

Peter Gerdson • Gesammelte Werke

—

Band 5

Mensch und Wissenschaft

Digitale Nachrichtenübertragung
[1996]

Grundlagen, Systeme,
Technik, praktische Anwendungen

herausgegeben und eingeleitet
von
Hamid Reza Yousefi

gefördert durch
Peter-Gerdsen-Stiftung

Traugott Bautz
Nordhausen 2016

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

Verlag Traugott Bautz GmbH
99734 Nordhausen 2016
Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist
ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere
für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung
und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany
ISBN 978-3-95948-097-0
www.bautz.de

Inhalt

Worum geht es in diesem Band?	9
[1996] Digitale Nachrichtenübertragung - Grundlagen, Systeme, Technik, praktische Anwendungen.....	13
Einleitung.....	15
1. Quellencodierung.....	25
1. 1. Übertragungssystem.....	25
1. 2. Nachrichtenebene	26
1. 3. Digitalisierung analoger Signale.....	31
1. 4. Codierungsverfahren.....	73
2. Basisband-Übertragung.....	87
2. 1. Analoge Übertragungssysteme.....	87
2. 2. Digitales Übertragungssystem: Überblick.....	88
2. 3. Impulsverzerrungen: Erstes Nyquist-Kriterium.....	93
2. 4. Störungen.....	103
2. 5. Aufbau des Regenerativ-Verstärkers	117
2. 6. Zeitdiskrete Übertragung analoger Signale.....	120
3. Kanalcodierung I: Leitungscodierung	127
3. 1. Aufgabe der Leitungscodierung.....	128
3. 2. Formatierung.....	130
3. 3. Korrelative Codierung.....	135
3. 4. Aufgaben	149
4. Entzerrung: Basisbandsignale.....	153
4. 1. Aufgaben der Entzerrung	154
4. 2. Entzerrung im Frequenzbereich	154
4. 3. Entzerrung im Zeitbereich	158
4. 4. Quantisierte Rückkopplung.....	171
4. 5. Adaptive Entzerrung.....	175

5. Takt-Synchronisation	183
5. 1. Anforderungen an das Signal.....	183
5. 2. Methoden der Taktübertragung.....	189
5. 3. Anforderungen an den Kanal.....	191
5. 4. Methoden der Taktrückgewinnung.....	193
5. 5. Aufgaben.....	207
6. Kanalcodierung II: Fehlersicherung	209
6. 1. Klassifikation der Codes	209
6. 2. Grundprinzip der Fehlersicherung.....	210
6. 3. Allgemeine Eigenschaften von Blockcodes	212
6. 4. Blockcodierung	214
6. 5. Übertragungsverfahren.....	230
6. 6. Fehlersicherheit.....	231
6. 7. Faltungscodierung.....	238
6. 8. Aufgaben.....	241
7. Kanalcodierung III: Modulation	243
7. 1. Einschwingvorgänge.....	246
7. 2. Amplitudenmodulation.....	249
7. 3. Phasenmodulation.....	251
7. 4. Frequenzmodulation	255
7. 5. Schnelle Übertragung.....	260
7. 6. Echomodulation.....	263
7. 7. Trelliscodierung.....	268
8. Multiplexsysteme	271
8. 1. Prinzip	271
8. 2. Zeitmultiplex.....	274
8. 3. Frequenzmultiplex	276
8. 4. Amplitudenmultiplex.....	278
9. Messtechnik	281
9. 1. Signalgeneratoren.....	281
9. 2. Messung der Eigenschaften der Übertragungswege.....	283
9. 3. Messung von Signaleigenschaften	285
9. 4. Messungen am Regenerativverstärker	290
9. 5. Quantisierungsverzerrungen	294

10. Telekommunikationssysteme	297
10. 1. Einführung	297
10. 2. Strukturprinzipien	302
10. 3. Systembeispiele	311
11. Realisierungsprinzipien	313
11. 1. Zwei Realisierungsalternativen	313
11. 2. Beispiele zur Digitalen Signalverarbeitung	316
12. Anhang.....	321
12. 1. Wahrscheinlichkeitslehre	321
12. 2. Einige nachrichtentechnische Grundbegriffe	323
12. 3. Statistische Signalbeschreibung	325
12. 4. Beschreibung eines stochastischen Digitalsignals.....	339
12. 5. Kompander	346
12. 6. Grundbegriffe der Informationstheorie	350
12. 7. Restklassenalgebra	356
12. 8. Rückgekoppelte Schieberegister	359
Glossar	365

Worum geht es in diesem Band?

Das Œuvre von Peter Gerdson wurde in zwei Abteilungen unterteilt: naturwissenschaftliche Schriften, zusammengefasst in fünf Bänden unter dem Titel ›Mensch und Wissenschaft‹, und geisteswissenschaftliche Schriften, zusammengefasst in fünf Bänden unter dem Titel ›Mensch und Transzendenz.‹ Gerdson gelingt es, zwei Wissenschaftskulturen auf eine einzigartige Weise miteinander zu verbinden. Darin liegt ein Verdienst dieses Wissenschaftlers und gleichsam auch eine Begründung dieser Gesamtausgabe.

Mit dem vorliegenden Band schließt sich der Kreis der ersten Abteilung der Gesamtausgabe. Um dem Leser ein Resümee zu geben, werden die Inhalte der einzelnen Bände konzise wiedergegeben.

Band 1:

Der erste Band umfasst die erste Sektion der Gesamtausgabe von Peter Gerdson mit folgenden Schriften: 13 natur- und ingenieurwissenschaftliche Abhandlungen aus den Jahren 1966-1979 sowie die Monographie ›Hochfrequenzmesstechnik – Messgeräte und Messverfahren‹ aus dem Jahr 1982. Charakteristisch für diese Periode ist, dass die Aufsätze 1966-1970 aus der Industriezeit Gerdsons, die praktische Anwendungen aus der Farbfernsehtechnik behandeln, während der Lehrtätigkeit 1971-1982 eine theoretische Vertiefung für das wissenschaftliche Fundament der studentischen Ausbildung erfahren. Die Hochfrequenzmesstechnik, die als konstitutives Element der Natur- und Ingenieurwissenschaften eine verbindende Bedeutung für Gerdsons Schriften hat, dokumentiert unter dem Paradigma der analogen Nachrichtentechnik eine Kulmination seines Wirkens.

Band 2:

Der zweite Band beschreibt einen vertiefenden Weg des Denkens von Peter Gerdson. In den 1980er Jahren vollzieht sich ein allmählicher Paradigmenwechsel von der analogen zur digitalen Nachrichtentechnik, welche die Gebiete der Signalübertragung und -verarbeitung umfasst. Dabei tritt an die Stelle der Signaldarstellung durch eine kontinuierliche Spannungszeitfunktion eine solche durch eine Zahlenfolge. Die Signalverarbeitung wird nicht mehr mit einer Schaltung aus elektrischen und elektronischen Bauelementen

durchgeführt, sondern mit einem Zahlenfolgen verarbeitenden Rechenwerk, welches durch einen Signalprozessor realisiert wird. Damit entsteht die Aufgabe, klassische Schaltungen der analogen Signalverarbeitung in Algorithmen für Signalprozessoren umzusetzen. Die neue digitale Nachrichtentechnik ist der analogen hinsichtlich der Präzision weit überlegen.

Mit der anschließenden Monographie ›Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung – Elemente, Bausteine, Systeme und ihre Algorithmen‹ gibt Peter Gerdsen der neuen Situation insbesondere für die Ausbildung der Studenten ein sicheres Fundament. Die 1. Auflage des Buches erscheint 1993; auf Grund des großen Erfolges erfolgt 1997 eine 2. Auflage in wesentlich erweiterter Form, die Gegenstand des vorliegenden 2. Bandes der Gesamtausgabe ist. Dabei bezieht sich die Erweiterung hauptsächlich auf die Berücksichtigung von Simulationsprogrammen in der digitalen Signalverarbeitung. Damit wird einem Trend Rechnung getragen, Systeme nach ihrem Entwurf durch Simulation auf einem Computer auf ihre Eigenschaften hin zu überprüfen. Solche Simulationsprogramme, die auch für die Schaltungen der analogen Nachrichtentechnik entwickelt wurden, sind durch die ständig steigenden Rechenleistungen der Computer möglich geworden. Die Monographie ist geprägt sowohl durch ihren Lehrbuchcharakter, der in zahlreichen Übungsaufgaben zum Ausdruck kommt, als auch von einer gründlichen Darstellung des neuen Gebietes der Nachrichtentechnik.

Band 3:

Der dritte Band enthält eine ›Systemtheorie der Telekommunikation‹. Eine solche Theorie wurde notwendig, als auf der Grundlage der in den 1980er Jahren des vorigen Jahrhunderts entstandenen Digitalen Signalübertragung immer komplexere Telekommunikationsnetze entstanden, um Studenten ein vertieftes Verständnis der Vorgänge in diesen Netzen unter übergeordneten Gesichtspunkten zu ermöglichen. So wie zur Beschreibung der Algorithmen in Computern besondere Sprachen erforderlich wurden, war dies auch bei der Formulierung einer ›Systemtheorie der Telekommunikation‹ der Fall. Durchgesetzt hatte sich zur Beschreibung der Vorgänge in Kommunikationssystemen die Sprache SDL (Specification and Description Language), die auch wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Bandes ist. Bei der Formulierung der Systemtheorie trat zu Tage, dass diese sowohl die ursprünglich dominante Mensch-zu-Mensch-Kommunikation als auch die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation erfasste.

Band 4:

Der vierte Band der Gesamtausgabe enthält das Buch ›Kommunikationssysteme 2 – Anleitung zum praktischen Entwurf (SDL)‹, das eine wichtige Ergänzung zu dem vorigen 3. Band ›Kommunikationssysteme 1 – Theorie, Entwurf, Messtechnik‹ darstellt und damit deren Inhalte voraussetzt. Dabei geht es um eine Anleitung zum praktischen Entwurf von Telekommunikationssystemen am Beispiel einer Dateiübertragung zwischen mehreren Personal Computern. Grundlage für den Entwurf ist das **Open System Interconnection** Referenzmodell. Aufbauend auf einer Anforderungsanalyse wird nach einer Analyse der Schichtenfunktionen eine vollständige SDL-Spezifikation erstellt.

Band 5:

Der vorliegende letzte 5. Band der ersten Abteilung der Gesamtausgabe ›Digitale Nachrichtenübertragung – Grundlagen, Systeme, Technik, praktische Anwendungen‹ stellt eine grundlegende Erweiterung und wesentliche Vertiefung der bereits 1983 erschienenen ›Digitalen Übertragungstechnik‹ dar. In den folgenden 13 Jahren ereignete sich ein fortschreitender Wandel von der analogen zur digitalen Nachrichtenübertragung, so dass eine vertiefte lehrbuchartige Darstellung dieser neuen Technik notwendig wurde. Das Buch ist modular aufgebaut; es besteht aus zwölf einzelnen, im Wesentlichen für sich lesbaren Kapiteln. Die beiden wichtigsten zusammenfassenden Begriffe sind die Quellen- und die Kanalcodierung, wobei diese auf drei Kapitel verteilt wurde: Leitungscodierung, Fehlersicherung und Modulation. Ausführliche Berücksichtigung finden die Gebiete Messtechnik und Realisierungsprinzipien.

[1996] Digitale Nachrichtenübertragung – Grundlagen, Systeme, Technik, praktische Anwendungen

Vorwort

Die elektrische Nachrichtentechnik lässt sich in die beiden Gebiete der Nachrichtenübertragung und der Nachrichtenverarbeitung unterteilen. Ausgehend von den Methoden der Signaldarstellung kann man zwischen analoger und digitaler Nachrichtentechnik unterscheiden. Während bisher die analogen Methoden die Nachrichtenübertragung und die digitalen Methoden die Nachrichtenverarbeitung beherrschten, beginnen die digitalen Methoden in zunehmendem Maße in die Nachrichtenübertragungstechnik und allgemein weiter in die Gebiete der Nachrichtenverarbeitung einzudringen, die bisher analogen Methoden vorbehalten waren. Dieses Buch möchte den Leser in die grundlegenden Methoden und Betrachtungsweisen der digitalen Nachrichtenübertragungstechnik einführen. Dabei wird versucht, innerhalb der vielfältigen Aspekte dieser Technik gemeinsame und übergeordnete Gesichtspunkte zu betonen. Die Beschränkung auf die wesentlichsten Zusammenhänge soll es ermöglichen, durch sorgfältige theoretische Ableitungen so weit in die Tiefe zu gehen, dass die Anwendungsnähe der Darstellung durch eine Reihe von ausgeführten Berechnungsbeispielen sichtbar wird.

Die vorliegende "Digitale Nachrichtenübertragung" ist entstanden aus einer Überarbeitung und wesentlichen, inhaltlichen Erweiterung und Umgestaltung des Teubner Studienskriptums "Digitale Übertragungstechnik". Dabei sind die Erfahrungen berücksichtigt worden, die der Verfasser in über zehnjähriger Lehrtätigkeit auf diesem Gebiet im Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Fachhochschule Hamburg gewonnen hat.

Das Buch ist modular aufgebaut; es besteht aus zwölf einzelnen, im Wesentlichen für sich lesbaren Kapiteln. Die beiden wichtigsten zusammenfassenden Begriffe sind die Quellen- und die Kanalcodierung, wobei diese auf drei Kapitel verteilt wurde: Leitungscodierung, Fehlersicherung und Modulation.

Das Buch wendet sich in erster Linie an Studenten der Fachhochschulen und Technischen Universitäten. Aber auch Ingenieure aus der Praxis, die sich in die digitale Nachrichtenübertragung einarbeiten wollen, sollen angesprochen werden. Vorausgesetzt werden die Grundlagen der Elektrotechnik und der Nachrichtentechnik. Um das Durcharbeiten zu erleichtern, wurden

einzelne Themen aus den Grundlagen sowie einige sehr spezielle, für das Verständnis des Stoffes wichtige Themen in einem Anhang erläutert.

Mit der Ausbreitung digitaler Methoden in der Übertragungstechnik sind einige spezifische Fachausdrücke entstanden, die mit einer Erläuterung ihrer Bedeutung in einem Glossar zusammengestellt sind.

Dem Teubner-Verlag, speziell Herrn Dr. Jens Schlembach, möchte ich für die gute Zusammenarbeit danken. Dank gilt auch meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Peter Kröger, der mir in vielen fachlichen Diskussionen über Einzelthemen und bei der Strukturierung des Buches eine wertvolle Hilfe war. Zu Dank verpflichtet bin ich auch Dipl.-Ing. Dieter Mehrkens, der eine ausgezeichnete Diplomarbeit zum Thema PSK4-Modem angefertigt hat, für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskripts. Ein besonderer Dank gilt meiner Frau für das mir in den Monaten der Entstehung dieses Buches entgegengebrachte Verständnis.

Hamburg, im Herbst 1996
Peter Gerdson

Einleitung

Information und Energie sind die beiden grundlegenden Begriffe der Elektrotechnik. Während die elektrische Energietechnik sich mit der Übertragung und Umwandlung von Energie beschäftigt, ist es Aufgabe der elektrischen Informationstechnik, Informationen zu übertragen und zu verarbeiten. Informationen können auf Grund bekannter oder unterstellter Abmachungen durch Zeichen oder kontinuierliche Funktionen dargestellt werden. Diese Funktionen oder Zeichen werden Nachrichten genannt, wenn sie zur Übertragung von Informationen dienen. Sie werden Daten genannt, wenn sie zur Verarbeitung von Informationen dienen. Durch Zeichen dargestellte Informationen sind digital, durch kontinuierliche Funktionen dargestellte Informationen sind analog.

Die Aufgaben der Übertragung und Verarbeitung erfordern eine physikalische Darstellung der Zeichen und kontinuierlichen Funktionen. Dies ist möglich entweder in Form einer räumlichen Anordnung, z.B. durch magnetische Einprägungen auf einem Magnetband, oder durch den zeitlichen Ablauf von elektrischen Strömen $i(t)$ oder Spannungen $u(t)$. Die physikalische Darstellung der Zeichen und kontinuierlichen Funktionen nennt man Signale. Liegen die Signale in einer räumlichen Anordnung vor, so hat man gespeicherte Informationen. Signale in Form zeitabhängiger elektrischer Ströme oder Spannungen sind Gegenstand der Übertragungstechnik. Stellen die zeitabhängigen Signale nicht kontinuierliche Funktionen, sondern Zeichen dar, so spricht man von digitaler Übertragungstechnik.

Signalklassen

Das elektrische Signal einer Nachrichtenquelle wird beschrieben durch die abhängige Signalkoordinate s als Funktion der unabhängigen Zeitkoordinate t in Form einer Zeitfunktion $s(t)$. Die Signalkoordinate ist in der Regel entweder eine Spannung u oder ein Strom i . Die Signalkoordinate s und die Zeitkoordinate t können in kontinuierlicher oder diskreter Weise verfügbar sein. Somit lassen sich Signale entsprechend Bild 1 in vier verschiedene Klassen einteilen:

Klasse 1: Signal- und Zeitkoordinate sind kontinuierlich verfügbar. Solche Signale treten z.B. auf am Ausgang eines Mikrophons, mit dem Sprache oder

Musik in elektrische Signale umgewandelt werden. Signale der Klasse 1 werden

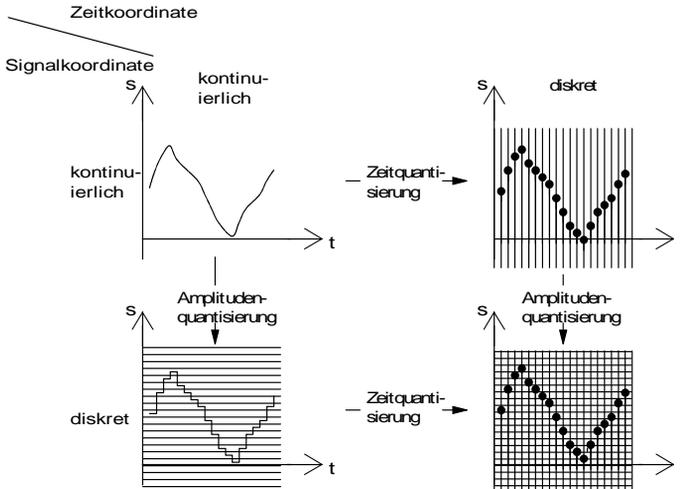


Bild 1. Signalklassen

charakterisiert durch ihre Signalgrenzfrequenz f_{gs} und durch ihren Signal-Geräusch-Abstand ρ . Unter der Grenzfrequenz f_{gs} eines Signals $u(t)$ versteht man die Frequenz f , oberhalb derer die Frequenzfunktion

$$\underline{U}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j 2\pi f t} dt \quad (1)$$

Null ist. Da jedem Signal $u(t)$ eine stochastische Geräuschspannung $u_r(t)$ überlagert ist, definiert man mit der Signalleistung P_s und der Geräuschleistung P_r den Signal-Geräusch-Abstand

$$\rho = \frac{P_s}{P_r} \quad (2)$$

Klasse 2: Die Signalkoordinate ist in kontinuierlicher und die Zeitkoordinate in diskreter Weise verfügbar. Diskret heißt für die Zeitkoordinate, dass sie durch bestimmte Zeitrasterabschnitte T_0 , in denen die Signalkoordinate nur wenig veränderlich ist, charakterisiert wird. Signale der Pulsamplitudenmodulation gehören zur Klasse 2. Charakterisiert werden die Signale der Klasse

2 durch den Rasterabstand T_0 und den Signal-Rausch-Abstand ρ . Durch Abtastung oder Zeitquantisierung (s. Abschn. 1.3.1) werden Signale der Klasse 1 in solche der Klasse 2 umgewandelt. Dabei wird in der Regel im Abtastzeitpunkt dem Signal $u(t)$ der Klasse 1 ein Funktionswert entnommen und bis zum nächsten Abtastzeitpunkt konstant gehalten. Die Bedingungen für die Wiedergewinnung des Signals $u(t)$ der Klasse 1 sind der Inhalt des Abtasttheorems (s. Abschn. 1.3.1.5).

Klasse 3: Die Signalkoordinate ist in diskreter und die Zeitkoordinate in kontinuierlicher Weise verfügbar. Diskret heißt für die Signalkoordinate, dass sie nur in bestimmten Stufen auftritt. Der Zeitpunkt, in dem eine Änderung der Signalkoordinate erfolgen kann, ist beliebig. Durch Amplitudenquantisierung (s. Abschn. 1.3.2) lassen sich Signale der Klasse 1 in solche der Klasse 3 umwandeln. Dabei wird der kontinuierliche Wertebereich der Signalkoordinate in diskret gestufte Äquivalenzbereiche eingeteilt, und alle in einen Äquivalenzbereich fallenden Signalwerte werden in einen in der Regel in der Mitte liegenden diskreten Signalwert übergeführt. Die Zeitpunkte der Änderung der Signalkoordinate richten sich dann nach dem Verlauf des Signals $u(t)$ der Klasse 1. Die Amplitudenquantisierung rechtfertigt sich dadurch, dass infolge der unvermeidlichen Geräuschspannung $u_r(t)$ die Funktionswerte der Signale der Klasse 1 bei einer Übertragung nur ungenau wiedererkannt werden können und dass das durch die Amplitudenquantisierung hervorgerufene Quantisierungsgeräusch durch Erhöhung der Stufenzahl beliebig klein gemacht werden kann. Charakterisiert werden Signale der Klasse 3 durch die minimale Intervalldauer und die Stufenzahl.

Klasse 4: Signal- und Zeitkoordinate sind in diskreter Weise verfügbar. Die Signale der Klasse 4 werden auch digitale Signale genannt. Sie entstehen aus den Signalen der Klasse 1 durch Zeit- und Amplitudenquantisierung. Die Signalkoordinate nimmt jeweils einen Wert aus einem vorgegebenen Wertevorrat an. Durch Codierung (s. Abschn. 1.3.4) stellt man häufig diese Werte durch Kombinationen von jeweils zwei Werten dar. Die Überführung von Signalen der Klasse 1 in solche der Klasse 4 nennt man auch Digitalisierung. Schließt sich an die Amplitudenquantisierung eine Codierung auf ein zweiwertiges Signal an, so spricht man häufig von Puls-Code-Modulation.

Digitale Signale

Signale der Klasse 4, also digitale Signale, deren Übertragung Gegenstand dieses Buches ist, haben wegen einiger vorteilhafter Eigenschaften eine besondere Bedeutung erlangt. Diese Eigenschaften sollen im Folgenden erläutert werden.

Zeitmultiplex

Digitale Signale ermöglichen die Mehrfachausnutzung von Kanälen in Form des Zeitmultiplex (s. Abschn. 8). Im Gegensatz zum Frequenzmultiplex, das in Form der Trägerfrequenztechnik weit verbreitet ist, wird die für das Frequenzmultiplex charakteristische, hohe Anzahl an Bandfiltern hier nicht benötigt. Ein weiterer Vorteil des Zeitmultiplex liegt in seiner relativen Unempfindlichkeit gegen nichtlineare Verzerrungen, auf die das Frequenzmultiplex mit dem nichtlinearen Nebensprechen sehr empfindlich reagiert.

Von besonderer Bedeutung ist noch, dass es neben analogen auch digitale Nachrichtenquellen (s. Fernschreibtechnik) gibt. Werden analoge in digitale Signale verwandelt, so ist die Zusammenfassung im Zeitmultiplex möglich.

Störungen

Sowohl bei analoger als auch bei digitaler Übertragung unterliegt die Signalleistung P_s der Streckendämpfung, die abschnittsweise durch Verstärker wieder aufgehoben wird (s. Bild 2). Bei einer digitalen Übertragungsstrecke tritt dabei an die Stelle der analogen Verstärker der Regenerativverstärker (s. Abschn. 2.2.3 und 2.5). Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der aufgelaufenen Geräuschleistung.

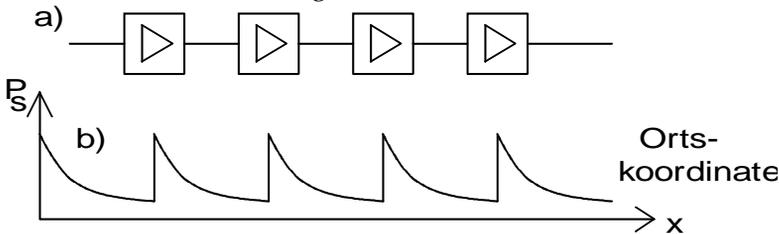


Bild 2. a) Übertragungsstrecke mit Verstärkern b) Signalleistung längs einer Übertragungsstrecke

Bei analoger Übertragung wird die Geräuschleistung in linearen Verstärkern jeweils um den gleichen Faktor angehoben wie die Signalleistung, wobei sich die innerhalb jedes Abschnittes hinzugekommenen Geräusche überlagern (Bild 3).

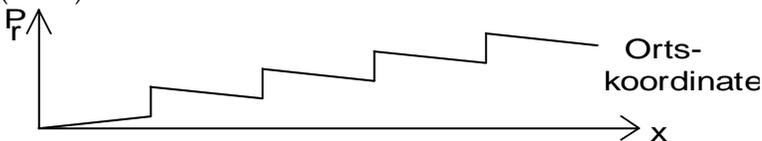


Bild 3. Geräuschleistung bei analoger Übertragung

Im Gegensatz dazu wird bei digitaler Übertragung mit Hilfe von regenerierenden Verstärkern das Signal von der aufgelaufenen Geräuschleistung P_{rd} jeweils wieder weitgehend befreit (Bild 4). Das Geräusch verursacht lediglich die fehlerhafte Übertragung einzelner Zeichen und Phasenjitter, d.h. statistische Schwankungen der Pulsperiodizität. Infolge der abschnittweisen Regenerierung addieren sich nur die Fehler, nicht aber die Geräusche. Eine geringe

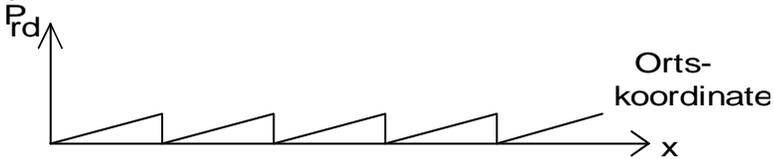


Bild 0.1. Geräuschleistung bei digitaler Übertragung

Erhöhung des Signal-Geräusch-Abstandes führt zu einer erheblichen Erniedrigung der Fehlerhäufigkeit. Damit ist die Übertragungsqualität weitgehend unabhängig von der Entfernung.

Genauigkeit

Bei Informationen zur Verarbeitung müssen besondere Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden. Im unteren Genauigkeitsbereich bis zu einem relativen Fehler von etwa 10^{-2} sind Anlagen mit Signalen der Klasse 1, d. h. mit analogen Signalen preiswerter als Anlagen mit Signalen der Klasse 4, d. h. mit digitalen Signalen, bei höheren Genauigkeiten kehrt sich das Verhältnis jedoch um.

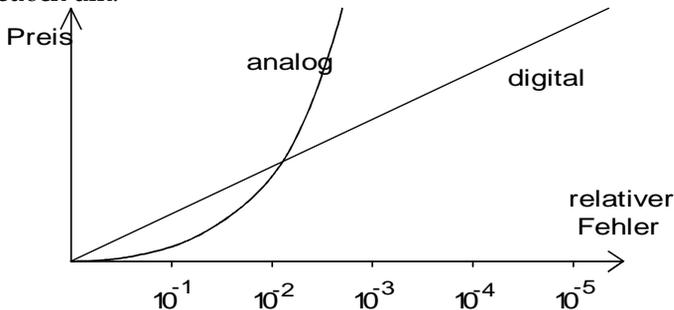


Bild 5. Zusammenhang zwischen Preis und Genauigkeit

Zur Verdeutlichung ist der Zusammenhang zwischen Preis und relativem Fehler durch ein Diagramm in Bild 5 dargestellt.

Übertragungssysteme

Zunächst soll ein Überblick gegeben werden über die Komponenten eines Nachrichtenübertragungssystems. Die Aufgabe der Nachrichtenübertragung besteht in der Übermittlung einer vorliegenden Nachricht an einen beliebig weit entfernten Ort. Die Nachricht kann aus Sprache, Schrift, Daten, Musik, Bildern oder anderen Ereignissen bestehen. Die technischen Einrichtungen zur Übertragung einer Nachricht stellen ein Nachrichtensystem dar. Bei der Vielfalt solcher Nachrichtensysteme ist es erforderlich, ein theoretisches Modell zu bilden, das sich mathematisch beschreiben lässt.

Nachrichtenarten

Die wichtigsten Aufgabenbereiche der elektrischen Nachrichtenübertragung zeigt Bild 6. Sie ergeben sich aus den Empfängern der Nachrichten: der Mensch oder eine Maschine. Die wichtigsten Eingangstore für Nachrichten sind beim Menschen das Auge und das Ohr. Damit ergeben sich zwei wichtige Übertragungstechniken: die Tonübertragung und die Bildübertragung.

Zu ihnen gehören vier Wandler: im Falle der Tonübertragung das Mikrophon mit dem Gegenstück Lautsprecher bzw. Kopfhörer und im Falle der Bildübertragung die Kameraröhre mit dem Gegenstück Bildröhre.

Wichtig ist die Frage der Übertragungsqualität und der dafür geeigneten Qualitätsmaßstäbe. Im Falle der Musikübertragung spricht man von Klangtreue und bei der Sprachübertragung von Silbenverständlichkeit. Hier eröffnet die digitale Nachrichtenübertragung ganz neue Möglichkeiten. Die Wandler für Bild und Ton erzeugen ein analoges Signal.

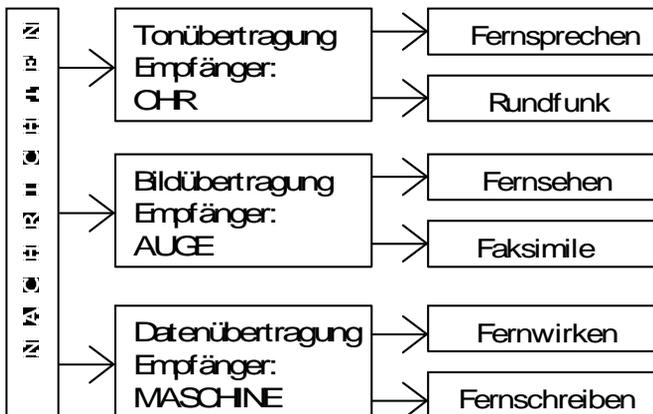


Bild 6. Nachrichtenarten

Daher ist zunächst eine Digitalisierung dieses Signals erforderlich. Das so entstehende Digitalsignal ist die physikalische Darstellung einer Zahlenfolge. Als allgemeines Qualitätskriterium ergibt sich hier die Fehlerhäufigkeit.

Systemaufbau

Im allgemeinen Fall liegen zu übertragende Nachrichten als nicht elektrische Ereignisse vor und müssen daher mit Hilfe eines Wandlers zunächst in elektrische Signale umgewandelt werden. Bei der Sprachübertragung kann man sich als Nachrichtenquelle einen sprechenden Menschen vorstellen. Als Wandler dient dabei auf der Sendeseite ein Mikrophon und auf der Empfangsseite ein Lautsprecher. Der Sender enthält im allgemeinen Fall zwei Blöcke:

- die Quellencodierung und
- die Kanalcodierung

Für die Funktion dieser beiden Blöcke hat der Begriff Redundanz eine wichtige Bedeutung. Man versteht darunter die Weitschweifigkeit der Informationsdarstellung durch ein Signal; ein Signal enthält Redundanz, wenn mehr Signalelemente als zur Darstellung der Information erforderlich vorhanden sind. Die Quellencodierung hat die Aufgabe so weit wie möglich Redundanz aus dem Signal zu entfernen. Dies kann einen Gewinn an Bandbreite und Leistung bringen.

Für die Übertragungstechnik ist nun wichtig, dass der Übertragungskanal das Signal verzerrt und dem Signal Störungen überlagert. Beide Einflüsse zerstören einen Teil der Information. Senderseitig wird dem Rechnung getragen durch eine Kanalcodierung, die das Signal so umformt, dass es in einem gewissen Maß resistent gegen die Einflüsse des Kanals wird und dass auf der Empfangsseite die Möglichkeit der Informationswiederherstellung besteht. Die Kanalcodierung ermöglicht dies durch die Zufügung von Redundanz. Bild 7 zeigt das einfache Grundschemata eines Übertragungssystems. Der Empfänger enthält im allgemeinen Fall drei Blöcke:

1. Entzerrung und Regeneration
2. Kanaldecodierung
3. Quellendecodierung

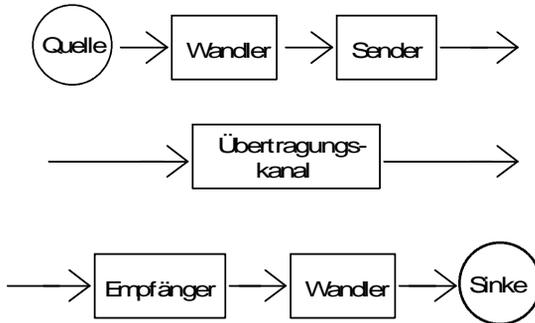


Bild 7. Grundschemata eines Nachrichtenübertragungssystems

Der 1. Block ist durch die Verzerrungen des Kanals bedingt, während die beiden anderen Blöcke die Codierungsvorgänge der Senderseite wieder rückgängig machen. Danach folgen wieder ein Wandler und die Nachrichtensinke. Im Falle der Sprachübertragung kann der Wandler ein Lautsprecher und die Senke das menschliche Ohr sein. In Bild 8 wird der Aufbau eines digitalen Nachrichtenübertragungssystems detaillierter dargestellt. Als Beispiel sei das analoge Sprachsignal betrachtet. Das Signal wird zunächst einer Quellencodierung unterzogen. Dabei können drei Blöcke unterschieden werden: Abtast-Halte-Glied, Analog-Digital-Wandlung und z.B. ein LPC-Vocoder (s. Abschn. 1.4.3). Die Quellencodierung, die das Signal in digitaler Form mit einer möglichst geringen Datenrate darstellen soll, wird in Abschn. 1 behandelt.

Nach der Quellencodierung wird eine Kanalcodierung durchgeführt, die trotz verzerrender und störender Einflüsse des Kanals eine fehlerlose Übertragung ermöglichen soll. Die Kanalcodierung vollzieht sich im Allgemeinen in drei Schritten: Fehlersicherungscodierung, Leitungscodierung und Modulation eines Sinusträgers. Digitale Nachrichtenübertragung bedeutet die Darstellung der Information durch eine Zahlenfolge; durch die Fehlersicherungscodierung nach Abschn. 6 erhält diese Zahlenfolge eine innere mathematische Struktur, so dass Fehler erkannt und evtl. korrigiert werden können. Die Leitungscodierung nach Abschn. 3 bringt das Signal in eine für die Übertragung günstige Form und durch Modulation eines Sinusträgers nach Abschn. 7 wird das Signal an einen Bandpass-Kanal angepasst. Auf der Empfangsseite finden sich die entsprechenden Blöcke, um die Vorgänge auf der Sendeseite wieder rückgängig zu machen.