

# Inhalt

<b>Worum geht es in diesem Band? .....</b>	<b>9</b>
<b>[1996] Digitale Nachrichtenübertragung - Grundlagen, Systeme, Technik, praktische Anwendungen.....</b>	<b>13</b>
<b>Einleitung.....</b>	<b>15</b>
<b>1. Quellencodierung.....</b>	<b>25</b>
1. 1. Übertragungssystem.....	25
1. 2. Nachrichtenebene .....	26
1. 3. Digitalisierung analoger Signale.....	31
1. 4. Codierungsverfahren.....	73
<b>2. Basisband-Übertragung.....</b>	<b>87</b>
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
<b>3. Kanalcodierung I: Leitungscodierung .....</b>	<b>127</b>
3. 1. Aufgabe der Leitungscodierung.....	128
3. 2. Formatierung.....	130
3. 3. Korrelative Codierung.....	135
3. 4. Aufgaben .....	149
<b>4. Entzerrung: Basisbandsignale.....</b>	<b>153</b>
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

<b>5. Takt-Synchronisation .....</b>	<b>183</b>
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
<b>6. Kanalcodierung II: Fehlersicherung .....</b>	<b>209</b>
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
<b>7. Kanalcodierung III: Modulation .....</b>	<b>243</b>
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
<b>8. Multiplexsysteme .....</b>	<b>271</b>
8. 1. Prinzip .....	271
8. 2. Zeitmultiplex.....	274
8. 3. Frequenzmultiplex .....	276
8. 4. Amplitudenmultiplex.....	278
<b>9. Messtechnik .....</b>	<b>281</b>
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

# **[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

# 1. Quellencodierung

Die umfassendste Bedeutung des Begriffs Codierung ist die Umwandlung einer Nachricht von einer Form in eine andere. Häufiger versteht man Codierung jedoch als Darstellung eines einzelnen Nachrichtenelementes aus einer größeren Menge solcher Elemente durch die Kombination von Elementen aus einer kleineren Menge von Nachrichtenelementen. Die Umkehrung dieses Vorgangs heißt Decodierung.

## 1. 1. Übertragungssystem

Im Folgenden wird das Modell eines Nachrichtenübertragungssystems, wie es Bild 1.1 darstellt, hergeleitet.

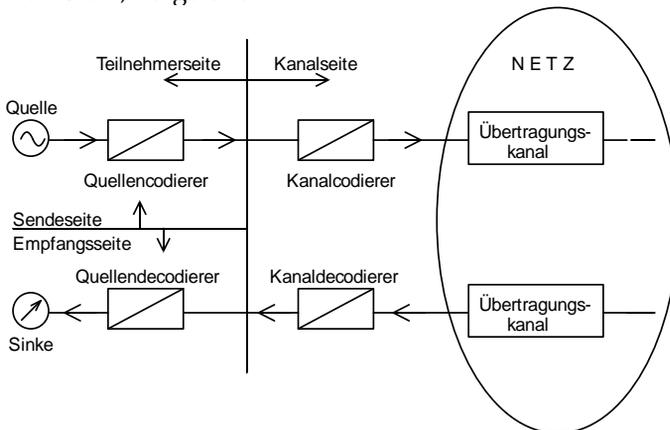


Bild 1.1. Modell eines Nachrichtenübertragungssystems

Die physikalischen Realitäten sind gegeben durch eine Nachrichtenquelle, einen mehr oder weniger gestörten Übertragungskanal und eine Nachrichtensinke. Nachrichtenquelle und Kanaleingang werden durch einen Codierer verbunden, die Kopplung zwischen Kanalausgang und der Nachrichtensinke erfolgt durch den Decodierer. Bei der Codierung müssen sowohl Eigenschaften der Quelle als auch Eigenschaften des Kanals berücksichtigt werden. Daher teilt man den Codierer in einen Quellen- und einen Kanalcodierer und den Decodierer in einen Quellen- und einen Kanaldecodierer auf. Hierbei sollen die jeweils einander zugeordneten Codierer und Decodierer

## 2. Basisband-Übertragung

Bei der Übertragung von elektrischen Signalen über Nachrichtenkanäle unterscheidet man

1. die Basisbandübertragung, bei der das Digitalsignal ohne Frequenzverschiebung durch Modulation übertragen wird, und
2. die trägerfrequente Übertragung, bei der die Basisbandsignale einem Sinusträger in Amplituden-, Phasen- oder Frequenzmodulation aufgebürdet werden.

Die Überlegungen dieses Abschnitts beziehen sich auf die Basisbandsignale. Eine gewisse Veränderung der Signale bei der Übertragung ist unvermeidlich. Es gibt keine idealen Kanäle. Die Ursachen für die Signalveränderungen sind die linearen und nichtlinearen Verzerrungen des Kanals und die von außen in den Kanal eindringenden Störungen. Dementsprechend werden in Abschn. 2.3 die Impulsverzerrungen auf der Grundlage des 1. Nyquist-Kriteriums und die Störungen in Abschn. 2.4 auf der Grundlage der Tiefpassfilterung und der Korrelation (s. Anhang 12.3.3) behandelt. Bei der Entwicklung eines Übertragungskonzepts werden analoge und digitale Übertragungssysteme einander gegenübergestellt.

### 2.1. Analoge Übertragungssysteme

Hier liegen die zu übertragenden Informationen im zeitlichen Verlauf  $u_e(t)$  der Eingangsspannung eines Übertragungskanals. Die an den Kanal zu stellenden Bedingungen für eine Übertragung ohne Informationsverlust werden zunächst im Zeitbereich formuliert. Dabei muss angegeben werden, welche Signalveränderungen zulässig sind, ohne dass ein Informationsverlust vorliegt. Bei analogen Signalen sind in der Regel zulässig

- \* eine zeitliche Verzögerung  $\tau$  und
- \* eine Multiplikation des Signals mit einem konstanten Faktor  $v$ .

In mathematischer Formulierung muss für die Ausgangsspannung  $u_a(t)$  des Kanals gelten

$$u_a(t) = v u_e(t - \tau) \quad . \quad (2.1)$$

### 3. Kanalcodierung I: Leitungscodierung

Wurde durch Quellencodierung ein gegebener Symbolvorrat unter Reduktion von Redundanz und Irrelevanz in zweckmäßiger Weise in ein binäres Signal überführt, so soll die Kanalcodierung dieses binäre Signal am Ausgang des Quellencodierers an den Kanal anpassen, was in der Regel durch Zufügung von Redundanz geschieht.

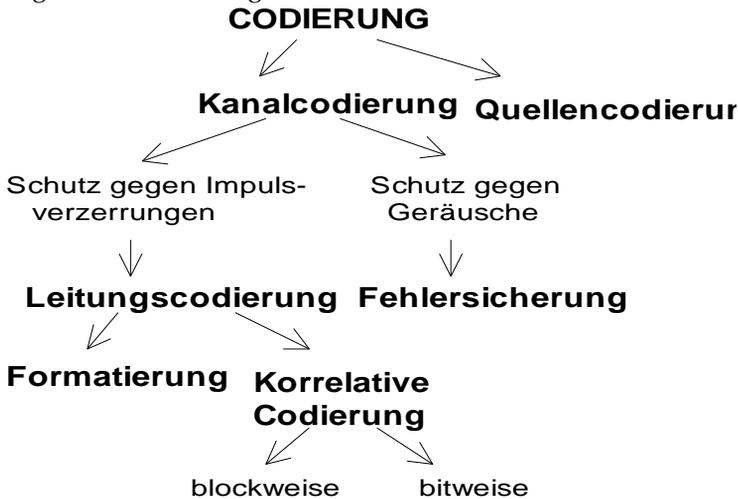


Bild 3.1. Übersicht zur Kanalcodierung

Bild 3.1 zeigt eine Übersicht zu Inhalt und Einordnung des Begriffes Kanalcodierung. Im Rahmen der digitalen Nachrichtenübertragung umfasst Codierung sowohl die Quellen- als auch die Kanalcodierung. Während die Quellencodierung ihre Blickrichtung auf die Signalquelle hat, fallen unter Kanalcodierung alle Maßnahmen, die erforderlich sind, um durch Anpassung des Signals an die Kanaleigenschaften eine Übertragung ohne Informationsverlust zu ermöglichen. Bei der Übertragung durch den Kanal entstehen Impulsverzerrungen und werden Geräusche überlagert. Dementsprechend können zwei Formen der Kanalcodierung unterschieden werden. Durch Leitungscodierung wird das Digitalsignal gegen Impulsverzerrungen geschützt. Die Geräusche können Fehler bei der Symbolerkennung im Rege-

## 4. Entzerrung: Basisbandsignale

Digitalsignale werden beim Durchgang durch die Kanäle eines Nachrichtennetzes gestört und verzerrt. Das hat Auswirkungen auf die mögliche Übertragungsgeschwindigkeit und auf die Fehlerhäufigkeit. Daher kommt der Entzerrung der empfangenen Signale hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Betriebssicherheit große Bedeutung zu. Bild 4.1 zeigt eine Übersicht zur Entzerrung, die

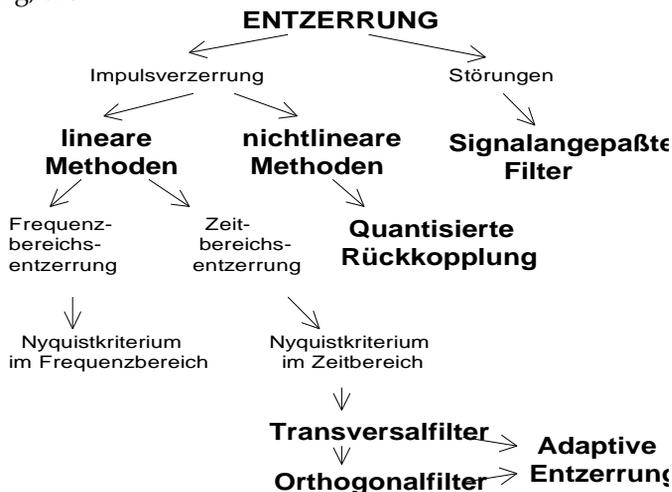


Bild 4.1. Übersicht zur Entzerrung

von der Vorstellung ausgeht, dass dem Signal im Übertragungskanal Impulsverzerrungen zugefügt und Störungen überlagert werden. Dabei soll dieser Abschnitt sich ausschließlich mit den Impulsverzerrungen beschäftigen. Hinsichtlich der überlagerten Störungen sei auf Abschn. 2.4 verwiesen, wo die Verminderung des Einflusses der Störungen durch Korrelation beschrieben wird.

Bei der Einführung des ISDN, des Integrated Services Digital Network, werden dem Teilnehmer zwei 64 Kbit/s - Kanäle zur Verfügung gestellt. Die Übertragung der Digitalsignale erfolgt dabei über die Teilnehmeranschlussleitungen, die, für die analoge Sprachübertragung ausgelegt, nur eine entsprechend kleine Bandbreite besitzen. Möglich ist dies nur über eine leistungsfähige Entzerrertechnik.

## 6. Kanalcodierung II: Fehlersicherung

Zu den Aufgaben der elektrischen Nachrichtentechnik gehört die Übertragung und Speicherung von Informationen. Mit zunehmender Bedeutung der Nachrichtentechnik in Staat, Wirtschaft und Gesellschaft wächst das Interesse daran, dass die Vorgänge der Übertragung und Speicherung möglichst fehlerfrei erfolgen. Hinsichtlich der Fehlerfreiheit ist nun gerade die digitale Nachrichtentechnik wesentlich leistungsfähiger als die analoge Nachrichtentechnik. Dies hängt hauptsächlich mit der Art der Informationsdarstellung zusammen: Während die analoge Nachrichtentechnik die Informationen durch kontinuierliche Funktionen darstellt, verwendet die digitale Nachrichtentechnik hierfür Zahlenfolgen, die meistens Null-Eins-Folgen sind. Diese Art der Informationsdarstellung ist damit für die mathematischen Verfahren<sup>9</sup> der Fehlererkennung und der Fehlerkorrektur besonders geeignet. Wichtige Einsatzfelder von digitalen Übertragungsstrecken mit Fehlersicherung sind:

D-Netz, E-Netz

Digital Audio Broadcast (DAB)

Digitales Satelliten Radio

Grundlage der Fehlersicherung ist die Zufügung von Redundanz mit Hilfe eines Codierers; diese Redundanz kann dann im Decodierer auf der Empfängerseite zur Fehlererkennung und Fehlerkorrektur ausgenutzt werden. Redundanz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass mehr Nullen und Einsen zur Darstellung eines Zeichens aus einem bestimmten Zeichenvorrats aufgewendet werden, als dies eigentlich erforderlich wäre.

### 6. 1. Klassifikation der Codes

Eine Übersicht über die Fehlersicherungs\_codes gibt Bild 6.1. Man unterscheidet zunächst die Blockcodes und die sequentiellen Codes. Bei den Blockcodes wird die Informationsfolge in einzelne Kombinationen bzw. Blöcke

---

<sup>9</sup> Peterson, William Wesley: *Prüfbar und korrigierbare Codes*, R. Oldenbourg-Verlag, München-Wien 1967.

## 8. Multiplexsysteme

Eine wichtige Forderung in der digitalen Nachrichtenübertragung ist, gleichzeitig mehr als ein Signal über einen gemeinsamen Kanal zu übertragen. Diese Multiplex- oder Vielfach-Übertragung<sup>19</sup> ist nicht umgebar, wenn nur ein einziger Übertragungskanal verfügbar ist, beispielsweise der die Erde umgebende Raum für ungerichtete Funkverbindungen. Aber auch aus wirtschaftlichen Gründen ist eine Multiplexübertragung sinnvoll, wenn z. B. einige Hundert Zweidrahtleitungen einer Fernsprechstrecke durch ein einziges viel billigeres Breitbandkabel ersetzt werden. Im Folgenden soll das Prinzip der Multiplexübertragung erläutert und ein Überblick über die Verfahren gegeben werden. Dabei werden die Charakterika der Multiplex-technik bei digitaler Nachrichtenübertragung herausgestellt.

### 8. 1. Prinzip

Sollen zwei Sendesignale  $u_{s1}(t)$  und  $u_{s2}(t)$  gleichzeitig über einen gemeinsamen Kanal übertragen werden, so müssen sie so umgeformt werden, dass sie trotz Addition am Kanaleingang sich am Kanalausgang wieder trennen lassen. Dies ist möglich in einer Anordnung nach Bild 8.1.

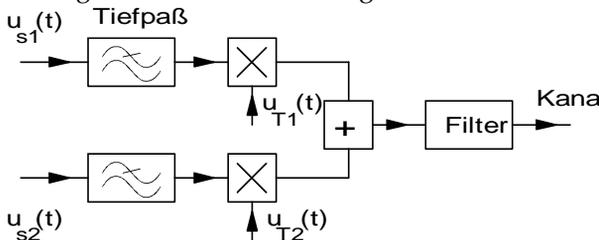


Bild 8.1. Umformung zweier Sendesignale zur Multiplexübertragung

Die durch Tiefpässe bandbegrenzten analogen Sendesignale werden mit Hilfe von Multiplikatoren zwei Trägersignalen  $u_{T1}(t)$  und  $u_{T2}(t)$  aufmoduliert und zur gleichzeitigen Übertragung addiert. Eine einfache Trennung der Signale am Kanalausgang ist möglich, wenn als Trägersignale orthogonale Funktionen verwendet werden. Kennzeichnet man die verschiedenen

<sup>19</sup> Lochmann, Dietmar: *Digitale Nachrichtentechnik*, Verlag Technik 1995.

## 9. Messtechnik

Die Übertragung von Informationen mit Hilfe digitaler Signale erfordert den Aufbau einer neuen Messtechnik. Sie unterscheidet sich von den Gegebenheiten der analogen Übertragungstechnik hinsichtlich der Signalgeneratoren, der zu messenden Größen und der verwendeten Messgeräte.

### 9. 1. Signalgeneratoren

In der Messtechnik analoger Übertragungssysteme spielen die Sinusgeneratoren eine große Rolle. Man kann mit ihnen die wichtigsten Eigenschaften der Übertragungssysteme untersuchen, die diese beim Betrieb mit wirklichen Signalen haben. In der Messtechnik digitaler Übertragungssysteme treten die Sinusgeneratoren in den Hintergrund; es kommen Generatoren zur Anwendung, die die Signale der digitalen Übertragungstechnik genauer simulieren, als dies bei der analogen Übertragungstechnik durch die Sinusgeneratoren der Fall ist.

#### 9. 1. 1. Allgemeines

Die Digitalsignalgeneratoren in der Messtechnik der digitalen Nachrichtenübertragung erzeugen ein isochrones Signal der Form

$$u(t) = U_0 T_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_m(n) g(t-nT_0) \quad . \quad (9.1)$$

Darin ist  $T_0$  die Taktperiode,  $f_0=1/T_0$  die Taktfrequenz und  $a_m(n)$  die Zahlenfolge als Träger der Information. Der Zahlenvorrat der Zahlenfolge  $a_m(n)$  ist in der Regel 2; man hat also binäre Digitalsignale. Die Werte der beiden Zahlen der Zahlenfolge legen zusammen mit dem Grundimpuls  $g(t)$  das Format (s. Abschn. 3.2) fest. Damit ergeben sich 3 wichtige Parameter, die bei einem Digitalsignalgenerator eingestellt werden müssen:

1. die Taktfrequenz,
2. das Format und
3. die Zahlenfolge.

## 11. Realisierungsprinzipien

Die vorliegende "Digitale Nachrichtenübertragung" beschreibt überwiegend Systeme der Übertragung von Digitalsignalen. Diese Systeme entstehen an Hand theoretisch-mathematischer Herleitungen in Form von Blockschaltbildern. Damit ist die Art der Realisierung noch völlig offen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass innerhalb der digitalen Nachrichtenübertragung neben der klassischen Schaltungstechnik die digitale Signalverarbeitung eine besondere Rolle spielt. Dies ist auch naheliegend; denn zu einer digitalen Nachrichtenübertragung als einer Übertragung von Zahlenfolgen passt naturgemäß besonders die digitale Signalverarbeitung, die Zahlenfolgen verarbeitet.

### 11. 1. Zwei Realisierungsalternativen

Die Realisierungsalternativen ergeben sich aus den Signalarten. Dabei wird unter Signal die physikalische Darstellung einer Nachricht verstanden. Grundsätzlich können zwei verschiedene Signalarten unterschieden werden:

1. Spannungs-Zeit-Funktion,
2. Zahlenfolge.

Spannungs-Zeit-Funktionen umfassen sowohl den Bereich der analogen als auch den Bereich der zeitdiskreten Signale. Während die analogen Signale die Nachricht in ihrer Kurvenform darstellen, sind die zeitdiskreten Signale physikalische Darstellungen von Zahlenfolgen in Form einer Spannungs-Zeit-Funktion. Bei den zeitdiskreten Signalen können unterschieden werden:

1. Abtastsignale
2. Digitalsignale

Die Abtastsignale stellen wertkontinuierliche Zahlenfolgen dar, wobei die Zahlen in den Flächen von Impulsen konstanter Form und Dauer abgebildet werden. Bei den Digitalsignalen liegt ein begrenzter Wertevorrat vor. Die Zahlenwerte werden durch Signalelemente dargestellt.

Neben den Spannungs-Zeit-Funktionen spielen die Zahlenfolgen, die ebenfalls zeitdiskrete Signale sind, eine wichtige Rolle. Dabei liegen die Zahlen als Dualzahlen entweder in Festkomma- oder in Gleitkomma-Darstellung vor. Die Zahlen sind vorhanden in den Registern von Rechenwerken