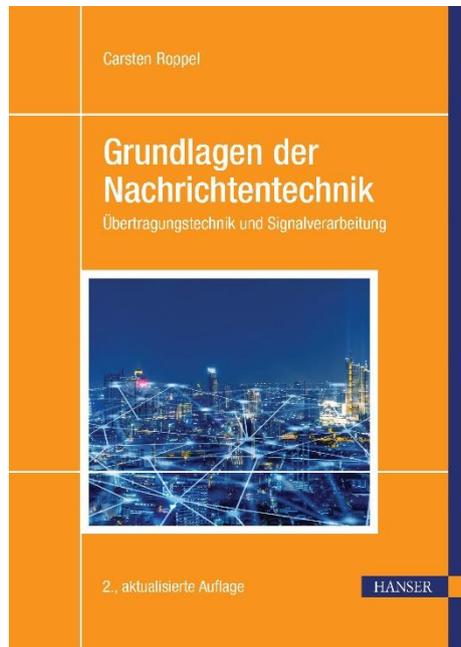


HANSER



Leseprobe

zu

Grundlagen der Nachrichtentechnik

von Carsten Roppel

Print-ISBN: 978-3-446-47861-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-47883-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446478619>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Nachrichten werden in technischer Hinsicht durch Signale dargestellt. Die Erzeugung, die Übertragung und der Empfang dieser Signale ist daher eine wesentliche Grundlage der Nachrichtentechnik. Mit diesen Aspekten befasst sich das vorliegende Buch, wobei der Schwerpunkt gemäß ihrer technischen Bedeutung auf den digitalen Übertragungssystemen liegt. Dabei spielen oft spezielle Filterfunktionen eine wichtige Rolle. Fragt man sich dann, wie beispielsweise ein Kosinus-roll-off-Filter oder ein signalangepasstes Filter implementiert wird, so gibt man sich auf das Gebiet der digitalen Signalverarbeitung. Daher geht das Buch auch auf die für die Nachrichtentechnik wichtigen Aspekte der digitalen Signalverarbeitung ein. Für die Kommunikationssysteme wie Internet oder Mobilfunk, die wir heute intensiv nutzen, ist die Übertragungstechnik ein ganz wesentlicher Baustein. Aber es werden auch Vermittlungstechnik und Datenübertragungsprotokolle benötigt, deren Grundlagen ebenfalls in knapper Form behandelt werden.

Um den Stoff zu vertiefen, gibt es zu jedem Kapitel einige Übungsaufgaben. Beim selbstständigen Bearbeiten der Aufgaben ist es wichtig, die eigenen Ergebnisse kontrollieren zu können, daher stehen die Lösungen dazu im Anhang. Eine große Bedeutung hat heute die Simulation, mit deren Hilfe nicht nur kompliziertere Fragestellungen bearbeitet werden können. Die den Simulationen zugrunde liegenden zeitdiskreten Modelle bilden häufig eine hard- oder softwarebasierte Implementierung eins zu eins ab. Sie können daher auch der Überprüfung einer solchen Implementierung oder der automatischen Codegenerierung dienen. Daher werden auf der Internetseite zum Buch Übungen mit den Simulationstools MATLAB und Scilab beschrieben.

Der vorliegende Text basiert teilweise auf dem Buch *Grundlagen der digitalen Kommunikationstechnik* (Hanser Verlag, 2006). Dessen Inhalt wurde jedoch so stark überarbeitet und völlig neu strukturiert, dass das vorliegende Buch den neuen Titel *Grundlagen der Nachrichtentechnik* bekommen hat.

Ich bedanke mich bei dem Team des Carl Hanser Verlages Franziska Jacob, Franziska Kaufmann und Manuel Leppert für zahlreiche Anregungen zum Konzept und zur Gestaltung des Buches sowie ihre Hilfe bei inhaltlichen und technischen Fragen. Und ich bedanke mich bei meiner Frau, die ganz wesentlich zur richtigen Rechtschreibung beigetragen hat.

Vorwort zur 2. Auflage

Für die zweite Auflage dieses Buches wurde im Kapitel 6 ein neuer Abschnitt „Modulationsfehler, EVM und MER“ sowie einige zusätzliche Beispiele eingefügt. Ferner wurden Druckfehler korrigiert — vielen Dank für die Hinweise von Studierenden und Kollegen — und Bilder und Text teilweise überarbeitet und aktualisiert. Auch die Begleitmaterialien wurden ergänzt: Dort findet man nun die Simulation eines Übertragungssystems mit Python, zusätzlich zu den schon vorhandenen MATLAB- und Scilab-Dateien.

Bei Christina Kubiak und Frank Katzenmayer vom Carl Hanser Verlag möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Schmalkalden, im Mai 2023

Carsten Roppel

Internetseiten mit Begleitmaterialien zum Buch:

<https://plus.hanser-fachbuch.de/>

<https://www.hs-schmalkalden.de/nachrichtentechnik>

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhalt

1	Einführung	11
1.1	Nachrichtentechnik – ein Überblick	11
1.2	Digitale und analoge Übertragung	13
1.3	Standardisierung	16
1.4	Zum Inhalt dieses Buches	17
2	Signalübertragung	19
2.1	Lineare zeitinvariante Systeme	19
2.1.1	Impulsantwort und Faltung	20
2.1.2	Fourier-Transformation	25
2.1.3	Übertragungsfunktion	32
2.1.4	Verzerrungsfreies System	36
2.1.5	Der ideale Tiefpass	38
2.1.6	Der ideale Bandpass	39
2.2	Energie- und Leistungssignale	40
2.2.1	Normierte Energie und normierte Leistung	40
2.2.2	Korrelation von Energie- und Leistungssignalen	41
2.2.3	Energie- und Leistungsdichtespektrum	43
2.3	Zufallssignale	45
2.3.1	Beschreibung von Zufallssignalen durch Erwartungswerte	46
2.3.2	Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte	48
2.3.3	Leistungsdichtespektrum von Zufallssignalen	55
2.3.4	Übertragung von Zufallssignalen über LTI-Systeme	58
2.3.5	Weißes Rauschen, Rauschbandbreite und additives Rauschen	60
2.4	Weiterführende Hinweise	65
2.5	Übungsaufgaben	65
3	Signalabtastung und Quantisierung	67
3.1	Abtasttheorem	67
3.2	Abtastung von Bandpasssignalen	73
3.3	Lineare Quantisierung	76
3.4	Nichtlineare Quantisierung und Pulsmodulation (PCM)	79
3.5	Weiterführende Hinweise	83
3.6	Übungsaufgaben	83

4	Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtentechnik	85
4.1	Zeitdiskrete Signale und Systeme	85
4.1.1	Energie, Leistung und Korrelationsfunktion	86
4.1.2	Diskrete Faltung	88
4.1.3	Fourier-Transformation zeitdiskreter Signale	91
4.1.4	Diskrete Fourier-Transformation	93
4.2	Digitale Filter	99
4.3	Weiterführende Hinweise	108
4.4	Übungsaufgaben	109
5	Digitale Nachrichtenübertragung im Basisband	111
5.1	Basisbandsignale und Leitungscodes.....	111
5.2	Intersymbol-Interferenz und Nyquist-Pulsformung	115
5.2.1	Nyquist-Bandbreite	115
5.2.2	Das erste Nyquist-Kriterium	116
5.2.3	Kosinus-roll-off-Filter	118
5.2.4	Das Augendiagramm	121
5.2.5	Leistungsdichtespektrum digitaler Basisbandsignale.....	123
5.3	Fehlerwahrscheinlichkeit	127
5.3.1	Fehlerwahrscheinlichkeit bei binärer Übertragung	127
5.3.2	Signalangepasstes Filter	131
5.3.3	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Mehrpegelübertragung	136
5.4	Kanalverzerrungen	140
5.4.1	Symboltaktentzerrer	140
5.4.2	Entzerrer mit Doppelabtastung	143
5.4.3	Vergleich der verschiedenen Empfängerkonzepte	147
5.4.4	Adaptive Entzerrung	148
5.5	Scrambling	150
5.6	Synchronisation	154
5.6.1	Symboltaktssynchronisation	154
5.6.2	Rahmensynchronisation	157
5.7	Weiterführende Hinweise	159
5.8	Übungsaufgaben	160
6	Modulationsverfahren	161
6.1	Bandpasssignale	162

6.1.1	Bandpasssignal und äquivalentes Tiefpasssignal	162
6.1.2	Äquivalentes Tiefpasssystem	166
6.1.3	Leistungsdichtespektrum von Bandpassrauschen	170
6.2	Analoge Modulationsverfahren	171
6.2.1	Amplitudenmodulation	172
6.2.2	Frequenz- und Phasenmodulation	179
6.3	Digitale Modulationsverfahren	189
6.3.1	Quadraturmodulator	189
6.3.2	Amplitudenumtastung	191
6.3.3	Phasenumtastung	193
6.3.4	Quadratur-Amplitudenmodulation	198
6.3.5	Frequenzumtastung	200
6.4	Demodulation und Fehlerwahrscheinlichkeit digitaler Modulationsverfahren .	209
6.4.1	Kohärente Demodulation	210
6.4.2	Inkohärente Demodulation	222
6.4.3	Modulationsfehler, EVM und MER	228
6.5	Entzerrung von Bandpasssignalen	229
6.6	Multiträgersysteme und Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	231
6.7	Empfängerarchitekturen	239
6.8	Weiterführende Hinweise	243
6.9	Übungsaufgaben	244
7	Kanalcodierung	247
7.1	Kanalkapazität	248
7.2	Blockcodes	251
7.2.1	Eigenschaften von Blockcodes	251
7.2.2	Hamming-Codes	255
7.2.3	Codiergewinn	259
7.2.4	Zyklische Codes	260
7.3	Faltungscodes	266
7.3.1	Codierung	267
7.3.2	Viterbi-Decodierung	271
7.3.3	Decodierung mit/ohne Zuverlässigkeitsinformation	275
7.4	Interleaving	277
7.5	Turbo-Codes und LDPC-Codes	280
7.6	Weiterführende Hinweise	282
7.7	Übungsaufgaben	283

8	Kommunikationsnetze	285
8.1	Das OSI-Referenzmodell	285
8.2	Mehrfachzugriffsverfahren.....	288
8.2.1	Prinzipien des Mehrfachzugriffs	288
8.2.2	Dezentrale Zugriffssteuerung	292
8.3	Leitungs- und Paketvermittlung.....	296
8.4	Zuverlässige Datenübertragung	302
8.5	Weiterführende Hinweise	306
8.6	Übungsaufgaben	307
	Anhang	309
	Anhang 1: Kleine Formelsammlung.....	309
	Anhang 2: Tabellen und Theoreme der Fourier-Transformation	313
	Anhang 3: Die Hilbert-Transformation	316
	Anhang 4: Die erfc-Funktion	318
	Anhang 5: Lösungen zu den Übungsaufgaben	320
	Verzeichnis der Beispiele	331
	Verzeichnis der Symbole und Formelzeichen	333
	Abkürzungsverzeichnis	335
	Literatur	339
	Index	343

1

Einführung

Dieses Kapitel gibt einen ersten Überblick über die Elemente digitaler und analoger Übertragungssysteme. Daneben gehen wir auch auf die wichtigsten Standardisierungsgremien ein, die dafür sorgen, dass Systeme verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können.

■ 1.1 Nachrichtentechnik – ein Überblick

Zwei Computer sind über ein Kommunikationsnetz verbunden und tauschen Daten aus (Bild 1.1) – dieses Prinzip liegt vielen Anwendungen der Nachrichtentechnik zugrunde. Beispielsweise kann es sich bei einem Computer um den privaten PC zu Hause handeln, der mit einem Server eines Internetanbieters kommuniziert. Es kann sich aber auch um einen Computer in einer Fertigungslinie handeln, der Daten von Sensoren erfasst und an einen Zentralrechner übermittelt. Oder um Steuergeräte für Antrieb, Bremsen usw. in einem Fahrzeug. Entsprechend der Vielzahl dieser Anwendungen kommen viele verschiedene Übertragungssysteme zum Einsatz: Ethernet, WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth, DSL (Digital Subscriber Line) oder Feldbusse für kürzere Entfernungen und die Übertragung über Lichtwellenleiter, Richtfunk oder Satellit bei großen Entfernungen.



Bild 1.1 Ein Kommunikationssystem

Trotz dieser Vielzahl gibt es grundlegende Funktionen, die den Systemen gemeinsam sind. Bild 1.2 zeigt ein allgemeines Modell eines Übertragungssystems. Im Sender finden wir die Quellen- und Kanalcodierung sowie die Modulation. Der Empfänger besteht aus den entsprechenden Funktionen der Quellen- und Kanaldecodierung und der Demodulation. Sender und Empfänger sind über den Übertragungskanal – oder kurz Kanal – verbunden.

Betrachten wir das System von „innen“ heraus und beginnen mit dem Kanal: Der Kanal ist das physikalische Übertragungsmedium zwischen Sender und Empfänger. Dabei kann es sich z. B. um eine terrestrische oder satellitengebundene Funkstrecke, ein Telefonkabel, einen Lichtwellenleiter oder auch um ein Speichermedium wie die Compact Disc (CD) handeln. Der Kanal dämpft und verzerrt das vom Sender ausgehende Nutzsignal, und es überlagern sich Störungen in Form eines Rauschsignals. Das Verhältnis der Leistung des Nutzsignals zur Leistung

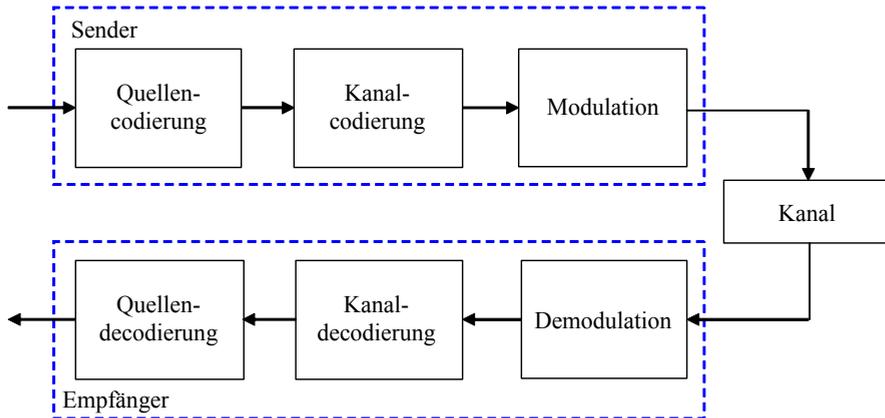


Bild 1.2 Elemente eines Übertragungssystems

des Rauschsignals am Empfängereingang bezeichnet man als Signal-Rausch-Verhältnis. Eine weitere wesentliche Eigenschaft des Kanals ist dessen Bandbreite, d. h. die Größe des für die Übertragung nutzbaren Frequenzbereichs. Bei einem digitalen Übertragungssystem bestimmen das Signal-Rausch-Verhältnis und die Bandbreite die erzielbare Übertragungsrate. Diese wird meist in Bit pro Sekunde (bit/s) angegeben.

Der Block Modulation bildet die zu übertragende Nachricht auf für den Kanal geeignete Signale ab. Modulation und Demodulation können auch Funktionen zur spektralen Formung des gesendeten Signals bzw. zur Entzerrung des Signals im Empfänger, oder im Falle einer optischen Übertragung die elektrisch-optische Wandlung des Signals, beinhalten. Der Begriff Modem leitet sich aus der Zusammenfassung Modulation-Demodulation ab.

Wie die Begriffe Bandbreite, Frequenzbereich und spektrale Formung andeuten, spielen in der Nachrichtentechnik sowohl der Zeit- als auch der Frequenzbereich eine wichtige Rolle. Bild 1.3 zeigt links ein Signal im Zeitbereich. Es handelt sich um ein Sinussignal, dem Rauschen überlagert ist. Bild 1.3 rechts zeigt das Spektrum dieses Signals. Das Spektrum zeigt die Verteilung der Leistung oder der Amplitude über der Frequenz. Die Verbindung zwischen Zeit- und Frequenzbereich stellt die Fourier-Transformation her.

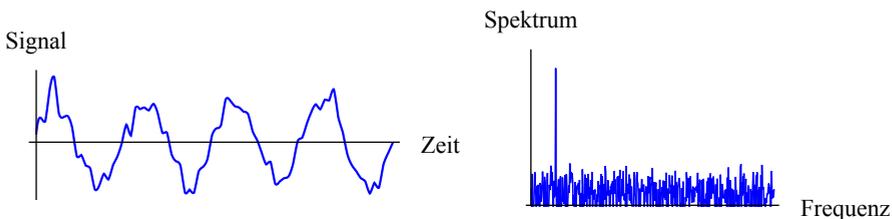


Bild 1.3 Ein Signal im Zeit- und im Frequenzbereich

Bei einem digitalen Übertragungssystem ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit ein wichtiges Qualitätskriterium. Grundsätzlich kommt es durch das dem Nutzsinal überlagerte Rauschen bei der Übertragung zu Bitfehlern. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bit verfälscht wird, ist umso

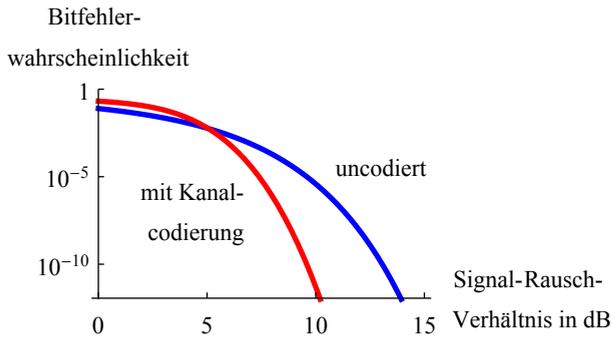


Bild 1.4 Bitfehlerwahrscheinlichkeit und Kanalcodierung

größer, je kleiner das Signal-Rausch-Verhältnis ist. Bild 1.4 zeigt einen typischen Verlauf der Bitfehlerwahrscheinlichkeit als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Mithilfe der Kanalcodierung lassen sich nun Bitfehler, die durch Störungen und auch durch Verzerrungen im Übertragungskanal verursacht werden, korrigieren. Dies geschieht, indem sendeseitig eine Zusatzinformation in Form von Redundanzbits zu der zu übertragenden Information hinzugefügt wird. Durch Auswertung der Redundanzinformation wird der Kanaldcodierer des Empfängers in die Lage versetzt, Bitfehler korrigieren zu können. Bild 1.4 zeigt die Verbesserung, die mit einer Kanalcodierung erzielt wird. Die Verbesserung drückt sich dadurch aus, dass bei gleicher Bitfehlerwahrscheinlichkeit mit Kanalcodierung ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis erforderlich ist als bei uncodierter Übertragung. Der steile Verlauf bei einem großen Signal-Rausch-Verhältnis ist typisch für digitale Übertragungssysteme. Er weist darauf hin, dass bei zunehmenden Störungen die Bitfehlerwahrscheinlichkeit stark ansteigt und die Übertragungsqualität schlagartig abnimmt. Wie man allerdings erkennt, schneiden sich die Kurven für codierte und uncodierte Übertragung. Links vom Schnittpunkt, also bei einem sehr kleinen Signal-Rausch-Verhältnis, ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei codierter Übertragung sogar größer als bei uncodierter Übertragung. Dies ist auf die zusätzlich zu übertragende Redundanzinformation zurückzuführen.

Am Eingang unseres Übertragungssystems in Bild 1.2 finden wir die Quellencodierung. Aufgabe der Quellencodierung ist es, die zu übertragende Nachricht mit einer möglichst geringen Anzahl von Bits darzustellen. Dazu wird die in der Nachricht enthaltene redundante Information minimiert. Die Trennung von Quellen- und Kanalcodierung geht auf die grundlegenden Arbeiten zur Informationstheorie von Claude Shannon aus dem Jahr 1948 zurück. Bekannte Quellencodierungsverfahren sind beispielsweise MPEG (Moving Picture Experts Group) für Videosignale und AAC (Advanced Audio Coding) für Audiosignale.

■ 1.2 Digitale und analoge Übertragung

Bei der großen Mehrzahl der heutigen Übertragungssysteme handelt es sich um digitale Systeme. Analoge Verfahren findet man im Bereich des Hörfunks, aber auch z. B. in der Sensorik. Eine Funktion, die sowohl in digitalen als auch in analogen Systemen zu finden ist, ist die Modulation eines Basisbandsignals auf einen sinusförmigen Träger. Ein Basisbandsignal ist das

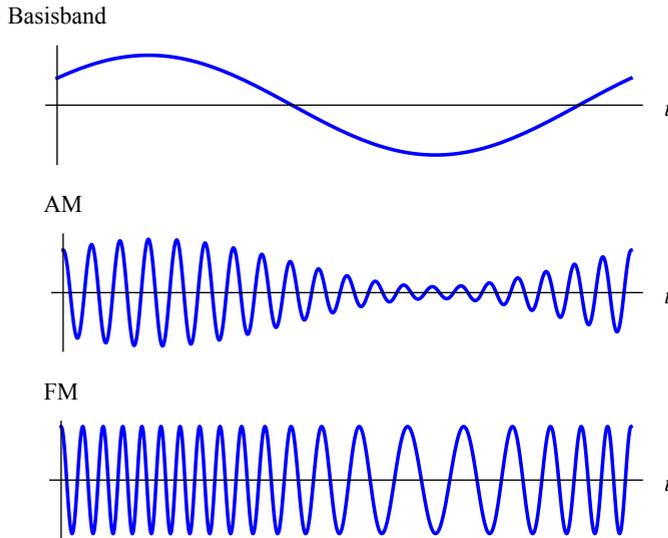


Bild 1.5 Analoge Modulationsverfahren

Quellensignal in seiner ursprünglichen Lage bei niedrigen Frequenzen. Durch die Modulation wird es zu höheren Frequenzen hin verschoben. Die wichtigsten analogen Modulationsverfahren sind die Amplitudenmodulation (AM) und die Frequenzmodulation (FM). Bei der AM ändert sich die Amplitude des Trägersignals in Abhängigkeit vom Basisbandsignal, und bei der FM ändert sich dessen Frequenz (Bild 1.5).

Bei den digitalen Modulationsverfahren repräsentiert das Basisbandsignal die zu übertragende Binärfolge (Bild 1.6). Bei der Amplitudenumtastung (Amplitude-Shift Keying, ASK) ändert sich die Amplitude in Abhängigkeit vom Basisbandsignal. Bei der Phasenumtastung (Phase-Shift Keying, PSK) ändert sich entsprechend die Phase und bei der Frequenzumtastung (Frequency-Shift Keying, FSK) die Frequenz.

Digitale Übertragungssysteme enthalten viele analoge Komponenten, und auch umgekehrt findet sich bei analogen Systemen die digitale Signalverarbeitung. Der Übergang von analogen zu digitalen – oder genauer zeitdiskreten Signalen – erfolgt mithilfe eines Analog-Digital (A/D)- bzw. Digital-Analog (D/A)-Wandlers. Bild 1.7 zeigt eine typische Aufteilung von digitaler und analoger Signalverarbeitung in einem Übertragungssystem. Ein analoges Quellensignal wird mit einem A/D-Wandler digitalisiert. Anschließend wird das modulierte Signal mithilfe der digitalen Signalverarbeitung erzeugt und in ein analoges Signal gewandelt. Auf den D/A-Wandler folgen weitere analoge Komponenten, typischerweise ein Mischer, mit dem das Signal auf die gewünschte Frequenz umgesetzt wird, und ein Leistungsverstärker. Der Empfänger besteht aus einer entsprechenden Signalverarbeitungskette.

Die grundlegenden Funktionen der A/D-Wandlung sind die Abtastung und die Quantisierung des analogen Signals (Bild 1.8). Durch die Abtastung des analogen Signals $x(t)$ mit der Abtastrate f_A erhalten wir das zeitdiskrete Signal $x(n)$. Die Punkte in der Darstellung von $x(n)$ markieren die äquidistanten Abtastwerte im Abstand $T_A = 1/f_A$. Unter Quantisierung versteht man die Abbildung der Amplitude der Abtastwerte auf eine endliche Anzahl von diskreten Werten.

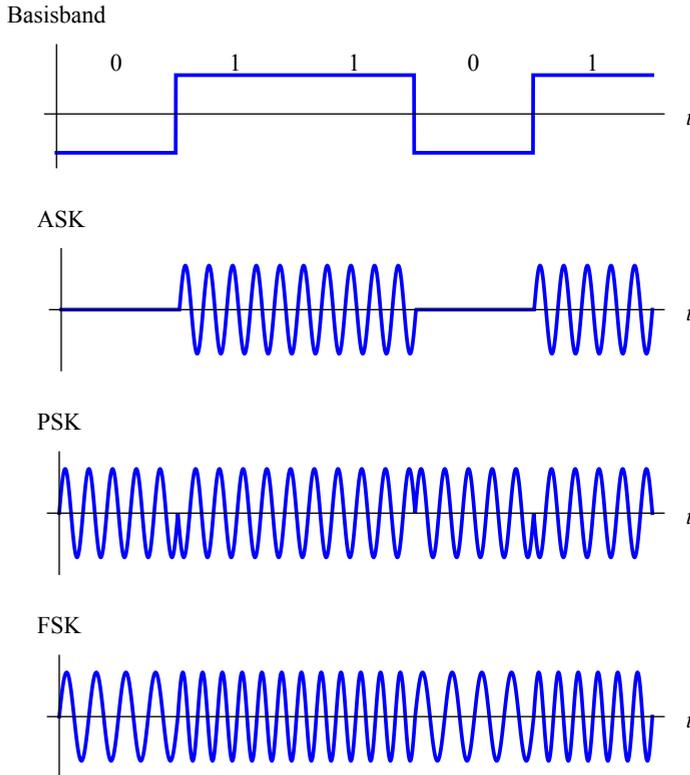


Bild 1.6 Digitale Modulationsverfahren

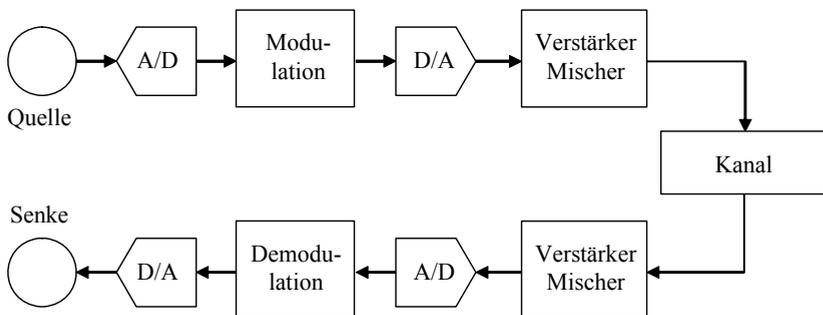


Bild 1.7 Digitale und analoge Signalverarbeitung

In der Nachrichtentechnik haben wir es in der Regel mit einer Echtzeitverarbeitung der Daten zu tun, bei der die Signalverarbeitung in einer fest begrenzten Zeit ausgeführt werden muss. Während man im Audibereich mit Abtastraten von einigen 10 kHz arbeitet, findet man in digitalen Übertragungssystemen Abtastraten bis zu 100 MHz und darüber hinaus. Beispielsweise muss bei der Filterung eines Audiosignals, das mit 44,1 kHz abgetastet wurde (diese Abtastrate

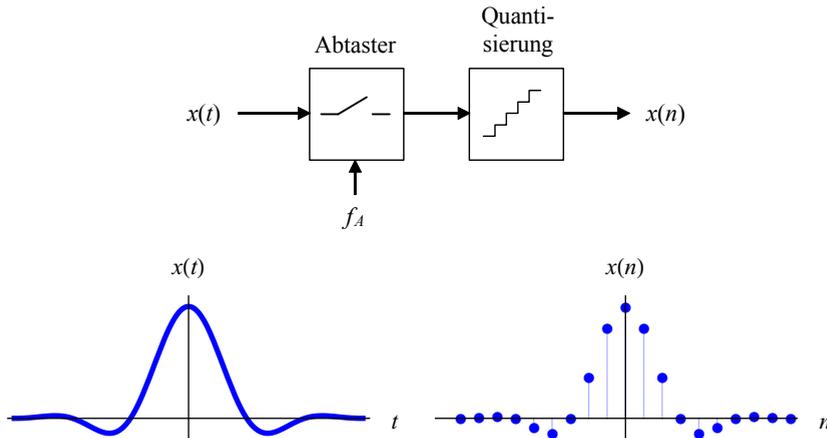


Bild 1.8 Ein zeitdiskretes Signal entsteht durch Abtastung eines analogen Signals

wird bei der Audio-CD verwendet), die digitale Filterfunktion alle $1/44,1 \text{ kHz} = 22,67 \mu\text{s}$ einen neuen Ausgangswert berechnen. Bei einer Abtastung mit 100 MHz stehen dagegen nur 10 ns für die Verarbeitung eines Abtastwertes zur Verfügung.

■ 1.3 Standardisierung

Standards sind in der Nachrichtentechnik von großer Bedeutung, da nur durch sie gewährleistet wird, dass Systeme verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können. Standardisierungsgremien erarbeiten offene Standards, die allen Herstellern zur Verfügung stehen, um konforme Produkte zu entwickeln. Die Standardisierung ist einerseits oft Voraussetzung, aber andererseits keine Garantie für erfolgreiche Entwicklungen.

Das weltweit wichtigste Standardisierungsgremium ist die *International Telecommunication Union* (ITU, www.itu.int). Die ITU ist eine Untergruppe der Vereinten Nationen und gliedert sich in drei Sektoren:

- ITU-T (Telecommunication Standardization Sector)
- ITU-R (Radiocommunication Sector)
- ITU-D (Telecommunication Development Sector)

Die ITU-T ist aus der CCITT (Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique) und die ITU-R aus der CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) hervorgegangen. Die ITU-R reguliert die weltweite Nutzung von Radiofrequenzen, und die ITU-D ist für Entwicklungsländer zuständig. Die für Telekommunikationsstandards zuständige ITU-T erarbeitet international gültige Empfehlungen (Recommendations). Diese sind in durch Buchstaben gekennzeichnete Serien geordnet. Beispielsweise befasst sich die G-Serie mit Übertragungssystemen (Transmission systems and media, digital systems and networks).

Die *International Organization for Standardization* (ISO, www.iso.org) ist die Dachorganisation der nationalen Normenausschüsse. Dies sind beispielsweise in Deutschland das DIN

(Deutsches Institut für Normung) und in den USA das ANSI (American National Standards Institute). Die ISO stimmt die von den einzelnen Ländern vorgeschlagenen Standards ab und ist z. B. für die ISO-9000-Serie im Bereich des Qualitätsmanagements bekannt. Im Bereich der Telekommunikation ist insbesondere die OSI-Architektur der ISO von Bedeutung.

Das *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI, www.etsi.org) wurde von der Europäischen Gemeinschaft gegründet und hat für die Normung im Bereich der Telekommunikation in Europa große Bedeutung. Ein überaus erfolgreicher ETSI-Standard im Mobilfunk ist GSM (Global System for Mobile Communications).

Das *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE, www.ieee.org) erarbeitet Normen auf dem Gebiet der Elektrotechnik und Informatik und ist insbesondere für die Standards der IEEE-802-Reihe für lokale Rechnernetze bekannt.

Für den Bereich des Internets ist die *Internet Engineering Taskforce* (IETF, www.ietf.org) das wichtigste Gremium, obwohl auch die ITU in den letzten Jahren hier verstärkt (in der Y-Serie) tätig wurde. Die IETF wurde 1989 als Untergruppe des IAB (Internet Architecture Board) gegründet und erarbeitet Standards für das Internet. Diese heißen RFCs (Request for Comments) und sind frei verfügbar.

■ 1.4 Zum Inhalt dieses Buches

Kapitel 2 beschreibt Signale und deren Übertragung über lineare, zeitinvariante Systeme. Die hier behandelten Themen wie Impulsantwort und Faltung, Fourier-Transformation, Übertragungsfunktion und die Beschreibung von Zufallssignalen sind wichtige Grundlagen für die folgenden Kapitel.

Kapitel 3 und 4 befassen sich mit der Signalabtastung und Quantisierung als Grundlage der Analog-Digital-Wandlung sowie der digitalen Signalverarbeitung. Das Abtasttheorem ist für die Arbeit mit zeitdiskreten Signalen von fundamentaler Bedeutung. Wir gehen auch auf die für die Nachrichtentechnik wichtige Abtastung von Bandpasssignalen ein, bei der durch eine Unterabtastung die Abtastrate reduziert werden kann. Viele Verfahren der Nachrichtentechnik gehen von zeitdiskreten Signalen aus. Bei der digitalen Signalverarbeitung konzentrieren wir uns auf die aus Sicht der Nachrichtentechnik wichtigen Themen.

Kapitel 5 behandelt die digitale Nachrichtenübertragung im Basisband, und **Kapitel 6** beschäftigt sich mit Modulationsverfahren. Auch bei der Verwendung eines Modulationsverfahrens erfolgt die Signalverarbeitung weitgehend im Basisband, sodass die Konzepte von Kapitel 5 von grundlegender Bedeutung sind. Wir behandeln analoge und digitale Modulationsverfahren und zuvor als gemeinsame Grundlage die Darstellung von Bandpasssignalen durch ihr äquivalentes Tiefpasssignal.

Gegenstand von **Kapitel 7** sind Kanalcodierungsverfahren und deren Decodierung, und in **Kapitel 8** gehen wir auf einige Aspekte von Kommunikationsnetzen ein, die über die Nachrichtenübertragung zwischen zwei Punkten hinausgehen.

Bei vielen Themen musste eine Auswahl getroffen werden. Am Ende jedes Kapitels finden sich daher weiterführende Hinweise mit Anmerkungen zu den Aspekten, die nicht behandelt wurden, und entsprechende Literaturhinweise. Ferner wird auf Veröffentlichungen hingewiesen, die zu den Klassikern in der Nachrichtentechnik gehören. Und wir blicken hier gelegentlich

auf aktuelle Forschungstrends und mit der Nachrichtentechnik verwandte Themen, in denen interessante Entwicklungen zu beobachten sind.

Für die Vertiefung des Stoffes finden sich am Ende jedes Kapitels Übungsaufgaben, die Lösungen dazu stehen im Anhang. Dort findet man auch nützliche Formeln und Tabellen. Neben Aufgaben, die mit Papier und Bleistift bearbeitet werden können, ist die Simulation von Übertragungssystemen sehr hilfreich, um Zusammenhänge verständlich zu machen oder um komplexere Systeme zu entwerfen. Als Simulationswerkzeuge bieten sich MATLAB und (als kostenfreie Alternativen) Scilab und Python an.

Auf den Internetseiten zum Buch

<https://plus.hanser-fachbuch.de/> und

<https://www.hs-schmalkalden.de/nachrichtentechnik>

stehen daher MATLAB-, Scilab- und Python-Dateien zur Verfügung, um ein einfaches Übertragungssystem zu simulieren und die als Ausgangspunkt für eigene Simulationen dienen können. Ebenso werden dort die Bilder aus dem Buch sowie interaktive Mathematica-Notebooks, u. a. zu den Themen Faltung, Abtasttheorem und diskrete Fourier-Transformation, bereitgestellt. Im einzelnen sind folgende Materialien verfügbar:

- Die **Bilder** des Buches als PDF-Datei
- Simulationen mit **MATLAB** und **Scilab**
- Simulationen mit **Python**
- Interaktive **Mathematica-Notebooks**

Zu den Simulationen gehört jeweils eine Beschreibung als PDF-Dokument und die MATLAB-, Scilab- und Python-Dateien. Der Python-Code steht in Form eines Jupyter-Notebooks zur Verfügung. Die Simulationen beinhalten:

- Basisband-Übertragung und Empfänger mit signalangepasstem Filter
- QPSK-Übertragungsstrecke und Empfänger mit signalangepasstem Filter
- QPSK-Übertragungsstrecke mit Mehrwegekanal und Empfänger mit T/2-Entzerrer

Die Mathematica-Notebooks können mit der kostenlosen Wolfram-Player-Software geöffnet werden. Auf eine englische Online-Version kann man beim Wolfram Demonstrations Project zugreifen. Die Notebooks sind zu folgenden Themen verfügbar:

- Faltung
- Abtasttheorem
- Diskrete Faltung
- Diskrete Fourier Transformation
- Analoge Modulation
- Digitale Modulation (QPSK)

2

Signalübertragung

Ein Signal ist die physikalische Darstellung einer Nachricht z. B. in Form einer elektrischen Spannung oder einer akustischen oder elektromagnetischen Welle. In diesem Kapitel gehen wir der Frage nach, wie sich ein Signal bei der Übertragung über ein System wie den Übertragungskanal oder ein Filter verhält. Sehr viele dieser Systeme gehören zur Klasse der linearen zeitinvarianten Systeme. Diese Systeme werden im Zeitbereich mithilfe der Impulsantwort und im Frequenzbereich mithilfe der Übertragungsfunktion beschrieben. Wichtige Werkzeuge in diesem Zusammenhang sind die Faltung und die Fourier-Transformation.

Nachrichtenträgende Signale sind Zufallssignale, im Gegensatz zu deterministischen Signalen wie beispielsweise einem Sinussignal. Ein deterministisches Signal ist vollständig bekannt, eine Übertragung ist daher gar nicht notwendig! Die Beschreibung von Zufallssignalen mithilfe der Korrelation und des Leistungsdichtespektrums bildet eine weitere Grundlage für die Analyse von Übertragungssystemen.

■ 2.1 Lineare zeitinvariante Systeme

Wir betrachten ein System mit einem Eingang und einem Ausgang. Das System reagiert auf ein Eingangssignal $x(t)$ mit dem Ausgangssignal $y(t)$. Der funktionale Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang wird durch $y(t) = F\{x(t)\}$ beschrieben (Bild 2.1).

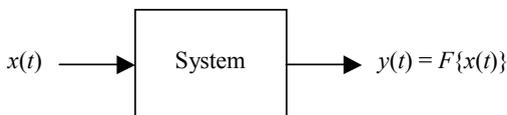


Bild 2.1 Ein System

Ein System ist linear, wenn für eine Linearkombination von Eingangssignalen $x_i(t)$ die Linearkombination der entsprechenden Ausgangssignale $y_i(t) = F\{x_i(t)\}$ zu beobachten ist:

$$\begin{aligned}x(t) &= a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) + \dots = \sum_i a_i x_i(t) \\y(t) &= a_1 F\{x_1(t)\} + a_2 F\{x_2(t)\} + \dots = \sum_i a_i F\{x_i(t)\}\end{aligned}\quad (2.1)$$

So ist ein System mit $F\{x(t)\} = 2x(t)$ linear, während ein System mit $F\{x(t)\} = x^2(t)$ nichtlinear ist und Gl. (2.1) nicht gilt. Ein System ist zeitinvariant, wenn dessen Eigenschaften unabhängig von der Zeit sind. Für ein zeitverschobenes Eingangssignal $x(t - t_0)$ ist dann das entsprechende zeitverschobene Ausgangssignal zu beobachten:

$$F\{x(t - t_0)\} = y(t - t_0)\quad (2.2)$$

In diesem Fall spricht man von linearen zeitinvarianten Systemen oder kurz LTI-Systemen (Linear Time-Invariant, LTI). Beispiele für LTI-Systeme sind analoge und digitale Filter, ein Integrator oder ein Verzögerungsglied. Viele reale Systeme verhalten sich bei Ansteuerung mit Signalen kleiner Amplitude linear, während bei Signalen großer Amplitude nichtlineare Effekte auftreten. Ein Beispiel für ein *zeitvariantes* System ist ein Funkkanal zu einem beweglichen Empfänger, etwa einem Fußgänger, Rad- oder Autofahrer. Aufgrund der Bewegung des Empfängers ändern sich die Eigenschaften des Kanals mit der Zeit und Gl. (2.2) gilt nicht.

2.1.1 Impulsantwort und Faltung

Zur Beschreibung eines LTI-Systems im Zeitbereich dient die Impulsantwort $h(t)$. Die Impulsantwort ist die Reaktion des Systems auf einen Dirac-Impuls $\delta(t)$ am Eingang, d. h. $h(t) = F\{\delta(t)\}$. Der Dirac¹-Impuls ist eine verallgemeinerte Funktion, die durch

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad \delta(t) = 0 \quad \text{für } t \neq 0 \quad (2.3)$$

definiert ist. Umgangssprachlich kann man den Dirac-Impuls als einen unendlich schmalen Impuls mit der Fläche 1 beschreiben, dessen Wert zum Zeitpunkt $t = 0$ undefiniert ist. $\delta(t)$ hat die Einheit 1/s. Der Impuls wird grafisch durch einen senkrechten Pfeil dargestellt. Messtechnisch kann der Dirac-Impuls durch einen schmalen Rechteckimpuls $d(t)$ der Breite T_0 , der Höhe $1/T_0$ und der Fläche 1 näherungsweise realisiert werden (Bild 2.2).

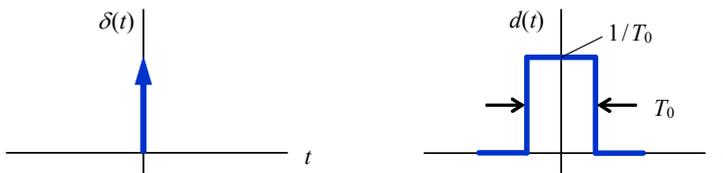


Bild 2.2 Dirac-Impuls und messtechnische Realisierung durch schmalen Rechteckimpuls

Ein beliebiges Signal $x(t)$ kann durch eine Folge von Rechteckimpulsen approximiert werden, siehe Bild 2.3. $x(nT_0) d(t - nT_0) T_0$ ist ein Rechteckimpuls an der Stelle $t = nT_0$ und der Höhe $x(nT_0)$. Durch Aufsummieren der Rechteckimpulse erhält man:

$$x(t) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_0) d(t - nT_0) T_0 \quad (2.4)$$

Die Approximation wird offensichtlich umso besser, je schmaler die Rechteckimpulse sind. Lässt man T_0 gegen null gehen, so geht der Rechteckimpuls in einen Dirac-Impuls und die Summe in Gl. (2.4) in ein Integral über. Mit den Bezeichnungen $T_0 \rightarrow d\tau$ sowie $nT_0 \rightarrow \tau$ erhält man den Ausdruck:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = x(t) * \delta(\tau) \quad (2.5)$$

¹ Paul A. M. Dirac (1902–1984), britischer Physiker.

Index

A

- A-Kennlinie 80
- Abtasthalteglied 72
- Abtastperiode 67
- Abtastrate 67
- Abtasttheorem 67, 70
 - für Bandpasssignale 73
- Acknowledgement 302
- Additive White Gaussian Noise (AWGN) 64, 131, 147, 210, 248
- Alias-Effekt 69
- ALOHA 292
 - Slotted 293
- Amplituden-Phasenumtastung 200
- Amplitudengang 32
- Amplitudenmodulation 172
 - reine Zweiseitenband-AM 174
 - Störverhalten 177
- Amplitudenumtastung 191
 - Fehlerwahrscheinlichkeit 217, 225
- Anstiegszeit 35
- Anti-Aliasing-Filter 70
- Augendiagramm 121
- Autokorrelationsfunktion (AKF) 42, 47
 - eines Sprachsignals 88
 - zeitdiskreter Signale 86
- Autokorrelationsmatrix 143, 230
- Automatic Repeat Request (ARQ) 302
 - Go-Back- n 305
 - Selective Repeat 305
 - Stop-and-Wait 302

B

- Bandpassrauschen 170
- Bandpasssignal
 - äquivalentes Tiefpasssignal 162
 - Abtasttheorem 73
 - Leistungsdichtespektrum 190

- Barker-Folge 158
- BER 130
- Binomialverteilung 54
- bipolares Signal 111
- Bitfehlerhäufigkeit 130
- Bitfehlerwahrscheinlichkeit 55, 129, 130, 133, 138
- Bitrate 111
- Bitraten-Laufzeit-Produkt 304
- Blockcode 251
 - linearer 253
 - perfekter 255
 - systematischer 251
 - zyklischer 261
- Bluetooth 291

C

- Carrier Sense Multiple Access (CSMA) 294
- Carson-Bandbreite 182
- Chip-Rate 289
- Code-Division Multiple Access (CDMA) 289
 - DS-CDMA 291
 - FH-CDMA 291
- Coderate 252
- Codiergewinn 259
- Compressed Sensing 83
- Crest-Faktor 47, 237
- Cyclic Redundancy Check (CRC) 265

D

- Dezibel 34
- Digital Video Broadcasting (DVB) 152, 208, 221, 279
- Dirac-Impuls 20
 - Siebeigenschaft 22

E

Effektivwert 40, 47
 Einheitsimpuls 86
 Einheitssprung 22, 86
 Energie, normierte 40, 86
 Energiedichtespektrum 43
 Energiesignal 40
 – zeitdiskrete 86
 Entzerrer
 – adaptiver 148
 – für Bandpasssignale 229
 – MLSE 147
 – MMSE 142, 144
 – Zero-Forcing 142, 144
 Error Vector Magnitude (EVM) 228
 Ethernet 295, 299

F

Faltung 21
 – diskrete 88
 Faltungscodierung 267
 – Codebaum 268
 – Codiergewinn 275, 276
 – Einflusslänge 267
 – freie Distanz 275
 – Gedächtnisordnung 267
 – Netzdiagramm 268
 – Punktierung 270
 – Zustandsdiagramm 269
 Faltungsmatrix 142
 Faltungstheorem 31
 Fensterfunktion 105
 FIR-Filter 101
 – Equiripple 106
 – Impulsantwort 101
 – Kosinus-roll-off 120
 Forward Error Correction (FEC) 247, 302
 Fourier-Reihe 30
 Fourier-Transformation 25
 – diskrete 94
 – schnelle 98
 – zeitdiskreter Signale 92
 Frequency-Division Multiple Access (FDMA) 288
 Frequenzhub 179, 201

Frequenzmodulation 179
 – Störverhalten 184
 Frequenzumtastung 200
 – Fehlerwahrscheinlichkeit 217, 227

G

Gaußverteilung 51
 Generatorpolynom 151, 261
 Gleichverteilung 50
 Gold-Folge 290
 Gray-Codierung 113, 193, 199
 Gruppenlaufzeit 36, 104

H

Hamming-Code 255
 Hamming-Distanz 252
 Hamming-Gewicht 253
 Hamming-Schranke 254
 Hilbert-Transformation 165, 316
 Hüllkurve 164

I

IIR-Filter 100
 Impulsantwort 20
 – des idealen Bandpasses 39
 – des idealen Tiefpasses 38
 – des RC-Tiefpasses 22
 – des verzerrungsfreien Systems 37
 – zeitdiskrete 89
 Interleaver
 – Blockinterleaver 277
 – Faltungsinterleaver 278
 Internet Protocol
 – IPv4 298
 – IPv6 300
 Intersymbol-Interferenz 116

J

Jitter 155
 Joint Communication and Sensing (JCAS) 244

K

- Kanalkapazität 248
- Korrelationsfilter 133
- Kosinus-roll-off-Filter 118
- Kreuzkorrelationsfunktion 41
 - zeitdiskreter Signale 86

L

- LDPC-Code 281
- Leckeffekt 95
- Leistung, normierte 40, 46, 87
- Leistungsdichtespektrum 44, 55
 - Bandpasssignal 190
 - digitaler Basisbandsignale 123
 - zeitdiskretes Signal 97
- Leistungssignal 40
 - zeitdiskretes 87
- Leitungscode 111
 - $nBmB$ 114
 - 2B1Q 113
 - AMI 112, 125
 - Manchester 112, 126, 188
 - NRZI 112, 188
- Leitungsvermittlung 296
- LMS-Algorithmus 148
- Local Area Network (LAN) 295, 299
- LTI-System 20, 58
 - zeitdiskretes 89

M

- Matched Filter 133
- Medium Access Control (MAC) 288, 296
- Mehrwegeempfang 37
- Minimum-Shift Keying (MSK) 204
 - Fehlerwahrscheinlichkeit 218
 - Gaußsches 207
- Mischer 239
- Mittelwert 46, 50
- Modulation Error Ratio (MER) 228
- Modulationsindex
 - AM 172
 - FM 180
 - FSK 201

N

- Normalverteilung 51
- NRZ-Signal 111
- Nyquist-Bandbreite 115
- Nyquist-Impuls 117
- Nyquist-Kriterium 117, 121
- Nyquist-Rate 70

O

- On-Off-Keying 191
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 232
 - Cyclic Prefix 237
- orthogonale Signale 41
- OSI-Modell 285

P

- Paketvermittlung 296
- Parsevalsches Theorem 44
- Peak-to-average power ratio (PAPR) 47, 200
- Periodogramm 97
- Phasengang 32
- Phasenmodulation 179
- Phasenregelkreis 155, 183, 220
- Phasenumtastung 193
 - differenzielle 197
 - Fehlerwahrscheinlichkeit 214, 226
 - Offset-QPSK 196
- PN-Folge 150, 290
- Protocol Data Unit (PDU) 286
- Protokollreferenzmodell 286
- Pulsamplitudenmodulation (PAM) 115, 136
- Pulscodemodulation (PCM) 80
 - adaptive 82
 - differenzielle 81

Q

- Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) 198
 - Fehlerwahrscheinlichkeit 216
- Quadratur-Demodulator 210
- Quadratur-Modulator 189
- Quadraturkomponente 163

Quantisierung

- lineare 76
- nichtlineare 79

Quantisierungsfehler 77

Quantisierungskennlinie 76

Quantisierungsrauschen 77

R

Radio Data System (RDS) 188

Rahmensynchronisation 157

Rauschbandbreite 63

Rauschen 60

- additives 64
- thermisches 52, 60
- weißes 60

Rauschleistungsdichte 60

Rayleighverteilung 53, 224

RC-Tiefpass 22, 24, 33, 35

Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) 244

Reed-Solomon-Code 266

Riceverteilung 53, 224

Roll-off-Faktor 118

Root-Mean-Square Value (RMS) 47

Round Trip Delay 304

RZ-Signal 111

S

Sample-Hold-Stufe 72

Scrambler

- Fehlermultiplikation 152
- rahmensynchronisierter 151
- selbstsynchronisierender 152

Service Access Point (SAP) 286

Service Data Unit (SDU) 286

Shannon-Grenze 249

si-Funktion 27

si-Verzerrung 73

Signal-Rausch-Verhältnis 64, 218, 229

signalangepasstes Filter 133

Signalraum 189

Sliding Window 303

Software Defined Radio (SDR) 243

spektrale Effizienz 249

Spiegelfrequenz 239

Spreizfaktor 290

Sprungantwort 22

- des RC-Tiefpasses 22

Spurious Free Dynamic Range (SFDR) 99

Störabstand 64, 78, 98, 130, 211, 250

Standardabweichung 46

Symbolfehlerwahrscheinlichkeit 137, 139

Symbolrate 113

Symboltaktsynchronisation 154

- entscheidungsrückgekoppelte 155
- Mueller & Müller 155

Syndrom 257, 263

T

Tastverhältnis 30

Tiefpass

- FIR 102
- idealer 38
- RC 22

Time-Division Multiple Access (TDMA) 289

Trägersynchronisation 219

- entscheidungsrückgekoppelte 220

Turbo-Code 280

U

Überabtastung 70, 73

Übertragungsbandbreite 115

- Kosinus-roll-off-Filter 119, 191

Übertragungsfunktion 32

- Mehrwegekanal 37
- RC-Tiefpass 33

UKW-Rundfunk 187

unipolares Signal 111

Unterabtastung 70, 75

V

Varianz 46, 50

Verteilungsfunktion 48

Viterbi-Decodierung 271

- Hard-Decision 275
- Soft-Decision 275
- Terminierung 273

Vorwärtsfehlerkorrektur 247, 302

W

Wahrscheinlichkeitsdichte [49](#)
Winkelmodulation [179](#)
Wireless Local Area Network (WLAN) [238](#)
Wurzel-Kosinus-roll-off-Filter [135](#)

Z

Zufallsprozess [46](#)
Zweierkomplement [76](#)
Zweitonsignal [96](#)
Zwischenfrequenz [239](#)