

# **Wissenschaftliche Begleitung des TETRA Pilotversuchs Aachen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)**

unter Mitwirkung von  
Dipl.-Ing. Marc-Peter Althoff  
Dipl.-Ing. Dirk Kuypers,  
Dipl.-Ing. Peter Seidenberg,  
Dipl.-Ing. Peter Sievering

April 2003

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



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Funknetz</b>	<b>9</b>
1.1	Funknetzplanung . . . . .	9
1.1.1	Vorgehensweise . . . . .	9
1.1.2	Link Budget Berechnungen . . . . .	10
1.1.2.1	Statische Versorgung . . . . .	10
1.1.2.2	Dynamische Versorgung . . . . .	12
1.1.2.3	Dienstverfügbarkeit für HRT . . . . .	13
1.1.3	Ergebnisse der werkzeuggesteuerten Funknetzplanung . . . . .	13
1.1.3.1	Downlink Erreichbarkeit für MRT . . . . .	18
1.2	Qualitätsbeurteilung der Funkversorgung (technisch) . . . . .	18
1.2.1	Zielsetzung . . . . .	18
1.2.2	Konzeption des Messsystems . . . . .	18
1.2.2.1	Konzept von TAQUR . . . . .	18
1.2.3	Entwicklung der Hardware . . . . .	21
1.2.4	Entwicklung der Software . . . . .	22
1.2.5	Durchführung der Messungen . . . . .	22
1.2.6	Auswertung . . . . .	22
1.3	Qualitätsbeurteilung des Funksystems (subjektiv) . . . . .	22
1.3.1	Konzept von TAQUR . . . . .	22
1.3.2	Realisierung . . . . .	22
1.4	Messen von Parametern an Mobilstationen . . . . .	22
1.4.1	Zielsetzung . . . . .	22
1.4.2	Vergleich der Uplink- und Downlink-Messwerte . . . . .	23
1.4.3	Messfahrt am 6.12.2001 im Aachener Süden . . . . .	24
1.4.4	Messfahrten am 11.1.2002 und 24.1.2002 im Aachener Norden . . . . .	30
1.4.5	Messfahrt am 27.3.2003 im Versorgungsbereich der Basisstation Wahlerscheid . . . . .	34
1.4.6	Messungen am 4.2.2002 und 6.2.2002 am Aachener Tivoli . . . . .	37
1.5	Bestimmung der erreichten Funkversorgungsgüte . . . . .	40
1.5.1	Funkausbreitung im Aachener TETRA-Netz . . . . .	41
1.6	Messungen zur Körperdämpfung . . . . .	43
1.7	Kapazitätserhöhung durch dynamische Verkleinerung von Funkzellen . . . . .	45
1.7.1	Zielsetzung . . . . .	45
1.7.2	Aktueller Stand . . . . .	45
<b>2</b>	<b>Festnetz</b>	<b>49</b>
2.1	Zielsetzung . . . . .	49
2.2	Vorgehensweise . . . . .	49
2.2.1	Bestimmung der Anzahl der Standorte der Basisstationen . . . . .	49
2.2.2	Bestimmung der Standorte der Basisstationen . . . . .	49

2.2.3	Netzplanung . . . . .	50
2.3	Ergebnis . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Verkehrsmessungen</b>	<b>51</b>
3.1	Zielsetzung . . . . .	51
3.2	Verkehrsformen und -arten des BOS-Funks . . . . .	51
3.2.1	Verkehrsformen . . . . .	51
3.2.2	Verkehrsarten . . . . .	52
3.3	Verkehrsmessungen im analogen BOS-Funknetz . . . . .	55
3.3.1	Auslastung des Polizeikanals . . . . .	55
3.3.1.1	Funkmeldesystem-Nachrichten . . . . .	55
3.3.1.2	Sprache . . . . .	55
3.3.1.3	Hauptverkehrsstunde . . . . .	57
3.3.2	Auslastung der Polizei-Sonderkanäle an einem Demonstrationstag . . . . .	59
3.3.3	Auslastung der Feuerwehrfrequenz . . . . .	62
3.3.3.1	Funkmeldesystem-Nachrichten . . . . .	62
3.3.3.2	Sprache . . . . .	63
3.4	Das TETRA-Netz in Aachen . . . . .	65
3.4.1	Migration der BOS . . . . .	66
3.4.2	Verfahren zur Analyse des Funkverkehrs im Aachener TETRA-Netz . . . . .	68
3.4.2.1	Beschreibung der ATIA-Informationen . . . . .	69
3.5	Bestimmung von Kenngrößen der Gruppenkommunikation im TETRA-Pilotnetz . . . . .	71
3.5.1	Analysierte Kennwerte . . . . .	72
3.5.1.1	Gruppengröße . . . . .	72
3.5.1.2	Verteilung des Sprachaufkommens . . . . .	73
3.5.1.3	Räumliche Verteilung der Netzteilnehmer . . . . .	75
3.5.1.4	Gruppenaktivität . . . . .	76
3.5.1.5	Rufdauer . . . . .	76
3.5.1.6	Zwischenankunftszeiten . . . . .	76
3.5.2	Korrelationsuntersuchungen . . . . .	76
3.5.2.1	Korrelation zwischen Nutzeranzahl und Gesprächsaufkommen . . . . .	79
3.5.2.2	Korrelation zwischen Rufanzahl und Gesprächsaufkommen . . . . .	79
3.5.2.3	Korrelation Aktivität der HVS und Gesamtaktivität . . . . .	81
3.6	Untersuchung des TETRA-Gesamtsystems . . . . .	81
3.6.1	Verkehrskenngrößen . . . . .	81
3.6.1.1	Angemeldete Nutzer . . . . .	82
3.6.1.2	Nutzungshäufigkeit der Dienste . . . . .	82
3.6.1.3	Rufdauer . . . . .	84
3.6.1.4	Sprachaktivität und Sprachankunftsrate . . . . .	84
3.6.1.5	Zwischenankunftszeit . . . . .	87
3.6.1.6	Maximale Kanalbelegung . . . . .	87
3.7	Verkehrsmessungen in anderen TETRA Netzen . . . . .	88
3.7.1	Verkehrsmessungen im TETRA Netz der Berliner Polizei . . . . .	88

<b>4</b>	<b>Lastmodelle</b>	<b>89</b>
4.1	Zielsetzung . . . . .	89
4.2	Modellierungskonzepte . . . . .	89
4.2.1	Die Definition des Begriffes Last . . . . .	89
4.2.2	Interaktive und nicht interaktive Anwendungen . . . . .	91
4.2.3	Modellierte Eigenschaften und Modellparameter . . . . .	93
4.2.3.1	Sitzungen . . . . .	94
4.2.3.2	Gemischte Lasten . . . . .	96
4.2.3.3	Prinzipieller Ablauf der Lasterzeugung . . . . .	96
4.2.4	Andere Modellierungskonzepte und Lastmodelle . . . . .	97
4.2.5	Die Auswertung von Messergebnissen . . . . .	100
4.2.5.1	Plausibilitätsüberprüfungen . . . . .	100
4.2.5.2	Logarithmische Transformationen und Verteilungen . . . . .	101
4.2.6	Empirische und analytische Modelle . . . . .	103
4.2.7	Korrelationen . . . . .	105
4.3	Lastmodelle für Sprachanwendungen . . . . .	105
4.3.1	Audio . . . . .	105
4.3.1.1	Die Entstehung von Audiodaten . . . . .	105
4.3.1.2	CBR- und VBR-Quellen . . . . .	106
4.3.1.3	Lastmodell für Audioquellen . . . . .	107
4.3.2	Sprache . . . . .	109
4.3.2.1	Die Entstehung von Sprachsequenzen und Pausen . . . . .	111
4.3.2.2	Ein Modell für das Sprachverhalten in Konversationen . . . . .	115
4.3.2.3	Ein einfaches Zwei-Zustandsmodell für das Sprachverhalten . . . . .	123
4.3.2.4	Sitzungseigenschaften von Sprachanwendungen . . . . .	124
4.3.2.5	Zusammenfassung . . . . .	125
4.4	Lastmodelle für Multimedia-Datenanwendungen . . . . .	125
4.4.1	HTTP . . . . .	125
4.4.2	FTP . . . . .	126
4.4.3	SMTP . . . . .	127
4.4.4	WAP . . . . .	128
4.4.4.1	WAP-Verkehrsmodell . . . . .	130
4.4.4.2	WAP Release 2.0 . . . . .	131
<b>5</b>	<b>TETRA-Simulationen</b>	<b>135</b>
5.1	Definition von Testszenarioszenarien . . . . .	135
5.1.1	Zielsetzung . . . . .	135
5.1.2	Konzept . . . . .	135
5.1.3	Testszenarioszenarien für den Pilotversuch Aachen . . . . .	136
5.1.4	Nachstellen von Testszenarioszenarien . . . . .	139
5.1.4.1	Versuchsdurchführung . . . . .	139
5.1.4.2	Angebotener Verkehr . . . . .	141
5.1.4.3	Schätzung der Anzahl simulierter Gruppen . . . . .	141
5.1.4.4	Systemreaktion . . . . .	142
5.1.5	ETSI-Szenarien . . . . .	142
5.2	Simulationsmodell . . . . .	143
5.2.1	Aufbau des Simulators . . . . .	145

5.3	Durchführung der Simulationen . . . . .	147
5.3.1	Zielsetzung . . . . .	147
5.3.2	Aktueller Stand . . . . .	147
5.3.2.1	Untersuchung des ETSI-Szenariums 8 . . . . .	147
5.3.2.2	Untersuchung von Szenarien unter Berücksichtigung der Verkehrsmessungen im TETRA Pilotnetz Aachen . . . . .	154
5.3.2.3	Leistungsbewertung von TETRA für Datenübertragungen . . . . .	155
5.4	Leistungsbewertung von TETRA Release 2 . . . . .	164
5.4.1	Simulationskonzept . . . . .	165
5.4.2	Leistungsanalyse . . . . .	165
5.4.2.1	Simulationsszenarien . . . . .	165
5.4.2.2	Leistungskenngrößen . . . . .	165
5.4.2.3	WAP im Vergleich zu Internet Anwendungen über GPRS bzw. TAPS . . . . .	166
5.4.2.4	Verkehrsmix mit WAP und WWW/E-mail über GPRS bzw. TAPS . . . . .	168
<b>6</b>	<b>Kopplung von Digitalfunksystemen</b>	<b>169</b>
6.1	Vorbemerkungen zur Interoperabilität von Bündelfunknetzen . . . . .	169
6.1.1	Standardprotokolle und -schnittstellen . . . . .	169
6.1.2	Zugänglichkeit eines Standards . . . . .	169
6.1.3	Relevanz der ISI für den Betrieb eines Netzes . . . . .	171
6.1.4	Sicherheit und Flexibilität für PMR-Netze für BOS . . . . .	171
6.1.5	Bundesweites PMR-Festnetz mit Netzelementen verschiedener Her- steller . . . . .	172
6.1.6	Management von Teilnetzen verschiedener Systemhersteller über die ISI . . . . .	173
6.1.7	Interoperabilität mit BOS-Netzen . . . . .	174
6.1.8	Verschlüsselung . . . . .	174
6.1.9	Roaming . . . . .	174
6.2	TETRA-ISI . . . . .	175
6.3	Kopplung TETRA-TETRAPOL . . . . .	176
6.3.1	Zielsetzung . . . . .	176
6.3.2	Aktueller Stand . . . . .	177
6.4	Interoperabilität mit Nachbarländern . . . . .	177
6.4.1	Zielsetzung . . . . .	177
6.4.2	Aktueller Stand . . . . .	177
6.5	Prüfung der erforderlichen Systemschnittstellen . . . . .	177
6.5.1	Zielsetzung . . . . .	177
6.6	Wechselseitige grenzüberschreitende Nutzung . . . . .	178
6.6.1	Zielsetzung . . . . .	178
6.6.2	Aktueller Stand . . . . .	178
6.7	Europaweites Roaming . . . . .	178
6.7.1	Zielsetzung . . . . .	178

<b>7</b>	<b>Begleitende Maßnahmen</b>	<b>179</b>
7.1	Analyse des Netzmanagements und Auswertung von Mängelberichten . . .	179
7.1.1	Zielsetzung . . . . .	179
7.1.2	Aktueller Stand . . . . .	179
7.2	Konformitätstest gegen Ausschreibung . . . . .	179
7.2.1	Zielsetzung . . . . .	179
7.2.2	Aktueller Stand . . . . .	180
7.3	Sprachqualität . . . . .	180
7.3.1	Zielsetzung . . . . .	180
7.3.2	Aktueller Stand . . . . .	180
7.4	Projektpräsentation . . . . .	180
7.4.1	Zielsetzung . . . . .	180
7.4.2	Aktueller Stand . . . . .	180
<b>A</b>	<b>Grundlegende verkehrstheoretische Modelle</b>	<b>183</b>
A.1	Verlustsystem . . . . .	184
A.1.1	Kanalauslastung . . . . .	185
A.2	Wartesystem . . . . .	185
A.3	Kennwerte und Momente von Verteilungen . . . . .	186
A.3.1	Wahrscheinlichster Wert . . . . .	186
A.3.2	Arithmetischer Mittelwert und Erwartungswert . . . . .	186
A.3.3	Varianz, Standardabweichung und Variationskoeffizient . . . . .	188
A.3.4	Momente von Verteilungen . . . . .	188
A.4	Wichtige Verteilungen . . . . .	190
<b>B</b>	<b>Grundlegende Eigenschaften und Modelle zur Funkausbreitung</b>	<b>195</b>
B.1	Charakteristika der Funkübertragung . . . . .	195
B.1.1	Dämpfung . . . . .	197
B.1.2	Ausbreitung über einer Ebene . . . . .	197
B.1.3	Schwund bei Ausbreitung mit vielen Reflektoren (Mehrwegeausbrei- tung) . . . . .	200
B.1.4	Statistische Beschreibung des Übertragungskanals . . . . .	202
B.1.4.1	Die Gauß-Verteilung . . . . .	202
B.1.4.2	Die Rayleigh-Verteilung . . . . .	202
B.1.4.3	Fadingfrequenz . . . . .	203
B.1.4.4	Die Rice-Verteilung . . . . .	204
B.1.5	Reflexion . . . . .	205
B.1.6	Beugung . . . . .	207
B.1.7	RMS Delay-Spread . . . . .	208
B.1.8	Abschattung . . . . .	208
B.1.9	Störungen durch Fremdsysteme . . . . .	208
B.2	Modelle zur Funkfeldberechnung . . . . .	208
B.2.1	Empirische Modelle . . . . .	209
B.2.2	Beugungsmodelle . . . . .	209
B.2.3	Strahlverfolgungsverfahren . . . . .	210
B.2.4	Das Okumura/Hata-Modell . . . . .	210
B.2.4.1	Geländetypen . . . . .	211

B.2.4.2	Morphologietypen . . . . .	211
B.2.5	Funkausbreitung in Mikrozellen . . . . .	212
<b>C</b>	<b>Paket- und Bitfehlerverhältnisse auf TETRA-Funkkanälen in mehrzellularen Umgebungen</b>	<b>213</b>
C.1	Fehlermusterdateien für TETRA-Pakete . . . . .	213
C.1.1	Bestimmung des Bitfehlerverhältnisses . . . . .	213
C.1.2	Modell für die Verteilung von Fehlerbüschellängen bei TETRA . . .	215
C.1.3	Ermittlung des Paketfehlerverhältnisses . . . . .	216
C.2	Paket- und Bitfehlerverhältnisse für verschiedene Kanalmodelle . . . . .	217
C.2.1	Verwendete Kanalmodelle . . . . .	217
C.2.2	Kanalmodell <i>Bad Urban (BU) 50</i> . . . . .	219
C.2.3	Kanalmodell <i>Typical Urban (TU) 50</i> . . . . .	223
C.2.4	Kanalmodell <i>Hilly Terrain (HT) 200</i> . . . . .	226
C.2.5	Kanalmodell <i>Rural Area (RA) 200</i> . . . . .	230
<b>D</b>	<b>Die Dokumente des TETRA Standards</b>	<b>241</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>255</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>259</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>263</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>265</b>
	<b>Index</b>	<b>271</b>