

# Datenkommunikation

Teil 1.3: Kommunikationsmodell

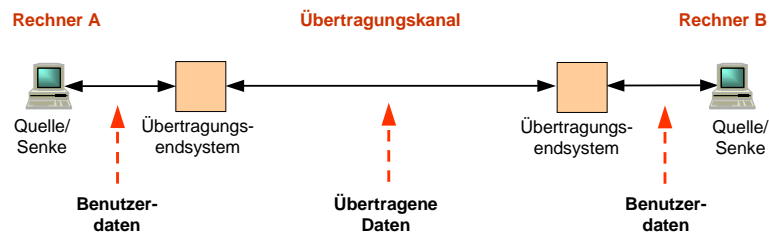
O.Univ.Prof.Dr. Harmen R. van As

## Übersicht

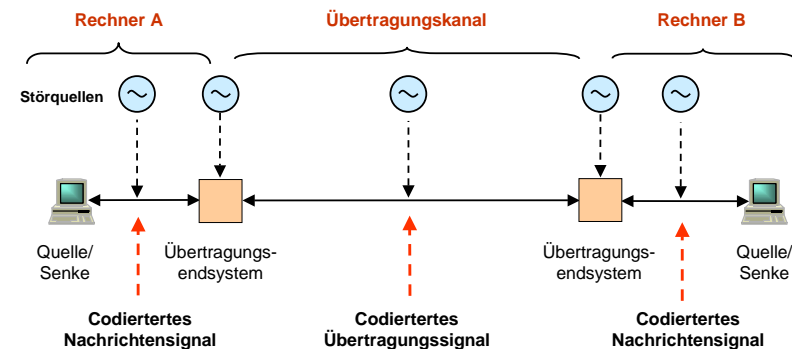
### 1.3 Grundlagen: Kommunikationsmodell

- Die Kommunikationsstrecke
- Systemkomponente einer Kommunikationsstrecke
- Quellen-, Leitungs-, Kanalcodierung
- Störungen, Fehlersicherung
- Signale, Bits, Rahmen, Pakete, Nachrichten

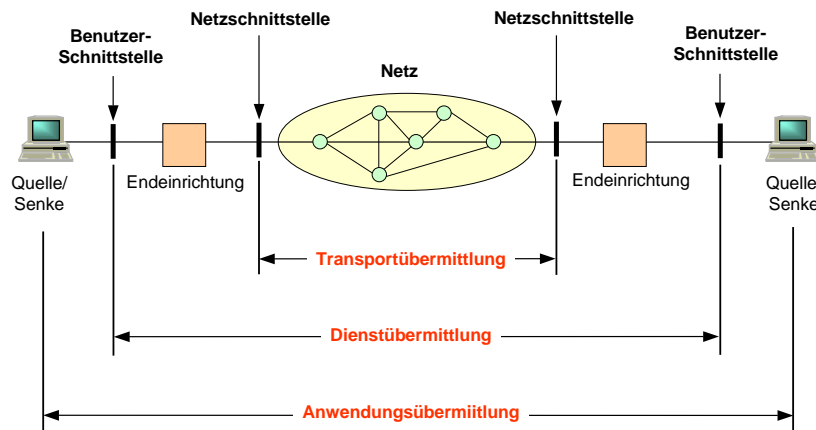
## Kommunikationsmodell



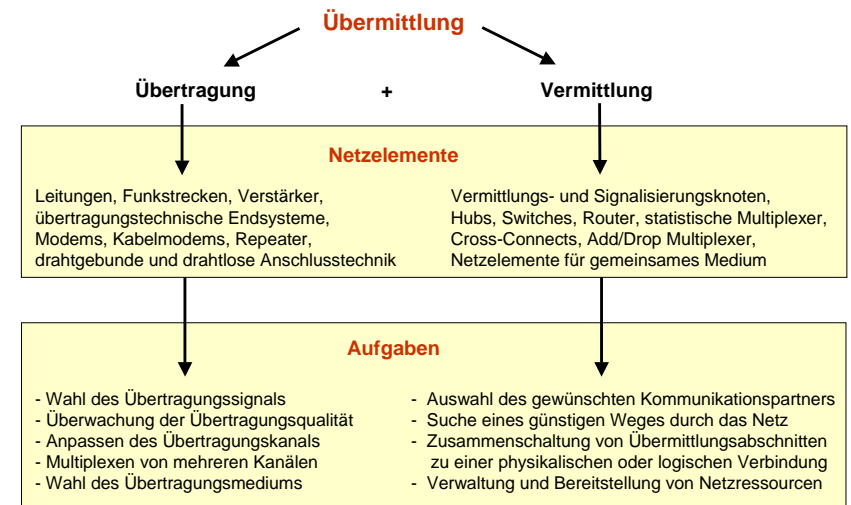
## Übertragungstechnisches Modell



## Netztechnisches Modell

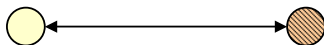


## Übertragung und Vermittlung



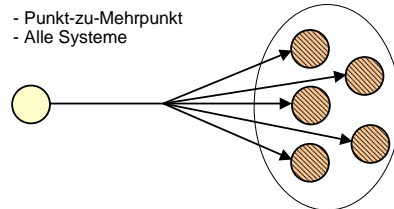
## Kommunikationsbeziehungen

### Punkt-zu-Punkt



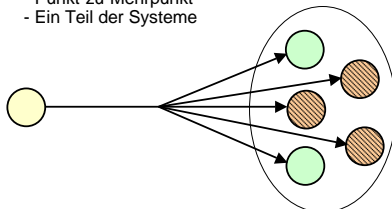
### Broadcast

- Punkt-zu-Mehrpunkt
- Alle Systeme



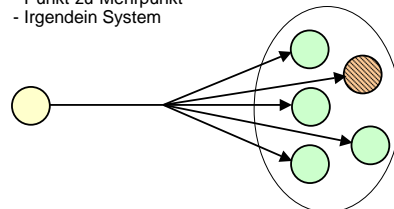
### Multicast

- Punkt-zu-Mehrpunkt
- Ein Teil der Systeme

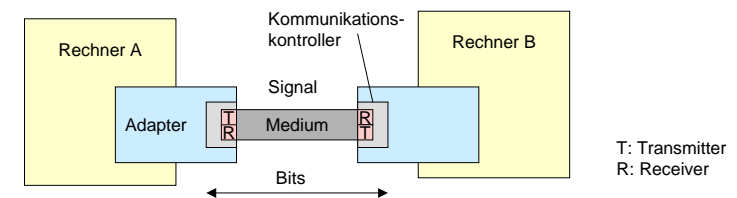


### Anycast

- Punkt-zu-Mehrpunkt
- Irgendein System



## Datenkommunikation



### Einfaches Szenario:

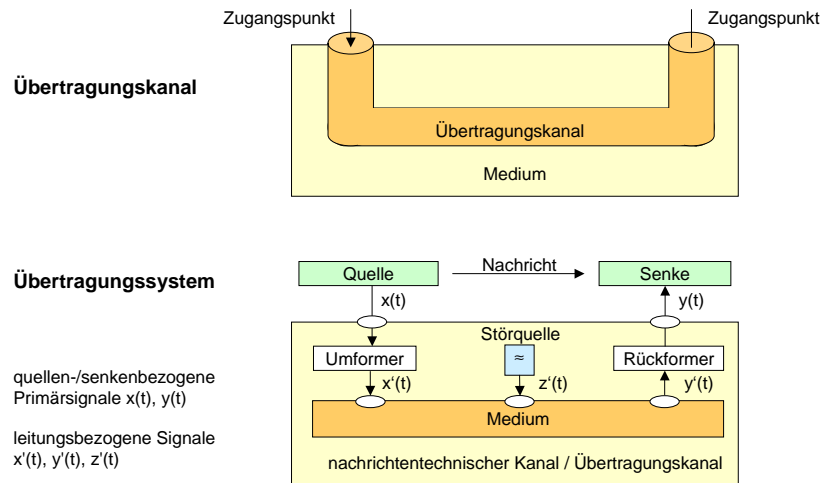
Zwei direkt benachbarte Rechner kommunizieren über ein Medium (z. B. Kupferadern, Radiowellen, Glasfaser ...)

- Anschluss der Rechner an das Medium über Adapter
- Kommunikationskontrolller auf dem Adapter regelt den Ablauf der Kommunikation

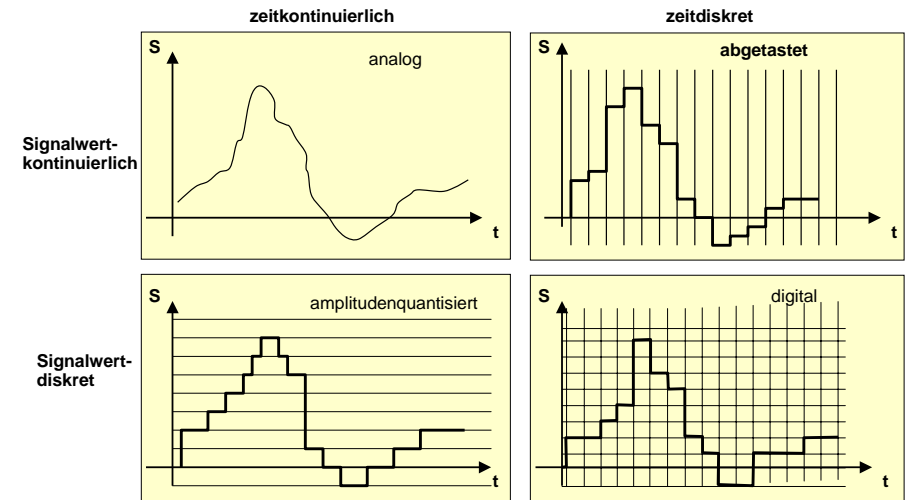
Folgende Probleme sind unter anderem zu lösen

- **Codierung der Signale**
- **Organisation der Übertragung**

# Übertragungskanal / Übertragungssystem



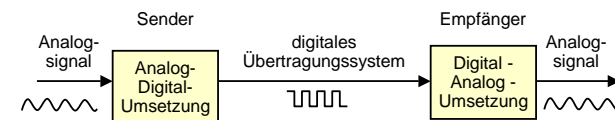
# Zeitabhängige Signale



# Signalquellen

<b>Sprache</b>	analog digital	3 kHz	GSM 13 kbit/s Telefonie 64 kbit/s, 32 kbit/s, ..., 9,6 kbit/s
<b>Audio</b>	analog digital	20 kHz	CD-Qualität 4 bis 6 Mbit/s MP3-komprimiert etwa 128 kbit/s
<b>Video</b>	analog digital	5-6 MHz	Fernsehen in Studioqualität 60 / 100 Mbit/s Video (unkomprimiert) 100 - 600 Mbit/s Video (komprimiert) 2 - 100 Mbit/s HDTV (unkomprimiert) 1500 Mbit/s HDTV (komprimiert) 150 Mbit/s
<b>Text</b>	digital		50 kbit/s - 10 Mbit/s
<b>Daten</b>	digital		Datentransfer 1 - 150 Mbit/s Telekonferenzen < 150 Mbit/s
<b>Bilder</b>	digital		Graphiken einige 100 kbit/s Fotos einige Mbit/s Hochauflösende Bilder < 150 Mbit/s

# Digitalisierung analoger Signale



## - Übertragung analoger Signale über digitale Übertragungssysteme:

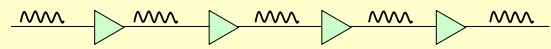
### Umwandlung

- wertkontinuierlich → wertdiskret (Quantisierung)
- zeitkontinuierlich → zeitdiskret (Abtastung)

### - Ziel: Rekonstruierbarkeit des originalen Signals beim Empfänger

## Vorteile digitaler Übertragungssysteme

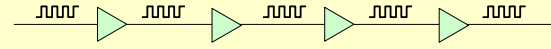
### Übertragung von analogen Signalen



- Regeneratoren verstärken Nutz- und Rauschsignal
- Dadurch wird das analoge Nutzsignal immer schlechter
- Beim Empfänger: **schlechtere Qualität** als das gesendete Nutzsignal

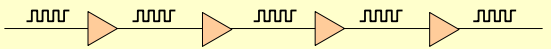
### Übertragung von digitalen Signalen

#### (elektronische Verstärker)



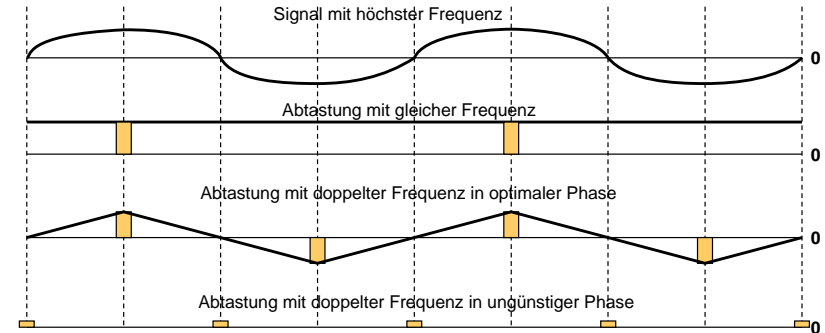
- Regeneratoren können das digitale Nutzsignal vollständig rekonstruieren
- 3R-Regeneration: Amplitude, Impulsform, zeitliche Lage
- Beim Empfänger: **gleiche Qualität** wie das gesendete Nutzsignal

### Optische Verstärker



- Optische Regeneratoren verstärken alle Nutzsignale auf jeder Wellenlänge gleichzeitig, aber dafür nur in der Amplitude (1R Regeneration)
- In regelmäßigen Abständen müssen alle Nutzsignale im einzelnen elektronisch rekonstruiert werden (optische 3R- Regeneratoren in Labors verfügbar)
- Beim Empfänger: **gleiche Qualität** wie das gesendete Nutzsignal

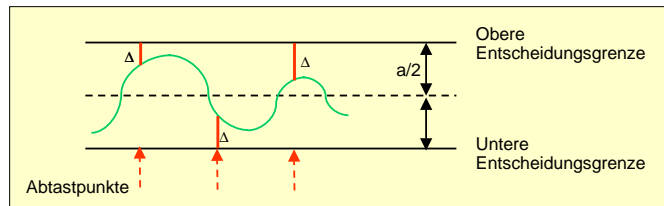
## Abtasttheorem nach Shannon



Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs der abgetasteten Analogsignale ist eine Mindestabtasthäufigkeit (Abtastfrequenz  $f_A$ ) bei periodischem Abtastzyklus erforderlich

Die Abtastfrequenz  $f_A$  muss mehr als doppelt so hoch sein wie die höchste im abzutastenden Signal vorkommende Grenzfrequenz ( $f_S$ ):  **$f_A > 2f_S$**

## Quantisierung und Codierung



a: Größe des Quantisierungsintervalls  
 $\Delta$ : Quantisierungsfehler  $< a/2$

- Wertebereich des Analogsignals wird in endliche Anzahl von Quantisierungsintervallen eingeteilt, denen jeweils ein fester diskreter Wert zugeordnet wird
- Anstelle des ursprünglichen Analogsignals wird das mit dem **Quantisierungsfehler  $\Delta < a/2$**  behaftete digitale Signal übertragen
- Zuordnung des Mittelwerts des Intervalls beim Empfänger

**Beispiel:** Pulse Code Modulation (PCM)

## Nyquist-Theorem

- maximale Datenrate D für einen rauschfreien Kanal mit eingeschränkter Bandbreite

$$D = 2 \cdot B \cdot \log_2(N)$$

- B: Bandbreite des Kanals [Hz]
- N: diskrete Signalstufen

- Beispiel:
  - Kanal mit 3000 Hz, binäres Signal ( $N = 2$ )
  - maximale Datenrate: 6 kbit/s

## Shannon'scher Kanalkapazitätssatz

- Maximale erzielbare Bitrate  $C$  hängt vom Signal-Rausch-Abstand ab

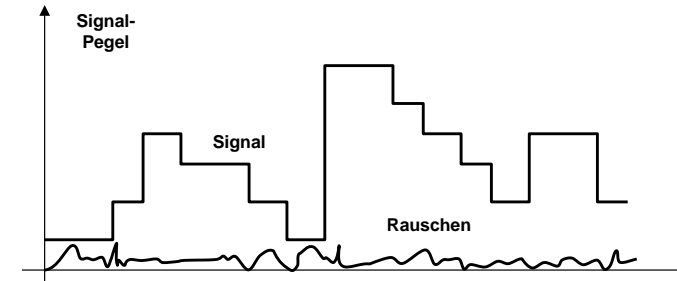
$$C = B \cdot \log_2 (1 + S / N)$$

- B: Kanalbandbreite
- S: Energie des Signals
- N: Energie der Störquelle (Energie ~ Quadrat der Amplitude)

- Beispiel

- 3000 Hz Kanal
- SNR (signal-to-noise ratio) [dB] = 30 dB =  $10 \log_{10}(S/N)$  dB
- $C = 3000 (\log_2 (1+1000)) \approx 3000 \cdot 10 = 30 \text{ kbit/s}$

## Kanalkapazität (Shannon)



## Übertragungsstörung durch Rauschen (1)

**Neben der systematischen Beeinflussung des Signals durch**

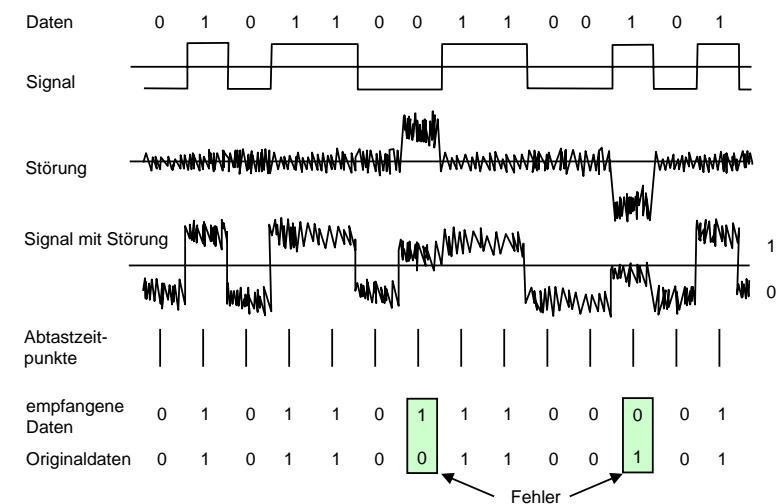
- Dämpfung
- Laufzeitverzerrungen

können Signalstörungen durch

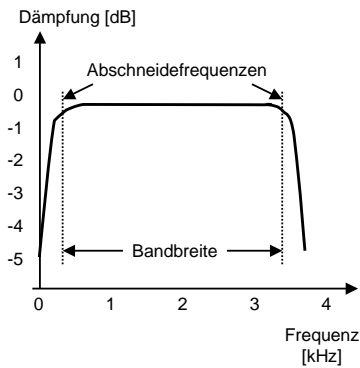
- transiente, stochastische Prozesse
  - weißes Rauschen
  - Impulsstörungen
- auftreten

**Lange anhaltende Störungen:** Bündelfehler (Echobildung, Nebensprechen, (thermisches)Rauschen, Anschalten von induktiven Lasten (Motor), 50Hz Netzbrummen stets auf einer Leitung, ...)

## Übertragungsstörungen durch Rauschen (2)



## Bandbegrenztes Medium



### Endliches Frequenzband zur Übertragung

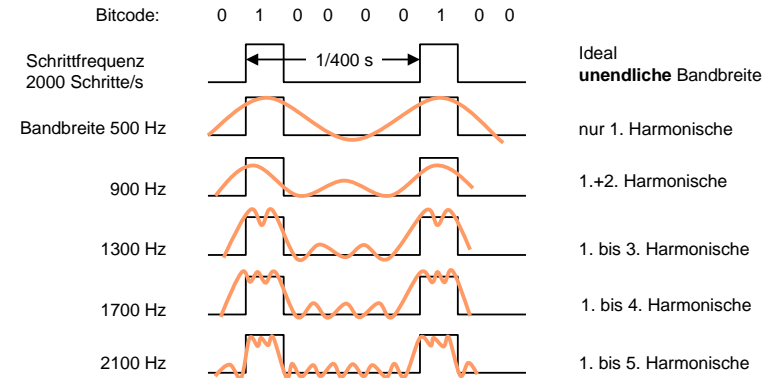
**Bandbreite in Hz:** Frequenzbereich, der über ein Medium (einschließlich der im Übertragungssystem enthaltenen Filter, Verstärker usw.) übertragen werden kann

Bandbreite ergibt sich aus der Differenz der höchsten und niedrigsten übertragbaren Frequenzen

Wegen nicht-idealer Bandbegrenzungen Festlegung von Abschneidefrequenzen erforderlich

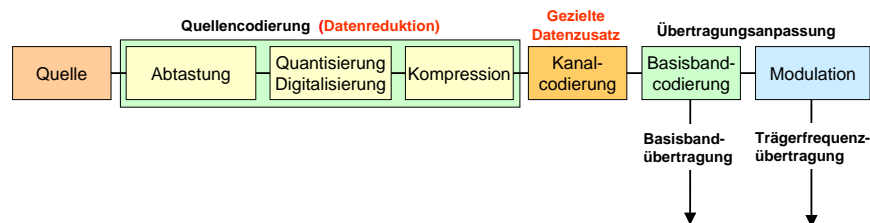
Signale müssen an die Übertragungscharakteristik des Mediums angepasst werden

## Bandbreite und digitales Signal

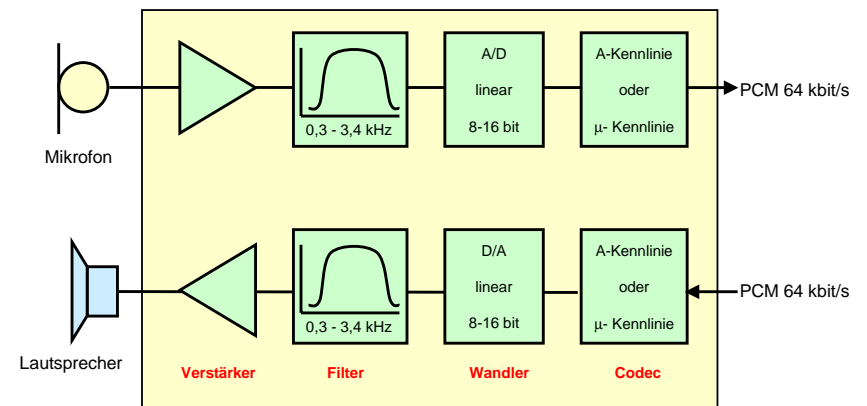


- Min. Bandbreite für Übertragung einer beliebigen Bitfolge mit bestimmter Schrittfrequenz nötig
- Berechnung der minimalen Bandbreite nach den Formeln von Shannon/Nyquist

## Codierung



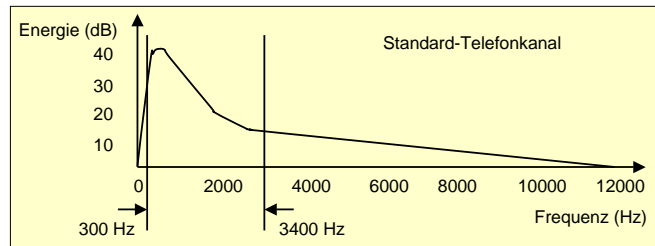
## Codierung und Decodierung von Sprache



A/D: Analog/digital-Wandler  
D/A: Digital/analog-Wandler

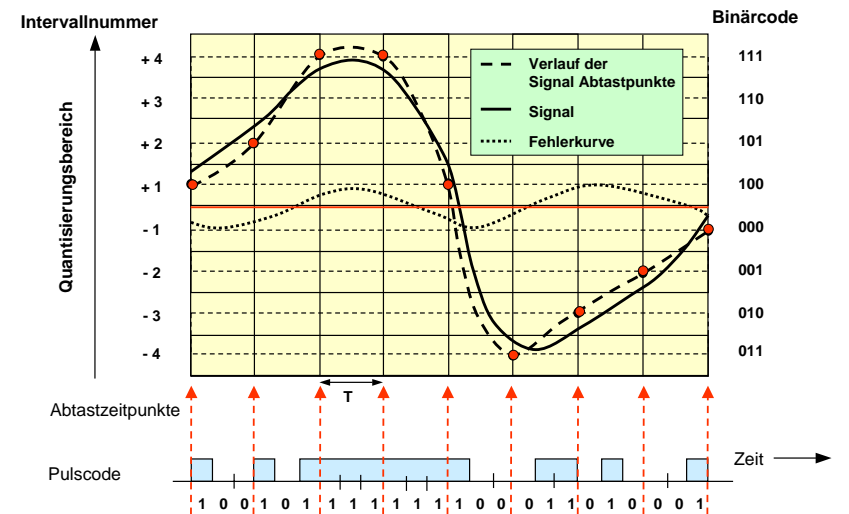
Codec: Codierer / Decodierer  
PCM : Pulse Code Modulation

## Pulse Code Modulation (PCM)

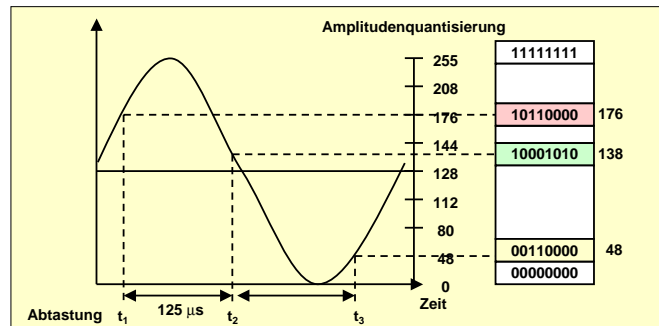


- Frequenzbereich: 300 - 3400 Hz = 3,1 kHz Bandbreite
- Abtastfrequenz höher als 6,8 kHz (Shannon-Abtasttheorem)
- Abtastfrequenz für PCM-Digitalisierung:  $f_A = 8 \text{ kHz}$
- Abtastperiode:  $T_A = 1/f_A = 1/(8000 \text{ Hz}) = 125 \mu\text{s}$
- 256 Quantisierungsintervalle, d.h. 8 Bit für binäre Codierung
- Bitrate für digitalisierten Fernsprechanal:  $8 \text{ kHz} \cdot 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$

## Prinzip der Pulscodemodulation (PCM)



## Logarithmische Quantisierung



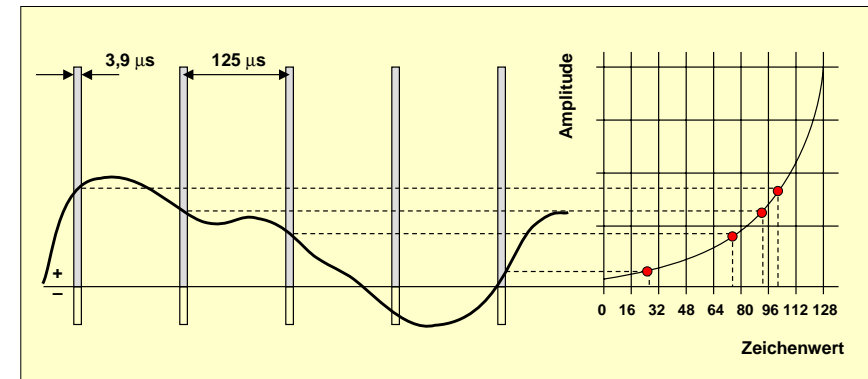
**Gleichförmige Quantisierung:** gleich große Intervalle

- Quantisierungsfehler machen sich bei kleinen Signalwerten stärker bemerkbar (Quantisierungsrauschen)
- Kleine Unterschiede werden bei leisen Signalen stärker wahrgenommen als bei lauten

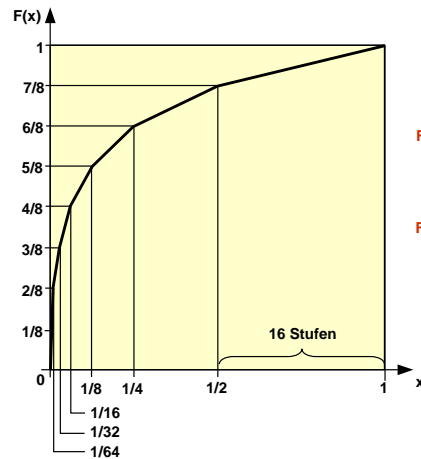
**Deshalb:**

Kompressor/Expander bei Sender/Empfänger mit logarithmischen Kompressionskennlinien

## Kompandierung des Signals bei PCM



## Positiver Ast der A-Kennlinie



$$F(x) = \text{Sgn}(x) \cdot [(1 + \lg(Ax|x|)) / (1 + \lg A)]$$

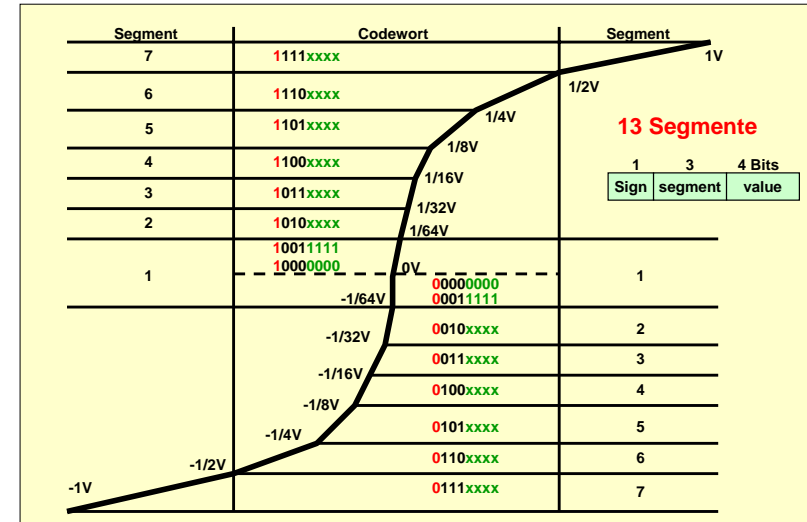
$$\text{für } 1/A \leq |x| \leq 1$$

$$F(x) = \text{Sgn}(x) \cdot [(Ax|x|) / (1 + \lg A)]$$

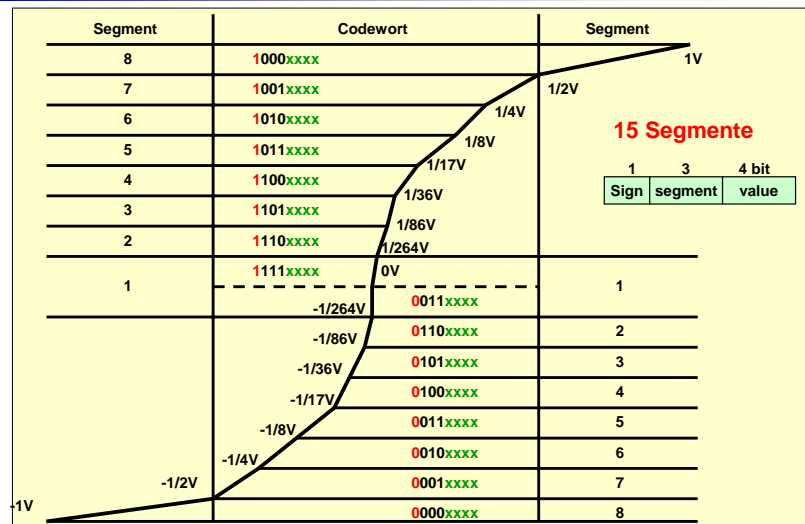
$$\text{für } 0 \leq |x| \leq 1/A$$

X Eingangssignal, normiert auf die halbe Maximalspannung  
F(x) Kompressorausgangsspannung, normiert auf die halbe Maximalspannung

## A- Kennlinie (A-Law) - Europe



## μ-Kennlinie (μ-Law) - USA, Japan



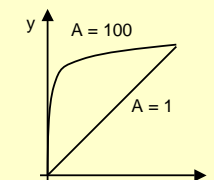
## A-Kennlinie und μ-Kennlinie

### A-Law (Europa)

$$y = \frac{Ax}{1 + \log_2(A)}, \quad 0 \leq |x| \leq \frac{1}{A}$$

$$y = \frac{1 + \log_2(Ax)}{1 + \log_2(A)}, \quad \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1$$

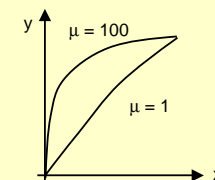
$$A = 87,6$$



### μ-Law (USA und Japan)

$$y = \frac{\log_2(1 + \mu x)}{\log_2(1 + \mu)}, \quad x \geq 0$$

$$\mu = 255$$





# Digitale Signalübertragung

## Schritt

■ Charakteristisch für zeitdiskrete Signale ist die Existenz eines minimalen Zeitintervalls  $T_{\text{Min}}$  zwischen aufeinanderfolgenden möglichen Änderungen der Signalkoordinate (Schrittdauer, kurz: Schritt als Signal definierter Dauer)

■ **Wichtig:** Digitales Signal mit fester Schrittdauer  $T$  (Schritt-Takt)

## Isochrones (isochronous) Digitalsignal

■ Ein Digitalsignal ist isochron, wenn seine Kennzeitpunkte, d.h. die Zeitpunkte des Übergangs von einem Signalelement zum nächsten, in einem festen Zeitraster liegen

## Anisochrones (anisochronous) Digitalsignal:

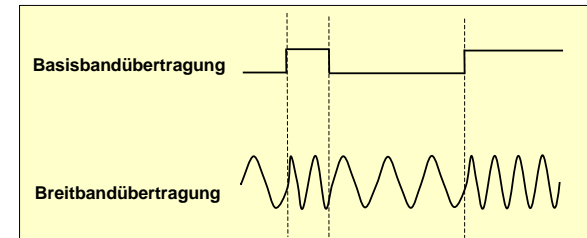
■ Ein nicht-isochrones Digitalsignal

## Schrittgeschwindigkeit

■ bei isochronen Digitalsignalen: Kehrwert der Schrittdauer:  $1/T$

■ Einheit: baud =  $1/s$

# Digitale Signale zur Datenübertragung



## Basisbandübertragung

- direkte Übertragung des rechteckförmigen Quellensignal (z.B. Strom / kein Strom)

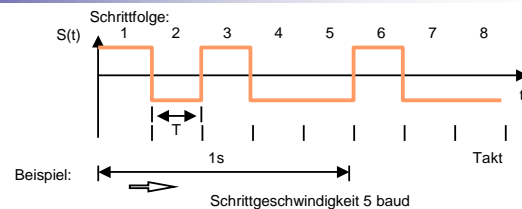
- Eigenschaften der Codes

- Bittakrückgewinnung
- Vermeiden von Gleichstromanteilen
- Codierung mehrerer Zeichen
- Resynchronisation durch Rahmenbildung

## Breitbandübertragung

- Modulation

# Übertragungs- vs. Schrittgeschwindigkeit



## Schrittgeschwindigkeit (Baudrate)

- Zahl der Signalparameter-Zustandswechsel
- Einheit: baud ( $1/s$ ) (nach Jean Marc Baudot)
- entspricht bei isochronem Takt der Taktfrequenz
- auch als *Baudrate* bezeichnet

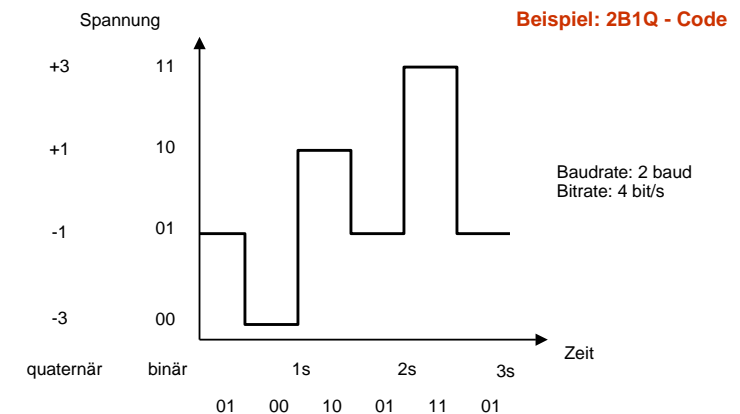
## Übertragungsgeschwindigkeit (Bitrate)

- Anzahl der übertragbaren Bitstellen pro Zeiteinheit
- Einheit: bit/s

## Schrittgeschwindigkeit = Übertragungsgeschwindigkeit

■ Nur für binäre Signale, bei denen jeder Schritt als Signalelement genau ein Bit als Codeelement darstellt

# Beispiel einer Baudrate (Symbolrate)



## Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

### Zweiwertiges Digitalsignal (Binärsignal)

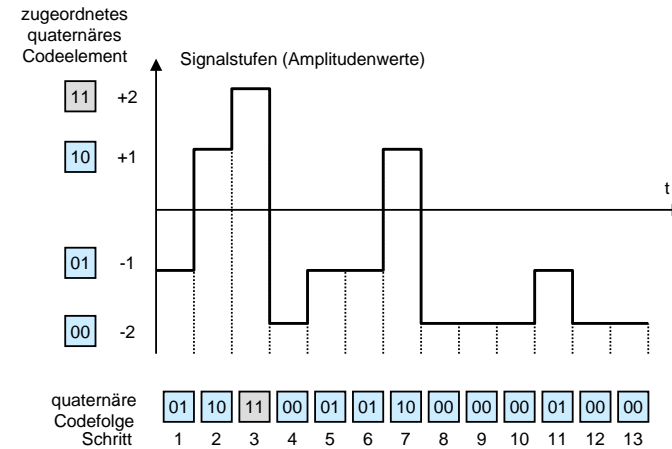
- Digitales Signal mit nur zwei Werten des Signalparameters (Digitales Signal, bei dem die Signalelemente binär sind)

### Mehrwertiges (mehrstufiges) Digitalsignal

- Die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen; Beispiel: DIBIT = zwei Bit pro Koordinatenwert (quaternäres Signalelement)
- Die Anzahl  $n$  der diskreten Werte (Kennwerte, Stufen), die ein Signalelement annehmen kann, wird wie folgt gekennzeichnet:

$n = 2$  binär (binary)  
 $n = 3$  ternär (ternary)  
 $n = 4$  quaternär (quarternary)  
 ...  
 $n = 8$  oktonär (octonary)  
 $n = 10$  denär (denary)

## Mehrwertiges Digitalsignal



## Leitungscodierung digitaler Signale

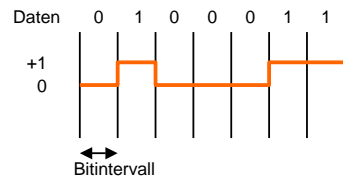
### Wichtige Eigenschaften eines Leitungscodes

- Taktrückgewinnung**
  - Den Signalwerten können Zeichenwerte und Takt entnommen werden
  - Die Taktrückgewinnung ist erforderlich, wenn keine separate Taktleitung zur Verfügung steht
  - Taktgehalt eines Codes sollte möglichst unabhängig vom Inhalt der übertragenen Daten sein
- Gleichstromanteil**
  - Auf manchen Übertragungsstrecken darf wegen der angeschlossenen Geräte kein Gleichstrom auftreten
  - Kann meist nicht absolut, sondern nur im statistischen Mittel erfüllt werden
- Fehlererkennung**
  - Signalfehler sollten auf Signalebene erkannt werden
- Übertragungsbereichweite**
  - Hängt mit der Betriebsdämpfung zusammen. Hohe Frequenzen werden stärker gedämpft als niedrige
- Anzahl gemeinsam codierter Zeichen**
  - In einem Signalwert kann mehr als ein Zeichenwert codiert werden
- Resynchronisation**
  - Wird meist durch Rahmenbildung ermöglicht

## Unterteilung der Leitungscodes

- Binäre Leitungscodes**
  - Symbolwerte werden durch Signalwert bestimmt
- Biphase Leitungscodes**
  - Symbolwerte werden durch Phasensprünge codiert
- Ternäre Leitungscodes**
  - Die beiden Symbolwerte 0 und 1 werden in drei Codiersymbole (-1, 0, +1) abgebildet
- Blockcodes**
  - $m$  Informationsbits werden als Block zusammengefasst und zu einem neuen Block der Länge  $n$  codiert (4B/5B, 5B/6B, ....)
- Faltungscodes**
  - Codebits werden nicht blockweise, sondern kontinuierlich erzeugt
  - Das Codegedächtnis  $m$  gibt an, wie viele Informationsbits ein Codebit beeinflussen
  - Coderate  $r = k / n$  : pro Takt werden aus  $k$  Informationsbits  $n > k$  Codebits erzeugt (typische Coderaten 1/3 bis 7/8)

## NRZ: Non-Return to Zero



### Binärer Code

#### Kennzeichen

- fester Pegel während eines Bitintervalls
- Signalübergänge (Signalwechsel) erfolgen an den Intervallgrenzen

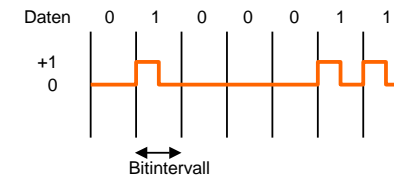
#### Non-Return to Zero

- "1" hoher Pegel
- "0" niedriger Pegel

#### Eigenschaften

- sehr einfach zu implementieren
- NRZ ist Standard innerhalb von Digitalgeräten (Rechnern, usw.)
- Entspricht Einfach- oder Doppelstromverfahren bei der Telegrafie
- Gleichstromkomponente kann hoch sein
- eignet sich nicht zur Taktrückgewinnung

## RZ: Return-to-Zero



### Binärer Code

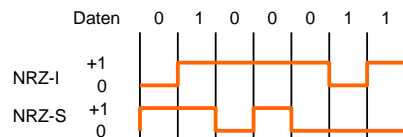
#### Einfacher Ansatz: "1" wird als high-Signal dargestellt; "0" als low-Signal

- Zwei Klassen solcher Codes, um Bitfolgen zu codieren
  - RZ (Return to Zero)
  - NRZ (Non-Return to Zero)

#### Return to Zero

- Gekennzeichnet durch einen Rechteckimpuls in der 1. Hälfte des Bitintervalls für das Datenelement "1"
- Danach Rückkehr in Grundzustand (Zero)
- Baudrate (Schrittgeschwindigkeit) ist im Extremfall (Folge von "1") doppelt so hoch wie Bitrate
- Bei Null-Folge keine Taktrückgewinnung möglich
- Gleichstromanteil kann hoch werden

## Differentielle Codierung



Es wird nicht der absolute Signalwert in der Zuordnungsvorschrift verwendet, sondern der Signalwert in Abhängigkeit von der Polarität des vorhergehenden Signalelements codiert

- Biphase Code
- Vorteil: Unter Einfluss von Störungen sind Signalwechsel leichter zu erkennen als Signalpegel, die mit einer Schwelle verglichen werden müssen

#### NRZ-I (Inverse)

- Übergang in den entgegengesetzten Signalwert zur Darstellung einer übertragenen "1"
- kein Wechsel bei "0"
- hoher Gleichstromanteil möglich
- Taktrückgewinnung nicht immer gegeben

#### NRZ-S (Space)

- Wie NRZ-I, aber Signalwechsel bei übertragener "0"

## Zusammenfassung der NRZ-Codes

### Non-Return to Zero (NRZ)

- 1 = hoher Pegel
- 0 = niedriger Pegel

### Non-Return to Zero Inverse (NRZ-I)

- 1 = Signalübergang zu Intervallanfang
- 0 = kein Signalübergang

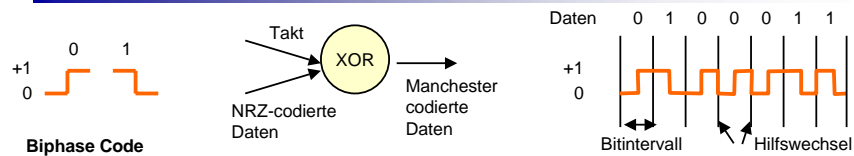
### Non-Return to Zero Space (NRZ-S)

- 1 = kein Signalübergang
- 0 = Signalübergang zu Intervallanfang

### Return to Zero (RZ)

- 1 = Signalübergang am Intervallanfang und Rücksetzung in der Mitte des Bit-Intervalls
- 0 = kein Signalübergang

## Manchester Code



### Biphase Code

Mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall; Maximal zwei Signalwechsel pro Bit  
 ■ 1 = Signalübergang vom hohen Pegel zum niedrigen Pegel in der Intervallmitte  
 ■ 0 = Signalübergang vom niedrigen Pegel zum hohen Pegel in der Intervallmitte  
 ■ Erzeugbar über XOR-Verknüpfung von NRZ-codierten Daten und dem Takt  
 Hilfswechsel erforderlich (erhöht Baudrate)

### Vorteile

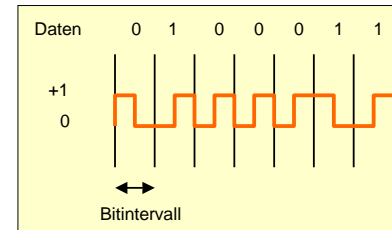
- Leichte Taktrückgewinnung, da stets mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall
- Keine Gleichstromkomponente
- Fehlererkennung auf Signalebene: Fehlen eines erwarteten Übergangs erkennbar (Verwendung: Ethernet)

### Nachteile

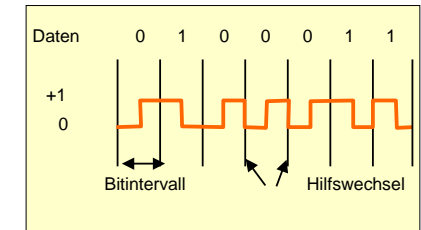
- Verdoppelt die Rate von Signalwechseln auf der Leitung (Baudrate steigt)
- im schlimmsten Fall ist Bitrate = 50% Baudrate, (d.h. Baudrate größer als Bitrate)
- Baudrate kann auch kleiner als Bitrate sein
- Übertragung von vier unterschiedlichen Signalen

## Differentieller Manchester Code

### Differentielle Manchester Code



### Manchester Code

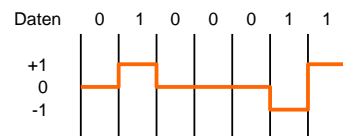


### Biphase Code

- Signalwechsel in der Mitte jedes Bitintervalls
- Signalwechsel am Anfang eines Bitintervalls nur, wenn "0" codiert wird
- Ausgangssignal von Startlevel abhängig
- Polaritätsunabhängig

Diese Art der Codierung wird beispielsweise im lokalen Netz Token Ring eingesetzt

## AMI-Code (Alternate Mark Inversion)



### Ternärer Code

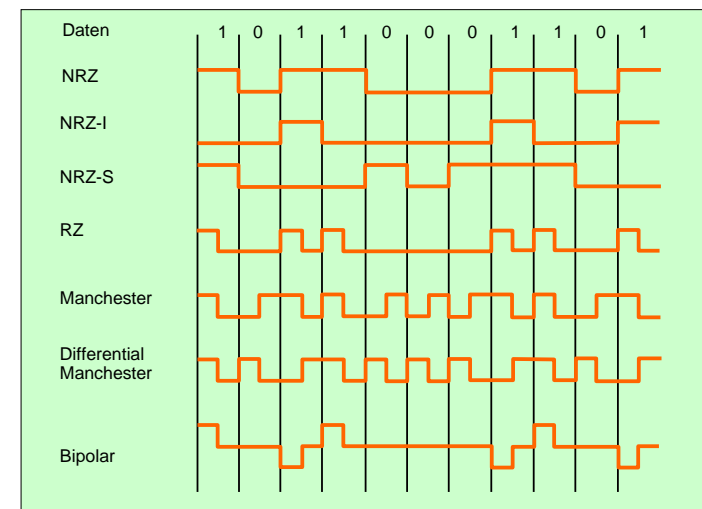
#### Leitungscodierung mit mehr als zwei Signalwerten

- keine Gleichstromkomponente
- Problem: lange "0"-Folgen
- Lösung: Zwei aufeinanderfolgende "0"-en werden durch eine "0" und eine umgekehrte "1" codiert
- einfache Taktrückgewinnung

#### Beispiel: AMI-Codierung (Alternate Mark Inversion)

- AMI-NRZ: Darstellung von "1" abwechselnd durch positiven oder negativen Impuls in der 1. Hälfte des Bitintervalls
- AMI-RZ: in der Mitte von einer 1-Codierung wird auf den Null-Wert gewechselt

## Leitungscodes



## Blockcode: 4B/5B-Code

4-Bit Daten	5-Bit Code
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

- Einfügen zusätzlicher Bits, um "0" bzw. "1"- Folgen zu vermeiden
- 4 Bit Daten werden in 5 Bit Code codiert
  - nicht mehr als eine führende "0"
  - nicht mehr als zwei abschließende "0"
- Übertragung mit NRZ-I
- 80% Effizienz

## Verwürfelung (Scrambling)

Biphase-Codes werden in lokalen Netzen bis zu einer Datenrate von ca. 10 Mbit/s eingesetzt, nicht aber für Weitverkehrsnetze

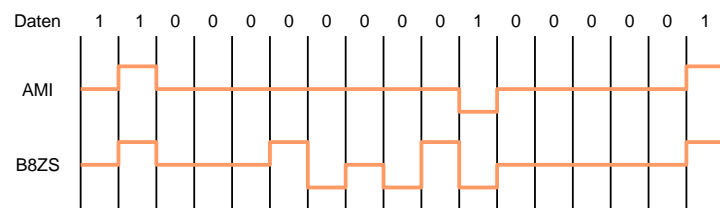
### Zielsetzung

- Sequenzen von Bits, die über eine längere Zeit keine Signalwechsel erzeugen, werden durch Füllsequenzen ersetzt, um die Synchronisation aufrecht zu erhalten
- Füllsequenz muss vom Empfänger erkannt und durch die Originalsequenz ersetzt werden
- Die Länge der Füllsequenz entspricht derjenigen der Originalsequenz

### Beispiele

- B8ZS: Bipolar with 8-zeros substitution (häufig in Nordamerika verwendet)
- HDB3: High-density bipolar with 3 zeros (häufig in Europa und Japan eingesetzt)

## B8ZS: Bipolar with 8-Zeros Substitution



Basiert auf AMI

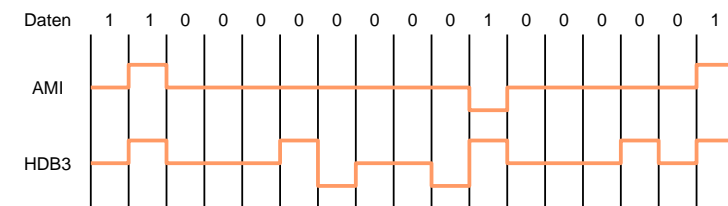
- Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

Auftreten von 8 Nullen in Folge

- Letzter vorangegangener Puls positiv: 8 Nullen werden als 000+-0+ codiert
- Letzter vorangegangener Puls negativ: 8 Nullen werden als 000-+0- codiert

Führt zu zwei Coderegolverletzungen innerhalb eines Wortes

## HDB3: High-Density Bipolar with 3 Zeros



Basiert auf AMI

- Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

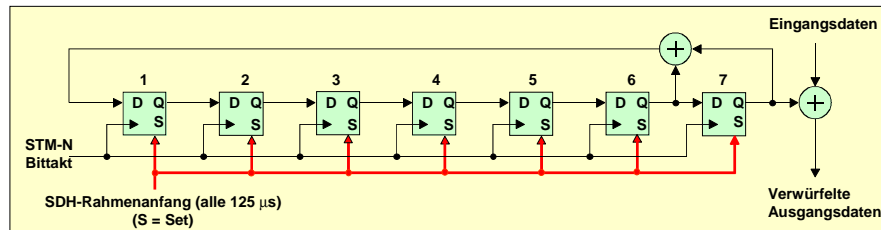
- Auftreten von 4 Nullen in Folge

Ersetzungen

Anzahl von Pulsen  
seit letzter Ersetzung

Letzter Puls	Gerade	Ungerade
Negativ	000-	+00+
Positiv	000+	-00-

## Synchroner SDH-Verwürfler



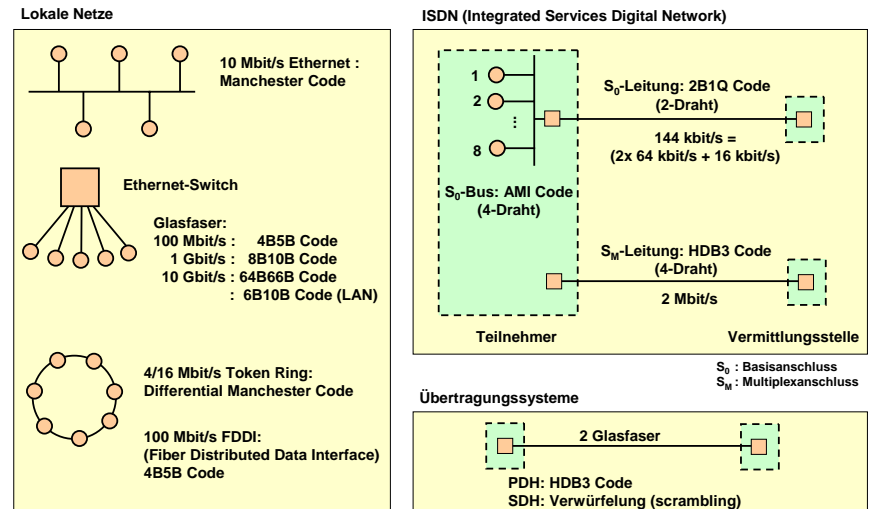
- Polynom:  $1 + x^6 + x^7$
- Anfangswert am Anfang jedes SDH-Rahmens = 1111111
- Entwürfler gleich (Verwürfelte Eingangsdaten → Ausgangsdaten)
- Verwürfler (Scrambler); Entwürfler (Descrambler)

Bitraten: STM-1 = 155 Mbit/s  
STM-4 = 622 Mbit/s  
STM-16 = 2,5 Gbit/s  
STM-64 = 10 Gbit/s

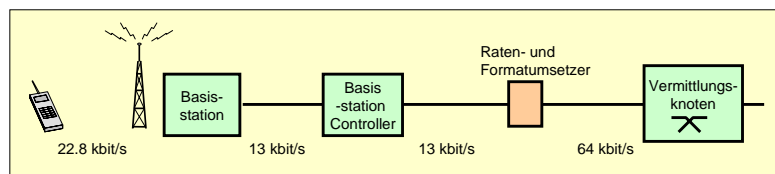
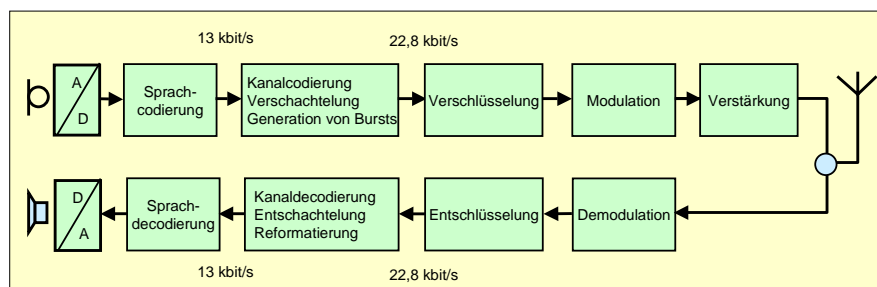
STM : Synchronous Transfer Module

$\oplus$	Modulo 2 Addition oder XOR (exclusive OR) :	$1 + 1 = 0$	$1 + 0 = 1$
		$0 + 0 = 0$	$0 + 1 = 1$

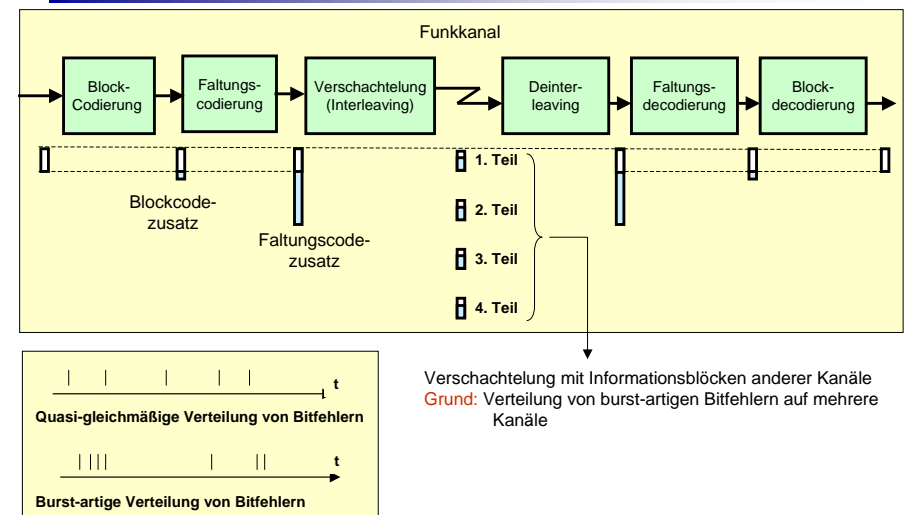
## Verwendung der Leitungscodes



## GSM-Codierung im Mobilgerät



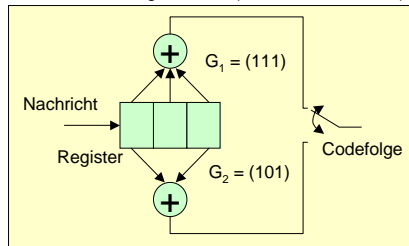
## Codierungsstufen über GSM-Funkkanal



Verschachtelung mit Informationsblöcken anderer Kanäle  
Grund: Verteilung von burst-artigen Bitfehlern auf mehrere Kanäle

## Faltungscodierung

Einfacher Faltungscodierer (Convolutional Coder)



Coderate  $r = \frac{1}{2}$  ( 1 Bit 2 Bits)  
 Registertiefe  $K = 3$   
 Eingangsbits per Takt  $k = 1$   
 Verknüpfungsregel 1:  $G_1 = (111)$   
 Verknüpfungsregel 2:  $G_2 = (101)$

Einlaufende Bitstrom ...00101  
 Startwert (000): Codefolge 11,10,00,10,11  
 Startwert (100): Codefolge 01,01,00,10,11

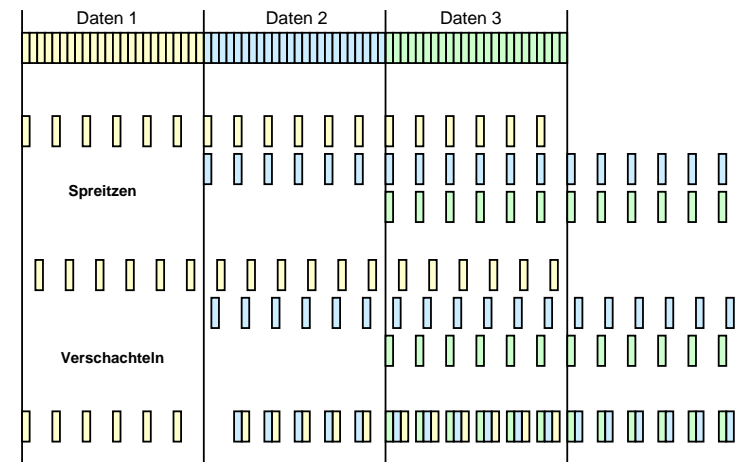
Registeranfangswert: 000

Takt	Register	Codewort
Start	000	00
1	100	11
2	010	10
3	101	00
4	010	10
5	001	11

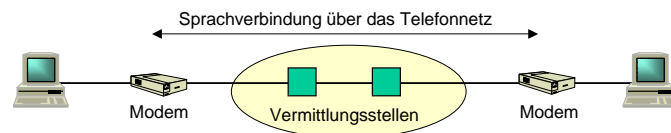
Registeranfangswert: 100

Takt	Register	Codewort
Start	100	11
1	110	01
2	011	01
3	101	00
4	010	10
5	001	11

## Verschachtelung (Interleaving)



## Analoge Übertragung digitaler Daten



### ■ Datenübertragung über das analoge Telefonnetz

Telefonnetz überträgt Frequenzen zwischen 300 Hz und 3400 Hz

### ■ Modulation

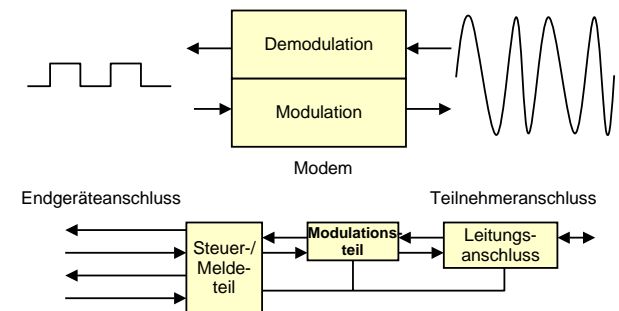
- Änderung von Signalparametern (Amplitude, Frequenz, Phase) eines Trägersignals durch ein modulierendes Signal
- Wandlung digitaler in analoge Signale

### ■ Demodulation

- Rückgewinnung des modulierenden Signals
- Wandlung analoger in digitale Signale

## Modem (Modelator - Demodulator)

■ Gerät, das Modulation und Demodulation in einer Einheit realisiert  
 z.B. Übertragung digitaler Daten über das analoge Telefonnetz



# Modulation

Modulationssignal: Sinusschwingung:  $S(t) = A(t) \sin[2\pi f(t) + \varphi(t)]$   
 Informationssignal: digitale Bitfolge

## Amplitudenmodulation (AM)

- technisch einfach, benötigt wenig Bandbreite, stör anfällig
- **Beispiel:** Kurzwellenfunk, optische Übertragung

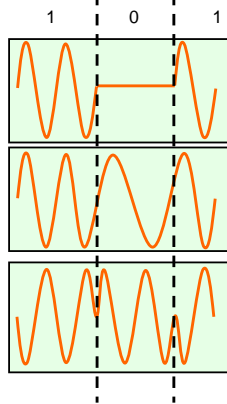
## Frequenzmodulation (FM)

- größere Bandbreite
- verändert die Frequenz des Trägersignals
- **Beispiel:** Hörfunkübertragung

## Phasenmodulation (PM)

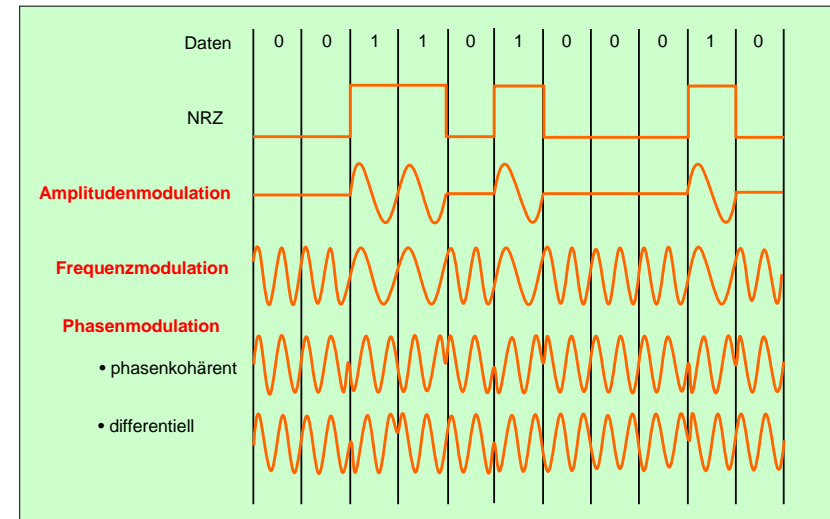
- verändert Phase der Sinus-Schwingung
- Arten
  - phasenkohärent: Vergleich mit Referenzsignal
  - differenziell: Sprung gegenüber letzter Phase (z.B. 90°/270°)
- robust
- **Beispiele:** Richtfunk, Mobilfunk, Modems, xDSL

## Kombination von Amplituden- und Phasenmodulation



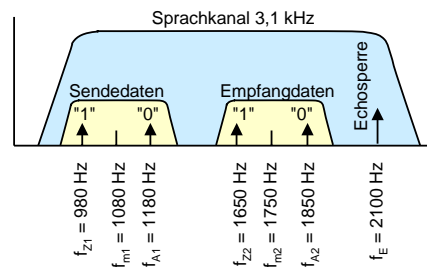
Andere Bezeichnung: **Umtastung (Shift Keying)**

# Modulationsverfahren



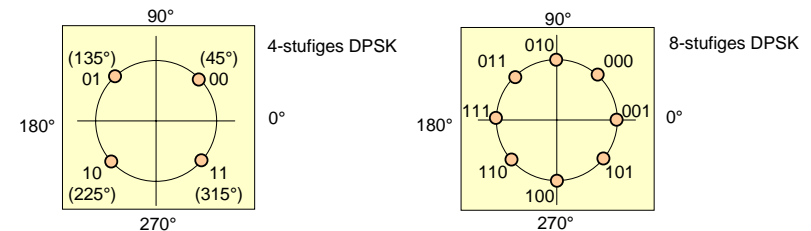
# Beispiel: V.21-Modemtechnik

- Frequenzmultiplex und Frequenzmodulation
- Nutzung des ITU-Standard-Telefonkanals, bis 300 bit/s, Vollduplex-Betrieb



Kanal A: Verbindung aufbauendes Modem  
 Kanal B: angerufenes Modem (schaltet sich bei Ruf automatisch um)

# Phase Shift Keying (PSK)



- Binary PSK (BPSK)
  - Erzeugen eines positiven oder negativen Signals (Phasenwinkel 180°)
- Quaternary PSK (QPSK)
  - 4 Phasenwinkel: 0°, 90°, 180°, 270°
- Differentielle PSK (DPSK)
  - Codierung nicht durch absolute Phasenverschiebung, sondern durch Änderung des Phasenzustands (z.B. Phasensprünge um 0°, 90°, 180° und 270°)
  - $\pi/4$ -DPSK: Phasensprünge um 45°, 135°, -135°, -45°
- Offset PSK
  - Vermeiden von großen (z.B. 180°) Phasensprüngen durch mehrere kleine (z.B. zweimal 90°)



