

Studie im Auftrag der Zentrale Polizeitechnische Dienste

**Eignung der Standards ETSI/TETRA und
TETRAPOL zur Erfüllung der
betrieblich-taktischen Forderungen der
Behörden und Organisationen mit
Sicherheitsaufgaben (BOS)**

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke
RWTH-Aachen, Kopernikusstr. 16, 52074 Aachen

Stand: 15. Dezember 2000

Zusammenfassung

Die Standards TETRA und TETRAPOL sind beide in Europa als Plattformen für den Betrieb nationaler Bündelfunknetze ausgewählt bzw. in Gebrauch, wobei TETRA-Systeme noch im Aufbau sind.

Das Dienstespektrum ist bei beiden Systemen vergleichbar vielfältig. Der Aufbau der Protokollstapel an der Funkschnittstelle ist bei den beiden Standards sehr ähnlich. Wesentliche Unterschiede sind in den Schichten 1 und 2 zu erkennen, was u. a. bedeutet, dass TETRA-Funkgeräte in einem TETRAPOL-Netz und umgekehrt nicht betrieben werden können.

Beide betrachteten Standards sind prinzipiell für den Einsatz in BOS-Netzen geeignet. *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) wird durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Vierwertige Funk-Modulation
- Zeitmultiplexverfahren auf der Funkschnittstelle.
- Duplexbetrieb an der Funkschnittstelle für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation
- Gegenüber TETRAPOL deutlich höhere Datenübertragungsraten bei Multislotbetrieb (bis zu 28,8 kbit/s je Funkkanal bei ungeschützter Übertragung).
- Größere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation gegenüber TETRAPOL.
- Geringerer Spektrumsbedarf für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in großen Gruppen mit geringer Mobilität.
- Größere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in kleinen Gruppen mit hoher Mobilität.
- Größere Frequenzwiederholabstände (mindestens 21er-Cluster)

Insgesamt ist TETRA eher für eine Benutzergemeinde geeignet, die eine mittlere bis hohe Verkehrskapazität benötigt wie sie beispielsweise für öffentliche Bündelfunknetze erwartet wird. Fachleute erwarten auch für *Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* (BOS)-Benutzer ein so großes Nachrichten-Verkehrsaufkommen – insbesondere bei Integration aller BOS-Nutzer und bei Einführung von Datendiensten –, dass TETRA-Netze für BOS-Nutzer mit spürbarem Anteil an Punkt-zu-Punkt-Kommunikation neben der üblichen Gruppenkommunikation bevorzugt in Frage kommen.

TETRAPOL-Systeme sind seit Jahren in Frankreich in Gebrauch und haben ihre Eignung für die dort vorliegenden, von den deutschen BOS z. T. abweichenden Anforderungen bewiesen. Der TETRAPOL-Standard hat folgende Merkmale, die ihn für die Nutzung als BOS-System unter geeigneten Umständen empfehlen:

- Zweiwertige robustere Funkmodulation
- Frequenzmultiplexverfahren auf der Funkschnittstelle
- Halbduplexbetrieb auf der Funkschnittstelle
- Ausreichende Übertragungsrate für einfache Datendienste je Funkkanal (4,6 kbit/s geschützt, 7,4 kbit/s ungeschützt)
- Um 5 dB bis 10 dB höheres Linkbudget bei gleicher Sendeleistung, das bedeutet im Extremfall einen fast doppelten Zellradius.
- Im Vergleich zu TETRA eine wesentlich geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Entsprechend hoher Spektrumsbedarf für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Im Vergleich zu TETRA wesentlich höhere Spektrumskapazität für Gruppenkommunikation von Gruppen mit großem Aktionsradius und geringer Mobilität.
- Geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in kleinen Gruppen mit hoher Mobilität.

TETRAPOL-Systeme können als die bevorzugte Lösung angesehen werden, wenn ein robustes System mit preisgünstiger Funkversorgung für ausgedehnte Flächenländer mit kleinem bis mittlerem Nachrichtenverkehrsaufkommen – bevorzugt Gruppenkommunikation in statischen Gruppen, d. h. Sprache mit nur kleinem Datenanteil –, ausreichend großer Frequenzausstattung und keinen besonders hohen Ansprüchen an die Flexibilität bei der Kombination von Diensten gefordert wird.

Mit zunehmendem Nachrichtenverkehrsaufkommen, insbesondere bei Datenübertragung, gehen die durch das zweiwertige Modulationsverfahren und die kleinere Funkkanalbandbreite (12,5 kHz) bedingten Vorteile einer kostengünstigeren Infrastruktur verloren, wenn die verfügbare Frequenzbandbreite kleinere Zellradien erfordert, wie sie bei TETRA-Systemen systembedingt von Anfang an nötig sind. Spätestens dann machen sich die durch Erfordernis eines Transceivers pro Funkkanal bedingten höheren Kosten von TETRAPOL-Funkkanälen bemerkbar.

Die spektrale Effizienz für Gruppenkommunikation in bis zu etwa vier Zellen ist in TETRA höher als in TETRAPOL. Diese Aussagen gelten auch unter Berücksichtigung der Möglichkeit, Gleichwellenfunk in TETRAPOL-Systemen einzusetzen, der bzgl. der Kapazität nur für Gruppenkommunikation in großen Gruppen mit großem Aktionsradius nennenswerte Vorteile bringt.

Die für gering bis mittelmäßig belastete Systeme bestehenden Kostenvorteile des TETRAPOL-Systems, die vom geringeren Infrastrukturbedarf herrühren, gehen tendenziell verloren, wenn über die im Standard beschriebenen Dienste hinaus weitere Dienste gefordert werden, wie bei TETRA im Standard vorgesehen.

Die in Tabelle 0.1 auf der nächsten Seite zusammengefassten Modellrechnungen zeigen, dass für die im Netzmodell der Unterarbeitsgruppe Technik der Projektgruppe Digitalfunk der deutschen BOS geforderte Nachrichtenverkehrskapazität pro Zelle in urbanen bzw. Ballungsgebieten erhebliche Unterschiede zwischen einer TETRA- bzw. TETRAPOL-Lösung feststellbar sind:

Tabelle 0.1: Frequenzbedarf

geforderte Zahl Kanäle	Bandbreite/Zelle (kHz)		Bandbreite/Cluster (MHz)	
	TETRA	TETRAPOL	TETRA (21)	TETRAPOL (13)
7×4 (Deutschland)	175	350	3,675	4,55
4×4 (Belgien)	100	200	2,1	2,6
5×4 (Landesgrenzen)	125	250	2,625	3,25

Für den Vergleich der Systeme wird aufgrund einer geforderten Ausfallsicherheit von 95 % bei TETRA mit einem 21er-Cluster und bei TETRAPOL mit einem 13er-Cluster gerechnet. Der Bedarf für Organisationskanäle wird vernachlässigt. Die für urbane und Ballungsgebiete geforderte Zahl von 28 Kanälen je Zelle ist zweifellos von der BOS-Unterarbeitsgruppe Technik großzügig geschätzt worden. Das zeigt ein Vergleich mit der geplanten Ausstattung für das belgische TETRA-Netz ASTRID, wo von 16 Kanälen pro Zelle für Brüssel ausgegangen wird.

In Deutschland steht für das digitale BOS-Netz eine Frequenzbandbreite von 3 MHz (Angabe in der Ausschreibung des Pilotversuches) plus 2 MHz (ist allgemein bekannt) zur Verfügung. Berücksichtigt man, dass im europäischen Grenzbereich wegen Koordinationsbedarf mit Nachbarländern grob geschätzt nur die Hälfte, d. h. 2,5 MHz in Deutschland zur Nutzung zur Verfügung stehen, dann kann Tabelle 0.1 wie folgt interpretiert werden:

- Die in Deutschland für Ballungsgebiete geforderte Kanalausstattung ist mit beiden Systemtypen im vorhandenen 5 MHz Band problemlos realisierbar.
- Im Grenzgebiet zu europäischen Nachbarländern sind für beide Systemtypen Einschränkungen der verfügbaren Kapazität vorhanden, wobei TETRA dann etwa 20 Kanäle pro Zelle verfügbar machen kann, TETRAPOL ca. 16.

Wenn man dieselben Versorgungsgrade fordert und dieselben Verluste für Körperverluste, Gebäudedurchdringung usw. ansetzt, dann ist der maximale Radius einer urbanen

- TETRA-Zelle ca. 2 km und in einer
- TETRAPOL-Zelle ca. 3,75 km.

Die mit einer TETRAPOL-Zelle versorgte Fläche ist also in diesem Extremfall ca. dreieinhalb mal so groß. Das hat entsprechende Wirkungen auf die Infrastrukturkosten, da die Zahl der Basisstations-Standorte und der Aufwand im Festnetz bei TETRA entsprechend höher sind.

Unterstellt man einen zukünftig zu erwartenden höheren Bedarf an Datendiensten mittlerer Übertragungsrate, dann müssen TETRAPOL-Zellen verkleinert werden, um bei gegebenem Spektrum den zusätzlichen Verkehr durch Zellverkleinerung tragen zu können. Dabei wird die von einer TETRAPOL-Zelle bedeckte Fläche kleiner und kann mit steigendem Verkehrsaufkommen sogar die Fläche einer TETRA-Zelle unterschreiten. Da TETRA-Systeme eine höhere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation haben – vergleichbar der des *Global System for Mobile communication* (GSM) – sind TETRA-Systeme für eine solche höhere Nachrichtenverkehrsbelastung besser geeignet, während die

Grenzen von TETRAPOL-Netzen dann deutlich früher erreicht werden. Ein derart hoher Verkehr wird heute von den BOS nicht vorhergesehen.

TETRAPOL-Netze können eine höhere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation durch Einführung eines höherwertigen Modulationsverfahrens erreichen. Sie würden sich bzgl. der Spektrumskapazität dabei dem TETRA-Standard annähern und wettbewerbsfähig bleiben. Solche Maßnahmen bei TETRAPOL sind bisher nicht veröffentlicht worden.

Man kann also feststellen, dass für ein landesweites *Private Mobile Radiocommunications* (PMR)-Netz in Deutschland unter Berücksichtigung

- der Infrastrukturkosten,
- der Flexibilität der standardisierten Dienste,
- der für diese Dienste verfügbaren Nachrichtenverkehrskapazität,
- der Ausbaufähigkeit und der dafür erforderlichen Kosten und
- des Zeitbedarfs für wichtige BOS-Funktionen

ein TETRA-Netz

- bei einem Verkehrsaufkommen, das mit knapper (1,575 MHz) bis mittelgroßer (2,1 MHz) Frequenzausstattung mit einer kleineren als der im BOS-Netzmodell geforderten Kanalausstattung, d. h. < 16 Kanäle in urbanen Gebieten, getragen werden kann, eine akzeptable Lösung sein wird,
- die modernere Funktechnik und ein Maximum an flexiblen Diensten zur Verfügung stellt,
- bei verkehrsaufkommensbedingt höherer Frequenzausstattung (ab 3 MHz) höhere Kosten verursacht, die gegen die höhere Diensteflexibilität abgewogen werden müssten. Es würde sich erst dann als günstigere Investition herausstellen, wenn erhebliche weitere Verkehrsbelastungen hinzukommen, die gegenwärtig nicht geplant sind.

ein TETRAPOL-Netz

- bei einem Verkehrsaufkommen, das mit knapper (1,575 MHz) bis mittelgroßer (2,6 MHz) Frequenzausstattung mit einer kleineren als der im BOS-Netzmodell geforderten Kanalausstattung, d.h. < 16 Kanäle in urbanen Gebieten, getragen werden kann, die zweitbeste Lösung ist,
- bei einer Frequenzausstattung ab ca. 3 MHz auf kurz- bis mittelfristige Sicht die spürbar kostengünstigere Lösung darstellt,
- bzgl. der Diensteflexibilität spürbare Einschränkungen aufweist.

Der Infrastrukturbedarf für ein landesweites TETRA- bzw. TETRAPOL-Netz ist ohne Überprüfung der Realisierbarkeit der ermittelten Basisstationsstandorte bestimmt und an die ZPD als Grundlage für ein zu erstellendes Wirtschaftlichkeitsmodell übergeben worden. Kommentiert man den Infrastrukturbedarf, dann ist festzuhalten, dass unter Berücksichtigung des Nutzungscharakters (urban, ländlich) in Deutschland das Funknetz durch das in Tabelle 0.2 auf der nächsten Seite dargestellte Mengengerüst charakterisiert ist.

Tabelle 0.2: Beispielhafte Berechnung der Anzahl von Standorten im TETRA-System (T) und im TETRAPOL-System (TP) für die Annahmen laut Tabellen 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15

Umgebung (km ²)	Innenstadt		Umland			
	Gesamtfläche	Anzahl Zellen		Gesamtfläche	Anzahl Zellen	
	(km ²)	T	TP	(km ²)	T	TP
Suburban	20739	1737	521	26267	419	125
Rural	1143	35	10	308452	1795	538
Σ		1772	531		2214	663

Berechnungsgrundlage: Funkversorgung 95% außerorts und Gebäudeversorgung in Städten für Handfunkgeräte (T: 1 W, TP: 2 W Sendeleistung) in Gürteltrageweise. Einzelheiten siehe Text.

Die Dimensionierung der Systeme erfolgt hier aufgrund der Zahl geforderter Sprechkreise, die sich über mehrere (viele) Zellen erstrecken können. Eine Kapazitätserhöhung durch Verkleinerung der Fläche einer Zelle, wie in Zellulernetzen für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation möglich, ist in Bündelfunknetzen nur sehr eingeschränkt möglich, z. B. durch Aufteilung eines regionalen Sprechkreises in zwei Sprechkreise *nord* bzw. *süd* mit Überleitung wichtiger Information durch die Leitstelle, wobei das Verkehrsaufkommen der geteilten Sprechkreise zusammen meist größer als das Aufkommen des ursprünglich gemeinsamen Sprechkreises ist. Eine solche Aufteilung ist nötig, wenn die Kapazität eines Kanals nicht ausreicht, den Verkehr der Teilnehmer zu tragen und unterliegt unabhängig vom System (TETRA bzw. TETRAPOL) den Gesetzen der Verkehrstheorie. Die Teilung von Sprechkreisen gestattet in Kombination mit der Möglichkeit, verschiedene Sprechkreise auf denselben Kanal zu multiplexen, eine Vergrößerung der Kapazität.

Die Zahl der Transceiver ist bei TETRAPOL etwa vierfach höher als bei TETRA und erfordert dementsprechend mehr Platz zur Unterbringung an der Basisstation und einen erhöhten Aufwand für die Antennen-Rangierverteiler, der hohe Kosten verursacht und den Vorteil von deutlich weniger Basisstationen vermindert. Eine genaue Bewertung dieser Kosten ist nur über eine Ausschreibung möglich.

Bezüglich der BOS-Dienste, welche die im Funknetz bzw. zugehörigen Vermittlungsnetz verfügbaren Informationen bzw. Funktionen verknüpfen, wobei Nachrichtentransport und Nachrichtenverarbeitung netzgestützt kombiniert werden, ist mehrfach gesagt worden, dass TETRAPOL-Netze eine geringere Flexibilität als TETRA-Systeme aufweisen. Das ist ein Ergebnis von Entwurfsentscheidungen des Systemherstellers für Software zur Realisierung der Bündelnetzfunktionen und ist von der Übertragungstechnik unabhängig. Es ist denkbar, wenngleich kostspielig, auf der TETRAPOL-Plattform sprechkreis-bezogene Dienste ähnlich flexibel zu implementieren wie bei TETRA.

Beide Systeme nutzen eine dezentrale Form des Zellwechsels: der Zellwechsel wird von der *Mobile Station* (MS) initiiert. Dies senkt den Signalisierungsaufwand im Netz und die MS kann über den für sie günstigsten Zeitpunkt eines Zellwechsels in Abhängigkeit von den gerade erbrachten Diensten entscheiden.

TETRA kann aber aufgrund des TDM-Verfahrens während einer laufenden Übertragung auf den nicht genutzten Zeitschlitzen die Signalisierkanäle benachbarter Zellen abhören und Messungen ihrer Empfangsfeldstärke durchführen und so den Handover vorbereiten. Dadurch kann der Wechsel in die andere Zelle in der Regel für den Dienstbenutzer un-

merklich erfolgen. TETRAPOL bietet nur die Möglichkeit, einen nötigen Zellwechsel trotz sich verschlechternder Verbindungsqualität hinauszuzögern. Reißt die Verbindung trotzdem ab, muss sie erst in der neuen Zelle erneut aufgebaut werden, so dass eine merkliche Unterbrechung auftreten kann.

Beide Systeme bieten im *Direct Mode* ähnlichen Komfort und Dienste. Zur Zeit spricht die geringere benötigte Bandbreite von TETRAPOL mit 12,5 kHz im Vergleich zu 25 kHz bei TETRA für einen DM-Kanal für TETRAPOL. Künftige TETRA-Geräte der zweiten Generation werden jedoch zwei DM-Kanäle pro Funkkanal unterstützen.

Inhaltsverzeichnis

1	Methodische Vorgehensweise	13
2	Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL	15
2.1	Einführung in die Standards TETRA und TETRAPOL	15
2.1.1	TETRA	15
2.1.2	TETRAPOL	15
2.1.3	Bewertung	16
2.2	Technische Daten	16
2.2.1	TETRA	16
2.2.2	TETRAPOL	17
2.2.3	Bewertung	18
2.3	Funknetz-technische Leistungsmerkmale	18
2.3.1	Bewertung	18
2.3.2	Empfänger-Leistungsverhalten	23
2.3.2.1	Bewertung	24
2.3.3	Zellgrößen	26
2.3.3.1	Link-Budget	26
2.3.4	Bewertung	28
2.3.5	Clustergrößen	29
2.3.5.1	Ausfallwahrscheinlichkeit	30
2.3.5.2	Clustergröße	31
2.3.5.3	Bewertung	31
2.3.6	Mengengerüst für das Funknetz	32
2.3.6.1	Empfangswahrscheinlichkeit	32
2.3.6.2	Link-Budget	33
2.3.6.3	Bestimmung der notwendigen Anzahl von Basisstationen	34
2.3.6.4	Bewertung	36
2.3.7	Spektrumsbedarf	37
2.3.7.1	Spektrumsbedarf für Signalisierung	37
2.3.7.2	Spektrum für Punkt-zu-Punkt-Verkehr	37
2.3.7.3	Spektrum für ein bundesweites Bündelfunknetz	38
2.3.7.4	Bewertung	40
2.3.8	Spektrale Kapazität	41
2.3.8.1	Spektrale Kapazität für Punkt-zu-Punkt-Verkehr	41
2.3.8.2	Spektrale Kapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehr	42
2.3.8.3	Bewertung	45
2.3.9	Koexistenz und Spektrale Verträglichkeit	46
2.3.9.1	Koexistenz mit anderen Mobilfunksystemen	46
2.3.9.2	Spektrale Verträglichkeit im Direkt-Modus	46
2.3.9.3	Bewertung	47

2.4	Dienste der Bündelfunksysteme	48
2.4.1	TETRA	48
2.4.2	TETRAPOL	50
2.4.3	Bewertung	52
2.5	Direkt- und Repeatermodus	52
2.5.1	TETRA	52
2.5.1.1	Referenzmodelle für den Direct Mode	53
2.5.1.2	Zeitmultiplexstruktur der DM-Luftschnittstelle	54
2.5.2	TETRAPOL	54
2.5.3	Bewertung	55
2.6	Adressierung	57
2.6.1	TETRA	57
2.6.2	TETRAPOL	57
2.6.3	Bewertung	59
2.7	Architektur der Standards	59
2.7.1	TETRA	59
2.7.1.1	Mobile Station	59
2.7.1.2	Line Station	60
2.7.1.3	Switching and Management Infrastructure	61
2.7.1.4	Schnittstellen des TETRA-Systems	61
2.7.2	TETRAPOL	63
2.7.2.1	Radio Terminal	63
2.7.2.2	Line Connected Terminal	64
2.7.2.3	Switching and Management Infrastructure	64
2.7.3	Bewertung	64
2.8	Die Protokollstapel an der Funkschnittstelle	64
2.8.1	TETRA	64
2.8.1.1	Aufbau des Protokollstapels Voice+Data	64
2.8.1.2	Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m	65
2.8.1.3	Die Bitübertragungsschicht	71
2.8.1.4	Die Sicherungsschicht	73
2.8.2	TETRAPOL	80
2.8.2.1	Aufbau des Protokollstapels	80
2.8.2.2	Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt R_3	81
2.8.2.3	Die Bitübertragungsschicht	84
2.8.2.4	Die Sicherungsschicht	86
2.8.2.5	Die Transportschicht	91
2.8.3	Bewertung	92
2.9	Roaming	92
2.9.1	TETRA	92
2.9.2	TETRAPOL	93
2.9.2.1	Cell Selection und Reselection	95
2.9.2.2	Registrierung und Attachment	96
2.9.2.3	Forced Attachment	97
2.9.2.4	Detachment	97
2.9.2.5	Roaming	97
2.9.3	Bewertung	98

2.10	Verschlüsselung	98
2.10.1	TETRA	98
2.10.2	TETRAPOL	98
2.10.3	Bewertung	99
2.11	Simulativer Vergleich	99
2.11.1	ETSI-Szenarien	99
2.11.2	Aufbau des Simulators	100
2.11.3	Beispielhafte Untersuchung für das ETSI-Szenarium 10 (TETRAPOL)	103
2.11.3.1	Zugriffsverzögerung auf den RACH	104
2.11.3.2	Zugriffsverzögerung auf den DACH	104
2.11.3.3	Verbindungsaufbauzeit	105
2.11.4	Beispielhafte Untersuchung für ein BOS-Szenarium (TETRAPOL) .	105
2.11.4.1	Zugriffsverzögerung auf den RACH	106
2.11.4.2	Zugriffsverzögerung auf den DACH	106
2.11.4.3	Verbindungsaufbauzeit	107
2.11.5	Beispielhafte Untersuchung für das ETSI-Szenarium 10 (TETRA) .	108
2.11.5.1	Zugriffsverzögerung auf den RACH	108
2.11.5.2	Verbindungsaufbauzeit	108
2.11.6	Beispielhafte Untersuchung für ein BOS-Szenarium (TETRA)	108
2.11.6.1	Zugriffsverzögerung auf den RACH	109
2.11.6.2	Verbindungsaufbauzeit	109
2.11.7	Zusammenfassung des simulativen Vergleichs	110
2.11.8	Erweiterungsmöglichkeiten in Bezug auf den Pilotversuch Aachen . .	110
3	Analyse der betrieblich-taktischen Forderungen	113
3.1	Analyse der <i>muss</i> - und <i>soll</i> -Forderungen	113
3.1.1	Funknetz-technische Forderungen	114
3.1.2	BOS-Dienste	115
3.1.3	BOS-Anwendungen	116
3.1.4	Administrative Regeln und mechanische Eigenschaften der Geräte .	117
3.2	Funkruf und die Standards TETRA und TETRAPOL	117
4	Entwicklungspotentiale der Standards TETRA und TETRAPOL	119
4.1	TETRA	119
4.1.1	TETRA Release 2	119
4.1.2	DAWS	120
4.1.2.1	LLC, MAC und PHY von DAWS	121
4.1.3	TIPHO	121
4.1.4	PSPP, APCO P34	121
4.2	Die Evolution von TETRAPOL	121
4.2.1	Die Infrastruktur – VoIP-Backbone	121
4.2.2	Die neue Luftschnittstelle	123
4.2.3	Nutzung eines neuen Modulationsverfahrens	123
4.2.4	Frequenzökonomie	124
4.2.5	Datenübertragung	124

5	Abkürzungen	127
5.1	Allgemeine Abkürzungen	127
5.2	TETRA-Abkürzungen	128
5.3	TETRAPOL-Abkürzungen	130
A	Modelle zur Funkfeldberechnung	137
A.1	Ausbreitungsverlust	137
A.2	Abschattungsschwund	138
A.3	Mehrwegeschwund	139
B	Berechnung der Clustergröße	141
B.1	Gleichkanalstörabstand	141
B.2	Sektorisierung	142
C	Tragbarer Verkehr	145
C.1	Verlustsystem	145
C.1.1	Kanalauslastung	146
C.2	Wartesystem	146
D	Vergleich der Europäischen Forderungen mit dem TETRA-Standard	149
E	Vergleich der Europäischen Forderungen mit dem TETRAPOL-Standard	181
F	Vergleich der deutschen Forderungen mit dem TETRA-Standard	209
G	Vergleich der deutschen Forderungen mit dem TETRAPOL-Standard	233

1 Methodische Vorgehensweise

Die Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze bearbeitet die vorliegende Aufgabenstellung in folgenden Schritten:

1. Identifikation der europäischen und nationalen Dokumente, in denen einvernehmlich die betrieblich-taktischen Forderungen der BOS festgelegt sind,
2. Einordnung der betrieblich-taktischen Forderungen in drei Klassen
 - *muss*-Forderungen (sind unbedingt zu erfüllen),
 - *soll*-Forderungen (sind wünschenswert, aber nicht zwingend gefordert),
 - *kann*-Forderungen (sind erwähnt, aber nicht gefordert).
3. Unterteilung der betrieblich-taktischen Forderungen in folgende Gruppen
 - *funknetz-technische Forderungen* (setzen bestimmte Eigenschaften der Funkchnittstelle bzw. -übertragungstechnik voraus),
 - *BOS-Dienste* (verknüpfen die im Funknetz bzw. zugehörigen Vermittlungsnetz verfügbaren Information bzw. Funktionen, wobei Nachrichtentransport und -verarbeitung netzgestützt kombiniert werden),
 - *BOS-Anwendungen*, die durch geeignete Programmierung von Prozessoren im Vermittlungsnetz oder in Endgeräten realisiert werden und nicht Teil der Standards TETRA bzw. TETRAPOL sind,
 - andere Forderungen, die administrative Regeln oder gewisse mechanische Eigenschaften der verwendeten Geräte verlangen und die nicht Teil der Standards sind.
4. Ermittlung der betrieblich-taktischen BOS-Forderungen, welche funknetz-technische Forderungen sind oder BOS-Dienste betreffen bzw. eng damit zusammenhängen.
5. Differenzierung zwischen europäischen und deutschen BOS-Forderungen der Kategorie *muss*.
6. Es erfolgt auch eine Identifikation und Kommentierung von funktechnischen Merkmalen der Standards TETRA und TETRAPOL, soweit betrieblich-taktische Forderungen berührt werden. Dazu sollen Nutzungsszenarien von PMR-Netzen definiert und großflächig durch Simulation des Nachrichtenverkehrs unter Berücksichtigung der jeweiligen standardgemäßen Funkparameter und Funkausbreitungsbedingungen bewertet werden.
7. Identifikation und Kommentierung von BOS-Diensten der Standards TETRA und TETRAPOL, soweit betrieblich-taktische Forderungen betroffen werden. Die Simulation von PMR-Netzen bezieht auch die BOS-Dienste ein und soll Aussagen über deren charakteristische Leistungsmerkmale erlauben.

1 Methodische Vorgehensweise

8. Erfüllung der funktechnischen und BOS-Dienste-Forderungen der Standards TETRA und TETRAPOL als Grundlage für einen bewertenden Vergleich der Standards.
9. Infrastrukturbedarf für ein landesweites TETRA- bzw. TETRAPOL-Netz.
10. Bewertung des Komforts der Nutzung von BOS-Diensten bei den Standards TETRA und TETRAPOL.
11. Prognose der Weiterentwicklung der beiden konkurrierenden Konzepte und Abschätzung des entsprechenden Beitrags zur Verbesserung der Erfüllbarkeit von betrieblich-taktischen Forderungen der Klassen *muss*, *soll* und *kann*.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

Die hier gemachten Aussagen betreffen funknetz-technische Forderungen und BOS-Dienste. Dabei wird soweit möglich unterschieden, ob im Standard die betreffende Funktion zwingend erforderlich ist oder optional realisiert werden kann.

2.1 Einführung in die Standards TETRA und TETRAPOL

2.1.1 TETRA

Zur Harmonisierung des europäischen Bündelfunkmarktes und unter Berücksichtigung dieser Faktoren beschloss das *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) im Jahre 1988, einen Standard für ein digitales, paneuropäisches Bündelfunknetz zu erarbeiten. Der erste Arbeitstitel für dieses von dem Technischen Subkomitee RES 06 entwickelte System war *Mobile Digital Trunked Radio System* (MDTRS). Ende 1991 wurde für MDTRS aber der neue Begriff *TERrestrial Trunked RAdio* (TETRA) eingeführt.

Für TETRA sind zwei Familien von Standards erarbeitet worden:

- Sprache und Daten (*Voice plus Data Standard*, V+D) und
- nur Datenübertragung (*Packet Data Optimized Standard*, PDO).

Der V+D-Standard ist als Nachfolger der bestehenden Bündelfunknetze 1. Generation gedacht, während der PDO-Standard ein Paketfunksystem der 2. Generation definiert. Beide Standards benutzen dieselbe Bitübertragungstechnik und weitgehend dasselbe Sende-/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 Datenfunkanwendungen 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 *Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* (BOS) gehören zu den Hauptanwendungsgebieten von TETRA. Für die Anwendungen der BOS kommt nur der V+D-Standard zum Einsatz.

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.

2.1.2 TETRAPOL

Mit dem Ziel, ein digitales Funksystem auf FDMA-Basis für den Einsatz in der Fläche zu entwickeln, begann im Jahr 1988 Matra Nortel Communications mit der Erarbeitung der

Tabelle 2.1: Technische Daten des TETRA-Bündelfunksystems

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 in 25 kHz PDO: Statistisches Multiplexing von Paketen
Zugriffsverfahren	V+D: TDMA mit S-ALOHA auf dem Random Access Channel (mit Reservierung bei Packet Data) PDO: S-ALOHA mit Reservierung, bzw. DSMA je nach Verkehrslast
Rahmenstruktur	V+D: 14,17 ms/slot; 4 slot/frame; 18 frame/multiframe; 60 multiframe/hyperframe; Slotlänge: 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
Nachbarkanalenschutz	-60 dBc
Verbindungsaufbau	< 300 ms kanalvermittelt; < 2 s verbindungsorientiert
Übertragungsverzögerung eines 100 byte Referenzpaketes	V+D: <500 ms bei verbindungsorient. Dienst, <3-10 s bei verbindungsorient. Dienst abh. von der Übertragungspriorität, PDO: <100 ms bei 128 byte Nachricht

TETRAPOL-Spezifikation. Diese Entwicklung wurde maßgeblich von der französischen Gendarmerie unterstützt, die sich entschied, ein Rubis-Netz auf der Basis von TETRAPOL aufzubauen. Die erarbeitete Spezifikation wurde 1994 als *Public Available Specification* (PAS) in weiten Teilen offengelegt. Ende 1993 war mit dem Rubis-Netz das erste TETRAPOL-Netz in Betrieb.

2.1.3 Bewertung

Die Standards TETRA und TETRAPOL sind beide in Europa als Plattformen für den Betrieb nationaler Bündelfunknetze ausgewählt bzw. in Gebrauch, wobei TETRA-Systeme noch im Aufbau sind. TETRA-Systeme sind für eine Vielzahl von Anwenderkreisen mit zum Teil unterschiedlichen Anforderungen entwickelt worden, während TETRAPOL-Systeme für Anwendungen der BOS optimiert wurden. Eine detaillierte Bewertung der Leistungsfähigkeit der beiden Standards erfolgt in den folgenden Kapiteln.

2.2 Technische Daten

2.2.1 TETRA

Das Bündelfunksystem TETRA kann als lokales 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 den Uplink bzw. Downlink mehrere Bereiche zwischen 380 MHz und 470 MHz bzw. 870 MHz bis 933 MHz vergeben worden, vgl. Tab. 2.1. Es wird außerdem untersucht, Frequenzen im 1,8 GHz Band zu verwenden.

Tabelle 2.2: Technische Daten des TETRAPOL-Bündelfunksystems

Frequenzen [MHz]	70 bis 520
Duplexabstand [MHz]	10
Kanalraster [kHz]	10 oder 12,5
Modulation	GMSK
Bitrate	8 kbit/s brutto, bis zu 6 kbit/s (Sprache) bzw. 4,6 kbit/s (Daten) netto (im 12,5 kHz Kanal)
Kanäle/Träger	1 Sprach- oder Datenkanal in 12,5 kHz
Zugriffsverfahren	FDMA mit S-ALOHA auf dem Random Access Channel
Rahmenstruktur	20 ms/frame; 200 frames/superframe; Slotlänge: 160 bit
Nachbarkanalschutz	-60 dBc (bei 12,5 kHz Kanalraster)

Das TETRA-System benutzt eine $\pi/4$ -DQPSK-Modulation und bietet in einem 25 kHz Kanal eine Bruttobitrate von 36 kbit/s an. Bei einer mittleren Dienstgüte der Kanalcodierung liegt die Nettobitrate bei 19,2 kbit/s. Ohne Kanalcodierung kann die maximale Nettobitrate von 28,8 kbit/s erreicht werden, vgl. Tab. 2.21. Pro Träger stehen bei V+D vier TDMA-Sprach- oder Datenkanäle zur Verfügung.

Slotted-ALOHA (mit Reservierung bei Datenübertragung) wird als Zugriffsverfahren bei V+D verwendet. Die Rahmenstruktur besteht bei V+D aus vier 510 bit Zeitschlitzen pro Rahmen, 18 Rahmen pro Multirahmen und 60 Multirahmen pro Hyperrahmen, der die größte zeitliche Einheit darstellt und ungefähr eine Minute dauert, vgl. Abschn. 2.8.1.2.1.

Der genaue Ablauf der Kanalcodierung für V+D ist in Abschn. 2.8.1.3 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 Transaktions-Priorität maximal 3 s, 5 s oder 10 s.

2.2.2 TETRAPOL

Das Bündelfunksystem TETRAPOL kann ebenso wie TETRA als lokales oder mehrzelliges Netz eingesetzt werden. Die Endgeräte haben eine Sendeleistung von 1 W, 2 W oder 10 W. Ein maximaler Zellradius lässt sich nicht angeben, da das Versorgungsgebiet durch die Zusammenschaltung mehrerer *Base Station* (BS) mittels der Gleichwellentechnik vergrößert werden kann. TETRAPOL-Systeme können in Frequenzbändern zwischen 70 MHz und 520 MHz betrieben werden, wobei zwei Versionen der physikalischen Schicht zur Verfügung stehen (*Very High Frequency*: bis 150 MHz, *Ultra High Frequency*: ab 150 MHz), vgl. Tab. 2.2.

Bei TETRAPOL wird eine zweiwertige GMSK-Modulation verwendet, die in einem 12,5 kHz Kanal eine Modulationsbitrate von 8 kbit/s bietet. Die Nettobitrate mit starker Kanalcodierung für einen Datenkanal liegt bei 3,4 kbit/s. Bei schwacher Kanalcodierung kann für Daten eine maximale Nettobitrate von 4,6 kbit/s erreicht werden. Die Nettobitrate für Sprachübertragungen liegt bei 6 kbit/s.

Das Kanalraster ist ein Systemparameter und kann entweder zu 10 kHz oder 12,5 kHz gewählt werden.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

Pro Träger steht ein FDMA-Sprach- oder Datenkanal zur Verfügung. Auch bei TETRAPOL wird Slotted-ALOHA als Zugriffsverfahren verwendet. Die Rahmenstruktur besteht aus 200 Rahmen pro Superrahmen, der die größte zeitliche Einheit darstellt und 4 s dauert.

Weder für die Dauer der Verbindungseinrichtung (sowohl kanalvermittelt als auch verbindungsorientiert) noch für die Übertragungsdauer eines Referenzpaketes werden im Standard Referenzwerte angegeben.

2.2.3 Bewertung

Die vierwertige Modulation in Verbindung mit dem größeren Kanalaraster führt bei TETRA im Vergleich zu TETRAPOL zu höheren Bitraten auf den Kanälen. TETRA-Systeme ermöglichen die parallele Nutzung von bis zu vier Zeitschlitzten, so dass nicht nur eine höhere Datenrate als bei TETRAPOL-Systemen, sondern auch variable Datenraten erzielt werden können.

Die Verwendung des *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK)-Modulationsverfahren bei TETRAPOL-Systemen macht es wegen der konstanten Einhüllenden möglich, kostengünstige Verstärker zu verwenden, da keine hohen Anforderungen an deren Linearität gestellt werden.

Eine genauere Betrachtung der funknetz-technischen Leistungsmerkmale wird in Abschnitt 2.3 gegeben.

2.3 Funknetz-technische Leistungsmerkmale

2.3.1 Bewertung

Beide betrachteten Standards sind prinzipiell für den Einsatz in BOS-Netzen geeignet. TETRA wird durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Vierwertige Funk-Modulation
- Zeitmultiplexverfahren auf der Funkschnittstelle.
- Duplexbetrieb an der Funkschnittstelle für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation
- Gegenüber TETRAPOL deutlich höhere Datenübertragungsraten bei Multislotbetrieb (bis zu 28,8 kbit/s je Funkkanal bei ungeschützter Übertragung).
- Größere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation gegenüber TETRAPOL.
- Geringerer Spektrumsbedarf für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in großen Gruppen mit geringer Mobilität.
- Größere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in kleinen Gruppen mit hoher Mobilität.
- Größere Frequenzwiederholabstände (mindestens 21er-Cluster)

Insgesamt ist TETRA eher für eine Benutzergemeinde geeignet, die eine mittlere bis hohe Verkehrskapazität benötigt wie sie beispielsweise für öffentliche Bündelfunknetze erwartet wird. Fachleute erwarten auch für BOS-Benutzer ein so großes Nachrichten-Verkehrsaufkommen – insbesondere bei Integration aller BOS-Nutzer und bei Einführung von Datendiensten –, dass TETRA-Netze für BOS-Nutzer mit spürbarem Anteil an Punkt-zu-Punkt-Kommunikation neben der üblichen Gruppenkommunikation bevorzugt in Frage kommen.

TETRAPOL-Systeme sind seit Jahren in Frankreich in Gebrauch und haben ihre Eignung für die dort vorliegenden, von den deutschen BOS z. T. abweichenden Anforderungen bewiesen. Der TETRAPOL-Standard hat folgende Merkmale, die ihn für die Nutzung als BOS-System unter geeigneten Umständen empfehlen:

- Zweiwertige robustere Funkmodulation
- Frequenzmultiplexverfahren auf der Funkschnittstelle
- Halbduplexbetrieb auf der Funkschnittstelle
- Ausreichende Übertragungsrate für einfache Datendienste je Funkkanal (4,6 kbit/s geschützt, 7,4 kbit/s ungeschützt)
- Um 5 dB bis 10 dB höheres Linkbudget bei gleicher Sendeleistung, das bedeutet im Extremfall einen fast doppelten Zellradius.
- Im Vergleich zu TETRA eine wesentlich geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Entsprechend hoher Spektrumsbedarf für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.
- Im Vergleich zu TETRA wesentlich höhere Spektrumskapazität für Gruppenkommunikation von Gruppen mit großem Aktionsradius und geringer Mobilität.
- Geringere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation in kleinen Gruppen mit hoher Mobilität.

TETRAPOL-Systeme können als die bevorzugte Lösung angesehen werden, wenn ein robustes System mit preisgünstiger Funkversorgung für ausgedehnte Flächenländer mit kleinem bis mittlerem Nachrichtenverkehrsaufkommen – bevorzugt Gruppenkommunikation in statischen Gruppen, d. h. Sprache mit nur kleinem Datenanteil –, ausreichend großer Frequenzausstattung und keinen besonders hohen Ansprüchen an die Flexibilität bei der Kombination von Diensten gefordert wird.

Mit zunehmendem Nachrichtenverkehrsaufkommen, insbesondere bei Datenübertragung, gehen die durch das zweiwertige Modulationsverfahren und die kleinere Funkkanalbandbreite (12,5 kHz) bedingten Vorteile einer kostengünstigeren Infrastruktur verloren, wenn die verfügbare Frequenzbandbreite kleinere Zellradien erfordert, wie sie bei TETRA-Systemen systembedingt von Anfang an nötig sind. Spätestens dann machen sich die durch Erfordernis eines Transceivers pro Funkkanal bedingten höheren Kosten von TETRAPOL-Funkkanälen bemerkbar.

Die spektrale Effizienz für Gruppenkommunikation in bis zu etwa vier Zellen ist in TETRA höher als in TETRAPOL. Diese Aussagen gelten auch unter Berücksichtigung

Tabelle 2.3: Frequenzbedarf

geforderte Zahl Kanäle	Bandbreite/Zelle (kHz)		Bandbreite/Cluster (MHz)	
	TETRA	TETRAPOL	TETRA (21)	TETRAPOL (13)
7×4 (Deutschland)	175	350	3,675	4,55
4×4 (Belgien)	100	200	2,1	2,6
5×4 (Landesgrenzen)	125	250	2,625	3,25

der Möglichkeit, Gleichwellenfunk in TETRAPOL-Systemen einzusetzen, der bzgl. der Kapazität nur für Gruppenkommunikation in großen Gruppen mit großem Aktionsradius nennenswerte Vorteile bringt.

Die für gering bis mittelmäßig belastete Systeme bestehenden Kostenvorteile des TETRAPOL-Systems, die vom geringeren Infrastrukturbedarf herrühren, gehen tendenziell verloren, wenn über die im Standard beschriebenen Dienste hinaus weitere Dienste gefordert werden, wie bei TETRA im Standard vorgesehen.

Die in Tabelle 2.3 zusammengefassten Modellrechnungen zeigen, dass für die im Netzmodell der Unterarbeitsgruppe Technik der Projektgruppe Digitalfunk der deutschen BOS geforderte Nachrichtenverkehrskapazität pro Zelle in urbanen bzw. Ballungsgebieten erhebliche Unterschiede zwischen einer TETRA- bzw. TETRAPOL-Lösung feststellbar sind:

Für den Vergleich der Systeme wird aufgrund einer geforderten Ausfallsicherheit von 5% bei TETRA mit einem 21er-Cluster und bei TETRAPOL mit einem 13er-Cluster gerechnet. Der Bedarf für Organisationskanäle wird vernachlässigt. Die für urbane und Ballungsgebiete geforderte Zahl von 28 Kanälen je Zelle ist zweifellos von der BOS-Unterarbeitsgruppe Technik großzügig geschätzt worden. Das zeigt ein Vergleich mit der geplanten Ausstattung für das belgische TETRA-Netz ASTRID, wo von 16 Kanälen pro Zelle für Brüssel ausgegangen wird.

In Deutschland steht für das digitale BOS-Netz eine Frequenzbandbreite von 3 MHz (Angabe in der Ausschreibung des Pilotversuches) plus 2 MHz (ist allgemein bekannt) zur Verfügung. Berücksichtigt man, dass im europäischen Grenzbereich wegen Koordinationsbedarf mit Nachbarländern grob geschätzt nur die Hälfte, d. h. 2,5 MHz in Deutschland zur Nutzung zur Verfügung stehen, dann kann Tabelle 2.3 wie folgt interpretiert werden:

- Die in Deutschland für Ballungsgebiete geforderte Kanalausstattung ist mit beiden Systemtypen im vorhandenen 5 MHz Band problemlos realisierbar.
- Im Grenzgebiet zu europäischen Nachbarländern sind für beide Systemtypen Einschränkungen der verfügbaren Kapazität vorhanden, wobei TETRA dann etwa 20 Kanäle pro Zelle verfügbar machen kann, TETRAPOL ca. 16.

Wenn man dieselben Versorgungsgrade fordert und dieselben Verluste für Körperverluste, Gebäudedurchdringung usw. ansetzt, dann ist der maximale Radius einer urbanen

- TETRA-Zelle ca. 2 km und in einer
- TETRAPOL-Zelle ca. 3,75 km.

Die mit einer TETRAPOL-Zelle versorgte Fläche ist also in diesem Extremfall ca. dreieinhalb mal so groß. Das hat entsprechende Wirkungen auf die Infrastrukturkosten, da die

Zahl der Basisstations-Standorte und der Aufwand im Festnetz bei TETRA entsprechend höher sind.

Unterstellt man einen zukünftig zu erwartenden höheren Bedarf an Datendiensten mittlerer Übertragungsrate, dann müssen TETRAPOL-Zellen verkleinert werden, um bei gegebenem Spektrum den zusätzlichen Verkehr durch Zellverkleinerung tragen zu können. Dabei wird die von einer TETRAPOL-Zelle bedeckte Fläche kleiner und kann mit steigendem Verkehrsaufkommen sogar die Fläche einer TETRA-Zelle unterschreiten. Da TETRA-Systeme eine höhere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation haben – vergleichbar der des GSM – sind TETRA-Systeme für eine solche höhere Nachrichtenverkehrsbelastung besser geeignet, während die Grenzen von TETRAPOL-Netzen dann deutlich früher erreicht werden. Ein derart hoher Verkehr wird heute von den BOS nicht vorhergesehen.

TETRAPOL-Netze können eine höhere Spektrumskapazität für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation durch Einführung eines höherwertigen Modulationsverfahrens erreichen. Sie würden sich bzgl. der Spektrumskapazität dabei dem TETRA-Standard annähern und wettbewerbsfähig bleiben. Solche Maßnahmen bei TETRAPOL sind bisher nicht veröffentlicht worden.

Man kann also feststellen, dass für ein landesweites PMR-Netz in Deutschland unter Berücksichtigung

- der Infrastrukturkosten,
- der Flexibilität der standardisierten Dienste,
- der für diese Dienste verfügbaren Nachrichtenverkehrskapazität,
- der Ausbaufähigkeit und der dafür erforderlichen Kosten und
- des Zeitbedarfs für wichtige BOS-Funktionen

ein TETRA-Netz

- bei einem Verkehrsaufkommen, das mit knapper (1,575 MHz) bis mittelgroßer (2,1 MHz) Frequenzausstattung mit einer kleineren als der im BOS-Netzmodell geforderten Kanalausstattung, d. h. < 16 Kanäle in urbanen Gebieten, getragen werden kann, eine akzeptable Lösung sein wird,
- die modernere Funktechnik und ein Maximum an flexiblen Diensten zur Verfügung stellt,
- bei verkehrsaufkommensbedingt höherer Frequenzausstattung (ab 3 MHz) höhere Kosten verursacht, die gegen die höhere Diensteflexibilität abgewogen werden müssten. Es würde sich erst dann als günstigere Investition herausstellen, wenn erhebliche weitere Verkehrsbelastungen hinzukommen, die gegenwärtig nicht geplant sind.

ein TETRAPOL-Netz

- bei einem Verkehrsaufkommen, das mit knapper (1,575 MHz) bis mittelgroßer (2,6 MHz) Frequenzausstattung mit einer kleineren als der im BOS-Netzmodell geforderten Kanalausstattung, d.h. < 16 Kanäle in urbanen Gebieten, getragen werden kann, die zweitbeste Lösung ist,

Tabelle 2.4: Beispielhafte Berechnung der Anzahl von Standorten im TETRA-System (T) und im TETRAPOL-System (TP) für die Annahmen laut Tabellen 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15

Umgebung (km ²)	Innenstadt		Umland			
	Gesamtfläche	Anzahl Zellen		Gesamtfläche	Anzahl Zellen	
		T	TP	(km ²)	T	TP
Suburban	20739	1737	521	26267	419	125
Rural	1143	35	10	308452	1795	538
Σ		1772	531		2214	663

Berechnungsgrundlage: Funkversorgung 95% außerorts und Gebäudeversorgung in Städten für Handfunkgeräte (T: 1 W, TP: 2 W Sendeleistung) in Gürteltrageweise. Einzelheiten siehe Text.

- bei einer Frequenzausstattung ab ca. 3 MHz auf kurz- bis mittelfristige Sicht die spürbar kostengünstigere Lösung darstellt,
- bzgl. der Dienstflexibilität spürbare Einschränkungen aufweist.

Der Infrastrukturbedarf für ein landesweites TETRA- bzw. TETRAPOL-Netz ist ohne Überprüfung der Realisierbarkeit der ermittelten Basisstationsstandorte bestimmt und an Intercai als Grundlage für ein zu erstellendes Wirtschaftlichkeitsmodell übergeben worden. Kommentiert man den Infrastrukturbedarf, dann ist festzuhalten, dass unter Berücksichtigung des Nutzungscharakters (urban, ländlich) in Deutschland das Funknetz durch das in Tabelle 2.4 dargestellte Mengengerüst charakterisiert ist.

Die Dimensionierung der Systeme erfolgt hier aufgrund der Zahl geforderter Sprechkreise, die sich über mehrere (viele) Zellen erstrecken können. Eine Kapazitätserhöhung durch Verkleinerung der Fläche einer Zelle, wie in Zellulernetzen für Punkt-zu-Punkt-Kommunikation möglich, ist in Bündelfunknetzen nur sehr eingeschränkt möglich, z. B. durch Aufteilung eines regionalen Sprechkreises in zwei Sprechkreise *nord* bzw. *süd* mit Überleitung wichtiger Information durch die Leitstelle, wobei das Verkehrsaufkommen der geteilten Sprechkreise zusammen meist größer als das Aufkommen des ursprünglich gemeinsamen Sprechkreises ist. Eine solche Aufteilung ist nötig, wenn die Kapazität eines Kanals nicht ausreicht, den Verkehr der Teilnehmer zu tragen und unterliegt unabhängig vom System (TETRA bzw. TETRAPOL) den Gesetzen der Verkehrstheorie. Die Teilung von Sprechkreisen gestattet in Kombination mit der Möglichkeit, verschiedene Sprechkreise auf denselben Kanal zu multiplexen, eine Vergrößerung der Kapazität.

Die Zahl der Transceiver ist bei TETRAPOL etwa vierfach höher als bei TETRA und erfordert dementsprechend mehr Platz zur Unterbringung an der Basisstation und einen erhöhten Aufwand für die Antennen-Rangierverteiler, der hohe Kosten verursacht und den Vorteil von deutlich weniger Basisstationen vermindert. Eine genaue Bewertung dieser Kosten ist nur über eine Ausschreibung möglich.

Bezüglich der BOS-Dienste, welche die im Funknetz bzw. zugehörigen Vermittlungsnetz verfügbaren Informationen bzw. Funktionen verknüpfen, wobei Nachrichtentransport und Nachrichtenverarbeitung netzgestützt kombiniert werden, ist mehrfach gesagt worden, dass TETRAPOL-Netze eine geringere Flexibilität als TETRA-Systeme aufweisen. Das ist ein Ergebnis von Entwurfsentscheidungen des Systemherstellers für Software zur Realisierung der Bündelnetzfunktionen und ist von der Übertragungstechnik unabhängig. Es ist denk-

Tabelle 2.5: Nominal-Fehlerwahrscheinlichkeiten der TETRA- und TETRAPOL-Empfänger

TETRA			TETRAPOL		
statisch (%)	TU50 (%)	HT200 (%)	statisch (%)	TU50 (%)	HT200 (%)
0,01	0,4	3,0	0,005	0,15	k.A.

bar, wengleich kostspielig, auf der TETRAPOL-Plattform sprechkreis-bezogene Dienste ähnlich flexibel zu implementieren wie bei TETRA.

2.3.2 Empfänger-Leistungsverhalten

Die jeweiligen Spezifikationen legen das Leistungsverhalten für TETRA- und TETRAPOL-Empfänger in definierten Umgebungen fest. Insbesondere werden maximale Bit- bzw. Rahmenfehlerhäufigkeiten für einige logische Kanäle bei bestimmten Empfangs- und Störleistungen vorgegeben.

Die Nominal-Fehlerwahrscheinlichkeiten sind in [ETS95] bzw. [For98f] definiert und beschreiben die Fehlerwahrscheinlichkeiten für ungeschützte Bits bei einer Empfangsleistung zwischen -40 dBm bis -85 dBm und ohne zusätzliche Störeinflüsse außer Rauschen. Tabelle 2.5 stellt die Nominal-Fehlerwahrscheinlichkeiten für TETRA- und TETRAPOL-Stationen dar. Die dort angegebenen Werte können als Richtwerte für den Normalbetrieb in einem gut versorgten Gebiet ohne Gleichkanalinterferenz angesehen werden. Die verschiedenen Funkausbreitungsumgebungen sind durch ein Ausbreitungs-Verzögerungsprofil sowie durch die Geschwindigkeit der Mobilstation in [ETS95] bzw. [For98f] festgelegt. Man unterscheidet neben den statischen Ausbreitungsbedingungen noch *Typical Urban* (TU) und *Hilly Terrain* (HT). Zahlen hinter den Abkürzungen bezeichnen die Geschwindigkeit in km/h.

Wegen der größeren Kanalbandbreite und dem höherwertigen Modulationsverfahren hat das TETRA-System bei gleicher Empfangsleistung höhere Fehlerwahrscheinlichkeiten als das TETRAPOL-System, vgl. auch Abschnitt 2.3.3 auf Seite 26.

Ein Vergleich des Empfänger-Leistungsverhaltens an der Empfindlichkeitsgrenze ist auf Grundlage der Spezifikation nur eingeschränkt möglich, da die TETRAPOL-Spezifikation nur Angaben zur Bitfehlerhäufigkeit für ungeschützte Bits im Sprachkanal und ansonsten Rahmenfehlerhäufigkeiten für geschützte Bits im Sprachkanal angibt. Angaben zu Bit- bzw. Rahmenfehlerwahrscheinlichkeiten (*Frame Erasure Rate*, FER) für die Datenübertragung fehlen in der Spezifikation [For98f] noch.

Tabelle 2.6 auf der nächsten Seite stellt die Fehlerhäufigkeiten an der Empfindlichkeitsgrenze für TETRA- und TETRAPOL-Empfänger zusammen.

Im TETRA-Standard sind verschiedene Güteklassen für Mobil- und Basisstationen definiert, was sich in unterschiedlichem Empfänger-Leistungsverhalten bemerkbar macht. Die Tabelle enthält daher jeweils den kleinsten und den größten im Standard angegebenen Wert für die Bitfehlerhäufigkeit im TETRA-System. Zusätzlich zu den Güteklassen beeinflusst bei der Datenübertragung die Verschachtelungstiefe die Fehlerhäufigkeit.

Eine weitere wichtige Kenngröße von Empfängern ist ihr Leistungsverhalten bei Gleichkanalstörung, vgl. Abschnitt B.1 auf Seite 141. Die Spezifikationen [ETS95] und [For98f] machen Angaben über die mindestens erzielbaren Bit- und Rahmenfehlerhäufigkeiten bei einem Referenzgleichkanalstörabstand und einer Empfangsleistung von -85 dBm. Für stati-

Tabelle 2.6: Bitfehlerhäufigkeiten bei Empfang an der Empfindlichkeitsgrenze

Dienst	Umgebung	TETRA		TETRAPOL	
		BS (%)	MS (%)	BS (%)	MS (%)
Ungeschützt	statisch	3–4	3,5–4	1,5	1,5
	TU50	2,5	2,5	1,5	1,5
	HT200	4	4	2,5	2,5
Sprache	statisch	0,3–3,3	0,3–2	1 (FER)	1 (FER)
	TU50	2–4	2–4	1 (FER)	1 (FER)
	HT200	4	4	1,5 (FER)	1,5 (FER)
Daten 4,8 kbit/s	statisch	0,2–1	0,15–0,8	—	—
	TU50	0,06–1,2	0,06–1,2	—	—
	HT200	4	3–4	—	—
Daten 2,4 kbit/s	statisch	0,01–0,2	0,01	—	—
	TU50	0,01–1,2	0,01–1,2	—	—
	HT200	0,15–1,3	0,13–1,3	—	—

sche Ausbreitungsbedingungen ist in den Spezifikationen kein Referenzwert für den Gleichkanalstörabstand angegeben. Aus den Empfängerempfindlichkeiten lassen sich aber äquivalente Signal-zu-Rauschleistungsverhältnisse ableiten. Da in TETRA Gleichkanalstörleistung wie Rauschleistung wirkt [LF91], ist damit auch der Gleichkanalstörabstand bekannt. In der ETSI-Empfehlung [ETS97] sind diese Verhältnisse für TETRA angegeben. Geht man davon aus, dass TETRAPOL- und TETRA-Empfänger ähnliche Rauschzahlen haben, so kann man auf das Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis für den statischen Fall an der Empfindlichkeitsgrenze schliessen. Es wird angenommen, dass sich Signal-zu-Rauschverhältnisse im dynamischen und statischen Fall zueinander genauso verhalten wie die Gleichkanalstörabstände im Referenzfall.

Tabelle 2.7 auf der nächsten Seite fasst die Referenzwerte zusammen. Die TETRAPOL-Spezifikation enthält nur Angaben für den Sprachkanal. Weiterhin wurde statt der TU50-Umgebung die TU100-Umgebung gewählt, was die Vergleichbarkeit der Referenzwerte erschwert. In der technischen Empfehlung [ETS97] der ETSI zu TETRA sind ergänzend zum Standard Referenzwerte für TETRA in der TU100-Umgebung angegeben. Diese wurden zusätzlich in die Tabelle aufgenommen.

2.3.2.1 Bewertung

Tabelle 2.5 auf der vorherigen Seite und Tabelle 2.6 zeigen, dass mit TETRAPOL ein System entworfen wurde, dass Übertragungsfehler tendenziell eher vermeidet als entstandene Fehler zu korrigieren. Dies zeigt sich im Vergleich der geforderten Bitfehlerhäufigkeiten für die Übertragung ungeschützter Bits, die im TETRA-System etwa doppelt so hoch sind wie im TETRAPOL-System. Der Entwurf eines solchen fehlervermeidenden Systems begünstigt insbesondere die Implementierung der Fehlersicherung für die Sprachübertragung, die eine wesentlich höhere Fehlerwahrscheinlichkeit toleriert als eine Datenübertragung. Da die Fehlervermeidung mit einer niedrigeren Übertragungsbandbreite einhergeht, ist das TETRAPOL-System bzgl. der Anzahl realisierbarer Trägerdienste mit den dazugehörigen

Tabelle 2.7: Bitfehlerhäufigkeiten bei Gleichkanalstörung

Dienst	Umgebung	TETRA		TETRAPOL	
		BS (%)	MS (%)	BS (%)	MS (%)
Ungeschützt	TU50	2	2	—	—
	TU100	2	2	3	3
	HT200	3,7	3,8	—	—
Sprache	TU50	2–4	2–4	—	—
	TU100	0,6–1	0,6–1	2 (FER)	2 (FER)
	HT200	4	4	—	—
Daten 4,8 kbit/s	TU50	0,06–1,2	0,06–1,2	—	—
	HT200	4	3–4	—	—
Daten 2,4 kbit/s	TU50	0,01–1,2	0,01–1,2	—	—
	HT200	0,15–0,3	0,13–1,3	—	—
Referenzgleichkanalstörabstand (dB):		19		15	
Gleichkanalstörabstand statisch (dB):		10		7	

Dienstgüten eingeschränkter als ein TETRA-System.

In [ETS97] wird für TETRA eine Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 4 % als obere Grenze genannt, bis zu der durch den Sprachcodec Sprache ohne gravierende Qualitätseinbußen möglich ist. Obwohl für TETRAPOL keine äquivalenten Angaben verfügbar sind, kann aufgrund der niedrigeren Bitfehlerhäufigkeit im Sprachkanal und der höheren Übertragungsrate des Sprachcodecs davon ausgegangen werden, dass die TETRAPOL-Sprachübertragung an der Empfindlichkeitsschwelle robuster ist als diejenige von TETRA. Da dieser Unterschied in der Praxis nur bei einer schlechten Versorgung bemerkbar ist, kann er durch eine sorgfältige Funknetzplanung und einem entsprechendem Infrastruktur-Aufwand im TETRA-System kompensiert werden, vgl. Abschnitt 2.3.3 auf der nächsten Seite.

Datendienste sind in TETRA mit einer Rest-Bitfehlerhäufigkeit von unter $2 \cdot 10^{-4}$ in fast allen Umgebungen realisierbar. Lediglich die Datenübertragung mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 4.8 kbit/s ist bei starker Zeitdispersion auf dem Funkkanal nur mit einer Fehlerhäufigkeit von 3–4 % möglich. Höhere Datenraten können in TETRA durch Kanalbündelung erreicht werden. Hier gelten für die gebündelten Kanäle dieselben Aussagen wie für Kanäle im Einzelnen.

Man erkennt aus Tabelle 2.7, dass die aus dem Referenz-Gleichkanalstörabstand resultierenden Fehlerhäufigkeiten für TETRA geringer sind als für TETRAPOL. Würde man für die ungeschützte Übertragung mit TETRA dieselbe Bitfehlerwahrscheinlichkeit fordern wie für TETRAPOL, so würde sich das hierzu erforderliche C/I in TETRA um etwa 2 dB auf 16 dB verringern [LF91, ETS97]. Damit bleibt TETRAPOL rechnerisch im Referenzfall ein Gewinn von einem Dezibel Gleichkanalstörabstand.

Im mehrzellularen Umfeld verliert TETRAPOL also seine fehlervermeidenden Eigenschaften, wenn man den Referenzfall für die Gleichkanalstörungen betrachtet. Da die Höhe der Störleistung aus Gleichkanalzellen durch entsprechende Funknetz- und Frequenzplanung minimiert werden kann, geht die verminderte Gleichkanal-Störfestigkeit von TETRAPOL eher zu Lasten der spektralen Effizienz als zu Lasten der Versorgung oder der

Tabelle 2.8: Eigenschaften von Sendern und Empfängern

	TETRA		TETRAPOL	
	BS	MS	BS	MS
maximale Sendeleistung (dBm)				
Leistungsklasse 1	46	45	44	40
Leistungsklasse 2	44	40	42	33
Leistungsklasse 3	42	35	38	30
Leistungsklasse 4	40	30	34	
Leistungsklasse 5	38		30	
Leistungsklasse 6	36			
Leistungsklasse 7	34			
Leistungsklasse 8	32			
Leistungsklasse 9	30			
Leistungsklasse 10	28			
statische Empfindlichkeit (dBm)	-115	-112	-121	-119
dynamische Empfindlichkeit (dBm)	-106	-103	-113	-111

Dienstgüte.

2.3.3 Zellgrößen

2.3.3.1 Link-Budget

Die Zellgröße in einem zellularen Mobilfunksystem ist durch den maximal erlaubten Ausbreitungsverlust zwischen einer Mobilstation und einer Basisstation begrenzt. Dieser Pfadverlust, der auch Link-Budget genannt wird, hängt von den Eigenschaften der Send- und Empfangseinrichtungen ab und ist somit systemabhängig. In Tabelle 2.8 sind die zur Berechnung des Link-Budget notwendigen und in den Spezifikationen vorgegebenen Parameter von Sendern und Empfängern aufgelistet. TETRAPOL-Stationen sind wegen ihrer gegenüber TETRA halben Kanalbandbreite prinzipiell um 3 dB empfindlicher als TETRA-Stationen. Der zusätzliche Unterschied in der Empfindlichkeit von 3–4 dB ist im Wesentlichen durch das zweiwertige Modulationsverfahren von TETRA, gegenüber einem einwertigen Verfahren bei TETRAPOL, bestimmt.

Neben diesen spezifizierten Parametern beeinflussen implementierungsabhängige Eigenschaften, wie z. B. Antennengewinne, Dämpfungen durch Kabel oder Koppler, sowie Maßnahmen zum Ausnutzen von Diversität das Link-Budget. Allgemein gilt (alle Werte in dB):

$$L_{max} = P_S - V_S + G_S - E_E + G_E - V_E \quad (2.1)$$

mit L :nutzbarer Ausbreitungsverlust

P_S :maximale Sendeleistung

V_S :Verluste auf der Senderseite

G_S :Gewinn auf der Senderseite, z.B. Antennengewinn

E_E :minimal erforderliche Empfangsleistung (Empfindlichkeit)

G_E :Gewinn auf der Empfängerseite, z.B. Antennengewinn

V_E :Verluste auf der Empfängerseite

Tabelle 2.9: Link-Budget ohne Berücksichtigung von Gewinnen und Verlusten, Angaben in dB

Leistungs- klasse des Senders	TETRA				TETRAPOL			
	DL		UL		DL		MS	
	statisch	dyn.	statisch	dyn.	statisch	dyn.	statisch	dyn.
1	158	149	160	151	163	155	161	153
2	156	147	155	146	161	153	154	146
3	154	145	150	141	157	149	151	143
4	152	143	145	136	153	145		
5	150	141			149	141		
6	148	139						
7	146	137						
8	144	135						
9	142	133						
10	140	129						

Da TETRAPOL- und TETRA-Systeme im selben Frequenzbereich arbeiten und ihre Kanalbandbreiten ähnlich sind, sind die Gewinne G und Verluste V prinzipiell implementierungsabhängig und tragen daher zum Vergleich der beiden Systeme nichts bei. Tabelle 2.9 zeigt das Link-Budget für beide Systeme unter Vernachlässigung von Gewinnen und Verlusten.

Entsprechend der Okumura/Hata-Formeln, vgl. Gleichung (A.2) auf Seite 137, ist die Differenz zweier Pfadverluste nur vom Radius und der Basisantennenhöhe abhängig. Für die Differenz zweier Pfadverluste im Okumura/Hata-Modell ergibt sich, vgl. Gleichung (A.2) auf Seite 137:

$$\Delta PL = PL_a(R_a) - PL_b(R_b) \quad (2.2)$$

$$= (44,9 - 6,55 \log(h_b)) \cdot \log\left(\frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.3)$$

$$\frac{R_a}{R_b} = 10^{\frac{\Delta PL}{44,9 - 6,55 \log(h_b)}} \quad (2.4)$$

Das Verhältnis der maximalen Reichweiten im TETRA- und im TETRAPOL-System hängt demnach nur von den in Tabelle 2.9 aufgeführten maximalen Pfadverlusten ab. Abbildung 2.1 auf der nächsten Seite stellt das Verhältnis der Reichweiten als Funktion der Differenz der Pfadverluste dar.

Technisch gesehen ist der Unterschied in den maximalen Pfadverlusten nur in der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Empfänger begründet. Die jeweilige Spezifikation beschreibt aber sowohl für TETRA als auch für TETRAPOL Leistungsklassen für Mobil- und Basisstationen, vgl. Tabelle 2.8 auf der vorherigen Seite, so dass sich die damit realisierbaren Link-Budgets von den theoretisch erreichbaren Werten unterscheiden. In Tabelle 2.10 auf Seite 29 sind die Verhältnisse der maximalen Reichweiten $\frac{R_{TP}}{R_T}$ eines TETRAPOL-Systems zu denen eines TETRA-Systems aufgeführt. Das Verhältnis der durch eine Zelle abgedeckten Flächen $\frac{A_{TP}}{A_T}$ bestimmt den Faktor, um den ein System zur Versorgung derselben Fläche mehr Zellen benötigt als das andere. Tabelle 2.15 auf Seite 36 unterscheidet zwischen typischen und technischen Kennwerten. Die Reichweitenverhältnisse, die sich nur aufgrund der verschiedenen Empfängerempfindlichkeiten ergeben, sind in Tabelle 2.10 auf

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

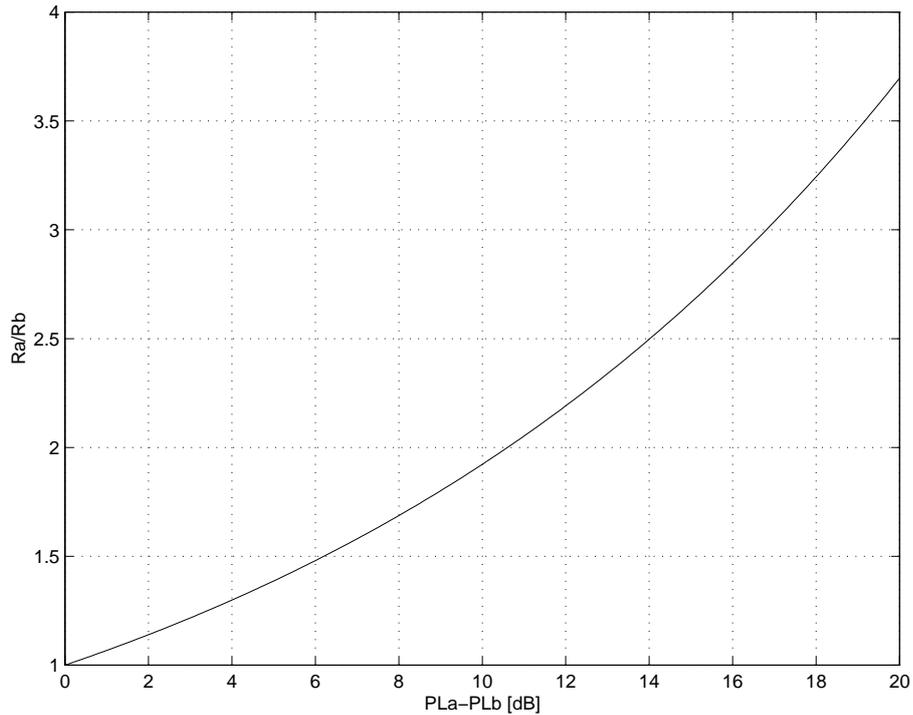


Abbildung 2.1: Radienverhältnis als Funktion der Differenz der maximalen Pfadverluste

der nächsten Seite unter *technisch* angegeben. Als *typisch* werden die Verhältnisse bezeichnet, die unter Berücksichtigung der Leistungsklassen der jeweiligen Standards gewonnen wurden.

Bei der Auswahl typischer Leistungsklassen wurde davon ausgegangen, dass für eine Basisstation, die in 30 m Höhe auf einem Mast angebracht ist, keine prinzipiellen Einschränkungen bzgl. der Leistungsklasse gelten. Es wurde daher für die Basisstationen beider Systeme die Leistungsklasse 1 gewählt. Die Aufwärtsstrecke wurde nur für den Betrieb mit Handfunkgeräten betrachtet, da das Link-Budget für Handfunkgeräte kleiner als für sonstige Mobilstationen und daher für die Bestimmung der Reichweite entscheidend ist. Bei der Wahl einer typischen Leistungsklasse für Handfunkgeräte wurde weiterhin eine maximal erlaubte Sendeleistung von 2 W, d. h. 33 dBm angenommen. Da im TETRA-Standard keine Leistungsklasse mit 33 dBm existiert, wurde die nächst niedrigere Klasse mit 30 dBm berücksichtigt [ETS97].

2.3.4 Bewertung

Wie in Tabelle 2.10 auf der nächsten Seite dargestellt, erzielt das TETRAPOL-System auf Grundlage der verschiedenen Empfängerempfindlichkeiten eine etwa anderthalbfache Reichweite, im dynamischen Fall sogar mehr. Wie aus Tabelle 2.10 auf der nächsten Seite weiterhin hervorgeht, ist unter Berücksichtigung der spezifizierten Leistungsklassen die Aufwärtsstrecke für die Reichweite entscheidend. Da in TETRA keine 2 W Handgeräte definiert sind, verschiebt sich das Verhältnis der Reichweiten typischerweise weiter zu Gunsten des TETRAPOL-Systems, mit dem im Extremfall knapp doppelt so große Entfernungen

Tabelle 2.10: Verhältnis der Reichweiten von TETRA- und TETRAPOL-Systemen

	Abwärtsstrecke		Aufwärtsstrecke	
	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
<i>typisch</i>				
Leistungsklasse TETRA	1	1	4	4
Leistungsklasse TETRAPOL	1	1	2	2
ΔPL (dB)	5	6	9	10
$\frac{R_{TP}}{R_T}$	1,39	1,48	1,8	1,92
$\frac{A_{TP}}{A_T}$	1,92	2,19	3,24	3,7
<i>technisch</i>				
ΔPL (dB)	7	8	6	7
$\frac{R_{TP}}{R_T}$	1,58	1,69	1,48	1,69
$\frac{A_{TP}}{A_T}$	2,5	2,85	2,19	2,85

erreichbar sind. Da Handgeräte in den meisten Fällen unbewegt betrieben werden, kann der statische Fall für einen realistischen Vergleich herangezogen werden. Hier erreicht das TETRAPOL- gegenüber dem TETRA-System eine 1,8-fache Reichweite.

Die Berechnung des Link-Budget und der Reichweiten basiert auf der Betrachtung von nur einer Zelle. Im mehrzellularen Netz kann die Größe einer Zelle erheblich von der theoretisch erreichbaren abweichen. Je nach Anforderung an Mobilität, Verkehr und verfügbarem Frequenzspektrum kann die Zellgröße im TETRAPOL-System theoretisch sogar kleiner sein als in TETRA, siehe hierzu Abschnitt 2.3.7.2 auf Seite 37.

2.3.5 Clustergrößen

Da TETRA und TETRAPOL zellulare Mobilfunksysteme sind, wird die durch das Funknetz zu versorgende Fläche in Funkzellen eingeteilt, die jeweils von einer Basisstation versorgt werden. Die Größe einer Zelle ist dabei unter anderem durch die in Abschnitt 2.3.3 auf Seite 26 beschriebene Reichweite begrenzt.

Sowohl TETRA als auch TETRAPOL verwenden das Frequenzvielfachzugriffsverfahren (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA). Dieses Verfahren erfordert die Einteilung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums in mehrere Frequenzkanäle. Im TETRA-System wird ein solcher Frequenzkanal zusätzlich noch im Zeitvielfach (*Time Division Multiple Access*, TDMA) betrieben.

Da die Anzahl der Teilfrequenzbänder begrenzt ist, müssen diese in anderen Zellen wiederverwendet werden. Man nennt eine Menge von Zellen, die ein zusammenhängendes Gebiet versorgen und in denen alle Teilfrequenzbänder des Gesamtspektrums genau einmal verwendet werden, ein Cluster. Die Zahl der Zellen eines Clusters wird Clustergröße genannt. Der Kehrwert der Clustergröße gibt an, welcher Anteil des Gesamtspektrums pro Zelle zur Verfügung steht.

2.3.5.1 Ausfallwahrscheinlichkeit

Nutz- und Störsignal weichen aufgrund von Abschattungseffekten lokal von ihrem in Abschnitt B.1 auf Seite 141 beschriebenen Mittelwert ab. Die Summe von mehreren log-normalverteilten Zufallsvariablen kann näherungsweise als log-normalverteilt angenommen werden [PK91]. Da sich damit das logarithmische Gleichkanal-Störverhältnis aus der Summe zweier normalverteilter Zufallsvariablen zusammensetzt, ist es ebenfalls normalverteilt, vgl. Abschnitt B.1 auf Seite 141. Die Verteilungsfunktion des Gleichkanal-Störabstandes berechnet sich unter Berücksichtigung von sechs Gleichkanalstörern wie folgt:

$$F(C/I) = \sum_n^6 F(C/I|n)F_n(n), \quad (2.5)$$

wobei $F(C/I|n)$ die Verteilungsfunktion des C/I ist, wenn genau n aktive Gleichkanalstörer existieren. $F_n(n)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass von sechs Störern genau n aktiv sind.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit P_{out} ist die Wahrscheinlichkeit, dass das C/I kleiner oder gleich dem mindestens erforderlichen Gleichkanal-Störabstand ist. Damit gilt:

$$P_{out} = F(C/I_{min}) \quad (2.6)$$

Geht man wie oben beschrieben davon aus, dass das C/I log-normalverteilt ist, so lautet die entsprechende Verteilungsfunktion:

$$F(C/I|n) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{C/I - \overline{C/I}(n)}{\sigma_{C/I}\sqrt{2}} \right). \quad (2.7)$$

Dabei gilt

$$\sigma_{C/I}^2 = \sigma_C^2 + \sigma_I^2. \quad (2.8)$$

Eine untere Grenze für den Mittelwert $\overline{C/I}$ kann man mit Hilfe von Gleichung (B.11) auf Seite 143 aus Anhang Abschnitt B.1 auf Seite 141 berechnen:

$$\overline{C/I}(n) = (44,9 - 6,55 \log h_B) \cdot \log \left(\sqrt{3N} - 1 \right) - 10 \log n, \quad (2.9)$$

wobei N die Clustergröße darstellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass von sechs möglichen Störern genau n aktiv sind, ist [PK91]

$$F_n(n) = \binom{6}{n} a_c^n (1 - a_c)^{(6-n)}. \quad (2.10)$$

Dabei ist a_c^n die Auslastung eines Gleichkanals, d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Kanal belegt ist, vgl. Abschnitt C.1 auf Seite 145. In Abbildung 2.2 auf der nächsten Seite ist die Verteilungsfunktion des C/I nach Gleichung (2.5) für verschiedene Auslastungen und Standardabweichungen σ dargestellt. Die Auslastungen wurden so gewählt, dass in einer Zelle mit 7 bzw. 15 Kanälen eine Blockierwahrscheinlichkeit von 2% erreicht wird.

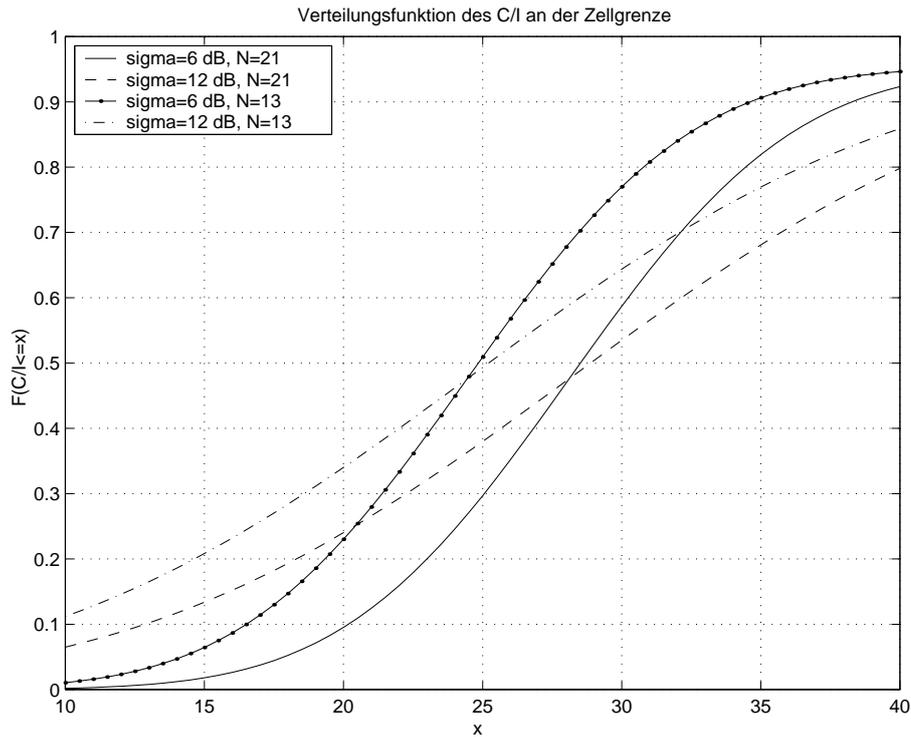


Abbildung 2.2: Verteilungsfunktion des C/I

2.3.5.2 Clustergröße

Abbildung 2.3 auf der nächsten Seite zeigt die Ausfallwahrscheinlichkeit an der Zellgrenze gemäß Gleichung (2.6) auf der vorherigen Seite für TETRA und TETRAPOL. Der Parameter σ bezeichnet die Standardabweichung des log-normalverteilten C/I . Bei einer Standardabweichung des Abschattungsschwundes von 4–10 dB beträgt die Standardabweichung σ des C/I zwischen 5,67–14,14 dB, vgl. Gleichung (2.8) auf der vorherigen Seite. Messungen in den Niederlanden haben typische Werte für den Abschattungsschwund zwischen 5,3 dB und 7,3 dB ergeben [vBSSR97]. Dies entspricht einer Standardabweichung für das C/I von 7,5 dB bzw. 10,3 dB.

2.3.5.3 Bewertung

Für den Betrieb eines Mobilfunknetzes sind Ausfallwahrscheinlichkeiten an der Zellgrenze zwischen 5 % und 10 % ausreichend [ETS97]. Allerdings verlangen die BOS mit ihrer Forderung nach 98% Orts-Zeitwahrscheinlichkeit der Funkversorgung eine Ausfallwahrscheinlichkeit am Zellrand von maximal 5 %. Bei einem geringen Abschattungsschwund ($\sigma_{C/I} = 6$ dB) folgt aus Abbildung 2.3 auf der nächsten Seite für das TETRA-System eine Mindest-Clustergröße von 21, für das TETRAPOL-System von 13, zur Erfüllung der BOS-Forderungen wären sogar Clustergrößen von 25 bzw. 15 notwendig. Eine Vergrößerung der Cluster führt zu einer geringeren spektralen Effizienz, d. h. bei begrenztem Spektrum zu einer Verminderung der Kapazität des Netzes. In Gebieten mit starkem Abschattungsschwund ist daher der Einsatz von sektorisierten Antennen erforderlich.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

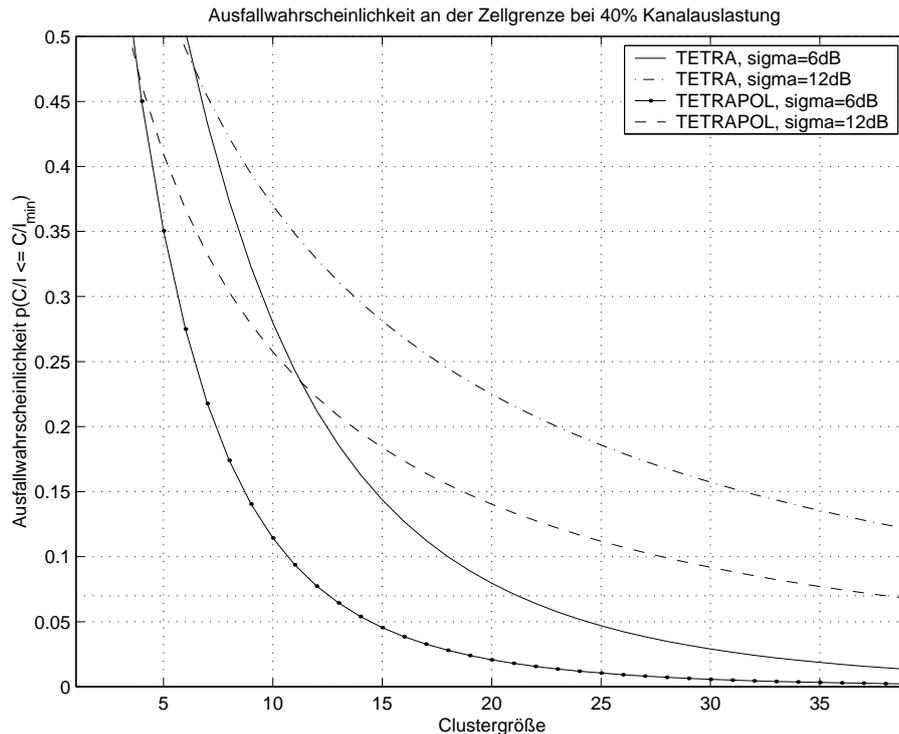


Abbildung 2.3: Ausfallwahrscheinlichkeit an der Zellgrenze in Abhängigkeit von der Clustergröße

2.3.6 Mengengerüst für das Funknetz

2.3.6.1 Empfangswahrscheinlichkeit

Aufgrund von Abschattungseffekten kann die Empfangsfeldstärke unter den mindestens erforderlichen Wert sinken. Die Wahrscheinlichkeit hierfür steigt mit zunehmendem Abstand zwischen Mobil- und Basisstation. Die komplementäre Wahrscheinlichkeit heißt Empfangswahrscheinlichkeit und ist ein wesentlicher Parameter beim Entwurf eines Mobilfunknetzes.

Für den Vergleich von TETRAPOL und TETRA wird, um einen ausreichenden Empfang sicherzustellen, eine Empfangswahrscheinlichkeit am Zellrand von 90 % vorausgesetzt. Dies entspricht einer mittleren Empfangswahrscheinlichkeit in der Zelle von etwa 95 % [ETS97]. Um eine Versorgung mit der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zu gewährleisten, müssen Schwundereignisse bei der Funkausbreitung mit berücksichtigt werden. Da bei der Funkausbreitung nur der Mittelwert des jeweiligen, distanzabhängigen Pfadverlustes berechnet werden kann, wird der bei der Link-Budget-Berechnung errechnete Wert für den maximalen Pfadverlust erniedrigt. Der Betrag dieses Zuschlages hängt zum einen von der Ausbreitungs Umgebung und zum anderen von der geforderten Versorgungswahrscheinlichkeit ab.

Langsamer Schwund kann als log-normal-verteilt angenommen werden; der schnelle Schwund folgt einer Rayleigh-Verteilung, wobei der Wert des langsamen Schwundes der Mittelwert der Rayleigh-Verteilung ist. Eine solche Verteilung nennt man Suzuki-Verteilung [Fre79]. Abbildung 2.4 auf der nächsten Seite zeigt für verschiedene σ die erreichbare Versorgungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Schwundzugabe.

Geht man von einer Standardabweichung des Schwundes von 7 dB in ländlichen und

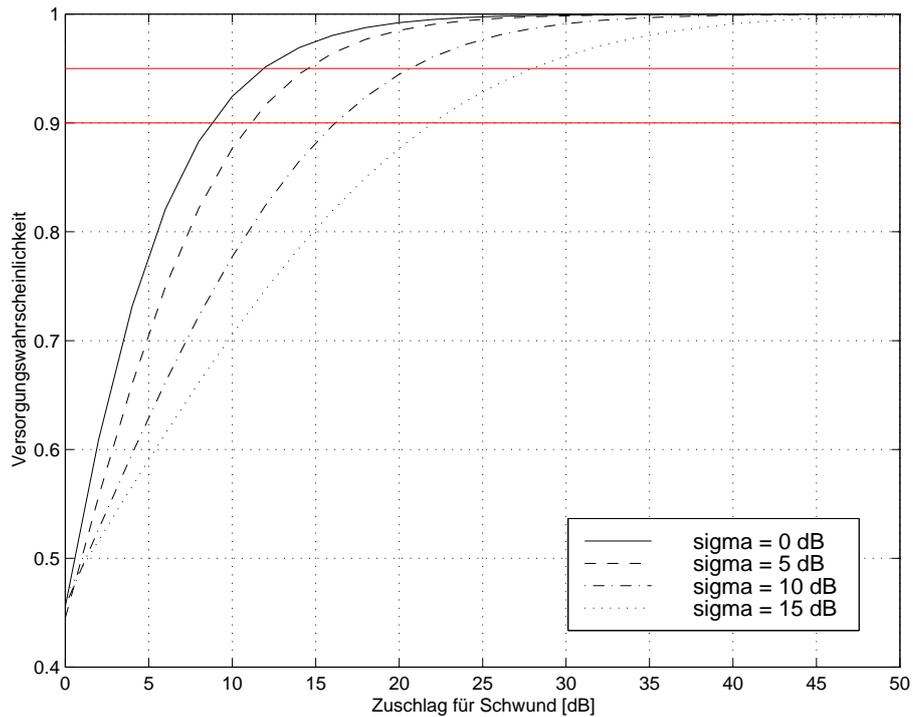


Abbildung 2.4: Betrag der Schwundzugabe für verschiedene Werte der Standardabweichung der Schwundereignisse

9 dB in städtischen Gebieten aus, so erfordert dies eine Schwundzugabe von 12,6 dB bzw. 15 dB.

2.3.6.2 Link-Budget

Zum Vergleich des Infrastrukturbedarfs für ein bundesweites Bündelfunknetz werden folgende Annahmen getroffen:

- Als Mobilstation wird ein unbewegtes Handfunkgerät betrachtet.
- In Innenstädten soll auch eine Funkversorgung innerhalb von Gebäuden gewährleistet sein, ansonsten genügt eine Versorgung außerhalb von Gebäuden. Hierzu wird in Innenstädten eine zusätzliche Reserve von 10 dB gefordert.
- Die Anforderungen an den Versorgungsgrad müssen sowohl für die Aufwärtsstrecke als auch für die Abwärtsstrecke erfüllt sein. In den meisten Fällen ist die Reichweite der Aufwärtsstrecke geringer, so dass deren Link-Budget entscheidend ist.
- Die systemunabhängigen Eigenschaften der Funkübertragungsgeräte (Antennengewinne, Dämpfungen etc.) sind für alle Systeme gleich.
- Die systemabhängigen Parameter entsprechen den Angaben in den jeweiligen Spezifikationen [For98f, ETS95].

Tabelle 2.11: Link Budget Aufwärtsstrecke TETRA

Gebiet	Innenstadt	Umland
Typ Sender	HH	HH
Sendeleistung (dBm)	30	30
Dämpfung durch Antennenkabel	-3	-3
Antennengewinn TX (dBi)	0	0
EIRP	27	27
Körperverlust (dB)	-5	-5
Schwundreserve (dB)	-15	-12,6
Gebäudeverlust (dB)	-10	0
max. Empfangsleistung	-3	9,4
max. Pfadverlust (dB)	118	130,4
min. Empfangsleistung (dBm)	-121	-121
Antennengewinn (dB)	8	8
Dämpfung durch Antennenkabel (dB)	-2	-2
Verlust durch Filter / Verteiler	-3	-3
Diversitätsgewinn (dB)	3	3
Empfindlichkeit (statisch) (dBm)	-115	-115

2.3.6.2.1 TETRA Die in Tabelle 2.11 und Tabelle 2.12 auf der nächsten Seite enthaltenen Zahlen für die Parameterwerte des TETRA-Standards zur Berechnung des Link-Budgets. Demnach ergibt sich für das Ausbreitungsgebiet Innenstadt ein maximal nutzbarer Ausbreitungsverlust von 118 dB und für das Umland ein maximal nutzbarer Ausbreitungsverlust von 130,4 dB.

2.3.6.2.2 TETRAPOL Die gleiche Berechnung ist für TETRAPOL in Tabelle 2.13 auf der nächsten Seite und Tabelle 2.14 auf Seite 36 dargestellt. Dabei ergibt sich für den Bereich Innenstadt ein maximal nutzbarer Ausbreitungsverlust von 127 dB und für das Umland ein Wert von 139,4 dB.

2.3.6.3 Bestimmung der notwendigen Anzahl von Basisstationen

Die Anzahl der für einen vorgegebenen Versorgungsgrad notwendigen Standorte für Basisstationen ist im wesentlichen von den funktechnischen Systemparametern und von der topographischen sowie morphologischen Beschaffenheit des zu versorgenden Gebietes abhängig. Der sich aus den Funkparametern und dem gewünschten Versorgungsgrad ergebende maximale Ausbreitungsverlust bestimmt die Reichweite und damit die von einer BS versorgte Fläche, vgl. Abschnitt 2.3.6.2 auf der vorherigen Seite.

Legt man der Berechnung des Ausbreitungsverlustes ein Hata-Okumura-Modell zugrunde, so ergeben sich bei 392 MHz und einer Differenz der Antennenhöhen von 38,5 m die in Tabelle 2.15 auf Seite 36 angegebenen Reichweiten in Abhängigkeit von der Ausbreitungs-umgebung (*Suburban* oder *Rural*) und vom gewünschten Versorgungsgrad.

Der Bestimmung der Zahl der Standorte liegt die Statistik der Flächennutzung in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt) zugrunde. Die Zuordnung der Ausbreitungs-umgebung und des Versorgungsgrades zu einem bestimmten Flächentyp erfolgte

Tabelle 2.12: Link Budget Abwärtsstrecke TETRA

Gebiet	Innenstadt	Umland
Typ Sender	BS	BS
Sendeleistung (dBm)	46	46
Verlust durch Filter / Kopplung (dB)	-4	-4
Dämpfung durch Antennenkabel	-2	-2
Antennengewinn TX (dBi)	8	8
EIRP	46	46
Körperverlust (dB)	-9	-9
Schwundreserve (dB)	-15	-12,6
Gebäudeverlust (dB)	-10	0
max. Empfangsleistung	12	24,4
max. Pfadverlust (dB)	121	133,4
min. Empfangsleistung (dBm)	-109	-109
Antennengewinn (dB)	-3	-3
Empfindlichkeit (statisch) (dBm)	-112	-112

Tabelle 2.13: Link Budget Aufwärtsstrecke TETRAPOL

Gebiet	Innenstadt	Umland
Typ Sender	HH	HH
Sendeleistung (dBm)	33	33
Dämpfung durch Antennenkabel	0	0
Antennengewinn TX (dBi)	-3	-3
EIRP	30	30
Körperverlust (dB)	-5	-5
Schwundreserve (dB)	-15	-12,6
Gebäudeverlust (dB)	-10	0
max. Empfangsleistung	0	12,4
min. Pfadverlust (dB)	127	139,4
min. Empfangsleistung (dBm)	-127	-127
Antennengewinn (dB)	8	8
Dämpfung durch Antennenkabel (dB)	-2	-2
Verlust durch Filter / Verteiler	-3	-3
Diversitätsgewinn (dB)	3	3
Empfindlichkeit (statisch) (dBm)	-121	-121

Tabelle 2.14: Link Budget Abwärtsstrecke TETRAPOL

Gebiet	Innenstadt	Umland
Typ Sender	BS	BS
Sendeleistung (dBm)	46	46
Verlust durch Filter / Kopplung (dB)	-4	-4
Dämpfung durch Antennenkabel	-2	-2
Antennengewinn TX (dBi)	8	8
EIRP	48	48
Körperverlust (dB)	-9	-9
Schwundreserve (dB)	-15	-12,6
Gebäudeverlust (dB)	-10	0
max. Empfangsleistung	14	26,4
max. Pfadverlust (dB)	135	142,4
min. Empfangsleistung (dBm)	-116	-116
Antennengewinn (dB)	-3	-3
Empfindlichkeit (statisch) (dBm)	-119	-119

Tabelle 2.15: Reichweiten für verschiedene Umgebungen und Versorgungsgrade für TETRA und TETRAPOL

	Versorgungsgrad	Link Budget (dB)	Reichweite (km)	
			<i>Suburban</i>	<i>Rural</i>
TETRA	Innenstadt	118	2,055	3,4
	Umland	130,4	4,711	7,795
TETRAPOL	Innenstadt	127	3,75	6,21
	Umland	139,4	8,61	14,24

durch die Autoren dieser Studie. Der Flächentyp *Gebäude- und Freifläche* entspricht z. B. der bebauten Fläche Deutschlands und wird daher der Klasse *Innenstadt, Suburban* zugeordnet. Insgesamt wurde eine Fläche von etwa 356601 km² in neun Klassen berücksichtigt. Tabelle 2.16 auf der nächsten Seite zeigt die Berechnung der notwendigen Anzahl von Standorten im TETRA-System auf Grundlage der statistischen Daten.

2.3.6.4 Bewertung

Es ergibt sich für ein bundesweites TETRA-Netz eine Gesamtzahl von 3986 Standorten. Ein entsprechendes Bündelfunknetz mit TETRAPOL-Funktechnik würde etwa ein Drittel, nämlich 1194 Standorte benötigen. Damit hat eine TETRAPOL-Zelle im Mittel eine etwa 1,83-fache Reichweite einer TETRA-Zelle, vgl. Abschnitt 2.3.3 auf Seite 26.

Tabelle 2.16: Beispielhafte Berechnung der Anzahl von Standorten im TETRA-System (T) und im TETRAPOL-System (TP) für die Annahmen laut Tabellen 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15

Umgebung (km ²)	Innenstadt		Umland			
	Gesamtfläche	Anzahl Zellen		Gesamtfläche	Anzahl Zellen	
	(km ²)	T	TP	(km ²)	T	TP
Suburban	20739	1737	521	26267	419	125
Rural	1143	35	10	308452	1795	538
Σ		1772	531		2214	663

Berechnungsgrundlage: Funkversorgung 95% außerorts und Gebäudeversorgung in Städten für Handfunkgeräte (T: 1 W, TP: 2 W Sendeleistung) in Gürteltrageweise. Einzelheiten siehe Text.

2.3.7 Spektrumsbedarf

Der Bedarf an Frequenzspektrum eines Mobilfunksystems ist im Wesentlichen durch den zu tragenden Verkehr und durch die Breite eines Frequenzkanals sowie durch die Clustergröße bestimmt. Zum Vergleich der beiden Systeme TETRA und TETRAPOL wird hier von einer Frequenzkanalbreite von 25 bzw. 12,5 kHz ausgegangen [For98f, ETS95].

2.3.7.1 Spektrumsbedarf für Signalisierung

In TETRAPOL steht pro Zelle mindestens ein Organisationskanal der Breite 12,5 kHz zur Verfügung. Die Zahl der notwendigen Organisationskanäle ist im wesentlichen durch die Signalisierungskapazität auf der Aufwärtsstrecke und damit durch den zu tragenden Verkehr pro Zelle bestimmt. Punkt-zu-Punkt-Verkehr wird über den *Random Access Channel* (RACH) signalisiert. Dieser Kanal stellt sechs Zugriffsmöglichkeiten pro Sekunde zur Verfügung. Geht man davon aus, dass der RACH wegen der unvermeidbaren Kollisionen etwa zu einem Drittel ausgelastet werden kann, so hat er eine Kapazität von etwa zwei Zugriffen pro Sekunde. Bei einer mittleren Gesprächsdauer von 20 Sekunden kann der RACH damit etwa 40 Erlang Punkt-zu-Punkt-Verkehr versorgen. Punkt-zu-Multipunkt-Verkehr wird über den *Dynamic Access Channel* (DACH) signalisiert, der etwa 30 Signalisierungen pro Sekunde erlaubt. Die Signalisierungskapazität reicht damit bei einer mittleren Rufdauer von 20 Sekunden für etwa 600 Erlang.

Im TETRA-System sind nach Simulationsuntersuchungen des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze pro Organisationskanal etwa 50 Zugriffe in der Sekunde möglich. Bei einer mittleren Gesprächsdauer von 20 Sekunden entspricht das einem Verkehr von 1000 Erlang.

In allen realistischen Netzentwürfen wird man daher zumindest für reinen Sprachverkehr immer mit einem Organisationskanal pro Zelle auskommen.

2.3.7.2 Spektrum für Punkt-zu-Punkt-Verkehr

Für den Vergleich der Systeme wird bei TETRA mit einem 21er Cluster und bei TETRAPOL mit einem 13er Cluster gerechnet. Diese Annahmen sind aufgrund der Ausführungen in Abschnitt 2.3.5.2 auf Seite 31 gerechtfertigt. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung einen Verkehrskanal in genau einer Zelle belegt.

Der Spektrumsbedarf berechnet sich dann wie folgt:

$$B = N \cdot (K + O) \cdot W/q \quad (2.11)$$

mit N : Clustergröße

K : Anzahl Verkehrskanäle pro Zelle

O : Anzahl Organisationskanäle pro Zelle

W : Bandbreite eines Frequenzkanals

q : Anzahl der Verkehrskanäle pro Frequenzkanal

A : Fläche einer Zelle

V : tragbarer Verkehr

Im folgenden bezeichnet der Index T eine TETRA-Größe, der Index TP eine Größe des TETRAPOL-Systems. Steht beiden Systemen dasselbe Frequenzspektrum zur Verfügung, dann gilt für ein gegebenes Spektrum B laut Gleichung (2.11):

$$N_{TP} \cdot (K_{TP} + 1) \cdot W_{TP}/q_{TP} = N_T \cdot (K_T + 1) \cdot W_T/q_T \quad (2.12)$$

$$13 \cdot (K_{TP} + 1) \cdot 12,5 = 21 \cdot (K_T + 1) \cdot 25/4 \quad (2.13)$$

$$\frac{K_{TP} + 1}{K_T + 1} = \frac{21 \cdot 25}{4 \cdot 13 \cdot 12,5} = c \quad (2.14)$$

$$\frac{K_{TP}}{K_T} = c - \frac{1 - c}{K_T} \quad (2.15)$$

Würde man die Organisationskanäle vernachlässigen, wäre das Verhältnis $K_{TP}/K_T = c$. Zellgröße und zu tragender Verkehr hängen über die Verkehrsdichte ρ zusammen. Da K im Sinne der Verkehrstheorie die Anzahl der Bediener darstellt, kann mit Hilfe der Erlang-B-Formel (Gleichung (C.3) auf Seite 145) der pro Zelle tragbare Verkehr V in Abhängigkeit von K ermittelt werden. Da c kleiner ist als Eins, gilt bei konstanter Verkehrsdichte aufgrund des Bündelgewinns:

$$\frac{K_{TP}}{K_T} > \frac{V_{TP}}{V_T} \quad (2.16)$$

$$> \frac{A_{TP}}{A_T}, \quad (2.17)$$

wobei A die Fläche einer Zelle darstellt. Das bedeutet, dass das Verhältnis $\frac{K_{TP}}{K_T}$ eine obere Grenze für das Verhältnis der Zellgrößen darstellt. Abbildung 2.5 auf der nächsten Seite stellt das Verhältnis $\frac{K_{TP}}{K_T}$ als Funktion der pro TETRA-Zelle verfügbaren Verkehrskanäle dar.

Es zeigt sich, dass die TETRAPOL-Zellen höchstens den Verkehr von 60–80% der Fläche einer TETRA-Zelle tragen können und daher entsprechend kleiner sein müssen, wenn beiden Systemen das gleiche Spektrum zur Verfügung steht und nur Punkt-zu-Punkt-Verkehr vorliegt.

2.3.7.3 Spektrum für ein bundesweites Bündelfunknetz

Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehr ist dadurch charakterisiert, dass ein Ruf unter Umständen einen Verkehrskanal in mehreren Zellen gleichzeitig belegt. Dies ist dann der Fall, wenn das

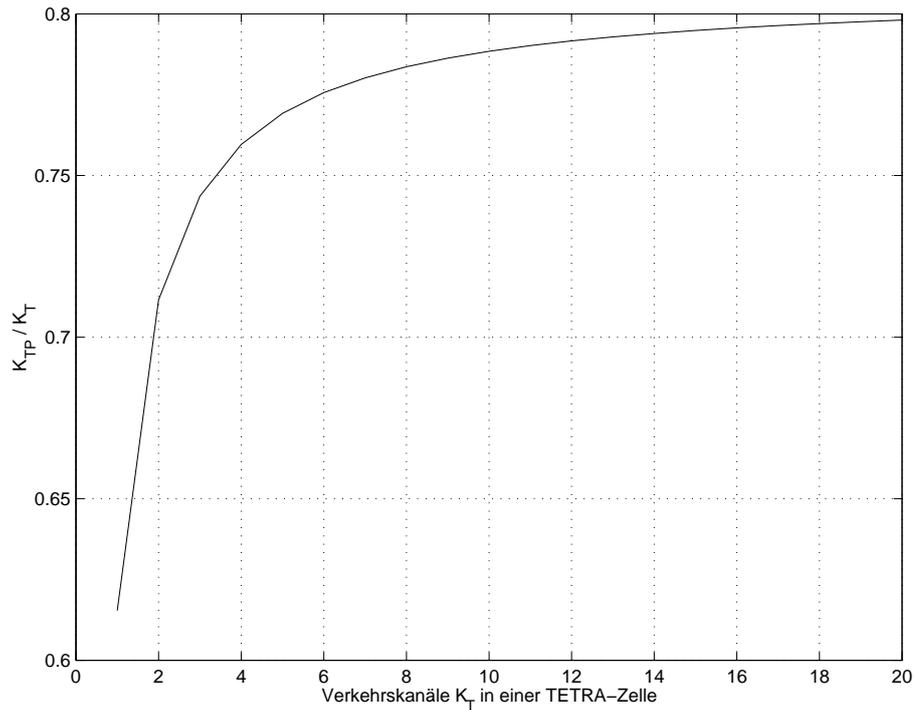


Abbildung 2.5: Obere Grenze für das Verhältnis der Zellgrößen bei Punkt-zu-Punkt-Verkehr

Arbeitsgebiet einer Kommunikationsgruppe von mehr als einer Zelle versorgt wird. In BOS-Netzen ist das Gebiet, in dem eine Gruppe kommuniziert, typischerweise viel kleiner als das Gesamtnetz. Umfasst ein solches Gebiet den Versorgungsbereich von mehr als einer Zelle, so hängt die Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehrskapazität nur von der pro Zelle zur Verfügung stehenden Zahl der Verkehrskanäle, nicht aber von der Zellgröße ab. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Verkleinerung der Zellen nicht zur Steigerung der Verkehrskapazität genutzt werden kann.

Aus diesem Grund lassen sich für BOS-Gruppenkommunikationsdienste Gleichwellennetze besonders effizient nutzen. Weiterhin kann bei Gleichwellenfunk die maximale Reichweite ausgenutzt werden, vgl. Abschnitt 2.3.3 auf Seite 26.

Das für die im Netzmodell der Unterarbeitsgruppe Technik der Projektgruppe Digitalfunk der deutschen BOS geforderte Nachrichtenverkehrskapazität pro Zelle notwendige Spektrum für Punkt-zu-Mehrpunkt-Kommunikation ist:

$$B = N \cdot \lceil (K + O)/q \rceil \cdot W, \quad (2.18)$$

wobei $\lceil \dots \rceil$ die Rundung auf die nächstgrößere ganze Zahl bedeutet. Abbildung 2.6 auf der nächsten Seite zeigt diesen Frequenzbedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Verkehrskanäle pro Zelle. Es sei darauf hingewiesen, dass die Anzahl der pro Zelle erforderlichen Verkehrskanäle für TETRAPOL und TETRA unterschiedlich sein kann, vgl. Abschnitt 2.3.8.2 auf Seite 42.

In Deutschland steht für das digitale BOS-Netz eine Frequenzbandbreite von 3 MHz (Angabe in der Ausschreibung des Pilotversuches) plus 2 MHz (ist allgemein bekannt) zur Verfügung. Tabelle 2.17 auf der nächsten Seite stellt den für großflächige Bündelfunknetze

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

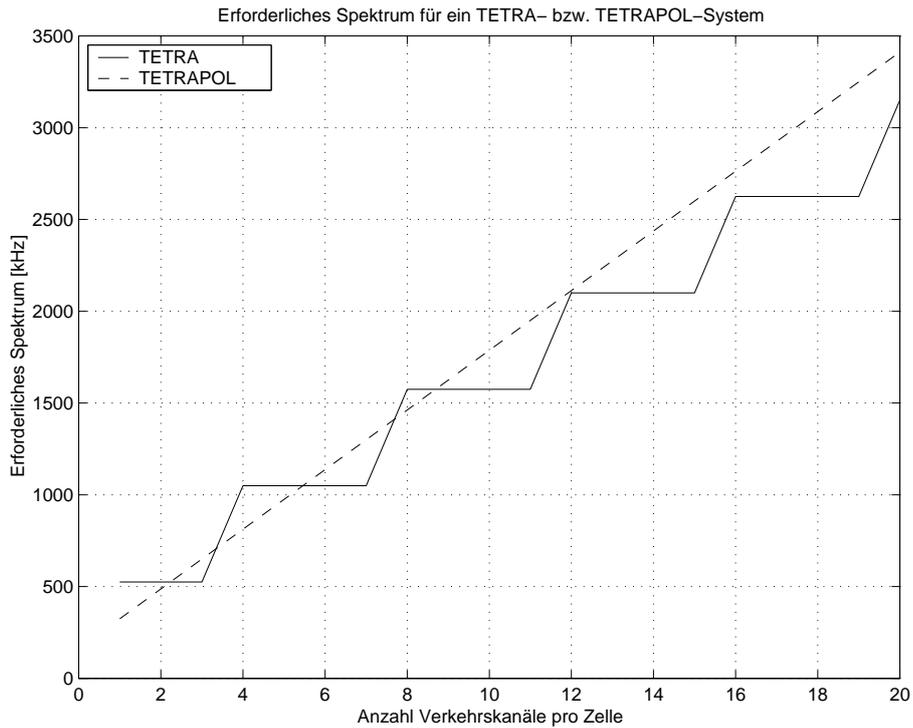


Abbildung 2.6: Spektrumsbedarf bei Punkt-zu-Mehrpunkt Verkehr (Gruppenruf)

Tabelle 2.17: Spektrumsbedarf für großflächige Bündelfunknetze nach TETRA- und TETRAPOL-Standard

geforderte Zahl Kanäle	Bandbreite/Zelle (kHz)		Bandbreite/Cluster (MHz)	
	TETRA	TETRAPOL	TETRA (21)	TETRAPOL (13)
7×4 (Deutschland)	175	350	3,675	4,55
4×4 (Belgien)	100	200	2,1	2,6
5×4 (Landesgrenzen)	125	250	2,625	3,25

mit Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehr notwendigen Spektrumsbedarf zusammen.

2.3.7.4 Bewertung

Berücksichtigt man, dass im europäischen Grenzbereich wegen Koordinationsbedarf mit Nachbarländern grob geschätzt nur die Hälfte, d. h. 2,5 MHz in Deutschland zur Nutzung zur Verfügung stehen, dann kann Tabelle 2.17 wie folgt interpretiert werden:

- Die in Deutschland für Ballungsgebiete geforderte Kanalausstattung ist mit beiden Systemtypen im vorhandenen 5 MHz Band problemlos realisierbar.
- Im Grenzgebiet zu europäischen Nachbarländern sind für beide Systemtypen Einschränkungen der verfügbaren Kapazität vorhanden. TETRA kann dort ca. 20 Kanäle verfügbar machen, TETRAPOL ca. 16.

Tabelle 2.18: Auslastung von typischen Kanalbündeln

Verkehrskanäle pro Zelle	geforderte Blockierwahrscheinlichkeit (%)	tragbarer Verkehr (Erlang)	Auslastung a_c (%)
7	5	3,7	53
15	5	10,6	71
7	2	2,9	41
15	2	9	60
7	1	2,5	36
15	1	8,1	54

2.3.8 Spektrale Kapazität

Ein Maß dafür, wieviel Verkehr ein Netz pro Bandbreite und Zelle tragen kann, ist die spektrale Kapazität. Der in einer Zelle tragbare Verkehr ist sowohl durch die erforderliche Clustergröße als auch durch die Zahl der Verkehrskanäle, die Art des Verkehrs sowie durch die geforderte Dienstgüte bestimmt. Die Clustergröße bestimmt die Anzahl der Verkehrskanäle, die bei einem vorgegebenen Spektrum in einer Zelle verfügbar sein können. Der Verkehr, der abhängig von der geforderten Dienstgüte in einer Zelle tragbar ist, kann wie in Abschnitt C.1 auf Seite 145 und Abschnitt C.2 auf Seite 146 beschrieben berechnet werden.

In Tabelle 2.18 ist der erreichbare Nutzungsgrad bei der für das deutsche BOS-Netz geforderten Kanalausstattung von Innenstadt- und Umland-Zellen dargestellt.

2.3.8.1 Spektrale Kapazität für Punkt-zu-Punkt-Verkehr

Die spektrale Kapazität gibt an, wieviel Verkehr pro MHz und Zelle von einem Netz getragen werden kann. Die Gesamtkapazität eines Netzes ist von der Zahl der Zellen und damit auch von der Zellgröße abhängig. Wie in Abschnitt 2.3.7.2 auf Seite 37 bereits gezeigt, lässt sich die Kapazität eines Netzes durch Verkleinerung der Zellen steigern.

Zur Berechnung der spektralen Kapazität für Punkt-zu-Punkt-Verkehr wird angenommen, dass ein TETRAPOL-Netz eine Clustergröße von 13 und ein TETRA-Netz eine Clustergröße von 21 benötigt. Weiterhin wird ein Verlustsystem vorausgesetzt und eine Blockierwahrscheinlichkeit von maximal 2 % gefordert.

Die Anzahl der Kanäle pro Zelle ist durch Gleichung (2.11) auf Seite 38 gegeben. Gleichung (C.3) auf Seite 145 in Abschnitt C.1 auf Seite 145 ergibt den tragbaren Verkehr für die vorgegebene Dienstgüte. In Tabelle 2.19 auf der nächsten Seite ist die Berechnung der spektralen Kapazität für Punkt-zu-Punkt-Verkehr bei einem Gesamtspektrum von 5 MHz bzw. 3 MHz dargestellt.

Bezeichnet η die spektrale Kapazität, so gilt

$$\eta = \frac{V}{B}, \quad (2.19)$$

und unter Verwendung von Gleichung 2.16

$$\frac{\eta_{TP}}{\eta_T} = \frac{V_{TP}}{V_T} < \frac{K_{TP}}{K_T} \quad (2.20)$$

Tabelle 2.19: Spektrale Kapazität für Punkt-zu-Punkt-Verkehr

	TETRA	TETRAPOL	Verhältnis TP/T
<hr/> 5 MHz <hr/>			
Träger pro Zelle	9,52	30,8	
Kanäle pro Zelle	37,1	29,8	
Verkehr pro Zelle	28,3	21,8	0,9
Kapazität η [Erlang/MHz/Zelle]	5,65	4,36	0,77
<hr/> 3 MHz <hr/>			
Träger pro Zelle	5,7	18,5	
Kanäle pro Zelle	21,9	17,5	
Verkehr pro Zelle	14,8	11	0,8
Kapazität η [Erlang/MHz/Zelle]	4,9	3,7	0,75

Abbildung 2.5 auf Seite 39 stellt das Verhältnis $\frac{K_{TP}}{K_T}$ als Funktion der pro TETRA-Zelle verfügbaren Verkehrskanäle und damit als Funktion des insgesamt verfügbaren Spektrums dar.

2.3.8.2 Spektrale Kapazität für Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehr

Wie in Abschnitt 2.3.7.3 auf Seite 38 bereits erläutert, hängt die Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehrskapazität nur von der pro Zelle zur Verfügung stehenden Zahl der Verkehrskanäle, nicht aber von der Zellgröße ab. In diesem Fall kann eine Verkleinerung der Zellen nicht zur Steigerung der Verkehrskapazität genutzt werden. Durch die besondere Eigenschaft des Punkt-zu-Mehrpunkt-Verkehrs, dass ein Gruppenruf Verkehr in mehr als einer Zelle erzeugen kann, ist es sinnvoll, eine spektrale Gruppenkapazität zu definieren:

Die spektrale Gruppenkapazität bezeichnet den Verkehr durch Gruppenrufe, die ein Netz pro MHz und Zelle tragen kann.

Zur Berechnung der spektralen Gruppenkapazität wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Es wird ein unendlich großes Netz betrachtet.
- Die Zellen des Netzes sind gleich groß und in regelmäßigen Abständen angeordnet.
- Eine Gruppe hat ein zusammenhängendes Gebiet der Fläche A_G , in dem sie kommuniziert. Rufe entstehen in dieser Fläche und werden in allen Zellen ausgesendet, die diese Fläche abdecken.
- Die Fläche A_G ist für alle Gruppen gleich. Weiterhin sind die Gruppen gleichmäßig über die Gesamtfläche des Netzes verteilt, die Gruppendichte ist also konstant.

Mit diesen Voraussetzungen kann der Verkehr berechnet werden, den ein Gruppenruf pro MHz und Zelle hervorruft. Ein Erlang Gruppenkommunikation erzeugt gleichzeitig ein

Erlang Verkehr in k_G Zellen. Mit einer Verkehrskapazität V von einem Erlang pro Zelle kann ein Netz also

$$\frac{1}{k_G} \left[\frac{\frac{\text{Gruppen}}{\text{Zelle}}}{\frac{\text{Erlang}}{\text{Zelle}}} = \frac{\text{Gruppen}}{\text{Erlang}} \right] \quad (2.21)$$

Gruppen pro Erlang zellularer, d. h. Punkt-zu-Punkt-Verkehrskapazität, tragen. Die spektrale Gruppenkapazität ist demnach

$$\xi = \frac{V}{B} \frac{1}{k_G} = \frac{\eta}{k_G} \left[\frac{\text{Gruppen}}{\text{MHz Zelle}} \right]. \quad (2.22)$$

Für das Verhältnis der spektralen Gruppenkapazitäten von TETRAPOL und TETRA ergibt sich:

$$\frac{\xi_{TP}}{\xi_T} = \frac{\eta_{TP}}{\eta_T} \frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}}. \quad (2.23)$$

Da A_G typischerweise kein ganzzahliges Vielfaches der Zellfläche ist, gilt allgemein:

$$k = \left\lceil \frac{A_G}{A_{Zelle}} \right\rceil \geq \frac{A_G}{A_{Zelle}}. \quad (2.24)$$

Ist A_G im Intervall einer Zellgröße gleichverteilt, so gilt im Mittel:

$$k = \frac{A_G}{A_{Zelle}} + 0,5 \quad (2.25)$$

Für das Verhältnis $\frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}}$ ergibt sich damit im Mittel:

$$\frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}} = \frac{A_{TP}}{A_T} \frac{A_G + 0,5A_T}{A_G + 0,5A_{TP}}, \quad (2.26)$$

bzw. ganzzahlig:

$$\frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}} = \frac{\left\lceil \frac{A_G}{A_T} \right\rceil}{\left\lceil \frac{A_G}{A_{TP}} \right\rceil}. \quad (2.27)$$

$$\frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}} = \begin{cases} 1 & \text{für } A_G \rightarrow 0 \text{ (entspricht Punkt-zu-Punkt Verkehr)} \\ \frac{A_{TP}}{A_T} & \text{für } A_G \rightarrow \infty \text{ (entspr. einer über das ges. Netz verteilten Gruppe)} \end{cases} \quad (2.28)$$

Das Verhältnis $\frac{k_{G,T}}{k_{G,TP}}$ liegt also zwischen Eins und 3,7, vgl. $\frac{A_{TP}}{A_T}$ in Tabelle 2.10 auf Seite 29. Mit den spektralen Kapazitäten η aus Tabelle 2.19 auf der vorherigen Seite ergeben sich für das Verhältnis der spektralen Gruppenkapazität die in Tabelle 2.20 auf Seite 45 zusammengefassten Werte. Das verfügbare Spektrum wurde zu 5 MHz angenommen.

Da das Verhältnis $\frac{\xi_{TP}}{\xi_T}$ bei gegebenem A_{TP}/A_T nur noch von dem Verhältnis A_T/A_G einer Zelle zur Fläche einer Gruppe abhängt, lässt es sich als Funktion der genormten Gruppengröße A_T/A_G darstellen, vgl. Abbildung 2.7 auf der nächsten Seite.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

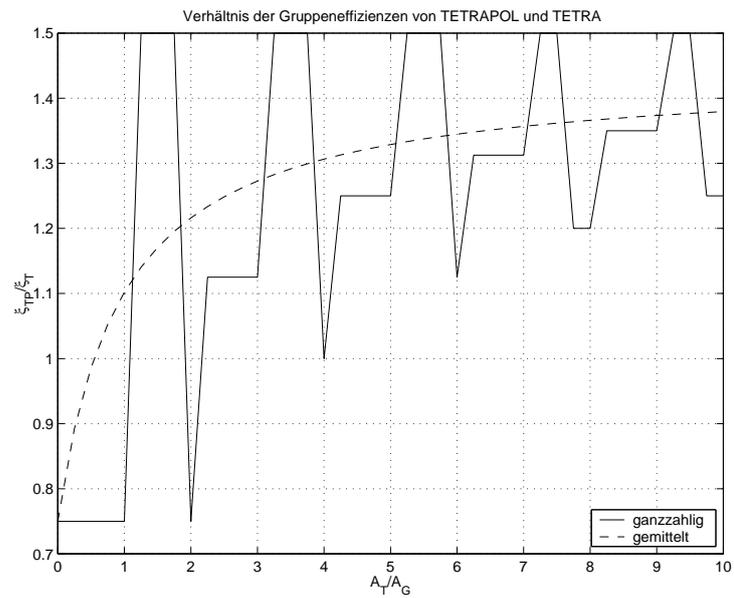


Abbildung 2.7: Verhältnis der spektralen Effizienzen für Gruppenkommunikation in TETRAPOL und in TETRA

Tabelle 2.20: Spektrale Kapazität bei Gruppenkommunikation

	Abwärtsstrecke		Aufwärtsstrecke	
	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
<i>typisch</i>				
Leistungsklasse T	1	1	4	4
Leistungsklasse TP	1	1	2	2
Clustergröße T	21	21	21	21
Clustergröße TP	13	13	13	13
$\frac{A_{TP}}{A_T}$	1,92	2,19	3,24	3,7
$(\frac{\xi_{TP}}{\xi_T})_{min}$	0,76	0,76	0,76	0,76
$(\frac{\xi_{TP}}{\xi_T})_{max}$	1,46	1,66	2,46	2,81
<i>technisch</i>				
Clustergröße T	21	21	21	21
Clustergröße TP	13	13	13	13
$\frac{A_{TP}}{A_T}$	2,5	2,85	2,19	2,85
$(\frac{\xi_{TP}}{\xi_T})_{min}$	0,76	0,76	0,76	0,76
$(\frac{\xi_{TP}}{\xi_T})_{max}$	1,9	2,17	1,17	2,17

2.3.8.3 Bewertung

Es zeigt sich, dass für Punkt-zu-Punkt-Verkehr TETRAPOL abhängig vom Bündelungsgewinn typischerweise nur etwa 76 % der spektralen Kapazität von TETRA erreicht. Damit können z. B. Datendienste als typische Punkt-zu-Punkt-Dienste in TETRA wesentlich effizienter realisiert werden als in TETRAPOL.

Da die spektrale Kapazität ξ für Gruppenkommunikation von der Gruppengröße abhängt, kann sie, wie Tabelle 2.20 zeigt, für TETRAPOL bei sehr kleiner Gruppengröße etwa 24% kleiner, bei größeren, ausgedehnt operierenden Gruppen aber auch mehr als doppelt so groß sein als bei TETRA. Wenn das zusammenhängende Aktionsgebiet einer Gruppe bis zu vier TETRA-Zellen groß ist, und sich in jeder dieser Zellen mindestens ein Teilnehmer der Gruppe befindet, kann die spektrale Effizienz in TETRA größer sein als in TETRAPOL. Das Gruppengebiet kann im Umland bis zu etwa 235 km² groß sein, in der Innenstadt bis zu etwa 44 km². Dieser Vorteil von TETRA kann aber nur realisiert werden, wenn das Versorgungsgebiet der Zellen an das Aktionsgebiet der Gruppe angepaßt sind, was in der Praxis nur schwer zu erreichen ist.

Das TETRAPOL-System kann seinen Vorteil bei der spektralen Gruppeneffizienz dann zum Tragen bringen, wenn ein Gruppenruf nur in den Zellen des Versorgungsgebietes der Gruppe ausgesendet wird, in denen sich Teilnehmer dieser Gruppe aufhalten. Bei Gruppen mit großem Versorgungsgebiet aber kleiner Nutzerzahl oder bei Gruppen mit hoher Mobilität ist eine solche dynamische Anpassung des Versorgungsgebietes der Gruppe notwendig, wie sie sowohl in TETRA als auch in TETRAPOL möglich ist. Dadurch wird gewährleistet, dass Verkehr nur in Zellen erzeugt wird, in denen sich Teilnehmer der Gruppe aufhalten.

Müssen große Flächen statisch versorgt werden, kann durch Gleichwellenversorgung die Zellfläche für TETRAPOL und damit die spektrale Gruppeneffizienz für solche Gruppen

wesentlich vergrößert werden.

2.3.9 Koexistenz und Spektrale Verträglichkeit

Aufgrund nichtidealer Verstärker und Filter in Mobil- und Basisstationen ist das Leistungsdichtespektrum des gesendeten Signals nicht auf die nominelle Kanalbandbreite beschränkt. Abhängig vom Modulationsverfahren und von der Güte der verwendeten Bauelemente in den Stationen wird auch Leistung in benachbarten Frequenzkanälen ausgesendet, die sich dort als Interferenz bemerkbar macht. Umgekehrt entspricht auch die Empfangsbandbreite wegen nichtidealer Empfangsfilter nicht der nominellen Kanalbandbreite, so dass auch aus Nachbarbändern Störleistung aufgenommen werden kann.

Die für ein System erlaubten Seitenbandaussendungen sind in den jeweiligen Standards festgeschrieben.

TETRA verwendet eine $\pi/4$ -DQPSK-Modulation, deren Einhüllende nicht konstant ist. Um Seitenband-Aussendungen zu begrenzen muss der Verstärker eines TETRA-Senders eine sehr lineare Verstärker-Kennlinie aufweisen. TETRAPOL verwendet eine GMSK-Modulation, deren Einhüllende konstant ist, was zur Folge hat, dass nur vergleichsweise geringe Anforderungen an die Verstärker gestellt werden müssen. Dieser Unterschied zwischen TETRA und TETRAPOL äußert sich letztlich darin, dass die Herstellung der TETRA-Funkeinheiten teurer ist als bei TETRAPOL.

Betrachtet man ein isoliertes TETRAPOL- oder TETRA-System, so können diese Effekte durch eine entsprechende Frequenzplanung minimiert und ein störungsfreier Betrieb gewährleistet werden.

2.3.9.1 Koexistenz mit anderen Mobilfunksystemen

Liegen die Sende- bzw. Empfangsbänder verschiedener Mobilfunksysteme im Spektrum nebeneinander oder sind einzelne Frequenzbänder sogar ineinander verschränkt, wie es z. B. an der Bundesgrenze üblich ist, so muss abhängig von den spektralen Eigenschaften der Funkgeräte ein Schutzabstand zwischen den betroffenen System im Frequenzband eingehalten werden. Da dieser Schutzabstand durch ein nicht genutztes Frequenzband realisiert wird, steigt der effektive Frequenzbedarf für ein System und die spektrale Kapazität bzw. Effizienz sinkt.

Da ein TETRA-Kanal etwa doppelt so breit ist wie ein TETRAPOL-Kanal, ist der Frequenzbereich, in dem Seitenbandaussendungen wirksam sind, bei TETRA breiter, so dass die notwendigen Schutzabstände zu benachbarten Systemen entsprechend größer sein müssen. Da die spektrale Effizienz von TETRA größer, aber auch kleiner als die von TETRAPOL sein kann (vgl. Abschnitt 2.3.8.3), kann eine Aussage zur Auswirkung der Schutzabstände auf die Effizienz der Frequenzbandnutzung nur im konkreten Fall gemacht werden.

2.3.9.2 Spektrale Verträglichkeit im Direkt-Modus

Die Kommunikation im Direkt-Modus wirkt sich bzgl. der Koexistenzproblematik prinzipiell wie ein vom Netz unabhängiges, fremdes Mobilfunksystem aus. Da die Direkt-Modus Kommunikation theoretisch sowohl im Frequenzband der Aufwärtsstrecke als auch im Frequenzband der Abwärtsstrecke möglich ist, ergeben sich folgende besonderen Störsituationen.

- *DMO-Mobilstation stört Basisstation.* Findet der DMO-Betrieb im Band der Aufwärtsstrecke statt, so besteht die Möglichkeit, dass eine DMO-Mobilstation in einem dem Empfangskanal der Basisstation benachbarten Frequenzkanal sendet und die Basisstation stört, wenn sich diese in räumlicher Nähe zur DMO-Mobilstation befindet. Die dabei wirkende Störleistung kann zu einer Verminderung der Reichweite der Basisstation auf der Aufwärtsstrecke führen.
- *Basisstation stört DMO-Mobilstation.* Findet der DMO-Betrieb im Downlink-Band statt, so besteht die Möglichkeit, dass eine Basisstation in einem dem Empfangskanal einer DMO-Mobilstation benachbarten Frequenzkanal sendet. Die hierbei wirkende Störleistung kann zu einer Verminderung der Reichweite der DMO-Verbindung führen.
- *DMO-Mobilstation stört DMO-Mobilstation.* Werden auf einer - im Katastrophenfall typischerweise relativ kleinen - Fläche mehrere DMO-Kanäle gleichzeitig betrieben, so kann es zu gegenseitigen Störungen von Mobilstationen auf benachbarten Frequenzkanälen kommen. Ein störungsfreier Betrieb ist dann u. U. nur möglich, wenn Mobilstationen, die benachbarte Frequenzkanäle verwenden, einen Mindestabstand einhalten. Dieser Abstand ist in TETRApol Systemen typischerweise viel kleiner als bei TETRA. Hier ist ein genereller Mindestabstand von etwa 20 m einzuhalten, wenn die maximale Reichweite einer DMO-Verbindung nicht reduziert werden soll [ETS00].

Kritische Störsituationen können vermieden werden, wenn ein Mindestabstand zwischen störender und gestörter Station gewährleistet ist oder wenn Frequenzkanäle verwendet werden, die nicht direkt benachbart sind.

2.3.9.3 Bewertung

Obwohl Schutzbänder zwischen den Frequenzbändern anderer Mobilfunksysteme und TETRA mindestens doppelt so groß sein müssen als bei TETRAPOL ist eine Aussage über die daraus resultierende Verminderung der Effizienz der Spektrumsnutzung nur im konkreten Fall möglich. Beim Vergleich der beiden Systeme wird TETRAPOL aber in den meisten Fällen im Vorteil sein, zumal die spektralen Anforderungen an einen TETRA-Transceiver insbesondere wegen des erforderlichen linearen Verstärkers schwer und nur mit verhältnismäßig teuren Bauelementen realisierbar sind.

Um die Koexistenz von DMO-Mobilstationen und anderen Stationen im selben Frequenzspektrum sicherzustellen, müssen erhöhte Anforderungen an die Frequenzkanal-Planung gestellt werden. Diese können von einem TETRAPOL System besser erfüllt werden, da die Anforderungen aufgrund geringerer Seitenband-Aussendungen schwächer sind. Aufgrund des bzgl. der spektralen Verträglichkeit günstigeren Modulationsverfahrens von TETRAPOL sind bei diesem System weniger Störungen zwischen DMO-Mobilstationen zu erwarten als bei TETRA.

2.4 Dienste der Bündelfunksysteme

2.4.1 TETRA

Das TETRA-System bietet Paketdatendienste und kanalvermittelte Daten- und Sprachdienste. Die paketorientierten Dienste unterscheiden folgende Verbindungsarten:

- Verbindungsorientierte Paketdatenübertragung gemäß ISO 8208 *Connection Oriented Network Service* (CONS) und Dienst entsprechend ITU-T-Empfehlung X.25.
- Verbindungslose Paketdatenübertragung gemäß ISO 8473 *Connectionless Network Service* (CLNS) für quittierte Punkt-zu-Punkt-Dienste und/oder TETRA-spezifische quittierte Punkt-zu-Punkt- und nichtquitierte Punkt-zu-Mehrpunkt-(PMP)-Dienste.

Kanalvermittelte Sprache kann ungeschützt über sog. Trägerdienste oder (bevorzugt) geschützt über Teledienste übertragen werden, vgl. Tab. 2.21. Die Teledienste für Sprachübertragung ermöglichen fünf Verbindungsarten:

Einzelruf: Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen rufendem und gerufenem Teilnehmer.

Gruppenruf: PMP-Verbindung zwischen rufendem Teilnehmer und einer über eine gemeinsame Gruppennummer angewählten Gruppe. Der Aufbau einer Verbindung findet schnell statt, da keine Bestätigung notwendig ist. Die Kommunikation erfolgt im Halbduplexmodus durch Betätigung einer Sprechaste (*Push-to-talk*).

Direktruf (Direct Mode, DM): Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei Mobilgeräten ohne Nutzung der Infrastruktur. Dabei stellt eine Mobilstation ohne Vermittlung einer Basisstation eine Verbindung zu anderen Mobilstationen her, hält sie aufrecht und übernimmt alle für die lokale Kommunikation nötigen Funktionen einer Basisstation. Dafür werden sonst nicht im Netz benutzte Frequenzbereiche benutzt. Zumindest eine Station muss auf einem anderen Kanal eine Verbindung zu einer Basisstation haben [Cay92]. Es können z. B. Verbindungen zwischen zwei Teilnehmern aufgebaut werden, von denen sich einer nicht im Einzugsbereich einer Basisstation befindet.

Bestätigter Gruppenruf: PMP-Verbindung zwischen rufendem Teilnehmer und der über die 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 von der TETRA-Infrastruktur dem rufenden Teilnehmer 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: PMP-Verbindung, bei der die über die Broadcastnummer angewählte Teilnehmergruppe dem rufenden Teilnehmer nur zuhören kann.

In Tabelle 2.21 auf der nächsten Seite sind die in den Standards vorgesehenen Träger- und Teledienste für die Protokollstapel V+D aufgeführt.

Tabelle 2.21: Träger- und Teledienste für V+D im TETRA-Standard

Trägerdienste	Teledienste
7,2–28,8 kbit/s kanalvermittelte, ungeschützte Sprache oder Daten	4,8 kbit/s Sprache
4,8–19,2 kbit/s kanalvermittelte, schwach geschützte Daten	verschlüsselte Sprache
2,4–9,6 kbit/s kanalvermittelte, stark geschützte Daten	
verbindungsorientierte Paketübertragung (Punkt-zu-Punkt)	
verbindungslose Paketübertragung in Standardformat (Punkt-zu-Punkt)	
verbindungslose Paketübertragung in Spezialformat (Punkt-zu-Punkt, Mehrpunkt, Broadcast)	

Das TETRA-System unterstützt folgende Daten- und Textdienste:

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

Daneben werden verschiedene Zusatzdienste angeboten, z. B.:

- indirekter Zugang zu *Public Switched Telecommunications Network* (PSTN), *Integrated Services Digital Network* (ISDN) und *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*, um bei bestehenden Gespräch durch Wahl einer Rufnummer einen weiteren Teilnehmer in die bestehende Verbindung mit einzubeziehen,
- Rufweiterleitung und Rufumleitung,
- Rufeinschränkung bzw. -sperre für ankommende bzw. abgehende Gespräche, *Barring of Incoming/Outgoing Call* (BIC/BOC),
- *Call Authorized by Dispatcher* (CAD), bei dem auf Antrag eine bestimmte Rufart ermöglicht wird.
- *Call Report* (CR) ermöglicht das Hinterlegen der Nummer des rufenden Teilnehmers beim gerufenen Teilnehmer für einen späteren Rückruf.
- *Call Waiting* (CW) zeigt dem belegten Teilnehmer an, wer in der Zwischenzeit angerufen hat,
- *Call Hold, Connect to Waiting* 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 Teilnehmer-nummer übernimmt die TETRA-Infrastruktur.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

- Prioritätenruf,
- Prioritätenruf mit Unterbrechung,
- Zugangspriorität,
- *Advice of Charge* (AoC) ist ein Dienst, durch welchen dem Teilnehmer die anfallenden Gebühren vor, während oder am Ende eines Gesprächs angezeigt werden.
- *Discrete Listening* (DL) Diskretes Abhören eines Gesprächs durch eine autorisierte Person.
- *Ambience Listening* (AL) ermöglicht, den Sender eines mobilen Endgerätes zu sperren, wobei dieses Endgerät nur noch Notrufe senden kann.
- Dynamische Gruppennummerzuweisung,
- *Transfer of Control* (TC) 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 enthalten [ETS94f, ETS94g, ETS94h].

2.4.2 TETRAPOL

Das TETRAPOL-System bietet Paketdatendienste und kanalvermittelte Sprach- und Datendienste. Die paketorientierten Datendienste unterscheiden folgende Verbindungsarten:

- Verbindungsorientierte Paketdatenübertragung (gemäß ITU-T X.25),
- Verbindungslose Übertragung von einzelnen Datenpaketen für nichtquittierte Punkt-zu-Mehrpunktdienste (*Point to MultiPoint*, PMP).

Kanalvermittelte Sprache wird geschützt über Teledienste übertragen. Die Teledienste für Sprachübertragung ermöglichen sechs Verbindungsarten:

Einzelruf: Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einem rufenden und gerufenem Teilnehmer.

Konferenzruf: PMP-Verbindung zwischen einem rufenden und bis zu 4 gerufenen Teilnehmern im Halbduplexmodus. Die Präsenz der gerufenen Teilnehmer wird dabei dem rufenden Teilnehmer angezeigt.

Gruppenruf: PMP-Verbindung zwischen rufendem Teilnehmer und einer über eine gemeinsame Gruppennummer angewählten Gruppe. Die Kommunikation erfolgt im Halbduplexmodus durch Betätigung einer Sprechtaaste (*Push-to-talk*). Beim bestätigten Gruppenruf wird dem rufenden Teilnehmer die Anwesenheit der Gruppenmitglieder durch eine Bestätigung angezeigt; Gruppenmitglieder, die anfangs besetzt waren, können sich später dem Gespräch zuschalten.

Direktruf (Direct Mode, DM): Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei Mobilgeräten ohne Nutzung der Netzinfrastruktur im Halbduplexmodus. Keine der beiden Stationen muss eine Verbindung zu einer Basisstation haben. Für den Direktruf werden speziell reservierte Frequenzbereiche benutzt.

Rundfunkruf: PMP-Verbindung, bei der die über einen *Multisite Open CHannel* (MOCH) angewählten Teilnehmergruppen dem rufenden Dispatcher nur zuhören können. Die Präsenz der gerufenen Teilnehmer wird nicht quittiert.

Notruf: Nach Auslösen eines Notrufes durch einen Teilnehmer wird von dem Endgerät des Teilnehmers ein Status versendet. Die Leitstelle kann daraufhin einen offenen Kanal aktivieren oder ein Gespräch mit hoher Priorität zu dem rufenden Teilnehmer aufbauen.

Das TETRAPOL-System unterstützt folgende Zusatzdienste:

- indirekter Zugang zu PSTN, ISDN, *Public Data Network* (PDN) und PBX über ein *Gateway*,
- *List Search Call*, bei dem die Teilnehmer oder Gruppen anhand der Reihenfolge von Eintragungen in einer Liste angerufen werden,
- *Include Call*, um bei bestehendem Gespräch durch Wahl einer Rufnummer einen weiteren Teilnehmer in die bestehende Verbindung mit einzubeziehen,
- Rufumleitung (*Call Forwarding*, CF) und Rufweiterleitung (*Call Transfer*, CT),
- Rufeinschränkung bzw. -sperre für ankommende bzw. abgehende Gespräche (*Call Barring*),
- *Call Authorized by Dispatcher*, bei dem auf Antrag eine bestimmte Rufart möglich wird,
- Teilnehmeridentifizierung (*Talking Party Identification*, *Calling/Called Party Identification*),
- *Short Number Addressing* (SNA) ermöglicht einem Benutzer, einen Teilnehmer über eine Kurzwahlnummer anzurufen. Die Umsetzung von Kurzwahl- zu Teilnehmernummern übernimmt die TETRAPOL-Infrastruktur,
- Prioritätenruf,
- Prioritätenruf mit Unterbrechung,
- Zugangspriorität,

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

- *Ambience Listening* (AL) ermöglicht, den Sender eines mobilen Endgerätes zu aktivieren, ohne diese Aktivierung anzuzeigen,
- *Discrete Listening* ermöglicht dem Dispatcher eine Sprachverbindung abzuhören,
- Anklopfen (*Call Waiting*, CW) und Rückruf (*Call-Me-Back*),
- automatischer Rückruf im Falle eines belegten Netzes bei Freiwerden der notwendigen Betriebsmittel (*Automatic Call-Back*),
- *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,
- aktiviert ein Benutzer einen *Notruf*, sendet das Terminal einen Statusbericht. Dann wird entweder automatisch ein offener Kanal aktiviert oder von einem vordefinierten Teilnehmer ein Ruf mit hoher Priorität aufgebaut,
- ITU-T-X.400-Nachrichtendienst,
- Paging.

Eine komplette Zusammenstellung sowie die ausführliche Definition und Beschreibung der Zusatzdienste ist in [FOR98c] enthalten.

2.4.3 Bewertung

Das Dienstespektrum ist bei beiden Systemen vergleichbar vielfältig. Ein Vorteil von TETRAPOL ist die Integration von Paging in das System, welches durch die höheren Reserven des TETRAPOL-Empfängers auch unter schlechten Empfangsbedingungen funktionieren sollte. Der Notrufdienst wurde offensichtlich in der TETRA-Standardisierung als Anwendung angesehen und deshalb nicht näher spezifiziert. In TETRAPOL ist der Notruf als Dienst im Standard beschrieben, es existiert also eine für alle TETRAPOL-Systeme verbindliche Referenzimplementation.

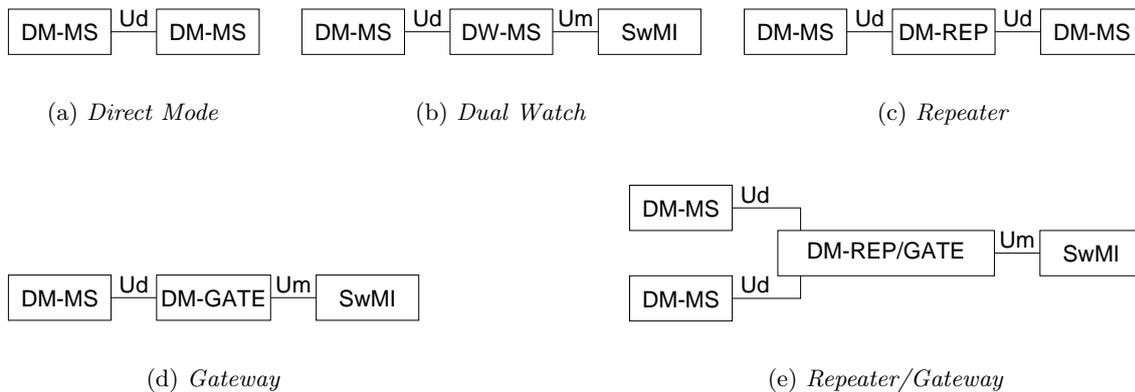
2.5 Direkt- und Repeatermodus

2.5.1 TETRA

Der *Direct Mode* (DM) ist ein Betriebsmodus, bei dem Mobilstationen ohne Unterstützung durch die Netzinfrastruktur direkt kommunizieren. Die dabei verfügbaren Dienste listet Tabelle 2.22 auf der nächsten Seite auf. Die Halbduplex-Kommunikation erfolgt auf bestimmten, zu diesem Zweck reservierten Frequenzen. Das Netz besitzt die Möglichkeit, diese Frequenzen zu überwachen. Da der DM für die BOS aber nur als Rückfallmöglichkeit für den Fall eines Netzausfalls oder einer Funkversorgungslücke gesehen wird, ist die Möglichkeit der Überwachung eher theoretischer Natur.

Tabelle 2.22: In TETRA verfügbare Dienste des *Direct Mode*

Dienst, in Klammern Interleavingtiefe	Teledienste	Trägerdienste
TETRA-Sprache	Einzelruf Gruppenruf	— —
kanalvermittelte, ungeschützte Daten	—	7,2 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, schwach geschützte Daten ($N = 1$)	—	4,8 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, schwach geschützte Daten ($N = 4$)	—	4,8 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, schwach geschützte Daten ($N = 8$)	—	4,8 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, stark geschützte Daten ($N = 1$)	—	2,4 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, stark geschützte Daten ($N = 4$)	—	2,4 (PZP+PMP)
kanalvermittelte, stark geschützte Daten ($N = 8$)	—	2,4 (PZP+PMP)

**Abbildung 2.8:** Die Referenzmodelle des *Direct Modes* für TETRA

2.5.1.1 Referenzmodelle für den Direct Mode

Für den DM existieren in TETRA fünf verschiedene Referenzmodelle, die die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Gerätetypen und evt. betroffenen Netzelementen beschreiben, vgl. Abbildung 2.8. Im Einzelnen sind dies:

Direct Mode MS: Dieses grundlegende DM-Modell beschreibt die einfache Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei MS über die Luftschnittstelle U_d des DM. Die einen Ruf über den DM initiiierende MS liefert die zeitliche Synchronisation Verbindung und wird deshalb *Master-MS* genannt, die darauf synchronisierte gerufene Station folglich *Slave*.

Dual Watch MS: Diese Modell trifft auf spezielle MSen zu. Sie können sich in drei verschiedenen Zuständen befinden:

1. Leerlauf im DM und *Trunked Mode* (TM), wobei sowohl ein ausgewählter DM-Kanal als auch der Signalisierkanal der Netzinfrastruktur beobachtet werden.
2. Kommunikation mit einer anderen DM-MS über die U_d -Schnittstelle bei gleichzeitiger Beobachtung des Signalisierkanals der Netzinfrastruktur über die Luftschnittstelle U_m .

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

3. Kommunikation mit der Netzinfrastruktur im TM über die Luftschnittstelle U_m bei gleichzeitiger Beobachtung eines ausgewählten DM-Kanals.

Es ist nicht möglich, eine gleichzeitige Kommunikation über beide Schnittstellen zu führen. Normale MSen können sich entweder im DM oder TM befinden, ohne allerdings die jeweils andere Luftschnittstelle beobachten zu können.

Direct Mode Repeater: Bei dieser Konstellation empfängt der *Repeater* die Signale einer DM-MS und sendet sie weiter im DM an eine dritte MS. Mit Hilfe eines *Repeaters* können also weitere Abstände zwischen MS ohne Netzverbindung überbrückt werden.

Der *Repeater* kann optional unterschiedliche Frequenzen für seinen Up- und Downlink verwenden, so dass ein mehr an Flexibilität in der Frequenznutzung erreicht wird.

Direct Mode Gateway: Mit Hilfe eines *Gateways* kann die Netzreichweite in schlecht versorgte Netzbereiche verlängert werden, so dass Terminals, die nur noch per DM kommunizieren können, mit der *Switching and Management Infrastructure* (SwMI) in Kontakt bleiben. Das *Gateway* sorgt für die Umsetzung der unterschiedlichen Protokolle der U_d - und U_m -Schnittstelle.

Direct Mode Gateway/Repeater: Dieses Gateway bietet neben der Verbindung mit dem Netz für DM-Endgeräte noch eine *Repeater*-Funktion, um die Verbindungsqualität zwischen mehreren DM-Endgeräten zu verbessern.

2.5.1.2 Zeitmultiplexstruktur der DM-Luftschnittstelle

Die Rahmenstruktur der Luftschnittstelle des *Direct Mode* ähnelt der des *Trunked Mode*, vgl. Abschnitt 2.8.1 auf Seite 64. Jeder DM-Funkkanal wird zeitlich in Multirahmen der Dauer 1,02s eingeteilt. Jeder Multirahmen besteht aus insgesamt 18 Rahmen der Länge 56,67 ms. Im jeweils 18. Rahmen ist der Steuerkanal (*Control Frame*) realisiert. Jeder Rahmen besteht wiederum aus vier Zeitschlitzen der Länge 14,167 ms, die schlussendlich die Datenbüschel transportieren. Da die Kommunikation im DM halbduplex ist, werden die Daten der Auf- und Abwärtsstrecke auf nur einer Frequenz der Bandbreite 25 kHz übertragen.

2.5.2 TETRAPOL

Für ein TETRAPOL-Terminal gibt es drei Betriebsarten:

- *Network Mode*,
- *Direct Mode* und
- *Repeater Mode*.

Befindet sich ein Terminal im Versorgungsbereich der TETRAPOL-Infrastruktur, wird es vornehmlich im Netzmodus (*Network Mode*) operieren.

Der *Direct Mode* (DM) ist ein Betriebsmodus, bei dem die Funkübertragungen direkt zwischen zwei oder mehr Terminals stattfinden. Der DM erlaubt gleichzeitig das Abhören der Kanäle, die von einem TETRAPOL-Netz belegt sind (*Dual Watch Mode*), falls sich

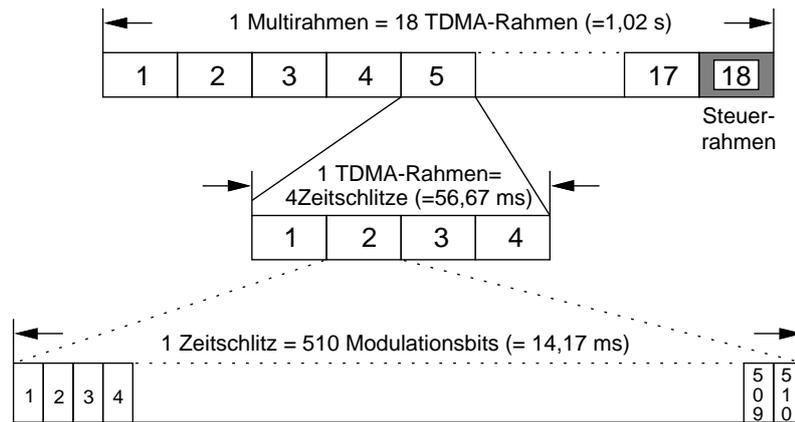


Abbildung 2.9: Rahmenstruktur der DM-Luftschnittstelle

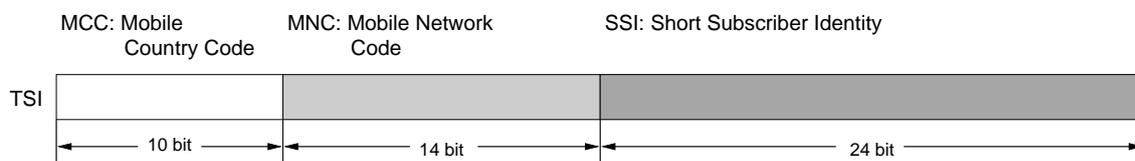


Abbildung 2.10: Format der TETRA Subscriber Identity

ein Terminal im Versorgungsbereich einer Funkzelle befindet. Die Terminals verwenden im DM spezielle, für den DM reservierte Kanäle der Bandbreite 12,5 kHz, die bei der Initialisierung im Gerät gespeichert werden. Der Teilnehmer wählt manuell den zu verwendenden DM-Kanal aus. Ein weiterer spezieller Betriebsmodus ist der *Repeater Mode* (RM). Bei dieser Betriebsart finden die Funkübertragungen zwischen zwei Terminals mit Hilfe eines *Repeaters* ohne Kontrolle durch das Funknetz statt. Der Repeater verlängert wie eine Relaisstation die Reichweite der Terminals. *Gateways* bieten darüber hinaus die Möglichkeit, DM-Verkehrskreise mit Verkehrskreisen des Netzes zusammenzuschalten. Wie im normalen Betrieb kann die Übertragung im DM verschlüsselt erfolgen.

Tabelle 2.23 auf der nächsten Seite zeigt, welche Dienste bei welchem Teledienst in den drei Betriebsmodi verfügbar sind. Im DM steht nur eine eingeschränkte Menge der TETRAPOL-Dienste zur Verfügung.

2.5.3 Bewertung

Beide Systeme bieten im *Direct Mode* ähnlichen Komfort und Dienste. Zur Zeit spricht die geringere benötigte Bandbreite von TETRAPOL mit 12,5 kHz im Vergleich zu 25 kHz bei TETRA für einen DM-Kanal für TETRAPOL. Künftige TETRA-Geräte der zweiten Generation werden jedoch zwei DM-Kanäle pro Funkkanal unterstützen, so dass TETRA und TETRAPOL dann im DM die gleiche spektrale Effizienz aufweisen.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

Tabelle 2.23: Verfügbare Zusatzdienste bei TETRAPOL in verschiedenen Betriebsarten

Betriebsmodus*	N+D+R	N	N	N+D+R	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Einzel- ruf	Konfe- renz	Gruppen- ruf	Not- ruf	Multisite Open Channel	Talk- group	Rund- funk- ruf	PABX	Rund- funk- daten	Status	TCP/IP	X.400	
<i>Sprachdienste</i>													
Ambience Listening	×	×	×	×	×	×	×						
Area Selection		×	×	×	×	×	×					×	
Call Barring	×	×			×	×	×	×					
Call Forwarding	×	×	×			×	×	×				×	
Call Transfer	×		×									×	×
Call Waiting	×	×											
Calling Party Identification	×	×		×									
Discreet Listening		×		×									
Dyn. Group Numb. Assignment				×	×	×	×						
Late Entry					×								
List Search Call	×	×		×	×								
Preemptive Priority Call	×	×	×	×	×			×					
Priority Call	×	×	×		×	×							
Short Number Addressing	×	×	×		×	×							
Talking Party Identification	×	×		×	×	×	×						
Intrusion	×	×		×		×		×					
<i>Datendienste</i>													
verbindungsorient. Paketdaten									×			×	×
verbindungslose Paketdaten												×	×

* N=Network Mode, D=Direct Mode, R=Repeater Mode

2.6 Adressierung

2.6.1 TETRA

TETRA identifiziert einen Benutzer eindeutig über die *TETRA Subscriber Identity* (TSI), eine insgesamt 48 bit lange Adresse, vgl. Abbildung 2.10 auf Seite 55. Die TSI besteht aus drei Teilen:

Mobile Country Code (MCC): die Länderkennung identifiziert das Land, in dem das TETRA-Netz betrieben wird,

Mobile Network Code (MNC): die Netz-Kennung identifiziert das Netz, in welchem die Mobilstation erreichbar ist,

Short Subscriber Identity (SSI): die Nutzerkennung stellt die Nutzeradresse dar, wie sie innerhalb eines Betreibernetzes zur Adressierung verwendet wird. Dies ermöglicht einen geringeren Signalisierungsaufwand für netzinterne Verbindungen.

Jede MS bzw. (LS) besitzt eine ganze Familie von TSIs, unter anderem genau eine Individualadresse (*Individual TETRA Subscriber Identity*, ITSI) und unter Umständen mehrere Gruppenadressen (*Group TETRA Subscriber Identity*, GTSI). Die Aufteilung des Adressraumes zwischen Gruppen- und Individualadressen ist nur innerhalb eines TETRA-Netzes bekannt und beliebig vom Betreiber festzulegen, nach außen sind ITSI und GTSI nicht unterscheidbar. Eine GTSI kann mehreren verschiedenen ITSIs zugeordnet sein.

2.6.2 TETRAPOL

Innerhalb eines TETRAPOL-Systems, das mit einem Ländercode und einem Netzcode identifiziert wird, sind die Teilnehmeradressen in folgende Kategorien unterteilt:

- *Base Network - Fleet - Subfleet Individual address* (RFSI),
- Gruppenadresse,
- ITU-T-X.400-Adresse,
- IP-Adresse,
- *Private Automatic Branch eXchange* (PABX)-Adresse aus einem externen Rufnummernplan.

Gruppenadressen für Sprachkommunikation werden unterschieden in:

- MOCH-Bezeichner,
- Sprachgruppen- und Gruppenruf-Bezeichner.

Zur Kategorie der RFSI gehören:

explizite Einzeladresse (Individual Explicit Address): Jedes Systemterminal kann über diese Adresse eindeutig in einem TETRAPOL-System identifiziert werden. Sie dient neben der Identifikation des rufenden bzw. gerufenen Teilnehmers in einer Sprachkommunikation auch der Teilnehmerverwaltung und dem Sicherheitsmanagement.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

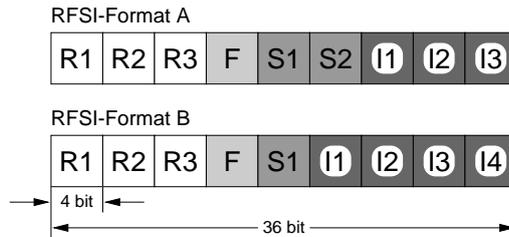


Abbildung 2.11: Format der RFSI-Adresse

implizite Einzeladresse (Individual Implicit Address): Eine solche Adresse kann einem Terminal innerhalb einer vordefinierten Gruppe von Systemterminals, die sich in derselben Zelle befinden, zugewiesen werden. Bei einer Datenkommunikation oder bei der Kommunikation mit Terminals einer anderen Zelle wird die implizite vom TETRAPOL-System in eine explizite Einzeladresse umgewandelt.

Listenadresse (List Address): Mehrere Einzeladressen können zu einer Listenadresse zusammengefasst werden.

Das RFSI-Adressformat umfasst 9 Dezimalstellen à 4 bit entsprechend einer Länge von 36 bit. Da nur Dezimalziffern zur Adressierung verwendet werden, reduziert sich die effektive Adresslänge auf ca. 30 bit. Die ersten drei Stellen bezeichnen ein regionales Basisnetz bestehend aus einer bis mehreren Basisstationen innerhalb einer SwMI. Weitere 2 bis 3 Stellen können die Flotte (*Fleet*) einer Benutzerorganisation und eine funktionale Gruppe dieser Flotte (*Subfleet*) beschreiben. Die übrigen drei oder vier Dezimalstellen dienen im Fall einer expliziten Einzeladresse der Identifikation eines Terminals, vgl. [Abbildung 2.11](#).

Eine Gruppenadresse wird mit 12 bit codiert und von der Benutzerorganisation verwaltet, wobei von einem regionalen Basisnetz bis zu 255 Gruppenadressen verwaltet werden können. Eine Gruppe (*Operational Group*, OG) bezeichnet eine Menge von Endgeräten mit den gleichen Rechten, eine Verbindung aufzubauen, auszulösen oder an einer Verbindung teilzunehmen.

Zur Kategorie der Gruppenadressen gehören:

Nominal OG: Jedes Terminal wird bei der Grundkonfiguration genau einer nominalen Arbeitsgruppe zugeordnet. Sie ist im gesamten TETRAPOL-System gültig und bekannt.

National OG: Eine Menge von Teilnehmern verschiedener Basisnetze wird einer nationalen Arbeitsgruppe zugeordnet. Auch sie kann im gesamten TETRAPOL-System zur Adressierung verwendet werden. Die Konfiguration dieser OG kann über Funk erfolgen.

External OG: Diese Gruppenadresse ist eine nationale OG, die von einem externen Werkzeug verwaltet wird.

Local OG: Eine lokale OG kann innerhalb der Leitstelle eines Basisnetzes definiert werden, der dann Teilnehmer aus beliebigen Basisnetzen zugeordnet werden können. Die Konfiguration dieser OG erfolgt über die Luftschnittstelle.

Composed OG: Mehrere Gruppenadressen können zu einer zusammengesetzten OG zusammengefasst werden. Auch diese OG ist nur innerhalb eines Basisnetzes bekannt.

Gruppenadressen sind verknüpft mit einem Versorgungsbereich (*Coverage*) innerhalb eines Regionalnetzes (einer Liste von Funkzellen und (*Line Access Base Station, LABS*)), in denen eine Gruppe bekannt und aktivierbar ist. Dieser Versorgungsbereich ist entscheidend bei den Verbindungsarten *Talkgroup*, Gruppenruf und *Multisite-Open-Channel*, da er bestimmt, ob eine solche Verbindung in einer bestimmten Funkzelle aktiviert oder weitergeführt werden kann.

2.6.3 Bewertung

TETRA-Systeme ermöglichen eine beliebige Aufteilung des Adressraums, wobei netzintern die 24 bit große SSI verwendet wird, mit der mehr als 16 Mio. Teilnehmer adressiert werden können. Mit diesem Konzept kann sehr flexibel auf die Bedürfnisse der BOS reagiert werden. Gruppenadressen und -zugehörigkeiten eines Endgeräts können flexibel von der Leitstelle über die Luftschnittstelle aktualisiert werden.

Bei TETRAPOL-Systemen können mehr als 1 Mio. Teilnehmer innerhalb eines Netzes adressiert werden, was für die Anwendungen der BOS als ausreichend erscheint. Die örtliche Begrenzung der Gültigkeit einer Gruppenadresse kann einen Gesprächsabbruch bei einem Zellwechsel zur Folge haben. Die Aktivierung einer Gruppe außerhalb des vordefinierten Versorgungsgebietes ist nur durch Eingriff der Leitstelle möglich.

Die Zusammenarbeit von Gruppen in Krisensituationen ist bei TETRAPOL ebenfalls nur durch manuellen Eingriff der Leitstelle möglich (*Talkgroup Merging*). Die Aktualisierung der Gruppenadressen eines Endgeräts ist nur durch Zugriff auf die Hardware des Endgeräts und nicht bequem über die Luftschnittstelle von der Leitstelle aus möglich.

2.7 Architektur der Standards

2.7.1 TETRA

Das TETRA-System ist wie das GSM aufgebaut, mit einigen Unterschieden, vgl. Abbildung 2.12 auf der nächsten Seite. Es gibt folgende drei Teilsysteme:

- *Mobile Station,*
- *Line Station,*
- *Switching and Management Infrastructure.*

2.7.1.1 Mobile Station

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 Mobilstation 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 Mobilstation.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

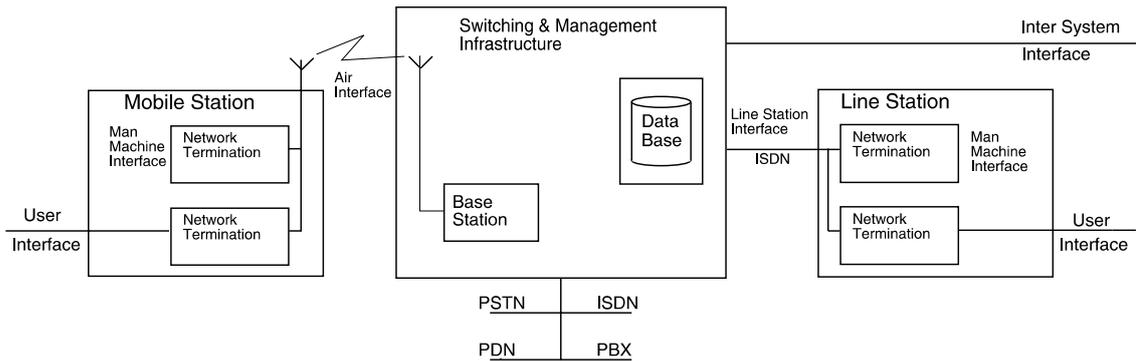


Abbildung 2.12: Die Architektur des TETRA-Systems

Als dritte Möglichkeit können die teilnehmerspezifischen Informationen der Mobilstation 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 gestohlenen Gerät sofort unbrauchbar gemacht werden, und unbefugter Zugriff ist praktisch ausgeschlossen.

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

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

Die TSI besteht aus den drei Teilen: *Mobile Country Code (MCC)*, der die Länderkennung beinhaltet, *Mobile Network Code*, welcher das betreffende TETRA-Netz bezeichnet, und der *Short Subscriber Identity (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 Managementfunktionen der Vermittlungsschicht genutzt. Die NSAP wird für die Adressierung von externen, also nicht-TETRA-Netzen, eingesetzt und ist optional. Es kann damit z. B. eine Verbindung in das ISDN hergestellt werden.

Mobilfunkgeräte können analog zum GSM in Fahrzeugen installiert oder portabel/handportabel ausgeführt sein. Alle in Abschnitt 2.4 auf Seite 48 aufgeführten Standarddienste können mit einer Mobilstation genutzt werden. Zusatzdienste werden vom Netzbetreiber angeboten oder müssen mitgebucht werden, damit die Mobilstation sie benutzen kann.

2.7.1.2 Line Station

Die *Line Station* ist im Prinzip aufgebaut wie die Mobilstation, aber mit der *Switching and Management Infrastructure* über das ISDN verbunden. Zum Beispiel wird ein Fuhrparkun-

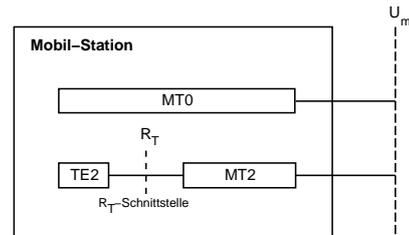


Abbildung 2.13: Netzanschlüsse der Mobilstationen mit den Bezugspunkten R_T und U_m

ternehmer in seiner Firma eine Line Station benutzen, welche die Zentrale für sein Netz darstellt. Die Line Station bietet die gleichen Funktionen und Dienste der Mobilstation.

2.7.1.3 Switching and Management Infrastructure

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

2.7.1.4 Schnittstellen des TETRA-Systems

2.7.1.4.1 Teilnehmerschnittstelle der Mobile Station Die TETRA-Mobilstation wird als *Mobile Termination* (MT) bezeichnet. Sie hat die Funktion der Funkkanalbetriebsmittel- und Mobilitätsverwaltung, der Sprach- und Datendecodierung/codierung, der Übertragungssicherung sowie der Steuerung des Datenflusses. Folgende Ausführungen werden eingesetzt:

MT0 (Mobile Termination Type 0): Enthält die genannten Funktionen mit Unterstützung von nichtstandardisierten Terminal-Schnittstellen, die Endgerätefunktionen enthalten, vgl. Abbildung 2.13.

MT2 (Mobile Termination Type 2): Unterstützt ebenfalls die genannten Funktionen und hat eine R_T -Schnittstelle für ein Endgerät nach dem TETRA-Standard, vgl. Abbildung 2.13.

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

2.7.1.4.2 Teilnehmerschnittstelle der Line Station Die Line Station hat eine *Network Termination Functional Group* (NT), da sie über die *Transmission-Line*-(TL)-Schnittstelle mit dem Festnetz mittels einer ISDN-Leitung verbunden ist, und eine *Terminal-Equipment*-(TE)-Funktionsgruppe, vgl. Abb. 2.14. Die NT ist in zwei Ausführungen vorgesehen und enthält die in der ITU-T-Empfehlung I.411 [ITU] definierten Funktionen:

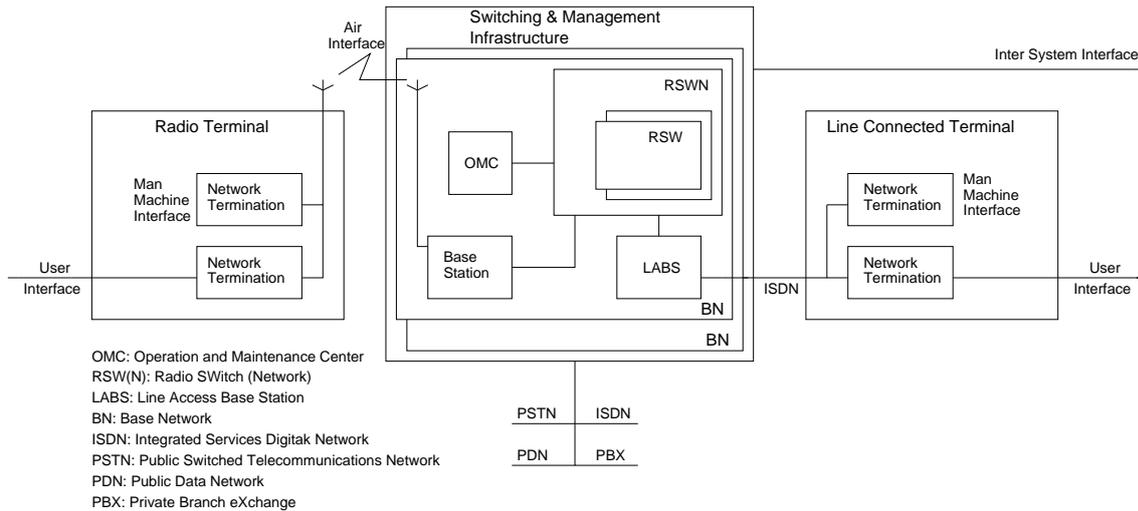


Abbildung 2.15: Die Architektur des TETRAPOL-Systems

2.7.2 TETRAPOL

Das TETRAPOL-System besteht aus folgenden vier Teilsystemen (vgl. Abbildung 2.15):

- *Radio Terminal* (RT),
- *Line Connected Terminal* (LCT).
- *Stand Alone Dispatch Position* (SADP)
- *Switching and Management Infrastructure* (SwMI),

2.7.2.1 Radio Terminal

Das *Radio Terminal* (RT) bezeichnet das vom Benutzer eingesetzte Endgerät, bestehend aus dem eigentlichen Funkgerät und der in Hard- und Software realisierten Mensch/Maschine-Schnittstelle für den Zugriff auf die Dienste des TETRAPOL-Netzes.

Ebenso wie z. B. im GSM wurde das RT in zwei physikalische Einheiten aufgespalten: die zum Zugriff auf die Funkschnittstelle benötigte Hard- und Software des Endgeräts und die in einer *Subscriber Identity Module* (SIM)-Karte realisierten teilnehmerspezifischen Informationen. Je nach Anwendung kann die SIM-Karte als scheckkartengroße Smart-Karte realisiert oder fest eingebaut sein. Das Mobilgerät wird bei Verwendung einer SIM-Karte benutzerunabhängig und lässt sich vom jeweiligen Benutzer mit Hilfe der SIM-Karte personalisieren.

Zusätzlich zur Teilnehmeridentifikation gibt es für jedes Mobilgerät eine *Terminal Equipment Serial Number*, die gerätespezifisch ist. Diese Nummer wird bei der Erst-Inbetriebnahme vom Betreiber eingegeben; nur er kann das Gerät sperren oder wieder freigeben. Somit kann ein gestohlenen Gerät sofort unbrauchbar gemacht werden, und unbefugter Zugriff ist praktisch ausgeschlossen.

Mobilfunkgeräte können analog zum GSM in Fahrzeugen installiert oder portabel/handportabel ausgeführt sein.

2.7.2.2 Line Connected Terminal

Das LCT bietet dem Nutzer die gleichen Dienste wie ein RT, ist aber mit der SwMI über ein Fremdnetz wie z. B. das ISDN oder GSM verbunden.

Eine Sonderstellung nimmt der Leitstellenarbeitsplatz (*Stand Alone Dispatch Position*, SADP) ein. Er bietet alle Dienste eines RT oder LCT und zusätzlich noch spezifische Dienste für einen Einsatzleiter, wie z. B. das Zusammenschalten (*Group Merging*) oder Deaktivieren von Gruppen (*Group Disable*), und Zusatzinformation, wie z. B. Teilnehmerlokalisierung über eine Verbindung zum *Operation and Maintenance Centre* (OMC).

2.7.2.3 Switching and Management Infrastructure

Die SwMI bildet die zentrale Vermittlungseinheit des TETRAPOL-Systems. Sie beinhaltet Basisstationen, welche die Kommunikation zwischen Mobilstation und LCT über Festverbindungen herstellen und unterhalten. Die SwMI erledigt die nötigen Kontrollaufgaben, teilt die Kanäle zu und vermittelt Verbindungen. Sie führt die Authentisierung durch, beinhaltet die erforderlichen Datenbanken wie *Home Data Base* (HDB), mit Rufnummer, Gerätenummer und *Visited Data Base* (VDB), mit Informationen über Besucher im Netz, die sie aus deren HDB kopiert. Eine BS kann bis zu 24 Frequenzen und bis zu 2500 MS verwalten.

Teil der SwMI ist das *Radio Switch Network* (RSWN), das die Basis-Vermittlungsfunktionen des Funknetzes bereitstellt. Es besteht aus einer oder mehreren *Radio Switch* (RSW), die alle oder eine Teilmenge der Funktionen des RSWN bereitstellen können. Es werden keine Vorgaben gemacht bezüglich der Anzahl und hierarchischen Kopplung der RSWs; dies ist dem Hersteller als Gestaltungsoption überlassen. Die *Radio Base Station* (RBS) stellt schließlich den Funkteil der SwMI dar.

2.7.3 Bewertung

Beide Standards, TETRA und TETRAPOL, beschreiben zellulare Bündelfunksysteme, die eine hierarchische Netzstruktur besitzen. Sie bieten auch beide Schnittstelle zu anderen Netzen, wie z. B. PSTN, ISDN, PDN.

Bei TETRAPOL können pro BS bis zu 24 Frequenzen verwaltet werden. In Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen müssen daher u. U. mehrere BS pro Funkzellen betrieben werden. Da es bei TETRA-Systemen eine solche Beschränkung nicht gibt, ist hierbei lediglich das verfügbare Spektrum die begrenzende Komponente.

2.8 Die Protokollstapel an der Funkschnittstelle

2.8.1 TETRA

Der folgende Abschnitt beschreibt den Protokollstapel Voice+Data zunächst allgemein. Danach werden die Funkschnittstelle, die Bitübertragungsschicht und die Sicherungsschicht im einzelnen erläutert.

2.8.1.1 Aufbau des Protokollstapels Voice+Data

Der Protokollstapel hat drei Schichten (*Air Interface*, AI), vgl. Abb. 2.16: die Bitübertragungsschicht, die für V+D und PDO identisch ist, die Sicherungsschicht, die in *Medium*

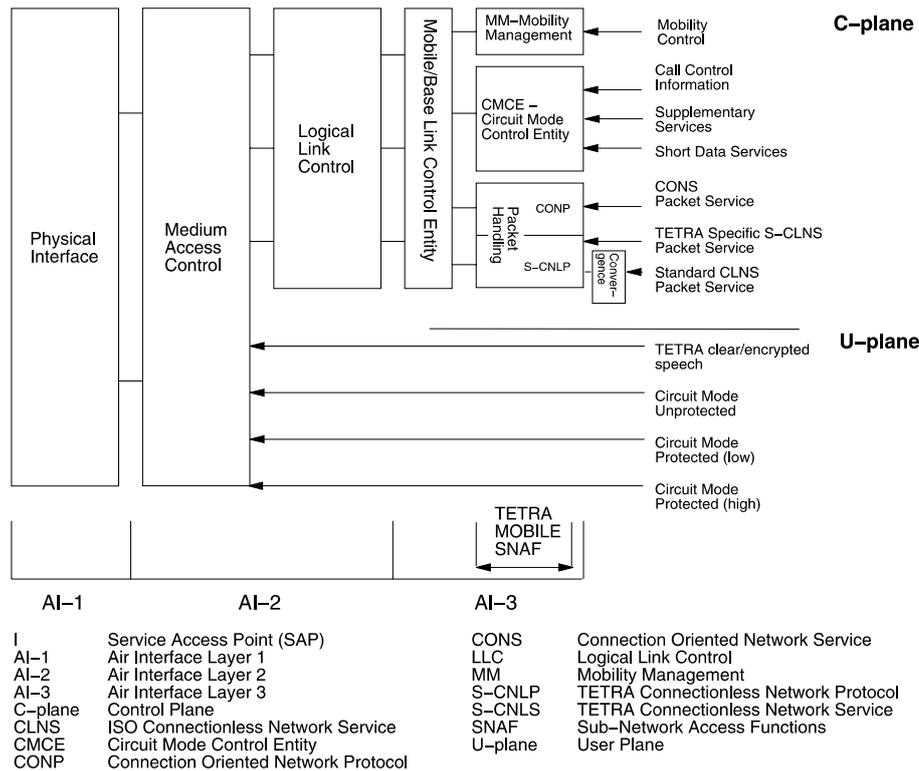


Abbildung 2.16: Architektur des Voice+Data-Protokollstapels

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

2.8.1.2 Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt U_m

Die Funkschnittstelle U_m liegt zwischen der Mobilstation und der *Switching and Management Infrastructure*, vgl. Abb. 2.12.

2.8.1.2.1 Die Multiplex-Strukturen

Wie im 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 (*Multiple Access*) verwendet wird (TDMA), vgl. Abb. 2.17. Diese Verfahren spielen neben der Sprachcodierung und der Modulation eine wichtige Rolle.

Das TETRA-System benutzt ein Zellularkonzept, wobei ein Versorgungsgebiet in Zellen eingeteilt und in deren Zentrum eine SwMI installiert wird. Die Mobilstation kann den Empfangspegel des ihr zugeteilten FDM-Kanals messen. Unterschreitet er eine gewisse Schranke, wird ein *Cell-Reselect*-Verfahren eingeleitet, das mit kurzzeitiger Unterbrechung von mindestens 300 ms das Gespräch oder die Datenübertragung auf eine andere Zelle umleitet. Das *Cell-Reselect*-Verfahren ist in verschiedenen Versionen im Standard vorgesehen,

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

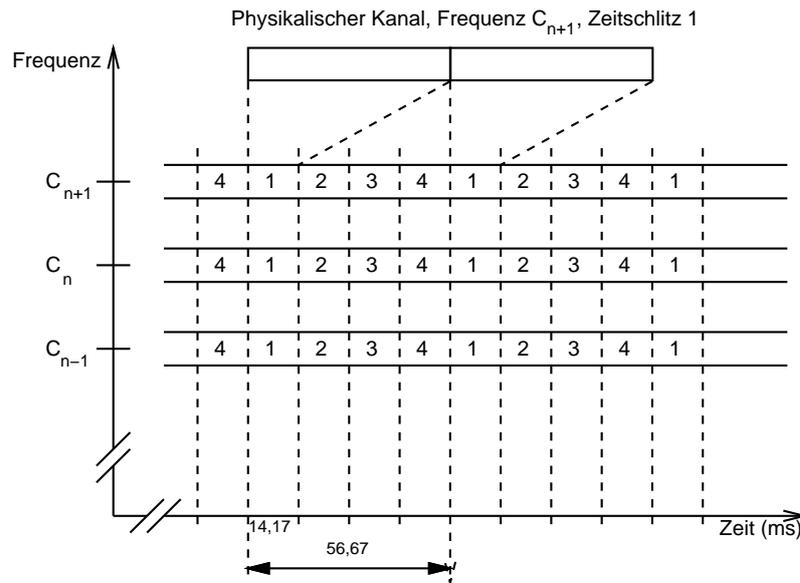


Abbildung 2.17: Realisierung der physikalischen Kanäle mittels FDM und TDM

wobei die Grundversion obligatorisch für alle Mobilstationen 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 Mobilstationen im Normalfall keinen großen Aktionsradius haben (z. B. ein Taxifuhrpark).

Frequenzmultiplex-Struktur Dem TETRA-Netz sind laut [A/S95] mehrere Frequenzbänder europaweit zugeteilt worden, die sich nicht völlig mit den Angaben des TETRA-Standards [ETS94d] decken, sondern zusätzliche Frequenzen oberhalb 870 MHz bzw. 915 MHz vorsehen, vgl. Tab. 2.1. Die jeweiligen Frequenzbänder für Up- und Downlink sind gleich breit. Der Trägerfrequenzabstand beträgt 25 kHz und jedes Up- und Downlink-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 Formeln für die Berechnung der Trägerfrequenzen angeben:

Für den Uplink:

$$F_{up}(c) = F_{up,min} + 0,001 \cdot G + 0,025 \cdot (c - 0,5) \text{ MHz}, \quad c = 1, \dots, N$$

und für den entsprechenden Downlink:

$$F_{dw}(c) = F_{up}(c) + D \text{ MHz}, \quad c = 1, \dots, N$$

Dabei ist D der konstante Duplexabstand zwischen der Up- und Downlink Trägerfrequenz. $F_{up,min}$ ist die Grenzfrequenz am unteren Rand des jeweiligen Frequenzbandes.

Zeitmultiplex-Struktur Wie in Abb. 2.17 zu erkennen, wird mittels des TDM-Verfahrens auf jeder Trägerfrequenz die Zeitachse in 4 Zeitschlitze (*Time Slot*) der Dauer 14,17 ms

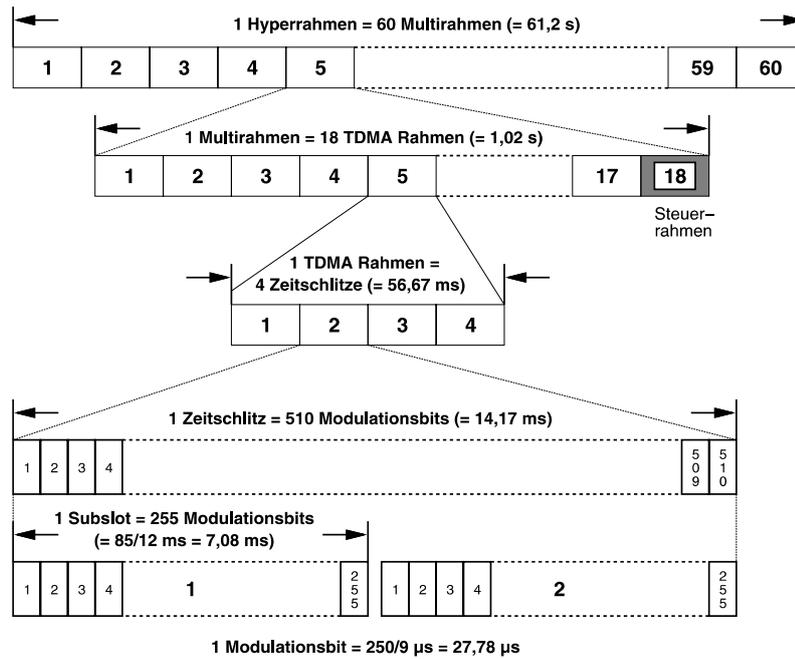


Abbildung 2.18: TDMA-Struktur des Voice+Data-Systems

entsprechend 510 bit eingeteilt. Ein periodischer Zeitschlitz realisiert einen physikalischen TDM-Kanal, auf den ein logischer Kanal abgebildet wird, vgl. Abschn. 2.8.1.2.3. Er wird durch seine Trägerfrequenz und den in Abständen von 56,67 ms wiederkehrenden Zeitschlitz charakterisiert.

In Abb. 2.18 ist die TDMA-Struktur für das Voice+Data-System zu sehen. Sie setzt sich aus Hyper-, Multi- und TDMA-Rahmen sowie den Zeitschlitz und Subslots zusammen, die nur beim Uplink-Verkehr auftreten. Ein Subslot (halber Zeitschlitz) besteht aus 255 bit und dauert 7,08 ms. Jeweils vier Zeitschlitz 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.

Der jeweils 18. Rahmen eines Multirahmens ist für die Signalisierungskanäle reserviert und wird Steuer Rahmen (*Control Frame*) genannt. Es können aber bei Bedarf auch weitere Rahmen für Signalisierung reserviert werden. Ein Hyperrahmen (*Hyper Frame*) besteht aus 60 Multirahmen und stellt mit einer Länge von 61,2 s die größte vorkommende Struktur dar. Die gesamte Rahmenstruktur wird auf dem Uplink um zwei Zeitschlitz gegenüber dem Downlink verzögert, damit die Mobilstation nicht gleichzeitig senden und empfangen muss. Bei der Mobilstation erfolgt die Rahmenausrichtung adaptiv abhängig von der Signalausbreitungsverzögerung.

Ein Burst ist ein auf eine Trägerfrequenz aufmoduliertes Datenbüschel, vgl. Abb. 2.19. Er stellt bei V+D den physikalischen Inhalt eines Zeitschlitzes bzw. physikalischen Kanals dar. Man unterscheidet drei Kanaltypen:

- Physikalischer Steuerkanal (*Control Physical Channel, CP*), der exklusiv die Steuer-

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

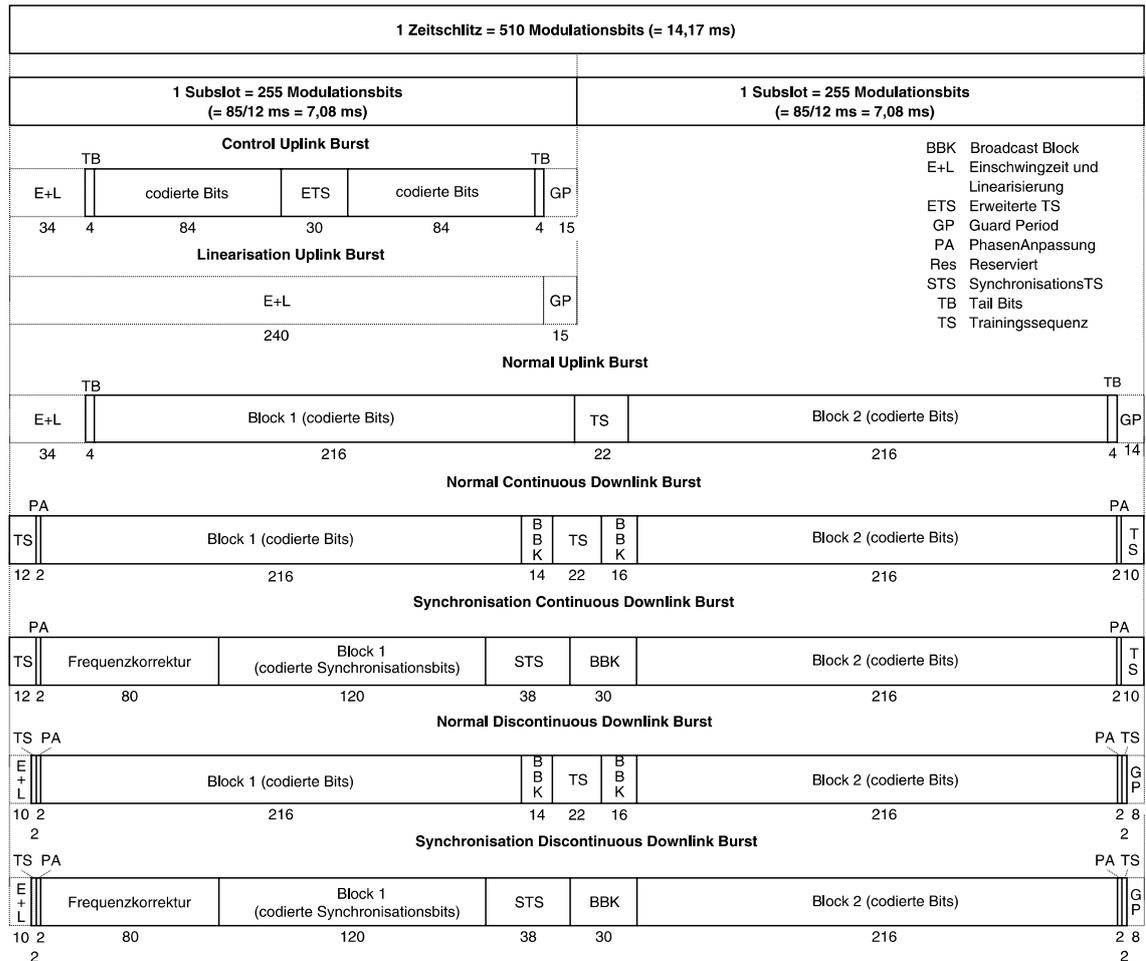


Abbildung 2.19: V+D Down- und Uplink-Bursts

kanaldaten überträgt;

- Physikalischer Verkehrskanal (*Traffic Physical Channel*, TP), auf den die logischen Sprach- und Datenkanäle abgebildet werden;
- Nicht belegter physikalischer Kanal (*Unallocated Physical Channel*, UP), der keiner Mobilstation zugeteilt ist und der Versendung von Broadcast- und Dummy-Nachrichten dient.

Ein bestehender physikalischer Kanal benutzt in aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen jeweils den gleichen Zeitschlitz.

Abbildung 2.19, vgl. [ETS94b], gibt einen Überblick über die Burststruktur, die im folgenden weiter erläutert wird. Im Standard sind drei verschiedene Uplinkbursts 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 Bursts nur einen Subslot 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) aufgeteilt.

Weiterhin gibt es vier Downlink-Bursts: Den *Normal* und *Synchronisation Continuous Downlink Burst* (NDB, SB) sowie den *Normal* und *Synchronisation Discontinuous Downlink Burst*, die alle einen ganzen Zeitschlitz belegen. Diese Unterscheidung wird gemacht, da die Basisstation zwischen *Continuous Transmission Mode* und *Time Sharing Mode* wählen kann, der diskontinuierliche Übertragung ermöglicht.

2.8.1.2.2 Logische Kanäle Der logische Kanal ist als logischer Kommunikationsweg zwischen zwei oder mehr Teilnehmern definiert und bildet die Schnittstelle zwischen den kommunizierenden Protokollinstanzen und dem Funkteilsystem. Die Zeitslitze bzw. die entsprechenden physikalischen Kanäle werden von den logischen Kanälen genutzt, um die Daten der logischen Kanäle zu übertragen. Da im TETRA-Standard vier Zeitslitze 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. Folgende logische Kanäle sind definiert:

TCH 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. Abschn. 2.8.1.4.1. Der Sprachcodec liefert eine Datenrate von 4,8 kbit/s und nutzt daher den TCH/4,8.

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

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

LCH: Der *Linearisation Channel* wird von den Mobil- und Basisstationen genutzt, um ihre Sender zu linearisieren. Auch hier existieren zwei Arten: Der *Common Linearisation Channel* (CLCH) für den Uplink der Mobilstationen und der *Basestation Linearisation Channel* (BLCH) für den Downlink.

Tabelle 2.24: Abbildung der logischen Kanäle auf die physikalischen Kanäle

Logischer Kanal	Richtung	Bursttyp	SSN/BKN	Physikalischer Kanal	FN	TN
BSCH	DL	SB	BKN1	CP, TP UP	18 1-18	$4 - (MN + 1) \bmod 4^*$ 1-4
BNCH	DL	NDB, SB	BKN2	CP, TP CP, UP	18 1-18	$4 - (MN + 3) \bmod 4^*$ 1-4
AACH	DL	NDB, SB	BBK	CP, TP, UP	1-18	1-4*
BLCH	DL	NDB, SB	BKN2	CP, UP TP	1-18 18	1-4
CLCH	UL	LB	SSN1	CP, TP CP, UP	18 1-18	$4 - (MN + 1) \bmod 4^*$ 1-4
SCH/F	DL UL	NDB NUB	BKN1, BKN2	CP	1-18 1-18	1-4
SCH/HD	DL	NDB, SB	BKN1, BKN2	CP, UP TP	1-18 18	1-4
SCH/HU	UL	CB	SSN1, SSN2	CP	1-18 18	1-4
TCH	DL UL	NDB NUB	BKN1, BKN2	TP	1-17	1-4
STCH	DL UL	NDB NUB	BKN1, BKN2	TP	1-17	1-4

* Abbildung auf den jeweiligen Zeitschlitz ist vorgeschrieben

SCH: Der *Signalling Channel* wird von allen Mobilstationen geteilt, kann aber Informationen für nur eine oder eine Gruppe von Mobilstationen enthalten. Die TETRA-Systemfunktionen erfordern mindestens einen SCH pro Basisstation. Es gibt drei Kategorien von SCH, 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/Downlink Signalling Channel* (SCH/HU, SCH/HD) belegen immer einen halben Zeitschlitz bzw. einen Subslot.

AACH: Der *Access Assignment Channel* wird auf allen Downlink-Slots im Broadcast-Block verschickt und enthält Angaben über die Zuweisung der nächsten Up- und Downlink-Slots auf dem entsprechendem Funkkanal. Er wird in jedem *Broadcastblock* (BBK) eines Downlink-Bursts übertragen, vgl. Abschn. 2.4.

STCH: Der *Stealing Channel* 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. bei der Zellwechselprozedur (*Cell Reselect*) genutzt.

2.8.1.2.3 Abbildung der logischen Kanäle auf physikalische Kanäle Im unteren Teil der MAC-Schicht werden die physikalischen Kanäle auf logische Kanäle abgebildet. Tabelle 2.24 zeigt, wie die Abbildung der physikalischen auf logische Kanäle definiert ist.

Im folgenden werden wichtige Aspekte der Tabelle erläutert. Der BCCH und CLCH werden auf den Steuerrahmen (18. Rahmen eines Multirahmens) eines physikalischen Steuer-

oder Verkehrskanals durch Funktionen des Zeitschlitzes und der Multirahmennummer abgebildet. Dazu gibt es folgenden Algorithmus:

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

Weiterhin kann die Basisstation den CLCH auf den Uplink-Subslot 1 und den BLCH auf den Downlink-Block 2 eines physikalischen Steuerkanals (CP) abbilden. Sie leistet dies auf Slot-zu-Slot-Basis und zeigt es im AACH an. Mobilstationen können ihre Sender bei Auftreten eines CLCH auf irgendeinem CP linearisieren, wenn dabei keine Abbildungsvorschriften verletzt werden und der Linearisationsvorgang länger als ein Multirahmen zurückliegt. Der BLCH wird auch auf einen Downlink-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 dem Uplink können, falls nicht ein CLCH auf den ersten Subslot abgebildet wird, ein SCH/F oder zwei SCH/HU abgebildet werden. Andernfalls kann nur Subslot zwei für einen SCH/HD genutzt werden. Auf dem Downlink können ein SCH/F oder zwei SCH/HU abgebildet werden, wenn nicht ein Block 2 für einen BNCH genutzt wird.

Die Basisstation zeigt auf dem AACH an, welcher logische Kanaltyp auf dem nächsten Uplink-Zeitschlitz genutzt wird. Diese Anzeige ist nur einen Rahmen lang und für einen physikalischen Kanal gültig. Auf dem Downlink wird die logische Kanalnummer durch den Typ der Trainingssequenz (TS) bestimmt. Wenn mehrere Downlink-Verkehrskanäle von einer Verbindung benutzt werden, werden die Up- und Downlink SCH auf den Kontrollrahmen (FN 18) und die niedrigste Zeitschlitznummer abgebildet. Für den Fall der Nutzung mehrerer Uplink-Verkehrskanäle durch eine Verbindung werden die Up- und Downlink SCH ebenfalls auf den Steuerrahmen, aber auf die höchste Zeitschlitznummer abgebildet.

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 Trainingssequenz angezeigt.

2.8.1.3 Die Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht bildet die physikalische Funkschnittstelle des TETRA-Systems. Sie generiert die aus einer Reihe von Symbolen bestehenden Bursts, die gesendet und empfangen werden.

Sie ist für folgende Funktionen zuständig, die im folgenden detailliert erläutert werden:

- Funkorientiert:
 - Modulation/Demodulation, – Sender-/Empfänger-Management,
 - Funkfrequenzcharakteristik, – Feinjustierung der Funkparameter,
- Bit- und symbolorientiert: Symbolsynchronisation,
- Burst-Bildung:

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

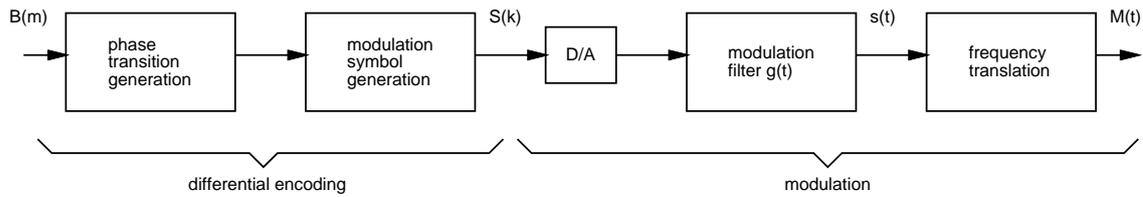


Abbildung 2.20: Blockdiagramm des Modulationsprozesses

- Empfangen und Senden der Daten von und zur MAC-Schicht,
- Slot-Flag-Codierung/Decodierung,
- Verschlüsselung und Entschlüsselung.

Das benutzte Modulationsverfahren ist $\pi/4$ -*Differential Quaternary Phase Shift Keying* ($\pi/4$ -DQPSK) mit einer Modulations-(Brutto-)bitrate von 36 kbit/s.

In Abb. 2.20 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:

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

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 $M(t)$ ist:

$$M(t) = \text{Re}\{s(t) \cdot e^{(j \cdot 2\pi f_c t + \Phi_0)}\}, \quad (2.29)$$

mit Φ_0 als Phasenoffset und $s(t)$ als komplexer Einhüllenden des modulierten Signals

$$s(t) = \sum_{k=1}^K S(k)g(t-t_k). \quad (2.30)$$

Dabei ist $g(t)$ die inverse Fouriertransformierte des *Square Root Raised Cosine* Spektrums und K die maximale Anzahl der Symbole.

Die Managementfunktion des Senders und des Empfängers 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 dieses Management sichergestellt wird. Eine

Optimierung auf diesem Gebiet wird zu einer Verringerung der Übertragungsfehlerrate führen. Ausführlichere Erläuterungen zu dieser Funktion sind in [ETS94d] und [ETS94e] zu finden.

Die Feinjustierung der Funkparameter ermöglicht eine Frequenzkorrektur mittels einer speziellen *Frequency Correction Sequence*, die in einem Synchronisationsburst innerhalb des BSCH lokalisiert ist. Damit werden nur sehr geringe Abweichungen von der Trägerfrequenz erreicht. Dies erfordert zusätzlich eine hohe Genauigkeit des Oszillators der Mobilstation. Die *Power-Control*-Funktion sorgt u. a. dafür, dass die Mobilstation immer die angepasste Sendeleistung verwendet. Dies wird von der MAC-Schicht gesteuert.

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

Die Mobilstation kann damit Anfang und Ende eines Bursts erkennen und nutzt das beim Übertragen von Daten, um die MAC-PDUs (*Protocol Data Unit*) auf die Bursts abzubilden, sowie ihre spezifischen Informationen korrekt zu plazieren. Beim Empfang wird dieser Prozess genau umgekehrt. Die spezifischen Informationen der Bitübertragungsschicht werden entfernt und aus dem Burst wird die MAC-PDU zurückgewonnen und an die MAC-Schicht übergeben. Die einzelnen Bursttypen sind in Abschn. 2.8.1.2.1 und [ETS94b] detailliert erläutert.

Das Slot-Flag existiert in zwei Versionen und zeigt durch die in den Bursts enthaltenen Trainingssequenzen an, ob ein ganzer Slot ($SF=0$) oder ein halber Slot ($SF=1$) 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. *Color Code* mitgeteilt. Die Verschlüsselung ist ein Teil der Kanalcodierung und wird in Abschn. 2.8.1.4.1 beschrieben.

2.8.1.4 Die Sicherungsschicht

In Abb. 2.21 ist die Architektur der Sicherungsschicht des TETRA-Standards V+D dargestellt. Sie gliedert sich in die Teilschichten MAC und LLC, wobei die MAC-Schicht am TMV-SAP (*Service Access Point*, Dienstzugangspunkt) in *Lower-* und *Upper-MAC* aufgeteilt ist. Am oberen Rand der Sicherungsschicht bieten drei Dienstzugangspunkte der *Link Control Entity* (MLE), vgl. Abb. 2.16, in der Netzschicht ihre Dienste an: TLA (*TETRA-LLC-A*), TLB und TLC. 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 Basisstation an die Mobilstation versendet. Der TLC-SAP ist nur auf Seiten der Mobilstation vorhanden und wird für Steuerungs- und Verwaltungsnachrichten verwendet.

Die Teilschichten LLC und MAC korrespondieren über die SAPs TMA (*TETRA-MAC-A*), TMB und TMC, die die gleichen Funktionen wie die entsprechenden SAPs der LLC-

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

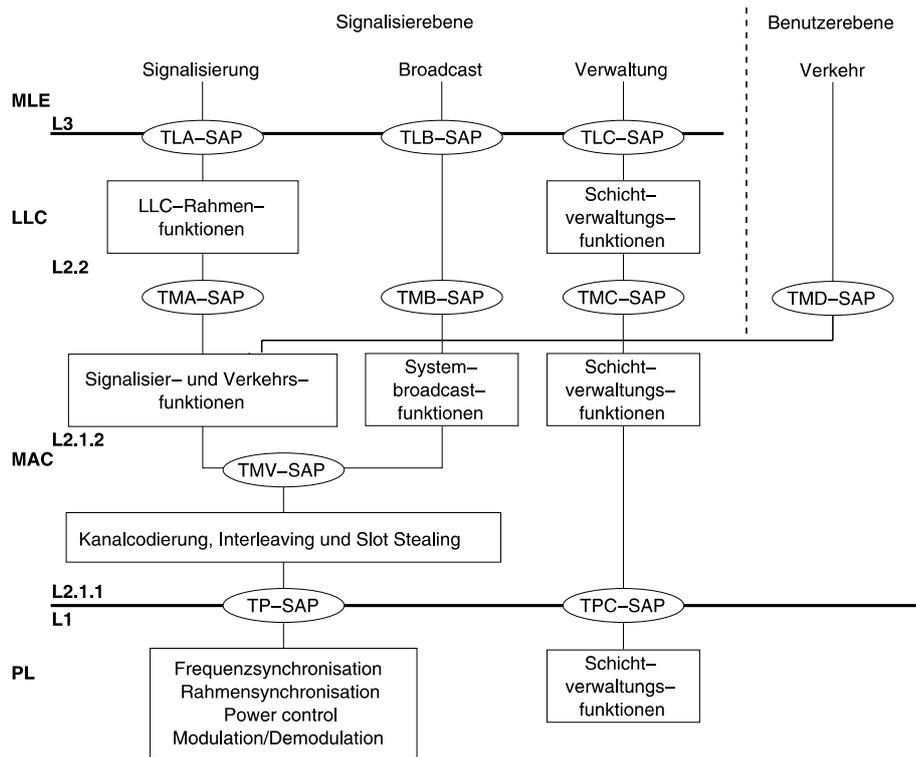


Abbildung 2.21: Architektur der Voice+Data-Sicherungsschicht

Teilschicht haben. Für die Benutzerebene enthält die MAC-Teilschicht einen weiteren SAP (TMD), über den der Informationstransport über eine kanalvermittelte 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, Interleaving und Slot Stealing anbietet. An der Schnittstelle zur Bitübertragungsschicht bietet der TPC-SAP (analog zum TLC- und TMC-SAP) den Zugang zur lokalen Schichtverwaltung. Über den TP-SAP korrespondiert die untere MAC Schicht mit der Bitübertragungsschicht.

2.8.1.4.1 Medium Access Control Die Funktionen der Medienzugriffsteilschicht (*Medium Access Control*, MAC) setzen sich nach Abbildung 2.21 hauptsächlich aus der Kanalcodierung, Kanalzugriffssteuerung und der Funkbetriebsmittelverwaltung zusammen, die je nach Übertragungsmodus ihre Dienste an die drei SAPs TMA, TMB und TMC für den Signalisierungs- und Paketdatenmodus oder an den 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 Basisstation darf kontinuierlich oder diskontinuierlich übertragen. Im letzteren Fall unterbricht die jeweilige Basisstation ihre Übertragung, wenn keine weiteren Informationen zu übertragen sind oder wenn sie denselben Funkkanal zu Signalisierungszwecken mit anderen Basisstationen teilt, die sich ebenfalls im *Time Sharing Mode* befinden. Im folgenden werden die Funktionen der MAC-Schicht erläutert.

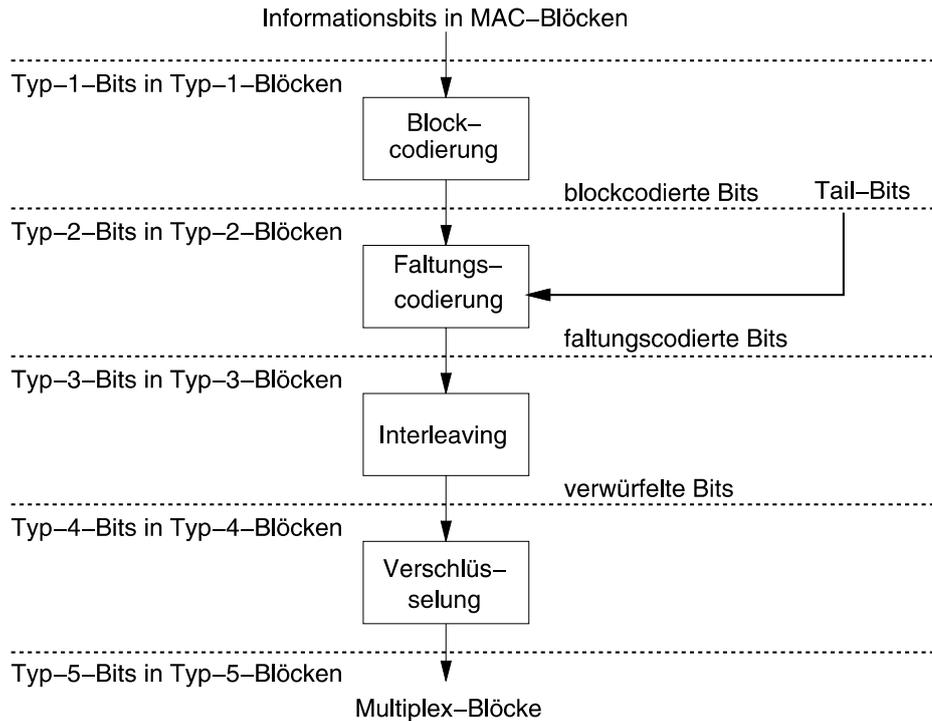


Abbildung 2.22: Schema der TETRA-Kanalcodierung

Kanalcodierung Die Kanalcodierung erfolgt beim Standard Voice+Data nach dem in Abb. 2.22 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 [ETS94c, LC83] 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 [Sk188] erzeugt.

Die Codewörter f werden mit den Typ-1-Informationsbits b_1 zusammen versendet, so dass sich die Typ-2-Bits b_2 zu

$$b_2(k) = \begin{cases} f(k-1), & \text{für } k = 1, 2, \dots, 16, \\ b_1(k-16), & \text{für } k = 17, 18, \dots, K_2 = K_1 + 16 \end{cases} \quad (2.31)$$

ergeben. Da $K_2 \in \{76, 108, 140, 284\} \neq 2^m - 1$ für $m \in \mathbb{N}$, handelt es sich nach [Sk188, LC83] bei dem hier verwendeten Blockcode weder um einen Hammingcode noch um einen *Bose-Chaudhuri-Hoquenghem-Code* (BCH).

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 $K_3 = \frac{t}{2}K_2$, $t \in \{3, 6\}$ codiert. Zuerst wird aus den Typ-2-Bits $b_2(k)$ von einem 16-Zustands-Faltungscodierer der Rate $1/4$ die Ausgabe V berechnet.

Die Punktierung zu einem 16-Zustands-RCPC-Code (*Rate-Compatible Punctured Convolutional*) der Rate $2/t$ erfolgt durch die Auswahl von $K_3 = \frac{t}{2}K_2$ Typ-3-Bits aus den vier K_2 codierten Bits V :

$$\begin{aligned}
b_3(j) &= V(k), \quad j = 1, 2, \dots, \frac{t}{2}K_2, \\
k &= 8 \lfloor (j-1)/t \rfloor + P \left(j - t \lfloor (j-1)/t \rfloor \right).
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Bei einer Coderate von 2/3 lauten die drei Punktkoeffizienten: $P(1) = 1$, $P(2) = 2$, $P(3) = 5$, mit $t = 3$. Bei einer Coderate von 1/3 lauten die sechs Punktkoeffizienten: $P(1) = 1$, $P(2) = 2$, $P(3) = 3$, $P(4) = 5$, $P(5) = 6$, $P(7) = 7$, 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 vier 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) -Blockinterleavers mit $K = K_3$ und z. B. $a = 101$ folgendermaßen verwürfelt, vgl. Abb. 2.23:

$$\begin{aligned}
b_4(k) &= b_3(i), \quad i = 1, 2, \dots, K = K_3 = K_4, \\
k &= 1 + ((a \cdot i) \bmod K).
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Alternativ ist für 432 bit lange Typ-3-Blöcke eine Bitverschachtelung über N Blöcke in eine Sequenz von Typ-4-Blöcken in zwei Schritten vorgesehen. Zuerst werden aus Typ-3-Bits b_3 verschachtelte Bits $b'_3(m, k)$, als Bits k des Blocks m erzeugt:

$$\begin{aligned}
b'_3(m, k) &= b_3(m - j, j + (i \cdot N)), & k &= 1, 2, \dots, 432, \\
& & m &= 1, 2, \dots, N, \\
j &= \lfloor (k-1)/(432/N) \rfloor, \\
i &= (k-1) \bmod (432/N)
\end{aligned} \tag{2.34}$$

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

$$b_4(m, i) = b'_3(m, k), \quad \text{mit } i = 1 + (103 \cdot k) \bmod 432. \tag{2.35}$$

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 , die aus einem Generatorpolynom und einer Initialisierungssequenz für P gebildet wird, zu b_4 Modulo-2 addiert wird:

$$b_5(k) = b_4(k) + p(k), \quad k = 1, 2, \dots, K_5 = K_4. \tag{2.36}$$

In Abb. 2.23 wird die Kanalcodierung abhängig vom verwendeten logischen Kanal bei Voice+Data dargestellt. Es fällt vor allem auf, dass die Synchronisationsdaten des BSCH nicht verschlüsselt werden, da die Mobilstationen 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

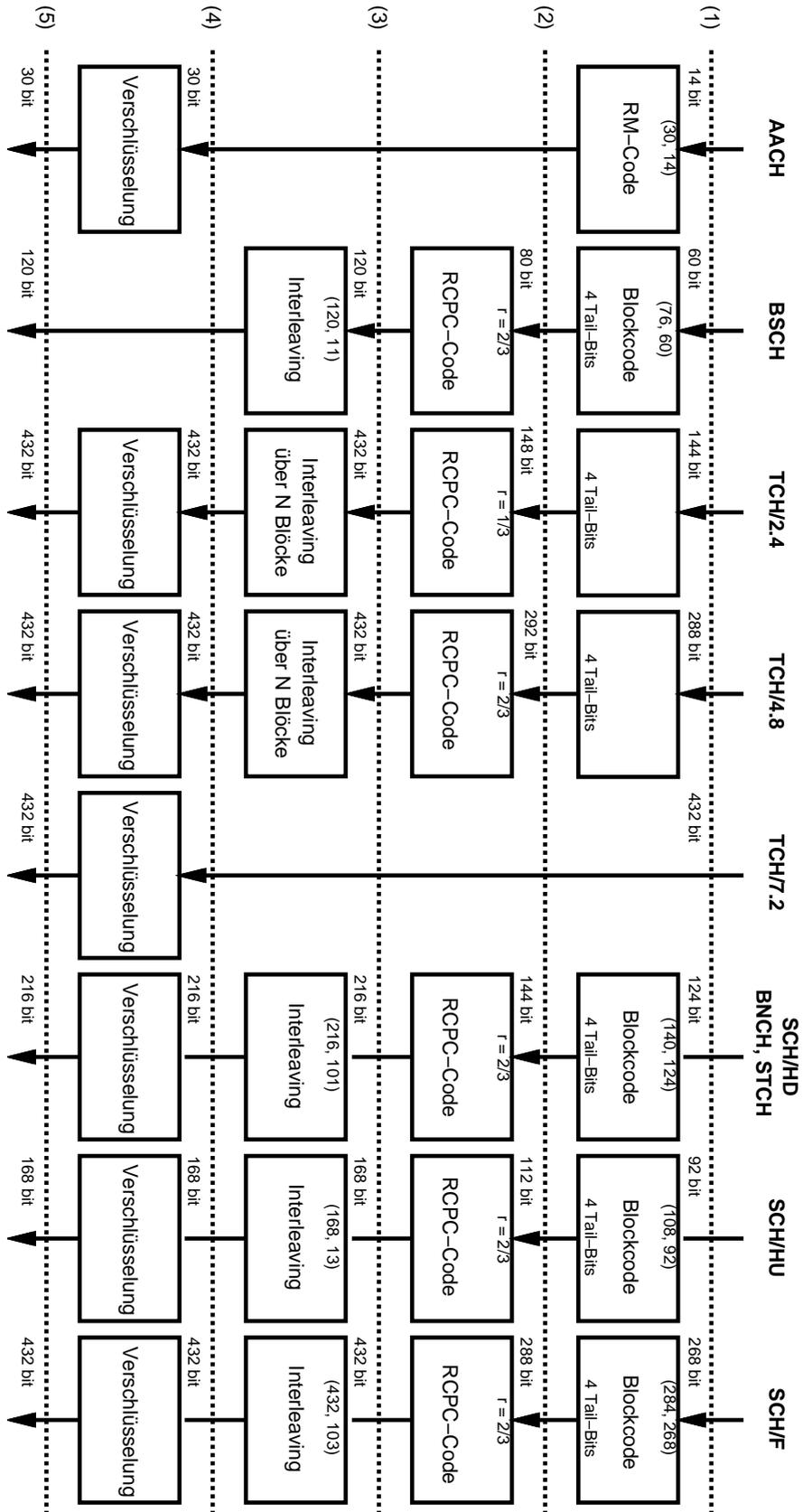


Abbildung 2.23: Struktur der V+D-Kanalcodierung

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 [LC83] insbesondere für kleine Datenmengen effizient ist, wird dieser auf die lediglich 14 bit breiten `Access_Assign`-PDUs des AACHs angewendet. Faltungscodierung und Bitverwürfelung werden für diese kleine Datenmenge nicht mehr durchgeführt.

Kanalzugriffssteuerung Die Kanalzugriffssteuerung enthält die Funktionen zur Rahmensynchronisation, die die Rahmennummer innerhalb des Multirahmens erfasst:

- Fragmentierung der von der LLC-Teilschicht erhaltenen PDUs in mehrere zu sendende MAC-SDUs (*Service Data Unit*, Dienstdateneinheit) und empfangsseitig Zusammenstellung (*Reassociation*) der empfangenen Fragmente,
- Multiplexen/Demultiplexen der logischen Kanäle sowie Bildung von Multirahmen, die daher explizit gezählt werden und
- Synchronisation der Multirahmen durch Synchronisationsblöcke der Basisstation, die auf dem Downlink gesendet werden und z. B. Informationen über die gezählten Rahmen enthalten.

Eine wichtige Funktion ist das Zufallszugriffsprotokoll (*Random Access Protocol*) für den Zugriff der Mobilstationen auf den Kanal. Die MAC-Schicht der Mobilstation verwendet beim Erstzugriff ein Slotted-ALOHA-Zugriffsprotokoll, um bei unaufgeforderter Nachrichtenübertragung Informationen an die Basisstation zu versenden. Bei Informationsanforderung der Basisstation oder bei Bestehen einer reservierten, kanalvermittelten Verbindung nutzt die Mobilstation den reservierten Zugriff. Bei geeigneter Wahl der Zugriffssparameter ist es möglich,

- die Kollisionsauflösung der Zugriffe der einzelnen Mobilstationen 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 Dienstgüteparameter (*Grades of Service*, GoS) des Zugriffs für verschiedene Gruppen- und Teilnehmerklassen anzubieten.

Die Basisstation bietet verschiedenen Mobilstationen unter Verwendung von vier Zugriffscodes (*Access Code*) Möglichkeiten des Zufallszugriffs, die A, B, C oder D genannt werden und wie Prioritäten aufzufassen sind. Der Zugriffsscode stellt eine Benutzerdienstkombination dar und wird den Mobilstationen vom Netzbetreiber fest zugewiesen. Nicht jeder Code muss allen Mobilstationen zugänglich sein. Nur wenn die Bedingungen für den Zugriff auf einen für einen bestimmten Code zugelassenen Subslot erfüllt sind, ist die Mobilstation berechtigt zuzugreifen. Die Einladung zum Zugriff wird den Mobilstationen von



Abbildung 2.24: Zugriffsmethoden des V+D-Zufallszugriffsprotokolls

den Basisstationen mittels zwei verschiedenen PDUs mitgeteilt. Die *Access_Define*-PDU 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. Mit der *Access_Assign*-PDU, welche in jedem Downlink-Zeitschlitz enthalten ist, werden dann die Zugriffsrechte der Mobilstationen auf die Uplink-Zeitschlitze angezeigt sowie mit dem *Traffic Usage Marker* die Sende- und Empfangserlaubnis des momentanen Up- und Downlink-Zeitschlitzes. Die Informationen der beiden PDUs werden bis zum Empfang einer Aktualisierung gespeichert.

In Abb. 2.24 sind beispielhaft die mit den verschiedenen Zugriffscode oder einer Reservierung gekennzeichneten Uplink-Subslots dargestellt, die in der *Access_Assign*-PDU angezeigt werden. Eine Mobilstation, 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. Ist die Nachricht fragmentiert, wird in der *MAC_Access*-PDU der Basisstation ein Reservierungswunsch für mehrere Zeitschlitze mitgeteilt. Die Basisstation antwortet auf die *MAC_Access*-PDU mit einer *MAC_Ressource*-PDU, in der sie den erfolgreichen Empfang quittiert. Weiterhin wird der Mobilstation mitgeteilt, ob und welche Zeitschlitze reserviert wurden. Diese sind in Abb. 2.24 durch ein Kreuz dargestellt. Hat eine Mobilstation nach Ablauf eines Timers noch keine Antwort auf die *Mac_Access*-PDU erhalten, wiederholt sie den Zufallszugriff. Ausführliche Erläuterungen zum Zufallszugriffsprotokoll sind in [ETS94a] enthalten.

Funkbetriebsmittel-Verwaltung Diese Funktionen sind teilweise nur in Mobil- oder Basisstationen oder in beiden vorhanden. Sie sollen jederzeit auch ohne Einbeziehung der Schicht 3 verfügbar sein. Folgende Funktionen sind u. a. vorgesehen:

- Messung der Bitfehlerhäufigkeit (*Bit Error Ratio*, BER) und der Blockfehlerhäufigkeit (*Block Error Ratio*, BLER) unabhängig oder unter Kontrolle der Schicht 3.
- 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 Broadcastverbindungen. Es können zwei Adressen verwendet werden: eine Kopie der *Individual*- oder *Group Subscriber Identity* oder ein *Event Label*, das von der MAC-Schicht bei bestehenden Verbindungen zur Reduktion des Signalisierungsaufwandes genutzt werden kann.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

- Management der Leistungssteuerung (*Power Control*) in Schicht 1.
- Einrichtung der Verbindung durch Verwendung der Angaben Frequenz, Zeitschlitz und Farbcode (*Colour Code*) von der *Mobile Link Entity*, (MLE).
- Speicherung von Steuerdaten- und Sprachrahmen bis zur Versendung.

2.8.1.4.2 Logical Link Control Das *Logical Link Control Protocol for TETRA* (LLC) stellt zwei Entities von Verbindungstypen, den *Basic Link* (BL) und den *Advanced Link* (AL), über den TLA-SAP zur Verfügung, vgl. Abb 2.21. Bei beiden Verbindungsarten ist eine bestätigte oder eine unbestätigte Datenübertragung möglich. Ein BL stellt einen bidirektionalen, verbindungslosen Pfad zwischen einer oder mehreren MS 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 MS 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 Flusskontrolle, 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 End Point Identifier*, CEPID) unterschieden werden. Jeder dieser CEP-Bezeichner 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 (N=Netz), z. B. kann im Punkt-zu-Mehrpunkt-Betrieb von einer MS zu mehreren anderen MS die sendende MS einen AL zur BS, die BS hingegen unbestätigte BLs zu den empfangenden MS verwenden.

2.8.2 TETRAPOL

Der folgende Abschnitt beschreibt den Protokollstapel zunächst allgemein. Danach werden die Funkschnittstelle, die Bitübertragungsschicht und die Sicherungsschicht im einzelnen erläutert.

2.8.2.1 Aufbau des Protokollstapels

Der Protokollstapel der Luftschnittstelle (*Air Interface*, AI) hat drei Schichten, vgl. Abbildung 2.25 auf der nächsten Seite: Die Bitübertragungsschicht, die Sicherungsschicht, die in MAC und *Logical Link Control* (LLC) aufgeteilt ist sowie die Netzschicht (*Network Layer*, N), die in mehrere Teilschichten aufgeteilt ist (Transportschicht (*Transport Layer*, T), (*Call Control*, CC) und (*Mobility Management*, MM)) und Verwaltungsdienste für Basis- und Mobilstationen anbietet. Auf der MAC-Schicht setzen zwei Protokollstapel auf:

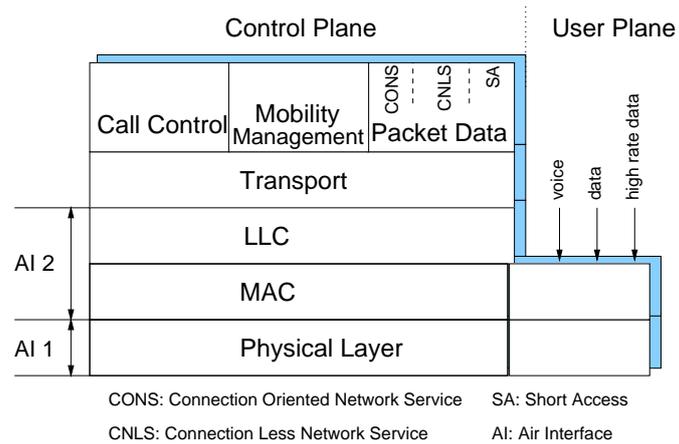


Abbildung 2.25: Der TETRAPOL-Protokollstapel

Die *User Plane* (UP), welche für den nicht adressierten Informationstransport zuständig ist und die *Control Plane* (CP) für adressierte Signalisierung.

2.8.2.2 Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt R3

Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt R3 liegt zwischen der Mobilstation und der *Switching and Management Infrastructure*, vgl. Abbildung 2.26 auf der nächsten Seite.

2.8.2.2.1 Die Multiplex-Struktur Im TETRAPOL-System wird Frequenzmultiplex (*Frequency Division Multiplex*, FDM) angewendet, wobei Vielfachzugriff der Mobilstationen (*Multiple Access*, MA) verwendet wird (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA). Dieses Verfahren spielt neben der Sprachcodierung und der Modulation eine wichtige Rolle.

Das TETRAPOL-System benutzt ein Zellularkonzept, wobei ein Versorgungsgebiet in Zellen eingeteilt und in deren Zentrum eine SwMI installiert wird. Die Mobilstation kann den Empfangspegel des ihr zugeteilten FDM-Kanals messen. Unterschreitet er eine gewisse Schranke, wird ein *Cell-Reselect*-Verfahren eingeleitet, vgl. Abschnitt 2.9 auf Seite 92, das mit kurzzeitiger Unterbrechung das Gespräch oder die Datenübertragung auf eine andere Zelle umleitet. Es gibt im TETRAPOL-System keine echte Handoverfunktion, weil die Benutzer der Mobilstationen im Normalfall keinen großen Aktionsradius haben (z. B. bei einem Bündelfunknetz auf einem Werksgelände).

TETRAPOL-Systeme können bei Funkfrequenzen zwischen 70 MHz und 520 MHz operieren. Der Trägerfrequenzabstand beträgt 12,5 kHz oder 10 kHz. Der Duplexabstand zwischen der Up- und Downlink-Trägerfrequenz desselben Funkkanals ist konstant.

Man unterscheidet zwei Kategorien von Funkkanälen:

- Verkehrskanäle (*Traffic CHannel*, TCH), die der Übertragung von Sprache und Daten bei kanalvermittelter Verbindung dienen, und
- Steuerkanäle (*Control CHannel*, CCH), über die Signalisierungsnachrichten und paketvermittelte Datenpakete übertragen werden.

Eine Basisstation überträgt auf bis zu 24 Funkkanälen, wobei ein Kanal für den Steuerkanal CCH reserviert ist. In einer Funkzellen können ein oder mehrere *Extended Control CHannel* (ECCH) eingerichtet werden. Jeder ECCH trägt im Downlink die logischen

- Trainingsrahmen,
- SCH/TI Rahmen (*SCH-TI*).

Der Trainingsrahmen ist ein deterministischer Rahmen, der keine sich ändernden Informationen trägt. Er wird von einem Terminal zu Beginn einer Uplink-Übertragung gesendet. Im Direktmodus (DM) sind die folgenden drei Rahmentypen verfügbar:

- Sprachrahmen (*VOICE*),
- Datenrahmen (*DATA* oder *HIGH RATE DATA*),
- Direktmodus-Notfallrahmen.

2.8.2.2.2 Logische Kanäle Der logische Kanal ist als logischer Kommunikationsweg zwischen zwei oder mehr Teilnehmern definiert und bildet die Schnittstelle zwischen den kommunizierenden Protokollinstanzen und dem Funkteilsystem. Die entsprechenden physikalischen Kanäle werden von den logischen Kanälen genutzt, um die Daten der logischen Kanäle zu übertragen.

Ein Funkkanal trägt eine Reihe von logischen Kanälen, von denen einige bidirektional sein können. Jeder logische Kanal nutzt einen Teil der Superrahmen, deren Zuordnung auf dem CCH bekannt gegeben wird. Die Terminals entnehmen die Superrahmensynchronisation dem CCH durch Detektion der *Paging CHannel* (PCH)- und *Broadcast CHannel* (BCH)-Rahmen.

Logische Kanäle werden in zwei Gruppen unterteilt:

- permanente logische Kanäle und
- logische Kanäle durch Stehlen von Rahmen durch die SwMI.

Folgende logische Steuerkanäle sind definiert:

PCH: Der *Paging CHannel* wird von der SwMI verwendet, um ein Terminal auszurufen.

BCH: Der *Broadcast CHannel* dient der SwMI dazu, Funkzellen- und Netzinformationen an alle Terminals zu verteilen.

RCH: Auf dem *Random access answer CHannel* quittiert die SwMI Zufallszugriffe auf den *Random Access CHannel* (RACH).

RACH: Die Terminals nutzen den *Random Access CHannel*, um durch Senden einer Zugriffsanforderung eine Kommunikation mit der SwMI einzurichten oder wiederherzustellen.

DACH: Der *Dynamic Access CHannel* wird von den Terminals dazu verwendet, kurze Informationsnachrichten zu versenden.

SDCH: Der *Signalling and Data Channel* ist ein bidirektionaler Kanal, der für Signalisier- und Datenaustausch zwischen SwMI und Terminals benutzt wird.

Zur Übertragung von Sprache und Daten stehen drei verschiedene Verkehrskanäle zur Verfügung:

Tabelle 2.25: Abbildung der logischen Kanäle auf die physikalischen Kanäle

Logischer Kanal	Richtung	Bursttyp	Physikalischer Kanal	Position im Superrahmen
PCH	DL	DATA	CCH	98, 99, 198, 199
BCH	DL	DATA	CCH	0..3, 100..103
RCH	DL	DATA	CCH	$14 + i \cdot 25, i = 0..7$
RACH	UL	RACH	CCH	$j + i \cdot 25, j = 0..2, i = 0..7$
DACH	UL	DATA	CCH	dyn. Zuweisung
SDCH	DL, UL	DATA	CCH	alle übrigen Rahmen
SCH/TI	DL	SCH_TI	TCH	0 (durch Stehlen)
SCH	DL	DATA	TCH	Rahmenstehlen
VCH/DCH	DL, UL	VOICE, DATA oder HIGH RATE DATA	TCH	alle übrigen

- Funkfrequenzcharakteristik,
- Sender-/Empfänger-Management,
- Feinjustierung der Funkparameter,
- Bit- und symbolorientiert: Symbolsynchronisation,
- Burst-Bildung:
 - Empfangen und Senden der Daten von und zur MAC-Schicht,
 - Verschlüsselung und Entschlüsselung.

Das benutzte Modulationsverfahren ist GMSK mit einer Modulations-(Brutto-)bitrate von 8 kbit/s.

Die Folge $m(k)$ der zu übertragenden Modulationsbits wird mit einer differentiellen Codierung in eine Folge von Modulationssymbolen $M(k)$ nach folgender Vorschrift abgebildet:

$$M(k) = (m(k) + m(k - 1)) \bmod 2. \tag{2.37}$$

Die Übertragungen von der Basisstation zur Mobilstation oder zwischen zwei Mobilstationen werden spektral invertiert:

$$\alpha_k = -(1 - 2 \cdot M(k)), \quad \alpha_k \in \{+1, -1\}. \tag{2.38}$$

Übertragungen von einer Mobilstation zur Basisstation werden nicht spektral invertiert, sondern wie folgt umgewandelt:

$$\alpha_k = 1 - 2 \cdot M(k), \quad \alpha_k \in \{+1, -1\}. \tag{2.39}$$

Das modulierte Signal $f(t)$ ist:

$$f(t) = \sum_i (-\alpha_i \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \int_{-\infty}^{t-iT} g(t)dt) \tag{2.40}$$

mit

$$g(t) = h(t) * \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right). \tag{2.41}$$

Dabei ist

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} \frac{1}{T} & \text{für } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.42)$$

und

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot s \cdot T}} \cdot \exp\left(\frac{-t^2}{2 \cdot s^2 \cdot T^2}\right) \quad (2.43)$$

mit

$$s = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2 \cdot \pi \cdot BT}, \quad BT = 0,25. \quad (2.44)$$

Das RF-Signal kann beschrieben werden durch:

$$x(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{T}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + f(t) + f_0). \quad (2.45)$$

E_b bezeichnet dabei die Energie pro moduliertem Bit und f_0 die Mittenfrequenz des Funkkanals.

Alle Zeitinformationen in einer Basisstation werden von einem einzigen Piloten abgeleitet. Die Terminals werten den CCH aus und führen damit eine Synchronisation in der physikalischen Schicht durch, die dann auch für die Uplink-Kanäle verwendet wird.

2.8.2.4 Die Sicherungsschicht

In Abbildung 2.29 auf der nächsten Seite ist die Architektur der Sicherungsschicht dargestellt. Dabei wurden die in der TETRAPOL-Spezifikation beschriebenen Funktionen der Sicherungsschicht geordnet und eine klare Trennung zwischen den Teilschichten *Medium Access Control* (MAC) und *Logical Link Control* (LLC) erreicht. Ein direkter Vergleich zwischen der Sicherungsschicht von TETRA und der von TETRAPOL wird dadurch möglich.

Diese Trennung ist zwar in der PAS angedeutet, aber nicht sauber vollzogen. Beispielsweise gibt es keine Darstellung der Dienstelemente, die zwischen den beiden Teilschichten ausgetauscht werden. Die MAC-Schicht kann in *Lower-* und *Upper-MAC* aufgeteilt ist. Am oberen Rand der Sicherungsschicht bieten drei Dienstzugangspunkte, vgl. Abbildung 2.25 auf Seite 81, der Netzschicht ihre Dienste an. Der LLC1-*Service Access Point* (SAP) bietet Dienste für den bidirektionalen Transfer von adressierten Signalisierungs- und Datennachrichten an. Der LLC2-SAP bietet den nichtadressierten Datentransfer an. Hier werden Rundsendenachrichten (z. B. mit Systeminformationen) unidirektional von der Basisstation an die Mobilstationen versendet. Auch der Paging-Dienst wird über diesen SAP realisiert. Der LLC3-SAP ist nur auf Seiten der Mobilstation vorhanden und wird für Steuerungs- und Verwaltungsnachrichten verwendet.

Für die Benutzerebene enthält die MAC-Teilschicht einen weiteren SAP, über den der Informationstransport über eine kanalvermittelte Verbindung erfolgt (MAC4-SAP). Die untere und die obere MAC-Teilschicht kommunizieren über den virtuellen MAC-SAP, welcher Dienste für die konkrete Funkübertragung wie z. B. Kanalcodierung, Interleaving und *Frame Stealing* anbietet. Über den PL-SAP korrespondiert die untere MAC-Schicht mit der Bitübertragungsschicht.

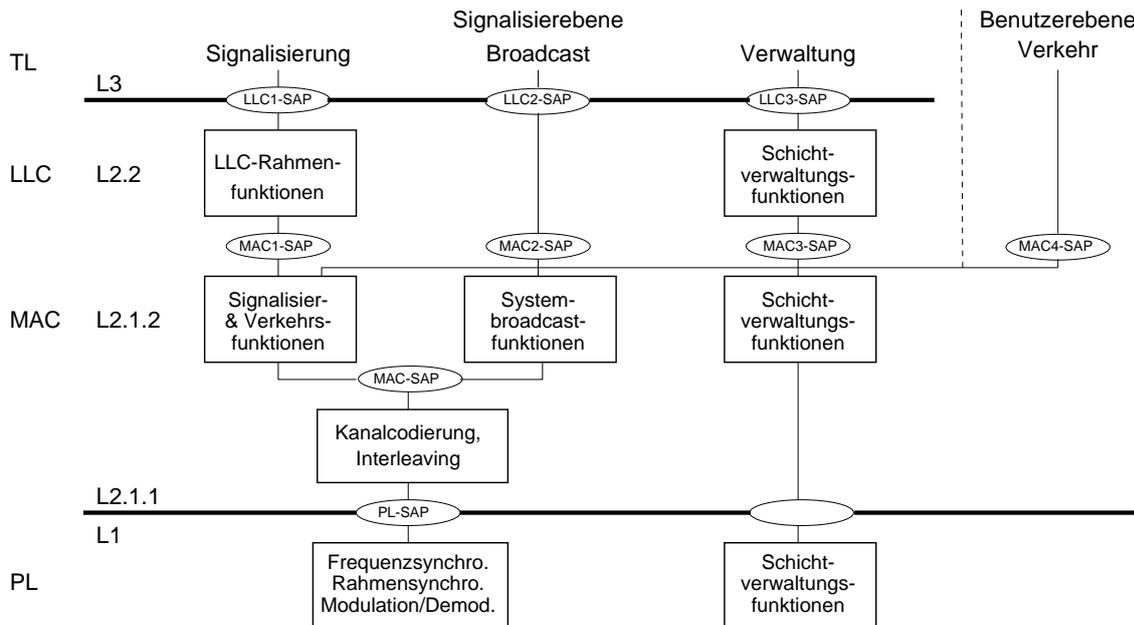


Abbildung 2.29: Die Architektur der TETRAPOL-Sicherungsschicht

2.8.2.4.1 Medium Access Control Die Funktionen der MAC-Teilschicht setzen sich nach Abbildung 2.29 hauptsächlich aus der Kanalcodierung, Kanalzugriffssteuerung und der Funkbetriebsmittelverwaltung zusammen, die je nach Übertragungsmodus ihre Dienste an die drei SAPs TMA, TMB und TMC für den Signalisierungs- und Paketdatenmodus oder an den 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 *Frame-Stealing*-Mechanismus versendet werden.

Kanalcodierung Die Kanalcodierung erfolgt bei TETRAPOL in Abhängigkeit des zu codierenden Rahmentyps. Eine genaue Beschreibung der jeweiligen Kanalcodierung wird in [FOR98d] gegeben.

VOICE-Rahmen Die ersten 20 bit eines Sprachrahmens werden zusammen mit den beiden *Associated Signalling Bits* (ASB) um ein Diskriminatorbit ($D = 0$) und 3 CRC-Bits erweitert und anschließend mit einem Faltungscodiercode der Coderate $K = \frac{1}{2}$ codiert. An die sich ergebenden 52 bit werden die übrigen 100 bit des Sprachrahmens angehängt. Diese 152 bit werden nach *Interleaving*, *Differential Precoding* und *Scrambling* um acht Synchronisationsbits erweitert. Es sind unterschiedliche Versionen des *Differential Precodings* für die UHF- und die VHF-Version der MAC-Schicht definiert.

DATA-Rahmen 66 Datenbits werden um 2 ASB, ein Diskriminatorbit und 5 CRC-Bits erweitert. Diese 74 bit werden aufgeteilt in zwei Blöcke mit 26 bzw. 48 bit. Der erste Block sowie der um 2 Bits (*Tailbits*) ergänzte zweite Block werden getrennt faltungscodiert ($K = \frac{1}{2}$). Bevor die Synchronisationsbits angehängt werden, werden *Interleaving*, *Differential Precoding* und *Scrambling* durchgeführt. *Interleaving* und *Differential Precoding* unterscheiden sich in der VHF- und der UHF-Version.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

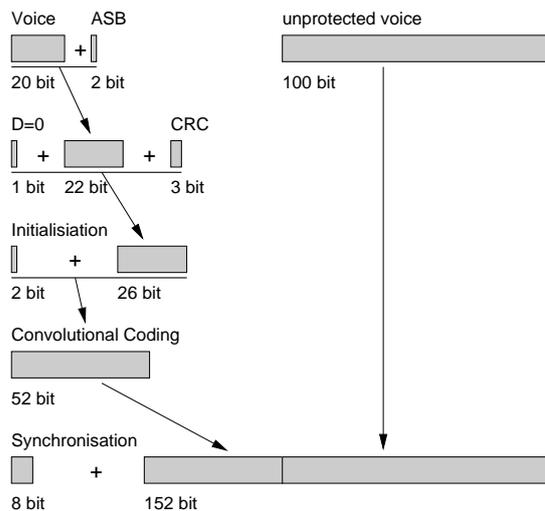


Abbildung 2.30: Codierung der VOICE-Rahmen

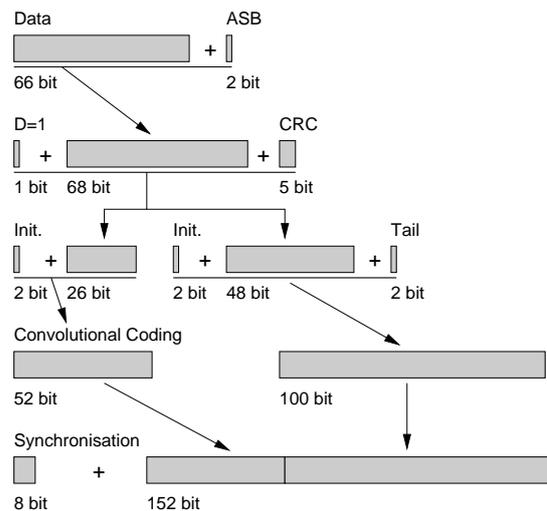


Abbildung 2.31: Codierung der DATA-Rahmen

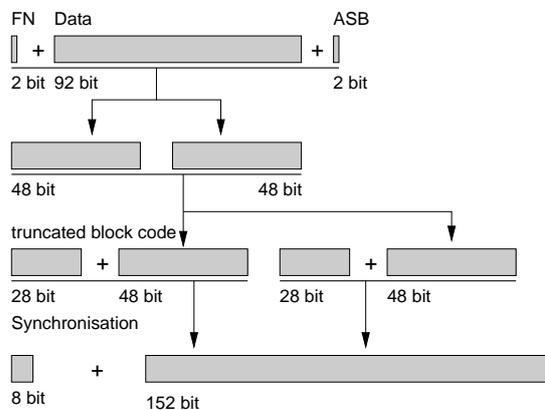


Abbildung 2.32: Codierung der HIGH-RATE-DATA-Rahmen

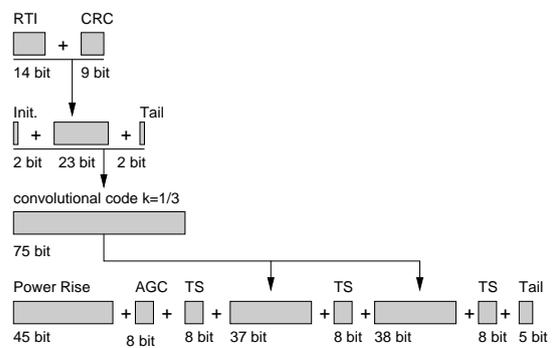


Abbildung 2.33: Codierung der RACH-Rahmen

HIGH RATE DATA-Rahmen Die um die ASB und die 2 *Flag Number Bits* (FN) erweiterten 92 Datenbits werden in zwei gleich große Blöcke geteilt und getrennt mit einem verkürzten BCH-Code codiert. Vor dem *Interleaving* werden diese zweimal 76 bit wieder zu einem Block verkettet. Das *Differential Precoding* ist auch hier für die VHF- und die UHF-Version verschieden.

RACH-Rahmen Die 14 bit des *Random Terminal Identity* (RTI) oder *Temporary Terminal Identifier* (TTI) werden zunächst mit neun CRC-Bits geschützt und anschließend faltungscodiert. Nach dem *Interleaving* werden 75 bit in zwei Blöcke unterteilt und, wie in [Abbildung 2.33](#) gezeigt, zu einem RACH-Rahmen zusammengesetzt.

Kanalzugriffssteuerung Die Kanalzugriffssteuerung enthält die Funktionen zur Rahmensynchronisation, die die Rahmennummer innerhalb des Superrahmens erfasst:

- Fragmentierung der von der LLC-Teilschicht erhaltenen *Protocol Data Unit* (PDU)s in mehrere zu sendende Dienstdateneinheiten (*Service Data Unit*, SDU) MAC-SDUs

und empfangsseitig Zusammenstellung (*Reassociation*) der empfangenen Fragmente und

- Multiplexen/Demultiplexen der logischen Kanäle sowie Bildung von Superrahmen, die daher explizit gezählt werden.

Die Kanalzugriffssteuerung wird in [FOR98b] ausführlich beschrieben.

Zugriff auf den RACH Eine wichtige Funktion ist das Zufallszugriffsprotokoll (*Random Access Protocol*) für den Zugriff der Mobilstationen auf den Kanal. Die MAC-Schicht der Mobilstation verwendet beim Erstzugriff ein Zufallszugriffsprotokoll, um bei un- aufgeforderter Nachrichtenübertragung Informationen an die Basisstation zu versenden. Bei Informationsanforderung der Basisstation oder bei Bestehen einer reservierten, kanalvermittelten Verbindung nutzt die Mobilstation den reservierten Zugriff. Bei geeigneter Wahl der Zugriffsparameter ist es möglich,

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

Der RACH ist organisiert in acht Gruppen mit je drei Zugriffsmöglichkeiten pro Superrahmen, vgl. Tabelle 2.25 auf Seite 85. Ein Terminal wählt den Zeitschlitz aus einer Gruppe anhand seiner Zugriffsnummer (*Access Number, AN*) aus. Diese Zugriffsnummer berechnet sich aus den 4 LSBs modulo 3 des TTI oder RTI. Damit ergibt sich eine mögliche Zugriffswiederholung alle 0,5s. In einem RACH-Rahmen überträgt ein Terminal die 14 LSBs des TTI oder RTI.

Alle 0,5s wird von der SwMI ein RACH-Rahmen gesendet, der die 3 Quittungen der 3 Zugriffe einer Zugriffsperiode trägt. Das fehlende Bit des TTI bzw. RTI kann bei korrektem Empfang des RACH-Rahmens durch Auswertung der AN berechnet werden. Im RACH wird durch Senden des TTI/RTI und einer positiven Quittung (*ACKnowledgement, ACK*) der Empfang bestätigt. Anschließend überträgt die SwMI einen RR-Rahmen mit gesetztem P-Bit, in dem dem betroffenen Terminal die gewährten Übertragungsrechte bekannt gegeben werden.

Empfängt das Terminal die positive Quittung, war der Zugriff erfolgreich. Im Falle des Empfangs einer positiven Quittung für ein anderes Terminal (NACK), des Nichtempfangs einer Quittung (EFF) oder des Nichtempfangs des RACH-Rahmens durch die Basisstation (NR), wiederholt das Terminal den RACH-Rahmen bei der nächsten Zugriffsmöglichkeit.

Im Falle einer Kollision (COLL) führt das Terminal entweder eine Zugriffswiederholung bei der nächsten Möglichkeit durch oder schaltet in den Wartemodus (Ebene 1) um. Die Entscheidung über das gewählte Verfahren wird zufällig getroffen. Im

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

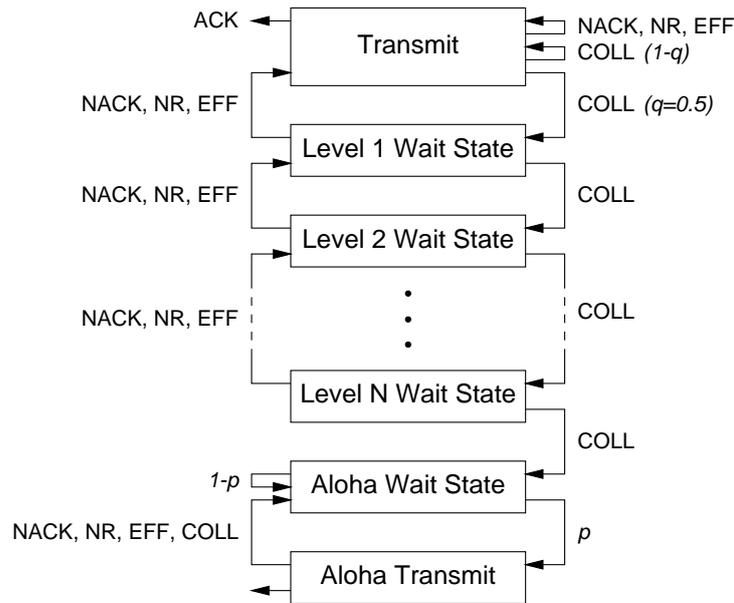


Abbildung 2.34: Algorithmus zur Steuerung der Übertragungswiederholungen auf dem RACH

Wartezustand wertet das Terminal die Daten des RCH aus, ohne RACH-Rahmen zu senden und schaltet bei Empfang einer COLL-Quittung in die nächst höhere Ebene bis zur Ebene N_{MAX} um. Bei Empfang einer NR-, NACK- oder EFF-Quittung wechselt es in die nächst niedrigere Ebene bis zur Ebene 0, dem Sendezustand, vgl. Abbildung 2.34.

Wird auch in der Ebene N_{MAX} eine Kollision erkannt, geht das Terminal in einen S-ALOHA-Modus über. N_{MAX} sollte so dimensioniert werden, dass der S-ALOHA-Modus nur selten erreicht wird. Ziel des Algorithmus ist die zeitliche Gleichverteilung der Zufallszugriffe.

Zugriff auf den DACH Zu jedem Zeitpunkt kann die Sicherungsschicht nur einen DACH-Übertragungswunsch bearbeiten. Soll ein LDACH-Rahmen übertragen werden, wird zuerst der Timer T210 gesetzt. Anschließend zieht das Terminal eine zufällige Zahl aus dem Wertebereich $0 < Y \leq \min(2^N, N212)$, wobei zunächst $N = N210$ gilt. Im Y ten DACH-Rahmen sendet das Terminal dann den LDACH-Rahmen, setzt den Timer D211 und hört den SDCH ab. Bei Empfang eines ACK_DACH-Rahmens war die Datenübertragung erfolgreich und die Timer werden gestoppt. Wird ein Füllrahmen empfangen, nachdem der Timer D211 abgelaufen ist, erhöht das Terminal N um 1 und wiederholt den Zugriff. Läuft der Timer T210 ab, informiert die Sicherungsschicht die Transportschicht über das Scheitern der Übertragung.

Der DACH wird dynamisch von der BS zugewiesen. Um einen DACH einzurichten, setzt die BS das ASB Y . Die empfangenden MS erkennen daran, dass der nächste DACH auf dem Uplink `shift_dach` Rahmen nach dem Empfang einer PDU mit gesetztem ASB Y beginnt. Sowohl `shift_dach` (typischer Wert: fünf Rahmen) als auch die Länge N_{DACH} des DACH (typischer Wert: zwei Rahmen) sind Systemkonstanten.

Zugriff auf den SDCH oder DCH Für Übertragungen auf den SDCH oder DCH ist ei-

ne vorherige Verbindungseinrichtung notwendig. Eine Verbindung kann nur von der Basisstation eingerichtet werden. Ein Terminal kann durch einen Zugriff auf den RACH der Basisstation einen Verbindungswunsch mitteilen. Zur Einrichtung einer Verbindung sendet die Basisstation ein SNRM-Kommando mit gesetztem P-Bit und startet den Timer T200. Empfängt das Terminal das Kommando korrekt, sendet es eine UA-Antwort mit gesetztem E-Bit. Der Timer wird gestoppt, wenn die Basisstation die UA-Antwort empfangen hat. Läuft der Timer ab, wiederholt die Basisstation die Übertragung des SNRM-Kommandos bis zu N201 mal.

Nach erfolgreicher Verbindungseinrichtung ist die Informationsübertragung möglich. Ging der Verbindungswunsch vom Terminal aus, kann es mit einem RR-Kommando mit gesetztem P-Bit der Basisstation seine Empfangsbereitschaft mitteilen.

Zugriff auf den VCH Genauso wie ein DCH besteht ein VCH aus zwei physikalischen Funkkanälen mit entgegengesetzten Richtungen. Die Einrichtung einer Sprachverbindung geschieht genauso, wie bei einer Datenverbindung.

2.8.2.4.2 Logical Link Control Die LLC-Teilschicht bietet einen Schutz gegen Übertragungsfehler für Signalisier- oder Nutzdaten. Dazu wird eine *Frame Check Sequence* (FCS) verwendet, um die Anzahl nicht erkannter fehlerhafter Nachrichten zu minimieren. Ein an das *High Level Data Link Control* (HDLC) angelehnter Fenstermechanismus sorgt bei der quitierten Datenübertragung für die Übertragungswiederholung aller Datenpakete ab dem ersten fehlerhaften Paket (Go-Back N ARQ, typische Fenstergröße 8).

2.8.2.5 Die Transportschicht

Die Aufgaben der Transportschicht sind:

- Multiplexen und Demultiplexen: Kombination von mehreren Transportverbindungen auf eine LLC-Verbindung,
- Segmentieren und Wiederzusammensetzen: Aufteilung einer TSDU in mehrere TPDU's auf der Senderseite und Zusammensetzen zum Originalformat auf der Empfängerseite,
- Übertragung von TPDU's,
- Flusssteuerung: Regulierung des Flusses von TPDU's zwischen der Transportschicht und der LLC-Teilschicht.

Sie bietet dazu drei verschiedene Dienste:

- Transportdienst im Datagramm-Modus zur unbestätigten unidirektionalen Übertragung auf den logischen Kanälen BCH, SCH und SDCH,
- Transportdienst für den DACH-Zugriff für die Übertragung von bis zu 84 bit Nutzdaten von einem RT zur BS,
- Transportdienst im verbindungsorientierten Modus, der verschiedene Dienstklassen und Dienstgüten anbietet.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

Der Datagramm-Modus wird in der Regel von der BS dazu verwendet, Informationen im Rundsendemodus zu verteilen. Er kann aber auch zur Übertragung von Information von einem Terminal zur SwMI im Polling-Modus verwendet werden. Beispiele für die Anwendung des Polling-Mechanismusses sind:

- *Automatic Vehicle Location* (AVL), basierend auf *Global Positioning System* (GPS),
- Sammlung von Messdaten mit Hilfe von Sensoren.

2.8.3 Bewertung

Die Spezifikationen der Funkschnittstelle von TETRA und TETRAPOL sehen beide eine Aufteilung in CP und UP vor. Beide Protokollstapel beschreiben die Schichten 1 bis 3, wobei die *Mobile Link Entity* (MLE)-Schicht bei TETRA und die Transportschicht bei TETRAPOL entworfen wurden, um die meisten funkspezifischen Eigenschaften der Funkschnittstelle zu verdecken und Dienste anzubieten, die einer vergleichbaren nicht-funkbasierten Schicht 2 entsprechen.

Der Aufbau der Protokollstapel an der Funkschnittstelle ist damit bei den beiden Standards sehr ähnlich. Wesentliche Unterschiede sind in den Schichten 1 und 2 zu erkennen, was u. a. bedeutet, dass TETRA-Funkgeräte in einem TETRAPOL-Netz und umgekehrt nicht betrieben werden können. Die Schicht 1 wurde bereits in Abschnitt 2.3 vergleichend bewertet.

Hinsichtlich der Erfüllung der betrieblich-taktischen Anforderungen der BOS sind insbesondere die Mechanismen der MAC-Teilschicht von Bedeutung. TETRA ermöglicht durch die variable Kombination von bis zu 4 Zeitschlitzes wesentlich höhere Datenraten als TETRAPOL. Die Möglichkeit, Daten ohne Kanalcodierung zu übertragen, ist zwar bei TETRA vorhanden, scheint aber wegen der nicht zu vernachlässigenden Bitfehlerrate des Funkkanals nicht nutzbar.

Wesentlichen Einfluss auf die Verbindungsaufbauzeiten und den maximal tragbaren Verkehr hat die Steuerung des Zufallszugriffs. Bei TETRA-Systemen variiert die BS in Abhängigkeit der aktuellen Kollisionshäufigkeiten die Fenstergröße für den Zufallszugriff. TETRAPOL-Systeme bieten diese Möglichkeit wegen der festen Rahmenstruktur nicht. Die Anzahl der Zugriffsmöglichkeiten lässt sich nur erhöhen, indem weitere CCH zur Verfügung gestellt werden. Diese CCH stehen als Verkehrskanäle dann nicht mehr zur Verfügung, können jedoch zur Übertragung von Daten mit niedriger Dienstgüte genutzt werden. Mehrere CCH sind vor allem dann notwendig, wenn viele Kurzdaten (bis 100 byte) übertragen werden sollen.

Eine weitere Differenzierung der Leistungsfähigkeit der beiden Standards ist nur auf der Basis von stochastischen Simulationen möglich, da nur auf diese Weise die Leistungsfähigkeit des gesamten Protokollstapels in Abhängigkeit unter verschiedenen Einsatzbedingungen ermittelt werden kann. Der Abschnitt 2.11 geht darauf näher ein.

2.9 Roaming

2.9.1 TETRA

Durch die zellulare Struktur des Netzes muss das Netz jederzeit über den Aufenthaltsort einer MS informiert sein. Dazu ist die MS im Heimatregister (*Home Location Register*,

HLR) ihrer Heimatvermittlungsstelle gespeichert, die einen bestimmten Bereich des Netzes mit in der Regel mehreren BS verwaltet (*Location Area*, LA). Verlässt die MS den Bereich einer Zelle, wird die Aktualisierung des Aufenthaltsorts im HLR veranlasst, bei Verlassen der LA wird die MS zusätzlich in der Besucherdatei (*Visited Location Register*, VLR) des neuen LA eingetragen. Dieser Vorgang wird Handover genannt, und wird vom Mobilitätsmanagement (*Mobility Management*, MM) automatisch durchgeführt.

Im Gegensatz zum GSM beispielsweise ist der Handovervorgang im TETRA-System dezentral organisiert, das heißt, die MS bestimmt den Zeitpunkt des Zellwechsels. Das Endgerät beobachtet laufend die Güte der Verbindung zur aktuellen BS und die Empfangsfeldstärke und Interferenzsituation benachbarter BSen. Abhängig von den äusseren Umständen und eingestellten Parametern für den Handover kann nun die MS selbständig über den günstigsten Zeitpunkt des Handovers entscheiden. Weiterhin kann das Endgerät zwischen verschiedenen Handover-Mechanismen wählen, die von einer einfachen Anrufwiederherstellung bis hin zum nahtlosen (*seamless*) Handover reichen.

Announced Cell Reselection: Wenn das Endgerät eine allmähliche Verschlechterung der Leistung einer Zelle im Vergleich mit einer anderen feststellt, bleibt ihm genügend Zeit, die Zelle, mit der es kommuniziert und die Zelle, mit der es die neue Verbindung aufbauen will, auf den bevorstehenden Wechsel vorzubereiten. TETRA unterstützt drei unterschiedliche Varianten der angekündigten Zellauswahl, die als Typ 1, 2 und 3 bezeichnet werden.

Typ 1: Bei dieser Art von Zellwechsel weiss die MS schon vor dem Wechsel, welchen neuen Verkehrskanal sie in der neuen Zelle belegen wird. Diese Art des Zellwechsels verursacht für Dienstenutzer, die auf der MLE-Schicht aufsetzen, keine merkliche Unterbrechung (*seamless*).

Typ 2: Hier weiss die MS vor dem Wechsel, in welche Zelle sie wechselt, hat aber noch keine Information darüber, welchen Verkehrskanal sie nach dem Wechsel belegen wird. Dieser Fall kann vorkommen, wenn die SwMI der momentanen Zelle nicht in der Lage ist, ein *GoTo_Channel*-Kommando zu senden oder keine Netzinformation empfangen werden kann.

Typ 3: Bei diesem Typ von Zellwechsel erfolgt der Verbindungsaufbau zur neuen Zelle ohne vor dem Wechsel schon eine neue Zelle mit ihren Verkehrskanälen auszuwählen. Da eine komplett neue Verbindung aufgebaut werden muss, kann es zu Unterbrechungen der Übertragung kommen.

Unannounced Cell Reselection: Im Falle eines plötzlichen Verlustes der Verbindung zu einer BS (z. B. durch Abschattung), kann die MS selbständig eine neue Zelle suchen und die Wiederherstellung einer bestehenden Verbindung anfordern.

2.9.2 TETRAPOL

Zur Registrierung und um aktiv an einem Einzelruf oder einer Gruppenkommunikation teilnehmen zu können, muss ein Terminal eine Funkzelle auswählen. *Roaming* wird der Prozess genannt, bei dem sich ein Terminal von einer Funkzelle in eine andere innerhalb des Funknetzes bewegt, in der es registriert ist [FOR99].

Mögliche Verfahren, um bei Zellwechseln eine kontinuierliche Kommunikation ohne Unterbrechung zu gewährleisten, sind:

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

- Handover,
- *Simulcast* – sehr große Zellabdeckung durch mehrere Basisstationen mit gleicher Frequenz (Gleichwelle),
- *Selection-Reselection*-Algorithmen.

Cell Selection in TETRAPOL ist ein dezentrales Verfahren, das nicht vom Netz kontrolliert wird. Die Entscheidung, die Zelle zu wechseln, wird vom RT getroffen, das ständig die Organisationskanäle der benachbarten Zellen beobachtet und bei Bedarf einen Zellwechsel auslöst. Nach erfolgreicher Registrierung in einer neuen Zelle ist das Terminal in der neuen Zelle angemeldet (*attached*) und die Daten über den Aufenthaltsort des Terminals werden vom Netz aktualisiert. Der Grund für die dezentrale Lösung des Zellwechsel liegt in der Gruppenkommunikation von TETRAPOL. Das System wäre dem Ansturm von Meldungen nicht gewachsen, wenn eine große Gruppe von Teilnehmern zur gleichen Zeit einen Zellwechsel initiieren würde, und alle Zellwechselwünsche vom OMC bearbeitet werden müssten. Instabilität und Dienstverzögerungen wären die Folge. Verschiedene Mechanismen wurden in TETRAPOL implementiert, um auch unter großer Verkehrslast einen möglichst verzögerungsfreien Betrieb zu gewährleisten: verschiedene Registrierungsklassen, unterschiedliche Registrierungskanäle, die durch spezielle Codierungen geschützt sind und Kollisionsauflösung. Zum Teil kann durch höhere Zellabdeckung infolge einer Vergrößerung des Zellradius (*Simulcast, s.o.*) ein zu häufiger Zellwechsel vermieden werden.

Cell Selection: Die Auswahl einer Zelle ist die Voraussetzung für Registrierung des Terminals.

Registrierung: Durch Übermittlung der Teilnehmer-Identität an die SwMI bekommt die MS den Status eines aktiven, wiedererkennbaren Mitgliedes. Dies ist die Voraussetzung, um an privaten oder Gruppenkommunikationen teilnehmen zu können. Nach Zellenauswahl und erfolgreicher Registrierung ist die MS einer Zelle zugeordnet.

Location Area: Ein Gebiet im Versorgungsbereich einer oder mehrerer BS, in dem sich die MS ohne Aktualisierung des *Location*-Register frei bewegen kann.

Serving Cell (Current Cell): Zelle, die durch Rückkehr, Auswahl (*Cell Selection*) oder Neuauswahl (*Reselection*) gewählt wurde. Ist das Terminal bereits registriert, handelt es sich um die besuchte Zelle (*Visited Cell*), in der die Daten der MS noch bekannt sind. Ist das Terminal noch im Registrierungsprozess (*Pending Registration*), so ist zumindest zeitweiser Verkehr erlaubt, bis das Terminal ein vollständiges Mitglied geworden ist.

Camped On: bedeutet, dass ein Terminal den *Control CHannel* (CCH) abhört.

Roaming: Wechsel des RT-*Attachment* eines gültig registrierten Benutzers von einem Versorgungsbereich in einen benachbarten.

Migration: Wechsel zwischen zwei Netzen. Näheres dazu findet sich in [FOR96].

Ein Terminal wählt eine Funkzelle aus, indem es die empfangene Qualität aller Steuerkanäle bewertet und anhand bestimmter Kriterien nicht unbedingt die stärkste Zelle bestimmt, vgl. auch den nächsten Abschnitt.

Die SwMI versendet periodisch Rundsendeinformationen, die folgendes enthalten:

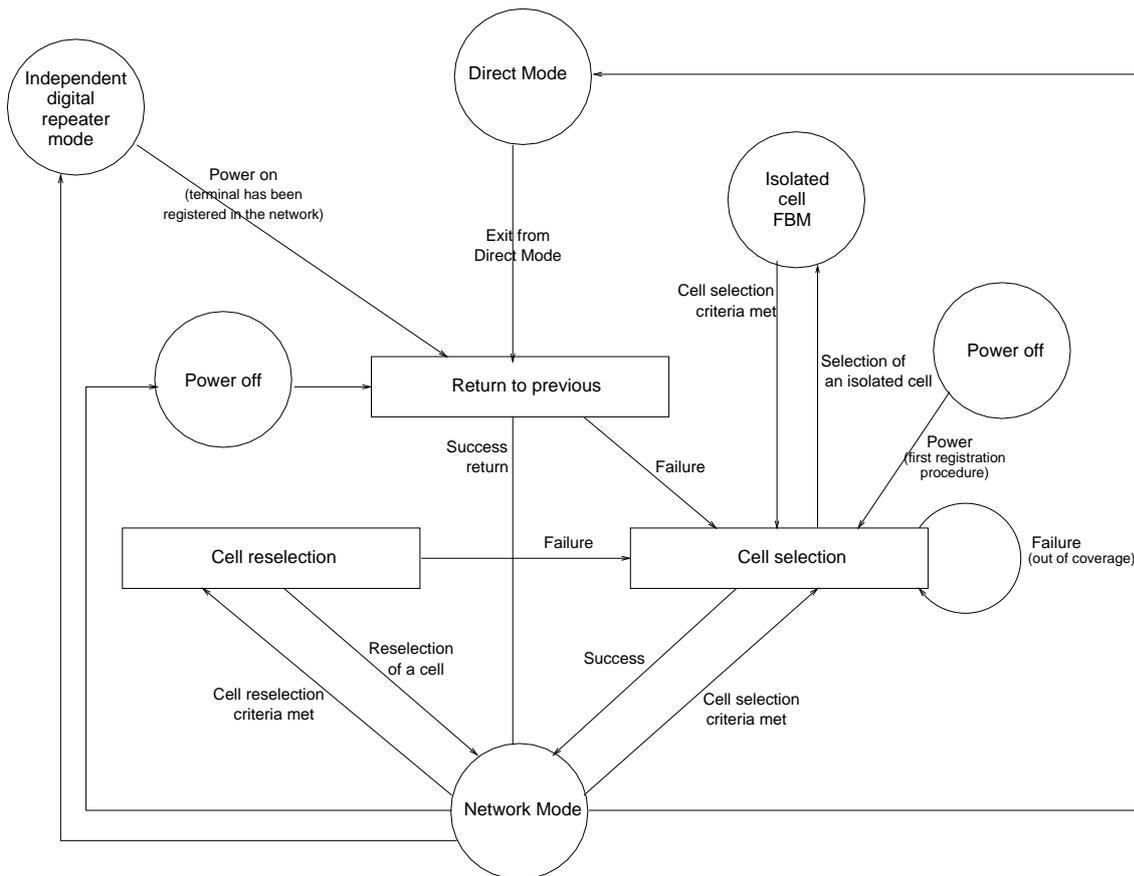


Abbildung 2.35: Cell Selection und Reselection

- Netz- und Zellenidentifikation (Land, Netz, Basisnetz, Zelle, Zellabdeckung),
- Zelleninformation (Zellenkonfiguration, Funkparameter, Scramblingparameter, lokale Zeit etc.).

Zusätzlich werden in periodischen Abständen Listen an alle Terminals einer Funkzelle verteilt, die die benachbarten Funkzellen bzw. alle verfügbaren MOCH auflisten. Die Messungen des Terminals zur Bestimmung der Empfangsqualität der Steuerkanäle werden ebenfalls periodisch durchgeführt ohne die laufenden Netzdienste des Terminals zu unterbrechen.

2.9.2.1 Cell Selection und Reselection

Abbildung 2.35 zeigt die drei verschiedenen Arten des Zellauswahlverfahrens als Zustandsübergangsdiagramm mit zugehörigen Übergängen.

Return to Previous Cell: Falls die MS vor dem Ausschalten oder dem Wechsel des Betriebsmodus in einer Zelle registriert war, versucht sie, die bekannte Zelle zu finden, ansonsten wird eine neue Zellauswahl eingeleitet.

Cell Selection: Das Auffinden der bestmöglichen Zelle nach bestimmten Kriterien (s.u.).

Reselection: Wechsel in eine benachbarte Zelle, falls dort bessere Empfangsbedingungen herrschen oder bestimmte Auswahlkriterien zutreffen.

Zum Auffinden einer Zelle beobachtet das RT die eigene und benachbarte Zellen durch Auswerten der Systeminformationen und Messen der Systemkanäle (CCH) und wählt nach geeigneten Kriterien nicht unbedingt die empfangsstärkste Zelle aus. Die MS trägt alle gemessenen Zellen in eine Liste ein und wählt nach Empfangsstärke geordnet die erste Zelle aus, die die geforderten Bedingungen wie z. B. auch die Existenz eines MOCH in einer Zelle erfüllt. Man unterscheidet folgende absolute Kriterien:

- Netz und Land
- operationeller/experimenteller Status von Versorgungsbereichen, wie z. B. Installation einer neuen BS und Status des RT, der auch vom Benutzer bestimmt wird.

und relative Kriterien

- *Preferred COverage (COV)/Base Network (BN)*: bevorzugtes Versorgungsgebiet oder Basisstation
- bevorzugte Zellenliste, die durch das RT vorgegeben wird
- *Parent Cell/RSW*: Heimatzone oder Heimat-RSW
- Zellstatus

Kriterien zur Bewertung der Empfangsstärke finden sich im Standard [FOR99].

2.9.2.2 Registrierung und Attachment

Die Registrierung eines RT ist notwendig zur Identifikation und Lokalisierung einer MS und natürlich, um an Diensten wie Gruppenkommunikation teilnehmen zu können. Das Terminal durchläuft während der Registrierung die Zustände **Non Registered**, **Pending Registration** und **Registered**.

Die Registrierung besteht aus zwei Phasen: Der Zuweisung einer *Temporary Terminal Identifier* (TTI) und der eigentlichen Registrierung. Zunächst prüft das Terminal selbstständig, ob der eigene Status und die Rechte ausreichen, eine Registrierung durchzuführen. Dazu vergleicht das RT die eigenen Systemparameter mit den ausgestrahlten Systeminformationen. Besitzt sie keine ausreichende Registrierungsklasse, verzichtet sie auf Registrierung und kann eine erneute Zellauswahl versuchen. Ist die Registrierungsklasse des RT höher als die der ausgewählten Zelle, wählt das Terminal eine zufällige Terminal-Nummer, die *Random Terminal Identity* (RTI), mit der es einen Antrag auf Registrierung an die SwMI schickt. Diese antwortet mit einer temporären Terminalnummer, dem *Temporary Terminal Identifier* (TTI), die mit einer *Transport Service Data Unit* (TSDU) im Datagramm-Mode an die RTI-Adresse verschickt wird und diese ablöst. Die SwMI versucht eine Level-2-Verbindung zum TTI-Terminal aufzubauen und entscheidet dann über den Erfolg der Registrierung mit dem Verschicken eines ACK bzw. *Not Acknowledged* (NAK). Das Terminal ist nun der ausgewählten Zelle zugeordnet (*Attached*) und die SwMI ist in der Lage, das RT zu lokalisieren und zu erreichen, da sie die Aktivität des RT auf den Steuerkanälen überwacht. Das *Attachment* wird genutzt, um die SwMI über den Status des Terminals

zu informieren und die Netzbetriebsmittel optimal zu verwalten. Die Statusinformationen betreffen neben dem RT-Betriebsmodus die Erreichbarkeit und die Zugehörigkeit zu einer *Operational Group* (OG).

2.9.2.3 Forced Attachment

Bei außergewöhnlichen Umständen können RT zur Registrierung gezwungen werden. Dies trifft nur auf nicht-registrierte RTs im Einzugsbereich einer Zelle zu und ist eine automatische Funktion des Netzes. Die nicht registrierten Terminals werden von der SwMI aufgefordert, die über den BCH abgestrahlten Registrierungsklassen zu ignorieren und können so eine Registrierung einleiten. Gründe für eine *Forced Registration* können sein:

- *Access Disabling*
- *Service Disabling*
- *Traffic Disabling*
- *RT Tracing*

2.9.2.4 Detachment

Ein Auflösen der Zuordnung zu einer Zelle (*Detachment*) kann vom RT initiiert werden, wenn:

- das Terminal ausgeschaltet wird
- bevor das Terminal in den *Direct Mode* (DM) oder *Independent Digital Repeater Mode* wechselt
- wenn der Teilnehmer im Netz gelöscht wurde

Die Gründe für das Detachment werden der SwMI in einer Nachricht mitgeteilt.

2.9.2.5 Roaming

Mit Roaming wird in TETRAPOL das Neuzuordnen eines RT-*Attachment* zu einer neuen Zelle bezeichnet. Dieses besteht aus den beschriebenen *Cell-(Re)Selection* und *Attach/Detachment*-Verfahren. Das Terminal nutzt folgende Informationen für das Roaming:

- Rundsende-Informationen des Netzes, vgl. D-SYSTEM-INFO in [FOR98a],
- persönliche Einstellungen des Benutzers,
- Messwerte des Terminals.

Ein Nachteil im Vergleich zum *Seamless Handover* im GSM ist die kurze Unterbrechung eines Gesprächs während eines Zellwechsels oder das zeitweise Aussetzen der Netzdienste während einer Zellauswahl, welche sich aus der dezentralen Organisation des Zellwechsels ergeben. Allerdings hat der Benutzer Einfluss auf die Auswahl der verwendeten Zellwechselsverfahren (Algorithmen). So kann zum Beispiel festgelegt werden, dass Verbindungen auch bei abnehmender Qualität erst nach Ende des Gespräches in eine benachbarte Zelle

umgeleitet werden (*Priority on not Changing Cell during a Call* statt *Priority on Quality of Service*). Im Gegensatz dazu führen aber Messungen der Empfangsfeldstärken benachbarter Zellen nicht zu Konflikten mit anderen Diensten, da sie auf einem *Frame-Stealing*-Mechanismus beruhen.

2.9.3 Bewertung

Beide Systeme nutzen eine dezentrale Form des Zellwechsels: der Zellwechsel wird von der MS initiiert. Dies senkt den Signalisierungsaufwand im Netz und die MS kann über den für sie günstigsten Zeitpunkt eines Zellwechsels in Abhängigkeit von den gerade erbrachten Diensten entscheiden.

TETRA kann aber aufgrund des TDM-Verfahrens während einer laufenden Übertragung auf den nicht genutzten Zeitschlitzen die Signalisierkanäle benachbarter Zellen abhören und Messungen ihrer Empfangsfeldstärke durchführen und so den Handover vorbereiten. Dadurch kann der Wechsel in die andere Zelle in der Regel für den Dienstbenutzer unmerklich erfolgen. TETRAPOL bietet nur die Möglichkeit, einen nötigen Zellwechsel trotz sich verschlechternder Verbindungsqualität hinauszuzögern. Reißt die Verbindung trotzdem ab, muss sie erst in der neuen Zelle erneut aufgebaut werden, so dass eine merkliche Unterbrechung auftreten kann.

2.10 Verschlüsselung

2.10.1 TETRA

Die Verschlüsselung von Daten ist bei TETRA-Systemen Teil der Kanalcodierung. Dadurch werden nicht nur Sprach- und Datenrahmen geschützt, sondern ebenfalls die Signalisierdaten. Dieses Verschlüsselungsprinzip stellt keine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung dar, da die Übertragung nur an der Funkschnittstelle verschlüsselt erfolgt.

Die Verschlüsselungsalgorithmen sind nicht Teil der TETRA-Spezifikation und können auf einem SIM implementiert werden.

2.10.2 TETRAPOL

Ziel der Verschlüsselung ist es, Daten unautorisierten Personen nicht zugänglich oder bekannt zu machen. Generell gibt es in einem TETRAPOL-System beim Aufbau einer Kommunikationsverbindung die Möglichkeit, zwischen einem verschlüsselten und einem unverschlüsselten Modus zu wählen, wobei der verschlüsselte Modus zu bevorzugen ist. Es wird sowohl die Verschlüsselung von Sprach- als auch von Datendiensten unterstützt. Eine Ausnahme bildet der Notruf, der immer im Klar-Modus eingerichtet wird. Den Teilnehmern einer Kommunikation wird dabei der jeweilige Modus angezeigt [FOR98e]. In TETRAPOL-Systemen wird eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung eingesetzt, ohne dass die Verschlüsselung zwischendurch aufgehoben wird.

Jedem Teilnehmer und dem Netz können eindeutige Schlüssel zugeordnet werden, die zur Authentisierung und zum Schlüsselmanagement verwendet werden. Allen Teilnehmern einer Gruppenkommunikation kann ein gemeinsamer Schlüssel zugeordnet werden. Im *Direct Mode* und im *Repeater Mode* wird nur ein allgemeiner Schlüssel verwendet. Die Verschlüsselungsalgorithmen und deren Leistungsfähigkeit sind nicht Teil der TETRAPOL-

Spezifikation und können im Endgerät oder auch in einem SIM implementiert werden. Der Übertragung aktueller Schlüssel erfolgt ebenfalls verschlüsselt.

Zum Schutz vor dem unberechtigten Auswerten der Signalisierdaten werden diese vor der Übertragung über die Funkschnittstelle verwürfelt.

2.10.3 Bewertung

Beide Systeme, TETRA und TETRAPOL, unterstützen die Verschlüsselung der zu übertragenden Daten an der Funkschnittstelle. TETRA bietet jedoch keine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung an. Das bedeutet, dass die TETRA-Netzinfrastruktur, insbesondere die zahlreichen Basisstationen, und eventuell vorhandene Richtfunkstrecken besonders gegen den Zugriff unberechtigter Personen geschützt werden muss.

TETRAPOL bietet keine echte Verschlüsselung der Signalisierdaten, da diese nur verwürfelt übertragen werden. Zu übertragende Sprach- und Datenrahmen werden jedoch ausreichend geschützt.

2.11 Simulativer Vergleich

Zur Bewertung der Protokollstapel TETRA und TETRAPOL an der Funkschnittstelle ist im Rahmen dieser Studie ein Simulator entwickelt worden, der es ermöglicht, großflächige Szenarien zu untersuchen und Aussagen über die charakteristischen Leistungsmerkmale zu treffen.

Folgende Merkmale kennzeichnen den entwickelten TETRA bzw. TETRAPOL-Simulator:

- Untersuchung des dynamischen Protokollverhaltens von TETRA bzw. TETRAPOL,
- Berücksichtigung der Störungen von bis zu 6 Gleichkanalzellen,
- Untersuchung von Szenarien mit bis 7 Gleichkanalzellen und bis zu 2500 Mobilstationen pro Zelle,
- Auswertung von Verbindungsaufbauzeiten, Wartezeiten, Verzögerungszeiten, *Grade of Service* (GoS), Paketverlustwahrscheinlichkeiten u. a.

In Abschnitt 2.11.1 werden die Szenarien beschrieben, die von der ETSI im TETRA Designer's Guide [ETS97] für simulative Untersuchungen vorgeschlagen werden. Mit dem entwickelten Simulator ist nicht nur die Untersuchung dieser Szenarien, sondern auch anderer Parametrierungen möglich. Im Abschnitt 2.11.2 wird der Aufbau des Simulators beschrieben. Beispielhafte Untersuchungen für das ETSI-Szenarium 10 und ein BOS-Szenarium werden in den Abschnitten 2.11.3 bzw. 2.11.4 diskutiert. Die Erweiterungsmöglichkeiten in Bezug auf den Feldversuch Aachen des Simulators werden in Abschnitt 2.11.8 beschrieben.

2.11.1 ETSI-Szenarien

In [ETS97] werden zehn verschiedene Szenarien vorgestellt, die die Grundlagen für den Vergleich von simulativen Untersuchungen bilden sollen, vgl. Tabelle 2.26. Es werden das

Tabelle 2.26: Szenarien – Beschreibung

Nr.	Beschreibung
1	Öffentliches Netz einer europäischen Stadt mittlerer Dichte
2	Öffentliches Netz in europäischen Ballungsgebieten (Zone 2) bestehend aus Ringautobahnen (Zone 1) und Städten hoher Dichte (Zone 1)
3	Öffentliches Netz auf Städte verbindenden Autobahnen
4	Öffentliches Netz in ländlicher Gegend mit Dörfern und kleineren Städten
5	Öffentliches Netz in einem Gewerbegebiet für mehrere Industrieunternehmen
6	Stadtweites Privatnetz für Gerätebenutzer verschiedener Gesellschaften (Elektrizitätswerke, Wasserwerke, städtische Behörden)
7	Privatnetz in ländlicher Gegend für Gerätebenutzer verschiedener Gesellschaften (Elektrizitätswerke, Wasserwerke etc.)
8	Stadtweites Privatnetz (Zone 2) für <i>Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben</i> (BOS) (Polizei, Feuerwehr etc.) mit Ballungspunkten wegen Unfällen, Veranstaltungen etc. (Zone 1)
9	Privatnetz in ländlicher Gegend mit Dörfern und kleineren Städten für Sicherheitsdienste
10	Privates Betriebsfunknetz eines Flughafens

erwartete Verkehrsaufkommen bei Sprache und Daten und weitere Parameter wie Geländetyp, abgedeckte Fläche, Teilnehmerdichte, GoS etc. aufgeführt.

In der Regel werden kreisförmige Szenarien vorausgesetzt (Ausnahme: Autobahnsszenarium 3), die z. T. aus Zonen mit besonderen morphologischen Eigenschaften oder mit besonderen Teilnehmerdichten bestehen, vgl. Tabelle 2.27. Dabei bedeutet *Grade of Service* (GoS) $(p_B + 10 \cdot p_A)/100$ und ist ein Dienstgütemaß zur Beschreibung der Fähigkeit des Systems, neue Verbindungen aufzunehmen und unterbrechungsfrei zu unterstützen.

In Tabelle 2.28 ist das erwartete Verkehrsaufkommen pro Teilnehmer für Sprach- und Datenübertragungen aufgeführt. Unter mittlerer Wartezeit wird hierbei die Zeit von der Wahl der jeweiligen Teilnehmer- bzw. Gruppennummer 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.

2.11.2 Aufbau des Simulators

Der Simulator wurde mit Ausnahme der Protokolle in der objektorientierten Programmiersprache C++ implementiert. Der prinzipielle Aufbau des TETRA(POL)-Simulators ist in Abbildung 2.36 auf Seite 102 dargestellt. Es wird die am Lehrstuhl entwickelte Klassenbibliothek *SDL Performance Evaluation Tool Class Library* (SPEETCL) verwendet, die unter anderem Klassen zur ereignisgesteuerten Simulation enthält. Die in Abbildung 2.36 auf Seite 102 grau hinterlegten Protokollstapel wurden objektorientiert mit der *Specification and Description Language* (SDL) unter Verwendung des Werkzeugs SDT formal für die Basisstation (*Base Station*, BS) und die Mobilstation (*Mobile Station*, MS) spezifiziert. Je nach gewünschtem zu untersuchenden Standard können die Protokollstapel für TETRA V+D, PDO oder TETRAPOL eingebunden werden. Die formalen Spezifikationen der Protokollstapel werden mit Hilfe des ebenfalls am Lehrstuhl entwickelten Codegenerators SDL2SPEETCL in Klassen der SPEETCL überführt, die dann zu einem lauffähigen

Tabelle 2.27: Szenarien – Allgemeine Daten

Nr. Zone	Geländetyp	Abgedeckte Fläche (km ²)	Teilnehmerdichte (1/km ²)	Teilnehmerverteilung	Verhältnis Handys zu Fahrzeugen (% : %)	Geschwindigkeit (km/h)	GoS (%)
1	TU	1.500	5	normalvert.	50 : 50	3–80	3
2	1 BU	1.000	10	gleichvert.	50 : 50	3–80	3
	2 TU	5.000	1	normalvert.	30 : 70	3–80	3
3	HT	<i>Länge:</i> 60 km	<i>hier:</i> 20 1/km	gleichvert.	0 : 100	3–150	3
4	HT	10.000	0,3	gleichvert.	5 : 95	3–100	3
5	BU	50	70	gleichvert.	80 : 20	3–50	3
6	TU, BU	1.500	1	gleichvert.	50 : 50	3–80	5
7	RA, HT	10.000	0,1	gleichvert.	5 : 95	3–120	5
8	1 BU	500	2	gleichvert.	80 : 20	3–80	5
	2 BU	2.000	0,5	gleichvert.	30 : 70	3–150	5
9	RA, HT	10.000	0,1	gleichvert.	0 : 100	3–150	5
10	BU	50	50	normalvert.	80 : 20	3–50	5

Tabelle 2.28: Szenarien – Verkehrsaufkommen

Nr.	Sprachaktivität A (mE)	Mittlere Gesprächsdauer $\bar{\beta}_s$ (s)	Mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ (s)	Sprachankunftsrate λ_s (1/h)	Kurzdatennachrichten 100 byte λ_{sd} (1/h)	Mitteldatennachrichten 2 Kbyte λ_{md} (1/h)	Langdatennachrichten 10 Kbyte λ_{ld} (1/h)
1	12,5	30	20	1,5	20	—	0,5
2	12,5	30	20	1,5	20	—	0,5
3	12,5	30	20	1,5	20	—	0,5
4	12,5	30	20	1,5	20	—	0,5
5	12,5	30	20	1,5	20	—	0,5
6	6	30	10	0,72	5	0,5	—
7	6	30	10	0,72	5	0,5	—
8	12	20	4	2,16	10	1	—
9	12	20	4	2,16	10	1	—
10	20	20	4	3,6	20	0,5	—

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

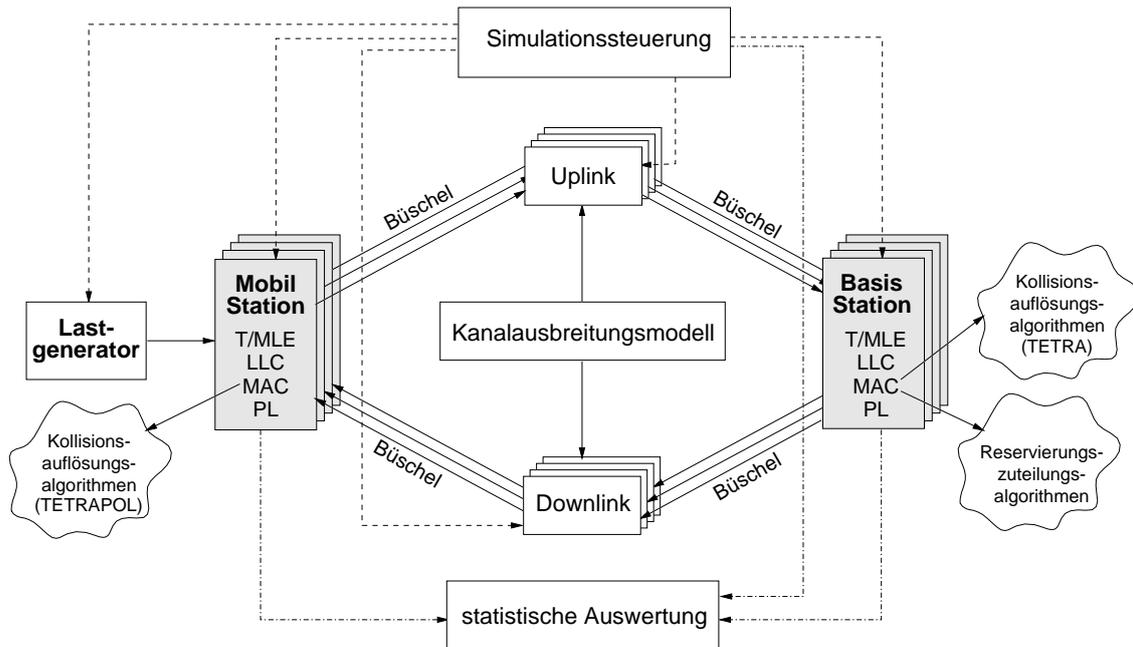


Abbildung 2.36: Der allgemeine Aufbau des TETRA(POL)-Simulators

Simulator gebunden werden können.

Die BSen kommunizieren mit den ihnen zugeordneten MSen auf mehreren Frequenzen, wobei über *UpLink* (UL) und *DownLink* (DL) entsprechende Datenbüschel ausgetauscht werden. Für die Protokollstapel wird die Übertragung durch Kanalausbreitungseigenschaften und Gleichkanalstörungen bei einer Simulation mit mehreren Funkzellen sowie durch Kollisionen beim Zufallszugriff auf dem UL beeinflusst.

Die Simulationssteuerung kontrolliert ereignisgesteuert den Ablauf der Simulation. Sie generiert die unterschiedlichen Verkehrslasten und sorgt für die Kommunikation der einzelnen Blöcke des Simulators untereinander. Eine Verkehrslast ist definiert durch die Ankunftszeitpunkte und die Größe von Dateneinheiten. Die SPEETCL stellt Verkehrslasten für Anwendungen wie Sprache, Video (z. B. *Moving Pictures Expert Group*, MPEG), *World Wide Web* (WWW), *File Transfer Protocol* (FTP), *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) und Kombinationen dieser Anwendungen zur Verfügung.

An jeder Stelle im Simulator können Messpunkte und zu messende Größen definiert werden, die dann statistisch ausgewertet werden können. Die SPEETCL stellt dazu verschiedene Messsonden bereit.

Die Funkschnittstelle beeinflusst die Dienstgüte maßgeblich. Für die Untersuchung des TETRAPOL-Protokollstapels wurden die Protokolle der Luftschnittstelle am sog. Referenzpunkt R3 implementiert, vgl. Abbildung 2.37 auf der nächsten Seite und Abbildung 2.26 auf Seite 82. Der TETRAPOL-Referenzpunkt R3 entspricht dem TETRA-Referenzpunkt U_m , vgl. Abbildung 2.13 auf Seite 61. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die Schichten *Medium Access Control* (MAC), *Logical Link Control* (LLC), *Transport Layer* (T) bzw. *Mobile Link Entity* (MLE) und *Call Control* (CC). Protokolle der Mobilitätsverwaltung (*Mobility Management*, MM) werden nur benötigt, wenn Bewegungen von Mobilstationen über Zellgrenzen hinweg in Betracht gezogen werden.

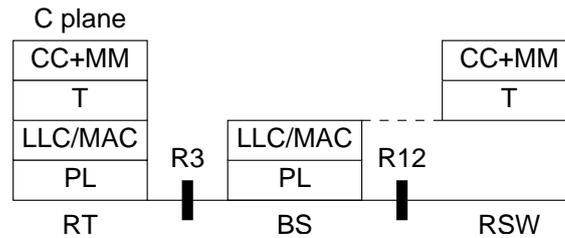


Abbildung 2.37: TETRAPOL-Protokollstapel am Referenzpunkt R3/R4

2.11.3 Beispielhafte Untersuchung für das ETSI-Szenarium 10 (TETRAPOL)

Zunächst wird das ETSI-Szenarium 10 untersucht, welches von der ETSI als spezielles Flughafenszenarium vorgesehen ist und das im Vergleich zu den anderen ein besonders hohes Verkehrsaufkommen aufweist.

TETRAPOL-Basisstationen können bis zu 24 Frequenzpaare verwalten, entsprechend max. 23 Verkehrskanälen. TETRA-Basisstationen unterliegen keiner prinzipiellen Beschränkung. Typischerweise kann eine TETRA-Basisstation bis zu 8 Trägerfrequenzpaare mit 31 Verkehrskanälen verwalten. Für den Vergleich wird ein Spektrum von 300 kHz jeweils für Up- und Downlink inkl. der Steuerkanäle vorgesehen.

Bei der in Szenarium 10 angegebenen Sprachaktivität A von 20 mE pro Teilnehmer, vgl. Tabelle 2.28 auf Seite 101, und 23 verfügbaren Verkehrskanälen zu je 12,5 kHz können die angenommenen 2500 Teilnehmer pro Funkzelle in TETRAPOL mit der geforderten Sprachaktivität nicht bedient werden, so dass die Zellgröße verkleinert und mehrere TETRAPOL-Zellen eingerichtet werden müssen.

Beim betrachteten Szenarium beträgt der insgesamt zu tragende Sprachverkehr:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{N_{MS} \cdot \lambda_s \cdot \bar{\beta}_s}{3600 \text{ s/h}} & (2.46) \\
 &= \frac{2500 \cdot 3,6 \text{ h}^{-1} \cdot 20 \text{ s}}{3600 \text{ s/h}} \\
 &= 50 \text{ E}
 \end{aligned}$$

Für 22 Nutzkanäle ergibt sich laut Erlang-C-Verteilung (vgl. Abschnitt C.2) bei einer Wartewahrscheinlichkeit von 5 % ein tragbarer Verkehr von 14,6 E. Um den angebotenen Verkehr tragen zu können, sind also mindestens 4 TETRAPOL-Zellen notwendig.

Wegen der großen Häufigkeit von Kurzdaten und der daraus resultierenden starken Belastung des RACH werden 4 TETRAPOL-Zellen mit je 2 Steuerkanälen angenommen, so dass weniger als 2 s^{-1} Zugriffe auf den RACH erfolgen.

Da sich die 2500 MS nicht zwangsläufig gleichmäßig auf die 4 Funkzellen verteilen, werden Konfigurationen mit 400 bis 800 Teilnehmern pro Funkzelle untersucht.

Die Gesprächsaktivität Λ ist zum einfacheren Verständnis in *Busy Hour Call Attempts* (BHCA) angegeben, gibt also die Anzahl der Gesprächswünsche in einer Stunde in einer Zelle an. Sie errechnet sich folgendermaßen:

$$\Lambda = N_{MS} \cdot \lambda_s = 2500 \cdot 3,6 \text{ h}^{-1} = 9000 \text{ BHCA} \quad (2.47)$$

60 % des erzeugten Verkehrs sind Gruppengespräche bei einer mittleren Gruppengröße

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

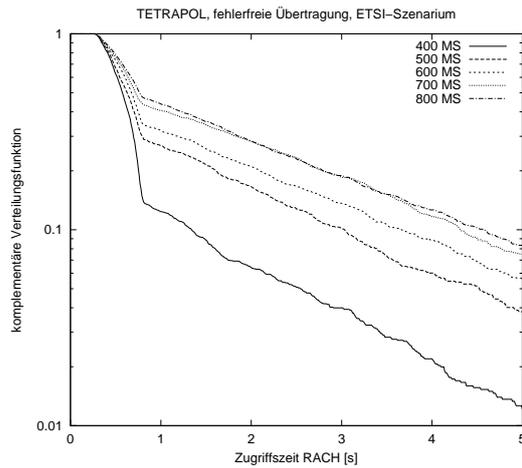


Abbildung 2.38: Zugriffsverzögerung auf den RACH bei TETRAPOL

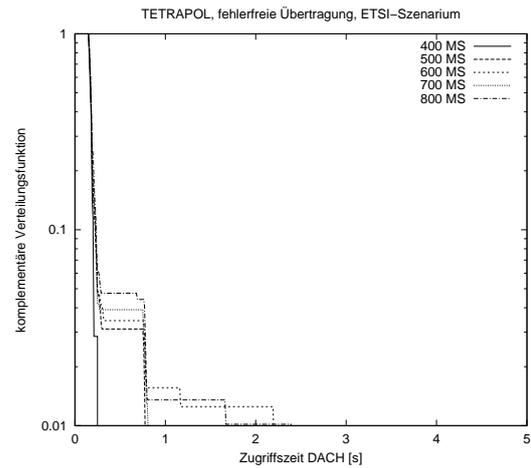


Abbildung 2.39: Zugriffsverzögerung auf den DACH bei TETRAPOL

von 20 Teilnehmern. Somit beträgt der von einer Gruppe erzeugte Sprachverkehr etwa $20 \cdot 20 \text{ mE} \cdot 0,6 = 240 \text{ mE}$.

2.11.3.1 Zugriffsverzögerung auf den RACH

Über den RACH wird vom RT eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit der BS eingerichtet, vgl. Abschnitt 2.8.2.4.1 auf Seite 88. Die Zugriffsverzögerung ist dabei definiert als Zeit zwischen dem Entstehen des Verbindungswunsches im RT und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs. Die Zugriffsverzögerung wird sowohl von der logischen Kanalstruktur als auch vom verwendeten Kollisionsauflösungsalgorithmus bestimmt.

Abbildung 2.38 zeigt die komplementären Verteilungsfunktionen der Zugriffszeit auf den RACH für die untersuchten Konfigurationen bei TETRAPOL. Die komplementären Verteilungsfunktionen beschreiben, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Verzögerung eingehalten werden kann.

Abbildung 2.38 zeigt, dass die großen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden RACH-Rahmen von 0,5 s und der in Abschnitt 2.8.2.4.1 beschriebene Kollisionsauflösungsalgorithmus dazu führen, dass der Zugriff auf den RACH mitunter zu langen Verzögerungszeiten führt.

2.11.3.2 Zugriffsverzögerung auf den DACH

Zur Aktivierung von Gruppengesprächen greift bei TETRAPOL ein sendewilliges RT auf den DACH zu, vgl. Abschnitt 2.8.2.4.1 auf Seite 88. Die Zugriffsverzögerung ist dabei definiert als die Zeit, die zwischen dem Entstehen des Verbindungs- oder Sprechwunsches im RT und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs vergeht.

Abbildung 2.39 zeigt die komplementären Verteilungsfunktionen der Zugriffszeit auf den DACH für die untersuchten Verkehrslasten.

Die geringe Auslastung des DACH und die daraus resultierende geringe Zahl von Kollision beim Zugriff auf den DACH führen zu geringen Verzögerungszeiten. Auch bei 800

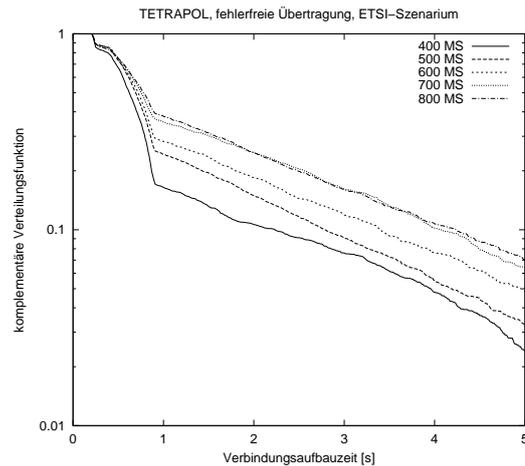


Abbildung 2.40: Verbindungsaufbauzeit

Teilnehmern pro Funkzelle sind die beiden DACH in der Lage, mehr als 98 % aller Anforderungen von Gruppenaktivierungen in weniger als 1 s zu übertragen.

2.11.3.3 Verbindungsaufbauzeit

Die Verbindungsaufbauzeit enthält neben der Zeit für einen erfolgreichen Zugriff noch die Zeit bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals. Sollten alle Frequenzen belegt sein, können hier Wartezeiten von max. 5 s entstehen. Sollte in dieser Zeit keine Zuteilung erfolgen, bricht die MS des wartenden Teilnehmers den Verbindungsaufbau ab. Bei der Messung der Verbindungsaufbauzeit werden sowohl Punkt-zu-Punkt- als auch Gruppengespräche berücksichtigt, wobei Gruppengespräche einen Anteil von 60 % haben.

Aufgrund der hohen Ankunftsrate von Kurzdaten wird die Verbindungsaufbauzeit maßgeblich von den Zugriffszeiten auf den RACH bestimmt. Bei 600 Mobilstationen pro Funkzelle beträgt die Wartewahrscheinlichkeit 2,4 %, bei 700 Teilnehmern pro Zelle wird der Wert von 5 % deutlich überschritten.

Die mittlere Wartezeit liegt bei den untersuchten Konfigurationen jeweils unterhalb von 4 s, so dass die Wartewahrscheinlichkeit der begrenzende Faktor für die Anzahl tragbarer Mobilstationen ist.

2.11.4 Beispielhafte Untersuchung für ein BOS-Szenarium (TETRAPOL)

Für die simulativen Untersuchungen im Rahmen dieser Studie wurde nicht nur das ETSI-Szenarium Nr. 10 gewählt, sondern auch ein spezielles BOS-Szenarium. Im Vergleich zum Szenarium 10 berücksichtigt das BOS-Szenarium nur Sprachkommunikation, wobei die Gesprächsaktivität variiert wird.

Für eine begleitende Untersuchung des Feldversuchs bietet es sich dann an, die empirisch gewonnenen Verkehrslasten des analogen Funknetzes für den Raum Aachen und im Laufe des Piloten gemachte Erfahrungen zu verwenden.

Die Gleichkanalstörungen wirken sich vornehmlich bei Datenübertragungen aus, so dass in dieser beispielhaften Untersuchung nur eine Funkzelle betrachtet werden muss. Auch bei

diesem Vergleich wird ein Spektrum von 300 kHz jeweils für Up- und Downlink inkl. der Steuerkanäle vorgesehen.

60 % des erzeugten Verkehrs sind Gruppengespräche, die mittlere Gruppengröße beträgt 20 MS.

Für 23 Nutzkanäle und eine Wartewahrscheinlichkeit von $p_B \leq 5\%$ ergibt sich laut Erlang-C-Verteilung ein maximal tragbarer Verkehr von 15,4 E. Bei einer mittleren Gesprächsdauer von 20 s ergibt sich eine tragbare Gesprächsaktivität von 2772 BHCA.

Die zur Einrichtung einer Sprachverbindung notwendigen Zugriffe auf den RACH bzw. DACH bestimmen maßgeblich die Verbindungsaufbauzeiten in einem TETRAPOL-System. Die Verzögerungszeiten für diese Zugriffsverfahren werden in den Abschnitten 2.11.4.1 und 2.11.4.2 betrachtet. Die Verbindungsaufbauzeiten werden in Abschnitt 2.11.4.3 ausgewertet.

2.11.4.1 Zugriffsverzögerung auf den RACH

Über den RACH wird vom RT eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit der BS eingerichtet, vgl. Abschnitt 2.8.2.4.1 auf Seite 88. Die Zugriffsverzögerung ist dabei definiert als Zeit zwischen dem Entstehen des Verbindungswunsches im RT (dem Erzeugen eines Datenpakets) und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs. Die Zugriffszeit schließt also die Wartezeit bis zur Zuweisung von Übertragungskapazität nicht mit ein. Die Zugriffsverzögerung wird durch die logische Kanalstruktur und den Kollisionsauflösungsalgorithmus maßgeblich bestimmt.

Abbildung 2.41 auf der nächsten Seite zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Zugriffszeit auf den RACH für die untersuchten Verkehrslasten. Zu erkennen ist ein Anstieg der Kollisionshäufigkeit mit zunehmender Sprachaktivität. Kollisionen führen zu zusätzlichen Wartezeiten und zu Zugriffswiederholungen. Auch bei einer Sprachaktivität von mehr als 2700 BHCA ist die Kollisionswahrscheinlichkeit beim Erstzugriff kleiner als 8 %, so dass der RACH nur schwach ausgelastet ist.

2.11.4.2 Zugriffsverzögerung auf den DACH

Bei Gruppengesprächen greift ein sendewilliges RT auf den DACH zu, siehe Abschnitt 2.8.2.4.1 auf Seite 88. Die Zugriffsverzögerung ist dabei definiert als die Zeit, die zwischen dem Entstehen des Verbindungs- oder Sprechwunsches im RT und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs vergeht. Auch beim Zugriff auf den DACH ist in der Zugriffszeit die Wartezeit bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals nicht mit eingeschlossen.

Abbildung 2.42 auf der nächsten Seite zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Zugriffszeit auf den DACH für die untersuchten Verkehrslasten.

Deutlich zu erkennen sind ausgeprägte Stufen mit einer Breite von ca. 400 ms, die die Wartezeit nach einem erfolglosen Zugriff beschreiben. Die minimale Zugriffszeit beträgt 160 ms entsprechend acht Rahmen.

Auch bei einer Sprachaktivität von mehr als 2700 BHCA wird ein erfolgreicher Zugriff auf den DACH aufgrund der schwachen Auslastung des DACH und der dadurch geringen Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb von 1 s durchgeführt.

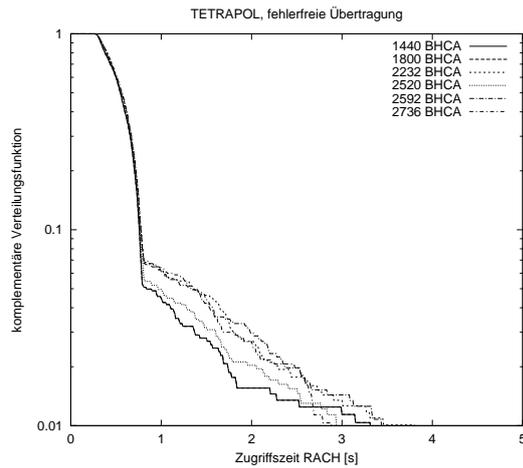


Abbildung 2.41: Zugriffsverzögerung auf den RACH

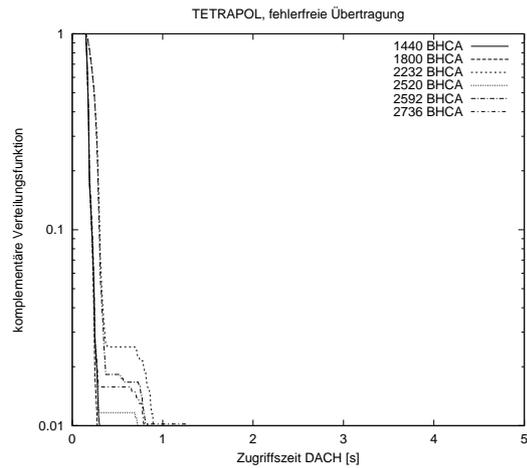


Abbildung 2.42: Zugriffsverzögerung auf den DACH

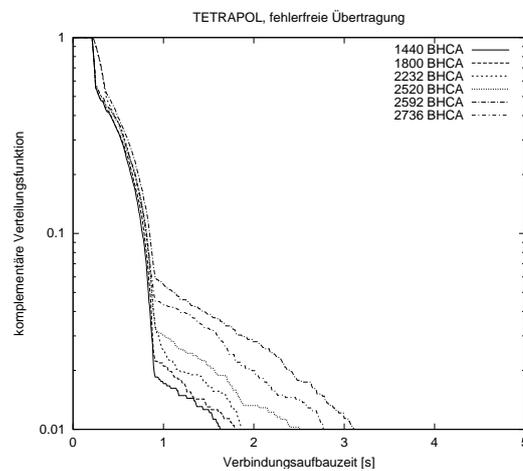


Abbildung 2.43: Verbindungsaufbauzeit

2.11.4.3 Verbindungsaufbauzeit

Die Wartezeit bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals oder von Übertragungskapazität auf dem Signalisierkanal ist neben der Zugriffszeit auf den RACH bzw. DACH ein weiterer wichtiger Bestandteil der Verbindungsaufbauzeit. Die Wartewahrscheinlichkeit p_B soll kleiner oder gleich 5% sein.

Abbildung 2.43 zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Verbindungsaufbauzeit für unterschiedliche Verkehrslasten.

Da in dem betrachteten TETRAPOL-System die Wartezeit auf 5s begrenzt wird und Verbindungswünsche bei Überschreitung dieser Grenze abgebrochen werden, stellt sich mit zunehmendem Verkehrsangebot ein Sättigungsverhalten ein, bei dem die Verluste ansteigen. Der GoS von 5% wird bei einer Sprachaktivität von 2736 BHCA überschritten.

Die Wartewahrscheinlichkeit von $p_B = 5\%$ wird bereits bei einer Sprachaktivität von ca. 2500 BHCA überschritten, da ein für eine Gruppenkommunikation reservierter Kanal

für die sog. *hang time* nach Ende eines Gruppengesprächs reserviert bleibt. Die *hang time* gibt an, wie lange ein für eine Gruppenkommunikation reservierter Kanal über das Ende einer Gruppenkommunikation hinaus belegt bleibt. Sie dient dazu, die Verzögerungszeiten bei der Aktivierung eines Gruppengesprächs zu reduzieren.

Die mittlere Wartezeit $\bar{\tau}_w$ von 4 s wird auch bei mehr als 2700 BHCA eingehalten. Bei einer Sprachaktivität pro Teilnehmer von $\bar{\beta}_s = 3,6h^{-1}$ ergibt sich insgesamt eine tragbare Anzahl von ungefähr 690 Mobilstationen pro Funkzelle.

2.11.5 Beispielhafte Untersuchung für das ETSI-Szenarium 10 (TETRA)

Um einen Vergleich mit einer ein Spektrum von 300 kHz verbrauchenden TETRAPOL-Zelle mit 23 Nutzkanälen zu ermöglichen, sind bei einer TETRA-Zelle 6 Trägerfrequenzen mit je 25 kHz Kanalbandbreite und zusammen 23 Nutzkanälen verwendet worden, so dass für eine TETRA-Zelle nur der halbe Spektrumsbedarf von 150 kHz angesetzt wurde.

2.11.5.1 Zugriffsverzögerung auf den RACH

In Abbildung 2.44 auf der nächsten Seite wird die komplementäre Verteilungsfunktionen der Zugriffszeit auf den RACH im Falle von TETRA untersucht. Bei TETRA wird der RACH verwendet, um sowohl Punkt-zu-Punkt-Verbindungen als auch Gruppengespräche zu aktivieren.

Die Zugriffsverzögerung ist hier analog zur TETRAPOL-Messung definiert als Zeit zwischen dem Entstehen des Verbindungswunsches in der Mobilstation und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs. Die Zugriffsverzögerung wird sowohl von der logischen Kanalstruktur als auch vom verwendeten Kollisionsauflösungsalgorithmus bestimmt.

2.11.5.2 Verbindungsaufbauzeit

Die Verbindungsaufbauzeit enthält neben der Zeit für einen erfolgreichen Zugriff noch die Zeit bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals. Sollten alle Frequenzen belegt sein, können hier Wartezeiten von max. 10 s entstehen. Sollte in dieser Zeit keine Zuteilung erfolgen, bricht die MS des wartenden Teilnehmers den Verbindungsaufbau ab. Bei der Messung der Verbindungsaufbauzeit werden sowohl Punkt-zu-Punkt- als auch Gruppengespräche berücksichtigt, wobei Gruppengespräche einen Anteil von 60 % haben.

Aufgrund der hohen Ankunftsrate von Kurzdaten wird die Verbindungsaufbauzeit maßgeblich von den Zugriffszeiten auf den RACH bestimmt. Bei 400 Mobilstation beträgt der GoS 0,25 %, bei 500 Teilnehmern 0,37 %.

2.11.6 Beispielhafte Untersuchung für ein BOS-Szenarium (TETRA)

Analog zu Abschnitt 2.11.4 wurde auch für eine TETRA-Zelle ein BOS-Szenarium simuliert, das nur Sprachkommunikation unter Variation der Gesprächsaktivität berücksichtigt.

Auch bei diesem Vergleich ist ein Spektrum von 150 kHz jeweils für Up- und Downlink inkl. der Steuerkanäle vorgesehen, d. h. es wird die Hälfte des bei TETRAPOL verwendeten Spektrums benötigt.

60 % des erzeugten Verkehrs sind Gruppengespräche, die mittlere Gruppengröße beträgt 20 MS.

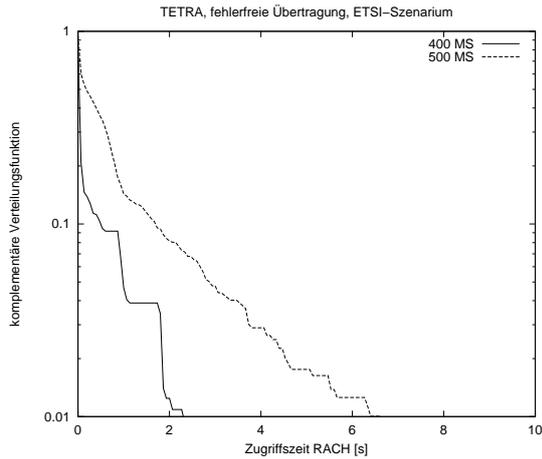


Abbildung 2.44: Zugriffsverzögerung auf den RACH bei TETRA

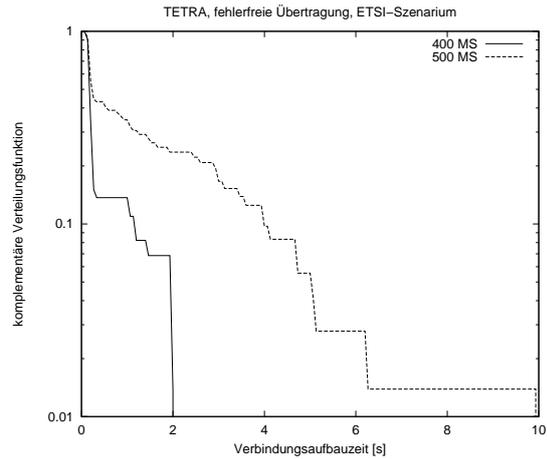


Abbildung 2.45: Verbindungsaufbauzeit bei TETRA

Für 23 Nutzkanäle und eine Wartewahrscheinlichkeit von $p_B \leq 5\%$ ergibt sich laut Erlang-C-Verteilung ein maximal tragbarer Verkehr von 15,4E. Bei einer mittleren Gesprächsdauer von 20s ergibt sich eine tragbare Gesprächsaktivität von 2772 BHCA.

Die zur Einrichtung einer Sprachverbindung notwendigen Zugriffe auf den RACH bestimmen maßgeblich die Verbindungsaufbauzeiten in einem TETRA-System. Die Verzögerungszeiten für diese Zugriffsverfahren wird im Abschnitt 2.11.6.1 betrachtet. Die Verbindungsaufbauzeiten werden in Abschnitt 2.11.6.2 ausgewertet.

2.11.6.1 Zugriffsverzögerung auf den RACH

Über den RACH wird von der MS eine Punkt-zu-Punkt oder eine Gruppenverbindung eingerichtet, vgl. Abschnitt 2.8.1.4.1 auf Seite 78. Die Zugriffsverzögerung ist dabei definiert als Zeit zwischen dem Entstehen des Verbindungswunsches in der MS (dem Erzeugen eines Datenpakets) und der Quittierung des erfolgreichen Zugriffs. Die Zugriffszeit schließt also die Wartezeit bis zur Zuweisung von Übertragungskapazität nicht mit ein. Die Zugriffsverzögerung wird durch die logische Kanalstruktur und den Kollisionsauflösungsalgorithmus maßgeblich bestimmt.

Abbildung 2.46 auf der nächsten Seite zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Zugriffszeit auf den RACH für die untersuchten Verkehrslasten. Zu erkennen ist ein Anstieg der Kollisionshäufigkeit mit zunehmender Sprachaktivität. Kollisionen führen zu zusätzlichen Wartezeiten und zu Zugriffswiederholungen. Auch bei einer Sprachaktivität von mehr als 2700 BHCA ist die Kollisionswahrscheinlichkeit beim Erstzugriff kleiner als 1%, so dass der RACH nur schwach ausgelastet ist.

2.11.6.2 Verbindungsaufbauzeit

Die Wartezeit bis zur Zuweisung eines Verkehrskanals oder von Übertragungskapazität auf dem Signalisierkanal ist neben der Zugriffszeit auf den RACH ein weiterer wichtiger Bestandteil der Verbindungsaufbauzeit.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

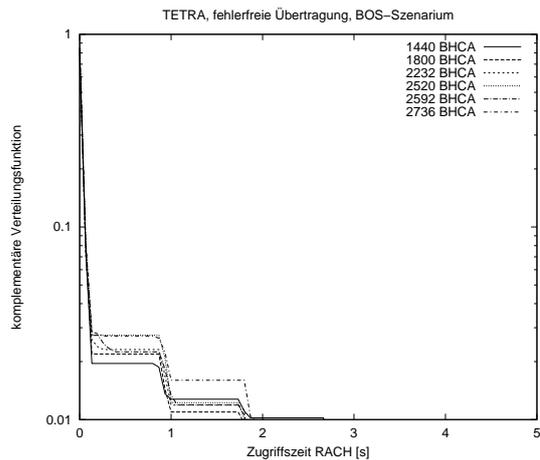


Abbildung 2.46: Zugriffsverzögerung auf den RACH bei TETRA

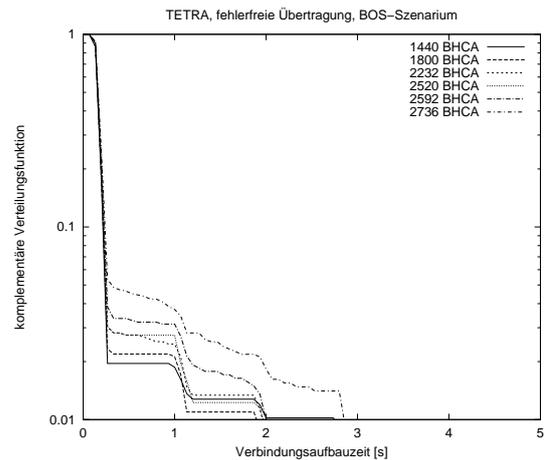


Abbildung 2.47: Verbindungsaufbauzeit bei TETRA

Abbildung 2.47 zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Verbindungsaufbauzeit für unterschiedliche Verkehrslasten.

Da in dem betrachteten TETRA-System die Wartezeit auf 10s begrenzt wird und Verbindungswünsche bei Überschreitung dieser Grenze abgebrochen werden, stellt sich mit zunehmendem Verkehrsangebot ein Sättigungsverhalten ein, bei dem die Verluste ansteigen. Der GoS liegt jedoch stets unter 5%. 800 Mobilstationen pro Funkzelle können problemlos getragen werden.

2.11.7 Zusammenfassung des simulativen Vergleichs

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei TETRA mit der Hälfte des bei TETRAPOL benötigten Spektrums mehr Verkehr getragen werden kann. Zugriffsverzögerungen und Verbindungsaufbauzeiten fallen bei TETRA generell kleiner aus. Besonders große zeitliche Vorteile von TETRA sind dann vorhanden, wenn das zu untersuchende System mit einem gemischten Dienstangebot bestehend aus Aufträgen zur Sprach- und Datenübertragung beaufschlagt wird.

2.11.8 Erweiterungsmöglichkeiten in Bezug auf den Pilotversuch Aachen

Für ein stadtweites Netz von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben wird in [ETS97] das Szenarium 8 vorgeschlagen. Verkehrsmessungen vor und während des Feldversuches im Raum Aachen sollten jedoch zunächst die in den Szenarien beschriebenen Parameter verifizieren bevor vergleichende Aussagen zwischen TETRA und TETRAPOL auf der Basis von Simulationen gemacht werden, um die Relevanz der Aussagen für die Anforderungen der BOS sicherzustellen.

Weiterhin sollten die entwickelten Simulatoren durch Messwerte validiert werden, die im Feldversuch bei der Untersuchung bestimmter Szenarien ermittelt werden. Dann ist es auch möglich, Szenarien zu untersuchen, die im Feldversuch nicht nachgestellt werden können.

Die Modellierung von Gruppenkommunikation, wie sie typisch für den Sprechfunkverkehr bei den BOS ist, kann durch die Auswertung von Verkehrsmessungen verbessert werden und so zu genaueren Aussagen über den zu erwartenden Bündelungsgewinn bzw. Spektrumsbedarf führen.

Durch die Erweiterung der Simulatoren um Mobilitätsmodelle, die die Mobilität von BOS-Nutzern beschreiben, und um Handoverfunktionen werden Aussagen über den Bündelungsgewinn und damit über den Spektrumsbedarf bei großen Gruppen bzw. bei Gruppen mit großen Aktionsradius möglich. Eine Bewertung der Handover-Zeiten und ggf. der Unterbrechungsdauern eines Gesprächs während eines Zellwechsels ist dann ebenfalls möglich.

2 Vergleich der Leistungsmerkmale von TETRA und TETRAPOL

3 Analyse der betrieblich-taktischen Forderungen der BOS und Abdeckung durch die Standards TETRA und TETRAPOL

Alle nachfolgend gemachten Aussagen beziehen sich auf Ergebnisse des Vergleichs der betrieblich-taktischen Forderungen mit Festlegungen für die Verfügbarkeit und evtl. Implementierung in den Standards. Hier werden schwerpunktmäßig die *muss*-Forderungen betrachtet. Für die *soll*-Forderungen werden kurz zusammengefasste Aussagen gemacht. Für den Bereich Funkruf ist ein eigener Abschnitt vorhanden.

3.1 Analyse der muss- und soll-Forderungen

Die hier betrachteten betrieblich-taktischen Forderungen sind in den Dokumenten:

- *Schengen – Digitales Funk-Kommunikationssystem für Sicherheitsbehörden (BOS) (8. Juni 1995)* und
- *Schengen – Definition der Anforderungen an das künftige Funksystem der Polizei-/Zolldienste (12. Juni 1992)*

beschrieben. Die zusätzlichen deutschen Forderungen sind im Dokument *Ausschreibung für Planung, Lieferung, Installation und Betrieb eines Digitalen Sprech- und Datenfunknetzes und der entsprechenden Endgeräte auf der Basis eines europäischen Standards oder einer gleichwertigen Vereinbarung für ein Pilotprojekt der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in der Stadt und im Landkreis Aachen – 20.5.99* definiert.

Der Vergleich dieser Dokumente ergibt, dass weitere zwölf Forderungen für deutsche BOS unbedingt zu erfüllen sind, die in den Schengen-Dokumenten nur als wünschenswert (*soll*) bezeichnet sind. Diese zusätzlichen deutschen Forderungen sind im einzelnen:

1. Verschlüsselung der Signalisierungsdaten
2. Unverschlüsselter Betrieb
3. 32 Kurzmeldungen
4. Funkruf (*Paging*)
5. Begrenztes geographisches Versorgungsgebiet
6. 50 Kommunikationskanäle für Direktverkehr
7. Direktverkehr auch im Bereich einer Basisstation
8. Verschlüsselte Funkübertragung bei Direktverkehr
9. Warnton beim Empfang eines unverschlüsselten Signals
10. Signalisierter Empfang eines nicht entschlüsselbaren Signals

3 Analyse der betrieblich-taktischen Forderungen

11. Auswahl zwischen unverschlüsseltem und verschlüsseltem Betrieb
12. Ferngesteuertes Löschen der Informationen im Gerät

Sowohl die deutschen als auch die europäischen BOS-Forderungen und der Grad ihrer Erfüllung durch die Standards TETRA und TETRAPOL sind detailliert in den Anhängen **D** bis **G** beschrieben.

3.1.1 Funknetz-technische Forderungen

Wie erwähnt können die betrieblich-taktischen Forderungen in drei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe beinhaltet *funknetz-technische Forderungen*, die bestimmte Eigenschaften der Funkschnittstelle bzw. -übertragungstechnik voraussetzen. Dieser Gruppe können folgende europäische und deutsche BOS-Forderungen, die als *muss*-Forderungen bezeichnet worden sind, zugeordnet werden:

1. Verschlüsselung
2. Verschlüsselung der Signalisierungsdaten
3. Unverschlüsselter Betrieb
4. Verschlüsselte Funkübertragung bei Direktverkehr
5. Verwaltung der Betriebsmittel
6. Laufzeit des Signals von Teilnehmer zu Teilnehmer
7. Erteilung der Sendeerlaubnis innerhalb einer Verkehrsbeziehung
8. Endgeräte-Adresse
9. Teilnehmerzahl in einer Gruppenverbindung
10. Unverschlüsseltes Signal bei Direktverkehr
11. Direktverkehr bei Sondereinsätzen (autonomer Verkehr, Relaisstelle, Netzübergang und Dual-Watch Modus)
12. Zeitverhalten beim Notruf

Beide Standards, TETRA und TETRAPOL, decken alle Forderungen dieser Gruppe – bis auf Punkt 6 – ab. Diese Forderung wird in beiden Standards nicht eingehalten. Es wird eine Laufzeit kleiner als 150 ms gefordert. Im ungünstigsten Fall liegt diese Verzögerung bei TETRA-Systemen zwischen 165–345 ms und bei TETRAPOL-Systemen über 200 ms (mit kleiner Streuung).

Beim TETRAPOL-Standard fehlt die Verschlüsselung der Signalisierungsdaten (Punkt 2). Das ist im Vergleich zu TETRA, wo diese Verschlüsselung vorhanden ist, ein erheblicher Mangel. Die Forderungen 9, 10 und 12 bei TETRA und 9 und 12 bei TETRAPOL sind in den Standards nicht explizit erwähnt und beschrieben. Die Analyse der entsprechenden Funktionen in den Standards zeigt, dass die Erfüllung dieser Forderungen mit großer Wahrscheinlichkeit erwartet werden kann, da alle notwendigen Mechanismen zur Verfügung stehen.

Zur Erteilung der Sendeerlaubnis innerhalb einer Verkehrsbeziehung (Punkt 7) ist anzumerken, dass beide Standards diese Forderung erfüllen. Jedoch wird sowohl in TETRA als auch in TETRAPOL nicht beschrieben, wie bei einer Kollision des Zugriffs eines sprechwilligen Teilnehmers zu verfahren ist. Hier ist also mit herstellerspezifischen Lösungen zu rechnen.

Für alle anderen Forderungen sind in den Anhängen **D** bis **G** Zitate aus den Standards zu finden, die klar nachweisen, dass die jeweilige Forderung eingehalten wird.

3.1.2 BOS-Dienste

Die zweite Gruppe der betrieblich-taktischen Forderungen beinhaltet die *BOS-Dienste*, die die im Funknetz bzw. zugehörigen Vermittlungsnetz verfügbaren Information bzw. Funktionen verknüpfen, wobei Nachrichtentransport und -verarbeitung netzgestützt kombiniert werden. Folgende betrieblich-taktischen Forderungen gehören zu dieser Gruppe:

1. Sprachkommunikation
2. Datenkommunikation
3. Ausschluss eines Funkgerätes
4. Teilnehmerberechtigungen zum Aufbau von Verbindungen
5. Vorrangstufen zum Aufbau von Verbindungen
6. Anmeldung
7. Abmeldung
8. Annahme einer weiteren Verkehrsbeziehung
9. ID des Anrufers
10. Gruppenzuordnung
11. Einzelverbindungen
12. Notruf
13. Kurzmeldungen
14. Funkruf
15. Begrenztes geographisches Versorgungsgebiet
16. Ferngesteuertes Löschen der Informationen im Gerät

Es gilt auch hier, dass beide Standards eine gute Basis für die aufgezählten Forderungen bieten. Die detaillierte Analyse zeigt, dass es zwei erwähnenswerte Punkte gibt: Funkruf und Datenkommunikation. Der TETRA-Standard sieht Funkruf als angepassten Kurznachrichtendienst, vgl. Abschnitt 3.2 auf Seite 117 betrachtet. Die Grundforderung, eine Datenübertragung von mindestens 4.8 kbit/s (niedrige Fehlerkorrektur) zu ermöglichen, ist beim TETRA-Standard vollständig erfüllt und bei TETRAPOL mit 4,6 kbit/s knapp

erfüllt. Andererseits ist sowohl bei TETRAPOL als auch bei TETRA eine Nutzbitrate von 7,2 kbit/s (ohne Fehlerkorrektur) bei der wechselseitigen Datenübertragung möglich. Bei TETRAPOL ist diese Möglichkeit im Standard nicht beschrieben aber es lässt sich aus der Beschreibung der Datenübertragung ermitteln. Die erwähnte Nutzbitrate von 7,2 kbit/s (ohne Fehlerkorrektur) wird bei TETRAPOL von der Firma AMC angeboten.

Weitere Unterschiede sind bei der Forderung *Notruf* festzustellen. Im TETRA-Standard basiert Notruf auf vordefinierten Kurznachrichten und Vorrangstufen. Werden beide Dienste gleichzeitig genutzt, so kann durch zusätzlichen Programmieraufwand die gewünschte Funktion *Notruf* bereitgestellt werden. Diese Lösung ist weniger elegant als die Lösung, die im TETRAPOL-Standard angeboten wird. Im TETRAPOL-Standard ist *Notruf* schon als standardisierter Dienst *Emergency Call* spezifiziert. Kleinere Unklarheiten bleiben bei beiden Standards bezüglich der Zeit, die nötig ist, um einen Kommunikationskanal für einen *Notruf* zur Verfügung zu stellen. Diese Zeit darf zwei Sekunden nicht überschreiten. Alle anderen Informationen über die Zeiten in den Standards weisen darauf hin, dass diese Forderung erfüllbar ist.

Die Forderung *Ferngesteuertes Löschen der Informationen im Gerät* (Punkt 16) ist in beiden Standards ebenfalls nicht gleich behandelt. TETRAPOL stellt diesen Dienst komplett zur Verfügung. Der TETRA-Standard sieht diese Forderung wohl als eine Anwendung (geht nicht darauf ein), die durch Anwendungsprogrammierung zu implementieren ist, da die schon spezifizierten Nachrichten eine nötige Basis dafür bereitstellen.

Alle anderen betrieblich-taktischen Forderungen aus dieser Gruppe sind ganz klar in den Standards TETRA und TETRAPOL vorgesehen und beschrieben. Ausführliche Kommentare und Zitate aus den Standards sind zu jeder Forderung dieser Gruppe auch in den Anhängen D bis G zu finden.

3.1.3 BOS-Anwendungen

Die dritte Gruppe umfasst die *BOS-Anwendungen*, die durch geeignete Programmierung von Prozessoren im Vermittlungsnetz oder in Endgeräten realisiert werden und nicht Teil der Standards TETRA bzw. TETRAPOL sind. Hierzu gehören folgende betrieblich-taktische Forderungen, die in den Schengen-Dokumenten verlangt sind:

1. Erreichbarkeit eines Funkgeräts
2. Direktverkehr als Rückfallebene
3. Notruffälle
4. Konfigurationsmanagement
5. Störungsmanagement
6. Leistungsmanagement
7. Sicherheitsmanagement
8. Warnton beim Empfang eines unverschlüsselten Signals
9. Warnung beim Empfang eines nicht entschlüsselbaren Signals

Alle diese Forderungen können durch geeignete Anwendungsprogrammierung bereitgestellt werden. Sowohl TETRA als auch TETRAPOL bieten hierzu die notwendige Basis. Das bedeutet, dass alle notwendigen Nachrichten und Informationen zur Verfügung stehen. Es ist nicht zu erwarten, dass die aufgeführten Anwendungen in den Standards TETRA und TETRAPOL spezifiziert sind. In beiden Standards ist die BOS-Anwendung *Erreichbarkeit eines Funkgerätes* beschrieben und spezifiziert. TETRAPOL beschreibt auch alle drei Notruffälle.

3.1.4 Administrative Regeln und mechanische Eigenschaften der Geräte

Die letzte Gruppe beinhaltet die Forderungen, welche administrative Regeln oder gewisse mechanische Eigenschaften der verwendeten Geräte verlangen, die nicht Teil der Standards sind. Zu dieser Gruppe gehören:

1. Betriebsdauer mit einer Akku-Ladung
2. Bereitstellung besonderer Kommunikationskanäle für den Direktverkehr

Die Kapazität einer Akku-Ladung hängt von Akku-Typ und -größe ab. Diese Frage gehört zu den mechanisch-technischen Fragen, die von den Herstellern zu lösen sind und nicht in den Standards spezifiziert sind.

Die Bereitstellung besonderer Kommunikationskanäle für den Direktverkehr hängt vom zugewiesenen Spektrum für TETRA oder TETRAPOL System ab. Um besondere Kanäle verfügbar zu haben, muss ein separater Teil des Spektrums für den Direktverkehr vorgesehen werden. Beide Standards gehen davon aus, dass dieses Spektrum zur Verfügung steht.

3.2 Funkruf und die Standards TETRA und TETRAPOL

Die jeweiligen Standardisierungsgruppen haben sich mit diesem Dienst befasst und Lösungen zu seiner Integration vorgeschlagen.

Da Funkrufempfänger anders als handportable Terminals getragen werden und deshalb ein besonders großes Linkbudget des Funknetzes vorgesehen werden muss, um eine zufriedenstellende Erreichbarkeit der Funkrufempfänger zu erreichen, führt die Forderung nach einem detailliert spezifizierten Funkrufdienst innerhalb desselben Systems zu erhöhten Infrastrukturkosten, wenn bestehende Datendienste der Standards unverändert dafür übernommen werden.

Die TETRA-Systemanbieter setzen, soweit sie einen Funkrufdienst anbieten, den Kurznachrichtendienst (*Short-Message Service*) in modifizierter Form für den Funkruf ein, wobei Modulation und Codierung unverändert bleiben und deshalb die Versorgungsgüte von Funkrufempfängern der von handportablen Terminals entspricht. In TETRAPOL sind *Paging* und *Lokale Rundsendedienste* als Datendienste vorgesehen. Diese zwei Dienste sind als Funkrufdienst zu verstehen. Das Linkbudget auf der Abwärtsstrecke ist bei TETRAPOL um knapp 6 dB höher als bei TETRA und erlaubt eine deutlich bessere Versorgung von Funkrufempfängern im Vergleich mit Handfunkgeräten. Durch Realisierung spezieller Funkrufempfänger für nur bestimmte Funkruffrequenzen und erhöhte Kanalcodierung soll laut Aussagen des TETRAPOL-Forum eine erhebliche Verbesserung des Linkbudgets auf der Abwärtsstrecke realisiert werden, die eine Integration des Funkrufdienstes in TETRAPOL

3 Analyse der betrieblich-taktischen Forderungen

als besonders zweckmäßig erscheinen lassen. Die Entwicklung spezieller Funkrufempfänger ist kostenträchtig, aber nötig.

Es gilt als gesichert, dass ein intern realisierter Funkrufdienst (auch ohne Entwicklung spezieller Empfänger) in TETRAPOL zu besseren Versorgungsergebnissen führen wird als bei TETRA.

Funkrufdienste haben sehr spezielle Anforderungen, die möglicherweise kostengünstiger durch dedizierte (analog übertragende) Systeme abgedeckt werden können.

4 Entwicklungspotentiale der Standards TETRA und TETRAPOL

Mit zunehmendem Aufbau von TETRA- bzw. TETRAPOL-Netzen steigen die Stückzahlen der produzierten mobilen Endgeräte. Dies ermöglicht bei entsprechendem Bedarf die Entwicklung von Dualmode-Funkgeräten, vergleichbar mit den derzeit verfügbaren Endgeräten für verschiedene GSM-Netze. Solche Dualmode-Funkgeräte können sowohl in TETRA- als auch in TETRAPOL-Netzen betrieben werden.

4.1 TETRA

4.1.1 TETRA Release 2

Die ETSI hat Erweiterungen des TETRA-Standards zugestimmt, um TETRA im Umfeld der neuen Telekommunikationsnetze der 3. Generation konkurrenzfähig zu erhalten. Folgende Erweiterungen und Merkmale sind geplant:

- höherrangige Paketdatendienste zur Unterstützung von Multimedia und Datenapplikationen mit hohem Bandbreitebedarf;
- Auswahl und Standardisierung eines (oder mehrerer) zusätzlicher Sprach-Codecs, um den einfachen Übergang zwischen TETRA-Netzen und anderen Netzen der dritten Generation ohne Transcoding zu ermöglichen und eine optimale Sprachqualität unter Verwendung modernster Codec-Technologie zu erreichen;
- weitere Verbesserungen der Luftschnittstelle, um die spektrale Effizienz, die Kapazität des Netzes, die Dienst- und Endgerätequalität (Lebensdauer der Batterie, Größe und Kosten) zu erhöhen;
- Erstellung oder Anpassung von Standards mit dem Ziel, ein verbessertes *Interworking* und *Roaming* von TETRA mit anderen Mobilfunknetzen wie GSM, *General Packet Radio Service* (GPRS), *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) und anderen auf IP basierenden Netzen der 3. Generation zu erreichen;
- Weiterentwicklung der TETRA-SIM-Karte hin zur *Universal SIM* (USIM) von UMTS, um TETRA-spezifische Dienste anbieten zu können bei gleichzeitiger Unterstützung einer Zusammenarbeit mit den öffentlichen Mobilfunknetzen wie GSM, GPRS und UMTS;
- Erweiterung der Reichweite von TETRA auf ca. 120–200 km, um das Nutzungsspektrum hin zu Anwendern von luft- und wassergestützten Einheiten, dünn besiedelter Gebiete, Pipelineüberwachung und Bahnfunk auszudehnen.
- Erstellung neuer ETSI-Deliverables zur Unterstützung von nutzer- und marktinduzierten Anforderungen;

- volle Abwärtskompatibilität und Integration der neuen Dienste in die bestehenden Standards, um Sicherheit für bestehende und zukünftige Investitionen von TETRA-Nutzern zu gewährleisten.

4.1.2 DAWS

Die Arbeitsgruppe 4 (*Working Group*, WG) des TETRA-Projektes hat sich bisher mit *Packet Data Optimized* (PDO) beschäftigt, seit einem Jahr besteht die Hauptaufgabe der WG4 aus der Entwicklung des zukünftigen DAWS-Standards (*Digital Advanced Wireless Service*, DAWS).

Der DAWS-Standard soll als Nachfolge-Standard von TETRA paketorientierte Informationsübertragung in Anlehnung an PDO in hochmobilen Umgebungen (bis zu *aeronautical speed*) bei ca. 5 GHz ermöglichen. Die Zielanwendergruppen von DAWS sind ausschließlich die BOS.

DAWS ist das mobile Pendant zu BRAN/HIPERLAN. Zur Zeit ist DAWS noch in der WG4 angesiedelt. DAWS soll aber ein eigenständiges ETSI-Projekt werden.

Hauptziele von DAWS sind:

- CyberCop-Applications
 - CopWeb-Endgeräte mit sicherer Internet-Telefonie,
 - Vollduplex-Video,
 - Iris-Abtastung,
 - Überwachung von Gebäuden und Plätzen mit intelligenten Kameras (d.h. verdächtige Personen werden von den Kameras automatisch gemeldet).
- Militärische Anwendungen (NATO)
 - Friedensunterstützende Maßnahmen: Luftraumüberwachung, Landminenbeseitigung, Logistik,
 - Schlachtfeld-Kommunikation über ein DAWS-Ad-Hoc-Netz.
- Drahtlose Telemedizin
- Katastrophenmanagement
- Mobile Roboter: Inspektion von nicht-zugänglichem Gelände (Verseuchung, Minen, einsturzgefährdete Gebäude) durch mobile Roboter.

DAWS wird auch als terrestrische Komponente von Breitbandsatellitenkommunikation gesehen.

Nach Information des *European Radiocommunications Committee* (ERC) der *Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications* (CEPT) steht der *Detailed Spectrum Investigation* (DSI) III Bereich (862 MHz bis 3,4 GHz) für den Betrieb von DAWS potenziell zur Verfügung.

4.1.2.1 LLC, MAC und PHY von DAWS

Es ist zwar geplant, Ende 2000 bereits Endgeräte auf den Markt zu bringen, eine genaue Spezifizierung der Luftschnittstelle liegt aber noch nicht vor.

Man will den Fehler einer Überspezifizierung wie bei TETRA vermeiden. Die LLC-Teilschicht soll hauptsächlich eine Anpassungsschicht zwischen der Netzschicht und der MAC-Teilschicht sein.

4.1.3 TIPHO

Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON) ist ein ETSI-Projekt mit dem Ziel, Interoperabilität von IP-basierten Telefonie-Systemen mit kanalvermittelten Netzen herzustellen. Dienstgüteanforderungen für Sprachverbindungen in IP-Netzen sollen realisiert werden, ebenso eine einheitliche Adressierung und neue Abrechnungsmodelle für Netzbetreiber. Schließlich wird an Sicherheits-, Rufaufbau- und Signalisierungsstandards gearbeitet.

Eine Integration der TIPHON-Ergebnisse in DAWS ist geplant.

4.1.4 PSPP, APCO P34

In den Vereinigten Staaten wird von den BOS das Bündelfunksystem *American Public Safety Communications Officials Project 25* (APCO P25) eingesetzt. Gleichzeitig wird an einem breitbandigen Nachfolgesystem APCO P34. Die Ziele von APCO P34 entsprechen denen von DAWS.

In Anlehnung an das 3GP-Projekt wird es ein *Public Safety Partnership Project* (PSPP) geben. Ziel von PSPP ist die einheitliche Kommunikation von BOS in Nordamerika und Europa im selben Frequenzbereich.

4.2 Die Evolution von TETRAPOL

4.2.1 Die Infrastruktur – VoIP-Backbone

Die Nutzung eines "Universalnetzes" für den Anschluß der TETRAPOL-Basisstationen und die Vernetzung macht eine starke Entkopplung der Funkkommunikation und der Kommunikation in der leitungsgebundenen Infrastruktur erforderlich, was für beide Seiten von Vorteil ist. Die Basisstationen erhalten zusätzliche Funktionen, wodurch sie unabhängiger werden und damit erweiterte Rückfallebenen bieten. Voraussetzung sind offene und standardisierte Schnittstellen der Basisstationen zum Festnetz.

Die Nutzung eines standardisierten IP-Netzes in der Infrastruktur macht den Anschluß von Einsatzleitstellen, die Zusammenschaltung von Teilnetzen und die Verbindung mit anderen Kommunikationsnetzen bzw. -diensten einfach, spezielle Schnittstellen werden weitgehend überflüssig.

Abbildung 4.1 zeigt die Grundstruktur eines TETRAPOL-Netzes der 3. Generation. Kernelement ist auf der ortsfesten Seite eine WAN-Struktur mit VoIP-Basis (*Voice over IP*). Alle wichtigen Komponenten sind an dieses *Wide Area Network* (WAN) angeschlossen.

Ein Gatekeeper ist für die Organisation des Verkehrs auf dem WAN zuständig. Er kann aus Redundanzgründen gedoppelt werden. Die Basisstationen sind ebenfalls als Teilnehmer

4 Entwicklungspotentiale der Standards TETRA und TETRAPOL

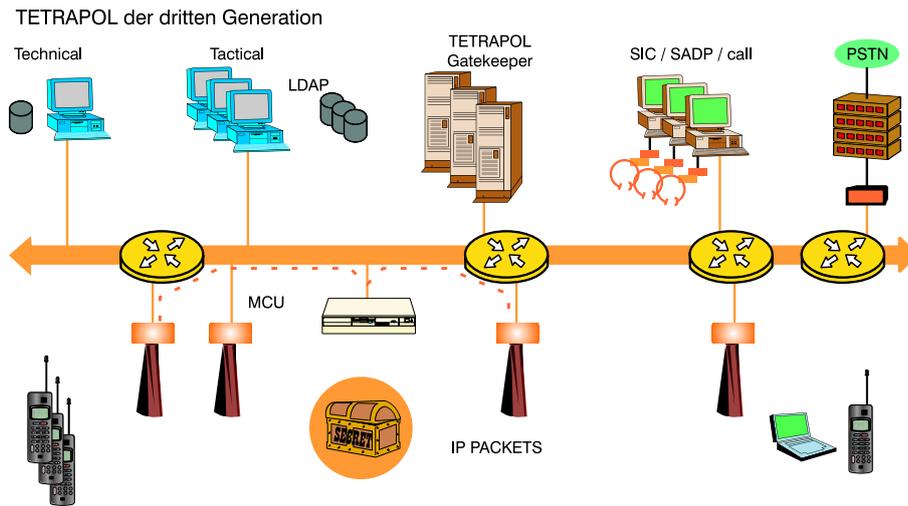


Abbildung 4.1: 3G-TETRAPOL Festnetzstruktur

an das WAN angeschlossen. Die reine Vermittlungsfunktion übernimmt das WAN selbstständig. Konferenzgespräche werden von einer *Media Conference Unit* (MCU) realisiert. Netzübergänge in private und öffentliche Netze werden über Gateways ermöglicht.

Die sicherheitsrelevanten, verschlüsselten Informationen werden im Festnetz von 3G-TETRAPOL in ein dem IP-Protokoll entsprechendes Format umgewandelt. Damit ergibt sich eine einheitliche Protokollwelt für die 3. Generation.

Bereits existente Netze können mit 3G-TETRAPOL-Netzen zusammenschaltet werden. Die neue Netzstruktur kann somit in eine bereits vorhandene Netztechnik integriert werden. Die neuen Vermittlungseinrichtungen können bei Bedarf die 2G-Vermittlungseinrichtungen ersetzen, vgl. Abb. 4.2.

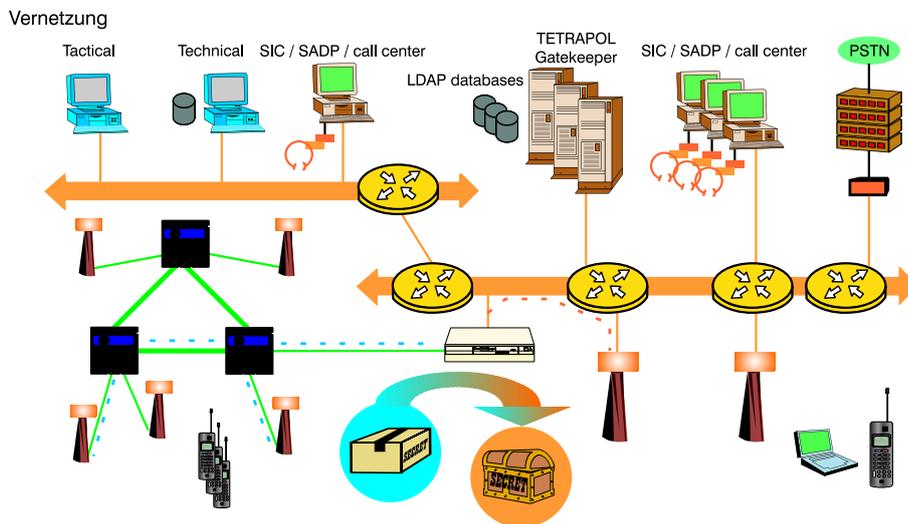


Abbildung 4.2: Vernetzung von 2G- und 3G-TETRAPOL-Netzelementen

4.2.2 Die neue Luftschnittstelle

Für das Funknetz gibt es wesentliche Anforderungen:

- Betrieb im Netz für eine geringe Verkehrs-/Teilnehmerdichte, wie sie für die meisten geographischen Gebiete gegeben ist. Dort besteht die Forderung nach möglichst großer Funkreichweite, um die Anzahl der Basisstationen und damit die Infrastrukturkosten bei Investition und Betrieb gering zu halten.
- Betrieb im Netz für eine hohe flächenbezogene Teilnehmerzahl, wie sie in Innenstadtbereichen oder z. B. auf Flughäfen typisch ist. Hier steht die Anzahl der benötigten Funkfrequenzen im Vordergrund, die Funkreichweite ist von sekundärer Bedeutung.
- Betrieb im Direktmodus ohne Nutzung des Netzes, auch wegen eines Verkehrs in/zu Gebäuden, wo es auf Reichweite sowie auf geringe Interferenzstörungen ankommt.
- Möglichst große Unempfindlichkeit gegenüber Interferenzstörungen, die oft durch den Nah/Fern-Effekt verursacht werden, ist eine generelle Forderung für PMR-Anwendungen, da bei ihnen – anders als in öffentlichen Netzen – öfters nahe der Reichweitengrenze gearbeitet werden muss.

Aus den genannten Gründen wird in 3G-TETRAPOL für die Sprachübertragung ein TDMA-Kanal mit halber Übertragungsrate eingeführt und das Modulationsschema optimiert.

Der neue Halbratenkanal ersetzt allerdings nicht den bisherigen Kanal (der zukünftig Vollratenkanal heißt). Überall, wo es auf Reichweite ankommt, wird er wie bisher eingesetzt, ebenso bei der Datenübertragung und im Direktmodus. In Bereichen mit einer hohen Dichte an Sprachkommunikation erhöht der Halbratenkanal die Frequenzökonomie erheblich. Dabei ist trotzdem auch in diesen Gebieten die Nutzung des Vollratenkanals möglich; es besteht sozusagen eine Wahlmöglichkeit "call by call". Man kann demnach die Übertragungstrecke (link) situationspezifisch an die jeweils geforderte Dienstgüte von Sprach- und Datendiensten anpassen (link adaptation). Die Auswirkungen der Einführung von Voll- und Halbratenkanälen auf die Netzarchitektur sind:

- Die FDMA-Vollratenkanäle halbieren die Anzahl der Basisstationen in der Fläche, die Halbratenkanäle halbieren die Infrastrukturkosten im städtischen Gebiet mit hohem Verkehrsaufkommen.
- Der Direktmodus ist das Kernelement für Sicherheitsanwendungen. Die Systeme müssen deshalb ein vorhersehbares Verhalten zeigen, eine hohe Empfindlichkeit aufweisen und einen starken Schutz vor Interferenzstörungen haben.

4.2.3 Nutzung eines neuen Modulationsverfahrens

Mit Einführung des Halbratenkanals wird auch das Modulationsschema optimiert. In Verbindung mit den heutigen Möglichkeiten moderner Signalprozessoren bekommt er dadurch die gleiche Empfindlichkeit wie der heutige Vollratenkanal. Der Halbratenkanal wird damit etwa um den Faktor 10 (10 dB) empfindlicher als ein TETRA-Kanal.

Da das optimierte Modulationsschema mit nahezu konstanter Einhüllender arbeitet, sind für die HF-Leistungserzeugung aufwändige Linearverstärker entbehrlich, die bisherige spektrale Reinheit bleibt erhalten, ebenso der gute Wirkungsgrad. Der Unterschied zu

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Werte

	<i>3G full channel</i>	<i>3G half channel</i>
Empfindlichkeit	-123/-125 dBm	-118/-120 dBm
Dynamic C/I	12 dB	15 dB
Gleichwelle möglich	Ja *	Ja *

* Keine erkennbare Verschlechterung der Bitfehlerrate für Signale mit Verzögerung bis zu 30 μ s

Tabelle 4.2: Spektrale Werte der unterschiedlichen Verfahren

	$N_1 \cdot \left(\frac{RTC^*}{MHz \cdot Cell}\right)$	$\eta_1 \cdot \left(\frac{bit/s}{kHz \cdot Cell}\right)$
Vorschlag Full Rate	17,80	86
Vorschlag Half Rate	15,06	75
Vorschlag Direktmodus	15,06	75
APCO 25 Phase 1	7,30	53
TETRA 25	10,51	50
TETRA 25 Direktmodus	5,25	25

* Radio Traffic Channel

TETRA für den benötigten Gleichkanalstörabstand beträgt etwa 6 dB für den Vollratenkanal.

Die geplante Evolution nimmt auf die existierenden Netze Rücksicht. Die neue Technik wird abwärtskompatibel sein, d.h. beispielsweise, dass 3G-Endgeräte in 2G-Funknetzen arbeiten können. Es ist außerdem möglich, die 2G-Basisstationen in einfacher Weise auf die 3. Generation hochzurüsten.

Das gewählte Modulationsverfahren für 3G-TETRAPOL hat eine quasi-konstante Einhüllende (*Continuous Phase Modulation*, CPM). Es erlaubt nichtlineare Verstärkerstufen einzusetzen so dass aufwandsgünstige Sendeverstärker möglich sind. Das Spektrum des gewählten Modulationsverfahrens garantiert geringe Nebenaussendungen in Nachbarkanäle. Berechnungen und Simulationen des 3G-Modulationsverfahrens ergeben folgende Merkmale:

4.2.4 Frequenzökonomie

Die Frequenzökonomie ist für den Regulierer von entscheidender Bedeutung. Betrachtet man gemäß CEPT ERC 52 die spektrale Effizienz, dann ist 3G-Tetrapol etwa 50% frequenzökonomischer als TETRA 25 oder 2G-TETRAPOL, vgl. Tabelle 4.2.

4.2.5 Datenübertragung

Für die Datenübertragung wird die bisherige Kanalbreite beibehalten werden. Dies ermöglicht in Verbindung mit dem neuen Modulationsschema eine Erhöhung der übertragbaren Nutzbitrate. Der 3G-Datenkanal hat eine effektive Nutzbitrate von 9.6 kbit/s, die sich an der Reichweitengrenze geringfügig reduziert; die äquivalente Bitfehlerrate ist dabei kleiner als $2 \cdot 10^{-4}$.

In extrem schlecht versorgten Gebieten beträgt die Datenübertragungsrate 4,8 kbit/s. Dies sind wesentlich bessere Werte als sie mit TETRA in hügeligem Gelände erreicht wer-

den können. Die entsprechenden Werte der erreichbaren Bitfehlerrate sind bei TETRA für 7,2 kbit/s um zwei Größenordnungen schlechter; selbst bei 2,4 kbit/s ist die Bitfehlerrate von TETRA in hügeligem Gelände eine Größenordnung schlechter.

Für Sonderanwendungen ist eine Bitrate von 14 kbit/s möglich, was mit einer Empfindlichkeitsreduzierung um 6-7 dB verbunden ist. Bei einer geplanten Funkausleuchtung für Handfunkgeräte sind 14 kbit/s nur den Verkehr mit Funkgeräten in Fahrzeugen einsetzbar. Entsprechend den Entwicklungen in den öffentlichen Mobilfunknetzen wird die Datenübertragung bei TETRAPOL paketvermittelt realisiert werden.

5 Abkürzungen

5.1 Allgemeine Abkürzungen

APCO	<i>American Public Safety Communications Officials</i>	ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
APCO P25	<i>American Public Safety Communications Officials Project 25</i>	FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>	FEC	<i>Forward Error Correction</i>
BER	<i>Bit Error Ratio</i>	FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
BHCA	<i>Busy Hour Call Attempts</i>	GoS	<i>Grade of Service</i>
BOS	<i>Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben</i>	GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
BS	<i>Base Station</i>	GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
BSI	<i>Bundesministerium für Sicherheit in der Informationstechnik</i>	HT	<i>Hilly Terrain</i>
BU	<i>Bad Urban</i>	ICI	<i>Interface Control Information</i>
CC	<i>Call Control</i>	IDU	<i>Interface Data Unit</i>
CEPId	<i>Connection Endpoint Identifier</i>	IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CEPT	<i>Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications</i>	IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
CPM	<i>Continuous Phase Modulation</i>	IP	<i>Internet Protocol</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>	ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
DL	<i>DownLink</i>	ISO	<i>International Standard Organisation</i>
DM	<i>Direct Mode</i>	ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardisation Sector</i>
DSI	<i>Detailed Spectrum Investigation</i>	LDAP	<i>Light Directory Access Protocol</i>
ERC	<i>European Radiocommunications Committee</i>	LLC	<i>Logical Link Control</i>
		LSB	<i>Least Significant Bit</i>

5 Abkürzungen

MAC	<i>Medium Access Control</i>	RA	<i>Rural Area</i>
MCU	<i>Media Conference Unit</i>	SAP	<i>Service Access Point</i>
MM	<i>Mobility Management</i>	SDL	<i>Specification and Description Language</i>
MPEG	<i>Moving Pictures Expert Group</i>	SDS	<i>Short Data Service</i>
MS	<i>Mobile Station</i>	SDU	<i>Service Data Unit</i>
MSC	<i>Message Sequence Chart</i>	SPEETCL	<i>SDL Performance Evaluation Tool Class Library</i>
N	<i>Network layer</i>	SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
OS	<i>Open System</i>	SwMI	<i>Switching and Management Infrastructure</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>	TCH	<i>Traffic CHannel</i>
PABX	<i>Private Automatic Branch eXchange</i>	TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
PBX	<i>Private Branch eXchange</i>	TETRA	<i>TErrestrial Trunked RAdio</i>
PCI	<i>Protocol Control Information</i>	TL	<i>Transport Layer</i>
PDN	<i>Public Data Network</i>	UD	<i>User Data</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>	UL	<i>UpLink</i>
PHY	<i>PHYsical Layer</i>	UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
PL	<i>Physical Layer</i>	USIM	<i>Universal SIM</i>
PMP	<i>Point to MultiPoint</i>	VoIP	<i>Voice over IP</i>
PMR	<i>Private Mobile Radiocommunications</i>	WAN	<i>Wide Area Network</i>
PSPP	<i>Public Safety Partnership Project</i>	WWW	<i>World Wide Web</i>
PSTN	<i>Public Switched Telecommunications Network</i>		
PTT	<i>Push-To-Talk</i>		

5.2 TETRA-Abkürzungen

AACH	<i>Access Assignment CHannel</i>	AL	<i>Advanced Link</i>
ACB	<i>Access Control Block</i>	BCCH	<i>Broadcast Control CHannel</i>
AI	<i>Air Interface</i>	BCH	<i>Bose-Chaudhuri-Hocquenghem</i>

BKN	<i>BlocK Number</i>	ITSI	<i>Individual TETRA Subscriber Identity</i>
BL	<i>Basic Link</i>	L2	<i>Layer 2</i>
BLCH	<i>Basestation Linearization CHannel</i>	L3	<i>Layer 3</i>
BLE	<i>Base Link Entity</i>	LA	<i>Location Area</i>
BLER	<i>BLock Error Ratio</i>	LAP.T	<i>Link Access Protocol for TETRA</i>
BNCH	<i>Broadcast Network CHannel</i>	LCH	<i>Link Access Protocol for TETRA</i>
BSCH	<i>Broadcast Synchronization CHannel</i>	LS	<i>Line Station</i>
CB	<i>Control Uplink Burst</i>	MCC	<i>Mobile Country Code</i>
CCH	<i>Control CHannel</i>	MDTRS	<i>Mobile Digital Trunked Radio System</i>
CEP	<i>Connection End Point</i>	MLE	<i>Mobile Link Entity</i>
CLCH	<i>Common Linearization CHannel</i>	MN	<i>Multiframe Number</i>
CLNP	<i>ConnectionLess Network Protocol</i>	MNC	<i>Mobile Network Code</i>
CLNS	<i>ConnectionLess Network Service</i>	NAK	<i>Not AcKnowledged</i>
CLT	<i>Common Linearization Time</i>	NDB	<i>Normal Downlink Burst</i>
CMCE	<i>Circuit Mode Control Entity</i>	NUB	<i>Normal Uplink Burst</i>
CONP	<i>Connection Oriented Network Protocol</i>	PDO	<i>Packet Data Optimized</i>
CONS	<i>Connection Oriented Network Service</i>	PL	<i>Physical Layer</i>
CP	<i>Control Physical channel</i>	QoS	<i>Quality of Service</i>
DAWS	<i>Digital Advanced Wireless Service</i>	RCPC	<i>Rate-Compatible Punctured Convolutional code</i>
DQPSK	<i>Differential Quaternary Phase Shift Keying</i>	RES	<i>Radio-Equipment and Systems</i>
DSMA	<i>Data Sense Multiple Access</i>	S-CLNP	<i>TETRA Specific ConnectionLess Network Protocol</i>
EL	<i>Event Label</i>	S-CLNS	<i>TETRA Specific ConnectionLess Network Service</i>
FCFS	<i>First Come First Serve</i>	SB	<i>Synchronization Downlink Burst</i>
FN	<i>Frame Number</i>	SCH	<i>Synchronization Downlink Burst</i>
GTSI	<i>Group TETRA Subscriber Identity</i>	SJN	<i>Shortest Job Next</i>
		SNAF	<i>Sub-Network Access Functions</i>

5 Abkürzungen

SOR	<i>Start Of Reservation</i>	TLx-SAP	<i>TETRA LLC type x SAP</i>
SP	<i>Service Primitive</i>	TM	<i>Trunked Mode</i>
SSI	<i>Short Subscriber Identity</i>	TMx-SAP	<i>TETRA MAC type x SAP</i>
SSN	<i>SubSlot Number</i>	TN	<i>Timeslot Number</i>
STC	<i>Standardization Technical Committee</i>	TP	<i>Traffic Physical channel</i>
STCH	<i>STealing CHannel</i>	TSI	<i>TETRA Subscriber Identity</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	TU	<i>Typical Urban</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	UP	<i>Unallocated Physical channel</i>
TIPHON	<i>Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks</i>	V+D	<i>Voice plus Data</i>

5.3 TETRAPOL-Abkürzungen

A/311	<i>CEN/CENELEC European profile for X.400</i>	ANF	<i>Additional Network Feature</i>
A/I	<i>Air Interface</i>	AP	<i>Audio Part</i>
ACK	<i>ACKnowledgement</i>	APDU	<i>Application Protocol Data Unit</i>
ACSE	<i>Association Control Service Element</i>	AS	<i>Area Selection</i>
ADMD	<i>Administration Management Domain</i>	ASB	<i>Associated Signalling Bits</i>
AFC	<i>Automatic Frequency Control</i>	ASN.1	<i>Abstract Syntax Notation 1</i>
AG	<i>Access Gate</i>	AU	<i>Access Unit</i>
AGC	<i>Automatic Gain Control</i>	AVL	<i>Automatic Vehicle Location</i>
AH	<i>Access Handler</i>	BCD	<i>Binary Coded Decimal</i>
AI	<i>Air Interface</i>	BCH	<i>Broadcast CHannel</i>
AIS	<i>Alarm Indication Signal</i>	BCS	<i>Binary Coded Sequence</i>
AL	<i>Ambience Listening</i>	BER	<i>Binary Error Rate</i>
AMD	<i>Acknowledgement of Message Distribution</i>	BN	<i>Base Network</i>
AN	<i>Access Number</i>	BNLM	<i>Base Network Local Messaging</i>
		BNOG	<i>Base Network Operational Group</i>

BS	<i>Base Station</i>	DACH	<i>Dynamic Access CHannel</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>	DB	<i>DataBase</i>
BSS	<i>Base Station Simulator</i>	DC	<i>Dispatch Centre</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>	DCE	<i>Data Circuit terminating Equipment</i>
CCH	<i>Control CHannel</i>	DCH	<i>Data CHannel</i>
CD	<i>Carrier Detect</i>	DCN	<i>Delivery Confirmation Notification</i>
CF	<i>Call Forwarding</i>	DCRP	<i>Data Connection Reference Point</i>
CGI	<i>Collective Group Identifier</i>	DCS	<i>Dispatch Centre Server</i>
CMCE	<i>Circuit Mode Control Entity</i>	DFN	<i>Delivery Failure Notification</i>
CMIP	<i>Common Management Information Protocol</i>	DGNA	<i>Dynamic Group Number Assignment</i>
CMIS	<i>Common Management Information Service</i>	DIAG	<i>DIAGnosis</i>
CNA	<i>Coded Nature of Address</i>	DISC	<i>DISConnect</i>
CNM	<i>Central Network Management</i>	DLC	<i>Data Link Control</i>
CODEC	<i>Speech enCOder DECoder</i>	DM/NM	<i>Direct Mode/Network Monitoring</i>
COV	<i>COverage</i>	DMK	<i>Direct Mode Key</i>
CP	<i>Control Plane</i>	DP	<i>Dispatch Position</i>
CR	<i>Connection Request</i>	DPS	<i>Dispatch Position Switch</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>	DPSI	<i>Dispatch Position Switch Interface</i>
CRP	<i>Connection Reference Point</i>	DR	<i>Disconnection Request</i>
CRSEL	<i>Cell ReSElection</i>	DSR	<i>Data Set Ready</i>
CSEL	<i>Cell SElection</i>	DT	<i>Data Transmit</i>
CT	<i>Call Transfer</i>	DTAU	<i>Data Terminal Access Unit</i>
CTCH	<i>Collective Traffic CHannel</i>	DTE	<i>Data Terminal Equipment</i>
CTR	<i>CounTeRCTS Clear To Send</i>	DTR	<i>Data Terminal Ready</i>
CUG	<i>Closed User Group</i>	DU	<i>Data Unit</i>
CW	<i>Call Waiting</i>		
DAC	<i>Dispatch Access Controller</i>		

5 Abkürzungen

ECCH	<i>Extended Control CHannel</i>	GSSI	<i>Group Short Subscriber Identity</i>
ECH	<i>Emergency Open CHannel</i>	H/V	<i>Home/Visited</i>
EDT	<i>External Data Terminal</i>	HDB	<i>Home Data Base</i>
EER	<i>Excessive bit Error Rate</i>	HDLC	<i>High Level Data Link Control</i>
EG	<i>Earth Ground</i>	HLR	<i>Home Location Register</i>
EN	<i>Enabled state</i>	HRSW	<i>Home RadioSWitch</i>
EPBS	<i>Emitted Power of a Base Station</i>	IA5	<i>International Alphabet no 5</i>
EPT	<i>Emitted Power of a Terminal</i>	IC	<i>Individual Call</i>
ETP	<i>Extended Transport Protocol</i>	ICS	<i>Implementation Conformance Statement</i>
ETS	<i>European Telecommunication Standard</i>	ID	<i>IDentifier</i>
EUT	<i>Equipment Under Test</i>	IDPSAP	<i>Identity of Presentation Service Access Point</i>
EXAM	<i>EXternal Application Messaging</i>	IDSSAP	<i>Identity of Session Service Access Point</i>
FBM	<i>FallBack Mode</i>	IDTSAP	<i>Identity of Transport Service Access Point</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i>	IE	<i>Information Element</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	INK	<i>Inter base Network Key</i>
FDR	<i>Fast Disconnection Request</i>	IPM	<i>Inter-Personal Messaging</i>
FER	<i>Frame Erasure Rate</i>	IRI	<i>Inter base Network Interface</i>
FHD	<i>File Header Delimiter</i>	ISI	<i>Inter System Interface</i>
FN	<i>Flag Number</i>	ISS	<i>Internal System Signalling</i>
FRMR	<i>Frame Reject</i>	ISSI	<i>Individual Short Subscriber Identity</i>
FS	<i>Fast Select</i>	IUT	<i>Implementation Under Test</i>
GC	<i>Group Call</i>	KMC	<i>Key Management Centre</i>
GF	<i>Generic Features</i>	KN	<i>KMC Master</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>	KeyLABS	<i>Line Access Base Station</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>	LABS	<i>Line Access Base Station</i>
		LAC	<i>Local Area Code</i>

LAP-B	<i>Link Access Procedure Balanced</i>	MS	<i>Mobile Station</i>
LC	<i>Logical Channel</i>	MSG APPLI	<i>MeSsaging APPLIcation</i>
LCT	<i>Line Connected Terminal</i>	MSG-Id	<i>MeSsaGe Identifier</i>
LE	<i>Late Entry</i>	MSW	<i>Main SWitch</i>
LFA	<i>Loss of Frame Alignment</i>	MSY	<i>Managed SYstem</i>
LG	<i>Logic Ground</i>	MT	<i>Message Transfer</i>
LLTI	<i>Link Level Terminal Identifier</i>	MTA	<i>Message Transfer Agent</i>
LPDU	<i>Link Protocol Data Unit</i>	MTMK	<i>Medium for TMK</i>
LS	<i>Line Station</i>	MTP	<i>Medium for ST Parameters</i>
LSC	<i>List Search Call</i>	MTS	<i>Message Transfer System</i>
LSDU	<i>Link Service Data Unit</i>	MTU	<i>Mobile Termination Unit</i>
MA	<i>Multiple Access</i>	N	<i>Network Layer</i>
MCCH	<i>Main Control CHannel</i>	NC	<i>Network Code</i>
MD	<i>Management Domain</i>	NDIS	<i>Network Device Interface Specification</i>
MDMK	<i>Medium for DMK</i>	NM	<i>Normal Mode</i>
MER	<i>Management Elementary Response</i>	NMC	<i>Network Management Centre</i>
MET	<i>Management Elementary Transaction</i>	NPI	<i>Numbering Plan Identifier</i>
MHS	<i>Message Handling System</i>	NS	<i>Not Significant</i>
MM	<i>Mobility Management</i>	NSAP	<i>Network Service Access Point</i>
MMI	<i>Man-Machine Interface</i>	NSDU	<i>Network Service Data Unit</i>
MMK	<i>Radio switch Master Key</i>	NT	<i>Not Tested</i>
MMMK	<i>Medium for MMK</i>	NW	<i>NetWork</i>
MO	<i>Managed Object</i>	O/R	<i>Originator/Recipient</i>
MOCH	<i>Multisite Open CHannel</i>	ODB	<i>Operation Data Base</i>
MPC	<i>Multiparty Call</i>	OG	<i>Operational Group</i>
MPDU	<i>Message Protocol Data Unit</i>	OMC	<i>Operation and Maintenance Centre</i>
MRI	<i>Mobile Random Identity</i>	OMWS	<i>Operation and Maintenance Work Station</i>

5 Abkürzungen

P1	<i>Message Transfer Protocol</i>	RM	<i>Repeater Mode</i>
P2	<i>Interpersonal Messaging Protocol</i>	RNK	<i>Base Network Key</i>
PAS	<i>Public Available Specification</i>	RNR	<i>Receive Not Ready</i>
PBN	<i>Preferred Base Network</i>	ROSE	<i>Remote Operation Service Element</i>
PC	<i>Personal Computer</i>	RP	<i>RePeater</i>
PCH	<i>Paging CHannel</i>	RR	<i>Receive Ready</i>
PE	<i>Protocol Element</i>	RSW	<i>Radio Switch</i>
PI	<i>Protocol Identifier</i>	RSWN	<i>Radio Switch Network</i>
PICS	<i>Protocol Implementation Conformance Statement</i>	RT	<i>Radio Terminal</i>
PINX	<i>Private Integrated Services network eXchange</i>	RTA	<i>Radio Transmission Acknowledgement</i>
PISN	<i>Private Integrated Services Network</i>	RTE	<i>Request To Emit</i>
PPK	<i>Private Partitioning Key</i>	RTI	<i>Random Terminal Identity</i>
PRMD	<i>Private Management Domain</i>	RTP	<i>Reduced Transport Protocol</i>
PSS1	<i>Private integrated Signalling System number 1</i>	RTS	<i>Request To Send</i>
PTCH	<i>Private Traffic CHannel</i>	RX.25	<i>X.25 network</i>
QSIG	<i>Signalling at Q reference point</i>	SA	<i>Secondary Address</i>
RACH	<i>Random Access CHannel</i>	SABM	<i>Set Asynchronous Balanced Mode</i>
RBS	<i>Radio Base Station</i>	SADP	<i>Stand Alone Dispatch Position</i>
RC	<i>Receiver Clock</i>	SCF	<i>Service Control Functional entity</i>
RCH	<i>Random access answer CHannel</i>	SCH	<i>Signalling CHannel</i>
RFS	<i>Base Network - Fleet - Subfleet address</i>	SCH/TI	<i>Signalling CHannel/Transmitter Interruption</i>
RFSI	<i>Base Network - Fleet - Subfleet Individual address</i>	SCN	<i>Submit Confirmation Notification</i>
RLCC	<i>Remote Line Connected Controller</i>	SCO	<i>RSW Switching Service</i>
		SCR	<i>SCRambling parameter</i>

SCS	<i>System Conformance Statement</i>	SVC	<i>Switched Virtual Circuit</i>
SD	<i>Short Data service</i>	T	<i>Transport Layer</i>
SDCH	<i>Signalling and Data Channel</i>	TAP	<i>Telesoftware Application Protocol</i>
SDP	<i>Submit/Delivery Protocol</i>	TAS	<i>Telesoftware Application Service</i>
SDPE	<i>Submit/Delivery Protocol Element</i>	TC	<i>Trunk Code</i>
SF	<i>Short Functional address</i>	TCE	<i>Terminal Control Equipment</i>
SFN	<i>Submit Failure Notification</i>	TD	<i>Transmit Data</i>
SII	<i>Internal SIgnalling</i>	TDX	<i>Telephone and Data eXchange</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>	TE	<i>Terminal Equipment</i>
SMPDU	<i>Service MPDU</i>	TI	<i>Speech transmit indication in the PTT service</i>
SN	<i>Short Number</i>	TKK	<i>Terminal Key of Key</i>
SNA	<i>Short Number Addressing</i>	TLR	<i>Time Local Radio</i>
SP	<i>Service Primitive</i>	TMK	<i>Terminal Master Key</i>
SPDU	<i>Session Protocol Data Unit</i>	TMSG-Id	<i>Temporary MeSsaGe Identifier</i>
SR	<i>Status Report</i>	TON	<i>Type of Short NumberTP TransPort layer</i>
SS	<i>System Simulator</i>	TPDU	<i>Transport service Protocol Data Unit</i>
SS3	<i>UDT Simulator</i>	TPDU-CR	<i>Transport Protocol Data Unit - Connection Request</i>
SSAP	<i>Session Service Access Point</i>	TPI	<i>Talking Party Identification</i>
SSDU	<i>Session Service Data Unit</i>	TRSP-U	<i>TRanSPort connection User</i>
SSI	<i>Short Subscriber Identity</i>	TRX	<i>Transmitter / Receiver</i>
SSW	<i>Secondary SWitch ST System Terminal</i>	TSAP	<i>Transport Service Access Point</i>
STCP	<i>System Terminal Control Protocol</i>	TSAP-ID	<i>Transport Service Access Point Identifier</i>
STS	<i>Reliable Transfer Server</i>	TSDU	<i>Transport Service Data Unit</i>
STUE	<i>UE in the ST</i>		
STUTEL	<i>Commercial name of ETS 300 075</i>		
SUT	<i>System Under Test</i>		

5 Abkürzungen

TTI	<i>Temporary Terminal Identifier</i>	USI	<i>Universal Subscriber Identity</i>
TTR	<i>TETRAPOL Technical Report</i>	UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
TTXAU	<i>TeleTeX Access Unit</i>	VC	<i>Virtual Circuit</i>
UA	<i>User Agent</i>	VCH	<i>Voice CHannel</i>
UAPDU	<i>User Agent Protocol Data Unit</i>	VCRP	<i>Voice Connection Reference Point</i>
UDP/IP	<i>User Data Protocol / Internet Protocol</i>	VDB	<i>Visited Data Base</i>
UDT	<i>User Data Terminal</i>	VHF	<i>Very High Frequency</i>
UDTUE	<i>UE in the UDT</i>	VLR	<i>Visited Location Register</i>
UE	<i>STUTEL protocol User Entity</i>	VRSW	<i>Visited RadioSWitch</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	VRSWN	<i>Visited RadioSWitch Network</i>
UMPDU	<i>User Message Protocol Data Unit</i>	VSW	<i>Visited SWitch</i>
UP	<i>User Plane</i>	X.400 MTA	<i>X.400 Message Transfer Agent</i>

A Modelle zur Funkfeldberechnung

Bei der Übertragung eines Signals über den Mobilfunkkanal wird dieses verzerrt und gedämpft. Im Folgenden werden Modelle zur Beschreibung der Eigenschaften des Mobilfunkkanals kurz dargestellt.

A.1 Ausbreitungsverlust

Für die Planung eines Mobilfunksystems ist es wichtig genaue Vorhersagen über die zu erwartenden Ausbreitungsdämpfungen machen zu können. Allgemein gilt für die Empfangsleistung im Mobilfunkempfänger

$$P_E = P_S \cdot L \cdot g_S \cdot g_E, \quad (\text{A.1})$$

wobei g den Gewinn einer Antenne gegenüber einem isotropen $\lambda/2$ -Rundstrahler und P die Empfangs- bzw. Sendeleistung darstellt. Der Faktor L beschreibt die Dämpfung des Signals und wird auch als Pfadverlust bezeichnet.

Da die Beschreibung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in realen Umgebungsbedingungen mit theoretischen Modellen nur sehr eingeschränkt möglich ist, bedient man sich zur Berechnung des Pfadverlustes empirischer Modelle.

Ein für den Frequenzbereich 150–1500 MHz allgemein anerkanntes Modell ist das Okumura/Hata-Modell [OOKF68, Hat80]. Als Grundlage dieses Modells dienten Messungen die Okumura in den Jahren 1962/63 und 1965 in Tokyo durchgeführt hat. Dabei unterschied er zwischen den Morphologietypen *Open Area*, *Rural Area*, *Suburban Area* und *Urban Area*. Hata hat diese Messreihen ausgewertet und formelmäßig approximiert.

Für den Ausbreitungsschwund in urbanen Gebieten gilt danach:

$$\begin{aligned} \frac{L_{UA}}{\text{dB}} &= 69,55 + 26,16 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 13,82 \log \frac{h_B}{\text{m}} - (1,1 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 0,7) \frac{h_M}{\text{m}} \\ &\quad + (1,56 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 0,8) + (44,9 - 6,55 \log \frac{h_B}{\text{m}}) \cdot \log \frac{R}{\text{km}} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Für die Ausbreitung in einer sog. *Open Area* gilt:

$$\frac{L_{OA}}{\text{dB}} = \frac{L_{UA}}{\text{dB}} - 4,78 \log \left(\frac{f}{\text{MHz}} \right)^2 + 18,33 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 40,94 \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} &= 27,81 + 46,05 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 13,82 \log \frac{h_B}{\text{m}} - (1,1 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 0,7) \frac{h_M}{\text{m}} \\ &\quad + (44,9 - 6,55 \log \frac{h_B}{\text{m}}) \cdot \log \frac{R}{\text{km}} - 4,78 \left(\log \frac{f}{\text{MHz}} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Für *Rural Area* gilt [ETS97]:

$$\frac{L_{RA}}{\text{dB}} = \frac{L_{OA}}{\text{dB}} + 10 \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} &= 37,81 + 46,05 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 13,82 \log \frac{h_B}{\text{m}} - (1,1 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 0,7) \frac{h_M}{\text{m}} \\ &\quad + (44,9 - 6,55 \log \frac{h_B}{\text{m}}) \cdot \log \frac{R}{\text{km}} - 4,78 \left(\log \frac{f}{\text{MHz}} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

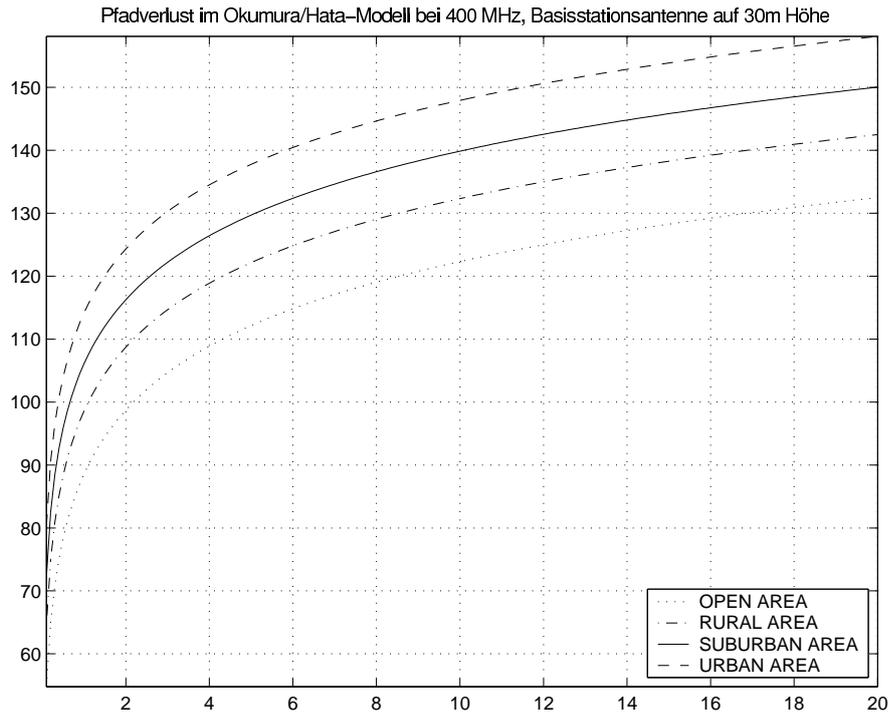


Abbildung A.1: Pfadverlust nach Okumura/Hata, Frequenz: 400 MHz, Höhe der Basisstation: 30 m

Für *Suburban Area* gilt entsprechend:

$$\frac{L_{SA}}{\text{dB}} = \frac{L_{UA}}{\text{dB}} - 2 \log \left(\frac{1}{28 \text{ MHz}} \right)^2 - 5,4 \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} &= 63,35 + 27,72 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 13,82 \log \frac{h_B}{\text{m}} - (1,1 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 0,7) \frac{h_M}{\text{m}} \\ &\quad + (44,9 - 6,55 \log \frac{h_B}{\text{m}}) \cdot \log \frac{R}{\text{km}} - 2 \log \left(\frac{1}{28 \text{ Mhz}} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Der Parameter h_M bzw. h_B beschreibt die Höhe der Antenne der Mobil- bzw. Basisstation in Metern. Abbildung A.1 zeigt den Pfadverlust nach Okumura/Hata für diese vier Umgebungen.

A.2 Abschattungsschwund

Das Okumura/Hata-Modell liefert als Ergebnis immer einen mittleren Pfadverlust. Die Empfangsleistung des Signals weist lokal Abweichungen von dem durch das Ausbreitungsmodell beschriebenen Ausbreitungsverlust auf. Diese Abweichung ist im allgemeinen mittelwertfrei und gehorcht annähernd einer log-Normalverteilung, d. h. der logarithmische Pfadverlust ist normalverteilt. Die Streuung dieser Verteilung ist abhängig von der Ausbreitungsumgebung und liegt typischerweise im Bereich von 4–10 dB.

Der Ausbreitungsverlust L kann also wie folgt statistisch beschrieben werden:

$$p(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.9})$$

Dabei ist \bar{L} der Mittelwert, der durch Gleichung (A.2) auf Seite 137 bis Gleichung (A.7) auf der vorherigen Seite beschrieben wird, und σ^2 ist die umgebungsabhängige Varianz. Beide Werte werden in dB ausgedrückt.

A.3 Mehrwegeschwund

Zwischen Sender und Empfänger existieren aufgrund von Streuung, Reflexion und Beugung an Hindernissen in der räumlichen Umgebung beliebig viele Ausbreitungswege für die elektromagnetischen Wellen. Aus diesem Grund setzt sich die Empfangsfeldstärke aus mehreren unterschiedlich starken und unterschiedlich verzögerten Komponenten zusammen. Dabei können sich die einzelnen Komponenten sowohl konstruktiv als auch destruktiv überlagern.

Selbst wenn kein Abschattungsschwund vorhanden ist, schwankt deshalb die Empfangsfeldstärke des Mobilfunksignals stark in Abhängigkeit vom Empfangsort, der Zeit und der Frequenz. Dieser Effekt wird als Kurzzeitschwund oder auch als Mehrwegeschwund bezeichnet. Bewegt sich ein Empfänger durch dieses Feld oder bewegen sich die Hindernisse oder Reflektoren, so führt dies zu schnellen Änderungen der Empfangsfeldstärken. Dabei können Pegelunterschiede von 20 dB und mehr auftreten, deren mittlerer Abstand etwa der halben Wellenlänge des Sendesignals entspricht. Für eine Frequenz von 400 MHz beträgt dieser Abstand etwa 67 cm.

Der langsame Schwund wird als log-normal-verteilt angenommen, schneller Schwund folgt einer Rayleigh-Verteilung, wobei der Wert des langsamen Schwundes der Mittelwert der Rayleigh-Verteilung ist. Eine solche Verteilung nennt man Suzuki-Verteilung [Fre79].

Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Gebiet der Empfangspegel R unter eine Schwelle M fällt ist [vBSSR97]:

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) \cdot \exp(-\pi/410 \frac{-(\alpha + \sqrt{2}\sigma y)}{10}) dy \quad (\text{A.10})$$

Dabei gilt: $\alpha = R - M$.

B Berechnung der Clustergröße

Im Fall eines hexagonalen Systems berechnet sich die Clustergröße zu

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad i, j \in \mathbf{N} \quad (\text{B.1})$$

Dabei werden die Parameter i und j durch die Schritte festgelegt, die man in den beiden Koordinatenrichtungen abzählen muss, um zu einer Gleichkanalzelle zu gelangen. In Abbildung B.1 ist zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges ein hexagonales Netz mit einer Clustergröße von 7 und den Parametern $i = 1$ und $j = 2$ dargestellt.

Zwei Zellen, die dieselbe Teilfrequenz verwenden, heissen Gleichkanalzellen. Der minimale Abstand zweier Gleichkanalzellen wird Wiederverwendungsabstand D genannt und kann wie folgt berechnet vgl. Abbildung B.2 auf der nächsten Seite:

$$D^2 = i(2h) + j^2(2h)^2 - 2ij(2h)^2 \cdot \cos(120^\circ) \quad (\text{B.2})$$

$$D = \sqrt{3} \sqrt{i^2 + ij + j^2} R \quad (\text{B.3})$$

$$= \sqrt{3N} \cdot R \quad (\text{B.4})$$

B.1 Gleichkanalstörabstand

Ein wesentliches Ziel beim Design von zellularen Mobilfunksystemen ist es, möglichst viele Verkehrsteilnehmer mit möglichst kleinem Frequenzspektrum zu bedienen. Dieses ist vor allem durch eine kleine Clustergröße N zu erreichen. Dadurch wird aber auch der Wiederverwendungsabstand klein, wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass sich zwei Zellen gegenseitig stören. Gleichkanalstörungen sind daher ein wesentlicher Faktor, der die Kapazität zellulärer Netze begrenzt.

Der Gleichkanalstörabstand bezeichnet das Verhältnis der Leistung des empfangenen Nutzsignals C (*Carrier*) bezogen auf die Interferenzleistung I (*Interference*). Zunächst wird ein homogenes Zellnetz betrachtet, in dem alle Basisstationen mit gleicher Leistung

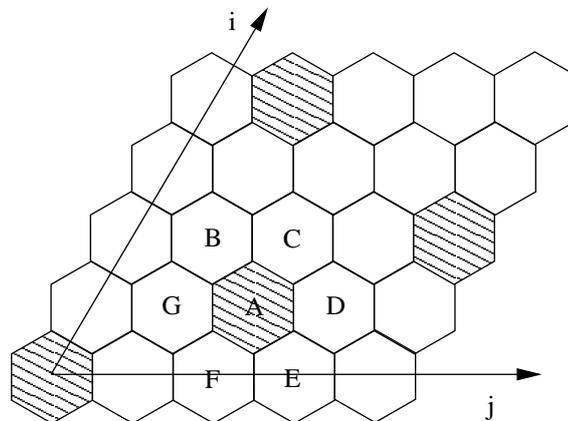


Abbildung B.1: Clustergröße und Wiederverwendungsabstand $D(i = 1, j = 2)$

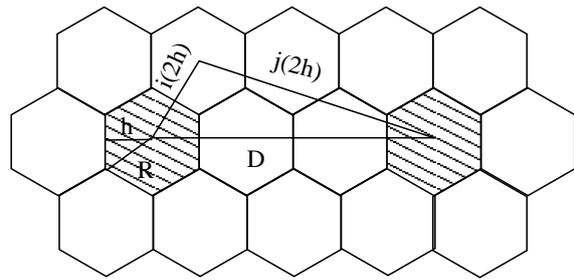


Abbildung B.2: Berechnung des Wiederverwendungsabstands D

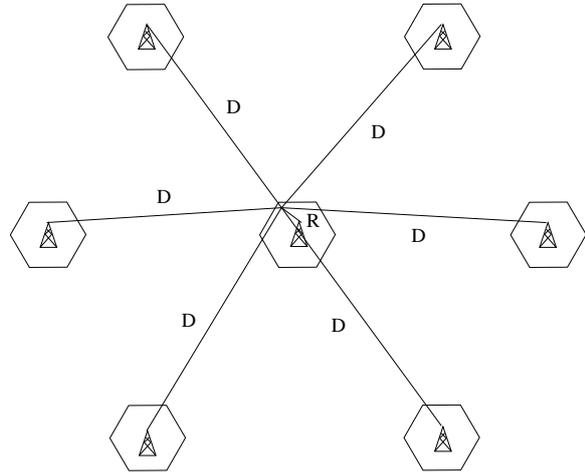


Abbildung B.3: Gleichkanalinterferenz der sechs nächsten Gleichkanalzellen

senden. Dann ergibt sich für die Abwärtsstrecke ein Gleichkanalstörabstand für den vereinfachten Fall, dass die Empfangsleistung proportional zu $r^{-\gamma}$ angenommen wird. Für die in [Abbildung B.3](#) dargestellte Konstellation gilt:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{K=1}^{K_T} D_K^{-\gamma}}, \quad (\text{B.5})$$

wobei R den Zellradius und D_K den Abstand der k -ten Gleichkanalzelle bezeichnet.

Für eine hexagonale Struktur gilt dann folgender vereinfachter Zusammenhang:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{2(D-R)^{-\gamma} + 2D^{-\gamma} + 2(D+R)^{-\gamma}} \quad (\text{B.6})$$

$$= \frac{1}{2(q-1)^{-\gamma} + 2q^{-\gamma} + 2(q+1)^{-\gamma}} \quad (\text{B.7})$$

Das Verhältnis $q = \frac{D}{R}$ wird als Verminderungsfaktor bezeichnet. Das C/I -Verhältnis ist demnach nur von $\frac{D}{R}$ und somit von der Clustergröße N abhängig. Für den Verminderungsfaktor gilt ([\[Dav96\]](#)):

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (\text{B.8})$$

B.2 Sektorisierung

In einer regelmäßigen, hexagonalen Zellstruktur besitzt jede Zelle immer sechs nächste Gleichkanalzellen, von denen die stärksten Interferenzen hervorgerufen werden. Durch den

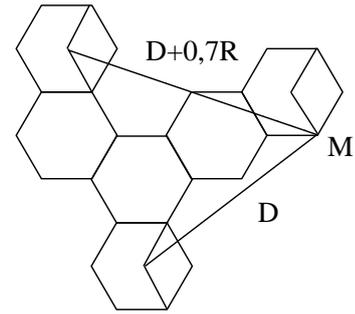


Abbildung B.4: Zellstruktur bei Einsatz von 120° -Sektorantennen in einem 7er-Cluster

Einsatz von Richtantennen an den Basisstationen lässt sich eine Zelle in Sektoren mit verschiedenen Kanalgruppen aufteilen. Dies hat zur Folge, dass für jeden Sektor weniger dichteste Gleichkanalstörer existieren. Weit verbreitet sind 120° und 60° Antennen, die eine Zelle in drei bzw. sechs Sektoren teilen. Abbildung B.4 zeigt die geometrischen Verhältnisse in einem hexagonalen Gitter beim Einsatz von 120° -Sektoren.

Werden sechs Richtantennen pro Basisstation mit jeweils 60° Öffnungswinkel eingesetzt, liegt in der Senderichtung nur noch eine Interferenzzelle, die berücksichtigt werden muss. Für den Gleichkanalstörabstand ergibt sich:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{(D + 0,7 \cdot R)^{-\gamma}} = (q + 0,7)^\gamma \quad (\text{B.9})$$

Eine untere Grenze für das C/I ist [GW98]:

$$\frac{C/I}{\text{dB}} \geq 10 * \log \left(\frac{M}{6} (\sqrt{(3N) - 1})^\gamma \right). \quad (\text{B.10})$$

Dabei ist M die Anzahl der Sektoren pro Zelle, N die Clustergröße und γ der Ausbreitungskoeffizient.

Mit dem Okumura/Hata-Modell ergibt gemäß der Gleichung (A.2) auf Seite 137 folgendes C/I -Verhältnis:

$$\frac{C}{I} = 44,9 - 6,55 \log h_B \cdot \log \left(\frac{D}{R} - 1 \right) - 10 \log 6 \quad (\text{B.11})$$

Für eine Antennenhöhe der Basisstation von 30 m ergibt sich somit ein Ausbreitungskoeffizient von 3,43.

C Tragbarer Verkehr

C.1 Verlustsystem

Wird ein Ruf abgewiesen, wenn alle Kanäle einer Zelle bereits belegt sind, spricht man von einem Verlustsystem. Ein solches Verlustsystem kann bei genügend großer Zahl von Verkehrsquellen und geeigneter Verteilung der Rufdauer sowie der Zeiten zwischen zwei Rufen als Markovsches M/M/n-Bedienungssystem beschrieben werden [Wal98]. Ein solches System ist in Abbildung C.1 schematisch dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Zelle von n Verkehrskanälen genau k belegt sind, ist dann [Wal98]:

$$P(X = x) = p_x = \frac{\frac{A^x}{x!}}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!}}, x = 0, 1, \dots, n \quad (\text{C.1})$$

mit

$$A = \frac{\lambda}{\epsilon} \quad (\text{C.2})$$

ϵ ist die mittlere Belegungsdauer der Verbindungen, d. h. die Bedienrate. λ ist der Mittelwert der Dauer zwischen zwei Rufen, also die Ankunftsrate. Das Angebot A wird in der Pseudo-Einheit *Erlang* angegeben. Die Verteilung aus Gleichung (C.1) gilt auch für Verlustsysteme mit beliebig verteilter Bedienzeit.

Wichtig für die Bestimmung des tragbaren Verkehrs ist der Zustand, in dem alle Verkehrskanäle belegt sind und neu eintreffende Verbindungswünsche abgewiesen werden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der dieser Fall auftritt wird als Blockierwahrscheinlichkeit bezeichnet und ist durch die sogenannte Erlang-Verlustformel (Erlang-B-Formel) beschrieben:

$$P_B = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!}} \quad (\text{C.3})$$

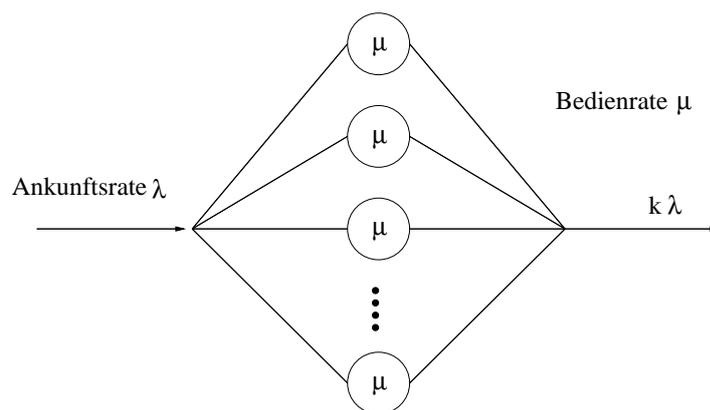


Abbildung C.1: M/M/n-Verlustsystem

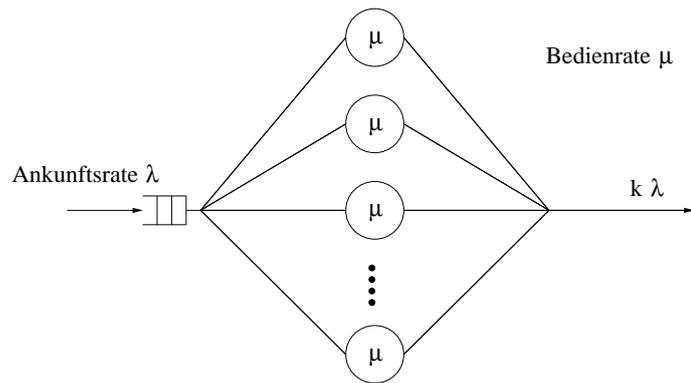


Abbildung C.2: $M/M/n - \infty$ Wartesystem

C.1.1 Kanalauslastung

Die mittlere Anzahl gleichzeitig belegter Bediener wird als Verkehrswert Y bezeichnet.

$$Y = E[X] = \sum_{x=0}^n x p_x = A \sum_{x=1}^n p_{x-1} = A(1 - p_B) \quad (\text{C.4})$$

In der Vermittlungstechnik wird normalerweise $p_B = B$ verwendet. Damit ergibt sich der Verkehrswert zu $Y = A(1 - B)$. Die Auslastung bzw. der Nutzungsgrad eines Verkehrskanals ist

$$a_c = \frac{Y}{n} \quad (\text{C.5})$$

Trägt man für eine konstante Blockierwahrscheinlichkeit ($B = \text{const}$) die Ausnutzung a_c gegen die Anzahl der Leitungen n auf, so ergibt sich eine höhere Ausnutzung für eine größere Anzahl von Kanälen. Aufgrund dieses sogenannten Bündelgewinns versucht man in Kommunikationsnetzen möglichst große Kanalbündel zu verwenden.

C.2 Wartesystem

Falls in einem belegten System die eingehenden Anforderungen bzw. Anrufe nicht abgewiesen, sondern in eine Warteschlange eingereiht werden, so spricht man von einem Wartesystem. Es wird dabei davon ausgegangen, dass immer genügend Speicherplatz in der Warteschlange vorhanden ist, so dass kein Anruf verloren geht. Es handelt sich dann um ein sogenanntes $M/M/n - \infty$ Wartesystem. Abbildung C.2 stellt dieses System schematisch dar.

Das TETRA- und das TETRAPOL-System können als solche Wartesysteme betrieben werden. Da die Verlustwahrscheinlichkeit in einem solchen System immer Null ist, werden als wichtigste Kenngrößen die Wartewahrscheinlichkeit, die mittlere Wartezeit sowie die mittlere Warteschlangenlänge angegeben. Für die Wahrscheinlichkeit P_k , dass k Kanäle belegt sind, gilt [Wal98]:

$$P(X = x) = \begin{cases} p_0 \frac{A^x}{x!} & \text{für } 0 \leq x \leq n \\ p_0 \frac{A^n}{n!} \left(\frac{A}{n}\right)^{x-n} & \text{für } x > n \end{cases} \quad (\text{C.6})$$

p_0 ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System leer ist:

$$p_0 = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{A^i}{i!} + n \frac{A^n}{n!(n-A)} \right)^{-1} \quad (\text{C.7})$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag warten muss ergibt sich zu

$$p_w = \frac{p_n}{1 - \rho} \quad (\text{C.8})$$

$$\rho = \frac{A}{n} \quad (\text{C.9})$$

Die Warteschlangenlänge ist

$$L_Q = p_n \frac{\rho}{(1 - \rho)^2} \quad (\text{C.10})$$

Unter Anwendung des Little's Theorem [Wal99] ergibt sich für die mittlere Wartezeit der wartenden Aufträge:

$$W = \frac{1}{n - A} \quad (\text{C.11})$$

Ebenso wie für das Verlustsystem erhält man auch hier den *Bündelgewinn*.

D Vergleich der Europäischen Forderungen mit dem TETRA-Standard

E Vergleich der Europäischen Forderungen mit dem TETRAPOL-Standard

F Vergleich der deutschen Forderungen mit dem TETRA-Standard

G Vergleich der deutschen Forderungen mit dem TETRAPOL-Standard

Literaturverzeichnis

- [A/S95] Danitas Radio A/S. *TETRA News*, März 1995. Information from the TETRA MoU Group. [2.8.1.2.1](#)
- [Cay92] G. 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. [2.4.1](#)
- [Dav96] Benkner T. David, K. *Digitale Mobilfunksysteme*. Teubner, 1996. [B.1](#)
- [ETS94a] ETSI. *TETRA 04.14: V+D Layer 2 MAC Protocol*. Working document, ETSI, November 1994. [2.8.1.4.1](#)
- [ETS94b] ETSI. *TETRA 05.02: Channel Multiplexing for V+D*. Working document, ETSI, November 1994. [2.8.1.2.1](#), [2.8.1.3](#)
- [ETS94c] ETSI. *TETRA 05.03: Channel Coding*. Working document, ETSI, November 1994. [2.8.1.4.1](#)
- [ETS94d] ETSI. *TETRA 05.05: Radio Transmission and Reception*. Working document, ETSI, November 1994. [2.8.1.2.1](#), [2.8.1.3](#)
- [ETS94e] ETSI. *TETRA 05.08: Radio Sub-System Link Control for V+D*. Working document, ETSI, November 1994. [2.8.1.3](#)
- [ETS94f] ETSI. (RES06). *TETRA Voice + Data, Part 10*. European Telecommunication Standard, European Telecommunications Standards Institute, ETSI Secretariat, 06921 Sophia Antipolis Cedex, France, November 1994. [2.4.1](#)
- [ETS94g] ETSI. (RES06). *TETRA Voice + Data, Part 11*. European Telecommunication Standard, ETSI, November 1994. [2.4.1](#)
- [ETS94h] ETSI. (RES06). *TETRA Voice + Data, Part 12*. European Telecommunication Standard, ETSI, November 1994. [2.4.1](#)
- [ETS95] ETSI. *TETRA Voice plus Data (V+D); Air Interface*. ETR 300-392-2, ETSI, 1995. [2.3.2](#), [2.3.2](#), [2.3.6.2](#), [2.3.7](#)
- [ETS97] ETSI. *TETRA Voice plus Data (V+D); Designers Guide*. ETR 300-1, ETSI, May 1997. [2.3.2](#), [2.3.2.1](#), [2.3.3.1](#), [2.3.5.3](#), [2.3.6.1](#), [2.11](#), [2.11.1](#), [2.11.8](#), [A.1](#)
- [ETS00] ETSI. *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designer's guide Part 3: Direct Mode Operation (DMO)*. Technical Report, ETSI, Februar 2000. [2.3.9.2](#)
- [FOR96] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: Inter System Interface: ISI Technical Requirements*. Public Available Specification PAS 0001-10-1, TETRAPOL FORUM, Bois d'Arcy, France, Dezember 1996. [2.9.2](#)

- [FOR98a] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: Air Interface Protocol: Air Interface Application Messages*. Public Available Specification PAS 0001-3-2, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Dezember 1998. [2.9.2.5](#)
- [FOR98b] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: Air Interface Protocol: Air Interface Transport Protocol*. Public Available Specification PAS 0001-3-3, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Januar 1998. [2.8.2.4.1](#)
- [FOR98c] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: General Network Design: Reference Model*. Public Available Specification PAS 0001-1-1, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Mai 1998. [2.4.2](#)
- [FOR98d] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: Radio Air Interface*. Public Available Specification PAS 0001-2, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Juli 1998. [2.8.2.4.1](#)
- [FOR98e] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: Security: Security Services*. Public Available Specification PAS 0001-16-1, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Januar 1998. [2.10.2](#)
- [For98f] TETRAPOL Forum. *TETRAPOL Specifications; Part2: Radio Air Interface*. PAS 0001-2, TETRAPOL Forum, July 1998. [2.3.2](#), [2.3.2](#), [2.3.2](#), [2.3.6.2](#), [2.3.7](#)
- [FOR99] TETRAPOL FORUM. *TETRAPOL Specification: General Network Design: General Mechanisms*. Public Available Specification PAS 0001-1-3, TETRAPOL FORUM, Bois d’Arcy, France, Januar 1999. [2.9.2](#), [2.9.2.1](#)
- [Fre79] R.C. French. *The effect of fading and shadowing on channel reuse in mobile radio*. IEEE transactions on vehicular technology, Bd. 28, S. 171–181, 1979. [2.3.6.1](#), [A.3](#)
- [GW98] Norbert Geng, Werner Wiesbeck. *Planungsmethoden für die Mobilkommunikation*. Springer Verlag, 1998. [B.2](#)
- [Hat80] M. 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. [A.1](#)
- [ITU] ITU-T. *Recommendation I.411, ISDN User Network Interfaces-Reference Configurations*. [2.7.1.4.2](#)
- [LC83] S. Lin, D. J. Costello. *Error control coding – Fundamentals and Applications*, Band 1 von *Computer Applications in Electrical Engineering Series*. Prentice–Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1 Auflage, 1983. [2.8.1.4.1](#), [2.8.1.4.1](#), [2.8.1.4.1](#)
- [LF91] C.-L. Liu, K. Feher. *Bit Error Rate Performance of $\pi/4$ – DQPSK in a Frequency-Selective Fast Rayleigh Fading Channel*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Bd. 40, Nr. 3, S. 558–568, August 1991. [2.3.2](#), [2.3.2.1](#)

- [OOKF68] K. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, K. Fukara. *Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Service*. Review of the Electrical Communications Laboratory, Bd. 16, S. 825–873, September 1968. [A.1](#)
- [PK91] Ramjee Prasad, Adriaan Kegel. *Improved Assessment of Interference Limits in Cellular Radio Performance*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Bd. 40, Nr. 2, S. 412–418, May 1991. [2.3.5.1](#), [2.3.5.1](#)
- [Skl88] B. Sklar. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1988. [2.8.1.4.1](#), [2.8.1.4.1](#)
- [vBSSR97] Jeroen van Bussel, Hans Schurer, Cornelis H. Slump, Erik K.L. Rossou. *Optimum Cell Size for Police Use*. In *Proceedings of the EPMCC*, S. 157–163, Bonn, Germany, 1997. [2.3.5.2](#), [A.3](#)
- [Wal98] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle, Band 1+2*. Teubner, 1998. [C.1](#), [C.1](#), [C.2](#)
- [Wal99] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie 2*. Vorlesungsskript, 1999. [C.2](#)