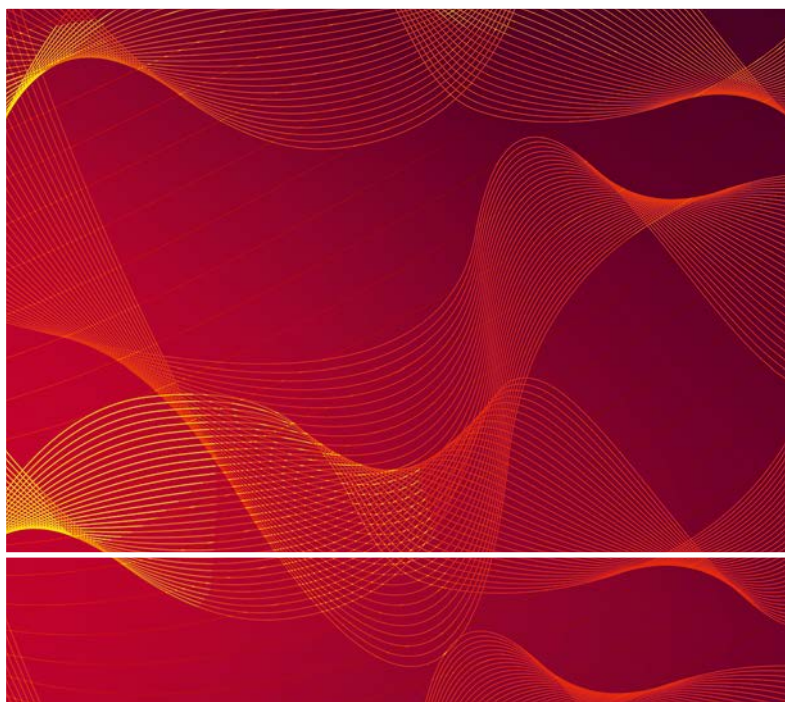


Jens Mückenheim

Mobilfunk verstehen

Grundlagen für Studium und Praxis



HANSER

Mückenheim **Mobilfunk verstehen**



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Jens Mückenheim

Mobilfunk verstehen

Grundlagen für Studium und Praxis

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Jens Mückenheim, Hochschule Merseburg

Print-ISBN: 978-3-446-48540-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-48706-2

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © gettyimages.de/AniGraphics

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	IX
1 Einführung	1
1.1 Grundlagen und Geschichte	1
1.2 Struktur zellularer Mobilfunknetze	5
1.3 Funkressourcenzuteilung	10
1.4 Prinzip der digitalen Datenübertragung	12
1.5 Übungsfragen	15
2 Mobilfunkkanal	17
2.1 Einführung	18
2.2 Pfadverlustmodelle	21
2.2.1 Freiraumausbreitung	21
2.2.2 Zweiwegeausbreitung	22
2.2.3 Erweiterte Pfadverlustmodelle	25
2.2.4 Langsamer Schwund	27
2.2.5 Störeinflüsse	30
2.3 Schnelle Kanalveränderungen	33
2.3.1 Schneller Schwund	33
2.3.2 Doppler-Effekt	40
2.3.3 Mehrwegeausbreitung	43
2.3.4 Gesamtbild	48
2.4 Diversitätsempfang	51

2.5	Komplexwertiges Übertragungsmodell	54
2.6	Übungsfragen	56
3	Digitale Modulation	57
3.1	Einführung	58
3.1.1	Grundlagen der Modulation	58
3.1.2	Analoge Modulationsverfahren	59
3.2	Digitale Modulationsverfahren	61
3.2.1	Einfache Modulationsverfahren	61
3.2.2	Minimum Shift Keying	64
3.2.3	Höherwertige Modulation	66
3.2.4	Pulsformung	70
3.2.5	Mehrträgermodulation	78
3.3	Empfang digital modulierter Signale	79
3.3.1	Empfangsverfahren	79
3.3.2	Empfang höherwertiger Modulation	86
3.3.3	Fehlerverhalten im Fading-Kanal	90
3.3.4	Diversitätsempfang	92
3.3.5	Praktische Aspekte	96
3.4	Kanalentzerrung	97
3.5	Komplexwertige Signalverarbeitung	100
3.6	Übungsfragen	102
4	Fehlerkorrektur/Codierung	103
4.1	Einführung	103
4.2	Grundlegende Fehlerkorrekturverfahren	106
4.2.1	Blockcodierung	106
4.2.2	Faltungscodierung	114
4.2.3	Interleaving	122
4.2.4	Punktierung	125
4.3	Erweiterungen	129
4.3.1	Codeverkettung	129
4.3.2	Turbocodierung	130
4.3.3	LDPC-Codierung	135
4.3.4	HARQ mit Kombination der Dateninformation	136

4.4	Quellcodierung zur Datenreduktion	138
4.4.1	Einführung	138
4.4.2	Sprachcodierung	141
4.5	Übungsfragen.....	143
5	Vielfachzugriffsverfahren	145
5.1	Grundlagen.....	146
5.1.1	Problemstellung.....	146
5.1.2	Methoden des Vielfachzugriffs.....	147
5.1.3	Duplexübertragung.....	149
5.2	Zugriff im Zeit-/Frequenzbereich	152
5.2.1	Frequenzvielfachzugriff.....	152
5.2.2	Zeitvielfachzugriff.....	153
5.2.3	Kombinierter Zeit- und Frequenzzugriff.....	154
5.3	Codevielfachzugriff.....	157
5.3.1	Grundlagen.....	157
5.3.2	Realisierung	160
5.3.3	Grundeigenschaften	163
5.3.4	Verhalten in der Mobilfunkumgebung.....	169
5.3.5	Mehrnutzer-CDMA	173
5.4	Orthogonaler Frequenzvielfachzugriff.....	177
5.4.1	Grundlagen.....	177
5.4.2	Realisierung	180
5.4.3	Verhalten in der Mobilfunkumgebung.....	183
5.4.4	Signaleigenschaften	189
5.5	Übungsfragen.....	193
6	Mehrantennentechnologien	195
6.1	Einführung	195
6.2	Mehrantennenkonzepte	198
6.2.1	Einzelantennensystem.....	198
6.2.2	Empfangsdiversität.....	199
6.2.3	Sendediversität.....	201
6.2.4	MIMO-Übertragung.....	204
6.2.5	Strahlformung	206
6.3	Leistungsfähigkeit.....	209

6.4	Verfahren mit verteilten Standorten	213
6.4.1	Mehrfachnutzer-MIMO	213
6.4.2	Mehrpunktübertragung	214
6.4.3	Massive MIMO	215
6.5	Übungsfragen	217
7	Funkressourcenverwaltung	219
7.1	Einführung	220
7.2	Zellulares Konzept – Handover	223
7.2.1	Funkzellen	223
7.2.2	Handover-Kontrolle	229
7.3	Leistungsregelung – Lastmanagement	232
7.3.1	Leistungsregelung	232
7.3.2	Interferenzmanagement	238
7.4	Ratenanpassung – schnelle Zuteilung	243
7.4.1	Anpassung der Senderate	243
7.4.2	Dynamische Ressourcenzuteilung	245
7.5	Direktzugriffskontrolle	251
7.5.1	Grundlagen	251
7.5.2	Verhalten in der Funkumgebung	254
7.6	Erweiterungen	255
7.7	Übungsfragen	257
8	Lösungen zu den Übungsfragen	259
8.1	Lösungen zu Abschnitt 1.5	259
8.2	Lösungen zu Abschnitt 2.6	261
8.3	Lösungen zu Abschnitt 3.6	262
8.4	Lösungen zu Abschnitt 4.5	264
8.5	Lösungen zu Abschnitt 5.5	266
8.6	Lösungen zu Abschnitt 6.5	270
8.7	Lösungen zu Abschnitt 7.7	272
9	Abkürzungsverzeichnis	275
	Literatur	281
	Index	283

Vorwort

Seit seiner Einführung vor mehr als 30 Jahren erfährt der digitale Mobilfunk zunehmende Verbreitung, die mittlerweile alle Bereiche des täglichen Lebens umfasst. Zum einen wird der digitale Mobilfunk als persönliche Informationsquelle und Kommunikationsmittel genutzt, für die Smartphones, Tablets usw. verwendet werden. Dies geschieht zumeist unbewusst, ohne auch nur einen Gedanken über deren Funktionsweise zu verlieren. Zum anderen ist das vielfältige Wirken des digitalen Mobilfunks im Verborgenen zu berücksichtigen, bei welcher z. B. mittels Maschine-zu-Maschine-(M2M-)Kommunikation Daten in Industrie, Logistik oder Umweltsteuerung ausgetauscht werden.

Eine große Bedeutung kommt hierbei der Vermittlung von entsprechendem Wissen, z. B. an Studierende in den betreffenden Bereichen, zu. Auch wenn man selbst nicht an der Entwicklung der Technologien beteiligt ist, sind die Hintergründe unter anderem bei der Anwendung im industriellen Umfeld wichtig. Das vorliegende Buch soll einen Beitrag zur Einführung in dieses Themengebiet leisten. Es entstand aus den Materialien von Grundlagenvorlesungen im Bereich Mobilfunk, welche seit 2011 vorrangig an der Hochschule Merseburg sowie an anderen Hochschulen gehalten wurden. Ebenfalls eingeflossen sind vielfältige Erfahrungen aus meiner vorangegangenen mehrjährigen Tätigkeit in der Mobilfunkindustrie.

Ausgehend von einer Beschreibung der bei der Mobilfunkübertragung auftretenden Umgebungseinflüsse werden zunächst die Verfahren vorgestellt, welche zur Aufprägung der digitalen Daten auf das analoge Funksignal mittels Modulation dienen (Kapitel 1 bis Kapitel 3). Danach erfolgt eine Darstellung der Methoden zur Behandlung der bei der Funkübertragung auftretender Fehler mittels Fehlerkorrektur (Kapitel 4). Eine wichtige Rolle spielen die anschließend behandelten Vielfachzugriffsverfahren, welche für das Verständnis der jeweiligen Mobilfunksysteme eine entscheidende Rolle spielen (Kapitel 5). Bei allen Betrachtungen wird hierbei immer der Bezug auf die vorangehend beschriebenen Einflüsse des Funkkanals hergestellt. Anschließend

wird eine Zusammenfassung von Antennenkonzepten gegeben, welche sukzessive eingeführt wurden, um z. B. die Qualität oder auch Kapazität in den verschiedenen Mobilfunkgenerationen z. T. signifikant zu verbessern (Kapitel 6). Zum Abschluss erfolgt eine Übersicht auf die in modernen Mobilfunksystemen verwendeten Verfahren zur Funkressourcenverwaltung (Kapitel 7).

Zahlreiche Bilder zeigen auf anschauliche Weise die Wirkungsweise der untersuchten Verfahren, illustrieren wichtige Zusammenhänge und verdeutlichen deren Leistungsfähigkeit. Die im Buch vorgestellten Formeln sowie mathematischen Ableitungen unterstützen das Verständnis der jeweils behandelten Methoden und Zusammenhänge. Für die Darstellung weiterer Details wird auf die weiterführende Literatur verwiesen. Ausgewählte Beispiele vertiefen die im Text behandelten Sachverhalte bzw. verweisen auf entsprechende Implementierungen innerhalb der Mobilfunksysteme. Übungsfragen am Ende jedes Kapitels ermöglichen eine gezielte Wiederholung der für das Grundverständnis der jeweiligen Themengebiete essenziellen Zusammenhänge. In Kapitel 8 werden die Lösungen zu den Übungsfragen bereitgestellt.

In Kapitel 9 sind die im Buch verwendeten Abkürzungen zusammengestellt, welche auch innerhalb des Mobilfunks weit verbreitet sind. Das Literaturverzeichnis verweist auf vielfältige weiterführende Quellen, wobei der Fokus auf einschlägige Lehr- bzw. Fachbücher gelegt wird, unabhängig davon, ob diese die jeweilige Erstveröffentlichung spezifischer Sachverhalte darstellen.

Dieses Buch ist einerseits als Begleitlektüre zu einem einsemestrigen Kurs zum Mobilfunk in den Bereichen Elektrotechnik/Informationstechnik bzw. Technische Informatik gegen Ende des Bachelorstudiums geeignet. Andererseits kann es als Einstieg für weiterführende Inhalte, z. B. während eines Masterstudiums, dienen. Darüber hinaus kann sich jeder in der Praxis Tätige mithilfe dieses Buches die wichtigsten Grundlagen der Mobilfunktechnologien im Selbststudium aneignen.

Als Vorwissen sind Grundkenntnisse auf dem Gebiet der Nachrichtenübertragungstechnik von Vorteil. Ebenfalls nützlich ist ein Grundverständnis der Frequenzdarstellung sowie Wahrscheinlichkeitsrechnung. Dieses kann z. B. aus der angegebenen Literatur entnommen werden.

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Dr. Frank Baumann und Frau Christin Dölz von der Hochschule Merseburg für die wertvollen Ratschläge und Hinweise während der Vorbereitung dieses Buchprojekts bedanken. Des Weiteren danke ich meiner Kollegin Frau Prof. Monika Trundt für das gründliche Probelesen. Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. Philippa Söldenwagner-Koch, Frau Julia Stepp sowie Herrn Tim Borck vom Hanser Verlag für ihre hilfreiche Unterstützung während der Erstellung des Buches.

Merseburg, im Juni 2026

Jens Mückenheim

1

Einführung

Dieses Kapitel führt in das Umfeld der Mobilfunktechnologie ein. Zunächst werden die Randbedingungen beleuchtet und es wird ein kurzer Überblick zur Geschichte des Mobilfunks gegeben (Abschnitt 1.1). Danach erfolgt eine Beschreibung der Struktur von Mobilfunksystemen, wobei das dabei angewandte zellulare Prinzip erläutert wird (Abschnitt 1.2). Als Nächstes folgt eine grundlegende Einführung in die Grundlagen der Ressourcenzuteilung, wobei die angesprochenen Vielfachzugriffsverfahren eine zentrale Rolle bei der Beschreibung der verschiedenen Mobilfunksysteme spielen (Abschnitt 1.3). Zum Abschluss wird ein generisches Modell für die Signalverarbeitung gegeben (Abschnitt 1.4). Die dabei vorgestellten Elemente verweisen jeweils auf die Inhalte der weiteren Kapitel.

1.1 Grundlagen und Geschichte

Aufgaben und Bedingungen

Der öffentliche Mobilfunk, wie er im Weiteren betrachtet wird, soll eine möglichst effiziente funkbasierte Kommunikationsmöglichkeit für mobile Nutzer bereitstellen. Hierbei stellen sich folgende zum Teil herausfordernde Bedingungen gegenüber der leitungsgebundenen Übertragung dar:

- **Mobilität:** Durch die Änderung des Standortes der mobilen Nutzer ergeben sich mitunter stark schwankende Funkbedingungen (Fading), welche eine besondere Herausforderung bei der Datenübertragung darstellen. Des Weiteren ergibt sich durch die in Abschnitt 1.2 beschriebene Zellstruktur die Notwendigkeit von Zellwechseln (Handover), welche beim Verlassen des Funkversorgungsgebietes der derzeitigen Funkzelle durchgeführt werden müssen.

- **Variabler Datenverkehr:** Zu Beginn der Mobilfunktechnik bestand die Hauptaufgabe des Mobilfunks in der Übertragung von Sprachdaten, welche ein gut vorher-sagbares Verhalten aufweisen. Mittlerweile werden (z.B. durch Smartphones) neben der Sprachübertragung verschiedenste Anwendungen unterstützt. Diese können einerseits große Datenmengen übertragen (z.B. Herunterladen größerer Dateien, Videostreaming). Andere Dienste erzeugen im Hintergrund wenig aber häufig wiederkehrenden Datenverkehr (z.B. E-Mail-Update, Kurzinformationen). Mittlerweile existieren viele Anwendungen außerhalb der menschlichen Nutzung mit jeweils eigenen Anforderungen (z.B. Maschine-zu-Maschine, M2M). Insgesamt stellt dies eine besondere Herausforderung bei der Ressourcenvergabe dar, welche nun dynamisch mit kurzen Zeitintervallen (im Millisekunden-Bereich) durchgeführt wird.
- **Begrenzte Funkressourcen:** Das für die Mobilfunkkommunikation genutzte Frequenzspektrum ist stark begrenzt und daher sehr teuer.¹⁾ Aus diesem Grund wird von den Betreibern gefordert, dass die vorhandenen Ressourcen möglichst effizient zwischen den Teilnehmern (Vielfachzugriff) bzw. zwischen den Übertragungsrichtungen (Duplexing) verteilt werden (vgl. Abschnitt 1.3).

Geschichte

Der Mobilfunk als öffentliche Einrichtung wurde seit Mitte des 20. Jahrhunderts zunächst in den USA, später auch in anderen Ländern etabliert. Hierbei kann man die Entwicklung in mehreren Stufen, welche im Folgenden kurz betrachtet werden, zusammenfassen (vgl. [27] und [36]).

Analog: Die ersten Mobilfunksysteme, welche seit den 1950er-Jahren entstanden sind, ermöglichten die Benutzung von Mobiltelefonen, welche im Wesentlichen eine Sprachübertragung mittels Funkübertragung ermöglichten. Die Technik beruhte auf analoger Signalverarbeitung, wie sie schon beim damals etablierten Rundfunk und Fernsehen benutzt wurde. Durch ihre anfangs extrem hohen Kosten war die Nutzerzahl zunächst recht beschränkt. Waren zu Beginn die Möglichkeiten noch recht eingeschränkt nutzbar, ermöglichten spätere Mobilfunknetze eine weitgehend flächendeckende Versorgung sowie verschiedene Grundfunktionen (Erreichbarkeit, Handover), wie sie bei späteren digitalen Systemen implementiert wurden. Die Systeme selbst waren zumeist durch länderspezifische Technologien gekennzeichnet. Analoge Mobilfunksysteme²⁾ wurden bis in die 1990er-Jahre genutzt, wobei gegen Ende der Nutzung durch die wesentlich verbesserte Kostensituation sowie die dann guten

¹⁾ Die verwendeten Frequenzbereiche werden in Deutschland von der Bundesnetzagentur (BNetzA) vergeben. Mittels regelmäßig durchgeführter Frequenzauktionen werden zeitlich begrenzte Lizenzen für mehrere Milliarden Euro an die jeweiligen Betreiber zugeteilt.

²⁾ Nach Start der digitalen Systeme wurde der analoge Mobilfunk auch häufig als System der 1. Generation bezeichnet.

Eigenschaften der Mobilfunk begann, einen größeren Markt zu erreichen (C-Netz in Deutschland).

2. Generation: Nach 1990 begann der weltweite Ausbau von digitalen Mobilfunknetzen. Hierbei entstanden verschiedene Systeme, welche von Beginn länderübergreifend funktionierten. Ein stark verbreitetes System³⁾ wurde hierbei das GSM (Global System for Mobile Communications), welches zunächst in vielen Ländern Europas und später in der ganzen Welt aufgebaut wurde. Vorrangiges Ziel war die (länderübergreifende) Möglichkeit, Telefongespräche durchzuführen. Weitere Dienste (z. B. SMS) sind ebenfalls angeboten. Später wurde mit GPRS (General Packet Radio Service) die Möglichkeit geboten, Internetdienste mit begrenzter Datenrate zu nutzen. Durch seine Einfachheit wird GSM noch in vielen Ländern der Welt genutzt, wobei einige Betreiber (z. B. in den USA oder der Schweiz) schon begonnen haben, GSM zugunsten von 4G bzw. 5G abzuschalten.

3. Generation: Um das Jahr 2000 herum begannen die Standardisierungsaktivitäten an einer Weiterentwicklung der digitalen Mobilfunksysteme. Hauptziel war die Bereitstellung von sogenannten Multimediadiensten, welche die Übertragung von Sprache, Video sowie Internetdiensten (WWW, E-Mail, usw.) ermöglichen sollte. Der wichtigste Vertreter⁴⁾ wurde das als System der 3. Generation (3G) bezeichnete UMTS (Universal Mobile Communications System), welches auf CDMA (Code-Division Multiple Access) beruht. Speziell mit der Weiterentwicklung HSPA (High Speed Packet Access) wurde ein Weg zur Übertragung von Paketdaten mit höherer Datenrate (bis ca. 100 Mbit/s) ermöglicht. Dies bildete für längere Zeit die Grundlage der mobilen Datenübertragung, wie sie von Smartphones genutzt wird. Aufgrund der Einschränkungen, welche im Wesentlichen aus der Fortführung der GSM-Architektur beruhten, begannen mittlerweile schon in vielen Ländern die Betreiber mit der Abschaltung der 3G-Netze (in Deutschland 2021). Dies ermöglicht es, die freigewordenen Funkressourcen für die wesentlich effizientere 4G- bzw. 5G-Technik zu nutzen.

4. Generation: Seit 2010 werden Systeme der 4. Generation (4G) umfassend aufgebaut und genutzt. Grundziel ist hierbei die möglichst effiziente flächendeckende Versorgung mit Breitbanddiensten (mehr als 100 Mbit/s). Weltweit hat sich das als Nachfolger von UMTS eingeführte LTE-(Long Term Evolution-)System weitgehend durchgesetzt, welches auf OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) beruht. Zur Vereinfachung gegenüber UMTS stellt ein LTE-Netz alleinig eine Paketdatenübertragung für eine Internetverbindung zur Verfügung. Weitergehende Dienste (Sprache, Video) werden mittels IP-Übertragung (z. B. Voice over IP, VoIP) realisiert. LTE ermöglicht eine sehr effiziente und daher auch kostengünstige Realisierung von

³⁾ Ein anderes System mit größerer Verbreitung war IS-95, welches auf CDMA beruhte und vorwiegend in Nordamerika eingesetzt wurde.

⁴⁾ Ebenfalls in den USA wurde als Weiterentwicklung von IS-95 das cdma2000 System entwickelt, welches auch auf CDMA beruht.

Mobilfunknetzen und stellt daher die zurzeit am meisten genutzte Mobilfunktechnologie dar.

5. Generation: Ab 2020 erfolgte der Aufbau von Netzen der 5. Generation (5G). Hierbei liegt zunächst der Fokus auf dem Angebot noch höherer Datenraten (bis über 1 Gbit/s) als eMBB-(enhanced Mobile Broadband-)Dienst. Daneben stehen weitere Dienste wie URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communication) für sicherheitskritische Übertragung sowie mMTC (massive Machine Type Communication) zur Unterstützung vieler Teilnehmer mit jeweils kleiner zu übertragender Datenmenge (z. B. für Internet of Things, IoT) zur Verfügung. Wesentliche Änderung im als New Radio (NR) bezeichneten Funknetz ist die Unterstützung von höheren Frequenzen oberhalb von 20 GHz. Des Weiteren ist angestrebt, viele Netzfunktionen mittels Software virtuell anzubieten (Software-Defined Networking, SDN, Network Function Virtualization, NFV). Derzeit werden 5G-Netze rasant aufgebaut und es kann erwartet werden, dass NR in den nächsten Jahren LTE in der Nutzung überholen wird.

In den Standardisierungsgremien wird inzwischen schon an der Weiterentwicklung 6G gearbeitet, wobei derzeit noch die generellen Anforderungen und Grundtechnologien entwickelt werden. Neben dem hier betrachteten Mobilfunk existieren noch weitere Funkssysteme, welche ebenfalls die im Buch gezeigten Grundverfahren benutzen. Als wichtigster Vertreter⁵ kann hier das WLAN betrachtet werden, welches eine (relativ) einfache Internetanbindung über Funk ermöglicht. Die Entwicklung startete 1997. Mittlerweile existieren unzählige meist privat betriebene WLAN-Netze.

Standardisierung

Während der Entwicklung der Mobilfunksysteme hat sich die Standardisierung als grundlegendes Mittel zur technischen Realisierung durchgesetzt. In diesem Rahmen beschreiben verschiedene Dokumente (die sogenannten Standards) die Aufgaben der einzelnen beteiligten Netzelemente, die Schnittstellen zwischen diesen Elementen sowie Struktur und Bedeutung der ausgetauschten Daten. Damit kann gewährleistet werden, dass unterschiedliche Netzelemente verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können. Von besonderer Bedeutung hierbei ist die Funkkommunikation zwischen den Mobilfunkstationen und der Infrastruktur.

Des Weiteren kann hierdurch gewährleistet werden, dass (nahezu) weltweit eine vergleichbare Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung steht, sodass man zumeist sein persönliches Mobilfunkgerät (fast) überall auf der Welt nutzen kann. Abhängig von der verwendeten Technologie sind unterschiedliche Standardisierungsorganisationen für die jeweilige Spezifikation verantwortlich. An dieser Stelle sollen die wich-

⁵ Es existieren viele weitere Systeme, z. B. das dezentral betriebene Bluetooth. Der Fokus in diesem Buch liegt aber auf Netzen, welche mit einer Infrastruktur betrieben werden, hauptsächlich der Mobilfunk.

tigsten Organisationen für die im Buch betrachteten Mobilfunktechnologien kurz vorgestellt werden.⁶⁾

ITU-R: Die International Telecommunications Union (<https://www.itu.int>) ist als Unterorganisation der UNO für das Zusammenarbeiten verschiedener Telekommunikationsstandards verantwortlich. Während in der optischen Übertragungstechnik hierbei sogar von der ITU-T eigene Standards erstellt werden, ist die ITU-R im Funkbereich vordringlich für die Zuteilung des globalen Funkspektrums verantwortlich. Des Weiteren werden aber auch Anforderungen erstellt, welche zur Einordnung von Mobilfunksystemen in die jeweilige Generation dienen. Zum Beispiel gilt IMT 2000 für 3G, IMT Advanced für 4G sowie IMT 2020 für 5G.

3GPP: Das 3rd Generation Partnership Project (<https://www.3gpp.org>) wurde im Dezember 1998 ursprünglich für die Bereitstellung eines weltweiten UMTS-Standards gegründet. Beteiligt sind dabei 7 regionale Standardisierungsorganisationen, welche für die Umsetzung in den jeweiligen Regionen zuständig sind. Im Jahr 2000 wurde die Verantwortung für GSM übernommen. Ebenso wird LTE, 5G sowie zukünftig auch das 6G-System durch 3GPP standardisiert.

IEEE: Das Institute of Electrical and Electronics Engineers wurde zunächst als Vertretung der Spezialisten in der Elektrotechnik gegründet. Speziell im Bereich der Computertechnik zeigt sich die IEEE (<https://standards.ieee.org>) mittlerweile aber auch für die Erstellung entsprechender Standards verantwortlich. Für die WLAN-Technologie sind insbesondere die Standards der Reihe 802.11 von Bedeutung.⁷⁾

1.2 Struktur zellularer Mobilfunknetze

Grundstruktur von Mobilfunknetzen

Im Folgenden wird die Struktur von terrestrischen Mobilfunknetzen betrachtet, welche im Allgemeinen von einem Betreiber bereitgestellt werden. Das Grundprinzip lässt sich auch auf andere infrastrukturbasierte Netze, wie z. B. WLAN, anwenden. Die Grundstruktur eines zellularen Mobilfunknetzes ist in Bild 1.1 dargestellt.

Schon in den analogen Mobilfunknetzen wurden die jeweiligen Funktionen auf verschiedene Netzelemente aufgeteilt. Seit UMTS hat sich eine grundsätzliche Aufteilung in zwei grundlegende Bereiche durchgesetzt. Das Kernnetz (Core Network, CN) beinhaltet alle übergreifenden Funktionen, wie Datenweiterleitung, Netzmanagement unter anderem, welche nicht funkabhängig sind. Die einzelnen Funktionalitäten und

⁶⁾ Zumeist erhält man über die hier angegebenen Webseiten einen Zugriff auf relevante Dokumente, welche oft einen guten Einblick auf die verwendeten Technologien geben.

⁷⁾ Die Zertifizierung einzelner Komponenten erfolgt durch die Wi-Fi Alliance (<https://www.wi-fi.org>), welche eine Industrieorganisation verschiedener Firmen aus diesem Bereich darstellt.

Netzelemente sind vom jeweiligen Mobilfunksystem abhängig und sollen nicht weiter betrachtet werden.

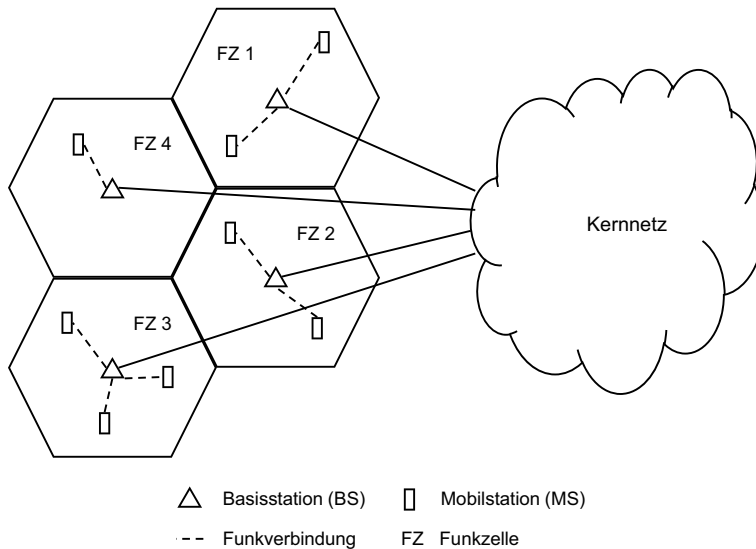


Bild 1.1 Grundstruktur eines zellularen Mobilfunknetzes

Das Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN) umfasst das flächendeckende Funknetz. Es besteht zumindest aus einer Basisstation (BS) als zentrales Element pro Funkzelle. Diese beinhaltet neben der gesamten Funktechnik (Antennen, Verstärker, Zuleitungen) auch die meisten Funktionen zur Signalverarbeitung, welche in Abschnitt 1.4 eingeführt werden. Bei GSM wurde die Basisstation Base Transceiver Station (BTS), bei UMTS NodeB genannt. In GSM und UMTS wurde noch ein zentrales Kontrollelement (Basestation Controller, BSC, bzw. Radio Network Controller, RNC) genutzt, welches unter anderem auch die höheren Protokollschichten realisierte. In LTE und NR werden diese Funktionen ebenfalls in der nun als eNodeB bzw. gNodeB bezeichneten Basisstation bereitgestellt (vgl. [27]).

Die Mobilstationen (MS) realisieren die beweglichen Netzelemente (z. B. Smartphones). Zur Verdeutlichung der erweiterten Funktionalität werden ab UMTS diese Stationen User Equipment (UE) genannt. Jegliche Funkkommunikation innerhalb des Funkzugangsnetzes geschieht (nahezu) ausschließlich über die der Funkzelle zugeordneten Basisstation, selbst wenn sich die beteiligten Mobilstationen in der gleichen Funkzelle befinden.⁸⁾

⁸⁾ Während der weiteren Entwicklung wurde für LTE sowie NR eine Kommunikation direkt zwischen benachbarten MS entwickelt (Device-to-Device, D2D), welche jedoch weiterhin von der BS gesteuert wird. Diese Funktionalität hat weitere besondere Eigenschaften, welche aber außerhalb der hier angeführten Betrachtungen ist.

Prinzip zellularer Netze

Zu Beginn der analogen Mobilfunktechnik wurden ähnlich wie bei Rundfunk und Fernsehen möglichst große Funkversorgungsgebiete angestrebt. Hiermit konnten die Mobilfunkteilnehmer mit einer überschaubaren Anzahl an Netzelementen versorgt werden. Nachdem sich die Teilnehmerzahl vergrößert hatte, wurde die Begrenzung dieses Ansatzes deutlich. Zur Abhilfe erfolgte schon im Endausbau der analogen Netze die Aufteilung der großen Gebiete in kleinere Einheiten, den sogenannten Funkzellen, welche ebenfalls in Bild 1.1 eingezeichnet sind. Mit diesem zellularen Ansatz sind die folgenden Eigenschaften verbunden:

- **Größere Kapazität:** Durch Wiederverwendung der gleichen Funkressourcen kann die Kapazität des Funknetzes erheblich gesteigert werden. Somit können mehr Teilnehmer mit höheren Datenraten kommunizieren.
- **Kleineres Versorgungsgebiet:** Die Funkzellen selbst umfassen meist nur überschaubare Gebiete mit relativ kleinen Zellradien. Damit kann die Sendeleistung speziell an der Mobilstation stark vermindert werden, was der Batterielaufzeit als auch der vom Menschen erhaltenen Funkstrahlung zugutekommt. Die überschaubaren Gebiete und damit gut darstellbare Funkausbreitung erleichtert darüber hinaus den Funknetzplanungsprozess.
- **Verbesserte Ausfallsicherheit:** Da die Funkzellen sich teilweise überlappen, können benachbarte Funkzellen im Falle eines Ausfalls auch teilweise den Funkverkehr der gestörten Funkzelle übernehmen. In modernen Funksystemen (LTE bzw. NR) ist es sogar möglich, eine Optimierung der Funkversorgung durch selbstorganisierende Ansätze (Self Organizing Networking, SON) zu erzielen. Hierbei werden verschiedene Parameter (z.B. Handover, Sendeleistung, Antennenrichtung) soweit angepasst, dass situationsabhängig jeweils eine optimale Funkversorgung gewährleistet wird. Damit kann man selbst bei Ausfall bzw. gezielter Abschaltung von Funkzellen den Funkverkehr aufrechterhalten.

Zur Verdeutlichung des zellularen Prinzips wird, wie in Bild 1.1 ebenfalls gezeigt, sehr häufig das Modell gleichgroßer hexagonaler Zellen benutzt. In der Praxis ergeben sich jedoch je nach Ausbreitungssituation völlig unregelmäßige Zellformen. Dabei kann die Zellgröße durch den Betreiber eingestellt werden. In Bereichen mit sehr hohem Verkehr (z.B. Einkaufszentren, Flughäfen) können kleine Picozellen mit Zellradien bis zu 100 m errichtet werden. In Gebieten mit wenigen Teilnehmern (z.B. Naturschutzgebiete) kann die Versorgung über größere Makrozellen mit Radien über 10 km erfolgen. Dabei hängt die Größe der Funkzellen neben der Sendeleistung auch von der verwendeten Frequenz ab, wobei grundsätzlich die Versorgungsdistanz mit zunehmender Frequenz geringer wird.

Zu beachten ist beim zellularen Prinzip insbesondere das Auftreten von Störungen zwischen benachbarten Funkzellen. Zur weitgehenden Vermeidung dieser Störungen erhielten im GSM-System die betroffenen Funkzellen unterschiedliche Frequenzka-

nähe. Beim CDMA-basierten UMTS wurde die gleiche Frequenz benutzt. Mit LTE und NR können aufgrund der OFDMA-Technik unterschiedliche Strategien genutzt werden, welche zum Teil gleiche Frequenzbereiche zwischen benachbarten Funkzellen zulassen.

Eine weitere Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Gewährleistung einer Funkversorgung für mobile Teilnehmer dar. Beim Verlassen des Versorgungsgebietes einer Funkzelle wird dies durch einen vom Netz gesteuerten Zellwechsel (Handover, im US-Raum auch Handoff) erreicht. Hierbei wird die Funkkommunikation bei schlechter werdender Funkqualität auf eine Funkzelle in der Nachbarschaft mit besserer Qualität umgeschaltet. Ein Handover wird vom Funknetz entschieden und durchgeführt, wobei die Entscheidung auf Messungen beruht, welche von der MS bereitgestellt werden. Bei GSM besteht dabei immer nur eine Verbindung zum Netz (Hard Handover), was zu größeren Unterbrechungen der Übertragung führen kann. UMTS unterstützt auch mehrere Verbindungen (Soft Handover) zu unterschiedlichen BS, wobei Unterbrechungen komplett vermieden werden. LTE und NR benutzen wieder den Hard Handover, wobei die unvermeidlichen Unterbrechungen z. B. durch eine Datenweiterleitung zur neuen BS vermindert werden können. Weitere Details zum zellularen Prinzip und den dafür verwendeten Handoververfahren sind in Kapitel 7 zu finden.

Schichtenmodell

Seit Beginn der digitalen Mobilfunktechnik wurde versucht, dass in der Computerindustrie verwendete OSI-Schichtenmodell ebenfalls zur Strukturierung der Datenkommunikation zu verwenden. Im Unterschied zur Computerkommunikation wird im Mobilfunk eine zusätzliche Trennung in Daten- und Kontrollebene vorgenommen. Ab UMTS können die wichtigsten Funktionalitäten der Funkübertragung entsprechend dem in Bild 1.2 dargestellten vereinfachten Schichtenmodell zugeordnet werden.

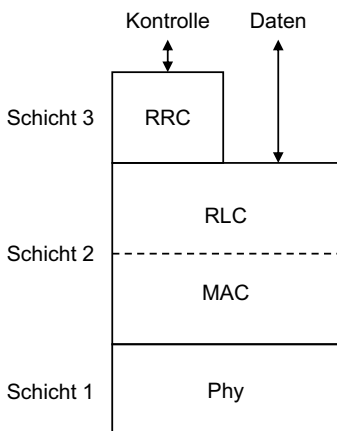


Bild 1.2

Vereinfachtes Schichtenmodell der Mobilfunkübertragung

Wie aus Bild 1.2 ersichtlich ist, sind für die Funkübertragung nur die unteren übertragungsnahen Schichten betroffen. Im Einzelnen kann man dabei folgende Funktionalitäten feststellen (in Bild 1.2 von unten nach oben):

Physikalische Schicht: In dieser Schicht (Physical Layer, Phy) sind sämtliche Funktionen zur Daten- und Signalverarbeitung zusammengefasst. Insbesondere gehören hierzu die in Abschnitt 1.4 beschriebene Modulation sowie die Kanalcodierung. Doch auch alle weiteren erforderlichen analogen Funktionen, wie Verstärker, Filter, Zuleitungen und die Antennen werden hinzugezählt.

Schicht 2: Gegenüber der Computertechnik wurde diese Schicht beim Mobilfunk erheblich ausgeweitet. In Bild 1.2 ist hierbei eine Trennung in zwei primäre Teilschichten zu sehen.⁹⁾ Die Medienzugriffsteilschicht (Medium Access Control, MAC) ermöglicht den gesteuerten Vielfachzugriff auf die von der physikalischen Schicht bereitgestellten Funkressourcen. Die Sicherungsteilschicht (Radio Link Control, RLC) stellt eine konfigurierbar fehlergesicherte Datenübertragung zur Verfügung. Die dafür bereitgestellten Funktionen reichen von einer einfachen Fehlerauswertung bis zur Nutzung von Retransmissionsprotokollen (Automatic Repeat Request, ARQ).¹⁰⁾

Schicht 3: Im Mobilfunk ermöglicht die Funkressourcenverwaltungsschicht (Radio Resource Control, RRC) die Überwachung der Funkressourcen sowie die Konfiguration aller für die darunter liegenden Schichten genutzten Funktionalität. Hierzu gehört z. B. die Entscheidung und Koordination der Handover sowie langsame Funkressourcenüberwachung (Überlastkontrolle, vgl. Kapitel 7). Im Gegensatz zum grundständigen OSI-Modell erhält diese Schicht direkte Kommunikationsmöglichkeiten von und zu den unteren Schichten.

Alle weiteren im OSI-Modell vorhandenen höheren Schichten werden in ihrer Grundstruktur beibehalten.¹¹⁾ Dies bedeutet, dass z. B. für die ab LTE alleinig verfügbare Paketdatenübertragung die Schicht 3 die IP-Übertragung der Daten gewährleistet.

⁹⁾ Im Mobilfunk gibt es je nach dem verwendeten System noch weitere Teilschichten innerhalb der Schicht 2, welche spezielle Funktionalitäten z. B. zur Unterstützung von IP-Paketdatenverarbeitung oder Verteildiensten (Broadcast) bereitstellen.

¹⁰⁾ Ab UMTS HSPA wird mit HARQ-Verfahren (Hybrid Automatic Repeat Request, vgl. Kapitel 4) eine zweite Ebene sehr schneller Retransmissionsprotokolle in der MAC-Teilschicht bereitgestellt.

¹¹⁾ Auch wenn diese Schichten selbst nicht verändert werden, kann es zu Interaktionen zwischen den Eigenschaften der Mobilfunkübertragung (Fehlerverhalten) und bestimmten Funktionalitäten der höheren Schichten (z. B. TCP-Flusskontrolle) kommen.

1.3 Funkressourcenzuteilung

Vielfachzugriff

In einem Mobilfunksystem teilen sich mehrere Mobilfunkteilnehmer ein gemeinsames Medium innerhalb einer Funkzelle. Dabei können folgende Ressourcen aufgeteilt werden: Zeit, Frequenz, Kapazität sowie der Standort (Raum). Bild 1.3 zeigt die für die ersten drei Ressourcen zugehörigen Nachrichtenquader verschiedener im Mobilfunk verwendeter Vielfachzugriffsverfahren.

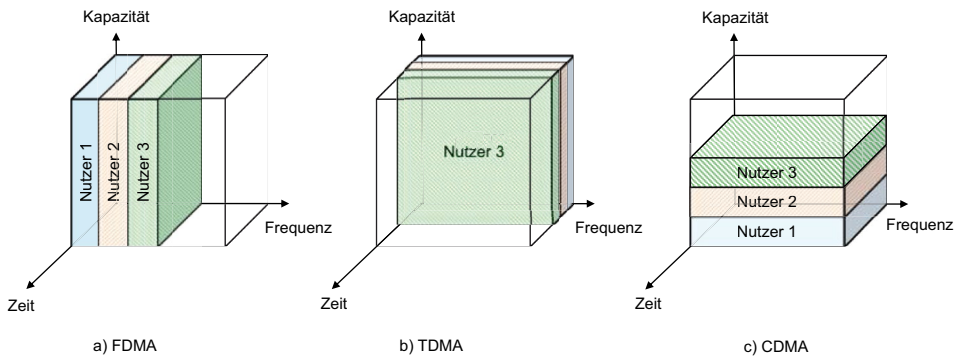


Bild 1.3 Nachrichtenquader verschiedener Vielfachzugriffsverfahren

Je nach unterteilter Ressource kann man die im Folgenden beschriebenen Vielfachzugriffsverfahren unterscheiden. Nähere Informationen über die einzelnen Verfahren sowie deren Eigenschaften werden in Kapitel 5 geliefert.

FDMA: Frequenzvielfachzugriff (Frequency-Division Multiple Access, FDMA, vgl. Bild 1.3a) ist die älteste Art der Ressourcenzuteilung. Hierbei erhält jeder Teilnehmer einen definierten Frequenzanteil innerhalb des gesamten Spektrums. FDMA wird seit Beginn der Rundfunk- und Fernsehtechnik zur Aufteilung der unterschiedlichen Frequenzkanäle benutzt. Im analogen Mobilfunk erfolgte ebenfalls die Zuteilung mittels FDMA. Der moderne digitale Mobilfunk enthält immer eine FDMA-Komponente, indem jeder Übertragung ein spezifischer Frequenzbereich zugeordnet ist. Das in Systemen der 4. und 5. Generation (LTE und NR) eingesetzte OFDMA kann als spezielle Weiterentwicklung von FDMA angesehen werden.

TDMA: Zeitvielfachzugriff (Time-Division Multiple Access, TDMA, vgl. Bild 1.3b) wird seit Einführung der digitalen Übertragungstechnik auf Leitungsebene genutzt. Hierbei erhält jeder Teilnehmer einen bestimmten Zeitabschnitt (Zeitschlitz) innerhalb eines gegebenen Zeitrahmens. TDMA wurde in Kombination mit FDMA beim GSM-System eingesetzt. In modernen Mobilfunksystemen liefert die zeitliche Zuteilung (scheduling) immer eine TDMA-Komponente während der Übertragung.

CDMA: Codevielfachzugriff (Code-Division Multiple Access, CDMA, vgl. Bild 1.3c) ist ein Verfahren der Ressourcenzuteilung, bei welchem die Teilnehmer den gesamten zur Verfügung stehenden Frequenzbereich im gleichen Zeitraum benutzen können. Dabei erhält jeder Teilnehmer einen definierten Anteil an der verfügbaren Übertragungskapazität. Die Unterscheidung erfolgt mittels spezifischer Codefolgen, welche am Sender zusätzlich den Daten aufgeprägt werden. Zur Rekonstruktion der Daten wird eine Korrelation mit der Sendefolge durchgeführt. CDMA ist das Grundverfahren für das UMTS-System.

SDMA: Mittels spezieller Antennenanordnungen (Sektorisierung, Strahlformung) lässt sich zusätzlich die Raumebene unterteilen. Dies wird auch als Raumvielfachzugriff (Space-Division Multiple Access, SDMA) bezeichnet. Die in Abschnitt 1.2 beschriebene Aufteilung des Versorgungsgebietes in kleinere Funkzellen kann als einfachste Form des SDMA angesehen werden.

Duplexverfahren

Bis auf wenige Ausnahmen ist der Mobilfunk durch eine gleichzeitige Datenübertragung in beide Richtungen charakterisiert. In Abhängigkeit von der Übertragungsrichtung haben sich folgende Bezeichnungen¹²⁾ etabliert (vgl. Kapitel 5):

Downlink: Die Übertragungsstrecke von der Basisstation zur Mobilfunkstation wird als Abwärtstrecke (Downlink, DL, im US-Raum auch Forward Link) bezeichnet. Prinzipiell handelt es sich hierbei um einen Verteilkanal (Broadcast Channel, vgl. [10] und [24]). Dieser Kanal ist durch einen Sender (BS) und viele Empfänger (MS) gekennzeichnet. Durch die Koordination zwischen den Sendungen ist eine synchrone Übertragung möglich. Je nach Standort der Mobilstation können hier völlig unterschiedliche Empfangssituationen vorherrschen.

Uplink: Die Übertragungsstrecke von der Mobilfunkstation zur Basisstation wird als Aufwärtstrecke (Uplink, UL, im US-Raum auch Reverse Link) bezeichnet. Prinzipiell handelt es sich hierbei um einen Vielfachzugriffskanal (Multiple Access Channel, vgl. [10] und [24]). Dieser Kanal ist durch viele Sender (MS) und einen Empfänger (BS) gekennzeichnet. Eine Koordination der Sendungen ist meist zu aufwendig, sodass fast ausschließlich eine asynchrone Übertragung verwendet wird. Bezüglich der auftretenden Störungen (Interferenzen) herrscht an der BS ein homogenes Empfangsszenario. Dies eröffnet die Möglichkeit einer gemeinsamen Signalverarbeitung bei Demodulation bzw. Decodierung, welche z. B. zur Unterdrückung von Interferenzen genutzt werden kann.

Die Unterteilung der Ressourcen für die Duplexübertragung erfolgt derzeit überwiegend im Frequenz- oder Zeitbereich. Dabei werden folgende Verfahren unterschieden:

¹²⁾ Diese Richtungen müssen nicht unbedingt den örtlichen Gegebenheiten entsprechen. So kann es in Gebieten mit hoher Bebauung auftreten, dass eine niedriger gelegene Basisstation eine höhergelegene Mobilstation im Downlink versorgt.

FDD: Beim Frequenzduplex (Frequency-Division Duplex, FDD) erfolgt die Übertragung in Uplink und Downlink auf unterschiedlichen Frequenzbereichen. Hierdurch kann eine völlige Separierung der Übertragungsrichtungen erzielt werden. Bei asymmetrischen Datenmengen kommt es zu ungleichen Auslastungen zwischen den Übertragungsrichtungen. FDD wird von Beginn beim Mobilfunk genutzt und ist derzeit die bevorzugte Methode bei geringeren Frequenzen.

TDD: Beim Zeitduplex (Time-Division Duplex, TDD) erfolgt die Übertragung im gleichen Frequenzbereich für beide Richtungen. Uplink sowie Downlink erhalten unterschiedliche Zeitabschnitte. Hiermit kann wesentlich flexibler eine asymmetrische Datenübertragung unterstützt werden, jedoch ist eine genaue Synchronisation zwischen den beteiligten Stationen erforderlich. Seit UMTS wird TDD unterstützt, wobei speziell im 5G-Mobilfunk dies die bevorzugte Methode für höhere Frequenzen darstellt.

1.4 Prinzip der digitalen Datenübertragung

Digitale Datenverarbeitung

Das Prinzip der digitalen Datenübertragung lässt sich im Wesentlichen auf das Zusammenspiel einiger wichtigen Grundelemente beschränken. Bild 1.4 zeigt die Grundstruktur der digitalen Datenübertragung, wie sie ebenfalls beim Mobilfunk verwendet wird. Hierbei entspricht der obere Teil dem Sender, welcher über den Funkkanal mit dem unteren Teil, dem Empfänger, verbunden ist. Dabei korrespondiert jedes Element auf der Senderseite einem entsprechenden Element auf der Empfängerseite.

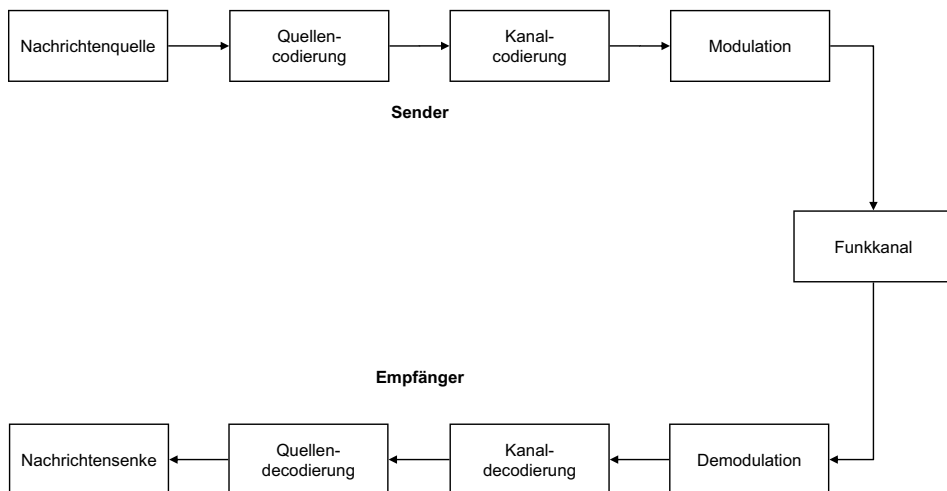


Bild 1.4 Grundstruktur der digitalen Datenübertragung (vgl. [10] und [21])

Im Folgenden wird die Funktion der einzelnen Blöcke kurz beschrieben und es wird auf die jeweils relevanten Kapitel im Buch verwiesen.

Funkkanal: Der Funkkanal verbindet den Sender mit dem Empfänger. Die Übertragung der modulierten analogen Signale erfolgt hierbei mittels elektromagnetischer Wellen. Im Gegensatz zur Datenübertragung mittels Leitungen oder Richtfunk ist der Funkkanal durch eine starke Variabilität der Übertragungsbedingungen gekennzeichnet. Besondere Herausforderungen stellen hierbei Effekte, wie Mehrwegeausbreitung oder Schwund dar. Kapitel 2 liefert die Details zu den Ausbreitungseffekten sowie geeignete Modelle für die Untersuchung der Einflüsse des Mobilfunkkanals auf die Verfahren in den nachfolgenden Kapiteln.

Modulation/Demodulation: Die Aufprägung der digitalen Daten auf die zur Übertragung verwendeten elektromagnetischen Wellen erfolgt durch die Modulation. Auf Empfängerseite werden die Daten durch die Demodulation wieder aus dem empfangenen analogen Signal extrahiert. Kapitel 3 widmet sich den hierbei verwendeten Verfahren und deren Eigenschaften. Die Veränderung des Nutzsignals durch den Funkkanal sowie Störungen beim Empfang der Signale führen hierbei zu Bitfehlern bei der Detektion der Daten. Verschiedene Möglichkeiten zur Verminderung des Einflusses des Funkkanals werden an dieser Stelle ebenfalls untersucht, zum Beispiel Funkdiversität bzw. Entzerrer.

Kanalcodierung/-decodierung: Die Kanalcodierung vermindert den Einfluss der unvermeidlich entstehenden Bitfehler auf die Datenübertragung. Hierbei wird den Daten strukturierte Zusatzinformation (Redundanz) hinzugefügt. Dies ermöglicht es dem Empfänger, im besten Fall fehlerhaft übertragene Daten zu korrigieren. Oft ist aber auch nur eine Feststellung von Fehlern ausreichend. Je nach Verfahren vergrößert sich hierdurch die zu übertragende Datenmenge zum Teil recht erheblich. Kapitel 4 zeigt neben den Grundlagen die zurzeit wichtigsten Verfahren, welche im Mobilfunk verwendet werden. Moderne Mobilfunkverfahren verknüpfen dabei oft die Methoden der Modulation und Kanalcodierung.

Quellencodierung/-decodierung: Die Quellencodierung erzeugt die zur Übertragung verwendeten Daten in einem geeigneten Format. Im Kontext der Mobilfunkübertragung spielen hierbei Verfahren insbesondere zur Datenreduktion von Sprach- bzw. Videodaten eine wichtige Rolle. Durch die Verminderung der dabei entstehenden Datenmengen kann somit eine effiziente Datenübertragung auch mit den durch die Mobilfunkübertragung gegebenen Beschränkungen realisiert werden. Quellencodierung wird ebenfalls kurz in Kapitel 4 beleuchtet.

Nachrichtenquelle/-senke: Nachrichtenquelle bzw. Nachrichtensenke realisieren die Erzeugung bzw. Weiterverarbeitung der übertragenen Daten. Je nach Anwendung können hierbei verschiedene Formen realisiert werden. Beispiele sind hierbei Audio (Sprache), Video, Dateien, E-Mails, Chats und viele andere. Im weiteren Verlauf wird nicht weiter auf die Charakteristik dieser Elemente eingegangen.

Das in Bild 1.4 dargestellte Grundmodell zeigt nicht alle im Mobilfunk notwendigen Verfahren. Eine Hinzunahme würde die Darstellung unübersichtlich erscheinen lassen. Im Weiteren werden die betroffenen Elemente kurz vorgestellt.

Vielfachzugriff: Wie schon in Abschnitt 1.3 dargestellt, steuert der Vielfachzugriff die Benutzung des gemeinsam genutzten Mediums. Ebenfalls wird hierbei die Art des Duplex gesteuert. Je nach Verfahren kann dies an unterschiedlichen Stellen des Übertragungsmodells geschehen. Viele Verfahren, wie FDMA, CDMA oder OFDMA, können als Teil der Modulation angesehen werden. Zeitgesteuerte Verfahren, wie TDMA, können auch vor der Modulation realisiert werden. Kapitel 5 beschreibt die Details und Eigenschaften der verschiedenen Verfahren, welche im Mobilfunk genutzt werden.

Mehrfachantennen: Um die Übertragungseigenschaften bei Mobilfunkkanälen zu verbessern, werden schon seit Beginn der digitalen Mobilfunkübertragung mehrere Antennen eingesetzt. Während einfache Verfahren die Diversität der Übertragung über mehrere Antennen ausnutzen, verwenden weitergehende Konzepte Verfahren der Strahlformung bis hin zur Mehrkanalübertragung mit mehreren Sende- bzw. Empfangsantennen (Multiple Input Multiple Output, MIMO). Je nach Realisierung kann dies die Signalverarbeitungsgruppen nach der Modulation (Strahlformung) bis hin zum gemeinsamen Übertragungsweg von Kanalcodierung und Modulation (MIMO) betreffen. In Kapitel 6 werden die dabei verwendeten Verfahren näher beschrieben sowie deren Leistungsfähigkeit gezeigt.

Funkressourcenverwaltung: Zum Betrieb eines Mobilfunknetzes sind verschiedene Verfahren notwendig, welche die vorhandenen Mobilfunkressourcen möglichst effektiv verwalten. Zum Radio Resource Management (RRM) zählen der schon in Abschnitt 1.2 beschriebene Handover zwischen benachbarten Funkzellen, die Leistungsregelung zur Einstellung der benötigten Sendeleistung sowie verschiedene Verfahren zur Vermeidung von Überlastsituationen. Mit dem Ausbau moderner Mobilfunksysteme kommt hierzu noch die schnelle Ressourcenzuteilung (dynamisches Scheduling) hinzu. Die wichtigsten Grundlagen und Verfahren werden in Kapitel 7 beschrieben.

Verschlüsselung: Zur Absicherung einer geschützten Datenübertragung werden seit Beginn der digitalen Mobilfunkübertragung verschiedene Verschlüsselungsverfahren eingesetzt. Üblicherweise geschieht dies an einer geeigneten Stelle im Netz, welche eine möglichst große Datensicherheit auf einem gewählten Übertragungsweg gewährleistet. Im Übertragungsmodell kann dies häufig vor der Kanalcodierung angesetzt werden. Die übertragene Datenmenge wird normalerweise durch Verschlüsselung nicht verändert. Die dabei verwendeten Verfahren liegen außerhalb des Fokus dieses Buches.

1.5 Übungsfragen

1. Welche besonderen Herausforderungen entstehen bei der Mobilfunkkommunikation?
2. Beschreiben Sie den Grundaufbau zellularer Mobilfunknetze. Welche Elemente sind für die Funkübertragung zuständig?
3. Erläutern Sie das Grundprinzip der Verwendung von Funkzellen. Was ist ein Handover und wozu wird er verwendet?
4. Beschreiben Sie das in der modernen Mobilfunktechnik verwendete Schichtenmodell. Was sind die Besonderheiten gegenüber der Computertechnik?
5. Nennen Sie Vielfachzugriffsverfahren und die dabei aufgeteilten Ressourcen.
6. Welche Duplexverfahren werden im Mobilfunk verwendet?
7. Beschreiben Sie die Grundstruktur der für die Funkübertragung verwendeten Signalverarbeitung sowie die Aufgaben der einzelnen Elemente.

2

Mobilfunkkanal

Der Mobilfunkkanal beschreibt die räumliche Verbindung zwischen Sender und Empfänger. Zur Datenübertragung werden elektromagnetische Wellen genutzt, welche bei ihrer Ausbreitung verschiedenen Einflüssen ausgesetzt sind. Dabei entstehen mitunter starke Schwankungen in der Empfangsqualität. Dies stellt eine besondere Herausforderung der Mobilfunkübertragung im Vergleich zur leitungsgebundenen Datenübertragung her. Die besondere Charakteristik des Mobilfunkkanals muss bei der Modulation/Demodulation sowie der Kanalcodierung beachtet werden. Sie beeinflusst ebenfalls die Wahl eines geeigneten Vielfachzugriffsverfahrens.

In diesem Kapitel soll eine Beschreibung der wichtigsten Merkmale des Mobilfunkkanals erfolgen. Dabei wird zunächst eine kurze Einführung gegeben und ein auf physikalischen Effekten aufbauendes Funkübertragungsmodell vorgestellt (Abschnitt 2.1). Die dabei inhärente Komplexität kann durch eine Separierung der Effekte in langsam wirkende sowie schnelle Änderungen vermindert werden, welche darauffolgend diskutiert werden (Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3). Verschiedene Beispiele verdeutlichen die dabei bestehenden Zusammenhänge.¹⁾ Möglichkeiten zur Verminderung der dabei auftretenden Effekte bietet der danach untersuchte Diversitätsempfang (Abschnitt 2.4). Abschließend wird ein in der Literatur häufig verwendetes komplexwertiges Übertragungsmodell eingeführt, welches die Untersuchung der vorher beschriebenen physikalischen Effekte vereinfacht (Abschnitt 2.5).

¹ Aus didaktischen Gründen sind diese Beispiele vorwiegend aus dem GSM-Bereich entnommen. Die gezeigten Zusammenhänge gelten natürlich auch bei den anderen Mobilfunksystemen.

2.1 Einführung

Im Mobilfunkkanal breiten sich die Signale in Form von elektromagnetischen Wellen im Freiraum aus. Die Wellenform ergibt sich dabei aus der Lösung der Maxwell'schen Gleichungen, welche jeweils das elektrische und magnetische Feld der Welle miteinander verbinden. Bei den im Mobilfunk verwendeten Frequenzen von $f_0 > 100$ MHz kann von einer quasioptischen Ausbreitung ausgegangen werden, welche in erster Näherung als ebene Welle²⁾ modelliert wird. Dabei erhält man die orts- sowie zweithabhängige elektrische Feldstärke³⁾ einer sich in x -Richtung ausbreitenden Welle (vgl. [5] und [9]) zu

$$E(x, t) = E_0 \cdot \cos(\omega_0 t - k_0 x + \varphi_0) \quad (2.1)$$

$\omega_0 = 2\pi f_0$: Kreisfrequenz

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$: Wellenzahl

φ_0 : Nullphase, hier $\varphi_0 = 0$

Der Zusammenhang zwischen Frequenz f_0 und Wellenlänge λ_0 ist durch die Lichtgeschwindigkeit mit $\lambda_0 \cdot f_0 = c_0 \approx 300 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gegeben. Die Ausbreitungsrichtung x wird in Anlehnung an die Strahlenoptik auch als Funkstrahl bezeichnet.

Während bei fest installierten Funksystemen, z.B. Richtfunk oder auch Satellitenfunk, zumeist nur ein direkter Funkstrahl existiert, ergeben sich beim Mobilfunk oft mehrere Möglichkeiten, wie ein Signal vom Sender zum Empfänger gelangen kann. Bild 2.1 zeigt eine typische Mobilfunkumgebung, welche mehrere Wege zur Signalübertragung zwischen einer Basisstation (BS) und einer Mobilstation (MS) im Downlink⁴⁾ zeigt.

Neben dem direkten Pfad (Line of Sight, LoS), welcher auch die kürzeste Strecke zwischen BS und MS darstellt, existieren noch weitere Pfade, welche zusätzlich eine (zeitlich verzögerte) Kopie des Sendesignals übertragen. Dabei treten folgende Effekte auf (vgl. [1] und [4]):

- **Reflexion (reflection):** Wie in der Optik bekannt, können auch Funkstrahlen an ebenen Flächen reflektiert werden. Dabei wird beim Auftreffen ein reflektierter Funkstrahl mit einem Austrittswinkel erzeugt, welcher dem Eintrittswinkel ent-

²⁾ Dieses Modell ist eigentlich physikalisch nicht realisierbar. Im Zusammenhang mit den später gezeigten Pfadverlustmodellen ergeben sich jedoch wiederum sinnvolle Lösungen.

³⁾ Eine ebene Welle wird weiterhin durch ihre (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gelegene) Schwingungsrichtung (Polarisation) charakterisiert. Für einen optimalen Empfang muss diese mit der Vorzugsrichtung der verwendeten Antenne übereinstimmen. Wenn nicht explizit angegeben, werden im Folgenden die daraus resultierenden Effekte vernachlässigt.

⁴⁾ Aus der Reziprozität des Funkkanals sowie der verwendeten Antennen wird davon ausgegangen, dass ähnliche Verhältnisse auch im Uplink zu beobachten sind.