
Immediate First Transmission .. *siehe*
 IFT
 Implementierung 93, 94, 137–141,
 153, 324, 325
 Impulsaufweitung 172, 281
Include Call *siehe* IC
Individual TETRA Subscriber Identity
 siehe ITSI
- Industrierauschen . 170, 326, 332, 340
 Inphasekomponente 179, 182
Integrated Services Digital Network ...
 siehe ISDN
Inter-System Interface *siehe* ISI
Interface Control Information .. *siehe*
 ICI
Interface Data Unit *siehe* IDU
Interface Definition Language .. *siehe*
 IDL
Interim Standard *siehe* IS
 Interleaving ... *siehe* Bitverwürfelung
International Standards Organisation .
 siehe ISO
International Telecommunication
 Union *siehe* ITU
 Internet 63
Internet Protocol *siehe* IP
 Interoperabilität 8, 87, 281
Intersymbolinterferenz *siehe* ISI²
 Interworking 8, 63, 281
 IP 63, 144, 313, 351
 IS 334, 339, 342
 ISDN 15–18, 66, 219, 346
 ISI 230
 ISI² 178, 182
 ISO 8208 11
 ISO 8473 11
 ISO 63, 330, 334, 339, 350
 ITSI 38
 ITU-T 11, 17
 ITU 281, 283, 330
- K**
- Kanal
 logischer .. 24, 27, 38, 40, 42, 48,
 62, 69, 70, 188
 physikalischer 23, 24, 27
 Kanalcodierung 10, 11, 24, 31, 33, 34,
 35, 38, 42, 43, 69, 72, 82, 83, 185,
 187, 194, 222

- Kanalimpulsantwort 172, 281
 Kanalkapazität 327
 Kanalmodell 147, 196, 253
 Kanaltyp .. 3, 180, 181, 186, 188, 189,
 204–206, 213, 214, 261
 Bad Urban siehe BU
 Hilly Terrain siehe HT
 Rural Area siehe RA
 Typical Urban siehe TU
 Kanalvermittlung 11
 Kanalzugriffssteuerung 33, 48
 Klassenhierarchie 155
 Kollisionsauflösung .. iii, 49, 193, 198,
 202, 206, 208, 215, 216, 313, 314,
 324, 349, 350
 Kollisionsauflösungsbaum 102
 Kollisionsauflösungsphase . siehe CRP
 Kommunikationsprotokoll ... 143, 146
 Kongruenz-Generator 156
 Korrelation 152
 Korrelationskoeffizient 149
 Korrelator 254
 Kovarianzmatrix 183
- L**
- LAN 346
 LAP.T 64, 65, 66, 69
 LAPD 66
Last Come First Serve ... siehe LCFS
Last In First Out siehe LIFO
Late Entry siehe LE
 Laufzeitspreizung 172, 281, 336
 Laufzeittypinformation ... siehe RTTI
 LB 24, 28
 LCFS 106
 LCH 26
 LE 221, 232
 Leistungsdichtespektrum 172, 178
 Leistungsregelung 31, 38, 42
 LI 235
 LIFO 106, 248
Limited Relative Error siehe LRE
Line of Sight siehe LOS
Line Station siehe LS
Linearisation Channel siehe LCH
Linearisation Uplink Burst . siehe LB
Link Access Protocol D-Channel siehe
 LAPD
Link Access Protocol for TETRA
 siehe LAP.T
List Search Call siehe LSC
 Littles Lehrsatz 113, 125
 LLC-Kopf 55
 LLC-Rahmen 55
 LLC 18, 32, 33, 40–42, 48, 54, 55, 56,
 58–66, 69, 70, 78–82, 126, 127,
 219, 221, 222, 224, 226, 227, 233,
 279
Local Area Network siehe LAN
 LOD 72, 77, 78, 80, 81, 230
Logical Link Control siehe LLC
 Long-Term Fading .. siehe Langsamer
 Schwund
 LOS 147, 255
 LOTOS 315, 330
Low Duty Mode siehe LOD
 LRE 150, 152, 156, 195, 328, 345
 LS 13, 15, 17, 231
 LSC 219
- M**
- MAC 18, 27, 29, 31, 33, 34, 38, 40, 42,
 43, 45, 46, 48, 55, 56, 62, 63, 66,
 69–72, 77–83, 107, 126, 127, 207,
 208, 219, 221, 222, 226–230, 233
Main Control Channel .. siehe MCCH
Man Machine Interface ... siehe MMI
 Man Made Noise siehe
 Industrierauschen
 MAR 74, 76, 208, 209, 213
 Markoff-Kette 111, 112, 123, 144, 145,
 185, 187, 314, 315, 327, 343, 349

- Master Block Channel* .. siehe MBCH
Master Control Channel siehe
 MCCH²
 Matched Filter ... siehe Optimalfilter
Max Access Retries siehe MAR
Max Data siehe MD
 MaxRand1 75
 MaxRand2 75, 76
 MBCH 69, 72, 82, 83
 MCC 15
 MCCH . 42, 52, 53, 119, 131, 136, 286
 MCCH² 70, 72, 213
 MD 74, 75, 117, 118, 121, 208
 MDTRS 8
 ME 234
Medium Access Control .. siehe MAC
 Mehrfachbetrieb 10, 61, 75, 281
 Mehrwegeausbreitung . 147, 281, 316,
 327, 332, 336, 342
 Mehrwegeschwund siehe Schneller
 Schwund
 Mensch-Maschine-Schnittstelle .. siehe
 MMI
 MER 38, 169, 185, 187–189, 205,
 213, 261
 MESA 217
Message Error Ratio siehe MER
Message Sequence Chart .. siehe MSC
 Message Trunking siehe
 Nachrichtenbündelung
 MExE 353
 MF 244
Minimum Mean Squared Error . siehe
 MMSE
*Ministry of Post and
 Telecommunication* siehe MPT
 MinRand1 75
 MinRand2 75, 76
 Mittelwert 257
 MLE 33, 40, 43, 45, 55, 56, 58–60, 63,
 65–69, 78, 80, 223–226, 228–230
 MM 63
 MM² 244
 MMI 11, 18, 234
 MMSE-Algorithmus siehe
 Algorithmus
 MMSE .. 100, 202, 203, 205, 207–209,
 213–215, 350
 MN 27, 28
 MNC 15
 MNI 14
Mobile Country Code siehe MCC
Mobile Digital Trunked Radio System
 siehe MDTRS
Mobile Execution Environment . siehe
 MExE
Mobile Link Control Entity siehe MLE
Mobile Network Code siehe MNC
Mobile Network Identity .. siehe MNI
Mobile Station To Fixed Network Call
 siehe MF
Mobile Station To Mobile Station Call
 siehe MM²
Mobile Termination siehe MT
Mobile Termination Type 0 siehe MT0
Mobile Termination Type 2 siehe MT2
 Mobilitätsverwaltung siehe MM
*Mobility for Emergency and Safety
 Applications* siehe MESA
Mobility Management siehe MM
Mobilstation siehe MS
 Modem 143, 146, 147, 253, 337
 Modulation 146, 186
 Modulationsbit 29, 83, 117
Modulator und Demodulator siehe
 Modem
 Monitoring 38, 225, 226
 Morphologie 147, 180, 281
Moving Picture Experts Group .. siehe
 MPEG
 MPEG ... 143–145, 313–315, 339, 343
 MPT 7

- MS . 12, 13, **14**, 15, 16, 18–20, 23, 24,
26, 27, 31, 33, 38, 42–55, 58,
61–64, 70–74, 76–82, 95–97, 102,
103, 109–111, 113, 115, 118, 120,
122–125, 128, 129, 131–136, 142,
143, 171, 172, 175, 176, 181, 188,
193–195, 223–225, 228–230, 233,
234, 244, 255, 279, 285, 286, 289,
292, 295, 329
- MSC ... **88**, 91, 92, 141, 143–146, 165,
257, 281, 323, 325, 331, 339
- MT0 **16**
- MT2 **16**
- MT **11**, **16**, 284
- Multi-Path Fading *siehe*
 Mehrwegeschwund
- Multiframe *siehe* Multirahmen
- Multiple Access . *siehe* Vielfachzugriff
- Multiplex-Block 24, 69, **82**, **83**
- Multiplexing .. *siehe* Mehrfachbetrieb
- Multirahmen **22**, 27, 31, 42, 48,
125–127, 197
- Multitasking 319
- Multithreading 319
- N**
- N **18**, 32, 38, 55, **62**, 63, 151, 152
- Nachbarkanalstörung *siehe* ACI
- Nachlaufzeit **282**
- Nachrichtenbündelung .. **46**, 196, 205,
281
- Nachrichtenflussdiagramm *siehe* MSC
- NAP **73**, **75**, **98**
- NBCH **69**, **72**, **82**, **83**, 188, 261
- NDB **24**, **28**
- Nebenorganisationskanal *siehe* SCCH
- Nettobitrate 10
- Network Layer* *siehe* N
- Network Layer SAP Addresses* .. *siehe*
 NSAP
- Network News Transfer Protocol* *siehe*
 NNTP
- Network Termination* *siehe* NT
- Network Termination Type 1* ... *siehe*
 NT1
- Network Termination Type 2* ... *siehe*
 NT2
- Netzschicht *siehe* N
- nichtöffentlicher beweglicher Landfunk*
 siehe nöbL
- NNTP 340
- nöbL **5**, **6**
- NOR **80**, **81**, **230**
- Normal Block Channel* .. *siehe* NBCH
- Normal Continuous Downlink Burst* ..
 siehe NDB
- Normal Mode* *siehe* NOR
- Normal Uplink Burst* *siehe* NUB
- Notrufnachrichten 13
- NSAP **14**, **15**
- NT1 **17**
- NT2 **18**
- NT **11**, **17**, **18**, 284, 330
- Nu 50, **52**, 197, 202, 203
- NUB **24**, **28**
- Number of Access Periods* *siehe* NAP
- Number of Random Access*
 Transmissions on Uplink ... *siehe* Nu
- Nutzdatenbits 40, 41
- NWK 233
- O**
- Object Modeling Technique* *siehe*
 OMT
- Object-Oriented Software Engineering*
 siehe OOSE
- Objektentwurf ... **91**, **92**, **93**, 138, 325
- Objektmodell 89, 90, 337
- OC **244**
- OFDM 351
- OMT 88–91, 285, **321**, **323**, 337

OOSE 88, 285, 321, 332
Open Channel Call *siehe* OC
Open Service Architecture . *siehe* OSA
Open Systems Interconnection .. *siehe* OSI
 Optimalempfänger 254
 Optimalfilter 182
Orthogonal Frequency Division Multiplexing *siehe* OFDM
 OSA 353
 OSI ... 11, 18, 144, 151, 284, 330, 333

P

Pacific Digital Cellular ... *siehe* PDC
Packet Data Optimised ... *siehe* PDO
 Paging *siehe* Funkruf
 Paketdatendienste 11
 Paketfehlerverhältnis *siehe* MER
 Paketverzögerung iii, 3, 109, 112, 113, 115, 119–122, 132, 135, 195, 198, 202–204, 206, 208, 209, 213, 215, 216, 316, 323, 335, 343, 350
 PAMR 7
 Pathloss *siehe* Pfadverlust
 PBX 219
 PC 220, 231, 232
 PCI 41, 65, 126, 251, 293
 PCM 25
 PDC 342
 PDF 4
 PDF² 205, 290
 PDO . iii, iv, 2, 5, 8, 9–13, 18, 61, 62, 63, 74, 76, 82, 83, 95–97, 99–101, 103, 104, 107, 117, 118, 121–123, 127, 129, 133, 136, 188, 193, 206–209, 213, 215, 219, 232–234, 261, 286, 296, 297, 314, 315, 317, 323, 348, 349
 Bitübertragungsschicht .. 18, 62, 63, 70, 82
 Kanäle 69–72, 82, 213

ACCH 70, 72
 DTCH 71, 72
 MBCH 69, 72, 82
 MCCH 70, 72, 213
 NBCH 69, 72, 82
 RACH 71, 72
 UTCH 71, 72
 LLC 62, 63
 MAC 62, 69
 Netzschicht 62, 63
 PDU ... 66–69, 71–74, 76–82, 97, 104, 117, 121–123, 127–131, 207, 208, 228–230, 288, 293, 296
 AA . 71, 72, 73, 76, 78–80, 97, 104, 122, 208
 AI 66, 67–69
 AP 71, 72–74, 76–78, 117, 207, 208
 DD1 71, 72, 79, 80
 DD2 . 71, 72, 79–81, 128, 129, 288, 293
 DR1 71, 72, 76, 78, 79, 81, 123, 127
 DR2 71, 72, 76, 78, 79, 81, 127
 DR3 71, 72, 76, 78, 79, 81, 127
 RR 66, 67–69, 79, 81
 SIN1 .. 71, 72, 77, 78, 82, 228, 229
 SIN2 .. 71, 72, 77, 79, 228, 229
 UD1 ... 71, 72, 74, 76, 78, 81, 117, 121, 130
 UD2 71, 72, 76, 81, 128, 129–131, 288, 293, 296
 UI 66
 UR 72, 79, 81
 WU 72, 77–81, 230
 SAP . 63, 64, 69, 78, 80, 227–229
 TLA 63, 64, 78, 80, 227
 TLB 63, 69, 228
 TLC 63, 69, 229
 Sicherungsschicht 62, 63

- SP 67–69, 78–81, 228–230
 TL-ADDLISTreq 229, 230
 TL-BROADCAST-1conf . 229
 TL-BROADCAST-1ind .. 229
 TL-BROADCAST-1req .. 229
 TL-BROADCAST-2conf . 229
 TL-BROADCAST-2ind .. 229
 TL-BROADCAST-2req .. 229
 TL-CONNECTconf 67–69, 228
 TL-CONNECTind 67, 68, 228
 TL-CONNECTreq 67, 68, 78–81, 228
 TL-DATAconf 68, 69, 228
 TL-DATAind 68, 69, 228
 TL-DATAreq ... 68, 69, 78–81, 228
 TL-MONITORind 229
 TL-MONITORreq 229
 TL-SCANconf 229
 TL-SCANreq 229
 TL-SELECTconf 229
 TL-SELECTreq 229
 TL-SERVINGind 229
 TL-UNITDATAind 228
 TL-UNITDATAreq 228
 PDU . 31, 38, 40–44, 46, 48–53, 55–57, 59–61, 65–69, 71–74, 76–82, 97, 103, 104, 107, 117, 121–123, 125–131, 136, 144, 151, 152, 202, 207, 208, 215, 228–230, 251, 280, 288, 293, 296
 PEI 231
 Persistenz 159
Personal Handyphone System ... siehe PHS
 Pfadlänge 147
 Pfadverlust ... 42, 171, 282, 283, 319, 324, 327, 336
 Phasenfehler 184
 Phasenumtastverfahren siehe DQPSK
Phrase Representation siehe PR
 PHS 319
Physical Layer siehe PL
 PICS 232–234
 PL 18, 29, 31, 40, 62, 63, 70, 82
 PMR 7, 325
 PMR² 7
 Poisson 109
Portable Document Format siehe PDF
 Power Control siehe Leistungsregelung
 Power Delay Profile siehe Verzögerungsleistungsprofil
 PPC 220, 232
 PR 151, 163–165
Pre-emptive Priority Call . siehe PPC
Preemptive Head Of Line Priority ... siehe PREHOL
 PREHOL 106
 Presiding Block siehe Startblock
 Prio1 75, 76
 Prio2 75, 76, 105
 Priorität 49, 52, 74, 76, 105
 maximale 103
 minimale 49
Priority 1 siehe Prio1
Priority 2 siehe Prio2
Priority Call siehe PC
Private Branch Exchange . siehe PBX
Private Mobile Radio siehe PMR²
Probability Distribution Function siehe PDF²
 Problemanalyse 88
 Produktentwicklungszyklus . 138, 139
Professional Mobile Radio siehe PMR
 Profifunk 7
 Programmierrichtlinien 162, 164
Protocol Control Information ... siehe PCI
Protocol Data Unit siehe PDU
 Protokolladateneinheit siehe PDU
 Protokollsteuerinformation . siehe PCI

- Protokollverschnitt 46, 281
 Prüfsumme *siehe* FCS
 Pseudo-Bayes-Algorithmus *siehe* Algorithmus
 PSTN 219, 231
 PTT 12, 107, 282, 285
Public Access Mobile Radio *siehe* PAMR
Public Switched Telephone Network .. *siehe* PSTN
Pulse Code Modulation ... *siehe* PCM
Punkt-zu-Mehrpunkt *siehe* PzM
Punkt-zu-Punkt *siehe* PzP
 Punktierung 36, 188, 282
 Purify 162
Push-to-Talk *siehe* PTT
 PzM 11–13, 55, 64, 228, 244
 PzP . 11–13, 55, 64, 204, 228, 244, 320
- Q**
- QAM 348
 QoS 54, 56, 60, 126, 280
 QPSK 337, 345
Quadrature Amplitude Modulation *siehe* QAM
 Quadraturkomponente 179, 182
Quality of Service *siehe* QoS
 Quasi-Transmission Trunking ... *siehe* Quasi-Übertragungsbündelung
 Quasi-Übertragungsbündelung ... 282
Quaternary Phase Shift Keying . *siehe* QPSK
- R**
- RA 180, 181, 188, 189, 196, 205, 207, 213, 241, 243, 261
 RACH 71, 72
Radio Equipment and Systems .. *siehe* RES
 Rahmen 22, 24, 25, 27, 28, 31, 40, 42, 43, 48, 51–53, 55–57, 65–70, 78–81, 119, 197, 221
 Rahmenlängenfaktor 52, 97
 Rahmensynchronisation 48
 RAM 139, 148, 149
 Randbedingung
 zeitliche 145, 146
Random Access Channel *siehe* RACH
Random Access Memory . *siehe* RAM
 Random Access Protocol *siehe* Zufallszugriffsprotokoll
Rate-Compatible Punctured Convolutional *siehe* RCPC
 Rauschen 170, 175, 179, 188, 189, 204, 213, 215, 282, 316, 337
 Ray-Tracing *siehe* Strahlenverfolgungstechnik
 RB 127
 RCPC 35, 36
 RD 75, 76, 104, 208, 209, 213
 Reassemblierung 65
 Reassociation *siehe* Zusammenstellung
Receiver Not Ready *siehe* RNR
Receiver Ready *siehe* RR
 Reed-Muller-Code 34, 38
 Referenzzähler 156
 Reflexion 171, 283
 RegTP 10
Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post ... *siehe* RegTP
 Reihung 64, 65
Repetitive Simulation Trials After Reaching Threshold . *siehe* RESTART
 RES 8, 219
Reservierte Blöcke *siehe* RB
 Reservierungszuteilung .. iii, 196, 207, 216, 315, 349
 Reservierungszuteilungsstrategie . 316
 RESTART 159, 328
Retry Delay *siehe* RD
 RNR 57

- Roll-Off-Faktor **184**, **188**
Round Robin *siehe* RR^2
 RR **66**, **67–69**, **79**, **81**, **344**
 RR^2 **106**
 $RTTI$ **155**, **158**
 Rufeinschränkung **220**
 Rufnummernidentifikation **220**
 Rufsperr **220**
 Rufumleitung **220**
 Rufweiterleitung **220**
Run-Time Type Information *siehe* $RTTI$
 Rundfunk **13**
 Rundfunkruf **12**, **204**
 Rundsendung .. **12**, **24**, **33**, **38**, **42**, **63**, **222**
Rural Area *siehe* RA
 RWTH **4**
- S**
- S-ALOHA .. **3**, **9**, **10**, **48**, **73**, **74**, **95**, **97**, **102**, **109**, **110**, **113**, **115**, **135**, **198**, **206–208**, **216**, **283**, **324**, **329**, **334**, **335**, **343**, **350**
 S-CLNS **63**
 S/N *siehe* Signalstörabstand
 SACCH **25**, **26**
 SAP .. **32**, **33**, **41–43**, **54**, **58**, **63**, **64**, **69**, **78**, **80**, **221–229**
 SB **24**, **28**
 Scanning **38**, **225**, **226**
 SCCH **52**, **119**, **286**
 SCH/F **26**, **27**, **28**, **40**, **42**, **43**
 SCH/HD .. **26**, **27**, **28**, **40**, **42**, **43**, **188**, **261**
 SCH/HU **26**, **27**, **28**, **41–43**
 SCH **26**, **27**, **44**
 Schicht **45**
 Schieberegister **280**
 Schiefe **257**
 Schmalbandkanal **178**
- Schnittstellendateneinheit . *siehe* IDU
 Schnittstellendefinitionssprache . *siehe* IDL
 Schnittstellensteuerinformation . *siehe* ICI
 Schwund
 langsamer ... **147**, **171**, **283**, **336**
 schneller **147**, **172**, **181**, **283**, **336**
 Scrambling *siehe* Verschlüsselung
SDL Performance Evaluation Environment and Tools *siehe* SPEET
SDL Performance Evaluation Environment and Tools Class Library *siehe* SPEETCL
SDL-oriented Object Modeling Technique *siehe* SOMT
 SDL .. **iii**, **iv**, **2**, **3**, **87**, **91–94**, **137–139**, **141–143**, **146**, **149**, **150**, **153**, **156**, **157**, **163–168**, **195**, **215**, **216**, **234**, **256**, **283**, **315**, **317**, **320**, **323**, **325–327**, **330**, **331**, **337**, **339**, **340**, **344**, **348–350**
 SDU ... **48**, **54–56**, **65**, **69**, **70**, **82**, **151**, **251**, **293**
Secondary Control Channel *siehe* SCCH
 Segmentierung . **48**, **54**, **56**, **64**, **65**, **70**, **279**
 Seiteneffekt **162**
 Sende-Empfangseinheit **203**, **213**
 Sendeergebnis **96**, **314**, **329**
 Senderate **109**, **110**, **113**, **119**, **202–205**, **207–209**
Service Access Point *siehe* SAP
Service Data Unit *siehe* SDU
Service Primitive *siehe* SP
Short Number Addressing . *siehe* SNA
Short Subscriber Identity ... *siehe* SSI
 Short-Term Fading ... *siehe* Schneller Schwund
Shortest Job First *siehe* SJF

- Shortest Processing Time* . siehe SPT
Shortest Remaining Processing Time .
 siehe SRPT
Shortest Remaining Service Time
 siehe SRST
 Sicherungsschicht siehe DL²
 Sichtverbindung siehe LOS
 Signal to Noise Ratio siehe
 Signalstörabstand
Signalling Channel siehe SCH
 Signalqualität 43, 230
 Signalstörabstand **171**, 175, 188, 189,
 196, 207
 SIM **14**, 234
Simple Mail Transfer Protocol .. siehe
 SMTP
 SIN1 **71**, 228
 SIN2 **71**, 228
 SJF **106**
 Slot Stealing 33, 44, 45, 47, 48
 Slot-Flag **31**
Slotted-ALOHA siehe S-ALOHA
Slow Associated Control Channel
 siehe SACCH
 SMTP 143, 144, 252, 313, 340
 SNA **220**
Software Performance Engineering ...
 siehe SPE
 Softwarequalitätssicherung 162
 SOMT **88**
 SOR **73**, 83
 SP . 58–61, 65, 67–69, 78–81, 221–230
 SPE 347
Specific Connectionless Network
Service siehe S-CLNS
Specific Semi-Markov Process ... siehe
 SSMP
Specification and Description Language
 siehe SDL
 SPEET **3**, 94, **137**, 138, 139, 141, 142,
 144, 146–148, 150, 153, 155, 193,
 215, 216, 317, 345, 348, 349
 SPEETCL . **3**, **155**, 156–159, 161–165,
 167, 188, 195, 215, 245–247, 259,
 313–317
 Speicherverwaltung **156**, 164
 Splitting-Algorithmus siehe
 Algorithmus
 Sprachaktivität 46, 237, **280**, 282, 285
 Sprachcodec .. **25**, 128, 129, 136, 222,
 326
 Sprache 143, 144
 Sprache, kanalvermittelt 195
 Sprachrahmen **25**, 136
 Sprachübertragung 12
 SPT **106**, 107, 248
Square Root Raised Cosine siehe
 SRRC
 SRPT **106**, 328, 344
 SRRC **30**, 182, **184**, 254, 287, 291, 298
 SRST **106**
 SSI **14**, 15, 40, 41, **70**, 125, 126
 SSMP 315
 SSN 22, 28
Start of Reservation siehe SOR
 Startblock **69**, 82
 State Chart siehe
 Zustandsübergangsdiagramm
 Statusmeldungen 13
 STCH **26**, 28, 40–43, 188, 261
Stealing Channel siehe STCH
 Steuerebene 18, 41
 Steuerkanal **24**, **25**, 27
 Stochastische Annäherung siehe
 Algorithmus
 Strahlenverfolgungstechnik 324
 Streuung **171**, 283
 Subburst siehe Teilbüschel
Subscriber Identity Module siehe SIM
 Subslot siehe Teilzeitschlitz
Subslot Number siehe SSN
Switching and Management

- Infrastructure* *siehe* SwMI
 SwMI 12, 13, 15, 18, 19, 75, 107, 123, 196, 220
 Symbol 117
 Symboldauer 171, 283
 Symbolrate 188
Synchronisation Continuous Downlink Burst *siehe* SB
System Information Type 1 *siehe* SIN1
System Information Type 2 *siehe* SIN2
 Systemanalyse 90, 91, 324, 325
 Systemanforderungsanalyse 88
 Systementwurf .. 91, 92, 143, 324, 325
 Systemoperationsmodell 90
 Szenarium 237
- T**
- TA 18
 TAA1 236
 Tail-Bits 36
 Taktfrequenz 139
Talking Party Identification *siehe* TPI
 TBR 236
 TCH ... 25, 26, 28, 38, 43, 44, 46, 47, 282, 285, 347
 TCP 313, 340
 TDM 19, 21
 TDMA .. 9, 10, 19, 21, 22, 24, 50–52, 323, 351
 TE1 18
 TE2 16, 18
 TE 17, 18, 330
 TEA1 236
 TEA2 236
 TEI 14
 Teilbüschel 72, 73, 83
 Teilschicht . 2, 5, 18, 29, 31–34, 38, 40, 41, 43, 45, 46, 48, 55, 56, 58–61, 63, 65, 66, 69–72, 77–82, 221–224, 226, 228–230
 Teilzeitschlitz .. 22, 24, 26, 27, 40–42, 49, 50, 52, 53, 119, 222, 286
Telecommunication Standardization Sector of ITU *siehe* ITU-T
Telecommunications Industry Association *siehe* TIA
 Teledienst 11–13, 284
 Telemetrie 8
 Telnet 143, 144, 313, 340
Terminal Adapting Functions ... *siehe* TA
Terminal Equipment *siehe* TE
Terminal Equipment Type 1 *siehe* TE1
Terminal Equipment Type 2 *siehe* TE2
Terrestrial Trunked Radio *siehe* TETRA
 Testsuite 92
 TETRA 343
TETRA Equipment Identity *siehe* TEI
TETRA LLC A-SAP *siehe* TLA-SAP
TETRA LLC B-SAP *siehe* TLB-SAP
TETRA LLC C-SAP *siehe* TLC-SAP
TETRA LLC SDU ... *siehe* TL-SDU
TETRA MAC A-SAP *siehe* TMA-SAP
TETRA MAC B-SAP *siehe* TMB-SAP
TETRA MAC C-SAP *siehe* TMC-SAP
TETRA MAC D-SAP *siehe* TMD-SAP
TETRA MAC V-SAP *siehe* TMV-SAP
TETRA MAC-SDU .. *siehe* TM-SDU
TETRA Management Identity .. *siehe* TMI
TETRA PL C-SAP . *siehe* TPC-SAP
TETRA PL-SAP *siehe* TP-SAP
TETRA Subscriber Identity *siehe* TSI
 TETRA .. iii, iv, 1–3, 5, 8, 10, 12, 13,

- 15, 16, 18–20, 24, 26, 29, 32, 63,
95, 96, 105, 107, 109, 110, 122,
128, 129, 155, 169, 170, 181, 182,
186, 188, 193, 195, 198, 202, 203,
205, 206, 208, 213, 215–217, **219**,
222, 230, 233–237, 280, 282, 285,
314–318, 323, 325, 326, 346–349,
352
TETRAPOL 346
TIA 217
Tiefpass 182, 184
Time Constraint *siehe*
Randbedingung
Time Division Multiple Access .. *siehe*
TDMA
Time Division Multiplex . *siehe* TDM
Time Sharing Mode *siehe*
Zeitscheibenverfahren
Timer *siehe* Zeitgeber
Timeslot *siehe* Zeitschlitz
Timeslot Number *siehe* TN
TL-SDU 56, 57, 197
TL 17
TLA-SAP 33, 54, **63**, 64, 78, 80, **223**,
226, 227
TLB-SAP . 33, **63**, **69**, 222, **223**, **228**
TLC-SAP . 33, **63**, **69**, 222, **223**, 224,
229
TM-SDU 40, 41, **221**
TMA-SAP 33, 42, 58, **221**
TMB-SAP 33, 43, **222**
TMC-SAP 33, **222**
TMD-SAP 33, 41, 43, 222
TMI 14, 15
TMV-SAP **32**, 33
TN 22, 27, 28
ToC **221**
Topographie 147, 180, **284**
TP-SAP 33
TP **24**, 28
TPC-SAP 33
TPI **220**, 232
TR 235, 236
Trägerdienst **11**, 12, **13**, **284**
Trägerfrequenz **20**, 21, 23, 24, **29**, 31,
42, 70, 83, 121, 129, 131, 146, 147,
171, **188**, 196, 203, 204, 207, 213
Traffic Channel *siehe* TCH
Traffic Physical Channel ... *siehe* TP
Traffic Usage Marker 50
Trainingssequenz *siehe* TS
Transaktion . **70**, 71, 72, 74, 76, 78–81
Transceiver *siehe* Sende-
Empfangseinheit
Transfer of Control *siehe* ToC
Transmission Control Protocol .. *siehe*
TCP
Transmission Line *siehe* TL
Transmission Trunking *siehe*
Übertragungsbündelung
Tree and Tabular Combined Notation
siehe TTCN
Trunked Mobile Radio System .. *siehe*
Bündelfunksystem
TS **27**, 28, 31, 73, 235
TSI 14, 15
TTCN **91**, 92, 284, 320, 326, 330, 334
TU **180**, 181, 188, 189, 196, 205, 207,
213, 214, 237, 238, 240, 261
Type Cast *siehe* Typumwandlung
Typical Urban *siehe* TU
Typumwandlung 155
- ## U
- UD1 **71**
UD2 **71**
Übertragung
bestätigt 55–58, 64, 66, 228, **284**
diskontinuierlich . **24**, 33, 42, **285**
kontinuierlich ... **24**, 33, 42, **285**
reserviert 72

- unbestätigt ... 56, 57, 59, 64, 66, 228, **284**
 - verbindungslos . 55, 56, 228, **284**
 - verbindungsorientiert ... 56, 228, **284**
 - Übertragungsbündelung **46**, 281, 282, **285**
 - Übertragungsmodell ... 138, 141, 143, **146**, 253
 - UI **66**
 - UL **8**, 9, 10, **20**, **21**, 22–24, 26–28, 40, 41, 50–52, 62, 64, 70–72, 74–76, 78–81, 83, 121, 127, 129, 175, 176, 195
 - UML **88**, 321, 323, 325, 329
 - UMTS Terrestrial Radio Access Network* *siehe* UTRAN
 - UMTS **216**, 333, 351–353
 - Unacknowledged Information* *siehe* UI
 - Unallocated Physical Channel* ... *siehe* UP
 - unbestätigt **284**
 - Unified Modeling Language* *siehe* UML
 - Universal Mobile Telecommunication System* *siehe* UMTS
 - UP **24**, 28
 - Uplink* *siehe* UL
 - Uplink Data Type 1* *siehe* UD1
 - Uplink Data Type 2* *siehe* UD2
 - Uplink End Subburst **83**
 - Uplink Even Subburst **83**
 - Uplink Odd Subburst **83**
 - Uplink Response* *siehe* UR
 - Uplink Start Subburst **83**
 - Uplink Traffic Channel* .. *siehe* UTCH
 - Uplink Transfer* *siehe* UT
 - UR **72**
 - Use Case *siehe* Benutzungsfall
 - User Plane *siehe* Benutzerebene
 - UT **71**
 - UTCH **71**, 72
 - UTRAN 353
- V**
- V+D . iii, iv, 2, 5, **8**, 9–13, 18, 21, 23, 32, 34, 38, 40, 46, 54, 62, 83, 95–97, 102, 103, 107, 110, 115, 118, 122, 123, 127–129, 135, 136, 188, 193, 195, 202–204, 206–208, 213, 215, 219, 221, 230–235, 261, 279–282, 285, 286, 293, 296, 297, 314, 316, 317, 323, 346, 348, 349
 - Benutzerebene 33
 - Bitübertragungsschicht .. 18, **29**, 31, 33, 40
 - Kanäle . 25–28, 30, 34, 38, 40–44, 46, 47, 50–53, 119, 131, 136, 282, 285, 286
 - AACH . **26**, 27, 28, 34, 38, 42, 44, 50
 - ACCH **25**
 - BCCH **26**, 27
 - BLCH **26**, 27, 28
 - BNCH **26**, 27, 28, 42, 43
 - BSCH .. **26**, 27, 28, 30, 38, 42, 43
 - CCH **25**
 - CLCH **26**, 27, 28, 51
 - FACCH **25**, 26
 - LCH **26**
 - MCCH .. 42, **52**, 53, 119, 131, 136, 286
 - SACCH **25**, 26
 - SCCH **52**, 119, 286
 - SCH **26**, 27, 44
 - SCH/F **26**, 27, 40, 42, 43
 - SCH/HD ... **26**, 27, 40, 42, 43
 - SCH/HU **26**, 27, 41–43
 - STCH **26**, 28, 40–43
 - TCH **25**, 26, 28, 38, 43, 44, 46, 47, 282, 285

- LLC **54**
- MAC **33**
- Netzschicht 18, **32**, **38**
- PDU 38, 40–44, 46, 49–53, 55–57, 59–61, 97, 103, 123, 125–127, 202, 280, 293, 296
 - Access-Assign .. 38, **40**, 42, 46, 50–53
 - Access-Define .. **40**, 42, 44, 46, 49, 51, 52, 97, 103, 202
 - AL-Ack **57**
 - AL-Data **56**, 57, 126, 293
 - AL-Data-AR **57**
 - AL-Disc **57**, 59, 61, 126
 - AL-Final **57**, 126, 293
 - AL-Final-AR **57**
 - AL-RNR **57**
 - AL-Setup . **56**, 59, 60, 126, 280
 - AL-SETUP 126
 - AL-UData **57**
 - AL-UFinal **57**
 - BL-Ack 55, **56**
 - BL-AData **55**, 56
 - BL-Data **56**
 - BL-UData **56**
 - MAC-Access .. **40**, 41, 42, **51**, 125
 - MAC-Data .. **41**, 42, 126, 127, 293
 - MAC-End 40, 41, **42**
 - MAC-End-HU 40, **41**, 42
 - MAC-Frag 40, **41**, 42, 125–127, 293, 296
 - MAC-Resource **41**, 42, 51, 52, 123, 125
 - MAC-Traffic **41**, 42, 43
 - MAC-U-Signal **41**, 43
 - Sync **42**, 43, 46
 - Sysinfo **42**, 43, 46
- SAP **32**, **33**, 41–43, 54, 58, 221–224, 226
- TLA 33, 54, **223**, 226
- TLB 33, 222, **223**
- TLC 33, 222, **223**, 224
- TMA 33, 42, 58, **221**
- TMB 33, 43, **222**
- TMC 33, **222**
- TMD 33, 41, 43, 222
- TMV **32**, 33
- TP 33
- TPC 33
- Sicherungsschicht **32**
- SP 58–61, 221–227
 - TL-CANCELreq 224, 226
 - TL-CONNECTind 60
 - TL-CONFIGUREconf ... **225**, 227
 - TL-CONFIGUREreq **224**, 225, 227
 - TL-CONNECTconf ... 59, 60, **223**, 224, 226
 - TL-CONNECTind ... 59, **223**, 224, 226
 - TL-CONNECTreq ... 59, **223**, 224, 226
 - TL-CONNECTresp .. 60, **223**, 224, 226
 - TL-DATAconf .. 59, **223**, 224, 226
 - TL-DATAind 59, **223**, 224, 226
 - TL-DATAreq 58, **223**, 224, 226
 - TL-DATAresp .. 58, **223**, 224, 226
 - TL-DISCONNECTconf ... 60, **223**, 224, 226
 - TL-DISCONNECTind 60, **223**, 224, 226
 - TL-DISCONNECTreq . 60, 61, **223**, 224, 226
 - TL-MEASUREMENTind **225**, 227

- TL-MONITOR-LISTreq . 225, 226, 227
- TL-MONITORind .. 225, 226, 227
- TL-RELEASEind ... 223, 224, 226
- TL-RELEASEreq 60, 61, 223, 224, 226
- TL-REPORTind . 58–61, 223, 224–227
- TL-SCAN-REPORTind .. 225, 226, 227
- TL-SCANconf .. 225, 226, 227
- TL-SCANreq ... 225, 226, 227
- TL-SELECTconf ... 225, 226, 227
- TL-SELECTind 225, 226, 227
- TL-SELECTreq 225, 226, 227
- TL-SELECTresp 225, 226
- TL-SYNCind ... 223, 225, 227
- TL-SYNCreq ... 223, 225, 227
- TL-SYSINFOind 223, 225, 227
- TL-SYSINFOreq 223, 225, 227
- TL-UNITDATAconf . 223, 224
- TL-UNITDATAind . 223, 224, 226
- TL-UNITDATAreq . 223, 224, 226
- TMA-CANCELreq .. 221, 226
- TMA-RELEASEind 222
- TMA-REPORTind .. 222, 226
- TMA-UNITDATAind 58, 221, 226
- TMA-UNITDATAreq 221, 226
- TMB-SYNCind 227
- TMB-SYNCreq 227
- TMB-SYSINFOind 227
- TMB-SYSINFOreq 227
- TMC-CONFIGUREconf .. 227
- TMC-CONFIGUREreq ... 227
- TMC-MEASUREMENTind ...
- TMC-MONITOR-LISTreq 227
- TMC-MONITORind 227
- TMC-REPORTind 227
- TMC-SCAN-REPORTind 227
- TMC-SCANconf 227
- TMC-SCANreq 227
- TMC-SELECTconf 227
- TMC-SELECTind 227
- TMC-SELECTreq 227
- TMD-REPORTind .. 222, 227
- TMD-UNITDATAind 222, 227
- TMD-UNITDATAreq 222, 227
- Validierung 330
- Variable Bit Rate* *siehe* VBR
- Varianz 257
- VBR 315, 343
- VDB 15
- Verbindung 55
- Verbindungsdauer 197
- Verbindungsendpoint *siehe* CEP
- Verbindungsendpointbezeichner *siehe* CEP-Id
- verbindungslos 284
- verbindungsorientiert 284
- Verifikation 92, 340
- Verkehrsgüte *siehe* GoS
- Verkehrskanal .. 24, 25, 27, 38, 44–48, 204, 281, 282, 285
- Verkehrslast 49
- Verkehrslastgenerator . 138, 141, 143, 144
- Verklemmung 350
- Verminderungsfaktor der Gleichkanalstörung 174
- Vermittlungs- und Verwaltungsinfrastruktur *siehe* SwMI
- Verschlüsselung 31, 37
- Verschränkung 33, 36
- Verteilung
 - Log-Normal 147

Rayleigh 147, 178
 Rice 147, 178
Very Low Duty Mode siehe VLD
 Verzögerungsleistungsprofil **172, 180**,
 281
 VHE 353
 Videotex 13
 Vielfachzugriff **285**
Virtual Home Environment siehe
 VHE
Visited Data Base siehe VDB
 Viterbi-Algorithmus 321, 333
 VLD 72, 77, 78, 80, 81, **230**
Voice plus Data siehe V+D
 Vorwärtsfehlerkorrektur ... siehe FEC

W

Waiting Time siehe WT
Wake Up siehe WU
 Wartewahrscheinlichkeit 135, 316
 Wartezeit ... **110, 115, 118, 119, 123**,
 125, 132–135, 202–204, **237**
 Wettbewerb 74
 Wichtungsfaktor **195**
 Wiederholrate 113, 115, 118, 119
Wireless Local Area Network ... siehe
 WLAN
 WLAN 352, 353
World Wide Web siehe WWW
 WT 50, 52, **115**, 197, 202, 203
 WU **72, 230**
 WWW ... 143, 144, 251, 252, 313, 319

X

X.25 11, 63
 X.75 63

Z

Zeitdispersion 147, **172**, 178, 182, **285**
 Zeitgeber ... 31, 43, 44, 47, 51, 57, 67
 Zeitmultiplex 19
 Zeitscheibenverfahren 24, 34, 42
 Zeitschlitz **21**, 23, 24, 26–28, 31,
 40–43, 50–53, 55, 96, 97, 99, 100,
 109–111, 115, 119–121, 125, 127,
 131, 222, 283, 314
 Zeitschlitzbitmuster **52**
 Zelle 42, 196
 Zellgruppe 42, **173**
 Zellgruppengröße ... 3, **173**, 174, 177,
 188, 189, 196, 204–207, 213, 214,
 216, 261, 322
 Zellwechsel **19**, 26
 Zufallszugriff 40, 41, 44–48, **49**, 51–53,
 70, 71, **73**, 74, 76–78, 96, **115**,
 117, 118–123, 130, 134–136, 140,
 197, 202, 203, 207–209, 213, 222,
 282, **286**, 323, 349
 Zufallszugriffsprotokoll **48, 73**, 78, 140
 Zugriffscode siehe AC
 Zugriffsfenster . **73**, 74, 76, 78, 79, 97,
 100, 101, 103, 104, 117, 121, 122,
 208, 209, 213, **286**
 Zugriffsperiode **73**, 74, 76, 78, 97, 117,
 121, 122, 207, 208, **286**
 Zugriffsrahmen **51**, 52, 53, 96, 97, 102,
 103, 115, 118–122, 135, 202, **286**
 Zugriffsverzögerung 49
 Zugriffswiederholung 76
 Zusammenstellung **48**
 Zusatzdienst ... **12**, 15, 219, 221, **286**
 Zustandsdiagramm 2, 5
 Zustandsübergangsdiagramm .. **90**, 92
 Zwischenankunftszeit 144

LEBENS LAUF

28. Mai 1969	Geboren in Düsseldorf
1975–1979	Grundschule am Friedrichsborn in Unna
1979–1980	Geschwister-Scholl-Gymnasium in Unna
1980–1988	Humanistische Rabanus-Maurus-Schule (Domgymnasium) in Fulda (Abitur: Juni 1988)
07/1988–10/1989	Wehrdienst in der 4. Kompanie des 2. Panzeraufklärungsbataillons in Hessisch-Lichtenau
10/1989–11/1994	Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen (Vertiefungsrichtung Technische Informatik) Diplomarbeit am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen bei Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke (Thema: „Leistungsbewertung des Vielfachzugriffsprotokolls des Bündelfunksystems TETRA“)
01/1995–06/2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen
12/1997	Gründung der AixCom Gesellschaft für Telekommunikations-Dienstleistungen mbH
Seit 06/2000	Geschäftsführender Gesellschafter der AixCom GmbH
Seit 10/1999	Mitglied der FDP-Fraktion im Rat der Stadt Aachen
Seit 08/2001	Vorsitzender der FDP-Fraktion im Rat der Stadt Aachen
15. 12. 2000	Eheschließung mit Frau Marion M. Heckötter aus Laer, Westfalen
02. 06. 2001	Kirchliche Trauung mit Frau Marion M. Steppeler
13. 04. 2002	Geburt des Sohnes Kilian David in Aachen

NACHWORT

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. Bernhard Walke für die Anregungen zum Thema der Dissertation, die sehr gute, fortwährende Betreuung und Förderung der Arbeit, sowie die kritische Durchsicht des Textes. Herrn Prof. Dr. sc. techn. Heinrich Meyr danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Diplomanden (D), Studienarbeitern (S) und studentischen Hilfskräften (H), die durch ihre Arbeit wesentlich zum Gelingen beigetragen haben: Gebhard Bouwer (H), Axel Brinkmann (D), Michael Büter (D, H), Holger Cornelsen (D, S), Jens Ergezinger (D, S), Dieter Kehren (S), Volker Krause (D), Bernd Kütting (D, H), Dirk Kuypers (D), Michael Löttner (D), Jürgen Lueg (D, S), Jens Holzhammer (geb. Matschke, S), Wolfgang Olzem (H), Dieter Quaschik (D), Stephan Recker (D), Klaus Riede (D), Thorsten Schumann (D, S), Jochen Sander (H), Wolfram Seidel (H) und Stefan Seidenberg (D).

Besonderer Dank gilt dem leider bereits verstorbenen Prof. Dr.-Ing. Friedrich Schreiber, Frau Prof. Dr. rer. nat. Carmelita Görg und meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Martin Junius, Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhmer, Dr.-Ing. Matthias Lott, Dipl.-Ing. Peter Seidenberg und Dipl.-Ing. Matthias Siebert, die durch Veröffentlichungen, Mitarbeit in Projekten und ideenreiche Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Schließlich bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Marion M. Steppler, die die Mühe des Korrekturlesens dieser Arbeit auf sich genommen hat und in den letzten Jahren sehr viel Geduld mit mir hatte. Bei meinen Eltern und meinem Bruder bedanke ich mich für die fortwährende Unterstützung in den letzten Jahren. Bei meinem Sohn Kilian bedanke ich mich dafür, dass es ihn gibt und dass er in der Nacht vor der Doktorprüfung durchgeschlafen hat.

Aachen, im Juli 2002

Martin Steppler

Et hätt noch immer jot jejang!

Lebensweisheit des gemeinen
Rheinländers