

Heinrich Nuskowski
Digitale Signalübertragung

Informationstechnik

Heinrich Nuskowski

Digitale Signalübertragung

Grundlagen der
digitalen Nachrichtenübertragungssysteme

3. Auflage

 VOGT

Dresden 2013

Autor

Dr.-Ing. habil. Heinrich Nuskowski
TU Dresden
Lehrstuhl Mobile Nachrichtensysteme

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Jörg Vogt
HTW Dresden
Fakultät Informatik / Mathematik
01069 Dresden

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Auflage März 2008
2. neubearb. und erw. Auflage Februar 2009
3. neubearb. und erw. Auflage Januar 2013

© Jörg Vogt Verlag 2013
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-55-7

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Vorwort des Herausgebers

Die in der Reihe „Informationstechnik“ erscheinenden Lehrbücher haben die Zielsetzung, Grundlagen, aktuelle Themen und Anwendungsgebiete ausgewählter Bereiche schwerpunktmäßig zu behandeln. Dabei sollen sowohl Studenten, als auch im Beruf stehende Fachleute angesprochen werden.

Bereits erschienen sind die Lehrbücher „Digitale Signalübertragung im Mobilfunk“ und „Hochfrequenztechnik I“. In Planung befinden sich die Themen Betriebssysteme, Rechnernetze und ein weiterführendes Werk zur Hochfrequenztechnik. Wir streben an, mit einer teilweisen Überlappung der Stoffgebiete das ganzheitliche Verständnis für die komplexe Problematik zu erhöhen.

Die positive Resonanz auf die erste und zweite Auflage des vorliegenden Lehrbuchs bestärkt Autor und Verlag darin, den eingeschlagenen Weg weiterzugehen.

Dresden, im November 2012

Jörg Vogt

Vorwort zur 3. Auflage

Die Gliederung und der Inhalt des Buches wurden gegenüber der 2. Auflage im Wesentlichen beibehalten. Jedoch wurden zahlreiche Ergänzungen und didaktische Veränderungen vorgenommen, so dass sich der Umfang des Buches um etwa 30 Seiten gegenüber der 2. Auflage vergrößert hat. Die Änderungen wurden in der Hoffnung gemacht, den Stoff noch übersichtlicher, anschaulicher und verständlicher zu präsentieren. So wurden mathematische Ableitungen in einem separaten mathematischen Anhang untergebracht. Auch wurden verschiedene Fehler korrigiert. Für Kommentare und kritische Hinweise aus dem verehrten Leserkreis bin ich weiterhin sehr dankbar.

Herzlich danken möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr. Rainer Schaffer für viele anregende Diskussionen und für die wertvolle Hilfe bei der Erstellung des \LaTeX -Manuskriptes.

Dresden, im September 2012

Heinrich Nuszowski

Vorwort zur 2. Auflage

Der Inhalt ist gegenüber der Erstauflage unverändert geblieben. Jedoch wurde die mit der Neuauflage gebotene Chance genutzt, einige Kapitel zu überarbeiten, verschiedene Sachverhalte zu präzisieren und zu ergänzen, sowie Fehler zu korrigieren, die leider in der ersten Auflage unentdeckt geblieben waren. Auch für die neue Auflage gilt, kritische Hinweise zur weiteren Verbesserung sind herzlich willkommen.

Dresden, im Januar 2009

Heinrich Nuszowski

Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch basiert auf dem Script zur Vorlesung "Digitale Signalübertragung", die der Autor an der Technischen Universität Dresden hält. Es wendet sich daher in erster Linie an Studenten, die sich in ihrem Fachstudium mit den Problemen der digitalen Signalübertragung beschäftigen und vermittelt theoretische Grundlagen dieser Disziplin der Nachrichtentechnik. Es ist auch gedacht als eine Grundlage für vertiefende Vorlesungen auf dem Gebiet der Über-

tragungstechnik im Fachstudium. Das Buch wendet sich aber auch an den auf diesem Gebiet tätigen Naturwissenschaftler oder Ingenieur. Der mit dem Buch vermittelte Überblick über das Stoffgebiet und die anschaulich beschriebenen Zusammenhänge bilden ein nützliches Repetitorium und eine Hilfe bei der Entscheidung praxisrelevanter Fragen. Für das Studium des Buches werden Kenntnisse der Systemtheorie vorausgesetzt, so wie sie im Grundstudium des Ingenieur-Studienganges Elektrotechnik vermittelt werden.

Digitale Signalübertragung kann unmoduliert im Basisband erfolgen oder moduliert im Bandpassbereich. Diese beiden Übertragungsvarianten geben die Gliederung des Buches vor. Nach einleitenden Betrachtungen im ersten Kapitel, behandelt das zweite Kapitel die digitale Signalübertragung im Basisband. Die intersymbolinterferenzfreie Übertragung von bandbegrenzten Impulsen, der optimale Signalempfang unter AWGN-Bedingungen und die Berechnung des Leistungsdichtespektrums zufälliger Impulsfolgen sind die Schwerpunkte dieses Kapitels. Das dritte Kapitel ist der modulierten Signalübertragung gewidmet. Es werden Ein- und Mehrträgerverfahren mit ihren Eigenschaften betrachtet: spektrale Effizienz und Störfestigkeit. Die Beschreibung der modulierten Signale erfolgt einerseits mit Hilfe der komplexen Einhüllenden. Diese Beschreibung ermöglicht ein Bandpassübertragungssystem in ein äquivalentes Basisbandübertragungssystem zu überführen. Dies bedeutet eine Vereinfachung der theoretischen Analyse und der mathematischen Simulation. Von großer praktischer Bedeutung ist die sich damit ergebende Möglichkeit, Modulation und Demodulation mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung im Basisband auszuführen. Andererseits werden die modulierten Signale als Vektoren in einem Signalraum beschrieben, der durch orthogonale Basisfunktionen definiert ist. Diese Beschreibung abstrahiert von der konkreten Signalform und ermöglicht die Anwendung der Vektoralgebra, als leistungsfähiges mathematisches Werkzeug, auf die Analyse von Übertragungsproblemen.

Wichtige Ressourcen für eine Signalübertragung sind Frequenzbandbreite und Sendeleistung. Beide Ressourcen stehen immer nur begrenzt zur Verfügung. Dem sorgsamem Umgang mit diesen beiden Ressourcen muss daher in jedem Übertragungssystem große Aufmerksamkeit gewidmet werden. Dieser Problemkreis steht daher auch im Mittelpunkt dieses Buches:

- Intersymbolinterferenzfreie Übertragung bandbegrenzter Signale unter Beachtung der Nyquistkriterien der Signalübertragung.
- Erhöhung der spektralen Effizienz durch Übertragung mehrvalenter Symbole, sowie durch Leitungscodierung und Impulsformung.
- Anwendung optimaler Empfangsmethoden (ML- und MAP-Empfänger) unter AWGN-Bedingungen (Störung durch additives gaußsches weißes Rauschen).

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis für die Unterstützung und Förderung der Arbeit und für die hervorragenden Arbeitsbedingungen an dem Vodafone Stiftungslehrstuhl "Mobile Nachrichtensysteme" bedanken.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Vogt für den Anstoß zu diesem Buch, für viele fachliche Diskussionen und die überaus wertvolle Unterstützung bei der Erstellung des Manuskripts. Auch allen meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die kreative und nette Arbeitsatmosphäre. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts, verbunden mit vielen Hinweisen und Anregungen, sage ich Herrn Dipl.-Ing. Marco Krondorf ein herzliches Danke.

In dem Bewußtsein, dass jede Arbeit verbessert werden kann, freue ich mich auf Reaktionen der Leserschaft. Hinweise und Vorschläge sind sehr willkommen.

Dresden, im Februar 2008

Heinrich Nuskowski

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Historische Entwicklung der Datenübertragung	3
1.2	Basisband- und Bandpassübertragung	5
2	Übertragung im Basisband	9
2.1	ISI-freie Impulsübertragung	9
2.1.1	Übertragungsmodell	9
2.1.2	1. Nyquistkriterium der Datenübertragung	11
2.1.3	2. Nyquistkriterium der Datenübertragung	21
2.1.4	Spektrale Effizienz der Impulsübertragung im Basisband	27
2.2	Partial Response Impulse	28
2.3	Signalempfang unter AWGN-Bedingungen	32
2.3.1	Optimales Empfangsfilter	32
2.3.2	Optimale Sendeimpulse	35
2.3.3	Korrelator als optimales Empfangsfilter	40
2.3.4	Maximum-Likelihood Detektor	41
2.3.5	Maximum-Likelihood Sequenz Detektor	48
2.4	Leistungsspektrum zufälliger Impulsfolgen	54
2.4.1	Berechnung des Leistungsspektrums	54
2.4.2	Leistungsspektren ausgewählter Impulsfolgen	59
2.4.3	Codes und Impulsformen für die Basisbandübertragung	74
3	Übertragung im Bandpassbereich	81
3.1	Darstellung von Bandpasssignalen	81
3.2	Äquivalentes TP-Übertragungssystem	84
3.3	Vektordarstellung von Signalen	88
3.3.1	Vektornorm	88
3.3.2	Skalarprodukt	88
3.3.3	Definition des Vektorraumes	89
3.3.4	Vektordarstellung hochfrequenter Symbole	90
3.4	Lineare Modulatorschaltung	93
3.5	Einzelträgerübertragung	95
3.5.1	Amplitudenmodulation	95

3.5.2	Phasenmodulation	100
3.5.3	Quadratur-Amplitudenmodulation	105
3.5.4	Frequenzmodulation	109
3.6	Mehrträgerübertragung	122
3.6.1	OFDM	123
3.6.2	GFDM	134
3.7	Orthogonale Modulationsverfahren	138
3.8	Optimaler Signalempfang	148
3.8.1	Allgemeines	148
3.8.2	Kohärenter Empfang	149
3.8.3	Nichtkohärenter Empfang	163
3.9	Bit- und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit	175
3.9.1	Binäre kohärente Signalübertragung	175
3.9.2	Mehrvalente kohärente Signalübertragung	182
3.9.3	Binäre nichtkohärente Signalübertragung	191
A	Mathematischer Anhang	195
A.1	Beschreibung periodischer Diracimpulsfolgen im Zeit- und Frequenzbereich	195
A.2	Abtastamplitudenfehler bei si -Impulsen	196
A.3	Duobinärübertragung mit Vorcodierung	197
A.4	Energiespektrum des Rechteck-Doppelimpulses	199
A.5	Rauschleistungsdichte im äquivalenten TP-System	200
A.6	Leistungsspektrum von M -ASK-Signalen	200
A.7	Leistungsspektrum von M -PSK-Signalen	201
A.8	Orthogonalitätsbedingung für Sinussignale	204
A.9	Leistungsspektrum von 2-FSK mit Phasensprüngen	205
A.10	Signalvektordiagramme für MSK	206
A.11	Varianz der Vektorkomponenten y_i	209
A.12	Berechnung des Skalarproduktes $\mathbf{y}^T \mathbf{s}_m$	210
A.13	Rayleigh- und Rice-Verteilung	210
	Abkürzungen	213
	Symbolverzeichnis	215

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Historische Entwicklung der Datenübertragung

Die Nachrichtenübertragungstechnik ist ein wesentlicher Bestandteil der Infrastruktur unserer modernen Gesellschaft. Ein geschichtlicher Rückblick bis in die Antike zeigt jedoch, dass der schnellen und sicheren Übertragung von Nachrichten schon immer eine große Bedeutung beigemessen wurde (Kuriere als berittene Reiter, Nachrichtenübermittlung durch Rauchzeichen, Fackelsignale, Semaphore, Brieftauben etc.), und dass das rechtzeitige Eintreffen oder das Fehlen einer Information Einfluss auf den Verlauf unserer Geschichte genommen hat.

Die Geschichte der elektrischen Nachrichtenübertragungstechnik beginnt in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Interessant ist, dass sie mit der Übertragung digitaler Signale beginnt:

- 1844 überträgt Samuel Morse zum ersten Mal Nachrichten auf einer 60 km langen Strecke von Baltimore nach Washington. Die Textinformation wurde dabei mit einem Strich-Punkt-Alphabet codiert, das heute nach seinem Erfinder den Namen Morsealphabet trägt. Elektrische Telegrafverbindungen entstehen wenig später in vielen Teilen der Welt. Ende des 19. Jahrhunderts erfinden Siemens und Halske den komfortableren, elektrischen Fernschreiber, der wie eine Schreibmaschine zu bedienen ist und die Codierung der Zeichen automatisch realisiert. Mit Hilfe der Telegrafie gelingt es, Nachrichten drahtgebunden weltweit zu übertragen. Die dafür notwendige Signalverstärkung übernimmt das elektromagnetische Relais (Bild 1.1). Von großem Vorteil ist die Robustheit des Übertragungsverfahrens gegen Störungen, von Nachteil die geringe Übertragungsgeschwindigkeit bei einer manuellen Bedienung des Telegrafengerätes.
- Am 26. Oktober 1860 führt Philipp Reis in Frankfurt/Main dem "Physi-

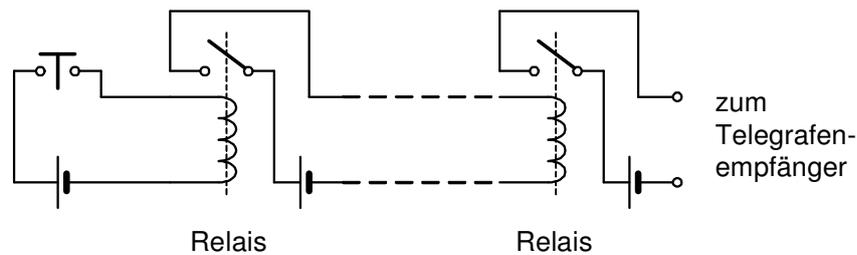


Bild 1.1: Verstärkung digitaler Signale mit Hilfe elektromagnetischer Relais

kalischen Verein” zum ersten Mal ein Gerät zur Sprachübermittlung vor, dem er den Namen Telefon gibt. Eine Krankheit verhindert jedoch die Weiterentwicklung und Vermarktung seiner Erfindung. Dies gelingt Alexander Graham Bell, der 1876 sein Telefon zum Patent anmeldet. Damit beginnt die Geschichte der drahtgebundenen, analogen Nachrichtentechnik. Telefonieren konnte man nur über geringe Entfernungen, da man analoge Signale nicht verstärken konnte. Eine größere Reichweite erzielte man zunächst nur durch eine höhere Leitungsinduktivität, indem man in regelmäßigen Abständen Spulen in die Übertragungsleitung einfügte, die sogenannten Pupinspulen. Mit der Erfindung der gesteuerten Elektronenröhre 1906 (Lee de Forest, Robert von Lieben) steht auch ein elektronischer Verstärker für analoge Signale zur Verfügung.

- Auch die drahtlose Nachrichtenübertragungstechnik beginnt digital. 1897 telegraphiert Marconi über den Bristol-Kanal (14 km). 1901 gelingt es ihm, Morsezeichen über den Atlantik zu übertragen, von Cornwall in Südeuropa nach Neufundland in Kanada (2500 km).
- Die drahtlose Übertragung analoger Nachrichten beginnt mit der Rundfunktechnik um 1920.

Die weitere Entwicklung der Nachrichtentechnik ist zunächst dadurch gekennzeichnet, dass analoge Signale analog übertragen werden, und die digitale Signalübertragung für die Telegrafie reserviert bleibt. Erst Ende der 60iger Jahre des vergangenen Jahrhunderts werden in den USA und Europa die ersten PCM-Telefonie-Systeme aufgebaut, mit denen eine digitale Sprach- und Musikübertragung in den Kabelnetzen der Postverwaltungen möglich wird. Mit der Entwicklung der Computertechnik in den 70iger und 80iger Jahren entsteht der Bedarf und der Zwang in großem Maße digitale Daten zu übertragen. Die *Digitale Signalübertragung* wird ein neuer Wissenschaftszweig der elektrischen Nachrichtentechnik und ist der Nachfolger der klassischen Disziplin *Telegrafie*. Der Aufbau des Internet in den 90iger Jahren erfordert eine schnelle Datenübertragung in einem weltweiten Datennetz. In den bestehenden Telefon-Kabelnetzen vollzieht sich eine rasche Umstellung der Signalübertragung von analog auf digital. Sie wird möglich

durch das Vorhandensein von leistungsfähigen und billigen Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandlern für Audio- und Videosignale. Die Kabelsysteme nutzen nunmehr auch für die analogen Signale die Vorteile der digitalen Signalübertragung: Garantie hoher Qualität und Zuverlässigkeit unabhängig von der Übertragungsentfernung. Etwas anders verläuft die Entwicklung bei den Funksystemen. Bei ihnen steht die effiziente Verwendung der Frequenzressourcen an erster Stelle. Für ein analoges Signal entsteht nach der Analog-Digital-Wandlung ein Bandbreitebedarf, der von der Abtastfrequenz und der Quantisierungsgenauigkeit abhängt. Er ist jedoch bei einer Übertragung mit binären Symbolen in jedem Fall größer als für das analoge Quellensignal. Die analogen Signale werden daher in den Richtfunk-, Hörrundfunk- und Fernsehrundfunksystemen weiterhin analog übertragen. Auch die Mobilfunksysteme der ersten Generation, die in den 80iger Jahren aufgebaut werden, sind Analogsysteme und verwenden Schmalband-FM als Modulationsverfahren. Die Situation verändert sich erst mit der Erfindung und technischen Realisierung der Quellencodierung von analogen Signalen in den 90iger Jahren. Die Quellencodierung ermöglicht eine drastische Datenreduktion von Audio- und Videosignalen durch die Entfernung von redundanter und irrelevanter Information. Für die Realisierung der Kompressionsalgorithmen stehen heute leistungsfähige Signalprozessoren oder spezielle, hochintegrierte Codecs zur Verfügung. Mit Hilfe der Quellencodierung haben sich nun die Verhältnisse umgekehrt. Heute ist es möglich, analoge Signale effizienter digital als analog zu übertragen. Damit sind alle Voraussetzungen erfüllt, dass in Zukunft überall die analoge durch eine digitale Signalübertragung abgelöst wird. Dieser Ablösungsprozess ist in vollem Gange. Die modernen Mobilfunksysteme nach dem GSM- oder UMTS-Standard übertragen digital. Auch bei den Rundfunksystemen vollzieht sich der Übergang. DVB-T, DVB-S und DVB-C sind die Standards für das digitale Fernsehen in Europa. DAB und DRM sind Standards, die für die Ablösung des analogen UKW- und AM-Hörrundfunks erarbeitet wurden.

1.2 Basisband- und Bandpassübertragung

Die Signale, die von einer Signalquelle abgegeben werden (Mikrofonsignale, Bildsignale einer Kamera, Messsignale von Sensoren, Datensignale eines PC etc.) sind sogenannte Basisbandsignale. Ihre Leistung konzentriert sich bei tiefen Frequenzen. Die Übertragung dieser Signale kann entweder im Basisband erfolgen oder im Bandpassbereich, indem man einen hochfrequenten Träger moduliert. Beide Möglichkeiten finden Anwendung und haben ihre praktische Bedeutung. Die Bilder 1.2 und 1.3 zeigen die wesentlichen Baugruppen für eine Übertragung im Basisband oder im Bandpassbereich. Allerdings müssen nicht zwangsläufig alle dargestellten Baugruppen in einem praktischen Übertragungssystem vorhanden sein. Die mit einem Schatten versehenen Baugruppen bilden den fachlichen Schwerpunkt des Buches. Man erkennt, dass die Signale vor ihrer Übertragung

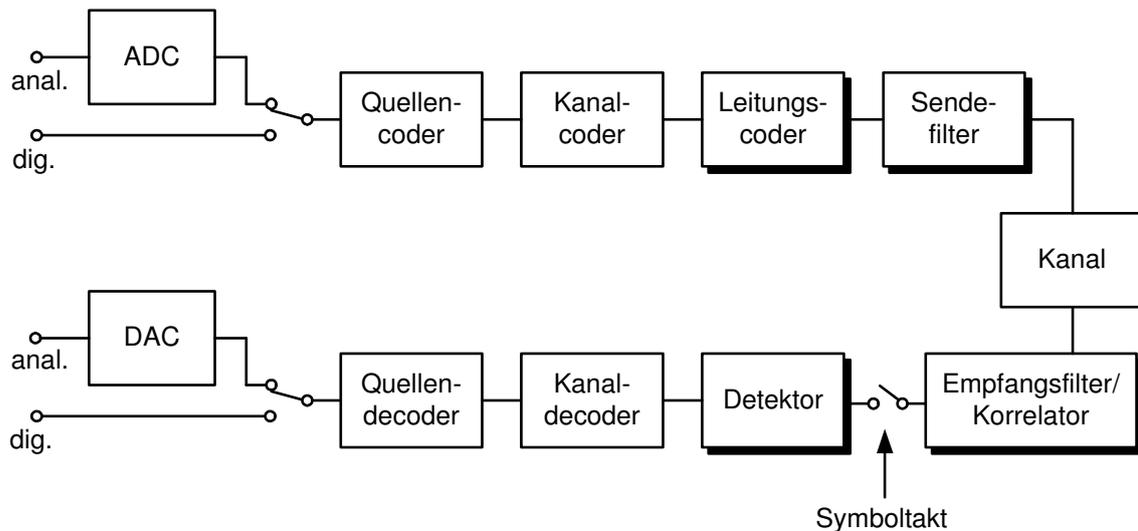


Bild 1.2: Signalübertragung im Basisband

über den Kanal in verschiedenen Baugruppen vorverarbeitet werden. Eine digitale Übertragung von Analogsignalen erfordert zunächst eine Analog-Digital-Wandlung (ADC, *analog-digital conversion*). Die Quellencodierung reduziert die erforderliche Datenrate durch Datenkompression. Die digitalen Signale werden dann vor ihrer Übertragung kanalcodiert, um die Information möglichst gut vor Übertragungsfehlern zu schützen. Die bis hierher beschriebene Signalverarbeitung ist im Wesentlichen für die Übertragung im Basisband oder im Bandpassbereich gleich und ist nicht Gegenstand der Betrachtung in diesem Buches. Für beide Übertragungsmöglichkeiten ist eine Anpassung des Übertragungssignals an den Kanal erforderlich. Diese Anpassung wird für die Basisbandübertragung durch eine Leitungscodierung erreicht, für die Bandpassübertragung durch Modulation. Die Basisbandübertragung ist eine leitungsgebundene Übertragung. Sie erfordert z.B. eine Kupferleitung oder einen Lichtwellenleiter als Übertragungsmedium. Die Leitungscodierung bewirkt eine spektrale Formung, mit der man das Leistungsspektrum des Sendesignals beeinflussen kann. Sie ist z.B. erforderlich, wenn ein Signal mit Gleichkomponente über einen gleichstromundurchlässigen Kanal übertragen werden muss. Durch Leitungscodierung lässt sich ein gleichstromfreies Signal erzeugen und seine Signalbandbreite beeinflussen. Sie kann auch sicherstellen, dass das Empfangssignal ausreichend Taktinformation für eine zuverlässige Taktwiedergewinnung im Empfänger enthält. Das Sende-filter formt das Spektrum des Datensignals und sichert, dass das Sendesignal nur eine begrenzte Bandbreite belegt. Auf der Empfangsseite gelangt das Signal auf das Empfangsfilter oder alternativ auf einen Korrelator. Das Ausgangssignal von Empfangsfilter oder Korrelator wird im Symboltakt abgetastet und dem Detektor übergeben. Der Detektor trifft die Entscheidung über das gesendete Symbol. Danach erfolgt die Kanaldecodierung, um eventuelle Übertragungsfehler zu korrigieren, und die

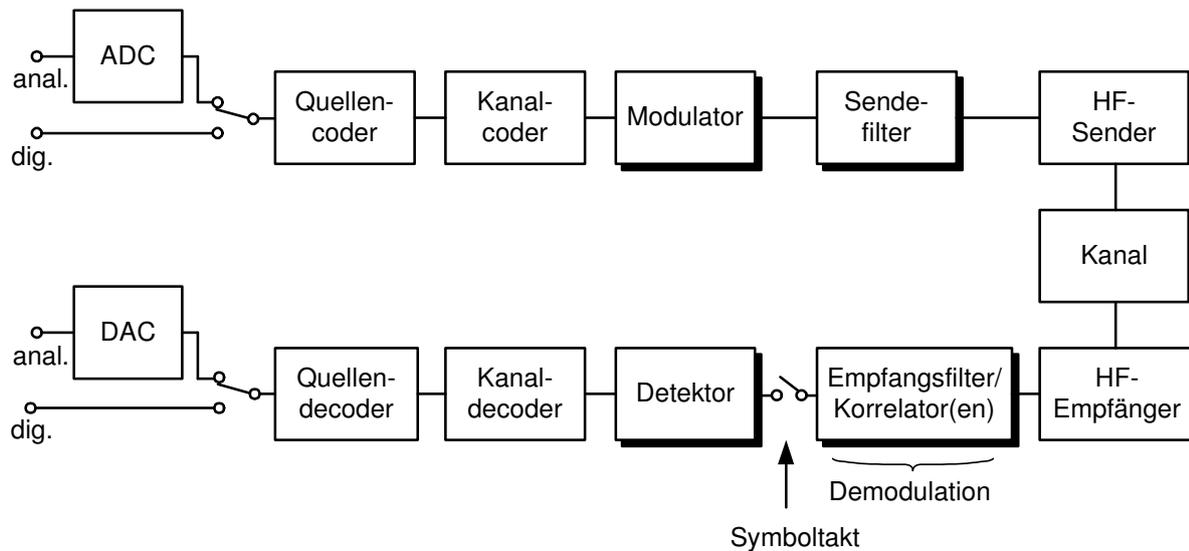


Bild 1.3: Signalübertragung im Bandpassbereich (modulierte Signalübertragung)

Quellendecodierung. Gesendete Analogsignale gelangen danach zu dem Digital-Analog-Wandler (DAC, *digital-analog conversion*).

In einem Bandpass-Übertragungssystem bewirkt die Modulation eines hochfrequenten Trägers, dass das Leistungsspektrum des Signals ein vorgesehenes Hochfrequenzband belegt und gestattet in einem Funksystem die Signalabstrahlung über eine Antenne. Natürlich kann auch in einem leitungsgebundenen Übertragungssystem eine Übertragung mit modulierten Signalen erfolgen. In modernen Übertragungssystemen erfolgt die Modulation und die Demodulation durch digitale Signalverarbeitung im Basisband. Die Verschiebung des Basisbandsignals in den Bandpassbereich und die entsprechende Verschiebung des Bandpasssignals zurück in das Basisband erfolgt durch komplexe Mischung mit sogenannten I/Q-Mischern in dem HF-Sender bzw. HF-Empfänger. In diesem Sinne kann die Übertragung im Bandpassbereich als eine Basisbandübertragung betrachtet werden, die um den linearen Vorgang der spektralen Verschiebung in den Hochfrequenzbereich im Sender und den umgekehrten Prozess der spektralen Rückverschiebung im Empfänger ergänzt wurde. Das Blockschaltbild des Bandpass-Übertragungssystems umfasst daher nahezu alle Baugruppen des Basisband-Übertragungssystems und ist um die Baugruppen des HF-Senders und HF-Empfängers erweitert. Lediglich die Baugruppe Leitungscodierung wurde durch die Baugruppe Modulation ersetzt. Beide Baugruppen haben allerdings dieselbe Funktion, die spektrale Anpassung des Sendesignals an den gegebenen Übertragungskanal. Das Signal erleidet bei seiner Übertragung eine Veränderung durch die Einwirkung einer Vielzahl von Störeinflüssen. Dazu gehören die Überlagerung mit Rausch- und Interferenzsignalen, die Signalverformung durch lineare und nichtlineare Verzerrun-

gen sowie die parasitäre Modulation durch einen zeitvarianten Kanal. Im Rahmen dieses Buches werden jedoch nur die linearen Verzerrungen des Übertragungskanals und AWGN-Störungen (*Additive White Gaussian Noise*) betrachtet. In diesem Modell wird das digitale Sendesignal über einen stationären, bandbegrenzten Kanal übertragen und mit einem Rauschsignal überlagert. Die Rauschamplituden sind gaußverteilt, aufeinanderfolgende Rauschabtwerte sind unkorreliert. Dieses einfache Kanalmodell ist ausreichend, um wichtige Erkenntnisse über die betrachteten Übertragungsverfahren zu gewinnen.

Kapitel 2

Übertragung im Basisband

2.1 Intersymbolinterferenzfreie Impulsübertragung

2.1.1 Übertragungsmodell

Das Datenübertragungssystem im Basisband soll durch das in Bild 2.1 dargestellte Blockschaltbild beschrieben werden. Das Eingangssignal $d(t)$ für das Sendefilter ist eine Folge von Diracimpulsen

$$d(t) = AT \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] \delta(t - kT),$$

die mit der zeitdiskreten Folge $ATd[k]$ gewichtet werden, wobei $d[k]$ die Datensymbole der Quelle bezeichnen. Für eine binäre Übertragung gilt z.B.

$$d[k] \in \{-1, 1\}.$$

Die Amplitude A regelt die Leistung des Sendesignals $u(t)$, die Taktperiode T die Übertragungsgeschwindigkeit. Das Sendefilter mit der Impulsantwort $h_S(t)$ formt das Sendesignal

$$\begin{aligned} u(t) &= d(t) * h_S(t) \\ &= \left(AT \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] \delta(t - kT) \right) * h_S(t) \\ &= AT \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] h_S(t - kT) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] g(t - kT). \end{aligned} \tag{2.1.1}$$

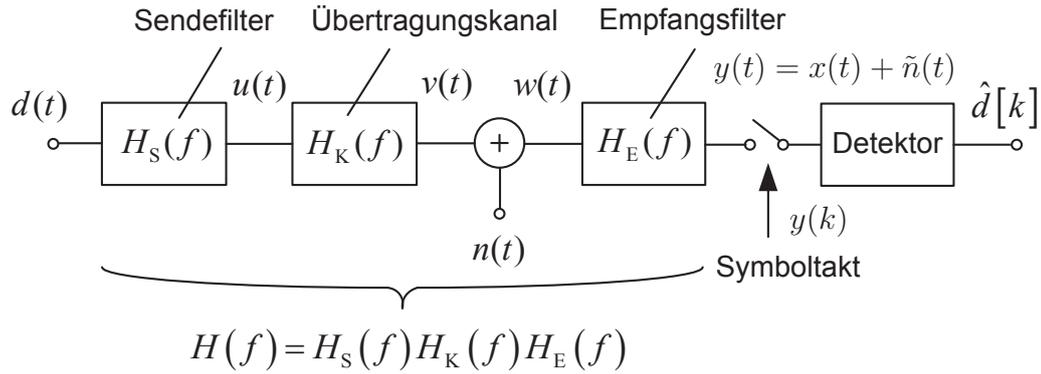


Bild 2.1: Blockschaltbild eines Datenübertragungssystems im Basisband

Der Zusammenhang zwischen Sendepuls $g(t)$ und Impulsantwort des Sendefilters $h_S(t)$ ist durch die Beziehung

$$g(t) = AT h_S(t) \quad 0 \leq t < T_g \quad (2.1.2)$$

gegeben, wobei T_g die Dauer des Impulses $g(t)$ bzw. der Impulsantwort $h_S(t)$ des Sendefilters bezeichnet. Für die Energie des Sendepulses gilt

$$\mathcal{E}_g = \int_0^{T_g} g^2(t) dt = A^2 T^2 \int_0^{T_g} h_S^2(t) dt. \quad (2.1.3)$$

Das Empfangssignal am Ausgang des Empfangsfilters ist mit $y(t)$ bezeichnet und besteht aus dem unverrauschten Nutzsignal $x(t)$ und dem gefilterten Rauschsignal $\tilde{n}(t)$

$$y(t) = x(t) + \tilde{n}(t). \quad (2.1.4)$$

Das unverrauschte Empfangssignal berechnet sich durch Faltung des Eingangssignals mit der Impulsantwort des Übertragungssystems $h(t)$

$$\begin{aligned} x(t) &= d(t) * h(t) \\ &= \left(AT \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] \delta(t - kT) \right) * h(t) \\ &= AT \sum_{k=-\infty}^{\infty} d[k] h(t - kT) \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

mit

$$h(t) = h_S(t) * h_K(t) * h_E(t). \quad (2.1.6)$$

Die fouriertransformierte Impulsantwort $h(t)$ liefert die Übertragungsfunktion des Systems $H(f)$, die sich durch Multiplikation der Übertragungsfunktionen $H_S(f)$, $H_K(f)$ und $H_E(f)$ für Sendefilter, Übertragungskanal und Empfangsfilter ergibt

$$\mathfrak{F}\{h(t)\} = H(f) = H_S(f)H_K(f)H_E(f). \quad (2.1.7)$$

Dem Nutzsignal $v(t)$ am Eingang des Empfangsfilters ist gaußsches weißes Rauschen $n(t)$ additiv überlagert. Für diese Störung ist die Abkürzung AWGN (*additive white gaussian noise*) gebräuchlich. Ihre Autokorrelationsfunktion (AKF) lautet

$$\phi_{nn}(\tau) = \text{E}[n(t)n(t + \tau)] = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (2.1.8)$$

wobei $N_0/2$ die zweiseitige Rauschleistungsdichte

$$\Phi_{nn}(f) = \mathfrak{F}\{\phi_{nn}(\tau)\} = \frac{N_0}{2} \quad (2.1.9)$$

bezeichnet. Der Detektor trifft die Entscheidung über die gesendeten Symbole und gibt im Symboltakt die geschätzten Symbole $\hat{d}[k]$ aus. Fehlentscheidungen sind bei dem gegebenen Übertragungsmodell nach Bild 2.1 als Folge linearer Signalverzerrungen und des Rauschens möglich.

2.1.2 1. Nyquistkriterium der Datenübertragung

In diesem Kapitel wird der Einfluss der linearen Verzerrungen auf das Sendesignal untersucht, wobei das Rauschen unbeachtet bleibt. Zunächst soll die Frage gestellt werden, welche Forderungen die Impulsantwort $h(t)$ bzw. die Übertragungsfunktion $H(f)$ eines verzerrungsfreien Übertragungssystems erfüllen muss. Verzerrungsfreie Übertragung heißt, dass die Signalform des Sendesignals erhalten bleibt. Erlaubt ist eine proportionale Veränderung des Signals (Amplitudenskalierung) sowie eine Signalverzögerung infolge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen bzw. elektromagnetischen Signale. Bild 2.2 zeigt ein solches verzerrungsfreies Übertragungssystem. Die Impulsantwort dieses Übertragungssystems ist ein verzögerter Diracimpuls

$$h(t) = c\delta(t - t_0), \quad (2.1.10)$$

der mit der Konstanten c multipliziert ist. Das Ausgangssignal $x_2(t)$ berechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} x_2(t) &= h(t) * x_1(t) \\ &= c\delta(t - t_0) * x_1(t) \\ &= cx_1(t - t_0). \end{aligned}$$

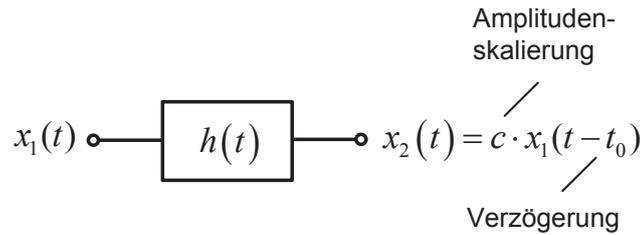


Bild 2.2: Verzerrungsfreies Übertragungssystem

Die Fouriertransformation dieser Beziehung liefert die entsprechende Forderung an die Übertragungsfunktion $H(f)$

$$H(f) = \mathfrak{F}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt = \frac{X_2(f)}{X_1(f)} = c e^{-j2\pi ft_0}. \quad (2.1.11)$$

Der Betrag der Übertragungsfunktion eines verzerrungsfreien Systems muss konstant sein

$$|H(f)| = c, \quad (2.1.12)$$

das Argument der Übertragungsfunktion eine lineare Funktion der Frequenz

$$\arg(H(f)) = -j2\pi ft_0. \quad (2.1.13)$$

Der Zusammenhang zwischen Übertragungsfunktion $H(f)$ und Dämpfung $a(f)$ und Phase lautet $b(f)$

$$H(f) = e^{-(a(f)+jb(f))}. \quad (2.1.14)$$

Daraus folgen die bekannten Bedingungen einer verzerrungsfreien Übertragung für Dämpfung

$$a(f) = -\ln|H(f)| = \text{const}, \quad (2.1.15)$$

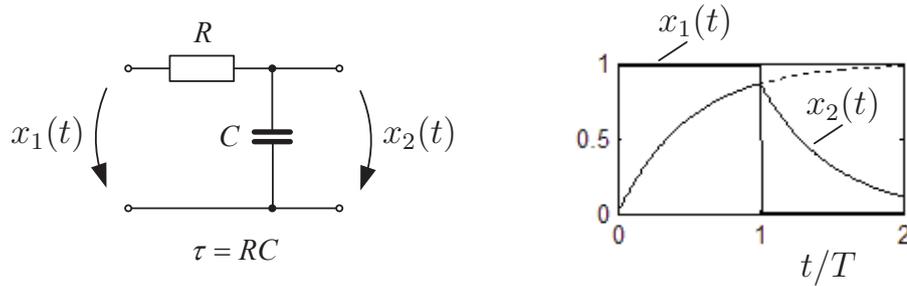
Phase

$$b(f) = -\arg(H(f)) = 2\pi ft_0 \quad (2.1.16)$$

und Gruppenlaufzeit

$$t_{\text{gr}}(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{db(f)}{df} = t_0. \quad (2.1.17)$$

Das heißt, ist die Dämpfung eines Übertragungssystems konstant und die Phase linear, dann werden alle Spektralkomponenten des Sendesignals gleichermaßen gedämpft und verzögert, das Empfangssignal bleibt unverzerrt. Sind diese Bedingungen jedoch innerhalb der Signalbandbreite nicht erfüllt, resultieren daraus Dämpfungs- und Phasenverzerrungen des Signals. Diese Verzerrungen werden unter dem Begriff *lineare Verzerrungen* zusammengefasst. Lineare Verzerrungen verursachen Einschwingvorgänge und beeinflussen daher aufeinanderfolgende Symbole. Dieses Phänomen wird als Intersymbolinterferenz (ISI) bezeichnet.

Bild 2.3: Verzerrung eines Rechteckimpulses durch ein RC-Glied ($\tau = T/2$)

Beispiel:

Bild 2.3 zeigt wie ein Rechteckimpuls $x_1(t)$ der Dauer T durch ein RC-Glied mit der Zeitkonstanten $\tau = RC = T/2$ verzerrt wird. Der Ausgangsimpuls $x_2(t)$ erstreckt sich über mehr als zwei Symbolperioden T und verursacht damit ISI. Eine Analyse zeigt, dass weder die Dämpfungs- noch die Phasenbedingungen für ein verzerrungsfreies System eingehalten werden. Die Übertragungsfunktion beträgt

$$H(f) = \frac{X_2(f)}{X_1(f)} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}} e^{-j \arctan(2\pi f\tau)}.$$

Für die Dämpfung und Phase erhält man daraus die Beziehungen

$$\begin{aligned} a(f) &= 0.5 \ln(1 + (2\pi f\tau)^2), \\ b(f) &= \arctan(2\pi f\tau). \end{aligned}$$

ISI macht das Empfangssymbol störanfälliger gegenüber Rauschstörungen. Im Vergleich zu einer ISI-freien Übertragung können schon kleinere Störampplituden zu einer Fehlentscheidung führen. Da in praktischen Übertragungssystemen die Signalbandbreite immer begrenzt ist, lässt sich die Forderung nach konstanter Dämpfung nur innerhalb eines gegebenen Frequenzbandes realisieren. Es ist daher die Frage zu untersuchen, ob für bandbegrenzte Signale ISI verhindert werden kann. Für diese Untersuchung sollen folgende Annahmen für das Übertragungssystem gemacht werden:

1. Die Impulsantwort ist kausal : $h(t) \neq 0$ für $0 \leq t < 2t_0$
2. Die Impulsantwort besitzt Maximalwert bei t_0 : $\max\{h(t)\} = h(t_0) = 1/T$
3. Die Übertragungsfunktion besitzt eine lineare Phase (Impulsantwort ist symmetrisch zu t_0): $H(f) = |H(f)| e^{-j2\pi f t_0}$