
Vorwort

Die *Informations- und Kommunikationstechnik* hat in den letzten Jahrzehnten enorm an Bedeutung gewonnen. Besonders *Internet* und *Mobilfunk* haben von den Fortschritten der Digitaltechnik profitiert. Das Handy ist inzwischen zum *Multifunktionsterminal* (Smartphone) geworden – mobiles Telefon, Internet-Zugang, Zahlungsmittel, universelle Fernbedienung und viele integrierte Funktionalitäten mehr (wie Digitalkamera, Terminplaner, Navigationshilfen und Spiele) leisten heutzutage moderne Endgeräte. *Mobilität*, *Multifunktionalität* und *universelle Kompatibilität* sind wichtige Schlagworte, die für den Erfolg mit verantwortlich sind.

Die technische Revolution im Bereich des Mobilfunksektors kann man gut anhand der Datenrate verdeutlichen: Während Anfang der neunziger Jahre Datenraten von etwa 10 kbit/s (in einer Bandbreite von 200 kHz) unterstützt wurden, sind nur zwanzig Jahre später Datenraten von etwa 100 Mbit/s und mehr (in einer Bandbreite von 20 MHz) Realität. Der nächste Quantensprung mit Datenraten von bis zu 100 Gbit/s (in einer Bandbreite von etwa 2 GHz) ist bis zum Ende dieses Jahrzehnts zumindest im Nahbereich zu erwarten, ungeachtet der unzähligen Innovationen und Möglichkeiten, die uns der Mobilfunk beschert hat und bescheren wird. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die erreichbare Datenrate bezogen auf 1 Hz Bandbreite im betrachteten Zeitraum von 30 Jahren pro Jahrzehnt etwa um den Faktor zehn gestiegen ist. Ähnliche empirische Gesetzmäßigkeiten kennt man beispielsweise bezüglich der Komplexität integrierter Schaltkreise, der Rechenleistung von Digitalrechnern und der Speicherdichte (Mooresches Gesetz) – eine Sättigung ist bislang nicht erkennbar. Es ist zu erwarten, dass die Fortschritte der mobilen Informations- und Kommunikationstechnik Alltag und Berufswelt noch nachhaltiger verändern werden, als dies bisher geschehen ist. Drahtlose Informations- und Kommunikationssysteme werden beispielsweise in der häuslichen Umgebung („Smart Home“), am Arbeitsplatz („Smart Office“), in öffentlichen Einrichtungen, in Produktionsstätten („Smart Fab“) und im Transportwesen („Smart Car“) Einzug halten, aber auch in vielen anderen Anwendungsbereichen. Der Bedarf an drahtloser Kommunikation deckt somit neben den klassischen Anwendungsfeldern wie Rundfunk, Satellitenkommunikation und Mobilfunktelefonie viele weitere Gebiete ab.

In diesem Lehrbuch werden *Grundlagen der digitalen Informationsübertragung* vermittelt. Nach Einschätzung des Autors steht der Vermittlung von Grundlagenwissen

eine große, vermutlich steigende Bedeutung zu. Aktuelle Forschungsgebiete wie Mehrantennensysteme (MIMO-Systeme), Mehrnutzerkommunikation und Netzwerkcodierung basieren auf informationstheoretischen Ansätzen, aber auch auf Kenntnissen der Codierungstheorie, der Übertragungstechnik und der Schätzverfahren. Im Vordergrund dieses Lehrbuchs stehen leistungsfähige *drahtlose Übertragungstechniken* unter besonderer Berücksichtigung des Mobilfunks. Die meisten Prinzipien und Verfahren sind aber auch in anderen Bereichen der digitalen Übertragungstechnik und verwandten Gebieten anwendbar. Das Buch entstand aus dem Wunsch, Grundlagen der digitalen Informationsübertragung in einer verständlichen Form möglichst umfassend darzustellen, auch unter Würdigung neuer Verfahren. Durch Querverweise wird ein Zusammenhang zwischen den Teilbereichen Informationstheorie, Kanalcodierung, Übertragungstechnik sowie grundlegenden Konzepten der Mobilfunkkommunikation hergestellt. Der Leser wird somit in die Lage versetzt, die wesentlichen Facetten der digitalen Informationsübertragung ganzheitlich zu erfassen.

Jegliche digitale Informationsübertragung kann in eine *software-orientierte Basisband-Signalverarbeitung* sowie eine *physikalisch-orientierte Übertragungseinrichtung* separiert werden. Die Übertragung selbst geschieht über ein Funkfeld (Mobilfunk, Satellitenkommunikation, Rundfunk), optisch (Lichtwellenleiter, Infrarot, Freiraum), akustisch (Unterwasserkommunikation) oder über ein Kabel. Dieses Buch ist der Basisband-Signalverarbeitung gewidmet. Die Schnittstelle zur physikalisch-orientierten Übertragungseinrichtung bildet der Digital-Analog-Wandler (im Sender) bzw. der Analog-Digital-Wandler (im Empfänger). Die physikalisch-orientierte Übertragungseinrichtung umfasst somit sämtliche hochfrequenten Bauelemente (wie Leistungsverstärker im Sender und rauscharmer Verstärker im Empfänger, Oszillatoren, Antennen, usw.). Effekte der physikalischen Übertragungsstrecke einschließlich der hochfrequenten Bauelemente können anhand von Kanalmodellen im Basisband berücksichtigt werden.

Die Basisband-Signalverarbeitung geschieht, wie bereits erwähnt, software-orientiert. Folglich sind sämtliche Basisband-Verfahren letztlich *Algorithmen*. Technologische Fortschritte der letzten Jahrzehnte führten zu einer rasch wachsenden Integrationsdichte in der digitalen Mikroelektronik und einer damit verbundenen Leistungssteigerung digitaler Schaltungen. Gleichzeitig wird der Bedarf an *bandbreiteneffizienten und gleichzeitig leistungseffizienten Übertragungsverfahren* stetig größer, beispielsweise um eine hohe örtliche Teilnehmerdichte kostengünstig bereitstellen zu können. Deshalb wird es immer wichtiger, die *informationstheoretischen Grenzen* zu kennen und technisch umzusetzen.

Das Gebiet der Informationsübertragung ist durch viele Innovationen geprägt, die auch in der Grundlagenausbildung angemessen berücksichtigt werden sollten. In der zweiten Auflage wurden nicht nur Details verbessert, sondern insbesondere viele aktuelle Themen integriert. Dieses Lehrbuch ist in fünf abgeschlossene Teile gegliedert. Die Teile bauen einander auf, können aber auch einzeln erarbeitet werden.

Teil I behandelt „*Grundlagen der angewandten Informationstheorie*“. Das Gebiet der Informations- und Codierungstheorie wurde 1948 in einer bahnbrechenden Arbeit von Claude E. Shannon etabliert. Seitdem hat sich speziell die Codierung von einer rein theore-

tischen Disziplin zu einer ausgedehnten anwendungsbezogenen Wissenschaft entwickelt. Nahezu alle fortschrittlichen digitalen Übertragungssysteme nutzen die Möglichkeiten der Codierung, sei es zur Datenkompression (Quellencodierung), zur Datenverschlüsselung/Datensicherheit (Kryptographie) oder zur Fehlererkennung und Fehlerkorrektur (Kanalcodierung). Als Beispiele seien der Mobilfunk, das Internet, Datenmodems, die Satellitenkommunikation, der digitale Rundfunk und digitale Speichermedien genannt. In Teil I werden alle drei Teilgebiete, d.h. Quellencodierung, Kryptographie und Kanalcodierung, sowie die gemeinsame Quellen- und Kanalcodierung und die Mehrnutzer-Informationstheorie behandelt. Die Praxis zeigt, dass bei der Entwicklung von digitalen Übertragungsverfahren eine Kenntnis der fundamentalen Schranken der Informationsübertragung immer wichtiger wird („Theory comes first“). Das hierzu benötigte Grundwissen wird in Teil I vermittelt. In der zweiten Auflage wurde das aktuelle Thema der Mehrnutzer-Informationstheorie um weitere Kanalmodelle erweitert: Den Relaykanal, den Interferenzkanal und den Duplexkanal. Die bestehenden Abschnitte zum Vielfachzugriffskanal und zum Rundfunkkanal wurden ergänzt. Neu berücksichtigt wurde das aufstrebende Thema der Netzwerkcodierung, wobei bewusst auf unnötigen mathematischen Ballast zugunsten einer verständlichen Darstellung verzichtet wird. Das Kapitel zur verlustlosen Quellencodierung wurde um das Thema Algebraische Codierung ergänzt. Der Abschnitt zur Rate-Distortion-Theorie wurde erweitert.

Teil II behandelt „*Grundlagen der Kanalcodierung*“. Während die Informationstheorie bezüglich der Kanalcodierung mit Zufallscodes zum Beweis zentraler Kommunikationssätze auskommt, werden in Teil II anwendungsorientierte Kanalcodes und Verfahren zu deren Decodierung behandelt. Es werden Blockcodes, Faltungscodes und verkettete Codierverfahren vorgestellt. Zu den neueren Techniken zählen Turbo-Codes und Blockcodes mit dünn besetzter Generatormatrix (LDPC-Codes), sowie Decodierverfahren mit Zuverlässigkeitsinformation am Ein- und Ausgang des Decodierers. Ohne Kanalcodierung wäre eine robuste Informationsübertragung nicht möglich. In der zweiten Auflage wurden insbesondere iterative Decodierverfahren und zugehörige Analysemethoden zum Konvergenzverhalten verketteter Codes vertiefend behandelt. Das aktuelle Thema der graphenbasierten Decodierung wurde ebenso wie die Extrinsic Information Transfer (EXIT)-Chart-Technik erweitert. Zudem wurden alternative Analysemethoden wie das Variance Transfer (VT) Chart, die Density Evolution und das Information Processing Characteristic (IPC) Chart aufgenommen. Ferner wurde der Abschnitt zu LDPC-Codes signifikant erweitert, wobei auch ratenlose Codes berücksichtigt wurden.

Teil III ist „*Digitalen Modulations- und Übertragungsverfahren*“ gewidmet. Digitale Übertragungssysteme besitzen typischerweise eine höhere *Leistungseffizienz* und eine höhere *Bandbreiteneffizienz* im Vergleich zu analogen Übertragungssystemen, wobei die Leistungseffizienz das benötigte Signal/Rauschleistungsverhältnis (in dB) bei gegebenem Gütekriterium und die Bandbreiteneffizienz (in bit/s/Hz) die erreichbare Datenrate (in bit/s) bezogen auf die benötigte Bandbreite (in Hz) ist. Ferner bieten digitale Übertragungssysteme eine bessere subjektive Qualität und weisen eine höhere Flexibilität auf. Beispielsweise können per *Software-Defined Radio* verschiedene Standards auf nur ei-

ner Hardware-Plattform integriert werden. Daten können in digitalen Speichermedien beliebig lange sicher aufbewahrt werden. Letztendlich sind Multimedia-Dienste, charakterisiert durch eine Integration von Sprache, Musik, Bilder, Video, Texten usw., nur digital realisierbar. In Teil III werden lineare und nichtlineare digitale Modulationsverfahren, Einträger- und Mehrträgerverfahren, kombinierte Modulations- und Kanalcodierverfahren, Mehrfachzugriffstechniken und Methoden zur Entzerrung, Kanalschätzung und Synchronisation vorgestellt. Aufgrund der Bedeutung der Abtastung und der Analog-Digital-Wandlung wurde diese Thematik in Teil III erweitert. Zum einen wurde das aktuelle Thema Compressed Sensing neu aufgenommen. Bei Compressed Sensing, auch Compressive Sensing oder Compressive Sampling genannt, handelt es sich um eine effiziente Form der Unterabtastung, bei der Abtastung und Datenkompression in nur einem Schritt geschieht. Im Vergleich zum Nyquist-Shannon-Abtasttheorem kann die Datenmenge oft drastisch reduziert werden, wenn das abzutastende Signal in einer Domäne (wie z. B. im Frequenzbereich) dünn besetzt ist. Der Abschnitt zur Analog-Digital-Wandlung wurde ferner um einen Abschnitt zur 1-Bit-Wandlung und einen Abschnitt zur Verbesserung der Auflösung durch Überabtastung und Dithering ergänzt. In Teil III wurden außerdem interessante und aktuelle Themen wie Superpositionsmodulation und Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDM) angemessen ergänzt.

Teil IV stellt anspruchsvolle „*Konzepte der Mobilfunkkommunikation*“ vor. Zu den Schwerpunkten zählen fortschrittliche Techniken wie Mehrantennensysteme (MIMO-Systeme) und Space-Time-Codes, Verfahren zur Mehrnutzerdetektion und Interferenzunterdrückung, sowie Methoden der senderseitigen Vorcodierung und der Strahlformung (Beamforming), aber auch Grundlagen hinsichtlich der Kanalmodellierung, einschließlich der MIMO-Kanalmodellierung. In der zweiten Auflage wurden Beiträge zu Mehrantennensystemen und Beamforming ergänzt und die Themen Ultrabreitband-Kommunikation und Ultrabreitband-Ortung sowie Software-Defined Radio und Kognitives Radio neu aufgenommen.

Teil V stellt die für ein Verständnis wichtigsten *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Grundlagen der Matrizenrechnung* sowie *Grundlagen der Signal- und Systemtheorie* in Form von Anhängen bereit. Ein weiterer Anhang ist *Simulationswerkzeugen* und deren Prinzipien gewidmet, weil aufgrund der Komplexität anspruchsvoller Übertragungsverfahren Computersimulationen ein wichtiger Schritt auf dem Weg vom Entwurf über die Optimierung bis hin zur Realisierung sind.

Dieses Grundlagenbuch entstand auf der Basis von Lehrveranstaltungen zu den Themen „Angewandte Informationstheorie“, „Kanalcodierung“, „Digitale Modulationsverfahren“ und „Mobilfunkkommunikation“, die an verschiedenen Universitäten und Hochschulen in Bachelor-, Master- und Diplomstudiengängen sowie in außeruniversitären Fortbildungsveranstaltungen angeboten wurden bzw. werden.

Das Buch richtet sich an Studierende der Elektrotechnik und Informationstechnik, der Informatik und der Physik sowie an alle Ingenieure, Informatiker und Physiker aus Industrie, Forschungseinrichtungen und Behörden, die die Grundlagen der modernen Informa-

tionstechnik kennenlernen oder ihr Wissen auf diesem Gebiet auffrischen und ergänzen möchten.

Mein Dankeschön gilt allen Kollegen und Lesern für die konstruktiven Hinweise, die zu einer Verbesserung der zweiten Auflage beigetragen haben, meinen Wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Rebecca Adam, Gilbert Forkel, Christopher Knievel, Meelis Nömm und Kathrin Schmeink für die konstruktive Durchsicht der vorliegenden Auflage, Torge Rabsch für LaTeX-spezifische Hilfestellungen sowie Herrn Reinhard Dapper und sein Team für die professionelle Betreuung seitens des Springer-Vieweg-Verlags. Mein besonderer Dank gilt wie bei der Erstauflage meiner Frau Sabah für ihre Unterstützung und Geduld.

Kitzeberg, im Herbst 2012

Peter Adam Höher

Grundlagen der digitalen Informationsübertragung

Von der Theorie zu Mobilfunkanwendungen

Höher, P.A.

2013, X, 804 S. 455 Abb. Mit 234 Beispielen., Softcover

ISBN: 978-3-8348-1784-6