

Bernhard Walke

# Mobilfunknetze und ihre Protokolle 1

Grundlagen, GSM, UMTS und andere  
zellulare Mobilfunknetze

3. Auflage

Mit 226 Abbildungen und 84 Tabellen



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>VII</b>
Vorwort zur zweiten Auflage . . . . .	X
Vorwort zur dritten Auflage . . . . .	XI
<b>Kurzinhalt Band 2</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Bestehende bzw. in Einführung befindliche Netze und Dienste . . .	7
1.1.1 GSM/DCS1800-System . . . . .	7
1.1.2 DECT . . . . .	10
1.1.3 Funknetze als Bypass des verdrahteten Ortsnetzes . . . . .	12
1.1.4 Drahtlose lokale Netze (IEEE 802.11 WLAN, Wireless LAN, ETSI/HIPERLAN 1) . . . . .	13
1.1.5 Drahtlose Netze für die Prozeßautomatisierung . . . . .	13
1.1.6 Universal Mobile Telecommunications System UMTS . . . . .	14
1.1.7 Drahtlose Breitbandsysteme . . . . .	14
1.1.8 Mobiler Satellitenfunk . . . . .	15
1.1.9 Universelle persönliche Mobilität . . . . .	18
1.2 Systeme mit intelligenten Antennen . . . . .	18
1.3 Mobilfunksysteme mit dynamischer Kanalvergabe . . . . .	20
1.4 Weitere Aspekte . . . . .	22
1.4.1 Selbstorganisierende Systeme . . . . .	22
1.4.2 Elektromagnetische Umweltverträglichkeitsuntersuchungen	22
1.5 Historische Entwicklung . . . . .	23
<b>2 Systemaspekte</b>	<b>29</b>
2.1 Charakteristika der Funkübertragung . . . . .	29
2.1.1 Dämpfung . . . . .	32
2.1.2 Ausbreitung über einer Ebene . . . . .	34
2.1.3 Schwund bei Ausbreitung mit vielen Reflektoren (Mehrwe- geausbreitung) . . . . .	36
2.1.4 Statistische Beschreibung des Übertragungskanals . . . . .	38
2.1.5 Reflexion . . . . .	43
2.1.6 Beugung . . . . .	45

2.1.7	RMS Delay-Spread . . . . .	46
2.1.8	Abschattung . . . . .	46
2.1.9	Störungen durch Fremdsysteme . . . . .	47
2.2	Modelle zur Funkfeldberechnung . . . . .	47
2.2.1	Empirische Modelle . . . . .	48
2.2.2	Beugungsmodelle . . . . .	48
2.2.3	Strahlverfolgungsverfahren . . . . .	49
2.2.4	Das Okumura/Hata-Modell . . . . .	49
2.2.5	Funkausbreitung in Mikrozellen . . . . .	51
2.3	Zellulare Systeme . . . . .	52
2.3.1	Clusterbildung und Störabstand . . . . .	53
2.3.2	$C/I$ -Verhältnis und Verminderungsfaktor . . . . .	55
2.3.3	Verkehrslast und Zellradius . . . . .	57
2.4	Sektorisierung und spektrale Effizienz . . . . .	59
2.4.1	Effizienz und tragbarer Verkehr . . . . .	60
2.4.2	Wirkung der Sektorisierung bei fester Clustergröße . . . . .	62
2.4.3	Effizienz und tragbarer Verkehr bei Sektorisierung und unterschiedlicher Clustergröße . . . . .	64
2.4.4	Sektorisierung bei Abschattung . . . . .	65
2.5	Das ISO/OSI-Referenzmodell . . . . .	66
2.6	Zuteilung der Funkkanäle . . . . .	69
2.6.1	Frequenzmultiplex, FDM . . . . .	70
2.6.2	Zeitmultiplex, TDM . . . . .	71
2.6.3	Codemultiplex, CDM . . . . .	72
2.6.4	CDMA-Technik für den zellularen Mobilfunk . . . . .	75
2.6.5	Raummultiplex, SDM . . . . .	81
2.6.6	Hybride Verfahren . . . . .	81
2.7	Kanalvergabestrategien . . . . .	82
2.7.1	Klassifizierung der Kanalvergabeverfahren . . . . .	82
2.7.2	FCA . . . . .	83
2.7.3	BCA . . . . .	84
2.7.4	DCA . . . . .	85
2.7.5	HCA . . . . .	85
2.7.6	Adaptivität der BCA/HCA-Kanalvergabeverfahren . . . . .	85
2.8	Grundlagen der Fehlersicherung . . . . .	86
2.8.1	Besonderheiten der Fehlersicherung bei Funkkanälen . . . . .	86
2.8.2	Fehlererkennung . . . . .	87
2.8.3	Fehlerkorrektur . . . . .	88
2.8.4	Fehlerbehandelnde Verfahren (Schiebefensterprotokolle) . . . . .	92
2.8.5	Hybride ARQ/FEC-Verfahren . . . . .	100
2.9	Grundlagen zum Zufallszugriff . . . . .	100
2.9.1	Die Slotted-ALOHA Zugriffsmethode . . . . .	101

2.9.2	Slotted-ALOHA mit Zufallszugriffsrahmen . . . . .	111
2.9.3	Zugriffsverzögerung bei Slotted-ALOHA . . . . .	118
2.9.4	Algorithmen zur Kollisionsauflösung bei Slotted-ALOHA . . . . .	124
<b>3</b>	<b>GSM-System</b>	<b>135</b>
3.1	Die GSM-Empfehlung . . . . .	135
3.2	Die Architektur des GSM-Systems . . . . .	139
3.2.1	Funktioneller Aufbau des GSM-Systems . . . . .	139
3.2.2	Schnittstellen des GSM-Systems . . . . .	151
3.3	Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt $U_m$ . . . . .	153
3.3.1	Multiplex-Struktur . . . . .	153
3.3.2	Frequency Hopping (FH) . . . . .	159
3.3.3	Logische Kanäle . . . . .	159
3.3.4	Hierarchie der Rahmenstrukturen . . . . .	164
3.3.5	Kombinationen logischer Kanäle . . . . .	164
3.3.6	Kanalkombinationen einer Zelle in Abhängigkeit von der erwarteten Zellauslastung . . . . .	171
3.3.7	Schicht 1: Bitübertragung . . . . .	172
3.3.8	GSM-Schicht-2: Sicherung . . . . .	184
3.4	Signalisierungsprotokolle der GSM-Sicherungsschicht . . . . .	185
3.4.1	Das LAPD <sub>m</sub> -Protokoll . . . . .	187
3.4.2	Dienste der physikalischen Schicht . . . . .	195
3.4.3	Einfluß der physikalischen Schicht auf das LAPD <sub>m</sub> . . . . .	195
3.4.4	Dienste des LAPD <sub>m</sub> . . . . .	198
3.5	Die Netzschicht im GSM . . . . .	200
3.5.1	Verbindungsaufbau . . . . .	202
3.5.2	Dienste der CC-Teilschicht . . . . .	203
3.5.3	Dienste der MM-Teilschicht . . . . .	206
3.5.4	Dienste der RR-Teilschicht . . . . .	209
3.5.5	Format und Codierung einer Schicht-3-Nachricht . . . . .	210
3.5.6	Weiterleiten einer Schicht-3-Nachricht . . . . .	213
3.5.7	Primitive der Teilschichten . . . . .	215
3.6	GSM-Handover . . . . .	215
3.6.1	Notwendigkeit für Handover . . . . .	216
3.6.2	GSM-Empfehlungen . . . . .	216
3.6.3	Handovervorbereitung . . . . .	217
3.6.4	Meßwertreporte . . . . .	223
3.6.5	Handoverentscheidung . . . . .	227
3.6.6	Beispielalgorithmus GSM 05.08 . . . . .	231
3.6.7	Probleme des GSM-Handoverprozesses . . . . .	236
3.6.8	Intra-MS-Handover . . . . .	237
3.6.9	Das Intra-MS-Handoverprotokoll . . . . .	242

3.6.10	Inter-MSK Handover . . . . .	258
3.7	Aktualisierung des Aufenthaltsbereiches ( <i>Location Update</i> ) . . . . .	259
3.7.1	Unterstützung von Roaming . . . . .	261
3.7.2	Numerierungsplan für das Roaming . . . . .	261
3.8	Verbindungsaufbau . . . . .	263
3.8.1	Kommender Ruf ( <i>Mobile Terminated Call</i> ) . . . . .	263
3.8.2	Gehender Ruf ( <i>Mobile Originated Call</i> ) . . . . .	265
3.9	Datenübertragung und Raten-Anpassungsfunktionen . . . . .	266
3.9.1	Ratenanpassung an die Leistung des Verkehrskanals . . . . .	266
3.9.2	Ratenanpassung bei der Verbindung BTS/Transcoder zur MSC bzw. MSC/IWF . . . . .	270
3.9.3	Schicht-2-Brückenfunktion ( <i>Layer 2 Relay, L2R</i> ) und <i>Radio Link Protocol (RLP)</i> . . . . .	270
3.9.4	Das Radio-Link Protokoll (RLP) . . . . .	270
3.10	Die Dienste im GSM-Mobilfunknetz . . . . .	272
3.10.1	Einführungsphasen der Dienste . . . . .	273
3.10.2	Trägerdienste . . . . .	274
3.10.3	Teledienste . . . . .	277
3.10.4	Zusatzdienste . . . . .	282
3.11	Zukünftige Sprach- und Datendienste im GSM . . . . .	283
3.11.1	ASCI – erweiterte GSM-Sprachdienste . . . . .	284
3.11.2	HSCSD – der hochbitratige kanalvermittelte Datendienst . . . . .	289
3.11.3	GPRS – der GSM-Paketdatendienst . . . . .	294
3.12	Netzübergangsfunktion – <i>Interworking Function, IWF</i> . . . . .	321
3.12.1	Übergang zum öffentlichen Fernsprechwählnetz . . . . .	322
3.12.2	Übergang zum ISDN . . . . .	322
3.12.3	Übergang zum öffentlichen paketvermittelten Datennetz . . . . .	323
3.12.4	Übergang zum öffentlichen kanalvermittelten Datennetz . . . . .	324
3.12.5	Netzübergangsfunktionen für Teledienste . . . . .	324
3.13	Sicherheitsaspekte . . . . .	325
3.13.1	Authentisierung . . . . .	326
3.13.2	Vertraulichkeit der Nutz- und Signalisierdaten . . . . .	326
3.13.3	Vertraulichkeit der Teilnehmeridentität . . . . .	327
3.13.4	Transport sicherheitsrelevanter Informationen . . . . .	327
3.14	GSM in Deutschland . . . . .	329
3.15	Schlußbemerkung . . . . .	329
3.16	Digital-Mobilfunknetz ETSI/DCS1800 . . . . .	338
3.17	Enhanced Data Rates for GSM Evolution . . . . .	340
3.17.1	Modulation . . . . .	341
3.17.2	Sendeleistungssteuerung . . . . .	342
3.17.3	Steuerung der Übertragungsqualität . . . . .	343

<b>4</b>	<b>Weitere öffentliche Mobilfunksysteme</b>	<b>347</b>
4.1	Flugtelefon-Netz für öffentliche Luft-Boden-Kommunikation . . . . .	347
4.1.1	TFTS-Zellulernetz . . . . .	347
4.1.2	Frequenz- und Zeitmultiplexkanäle . . . . .	348
4.1.3	Sprach- und Datenübertragung . . . . .	349
4.1.4	Funktionsmerkmale . . . . .	349
4.1.5	Bodenstationen und Frequenzplan . . . . .	351
4.2	Das US Digital Cellular System (USDC) . . . . .	351
4.2.1	Technische Daten des USDC-Systems . . . . .	353
4.3	CDMA-Zellularfunk gemäß IS-95 . . . . .	354
4.3.1	Forward-Link . . . . .	354
4.3.2	Return-Link . . . . .	359
4.3.3	Praktische Erfahrungen mit IS-95-CDMA . . . . .	363
4.4	Das japanische Personal Digital Cellular System (PDC) . . . . .	365
4.4.1	Technische Daten des PDC-Systems . . . . .	365
4.5	Vergleich von Zellularsystemen der 2. Generation . . . . .	367
<b>5</b>	<b>Zellulare Mobilfunknetze der 3. Generation</b>	<b>369</b>
5.1	UMTS – Universal Mobile Telecommunications System . . . . .	372
5.2	FPLMTS – IMT 2000 . . . . .	374
5.3	Dienste für UMTS und IMT-2000 . . . . .	376
5.3.1	Trägerdienste . . . . .	376
5.3.2	Teledienste . . . . .	378
5.3.3	Zusatzdienste . . . . .	379
5.3.4	Mehrwertdienste . . . . .	380
5.3.5	Dienstparameter . . . . .	380
5.3.6	Verkehrsdichte . . . . .	382
5.4	Frequenzspektrum für UMTS . . . . .	385
5.5	Die Architektur des UMTS . . . . .	388
5.5.1	User Equipment Domain . . . . .	388
5.5.2	Access Network Domain . . . . .	389
5.5.3	Core Network Domain . . . . .	389
5.6	Die Zugangsebene . . . . .	390
5.6.1	Das Kernnetz . . . . .	391
5.6.2	UMTS Terrestrial Radio Access Network . . . . .	392
5.6.3	Funktionaler Aufbau des UTRAN . . . . .	393
5.6.4	Funktionen des UTRAN . . . . .	393
5.7	Die Funkschnittstelle am Bezugspunkt $U_u$ . . . . .	397
5.8	Die Bitübertragungsschicht . . . . .	399
5.8.1	Vielfachzugriff . . . . .	399
5.8.2	Die Transportkanäle . . . . .	402
5.8.3	Physikalische Kanäle im FDD-Modus . . . . .	408

5.8.4	Physikalische Kanäle im TDD-Modus . . . . .	417
5.8.5	Code-Spreizung und Modulation . . . . .	421
5.8.6	Kanalcodierung, Multiplexen und Verschachteln . . . . .	426
5.9	Die Sicherungsschicht . . . . .	434
5.9.1	Die MAC-Teilschicht . . . . .	434
5.9.2	Die RLC-Teilschicht . . . . .	442
5.9.3	Datenfluß durch die Sicherungsschicht . . . . .	446
5.9.4	Die BMC-Teilschicht . . . . .	448
5.9.5	Die PDCP-Teilschicht . . . . .	448
5.10	Die Netzschicht . . . . .	450
5.10.1	Funktionen der Netzschicht . . . . .	450
5.10.2	Aufbau der Netzschicht . . . . .	452
5.11	Der UMTS Standard . . . . .	453
<b>A</b>	<b>Warte- und Verlustsysteme</b>	<b>463</b>
A.1	Das Wartesystem $M/M/n-\infty$ . . . . .	463
A.1.1	Zustandsprozeß als spezieller Geburts- und Sterbe-Prozeß . . . . .	464
A.1.2	Charakteristische Leistungskenngrößen . . . . .	465
A.2	Das Warte-Verlustsystem $M/M/n-s$ . . . . .	467
A.2.1	Zustandsraum als spezieller GS-Prozeß . . . . .	467
A.2.2	Charakteristische Größen . . . . .	468
<b>B</b>	<b>Standards und Empfehlungen</b>	<b>471</b>
B.1	Internationale Standardisierungsorganisationen . . . . .	472
B.1.1	ISO . . . . .	472
B.1.2	ITU . . . . .	473
B.1.3	IEC . . . . .	477
B.1.4	INTELSAT/INMARSAT . . . . .	478
B.1.5	ATM Forum . . . . .	478
B.2	Europäische Standardisierungsorganisationen . . . . .	478
B.2.1	CEN/CENELEC . . . . .	479
B.2.2	CEPT . . . . .	479
B.2.3	ETSI . . . . .	480
B.2.4	ECMA . . . . .	488
B.2.5	EBU . . . . .	489
B.2.6	EUTELSAT . . . . .	489
B.2.7	ESA . . . . .	489
B.3	Nationale Standardisierungsorganisationen . . . . .	489
B.4	Quasi-Standards . . . . .	490
B.4.1	Firmen-Standards . . . . .	490
B.4.2	Benutzer-Standards . . . . .	491

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	XIX
<b>C Internationale Frequenzzuweisungen</b>	<b>493</b>
<b>D Frequenzen europäischer Mobilfunksysteme</b>	<b>497</b>
<b>E Der GSM-Standard</b>	<b>499</b>
<b>F Abkürzungen</b>	<b>505</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>525</b>
<b>Index</b>	<b>539</b>