

## 1.3 Grundlagen: Kommunikationsmodell

Version: Jan. 2003

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

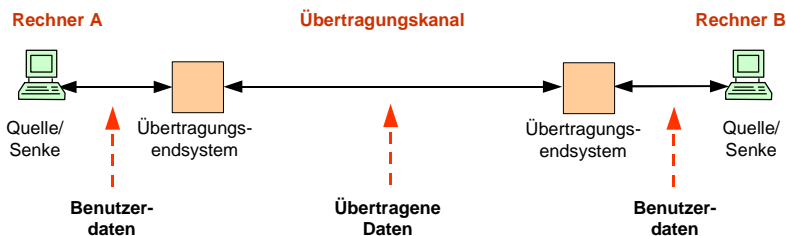


Bild: Kommunikationsmodell

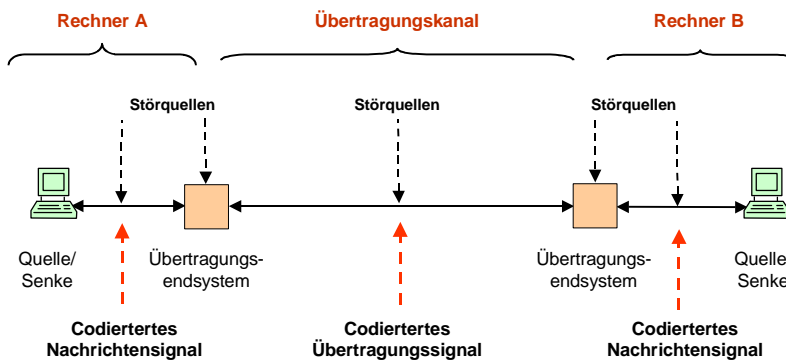


Bild: Übertragungstechnisches Modell

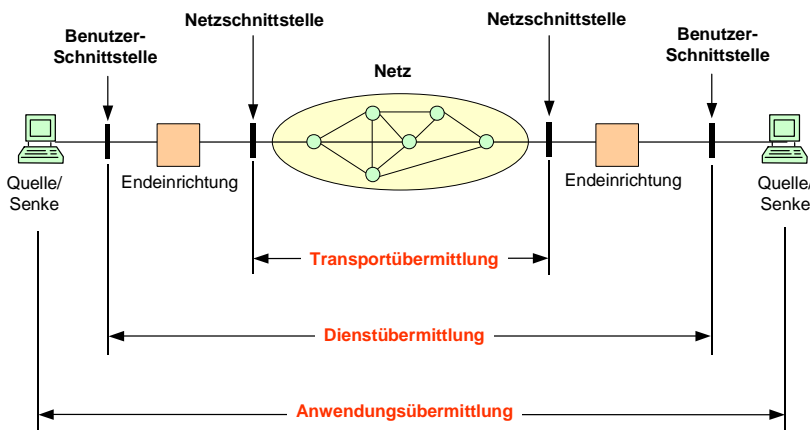


Bild: Netztechnisches Modell

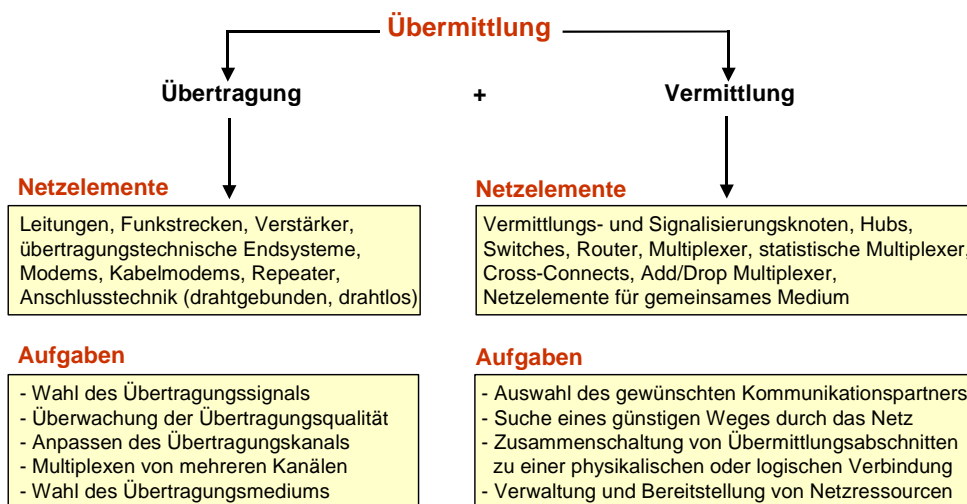
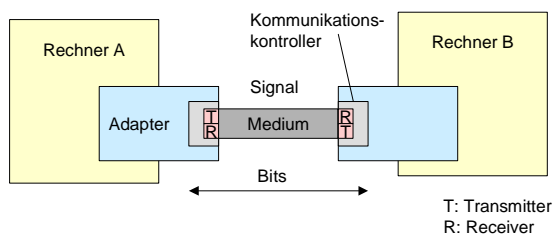


Bild: Übertragung und Vermittlung



#### Einfaches Szenario:

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

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

Folgende Probleme sind unter anderem zu lösen

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

Bild: Datenkommunikation

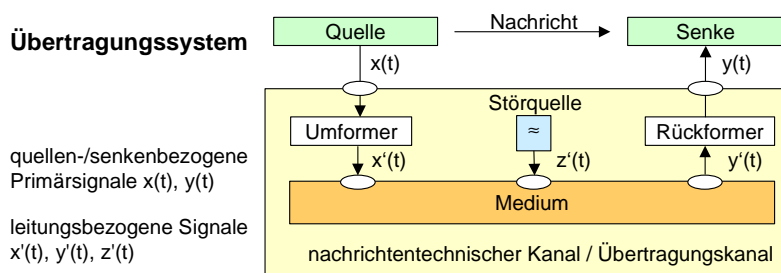
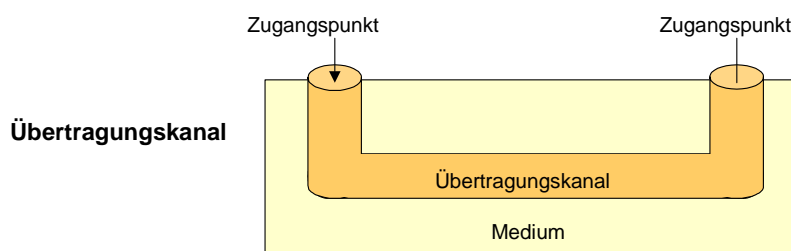


Bild: Übertragungskanal / Übertragungssystem

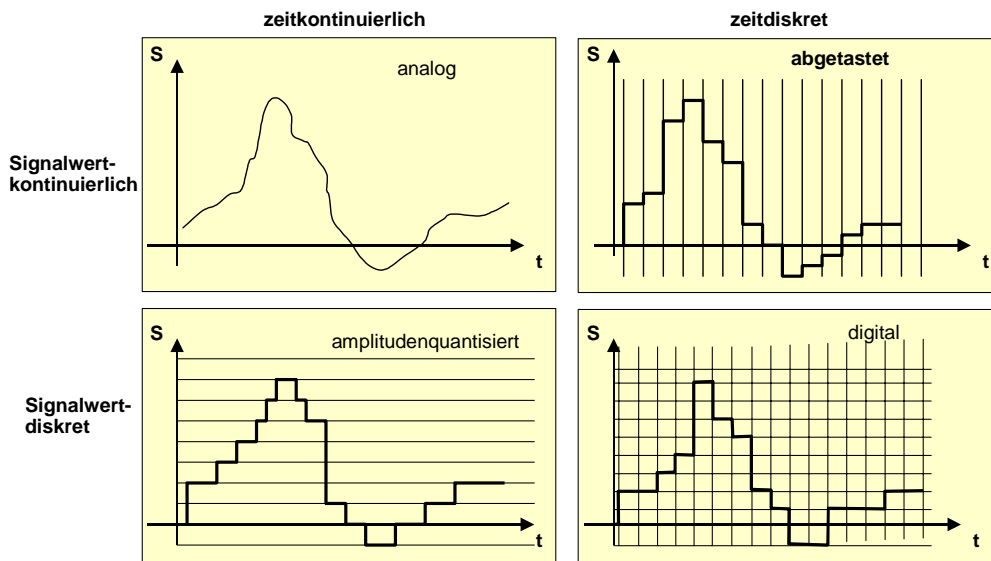
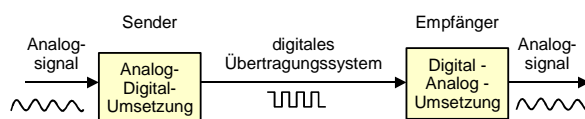


Bild:

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

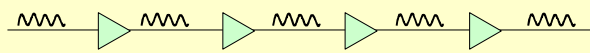
Bild: Zeitabhängige Signale



- Übertragung analoger Signale über digitale Übertragungssysteme:**
  - Umwandlung
    - wertkontinuierlich → wertdiskret (Quantisierung)
    - zeitkontinuierlich → zeitdiskret (Abtastung)
- Ziel:** Rekonstruierbarkeit des originalen Signals beim Empfänger

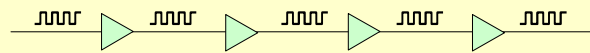
Bild: Digitalisierung analoger Signale

### Übertragung von analogen Signalen



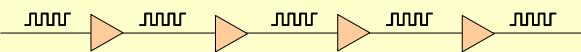
- Regeneratoren verstärken Nutz- und Rauschsignal
- Dadurch wird das analoge Nutzsignal immer schlechter
- **Beim Empfänger: schlechtere Qualität als das gesendete Nutzsignal**

### Übertragung von digitalen Signalen (elektronische Verstärker)



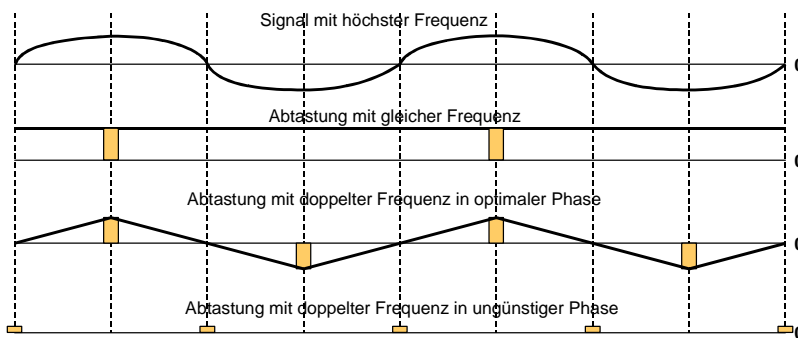
- Regeneratoren können das digitale Nutzsignal vollständig rekonstruieren
- 3R-Regeneration: Amplitude, Impulsform, zeitliche Lage
- **Beim Empfänger: gleiche Qualität wie das gesendete Nutzsignal**

### Übertragung von digitalen Signalen (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**

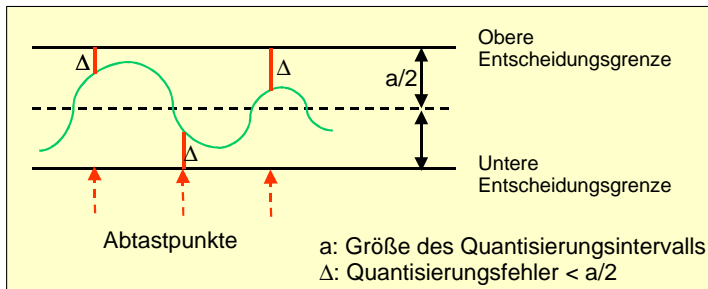
Bild: Vorteile digitaler Übertragungssysteme



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 ( $f_S$ ):  **$f_A > 2f_S$**

Bild: Abtasttheorem nach Shannon



- 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)

Bild: Quantisierung und Codierung

Schon 1924 hat H. Nyquist die Existenz einer fundamentalen Grenze der Datenrate eines Kanals erkannt und eine Gleichung abgeleitet, die die maximale Datenrate für einen rauschfreien Kanal mit eingeschränkter Bandbreite angibt. 1948 führte Claude Shannon die Arbeit von Nyquist fort und entwickelte eine Gleichung für einen Kanal aus mit zufälligem (thermodynamischem) Rauschen (Shannon, 1948).

- maximale Datenrate  $D$  für einen rauschfreien Kanal mit eingeschränkter Bandbreite

$$D = 2 \cdot B \cdot \log_2(N) \text{ bit/s}$$

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

- Beispiel:

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

Bild: Nyquist-Theorem

Nyquist bewies, wenn ein beliebiges Signal durch einen Tiefpassfilter der Bandbreite  $B$  geführt wird, das gefilterte Signal vollständig durch  $2B$  Abtastwerte pro Sekunde wiederhergestellt werden kann. Mehr als  $2B$  Abtastwerte pro Sekunde sind überflüssig, da Anteile mit höherer Frequenz, die durch eine höhere Abtastrate entdeckt werden konnten, bereits ausgefiltert wurden. Besteht ein Signal aus  $N$  diskreten Stufen, lautet das Nyquist-Theorem wie im Bild angegeben.

Ein rauschfreier 3-kHz-Kanal kann beispielsweise binäre (d.h. zweistufige) Signale mit einer maximalen Rate von 6 kbit/s übertragen.

- 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  $\sim$  Quadrat der Amplitude)

- Beispiel

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

Bild: Kanalkapazität nach Shannon

Bis jetzt wurde ein rauschfreier Kanal betrachtet. Ist zufälliges Rauschen vorhanden, verschlechtert sich die Situation sehr schnell. Der Umfang des vorhandenen thermischen Rauschens wird durch das Verhältnis vom Signal  $S$  zum Rauschsignal  $N$  - den Rauschabstand  $S/N$  - bestimmt.

Normalerweise wird nicht dieses Verhältnis angegeben, sondern der Wert  $10 \log_{10} S/N$ . Diese Einheiten werden Dezibel (dB) genannt. Ein Verhältnis  $S/N$  von 10 ist 10 dB, ein Wert von 100 ergibt 20 dB, ein Wert von 1.000 ergibt 30 dB usw.

Die Hersteller von Stereoverstärkern geben die Bandbreite (den Frequenzbereich), über den sich ihr Produkt linear verhält, durch die jeweilige Frequenz von 3 dB an. An diesen Punkten wird die Verstärkung ungefähr halbiert. Shannons wichtigste Erkenntnis ist die, dass die maximale Datenrate eines rauschenden Kanals mit einer Bandbreite von  $B$  Hz und einem Rauschabstand von  $S/N$  wie im Bild angegeben.

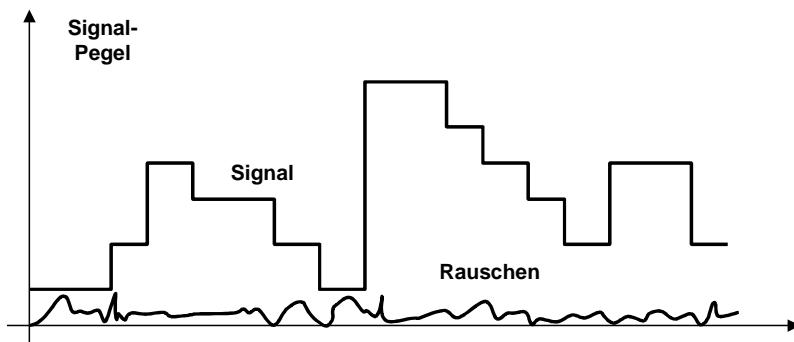


Bild: Kanalkapazität (Shannon)

So kann z.B. ein Kanal mit 3 kHz Bandbreite und einem Rauschabstand von 30 dB (typische Parameter des Telefonsystems) nie mehr als 30 kbit/s übertragen, gleichgültig, wie viele oder wenn die Signalstufen benutzt werden und wie oft oder selten Abtastwerte abgenommen werden. Shannons Ergebnis wurde mit Argumenten der Informationstheorie abgeleitet und ist auf jeden Kanal, der dem Gaußschen (thermischen) Rauschen unterliegt, anwendbar.

#### 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, ...)

Bild: Übertragungsstörungenursachen durch Rauschen

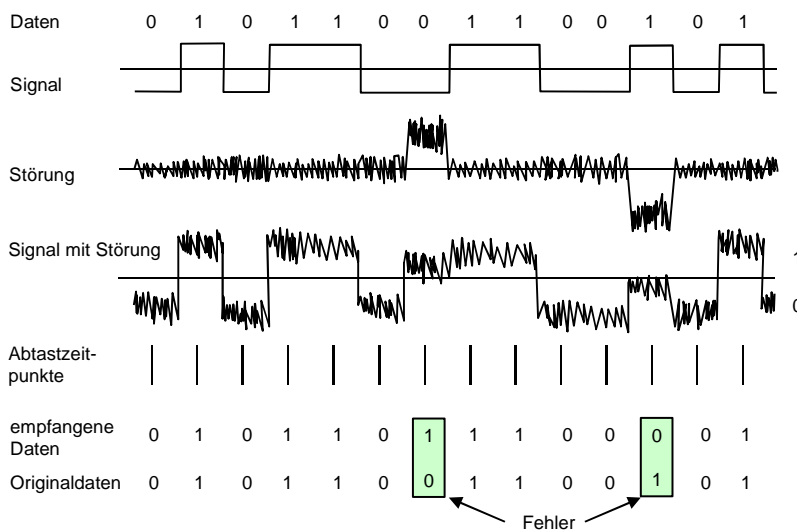
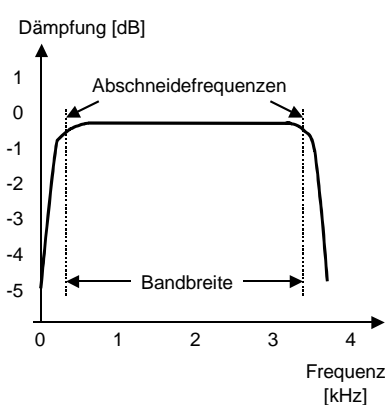


Bild: Übertragungsstörung durch Rauschen



### Endliches Frequenzband zur Übertragung

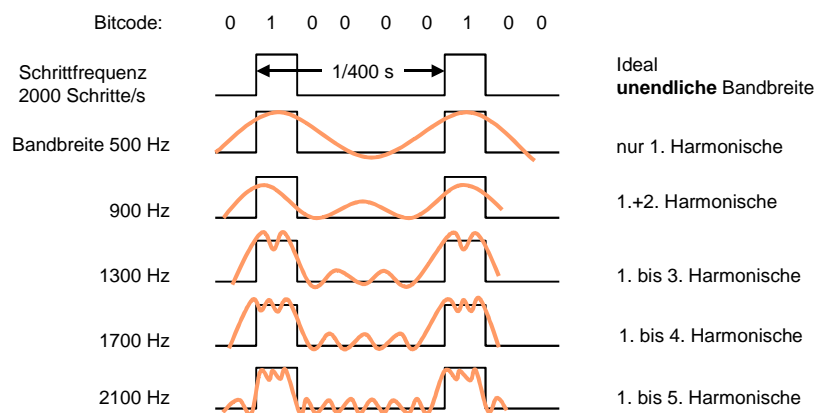
**Bandbreite in Hz:** Frequenzbereich, der über ein Medium (einschließlich der im Übertragungssystem enthaltenen Filter, Verstärker usw.) übertragen werden kann

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

Bild: Bandbegrenztes Medium



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

Bild: Bandbreite und digitales Signal

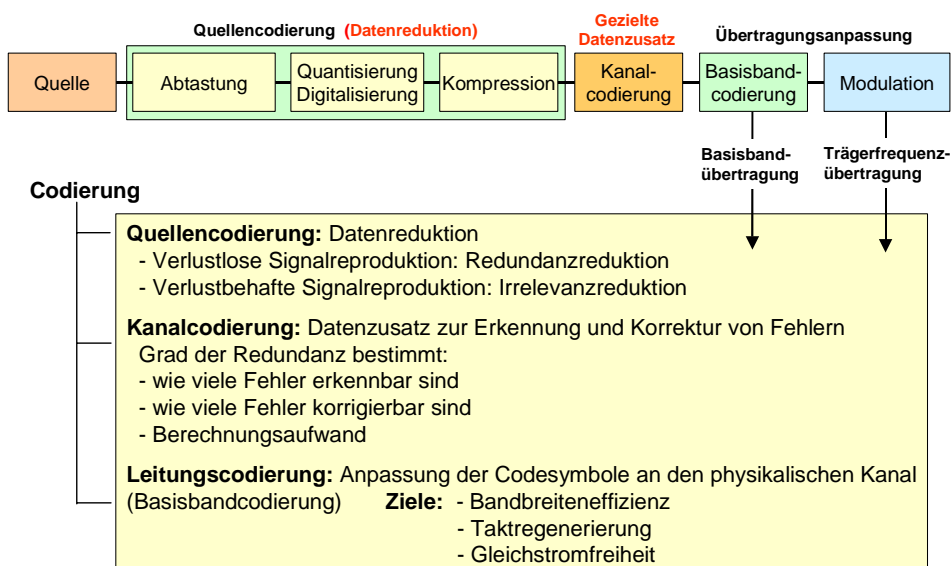


Bild: Codierung

## Codierung und Modulation

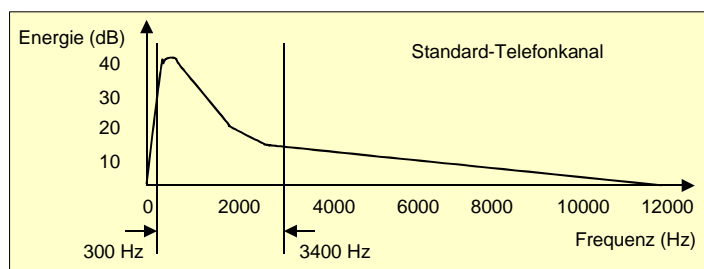
Eine Codierung kann unter anderem folgende **Ziele** verfolgen:

- Darstellung alphanumerischer **Zeichen** in einer standardisierten Form. Beispielsweise wird das lateinische Alphabet häufig durch den ASCII-Code dargestellt.
- Codierung von **Zahlen**, Zahlenwerte können prozessorintern unterschiedlich dargestellt sein. Für ihre Übertragung in Netzen sind ebenfalls standardisierte Codes erforderlich.
- Codierung von **Symbolen** (beliebige Zeichen, einzelne Bits oder Bitketten) zur Übertragung über einen physikalischen Kanal.
- Codierung von **Signalen** der realen Welt (z.B. Sprache, Bilder) so, dass zur Übertragung eine möglichst geringe Bandbreite benötigt wird.

Reale Signale (z.B. Sprache: Schallwellen, Bilder: zweidimensionale Verteilung der Lichtintensität) werden in der Regel zuerst in eine analoge elektrische Darstellung gebracht. Die Spannungsverläufe sind also kontinuierlich. Für die Verarbeitung und Übertragung werden jedoch meistens und noch zunehmend digitale (wertediskrete) Darstellungen bevorzugt. Zur Umwandlung zwischen den Signaldarstellungen existieren verschiedene Verfahren.

Im Hinblick auf die Signalübertragung unterscheidet man die folgenden Codierungsarten: Leitungscodierung, Kanalcodierung und Quellencodierung.

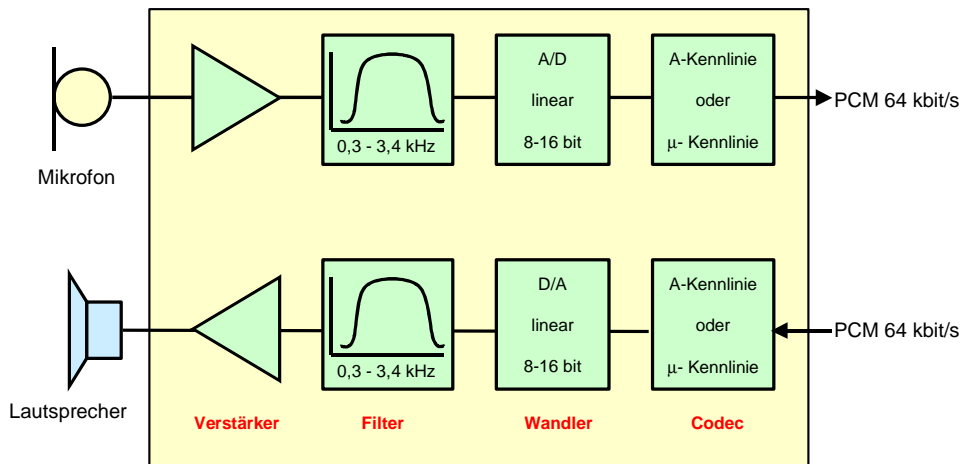
Die Codierungsarten erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Die gestellten Anforderungen unterscheiden sich ebenfalls. Wenn alle Codierungsarten eingesetzt werden (beispielsweise bei der Sprach- oder Bildübertragung über Paketnetze) ist beim Sender die Folge Quellen-, Kanal- und Leitungscodierung zu durchlaufen. Beim Empfänger ist die Reihenfolge umgekehrt.



- 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 Fernsprechkanal:  $8 \text{ kHz} \cdot 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$

Bild: Pulse Code Modulation (PCM)





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

Codec: Codierer / Decodierer  
PCM : Pulse Code Modulation

Bild: Codierung und Decodierung von Sprache

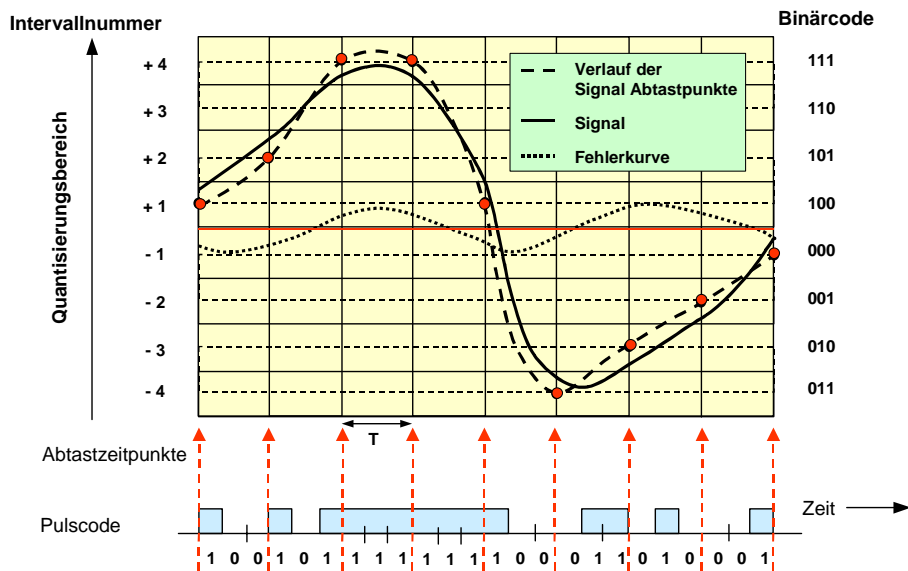


Bild: Prinzip der Pulscode modulation (PCM)

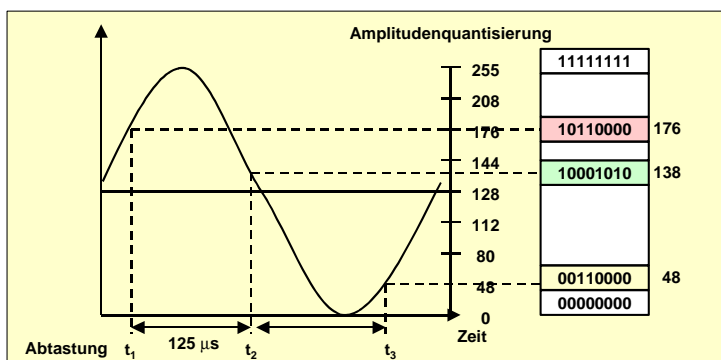


Bild: Logarithmische Quantisierung

**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

The diagram illustrates the quantization of a continuous signal. The signal is sampled at intervals of 32, 64, 96, and 128. The quantization process is shown on the right, where the signal is approximated by a staircase function. The quantization levels are marked on the y-axis, and the corresponding digital values (Zeichenwert) are marked on the x-axis.

Zeichenwert	Quantization Level (Approx.)
32	0.5
64	1.5
96	2.5
128	3.5

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

für  $1/A \leq |x| \leq 1$

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

für  $0 \leq |x| \leq 1/A$

16 Stufen

Bild: Positiver Ast der A-Kennlinie

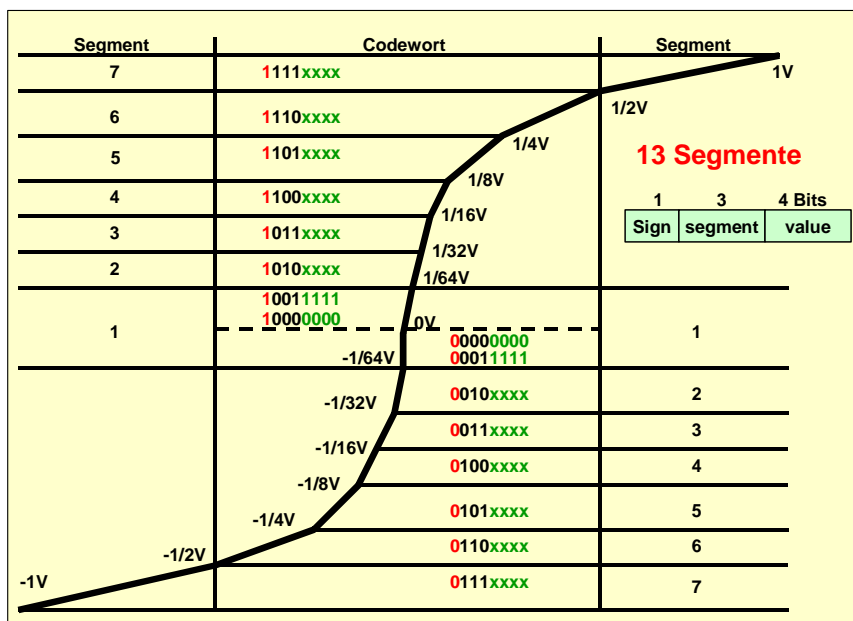


Bild: A- Kennlinie (A-Law) - Europa

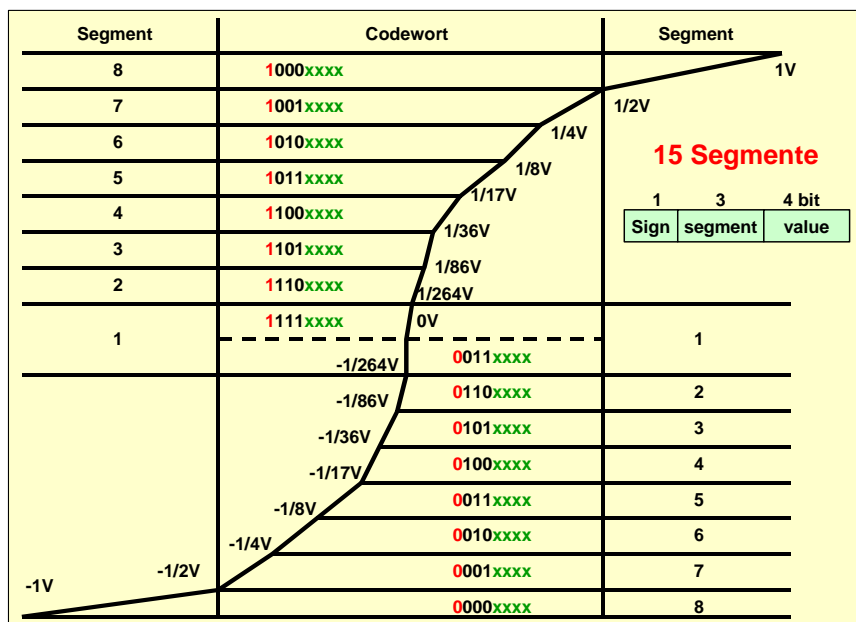


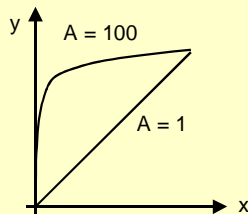
Bild: μ-Kennlinie (μ-Law) - USA, Japan

### 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)

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

$$\mu = 255$$

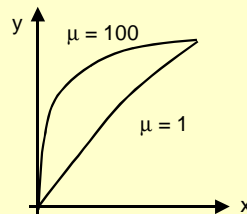


Bild: A-Kennlinie und μ-Kennlinie

#### Schritt

- Charakteristisch für zeitdiskrete Signale ist die Existenz eines minimalen Zeitintervalls  $T_{\min}$  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

Bild: Digitale Signalübertragung

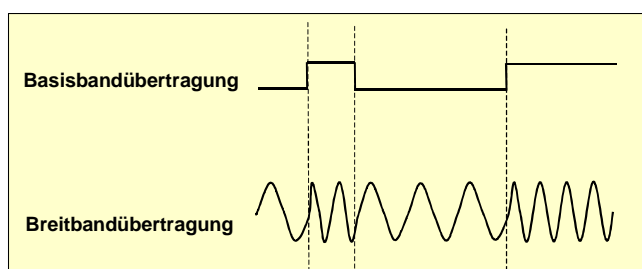


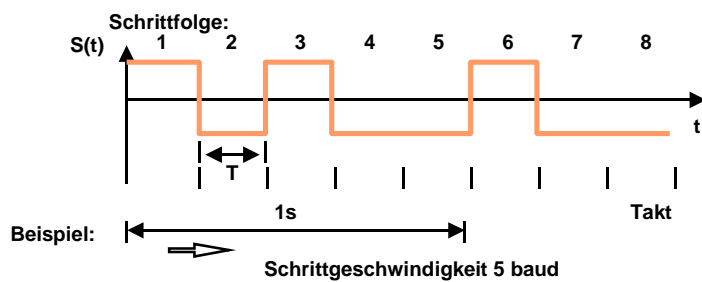
Bild: Digitale Signale zur Datenübertragung

#### ■ Basisbandübertragung

- direkte Übertragung des rechteckförmigen Quellsignal (z.B. Strom / kein Strom)
- Eigenschaften der Codes
  - Bittakrückgewinnung
  - Vermeiden von Gleichstromanteilen
  - Codierung mehrerer Zeichen
  - Resynchronisation durch Rahmenbildung

#### ■ Breitbandübertragung

- Modulation



#### 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

Bild: Übertragungs- vs. Schrittgeschwindigkeit

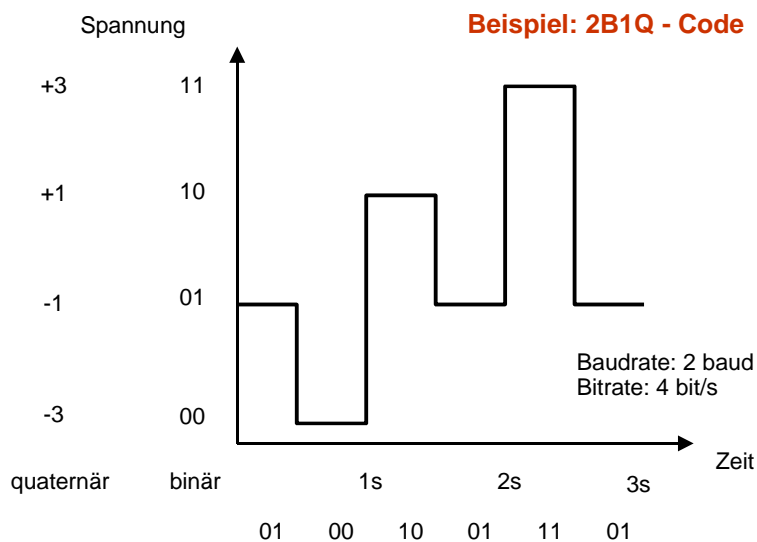


Bild: Beispiel einer Baudrate (Symbolrate)

### 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)

Bild: Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

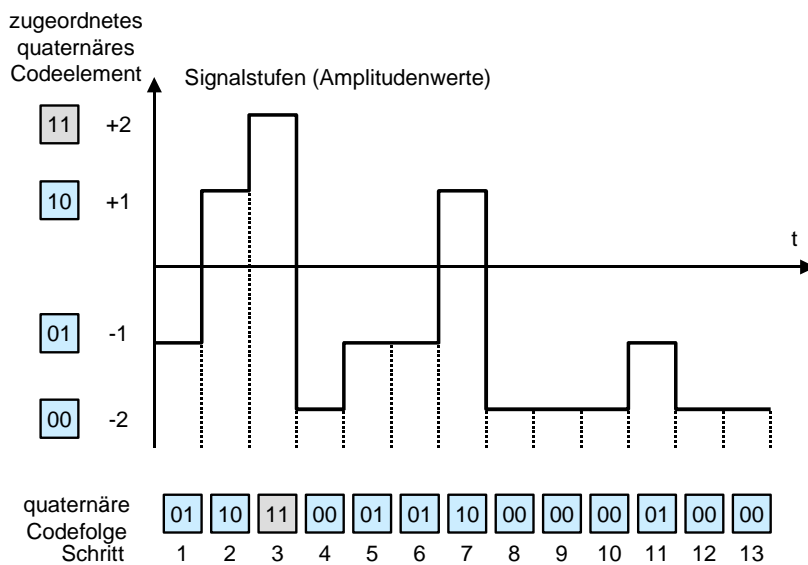


Bild: Mehrwertiges Digitalsignal

## 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

### ■ Übertragungsreichweite

- 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

Bild: Leitungscodierung digitaler Signale

### ■ 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

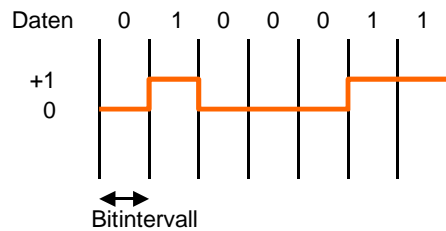
### ■ Blockcodes

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)

Bild: Unterteilung der Leitungscodes



#### Binärer Code

##### Kennzeichen

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

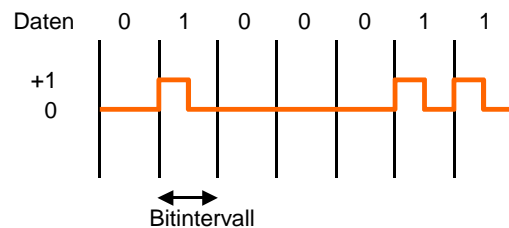
##### Non-Return to Zero

- "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

Bild: NRZ: Non-Return to Zero



#### Binärer Code

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

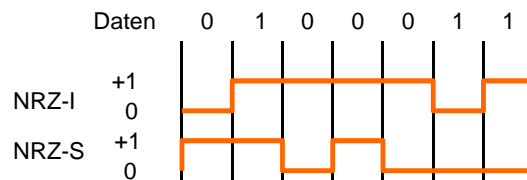
- Zwei Klassen solcher Codes, um Bitfolgen zu codieren
  - RZ (Return to Zero)
  - NRZ (Non-Return to Zero)

##### 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

Bild: RZ: Return-to-Zero





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"

Bild: Differentielle Codierung

#### 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

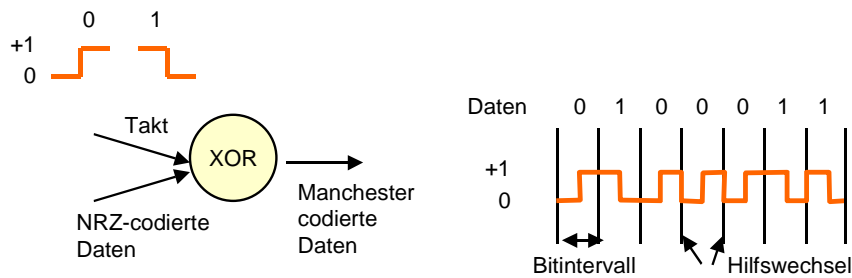
0 = Signalübergang zu Intervallanfang

#### Return to Zero (RZ)

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

0 = kein Signalübergang

Bild: Zusammenfassung der NRZ und RZ Codes



### 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

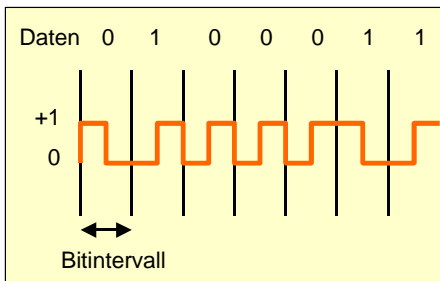
- Leichte Taktrückgewinnung, da stets mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall
- Keine Gleichstromkomponente
- Fehlererkennung auf Signalebene: Fehlen eines erwarteten Übergangs erkennbar (Verwendung: Ethernet)

### Nachteile

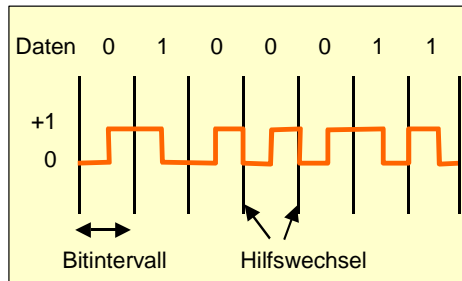
- Verdoppelt die Rate von Signalwechseln auf der Leitung (Baudrate steigt)
- im schlimmsten Fall ist Bitrate = 50% Baudrate, (d.h. Baudrate größer als Bitrate)
- Baudrate kann auch kleiner als Bitrate sein
- Übertragung von vier unterschiedlichen Signalen

Bild: Manchester Code

### Differentielle Manchester Code



### Manchester Code

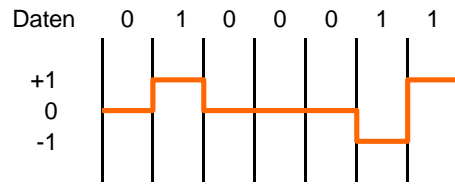


### Biphase Code

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

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

Bild: Differentieller Manchester Code



## 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

Bild: AMI-Code (Alternate Mark Inversion)

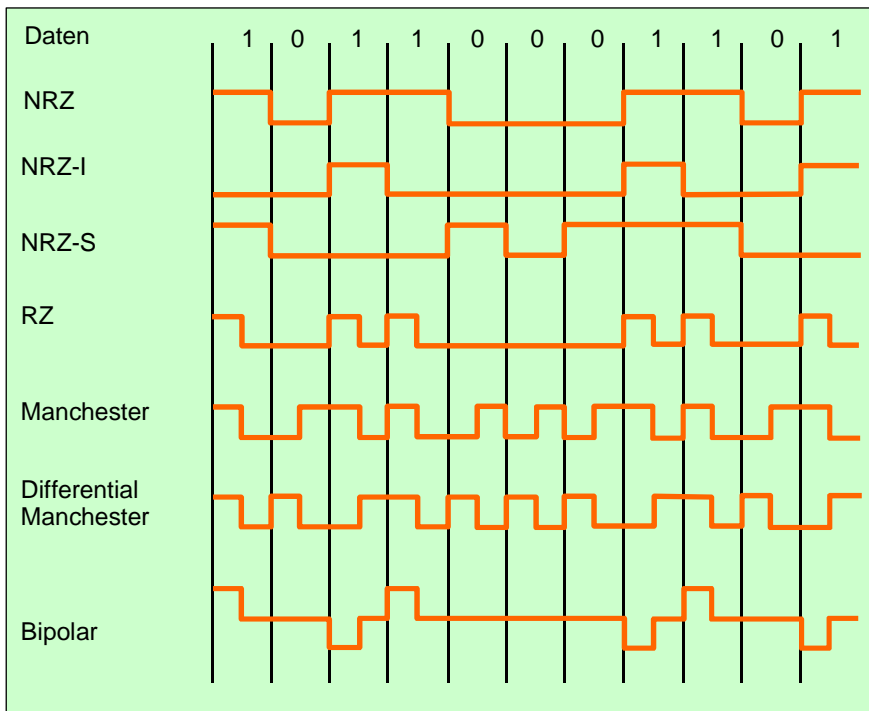


Bild: Leitungscodes

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

Bild: Blockcode: 4B/5B-Code

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

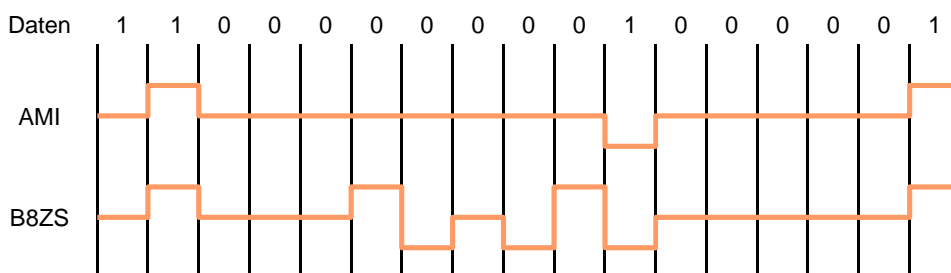
#### Zielsetzung

- 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)

Bild: Verwürfelung (Scrambling)



Basiert auf AMI

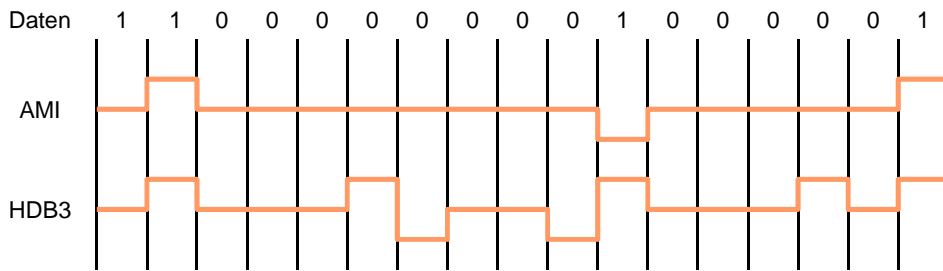
- Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

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 Coderegelerletzungen innerhalb eines Wortes

Bild: B8ZS: Bipolar with 8-Zeros Substitution



Basiert auf AMI

■ Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

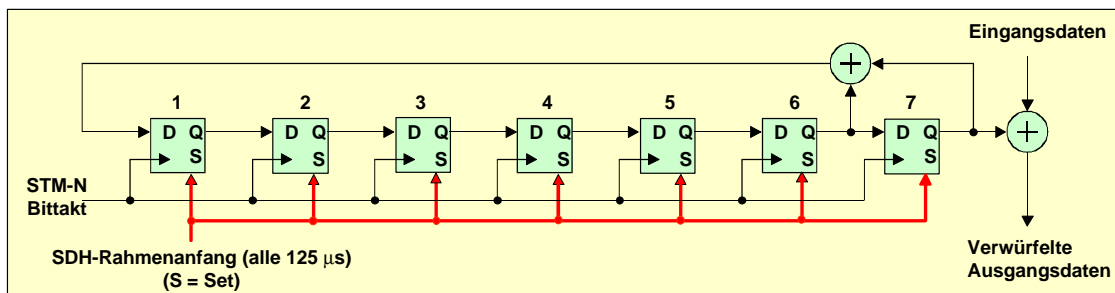
■ Auftreten von 4 Nullen in Folge

Ersetzungen

Anzahl von Pulsen  
seit letzter Ersetzung

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

Bild: HDB3: High-Density Bipolar with 3 Zeros



- 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



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

Bild: Synchroner SDH-Verwürfler (Scrambler)

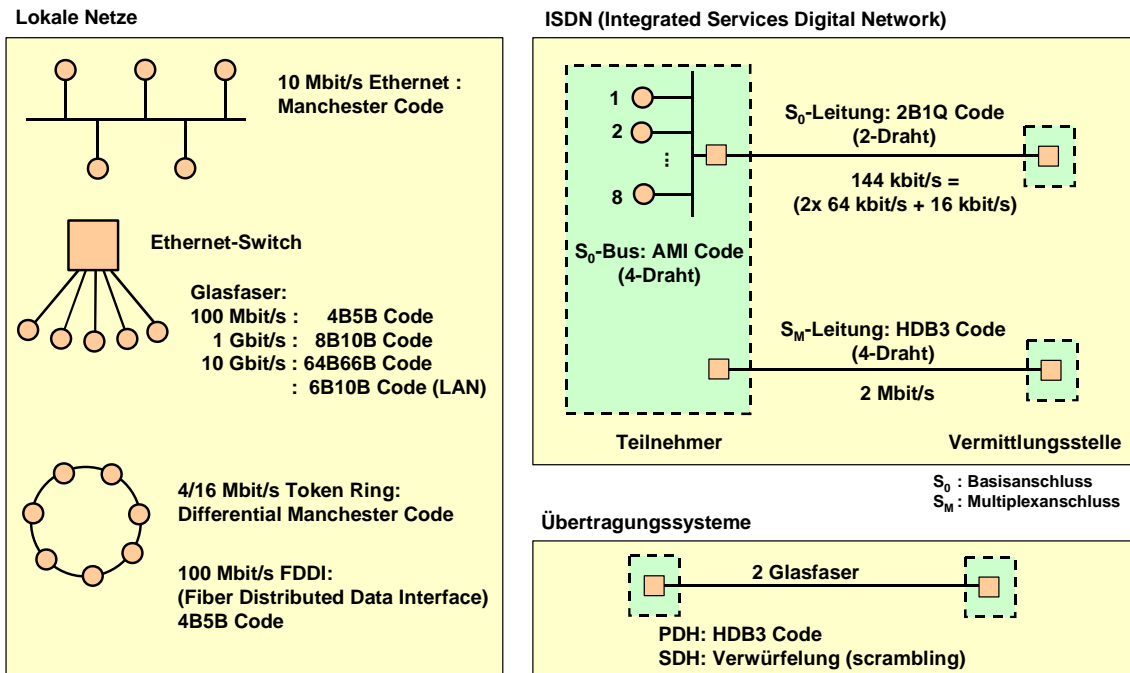


Bild: Verwendung der Leitungscode

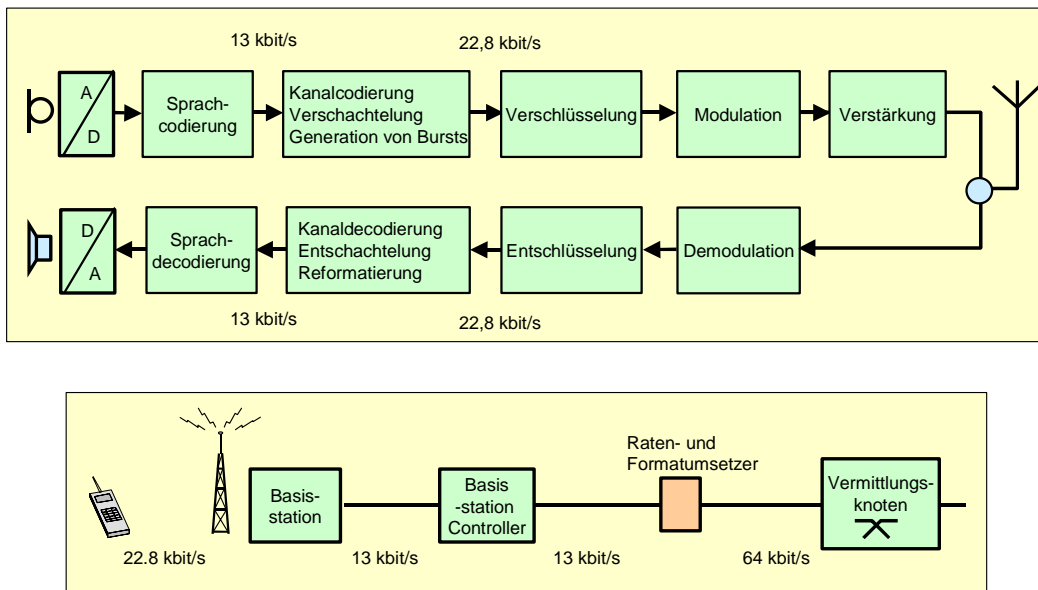


Bild: GSM-Codierung im Mobilgerät

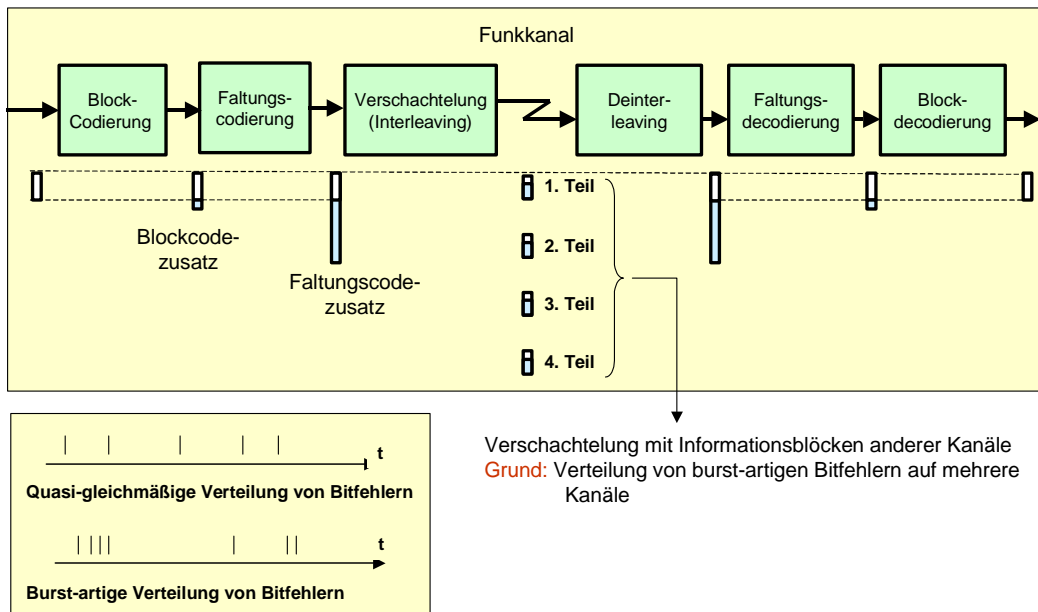


Bild: Codierungsstufen über GSM-Funkkanal

## Faltungscodes

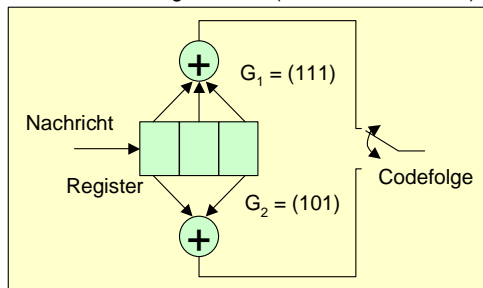
### Baum- und Netzdiagramm

Faltungscodes (convolutional codes) erzeugen aus den Informationsbits die Codebits nicht blockweise, sondern gleitend, wie bei einer Faltungsoperation (convolution), so z. B. für ein neues Informationsbit zwei neue Codebits. Statt der Blocklänge ist hier das Codegedächtnis  $M$  bzw. die Einflusslänge maßgebend. Letztere gibt an, von wievielen Informationsbits ein Codebit beeinflusst wird. Werden pro Takt aus  $K$  Informationsbits  $N > K$  Codebits erzeugt, so spricht man von der

Coderate  $R = \frac{K}{N}$

Die Anzahl  $K$  ist üblicherweise klein (1,...,7) und Coderaten von 1/3 bis 7/8 sind typisch. Die Codebits werden i. allg. von  $(M + 1) K$  Informationsbits erzeugt.

### 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

Bild: Faltungscodierung

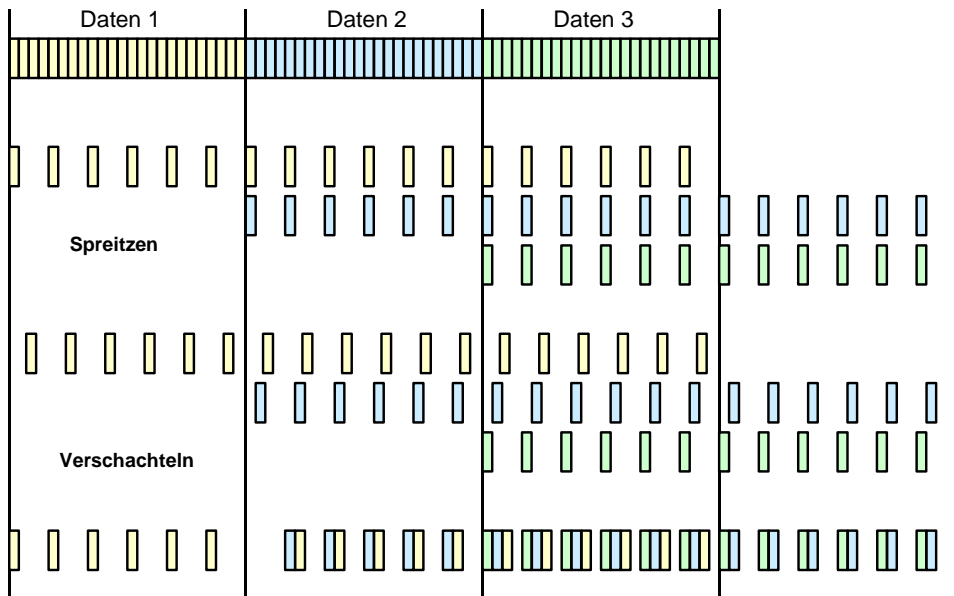
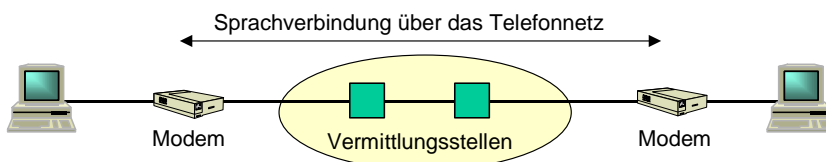


Bild: Verschachtelung (Interleaving)



Der Begriff Modem ist ein Kunstwort aus Modulation und Demodulation. Diese zwei Begriffe repräsentieren die wichtigsten. Ein Modem sorgt dafür, dass die von einem Rechner (häufig von einem PC) ankommenden digitalen Datensignale für die Übertragung über eine analoge Leitung oder über ein analoges Fernsprechnetz in analoge Datensignale umgewandelt werden. Dieser Vorgang wird als Modulation bezeichnet. Sie beruht auf den Veränderungen eines Trägersignals durch das digitale Datensignal und wird an der Sendeseite im Modulator durchgeführt. Umgekehrt erfolgt am Ziel die Umwandlung der analogen Datensignale in digitale Datensignale. Dies nennt man Demodulation, und sie wird im Demodulator realisiert.

- **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

Bild: Analoge Übertragung digitaler Daten

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

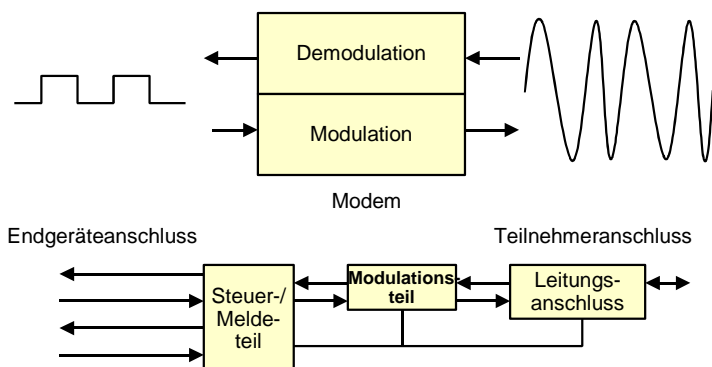


Bild: Modem (Modulator - Demodulator)

In jedem Modem sind zwei Gruppen von Komponenten zu unterscheiden, die folgende Teile bilden:

- **Sendeteil:** Hierzu gehören folgende Funktionsmodule: Scrambler, Codierer, Modulator und Ausgangsfilter.
- **Empfangsteil:** Zu diesem Teil gehören: Eingangsfilter, Entzerrer, Demodulator, Decodierer und Descrambler.

Zusätzlich muss ein Taktgeber vorhanden sein, der die erforderlichen Taktsignale erzeugt. Als Schnittstelle DTE/DCE wird in diesem Fall oft die Schnittstelle V.24 eingesetzt.



Ein Scrambler und Descrambler dienen der Taktrückgewinnung. Es ist wichtig, dass der im Empfänger erzeugte Takt dem Sendetakt genau entspricht. Die Taktrückgewinnung wird durch eine quasi zufällige Bitfolge wesentlich erleichtert. Deshalb setzt man im Sendeteil einen Scrambler (Verwürfler) ein. Er erzeugt aus der zu sendenden Bitfolge nach einer Operation A eine Pseudozufallsfolge. Dabei muss auf der Empfangsseite durch einen kompatiblen Descrambler (Entwürfler) nach einer Umkehroperation A' die ursprüngliche Bitfolge wiederhergestellt werden. Die Scrambler-Operation A wird in Modem-Standards festgelegt. Ein Scrambler und Descrambler besteht aus einem mehrstufigen Schieberegister mit entsprechenden Rückkopplungen. Der Scrambler verwürfelt die einzelnen Bits in der zu sendenden Folge, so dass lange Sequenzen von Nullen oder Einsen unterdrückt werden. Dadurch kann der Empfänger sicherer den Takt aus dem Empfangssignal ableiten.

Eine Steigerung der Übertragungsrate bei gleichzeitiger Verbesserung der Übertragungsqualität ist in den high-speed (HS) Modems durch die zusätzliche Umcodierung nach dem Verwürfeln im Scrambler der zu sendenden Daten realisiert. Insbesondere in Modems nach den ITU-T-Standards V32, V32bis und V34 wird die sogenannte Trellis-Codierung eingesetzt. Diese Codierung ist durch die zugefügte Redundanz gekennzeichnet, die eine Fehlererkennung und -korrektur ermöglicht.

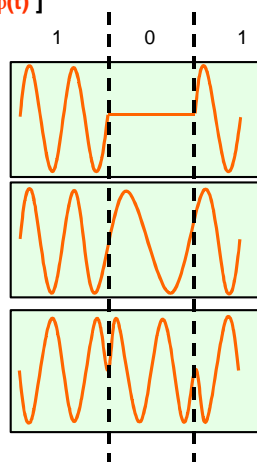
Die umcodierte Bitfolge wird weiter im Modulator in analoge Signale umgewandelt. Im Ausgangsfilter werden die irrelevanten Frequenzanteile des analogen Datensignals ausgefiltert. Der Ausgangsverstärker übernimmt die Anpassung der Sendeleistung an die Leitungsanforderungen.

Die empfangenen analogen Datensignale werden nach entsprechender Verstärkung dem Entzerrer zugeführt. Mit dem Entzerrer werden die Signalverzerrungen (Signalverletzungen) beseitigt, die während der Übertragung entstanden sind. Eine genaue Entzerrung bieten erst adaptive (selbstanpassende) Entzerrer. Solche Entzerrer werden vor allem in HS-Modems eingesetzt. Die analogen Signale werden nach der Entzerrung im Demodulator in eine digitale Bitfolge umgewandelt. Diese Bitfolge wird im Decodierer in eine binäre Bitfolge umcodiert, aus der im Descrambler die Daten zurückgewonnen werden.

Da es bei Modems verschiedene Bitraten gibt, wurden ITU-T-Standards - sogenannte V-Standards - definiert, damit Modems unterschiedlicher Hersteller miteinander kommunizieren können. Bei der Datenübertragung über Modem müssen beide Seiten den selben Modem-Standard unterstützen.

**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**



### Modulationsprinzipien

Im allgemeinen besteht die Modulation in der Veränderung von Parametern einer analogen Schwingung, die als Datenträgersignal dient, durch die zu sendenden Daten. Als Signalparameter einer Sinusschwingung kommen die Amplitude, die Frequenz und die Phase in Betracht. Die einfachste Form der Modulation beruht auf der Veränderung nur eines Parameters, so dass man von Amplituden-, Frequenz- oder Phasenmodulation spricht.

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

Bild: Modulation

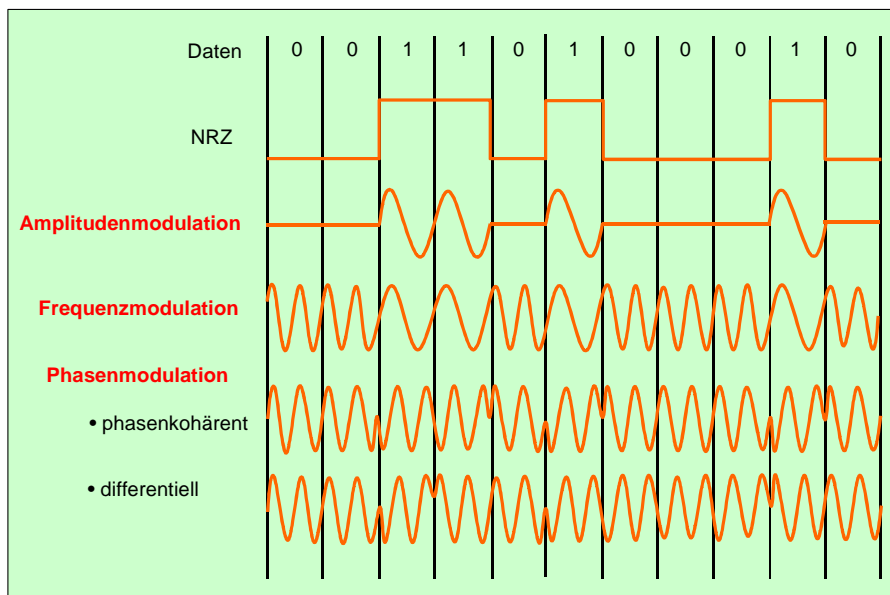
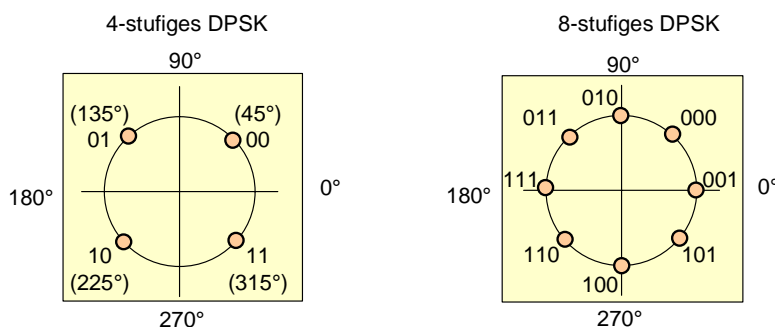


Bild: Modulationsverfahren

Bei der Phasenmodulation (PM) wird die Phase einer Trägerschwingung in Abhängigkeit vom zu übertragenden Bitstrom verändert. Zur Wiedergewinnung von Daten an der Empfangsseite muss ein Phasenvergleich der Phase des empfangenen Datensignals mit einer Bezugsphase durchgeführt werden. Da es aufwendig ist, die Phasendemodulation zu realisieren, verwendet man in der Praxis die Phasendifferenzmodulation, die kurz als DPSK (Differential Phase Shift Keying) bezeichnet wird. Der Vorteil der DPSK liegt in der einfachen Art der Demodulation.



- 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°)

Bild: Phase Shift Keying (PSK)

Bei der Amplitudenmodulation (AM) wird die Amplitude eines analogen Datenträgers (z. B. Sinusschwingung) entsprechend dem Verlauf von Daten verändert. Eine AM mit einem binären Datensignal besteht in der einfachsten Form aus dem Ein- und Ausschalten einer Trägerschwingung. Reine Amplitudenmodulation hat keine Bedeutung in der Praxis. Bei der Frequenzmodulation (FM) werden die zu übertragenden Daten durch die Frequenzänderung der Trägerschwingung dargestellt. Die Schwingung mit der höheren Frequenz entspricht der binären "0". Die Frequenzmodulation ermöglicht nur die Übertragungsgeschwindigkeiten bis 1.2 kbit/s und wird in Modems nach V21 und V23 eingesetzt.

In Modems für die Übertragungsgeschwindigkeiten 1.2, 2.4 und 4.8 kbit/s wird mehrstufige DPSK eingesetzt, so dass der ankommende binäre Datenstrom umcodiert werden muss. Diese Umcodierung besteht bei der 4stufigen DPSK darin, dass jeweils zwei Bits zu einem Dibit zusammengefasst werden. Den einzelnen Dibit Zuständen werden entsprechende Phasensprünge zugeordnet. Bei der 8stufigen DPSK werden jeweils drei Bits zu einem Tribit zusammengefasst und den einzelnen Tribit-Zuständen werden entsprechende Phasensprünge zugeordnet. Im allgemeinen besteht eine mehrstufige Modulation darin, dass die zu übertragenden Bits zu den (Daten-) Symbolen zusammengefasst und den einzelnen Symbolen entsprechende Trägersignale zugeordnet werden. Die Anzahl der Symbole pro Sekunde stellt die Symbolrate (Symbol Rate) dar, die auch als Schrittgeschwindigkeit bezeichnet wird.

Der Hauptvorteil aller mehrstufigen Modulationsarten beruht darauf, dass die Übertragungsrate auf der Leitung als Symbolrate nur ein Teil der Übertragungsgeschwindigkeit ist. Bei der 4stufigen bzw. 8stufigen DPSK geht die Schrittgeschwindigkeit auf die Hälfte bzw. auf ein Drittel der Übertragungsgeschwindigkeit zurück.

Die zu sendenden Symbole (als Gruppen von Bits) bei einer mehrstufigen Modulation können in dem Signalraum in Form eines Signalzustanddiagramms dargestellt werden. Das Signalzustanddiagramm nach ITU-T Empfehlung V.26 (sog. Alternative A) für die 4stufige DPSK. Es ist hier zu bemerken, dass die einzelnen Symbole (Dibits) als Punkte gleichmäßig verteilt

sind. Dadurch sind die Abstände zwischen den benachbarten Punkten möglichst groß und somit lassen sich Fehlentscheidungen vermeiden.

Da alle Punkte auf einem Kreis liegen, haben die zu sendenden Trägersignale für alle Symbole die gleiche Amplitude. Der Modulationsvorgang bei der 4stufigen DPSK läuft wie folgt ab:

- Wird 00 gesendet, so erfolgt der Phasensprung um  $45^\circ$ .
- Wird 01 gesendet, so erfolgt der Phasensprung um  $135^\circ$  usw. Jeder Phasensprung bezieht sich auf die vorherige Phasenlage. Eine absolute Bezugsphase ist nicht erforderlich.

Das Signalzustandsdiagramm nach ITU-T-Empfehlung V.27 für die 8stufige DPSK ist ebenfalls gezeigt. Aus diesem Diagramm kann die Zuordnung der Phasensprünge von Trägersignalen für die einzelnen Symbole (Tribits) abgelesen werden.

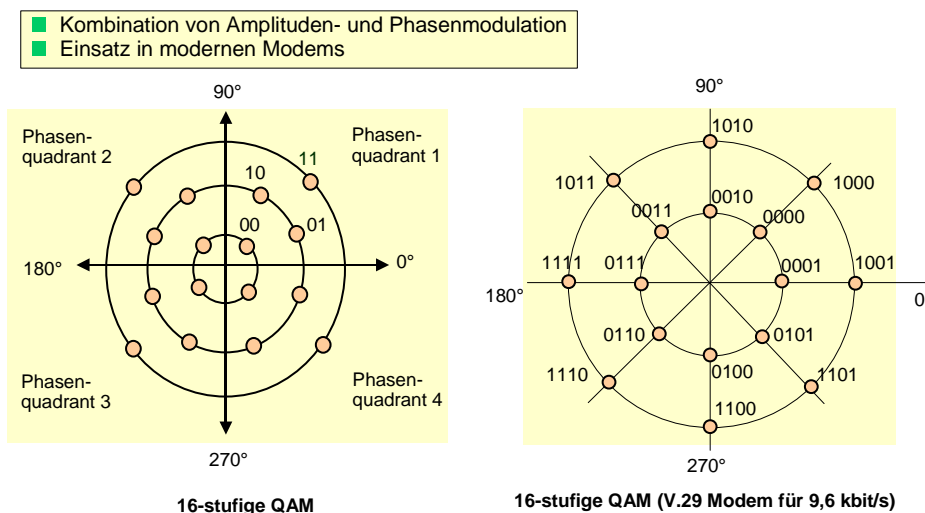


Bild: Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)

Bei der QAM werden mehrere Amplitudenstufen der Trägersignale für die zu übertragenden Symbole verwendet. Bei der QAM nach V29 in den Modems mit der Bitrate 9.6 kbit/s werden jeweils vier Bits zu einem Symbol (Punkt) zusammengefasst. Das Bild zeigt die Verteilung dieser Symbole im Signalzustandsdiagramm. Ein Signalzustandsdiagramm wird bei der QAM auch als Konstellationsgitter bezeichnet.

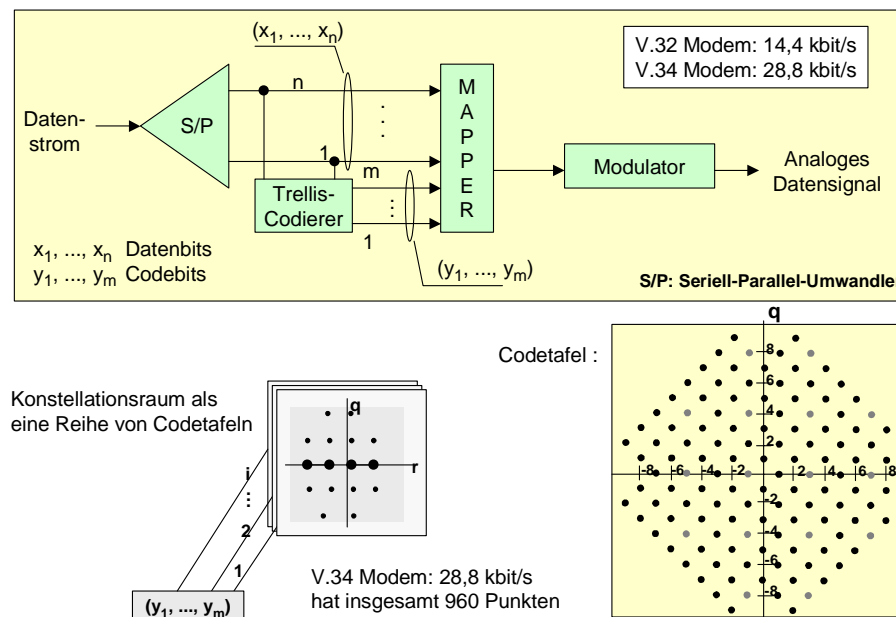


Bild: Hochgeschwindigkeitsmodem

Die QAM wird in Modems verwendet, in denen die Übertragungsgeschwindigkeiten 7.2 und 9.6 kbit/s unterstützt werden. Eine weitere Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Übertragungsqualität ist durch die sogenannte Trellis-Codierung (in Deutsch: Gitter-Codierung) zu erreichen. Diese Codierung wird in Modems mit der QAM eingesetzt. Dadurch lassen sich die Übertragungsgeschwindigkeiten 14.4 und 28.8 kbit/s erreichen. Die Modems mit diesen Übertragungsgeschwindigkeiten werden auch als High Speed Modems (kurz HS-Modems) bezeichnet.

In HS-Modems wird die QAM mit der Trellis-Codierung verwendet. Auf diese Codierung beziehen sich die Modem-Standards V.32, V.32bis und V.34.

Die zu sendenden Bits werden nach der Seriell/Parallel-Wandlung zu den Bitgruppen  $(x_1, \dots, x_n)$  zusammengefasst und an einen Mapper weitergeleitet. Die Bitgruppen werden als Symbole (Punkte) im Konstellationsgitter dargestellt. Der Mapper

hat die Aufgabe, das zu sendende Symbol einem Punkt im Konstellationsgitter optimal zuzuordnen. Die Konstellation besteht z. B. beim Modems nach V.34 aus einem Gitter mit insgesamt 960 Punkten. Eine so große Anzahl von Punkten wird auf eine Reihe von Tafeln verteilt. Die einzelnen Tafeln werden durch die Codewörter am Ausgang des Trellis-Codierers ausgewählt.

Die Verteilung der zu sendenden Symbole auf mehrere Tafeln ermöglicht die Vergrößerung der Abstände zwischen den benachbarten Symbolen auf den einzelnen Tafeln. Dies führt zu Vermeidung der Fehlentscheidungen an der Empfangsseite. Dieses Prinzip hat nur dann Vorteile, wenn die Nummer der Tafel (d. h. Codewort am Ausgang des Trellis-Codierers) fehlerfrei ist. Dies bedeutet, dass die Tafelnummern besonders zuverlässig übertragen werden müssen.

Im Trellis-Codierer wird sendeseitig eine Redundanz zugefügt, die eine Fehlererkennung und -korrektur ermöglicht. Diese Redundanz ist von den zuvor verarbeiteten Signalen (d. h. von der Vorgeschichte) abhängig. Die Vorgeschichte wird an der Empfangsseite ebenfalls berücksichtigt. Hierfür wird ein sogenannter Viterbi-Decoder verwendet, in dem mit Hilfe des Viterbi-Algorithmus die Vorgeschichte ermittelt wird. Der Decodierungsvorgang beruht darauf, dass alle möglichen Signalabläufe zurückverfolgt werden und der wahrscheinlichste Signalverlauf als der richtige ausgewählt wird. Mit diesem Verfahren lassen sich einzelne Bitfehler mit großer Wahrscheinlichkeit korrigieren. Bei den Gruppenbitfehlern funktioniert dieses Verfahren nicht immer sicher.

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

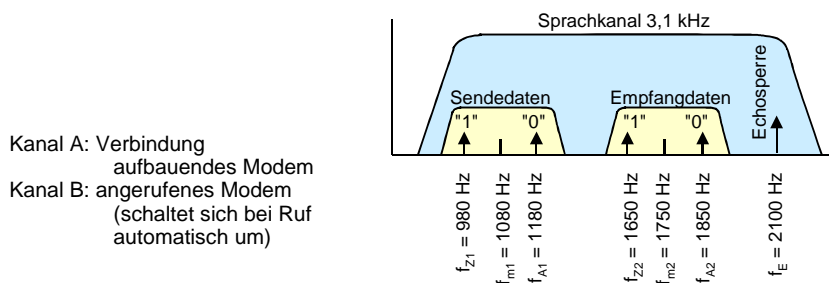


Bild: Beispiel: V.21-Modemtechnik

- Aufteilen des Frequenzspektrums in 4 kHz-Subkanäle
- Modulation der Bits mit QAM in jedem der Subkanäle
- Anzahl der Bits pro Kanal hängt vom Frequenzbereich ab

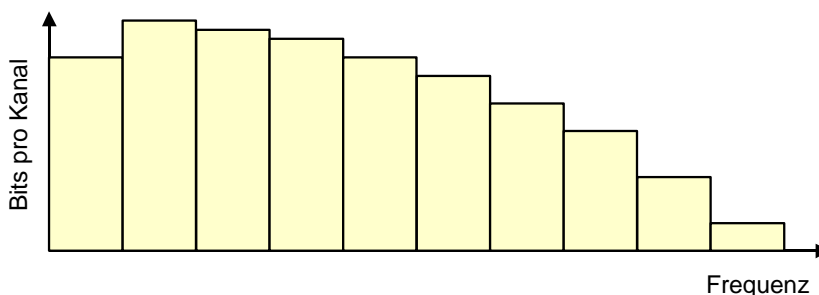


Bild: Discrete Multi-Tone Modulation (DMT)