

Inhaltsverzeichnis

1	Long Term Evolution (LTE) und LTE-Advanced	1
1.1	Einleitung und Überblick	1
1.2	Netzwerk-Architektur und Schnittstellen	2
1.2.1	LTE-Endgeräte und die LTE Uu-Schnittstelle	3
1.2.2	Der eNodeB und die S1 und X2-Schnittstellen	6
1.2.3	Die Mobility Management Entity (MME)	10
1.2.4	Das Serving-Gateway	11
1.2.5	Das PDN-Gateway	12
1.2.6	Das HSS	14
1.2.7	Abrechnungssysteme	16
1.2.8	Qualitäts- und Prioritätssteuerung	16
1.3	Die LTE-Luftschnittstelle und das Radionetzwerk	17
1.3.1	OFDMA für die Datenübertragung im Downlink	18
1.3.2	SC-FDMA für Uplink Übertragungen	20
1.3.3	Quadrature Amplitude Modulation für Subcarrier	21
1.3.4	Symbole, Slots, Radio Blocks und Frames	23
1.3.5	Referenz- und Synchronisations-Signale	25
1.3.6	Das LTE-Kanalmodel in Downlink-Richtung	25
1.3.7	Downlink Management-Kanäle	27
1.3.8	System Information Messages (SIBs)	28
1.3.9	Das LTE-Kanalmodel in der Uplink-Richtung	29
1.3.10	Multiple Input Multiple Output Übertragungen	29
1.3.11	HARQ und ARQ	32
1.3.12	PDCP – Komprimierung und Verschlüsselung	35
1.3.13	Der LTE Protokoll Stack	36
1.4	Scheduling	38
1.4.1	Downlink Scheduling	38
1.4.2	Uplink Scheduling	42
1.5	Grundsätzliche Prozeduren	43
1.5.1	Netzwerksuche	43

1.5.2	Attach und Aktivierung des Default Bearers	46
1.5.3	Handover Szenarien	50
1.6	Mobility Management und Leistungsoptimierung	53
1.6.1	Mobilitätsmanagement im RRC-Connected State	53
1.6.2	Mobility Management im Idle State	56
1.6.3	Mobility Management und Zustandsänderungen in der Praxis	58
1.7	LTE Sicherheitsarchitektur	60
1.8	Zusammenspiel mit UMTS und GSM	61
1.8.1	Cell Reselection zwischen LTE und GSM/UMTS	62
1.8.2	RRC Connection Release mit Redirect zwischen LTE und GSM/UMTS	64
1.9	Carrier Aggregation	64
1.9.1	CA Varianten, Bandbreitenklassen und Bandkombinationen	66
1.9.2	CA Konfigurationen, Aktivierung und Deaktivierung	68
1.9.3	Uplink Carrier Aggregation	71
1.10	Von Dipolen zu Aktiven Antennen und Gigabit Backhaul	72
1.11	Self-Organizing Networks	74
1.12	Kapazität eines Standortes und Anzahl gleichzeitiger Nutzer	75
1.13	CS-Fallback für Sprache und SMS mit LTE	77
1.13.1	SMS über SGs	78
1.13.2	CS Fallback	79
1.14	Network Sharing – MOCN und MORAN	81
1.14.1	National Roaming	81
1.14.2	MOCN (Multi-Operator Core Network)	82
1.14.3	MORAN (Mobile Operator Radio Access Network)	84
1.15	IPv6 im Mobilfunk	84
1.15.1	Das IPv6 Prefix und Interface IDs	85
1.15.2	IPv6 und Roaming	88
1.15.3	IPv6 und Wi-Fi Tethering	88
1.15.4	IPv6-Only Kommunikation	90
1.16	Network Function Virtualization	91
1.16.1	Virtualisierung auf dem Desktop	91
1.16.2	Nutzung eines Betriebssystems in einer virtuellen Maschine	92
1.16.3	Das gleichzeitige Ausführen mehrerer virtueller Maschinen	93
1.16.4	Snapshots von Virtuellen Maschinen	94
1.16.5	Klonen einer Virtuellen Maschine	94
1.16.6	Virtualisierung in Rechenzentren in der Cloud	95

1.16.7	Administration von Virtuellen Maschinen in der Cloud	96
1.16.8	Network Function Virtualization	97
1.16.9	Router Virtualisierung	98
1.16.10	Software-Defined Networking	99
1.17	Machine Type Communication (MTC) und das Internet der Dinge	100
1.17.1	LTE CAT-1 Endgeräte	101
1.17.2	LTE CAT-0 Endgeräte und PSM	101
1.17.3	LTE CAT-M1 Endgeräte	102
1.17.4	LTE NB1 (NB-IoT) Endgeräte.	103
1.17.5	NB-IoT Konfigurationsoptionen	104
1.17.6	Die NB-IoT Luftschnittstelle	104
1.17.7	NB-IoT Control Channels und Scheduling	105
1.17.8	NB-IoT Multi-Carrier Operation	106
1.17.9	NB-IoT Durchsatz und Anzahl der Geräte pro Zelle	107
1.17.10	NB-IoT Stromsparmechanismen	108
1.17.11	NB-IoT – High Latency Kommunikation	108
1.17.12	NB-IoT – Optimierung von IP und nicht-IP basieren Datenübertragungen	110
1.17.13	NB-IoT Zusammenfassung	112
1.18	Fragen und Aufgaben	112
2	5G New Radio (NR) und das 5G Kernnetz.	115
2.1	Einführung und Überblick	115
2.1.1	Gründe für den 5G Start als Hybrid Lösung	116
2.1.2	Frequency Range 1 und 2.	117
2.1.3	Dynamic Spectrum Sharing in Low- und Mid-Bands	118
2.1.4	Netze in der Praxis und weiterer Aufbau des Kapitels.	118
2.2	Die 5G Non-Standalone (NSA) Architektur	119
2.2.1	Netzwerk Architektur und Schnittstellen	119
2.2.2	3GPP 5G NR Option 2 und 3 mit Dynamic Spectrum Sharing	122
2.2.3	Unterschiede der Optionen 3, 3A und 3X	123
2.2.4	Das Fronthaul Interface	125
2.3	Die 5G TDD Luftschnittstelle	126
2.3.1	Flexibles OFDMA für den Downlink	127
2.3.2	Das 5G Resource Grid: Symbole, Slots, Resource Blocks und Frames.	130
2.3.3	Synchronisation und Referenz Signale	132
2.3.4	Massive-MIMO für Beamforming und Multi-User Datenübertragung	133
2.3.5	TDD Slot Formate	136
2.3.6	Downlink Control Kanäle	139
2.3.7	Uplink Kanäle	140

2.3.8	Bandwidth Parts	141
2.3.9	Der Downlink Control Channel und das Scheduling	142
2.3.10	Downlink Geschwindigkeit in Theorie und Praxis	145
2.3.11	Downlink Datendurchsatz	147
2.3.12	Das TDD Air Interface in den mmWave Bändern (FR2)	148
2.4	Die 5G FDD Luftschnittstelle	149
2.4.1	Refarming und Dynamic Spectrum Sharing	151
2.5	EN-DC Bearer und Scheduling	156
2.5.1	Split Bearer und Flusskontrolle	157
2.5.2	Zwei Sender für EN-DC	158
2.6	Grundsätzliche Prozeduren und Mobility Management im Non-Standalone Mode	160
2.6.1	Aufbau eines LTE-Only Bearers als 5G Anker aus dem Flugmodus	160
2.6.2	Hinzufügen einer NR Zelle im Non-Standalone Modus	164
2.6.3	5G Anzeige im Display	169
2.6.4	Handover Szenarien	170
2.6.5	EN-DC Signaling Radio Bearers	173
2.6.6	5G Non-Standalone und VoLTE	174
2.7	Netzwerkplanung und Rollout Aspekte	174
2.7.1	Die Reichweite von Band n78	175
2.7.2	Backhaul Betrachtungen	175
2.8	Die 5G NR Standalone (SA) Architektur und grundsätzliche Prozeduren	176
2.8.1	Funktionen des 5G Kernnetz	176
2.8.2	Netzwerkschnittstellen	178
2.8.3	Teilnehmer und Geräte IDs	179
2.8.4	Prozeduren im 5G Kernnetz	180
2.8.5	Connection Management	180
2.8.6	Registration Management Prozeduren	181
2.8.7	Session Management	183
2.8.8	Mobility Management	187
2.8.9	Neue Sicherheitsfunktionen	188
2.8.10	Der 5G Kern und unterschiedliche RAN Optionen	191
2.8.11	Zusammenspiel der 5G und 4G Kernnetzwerke	191
2.8.12	Das 5G Kernnetz und SMS	196
2.8.13	Das Cloud Native 5G Kernnetz	197
2.9	Die 5G Standalone Luftschnittstelle	200
2.9.1	Der RRC Inactive Zustand	201
2.9.2	System Information Nachrichten	202
2.9.3	Messkonfiguration, Events und Handover	203
2.10	Network Slicing	204
2.11	Fragen	206

3	Voice over LTE und NR (VoLTE, VoNR)	209
3.1	Das Session Initiation Protocol (SIP)	210
3.2	Das IP Multimedia Subsystem (IMS) und VoLTE	215
3.2.1	Architekturüberblick	215
3.2.2	IMS Registrierung	217
3.2.3	Der VoLTE Gesprächsaufbau	219
3.2.4	LTE Bearer Konfiguration für VoLTE	221
3.2.5	Dedicated Bearer Setup mit Preconditions	224
3.2.6	Header Compression und DRX	226
3.2.7	Sprachcodecs und Aushandlung der Bandbreite	227
3.2.8	Freiton, Ring-Back Melodien und Early-Media	231
3.2.9	Verwendung von Ports	231
3.2.10	Filterung von Nachrichten und Asserted Identities	232
3.2.11	DTMF Töne	233
3.2.12	SMS über IMS	234
3.2.13	Konfiguration der Anrufweiterleitung und XCAP	235
3.2.14	Single Radio Voice Call Continuity	238
3.2.15	Wahl des Radionetzwerkes, T-ADS und VoLTE Interworking mit GSM und UMTS	242
3.2.16	VoLTE Notrufe	243
3.3	VoLTE Roaming	245
3.3.1	Option 1: VoLTE Local Breakout	246
3.3.2	Option 2: VoLTE S8-Home Routing	247
3.4	Voice und 5G NR	249
3.4.1	IMS Signalisierung über 5G SA	250
3.4.2	5G NR EPS Fallback	252
3.4.3	5G Voice over NR (VoNR)	253
3.5	Voice over Wifi (VoWifi)	253
3.5.1	VoWifi Netzwerkarchitektur	254
3.5.2	VoWifi Handover	256
3.5.3	Wifi-Preferred und Cellular-Preferred	257
3.5.4	SMS, MMS und Supplementary Services über Wifi	258
3.5.5	VoWifi Roaming	259
3.6	VoLTE und Festnetz IMS – Ein Vergleich	260
3.7	Fragen und Aufgaben	261
4	Wireless LAN IEEE 802.11	265
4.1	Wireless LAN Überblick	265
4.2	Geschwindigkeiten und Standards	266
4.3	WLAN-Konfigurationen: Von Ad-hoc bis Wireless Bridging	269
4.3.1	Ad-hoc, BSS, ESS und Wireless Bridging	269
4.3.2	SSID und Frequenzwahl	273

4.4	Management-Operationen	275
4.5	Die MAC-Schicht	281
4.5.1	Zugriffssteuerung auf das Übertragungsmedium	281
4.5.2	Der MAC Header	284
4.6	Physical Layer und MAC-Erweiterungen	286
4.6.1	IEEE 802.11b mit bis zu 11 Mbit/s	286
4.6.2	IEEE 802.11g mit bis zu 54 Mbit/s	289
4.6.3	IEEE 802.11a mit bis zu 54 Mbit/s	291
4.6.4	IEEE 802.11n mit bis zu 600 Mbit/s	292
4.6.5	IEEE 802.11ac mit bis zu 6,8 Gbit/s	302
4.6.6	IEEE 802.11ax – Wi-Fi 6 – High Efficiency Erweiterungen	308
4.7	Wireless LAN-Sicherheit	313
4.7.1	Wired Equivalent Privacy (WEP) und frühere Sicherheitsverfahren	313
4.7.2	WPA und WPA-2 Personal Mode-Authentifizierung	313
4.7.3	WPA und WPA-2 Enterprise Mode Authentifizierung – EAP- TLS	315
4.7.4	WPA und WPA-2 Enterprise Mode Authentication – EAP- TTLS	317
4.7.5	WPA und WPA-2 Enterprise Mode Authentication – EAP- PEAP	319
4.7.6	WPA und WPA Enterprise Mode Authentifizierung – EAP- SIM	321
4.7.7	Verschlüsselung mit WPA und WPA-2	323
4.7.8	Wi-Fi Protected Setup (WPS)	324
4.7.9	WPA3 Personal Mode Authentication	326
4.7.10	Protected Management Frames	328
4.8	IEEE 802.11e und WMM – Quality of Service	330
4.9	Fragen und Aufgaben	337
5	Bluetooth	339
5.1	Überblick und Anwendungen	339
5.2	Physikalische Eigenschaften	341
5.3	Piconetze und das Master Slave Konzept	344
5.4	Der Bluetooth Protokoll Stack	347
5.4.1	Der Baseband Layer	347
5.4.2	Der Link Controller	353
5.4.3	Der Link Manager	356
5.4.4	Das HCI Interface	357
5.4.5	Der L2CAP Layer	360
5.4.6	Das Service Discovery Protocol	362

5.4.7	Der RFCOMM Layer.	364
5.4.8	Aufbau einer Verbindung im Überblick.	366
5.5	Bluetooth Sicherheit.	367
5.5.1	Pairing bis Bluetooth 2.0	367
5.5.2	Pairing ab Bluetooth 2.1 (Secure Simple Pairing).	369
5.5.3	Authentifizierung	371
5.5.4	Verschlüsselung	371
5.5.5	Autorisierung	373
5.5.6	Sicherheitsmodi	374
5.6	Bluetooth Profile	375
5.6.1	Grundlegende Profile: GAP, SDP und Serial Profile	376
5.6.2	Object Exchange Profile: FTP, Object Push und Synchronize	377
5.6.3	Headset, Hands-Free und SIM-Access Profile.	380
5.6.4	High Quality Audio Streaming	384
5.6.5	Das Human Interface Device (HID) Profile.	387
5.7	Fragen und Aufgaben.	389
6	GSM	391
6.1	Leitungsvermittelnde Datenübertragung	391
6.1.1	Klassische Leitungsvermittlung	392
6.1.2	Virtuelle Leitungsvermittlung über IP	394
6.2	Standards	395
6.3	Übertragungsgeschwindigkeiten	396
6.4	Das Signalisierungssystem Nr. 7	397
6.4.1	Klassischer SS-7-Protokollstack	398
6.4.2	Spezielle SS-7-Protokolle für GSM.	401
6.4.3	IP-basierter SS-7-Protokollstack	402
6.5	Die GSM Subsysteme	403
6.6	Das Network Subsystem	404
6.6.1	Die Mobile Vermittlungsstelle (MSC), Server und Gateway	405
6.6.2	Das Visitor Location Register (VLR).	409
6.6.3	Das Home Location Register (HLR)	410
6.6.4	Das Authentication Center (AC)	413
6.6.5	Das Short Message Service Center (SMSC)	415
6.7	Das Base Station Subsystem (BSS) und Sprachcodierung	417
6.7.1	Frequenzbereiche	417
6.7.2	Base Transceiver Station (BTS).	419
6.7.3	Die GSM-Luftschnittstelle.	420
6.7.4	Der Base Station Controller (BSC)	428
6.7.5	Die TRAU für Sprachdatenübertragung	433
6.7.6	Channel Coder und Interleaver in der BTS	438

6.7.7	Verschlüsselung	440
6.7.8	Modulation	442
6.7.9	Voice Activity Detection	442
6.8	Mobility Management und Call Control	444
6.8.1	Cell Reselection und Location Area Update	444
6.8.2	Mobile Terminated Call	446
6.8.3	Handoverszenarien	449
6.9	Mobile Endgeräte	452
6.9.1	Aufbau eines einfachen GSM Telefons	452
6.9.2	Aufbau eines Smartphones	454
6.10	Die SIM-Karte	456
6.11	Das Intelligent Network Subsystem und CAMEL	461
6.12	Fragen und Aufgaben	464
7	GPRS und EDGE	465
7.1	Leitungsvermittelte Datenübertragung	466
7.2	Paketorientierte Datenübertragung	467
7.3	GPRS auf der Luftschnittstelle	470
7.3.1	GPRS Timeslot-Nutzung im Vergleich zu GSM	470
7.3.2	Gleichzeitige Nutzung einer Basisstation von GSM und GPRS	472
7.3.3	Coding Schemes	473
7.3.4	EDGE (EGPRS)	474
7.3.5	Mobile Device Classes	476
7.3.6	Network Operation Mode (NOM)	477
7.3.7	GPRS-Kanalstruktur auf der Luftschnittstelle	479
7.4	GPRS-Zustandsmodell	481
7.5	GPRS-Netzwerkelemente	484
7.5.1	Die Packet Control Unit (PCU)	484
7.5.2	Der Serving GPRS Support Node (SGSN)	485
7.5.3	Der Gateway GPRS Support Node (GGSN)	487
7.6	GPRS Radio Resource Management	488
7.7	GPRS-Schnittstellen und Protokolle	491
7.8	GPRS Mobility und Session Management (GMM/SM)	496
7.8.1	Mobility Management-Aufgaben	496
7.8.2	GPRS Session Management	499
7.9	Session Management aus Anwendersicht	502
7.9.1	Leitungsvermittelter Verbindungsaufbau	503
7.9.2	GPRS-Verbindungsaufbau	504
7.10	Fragen und Aufgaben	506
	Stichwortverzeichnis	509