



## Motivierende Fragen

- Welche Arten von Signalen gibt es?
- Wie werden Signale übertragen?
- Welche Übertragungsmedien existieren?
- Was versteht man unter Pulse-Code-Modulations-Technik (PCM)?
- Welche Signalkonversionen gibt es?



## Übersicht

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Einführung und Motivation           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung, Beispiele</li> </ul> </li> <li>2. Begriffswelt und Standards           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dienst, Protokoll, Standardisierung</li> </ul> </li> <li>3. Direktverbindungsnetze           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fehlererkennung, Protokolle</li> <li>▪ Ethernet</li> </ul> </li> <li>4. Vermittlung           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vermittlungsprinzipien</li> <li>▪ Wegwahlverfahren</li> </ul> </li> <li>5. Internet-Protokolle           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ IP, ARP, DHCP, ICMP</li> <li>▪ Routing-Protokolle</li> </ul> </li> <li>6. Transportprotokolle           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ UDP, TCP</li> </ul> </li> <li>7. Verkehrssteuerung           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kriterien, Mechanismen</li> <li>▪ Verkehrssteuerung im Internet</li> </ul> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>8. Anwendungsorientierte Protokolle und Mechanismen           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Netzmanagement</li> <li>▪ DNS, SMTP, HTTP</li> </ul> </li> <li>9. Verteilte Systeme           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Middleware</li> <li>▪ RPC, RMI</li> <li>▪ Web Services</li> </ul> </li> <li>10. Netzsicherheit           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kryptographische Mechanismen und Dienste</li> <li>▪ Protokolle mit sicheren Diensten: IPSec etc.</li> <li>▪ Firewalls, Intrusion Detection</li> </ul> </li> <li><b>11. Nachrichtentechnik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Daten, Signal, Medien, Physik</b></li> </ul> </li> <li>12. Bitübertragungsschicht           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Codierung</li> <li>▪ Modems</li> </ul> </li> </ol> |
|--|--|



# Grundlagen: Rechnernetze und Verteilte Systeme

## Kapitel 11: Nachrichtentechnik Daten, Signal, Medien, Physik

Prof. Dr.-Ing. Georg Carle  
 Lehrstuhl für Netzarchitekturen und Netzdienste  
 Technische Universität München  
 carle@net.in.tum.de  
 http://www.net.in.tum.de



## Ziele

- In diesem Kapitel wollen wir vermitteln
  - Signaltypen
  - Übertragungsarten und Übertragungsmedien
  - Übertragungsverfahren
  - Pulse-Code-Modulations-Technik (PCM)



## Kapitelgliederung

- 11.1. Typen von Signalen
  - 11.1.1. Einteilung von Signalen
  - 11.1.2. Beschreibung von Signalen
- 11.2. Übertragungssysteme
- 11.3. Übertragungsmedien
  - 11.3.1. leitungsgebundene Medien (u.a. Koaxialkabel, Glasfaser)
  - 11.3.2. nicht leitungsgebundene Medien (u.a. Richt-Funk, Satelliten-Rundfunk)
- 11.4. Übertragungsverfahren
  - 11.4.1. Digitale Signalübertragung
  - 11.4.2. Basisbandübertragungsverfahren
  - 11.4.3. Mehrfachnutzung von Übertragungswegen
  - 11.4.4. Digitale Übertragung analoger Daten
- 11.5. Pulse-Code-Modulations-Technik (PCM)
- 11.6. Zusammenfassung der Signalkonversionen



## 11.1. Typen von Signalen Im Folgenden...

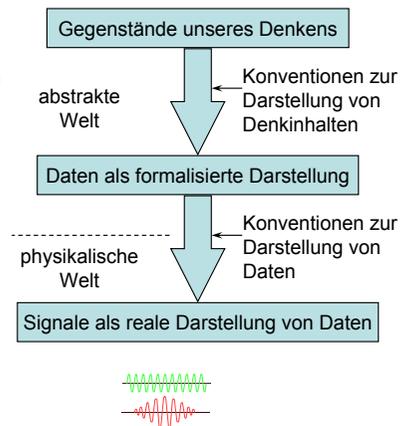
- Einteilung von Signalen
- Beschreibung von Signalen
  - im Zeitbereich
  - im Frequenzbereich
- Übertragung von Signalen
  - Übertragungssystem
  - Einfluss des Mediums auf das Signal
- Übersicht über Übertragungsmedien



## Wiederholung: Der Begriff „Signal“

### □ Signal

- Ein Signal ist die physikalische Darstellung (Repräsentation) von Daten durch charakteristische räumliche und/oder zeitliche Veränderungen der Werte physikalischer Größen.
- Signale sind somit die reale physikalische Repräsentation abstrakter Darstellungen der Daten.



## 11.1.1. Einteilung von Signalen Ortsabhängige vs. zeitabhängige Signale

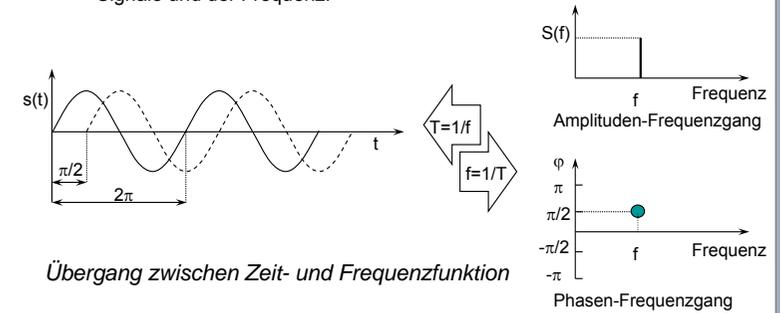
- Ortsabhängige (räumliche) Signale
  - Beispiel: Bildverarbeitung
    - Kamera, Scanner, Monitor
  - Beispiel: Speichermedien
    - Optische Speicher (bedrucktes Papier, CD/DVD), magnetische Speicher (Festplatte)
- Zeitabhängige Signale
  - Beispiel: Signalverarbeitung und -übertragung
    - Telefon: Sprachsignal
- Orts- und Zeitabhängige Signale → Welle
  - Beispiel: Elektromagnetische Welle, Schall
- Grundsatz:
  - Jedes ortsabhängige Signal ist in zeitabhängiges Signal überführbar („Lesen“, „Abtasten“) und umgekehrt („Schreiben“, „Aufzeichnen“)
- Fokus in der Vorlesung auf zeitabhängigen Signalen und Wellen

## Signalparameter

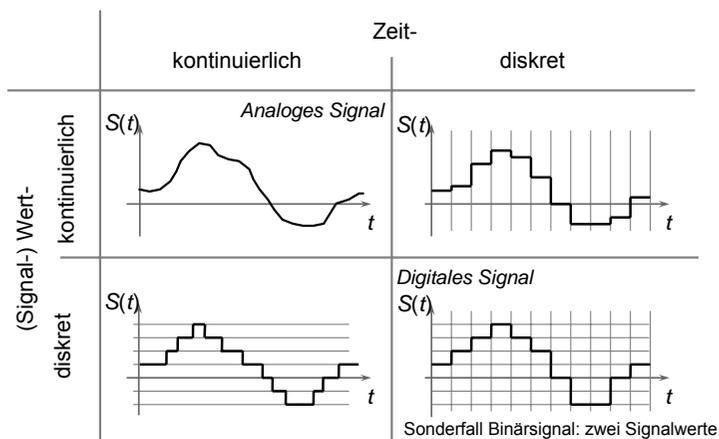
- Physikalische Kenngrößen eines Signals, deren Wert oder Werteverlauf die Daten repräsentieren
  - Bei *räumlichen* Signalen sind Werte des Signalparameters Funktion des Ortes, z.B. des Speichermediums.
  - Bei *zeitabhängigen* Signalen sind Werte des Signalparameters  $S$  Funktion der Zeit  $S = S(t)$ .
- Generische Einteilung *zeitabhängiger* Signale in vier Klassen:
  - zeitkontinuierliche, signalwertkontinuierliche Signale
  - zeitdiskrete, signalwertkontinuierliche Signale
  - zeitkontinuierliche, signalwertdiskrete Signale
  - zeitdiskrete, signalwertdiskrete Signale

## 11.1.2. Beschreibung von Signalen Zeitdarstellung/Frequenzdarstellung

- **Zeitfunktion (Zeitdarstellung):**
  - Die Zeitfunktion ist eine Zuordnung von Signalwert und Zeit.
- **Frequenzfunktion (Frequenzgang, Spektrum):**
  - Die Frequenzfunktion ist eine Zuordnung von Werten sinusförmiger Signale und der Frequenz.



## Signalklassen

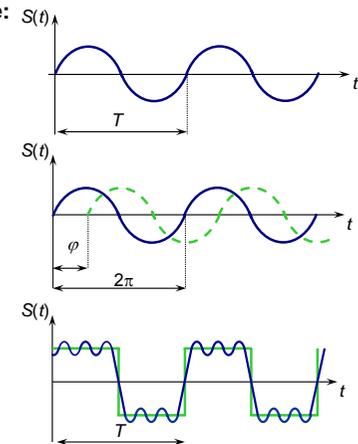


## Periodische Signale

- **Kenngrößen periodischer Signale:**  $S(t)$   
 Periode  $T$ , Frequenz  $1/T$ ,  
 Amplitude  $S(t)$ , Phase  $\varphi$

- Beispiele:
  - Sinus-Schwingung
  - Phasendifferenz  $\varphi$

- Rechteck-Schwingung  
 (zeitdiskret „idealisiert“)





## Periodische Signale: Fourier-Analyse

- Jede **periodische** Funktion kann durch die Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen dargestellt werden (Fourier-Reihe).

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

- mit  $f=1/T$  Grundfrequenz,  $a_n$  und  $b_n$  Amplituden von Sinus bzw. Kosinus der  $n$ -ten Harmonischen,  $c/2$  Gleichanteil

- Berechnung der Fourier-Koeffizienten:

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

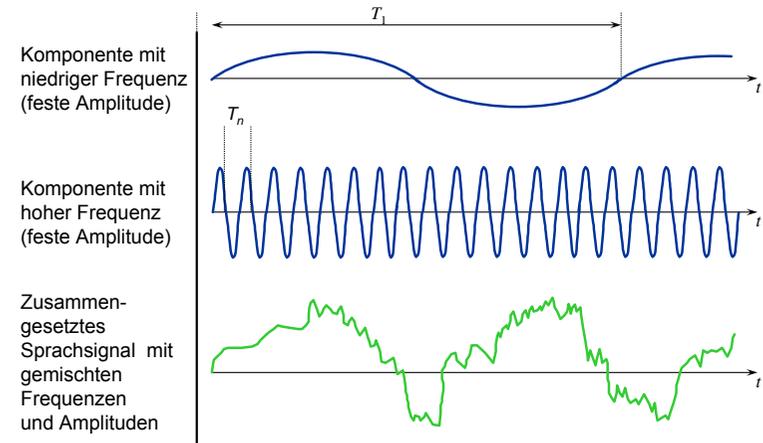
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

- Signalleistung der  $n$ -ten Harmonischen:  $a_n^2 + b_n^2$



## Zusammengesetzte Signale



## Periodische Signale: Fourier-Analyse

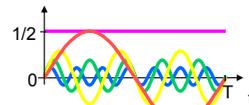
- Fourier-Reihe einer idealen Rechteckschwingung mit Periode T:



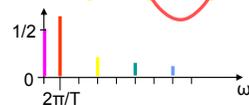
$$g(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$



Harmonische im Zeitbereich:



Fourier-Spektrum:



- unendlich viele Fourierkoeffizienten ungleich null → unendliche Bandbreite

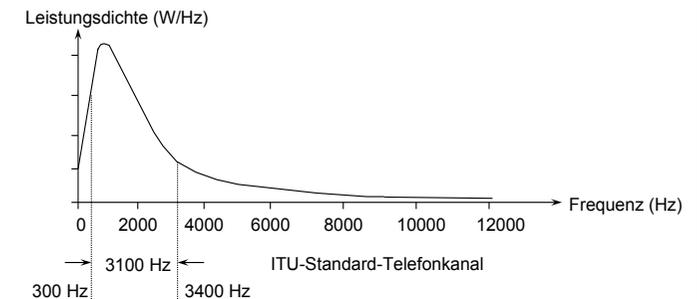


## Frequenzspektrum eines Signals

- **Bandbegrenzte Signal:**

- Signale können ein „natürlich“ begrenztes - meist kontinuierliches - Frequenzspektrum umfassen oder durch technische Mittel auf einen Ausschnitt ihres Spektrums begrenzt werden (Bandbreite).

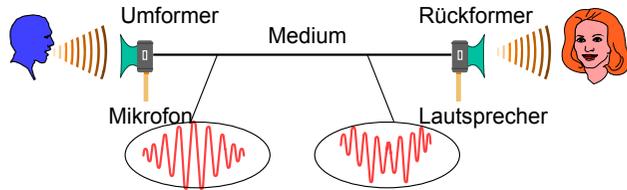
*Kontinuierliches - akustisches - Frequenzspektrum der menschlichen Stimme und Bandbreite des analogen ITU-Standardtelefonkanals*



## Signalumformung akustisch-elektrisch

- Beispiel: Telefon
  - zeitabhängiges Signal, physikalische Größe

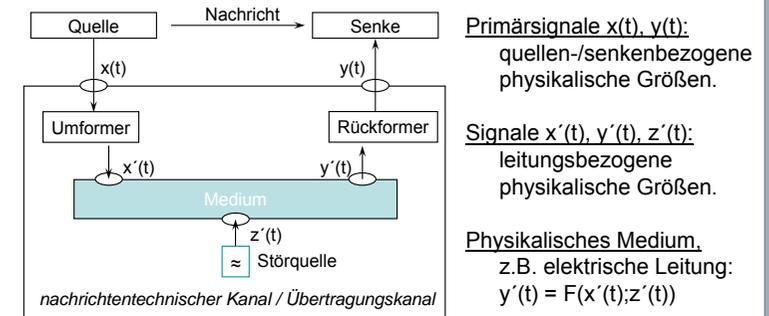
analoges akustisches Signal → analoges elektrisches Signal → analoges akustisches Signal



Klassisches Modell des Übertragungssystems Telefon

## Übertragungssystem: physikalisches Medium

- Verwendung eines physikalischen Mediums zur Übertragung von Nachrichten.



## 11.2. Übertragungssystem: Grundlagen, Begriffe

- **Signalübertragung:**
  - Grundlage jeder Kommunikation
  - Transport von Signalen über ein geeignetes Medium, das diese Signale über eine räumliche Distanz weiterleitet (→ Welle).



*Verkürzender Sprachgebrauch:*

Übertragungssignal	= Signal
Signaltransportmedium/Übertragungsmedium	= (physikalisches) Medium
Signalgeber, Signalquelle	= Sender
Signalempfänger, Signalsenke	= Empfänger
physikalisch-technisches Transportsystem für Signale	= Übertragungsweg

Signalübertragung wird in der Nachrichtentechnik als Nachrichtenübertragung bezeichnet.

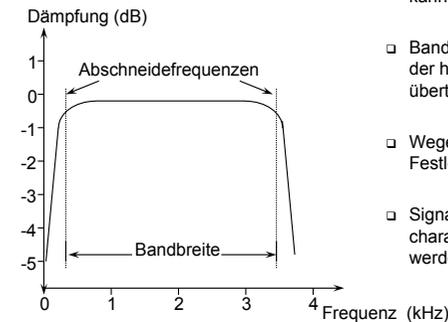
## Bandbegrenzttes Medium

### Bandbreite eines Mediums:

- Signaltransportmedien bzw. Übertragungssysteme übertragen stets nur ein endliches Frequenzband.

### Bandbreite von Übertragungswegen:

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

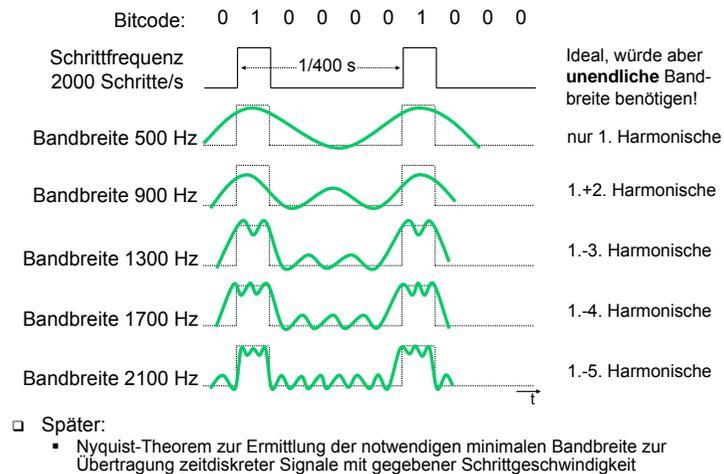


- Bandbreite ergibt sich aus der Differenz der höchsten und niedrigsten übertragbaren Frequenzen.

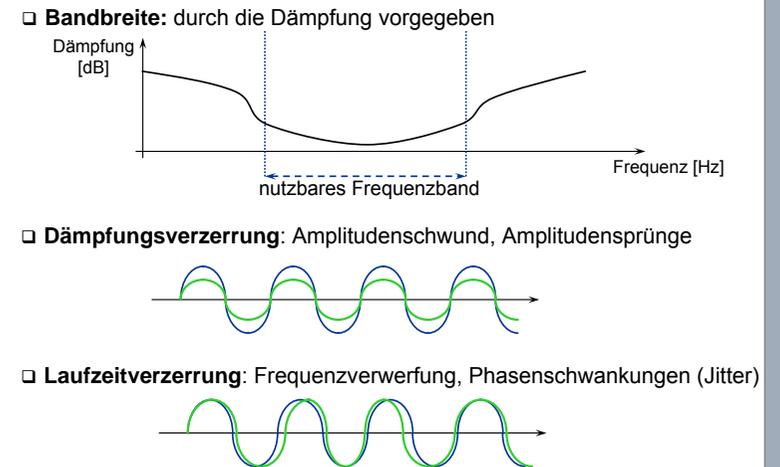
- Wegen nicht-idealer Bandbegrenzungen Festlegung von Abschneidefrequenzen.

- Signale müssen an die Übertragungscharakteristik des Mediums angepasst werden.

## Einfluss der Bandbreite eines Übertragungssystems auf ein digitales Signal



## Kenngrößen medienbedingter Abweichungen

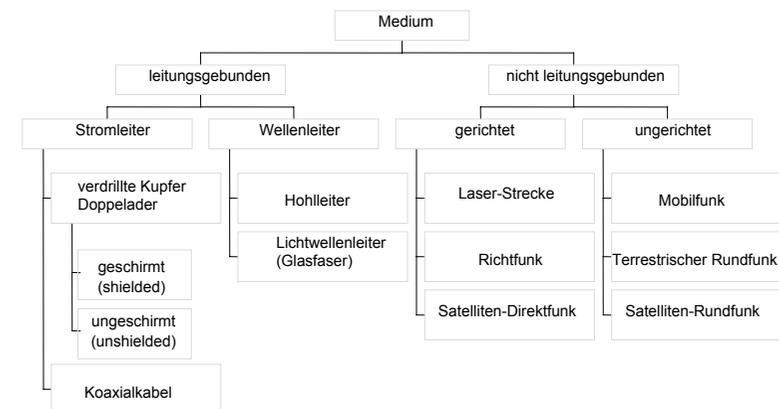


## Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Signalen

- Optimum: Lichtgeschwindigkeit ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) im Vakuum
- Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen: etwa  $2/3 c = 2 \cdot 10^8$  m/s
- Durch die begrenzte Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat das Medium eine Speicherkapazität.
- Beispiel: Datenübertragung von MIT nach Berkeley:
  - Strecke: 5000 km; Signallaufzeit: ca. 25 ms ( $5000 \text{ km} / 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )
  - Round Trip Delay (RTT): ca. 50 ms (doppelte Signallaufzeit)
  - Bei einer Übertragungsrate von 100 kbit/s: 2500 bit Speicherkapazität
  - Bei einer Übertragungsrate von 1 Gbit/s: 25000000 bit  $\approx$  3 Mbyte

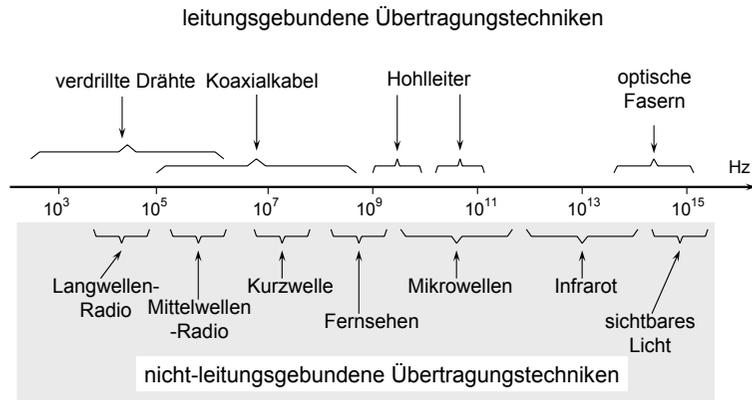


## 11.3. Medien: Klassifikation





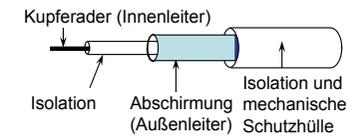
## Nutzung des elektromagnetischen Spektrums



## Koaxialkabel

### □ Koaxialkabel (coax)

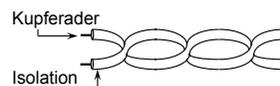
- Gehören zur Kupferkabeltechnik, da Innenleiter aus Kupfer besteht.
- *Außenleiter* umschließt *Innenleiter* zylindrisch.
- Dazwischen befindet sich ein *Dielektrikum* aus Kunststoffen oder Gasen.
- Die Signalausbreitung erfolgt im Dielektrikum zwischen den beiden Leitern.
- Unterscheidung durch Angabe Verhältnis Innenleiter zu Außenleiter, z.B.
  - ITU 2,6/9,5 mm
- Bandbreite: bis 900 MHz



## 11.3.1. leitungsgebundene Medien - Kupfer-Doppeladern

### □ Kupfer-Doppeladern (DA)

- Verwendung z.B. im Teilnehmer-Anschlussnetz (Ortsnetz)
- Leiterdurchmesser: 0,4 - 0,9 mm
- Bandbreite: einige 100 kHz bis z. Zt. 600 MHz
- internationaler Begriff: Unshielded Twisted Pair (UTP)
- verschiedene Qualitätsklassen, z. B. UTP 3, 4, 5, 6 bis zu 2,5 Gbit/s voll duplex (sog. Kategorien, z.B. CAT 5)
- auch mit zusätzlicher Kupferummantelung (STP, shielded twisted pair)
- ggf. auch zusätzliche Gesamtabschirmung in einem Kabel mit mehreren Doppeladern: screened/unshielded twisted pair (S/UTP) und screened/shielded twisted pair (S/STP)



**Hinweis:** Die Verwendung einer Doppelader ist aus elektrischen Gründen notwendig. Hin- und Rückleiter im elektrischen Stromkreis!



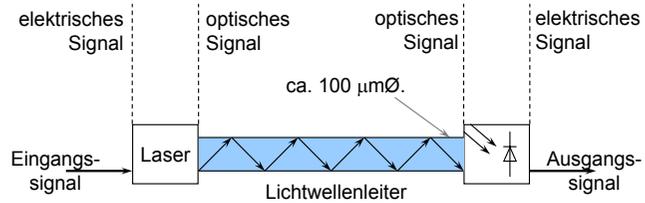
## Hohlleiter

### □ Hohlleiter sind

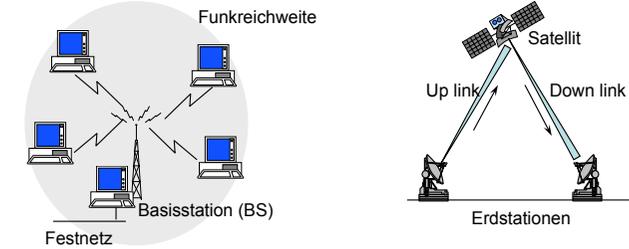
- mit Luft gefüllte, gestreckte metallische Hohlkörper
- mit runden, elliptischen oder rechteckigen Querschnitten.
- Sie bewirken eine geführte Ausbreitung höchstfrequenter elektromagnetischer Wellen (Mikrowellen) im Inneren des Hohlkörpers durch fortlaufende Reflexion.
- Sie sind allerdings heutzutage teilweise von Lichtwellenleitern abgelöst.
- Einsatzorte noch in der Richtfunktechnik (insb. Zuleitung zu Antennen)
- Die Mindestbreite eines Rechteckhohlleiters: halbe Wellenlänge der übertragenen Frequenz  
Dazugehörige Wellenlänge: Grenzwellenlänge  $\lambda_c = 2 \cdot a$   
(a: längere Seite des Rechteckhohlleiterquerschnitts)



## Lichtwellenleiter (Glasfaser)

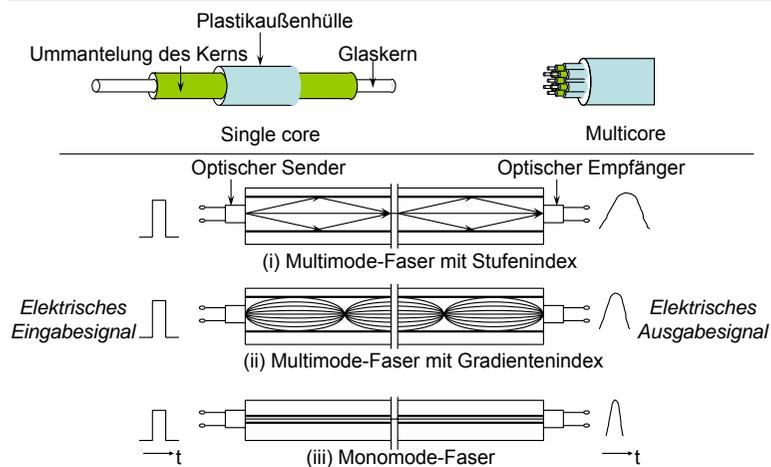


## 11.3.2. nicht leitungsgebundene Medien Funk- und Satellitentechnik



- Medium: Elektromagnetische Welle ( $10^4 - 10^9$  Hz)
  - Daten werden aufmoduliert
  - Eingeschränkte Reichweite, je nach Ausgangsleistung der BS und örtlichen Gegebenheiten
  - Datenrate: Einige 10 kbit/s bis 10 Mbit/s pro Benutzer
- Medium: Elektromagnetische Welle ( $10^9 - 10^{11}$  Hz)
  - Transponder im Satellit empfängt auf einem Kanal, sendet auf einem anderen.
  - Mehrere Transponder pro Satellit
  - Hohe Bandbreite (500MHz) pro Kanal

## Glasfaser - Typen



## Der Begriff „digital“

- *Digitale Daten (Beispiele)*
  - Zahlen, Schriftzeichenalphabet, Binärcodes usw.
- *Digitale Signale*
  - Zeit- und wertdiskrete Signale
- *Digitale Übertragungssysteme*
  - Übertragungssysteme, die nur für digitale Daten geeignet sind. Sie verstärken nicht - wie im Analogfall - Signalverläufe (einschließlich Störungen), sondern detektieren die den Signalstrom bildenden Digitaldaten (in der Regel Folgen von 0 und 1) und regenerieren die ursprünglichen Daten in neu erzeugte „perfekte“ Signalformen.
  - Rauscheinflüsse und Störungen werden eliminiert.
- Im Folgenden: Betrachtung digitaler Übertragungssysteme



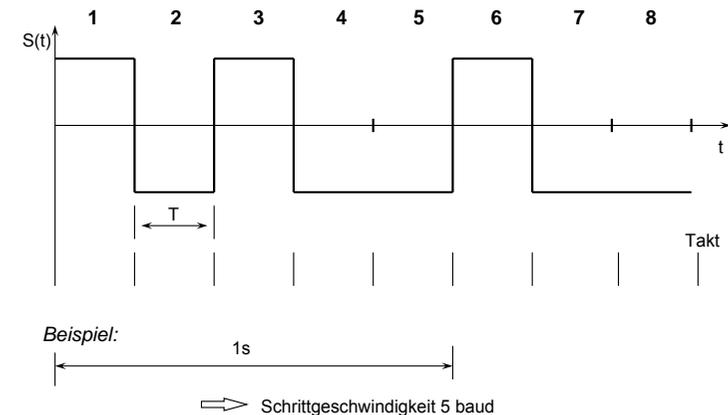
## 11.4. Übertragungsverfahren Im Folgenden...

- Digitale Signalübertragung
  - Schrittgeschwindigkeit und Übertragungsgeschwindigkeit
  - Synchronisation
  - Fehlerquellen
  - Kanalkapazität
- Basisbandübertragungsverfahren
  - Leitungscodes
  - Schwingungsmodulation
- Mehrfachnutzung von Übertragungswegen
  - Multiplexverfahren
- Digitale Übertragung analoger Daten
  - PCM-Technik



## Schrittgeschwindigkeit - Beispiel

Schrittfolge:



## 11.4.1. Digitale Signalübertragung

- **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** =  $1/s$  (nach Jean-Maurice-Emile Baudot, franz. Ingenieur)



## Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

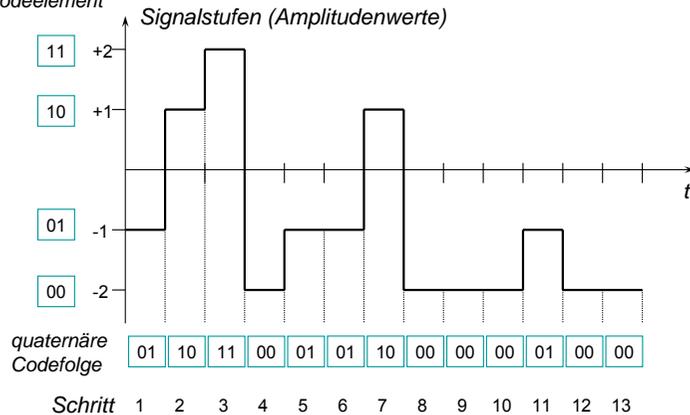
- **Zweiwertiges Digitalsignal (Binärsignal):**
  - Digitales Signal mit nur zwei Werten des Signalparameters (Digitales Signal, bei dem die Signalelemente binär sind)
- **Mehrwertiges (mehrstufiges) Digitalsignal:**
  - Die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen; Beispiel: DIBIT = 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 - Beispiel

zugeordnetes  
quaternäres  
Codeelement



## Synchronisation bzgl. Abtastzeitpunkte

- **Abtastzeitpunkte:**
  - Zeitpunkte, an denen die Senke den Signalverlauf  $y'(t)$  für das aktuelle Zeitintervall zur Ermittlung des Signalwertes abtastet.
- **Verfahren zur Erzielung von Gleichlauf (Synchronisation):**
  - Send- und Empfangstakt unterliegen gemeinsamen Konventionen und werden diesen folgend von Quelle und Senke unabhängig voneinander bestimmt.
    - *äußerst stabile Taktgeneratoren erforderlich*
  - Übertragung des Taktrasters auf eigenem parallelen Kanal.
    - *beschränkt auf Nahbereich*
  - Übertragung des Taktrasters mit dem Signal.
    - *Ableitung des Taktrasters aus dem Signalverlauf*
  - Punktuelle Synchronisation eines weitgehend unabhängigen Taktgenerators bei der Senke durch das Signal.
    - *nur beschränkte Frequenzkonstanz erforderlich, Synchronisation bei Schrittgruppen oder Blöcken*



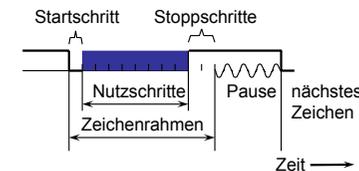
## Schritt- versus Übertragungsgeschwindigkeit

- **Schrittgeschwindigkeit  $v_s$  (symbol rate, modulation rate, digit rate)**
  - Gibt - anschaulich - die Zahl der ggf. nur potenziellen Signalparameter-Zustandswechsel an (Schrittschläge).
  - Für isochrone Digitalsignale gilt:  $v_s = 1/T$  (T: Schrittdauer)
  - **Einheit: 1/s = baud** (Abk. bd)
- **Übertragungsgeschwindigkeit  $\Phi$  (Einheit: bit/s)**
  - Für zweiwertige Signale (binäre Signale):  
Jeder Schrittschlag codiert ein Bit. Deshalb gilt in diesem Fall:  
 $v_s$  (in baud) =  $\Phi$  (in bit/s)
  - Die Übertragungsgeschwindigkeit wird in diesem Fall als *Bitrate (bit rate)* bezeichnet.
  - Für mehrstufige Signale (mit n möglichen Wertestufen):  
Übertragungsgeschwindigkeit  $\Phi$  (in bit/s):  $\Phi = v_s * \lg(n)$
  - Bei DIBIT-Codierung: 1 baud = 2 bit/s (quaternäres Signal)
  - Bei TRIBIT-Codierung: 1 baud = 3 bit/s (oktonäres Signal)



## Synchronisation durch Taktrasterübertragung

Zeichenweiser Start/Stop-Betrieb (Asynchronbetrieb)



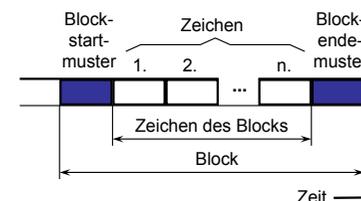
**Voraussetzung:**

- Ruhepegel
- feste Zahl von Nutzschriften

**Nachteil:**

- 3-aus-11 Overhead  
(8 Nutzbits bei 11 zu übertragenden Bits)

Blocksynchrisation (Synchronbetrieb)



**Voraussetzung:**

- Blockstart-/endemuster eindeutig

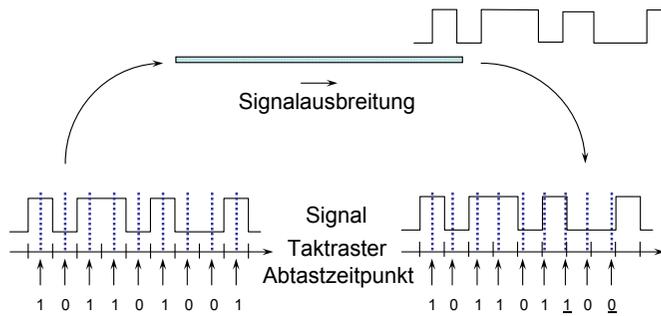
**Maßnahme:**

- Modifikation/Rückgängigmachen entsprechender Muster im Block (Bitstopfen)



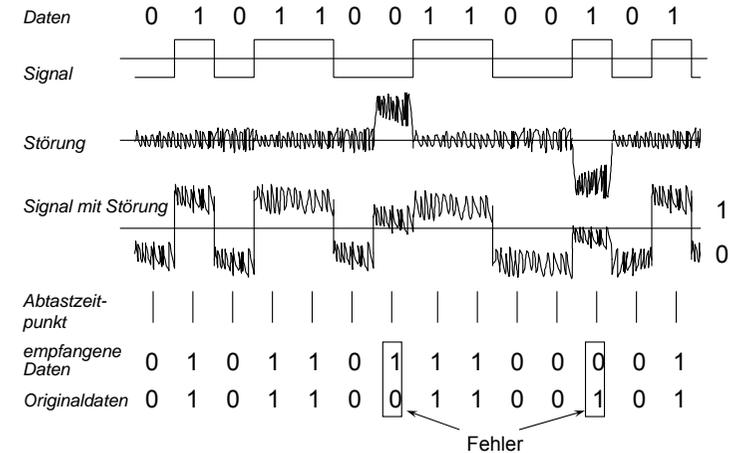
## Bitfehler durch fehlerhafte Synchronisation

- Beispiel:



## Bitfehler durch transiente Störungen

- Beispiel:



## Übertragungsstörung durch Rauschen

- 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, ...)



## Nyquist-Kriterium und Shannon-Kanalkapazität

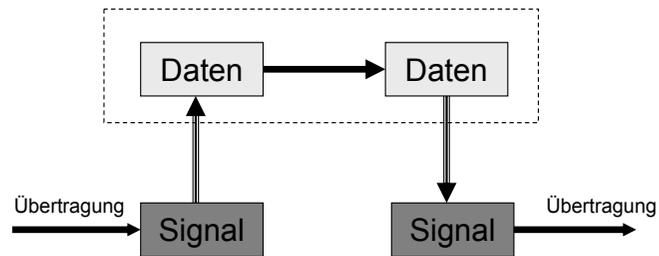
- 1924, H. Nyquist:  
**Maximale Schrittgeschwindigkeit** für einen Kanal mit **eingeschränkter Bandbreite**:  
 $v_s = 2 B$   
 mit  $B$  = Bandbreite des Kanals
- Daraus ergibt sich eine maximale Datenrate für einen rauschfreien Kanal:  
**max. Datenrate =  $v_s \cdot \text{ld}(n)$**   
 $= 2 B \cdot \text{ld}(n)$  [bit/s]  
 mit  $n$  = Anzahl diskreter Signalstufen
- Bsp.: Kanal mit 3.000 Hz Bandbreite, binäres Signal  
 → max. Datenrate: 6.000 bit/s
- 1948, C. Shannon:  
 (auch bekannt als *Shannon-Hartley-Gesetz*)  
 Kanalkapazität = informationstheoretische obere Grenze für die Information (in Bit), die in einem Schritt **fehlerfrei** über einen Kanal mit **weißem Rauschen** übertragen werden kann
- Daraus ergibt sich eine maximale Datenrate, die mit einer hypothetischen optimalen Kanalkodierung erreichbar ist:  
**max. Datenrate =  $B \cdot \text{ld}(1+S/N)$**  [bit/s]  
 mit  $S/N$  = Signal-Rauschverhältnis
- Bsp.: Kanal mit 3.000 Hz Bandbreite,  $S/N = 1000 = 30\text{dB}$ <sup>1)</sup>  
 → max. Datenrate: 30.000 bit/s  
 Durch Verwendung von fehlererkennenden bzw. -korrigierenden Codes (Redundanz!) wird aber mit höherer Rate gesendet!

<sup>1)</sup> Signal-Rauschverh. in dB =  $10 \log_{10}(S/N)$  [dB]

**Achtung:** Da für einen Kanal stets beide Sätze gelten, ergibt sich die fehlerfrei erreichbare maximale Datenrate aus dem *Minimum* der beiden Ergebnisse!



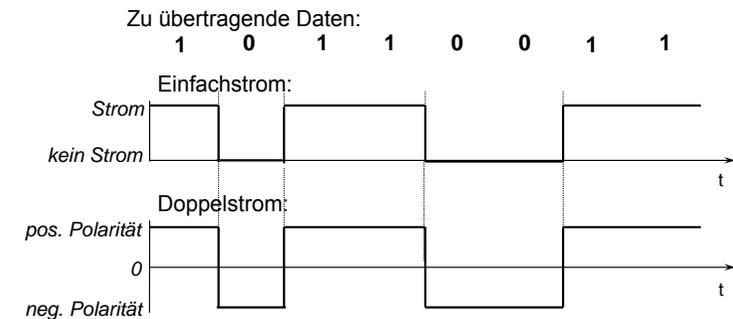
## Digitale Regeneration über abstrakte Datenrepräsentation



→ prinzipiell unendlich wiederholbare Regeneration digitaler Daten



## Einfachstrom/Doppelstrom-Verfahren



Binärzeichen	1	0
Einfachstrom	Strom	kein Strom
Doppelstrom	positive Polarität	negative Polarität



## 11.4.2. Basisbandübertragungsverfahren

- **Basisband:**
  - (üblicher Wortgebrauch in der Nachrichtentechnik) Bandbereich eines primären Signals in der „ursprünglichen“ Frequenzlage
  - Hier insbesondere: Frequenzband, das auch sehr niedrige Frequenzen bis zum Gleichstrom beinhaltet
  - Übertragung digitaler Signale mit „rechteckförmigem“ Signalverlauf erfordert die Übertragung sehr niedriger Frequenzen! (und theoretisch unendlich hoher Frequenzen nach Fourier, daher kann Rechteckform nie erreicht werden!)
  - Bei Gleichstromanteil (z.B. Einfachstromsignale) Übertragung ab Frequenz 0.
  - Älteste und einfachste Verfahren aus der Telegrafentechnik (z.B. Morsetelegrafie)

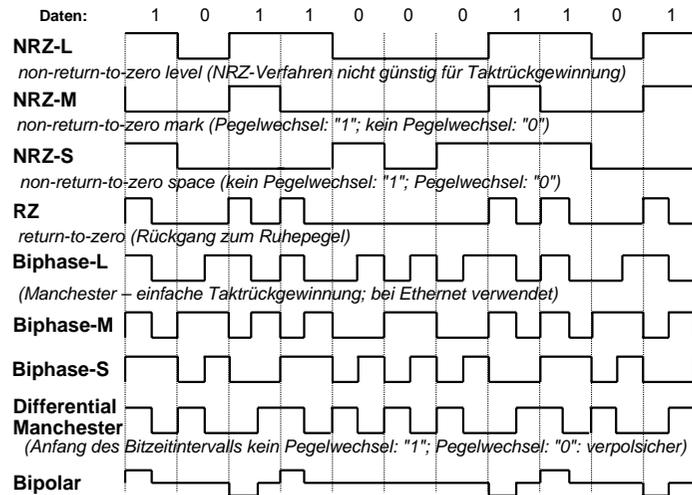


## Moderne Basisbandverfahren

- Moderne digitale Übertragungstechnik verwendet Basisbandverfahren bis zu sehr hohen Bitraten im Multi-Mega-bit/s-Bereich (PCM-Technik, lokale Netze (LAN), ISDN usw.).
- Dabei erwünscht bzw. erforderlich:
  - kein Gleichstromanteil
  - Wiedergewinnung des Takts aus ankommender Signalfolge (selbsttaktende Signalcodes)
  - Erkennung von Signalfehlern auf Signalebene
  - Niedrige Fehleranfälligkeit bei der Decodierung
- **Leitungscode, Übertragungscode:**
  - Die Zuordnungsvorschrift  
*digitales Datenelement* → *digitales Signalelement*  
wird als Signal- bzw. Leitungscodierung bezeichnet.
  - Die sich ergebenden zeit- und wertdiskreten Signalverläufe heißen: Leitungscodes bzw. Übertragungscode



## Moderne Basisbandverfahren - Beispiele



## Übertragungsverfahren mit Träger - Begriffe

- Trägerfrequenz-Übertragungsverfahren:
  - Modulation digitaler Daten auf analoge Signalträger
- Modulation allgemein:
  - Übertragung eines Signals in seiner „ursprünglichen“ Signalform und Frequenzlage aus technischen und wirtschaftlichen Gründen oft nicht sinnvoll.
  - Als Modulation allgemein wird Verschiebung der Frequenzlage, Anpassung an Übertragungscharakteristik des Übertragungsmediums (auch Übertragungskanal) usw. bezeichnet.
- Modulation (engere Bedeutung):
  - Modulation ist die planmäßige Beeinflussung eines Trägersignals durch das modulierende Signal (Modulationssignal)



## 4b/5b - Kodierung

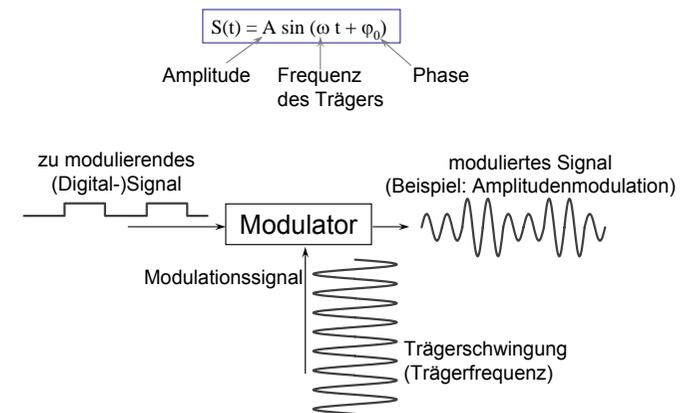
Symb.	Code Gruppe	Binärdarstellung
0	11110	0000
1	01001	0001
2	10100	0010
3	10101	0011
4	01010	0100
5	01011	0101
6	01110	0110
7	01111	0111
8	10010	1000
9	10011	1001
A	10110	1010
B	10111	1011
C	11010	1100
D	11011	1101
E	11100	1110
F	11101	1111

Symb.	Code Gruppe	Bedeutung
Q	00000	Quiet
I	11111	Idle
H	00100	Halt (Forced Break)
J	11000	1st of Start Delimiter(SD) Pair
K	10001	2nd of SD-Pair
T	01101	End Delimiter (ED)
R	00111	Logical ZERO (reset)
S	11001	Logical ONE (set)

- 4 Datenbits → 5 Signalbits auf der Leitung
- keine Symbole mit mehr als 3 Nullen in Folge (mindestens alle vier Bits erfolgt eine Transition): Vermeidet zu langes Verweilen auf einem Signalpegel → stellt Taktrückgewinnung sicher
- Anwendung: FDDI (Fiber Distributed Data Interface) mit NRZ-M-Verfahren
- Code-Effizienz: 80% (vgl.: Differential Manchester hat Code-Effizienz von 50%)
- 16 Symbole zur Nutzdatenübertragung; weitere für Steuerzwecke



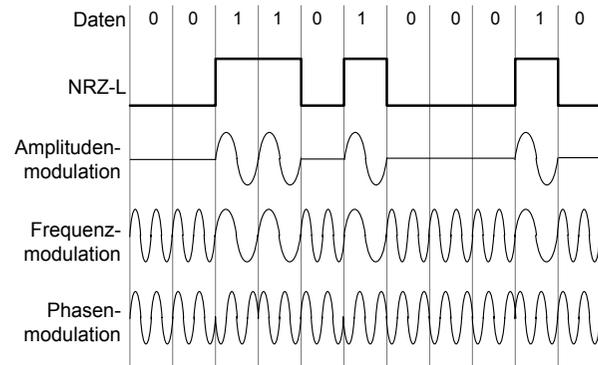
## Prinzip der Schwingungsmodulation



Schwingungsmodulation: analoger Signalträger ist Sinusschwingung



## Arten der Schwingungsmodulation



## 11.4.3. Mehrfachnutzung von Übertragungswegen

- **Übertragungsweg:**
  - physikalisch-technisches Transportsystem für Signale
- **Übertragungskanal:**
  - Abstraktion eines Übertragungsweges für einen Signalstrom
  - Auf einem Übertragungsweg können oft mehrere (viele) Übertragungskanäle parallel unterhalten werden, so ist beispielsweise eine Aufspaltung der totalen Übertragungskapazität eines Übertragungsweges auf verschiedene Sender-Empfänger-Paare möglich.
  - Die Zusammenfassung von Übertragungskanälen auf einem Übertragungsweg heißt

### Bündelung oder Multiplex, auch Verschachtelung

- Nutzung des Übertragungskanal in beide Richtungen: Richtungsmultiplex oder Duplex



## Klassisch: Äquivalenzliste nach ITU V.1

		Binärzeichen 0	Binärzeichen 1
<i>Gleichstrombetrieb</i>	Doppelstrom	negativ	positiv
	Einfachstrom	kein Strom	Strom
<i>Wechselstrombetrieb</i>	Amplitudenmodulation	kein Ton	Ton
	Frequenzmodulation	hohe Frequenz	tiefe Frequenz
	Phasendifferenzmodulation	keine Phasendrehung	Phasendrehung um 180°
	Phasenmodulation mit Bezugsphase	Gegenphase	Bezugsphase

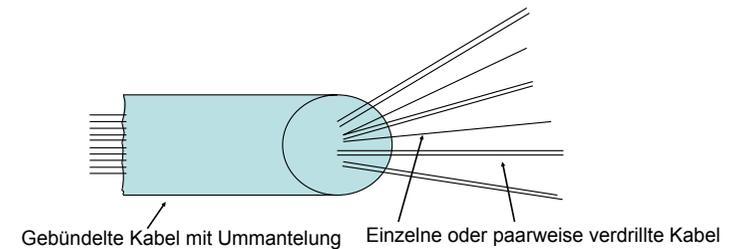


## Raummultiplex

- Bündelung vieler Einzelübertragungswege heißt:

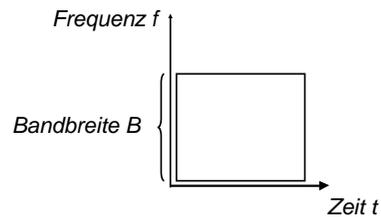
### Raummultiplex

- Beispiele: mehrspurige Autobahn, Leitungsnetz zwischen Fernvermittlungsstellen der Telekom



## Übertragungskapazität eines Nachrichtenübertragungssystems

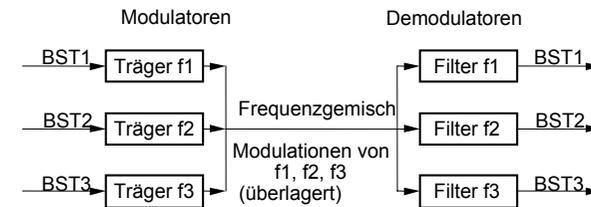
- Zeitgesetz der Nachrichtenübertragungstechnik:
  - integrale **Übertragungskapazität** eines Systems = Produkt der Bandbreite (Frequenzbereich) und der zur Verfügung stehenden Zeit  
(Achtung: idealer Fall ohne Störungen bei binärem Signal)



## Eignung des Frequenzmultiplex

Das *Frequenzmultiplexverfahren* (FDM= **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing) ist für analoge Daten und schwingungsmodulierte digitale Daten geeignet.

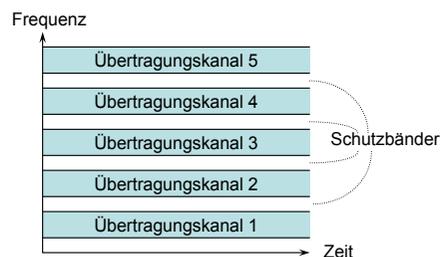
Anwendung z.B. Funk-/Satellitentechnik



Schema der technischen Realisierung eines Frequenz-Multiplexsystems  
BSTx = Bitstrom x

## Frequenzmultiplex

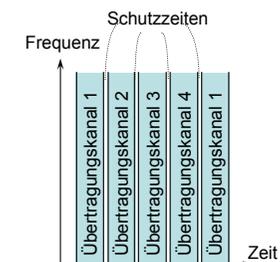
- Breitbandige Übertragungswege ermöglichen die Unterbringung vieler Übertragungskanäle in unterschiedlichen Frequenzbereichen (Frequenzbänder), d.h. man teilt die verfügbare Bandbreite in eine Reihe von - nicht notwendig gleichbreite - Frequenzbänder und ordnet jedem Frequenzband einen Übertragungskanal zu.



Nutzung der Übertragungskapazität eines Übertragungsweges im Frequenzmultiplex

## Starres Zeitmultiplex

- Die gesamte Übertragungskapazität (die ganze verfügbare Bandbreite) wird kurzzeitig (Zeitschlitz, Zeitscheibe) einer Sender-Empfänger-Kombination zur Verfügung gestellt.
- Nach einer Schutzzeit wird dann die Kapazität des Übertragungsweges dem nächsten Kanal zugeteilt.
- Diese zeitlich gestaffelte Übertragung mehrerer Signalströme wird als Zeitmultiplex (TDM = **T**ime **D**ivision **M**ultiplexing) bezeichnet.

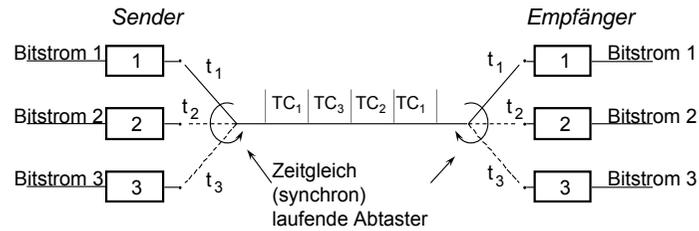


Nutzung der Übertragungskapazität im Zeitmultiplex



## Eignung des starren Zeitmultiplex

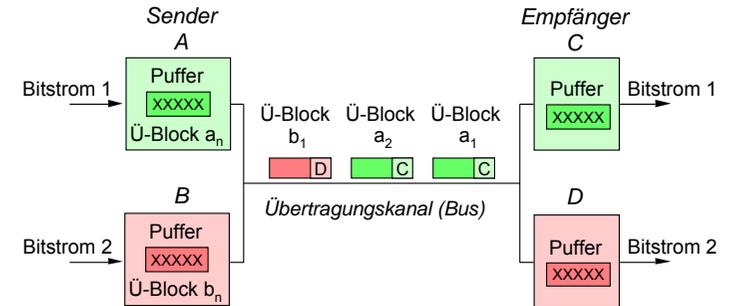
- Zeitmultiplex nur für zeitdiskrete Signale einsetzbar (bevorzugt zeit- und wertdiskrete Signale = Digitalsignale)



- Festes Zeitmultiplex mit starrer Zeitscheibenzuteilung.
- Übertragungseinheit z. B. ein Bit, ein Byte (Oktett).
- Jedem Sender wird periodisch eine Zeitscheibe (time slot, time slice)  $TC_1, TC_2, \dots, TC_n$  zugeteilt. Sender, Abtaster und Detektionsmechanismus beim Empfänger laufen im gleichen Takt: synchrone Zeittakt-Stabilität wichtig!



## Schema des anforderungsgesteuerten Zeitmultiplex

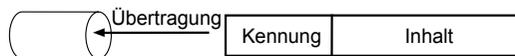


- Schema der technischen Realisierung des statistischen Blockmultiplex
- Sehr unterschiedliche Zuteilungsstrategien für den gemeinsam genutzten Übertragungsweg



## Anforderungsgesteuertes Zeitmultiplex

- Zeitscheiben werden nicht fest, sondern bei Bedarf dem Sender zugeteilt.
- Empfänger kann nicht mehr aus der Zeitlage der Zeitscheiben die Herkunft (Zuordnung zu unterschiedlichen Sendern) identifizieren!
- Somit wird eine Kennung erforderlich (Adresse, Kennzahl, usw.).



Schematischer Aufbau eines Übertragungsblocks mit Kennung

- Das anforderungsgesteuerte Zeitmultiplex (demand multiplexing) wird auch als statistisches Zeitmultiplex (STDM = **S**tatistical **T**ime **D**ivision **M**ultiplexing) bezeichnet.

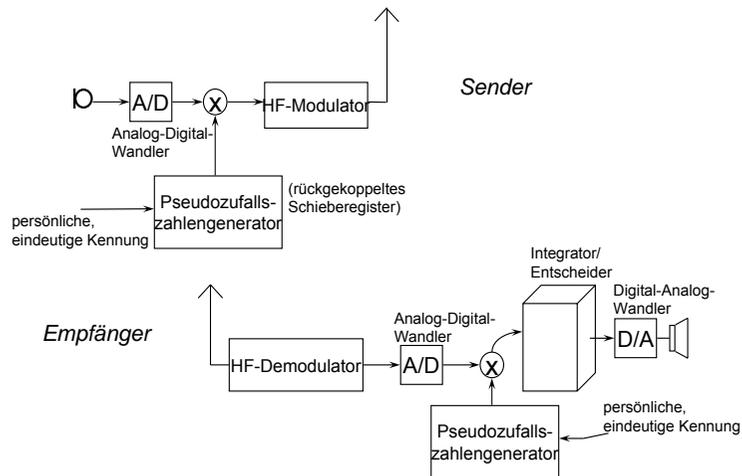


## CDMA - Code Division Multiple Access - Prinzip

- **Prinzip:**
  - alle Sender nutzen das gleiche Frequenzband und senden gleichzeitig
  - Signal wird auf der Senderseite mit einer für den Sender eindeutigen Pseudozufallszahl verknüpft (XOR)
  - Empfänger kann mittels bekannter Sender-Pseudozufallsfolge und einer Korrelationsfunktion das Originalsignal restaurieren
- **Nachteil:**
  - höhere Komplexität der Implementierung wg. Signalregenerierung
- **Vorteile:**
  - alle können auf der gleichen Frequenz senden
  - keine Frequenz-/Zeitscheibenplanung nötig
  - sehr großer Coderaum (z.B.  $2^{32}$ ) im Vergleich zum Frequenzraum



## CDMA - Code Division Multiple Access

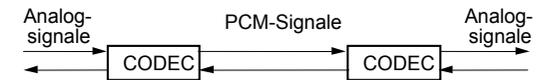


## 11.5. Pulse-Code-Modulations-Technik

- Die Zusammenfassung der Schritte **Abtastung - Quantisierung – Codierung** und die Darstellung der gewonnenen Codewörter als digitale Basisbandsignale am Ausgang des PCM-A/D-Umsetzers und Codierers ist Grundlage der im großen Umfang eingesetzten digitalen

### PCM-Technik.

- Die A/D-Umsetzung (Abtastung/Quantisierung) und Codierung sowie die Rückkonvertierung erfolgt im sogenannten **CODEC** (Codierer/Decodierer).



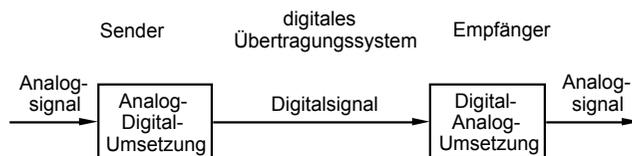
Umsetzung von Analogsignalen in PCM-Signale und Rückkonvertierung durch CODECs



## 11.4.4. Digitale Übertragung analoger Daten

- Übertragung analoger Daten (dargestellt durch analoge Signale) über digitale Übertragungssysteme erfordert:

### Digitalisierung der analogen Daten/Signale



- A/D- und D/A-Umsetzungen zur Übertragung analoger Signale auf digitalen Übertragungssystemen

<b>analog</b>	<b>digital</b>
wertkontinuierlich →	wertdiskret = Quantisierung
zeitkontinuierlich →	zeitdiskret = Abtastung



## Abtastung

- Für die *Zeitdiskretisierung* muss eine Abtastung der Analogverläufe erfolgen. Praktisch wichtig ist die periodische Abtastung. Der zum Abtastzeitpunkt vorliegende Momentan-Wert des Analogsignals wird der Analog-Digital-Umsetzung unterworfen.
- Abtastung* und *Quantisierung* sind voneinander unabhängig zu betrachten. Eine exakte Rekonstruktion des Zeitverlaufs (bzw. des Frequenzspektrums) sagt nichts über den Fehlergrad bei der Signalwertdiskretisierung.

## Abtasttheorem

### Abtasttheorem von Shannon und Raabe (1939):

- Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs der abgetasteten Analogsignale ist eine Mindestabtasthäufigkeit (Abtastfrequenz  $f_A$ ) erforderlich (bei periodischem Abtastzyklus).
- **Abtasttheorem:** Eine Signalfunktion, die nur Frequenzen im Frequenzband  $B$  (bandbegrenztetes Signal) enthält, wobei  $B$  gleichzeitig die höchste Signalfrequenz ist, wird durch ihre diskreten Amplitudenwerte im Zeitabstand  $t_0 = 1/(2B)$  vollständig bestimmt.
- Andere Formulierung: Die Abtastfrequenz  $f_A$  muss mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste im abzutastenden Signal vorkommende Frequenz  $f_s$ .

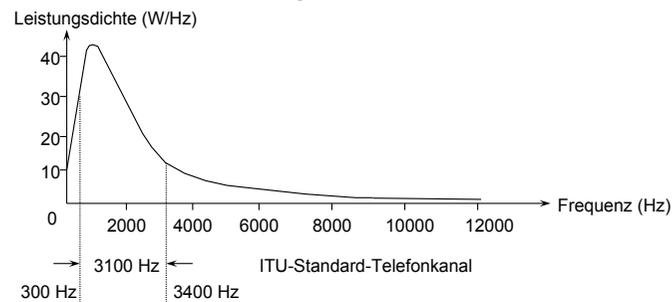
## PCM-Fernsprechkanal - Abtastung

- **Ausgangspunkt**
  - Analoger ITU-Fernsprechkanal, Frequenzlage 300-3400 Hz, Bandbreite 3100 Hz, höchste vorkommende Frequenz 3400Hz
- **Abtastfrequenz**
  - ITU-empfohlene Abtastfrequenz für PCM-Fernsprech-Digitalisierung  
 $f_A = 8 \text{ kHz}$
- **Abtastperiode**
  - $T_A = 1/f_A = 1/8000\text{Hz} = 125 \mu\text{s}$
  - Die ITU gewählte Abtastfrequenz ist höher als nach Shannon-Abtasttheorem erforderlich (3400 Hz obere Bandgrenze ergibt 6800 Hz Abtastfrequenz).
  - Für die höhere Abtastfrequenz sprechen technische Gründe (Filtereinfluss, Kanaltrennung usw.).

## Wiederholung: Frequenzspektrum eines Signals

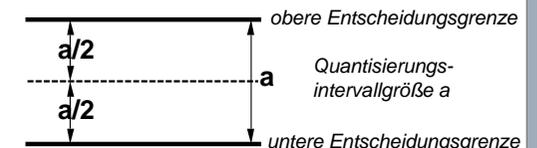
- Bandbegrenztetes Signal: Signale können ein „natürlich“ begrenztes - meist kontinuierliches- Frequenzspektrum umfassen oder durch technische Mittel auf einen Ausschnitt ihres Spektrums begrenzt werden (Bandbreite).

*Kontinuierliches - akustisches - Frequenzspektrum der menschlichen Stimme und Bandbreite des analogen ITU-Standardtelefonkanals*



## Quantisierung

- Der gesamte Wertebereich des Analogsignals wird in eine endliche Anzahl von Intervallen (Quantisierungsintervallen) eingeteilt, denen jeweils ein fester diskreter Wert zugeordnet wird.
- Quantisierungsfehler: Da alle in ein Quantisierungsintervall fallenden Analogwerte nur einem diskreten Wert zugeordnet werden, entsteht ein Quantisierungsfehler.



- Quantisierungsintervall für die Zuordnung eines diskreten Wertes zu allen z.B. zwischen  $+a/2$  und  $-a/2$  liegenden Werten einer Analogdarstellung (andere Zuordnungen denkbar)
- Rückwandlung: Beim Empfänger wird ein Analogwert rückgewandelt (Digital-Analog Umsetzung), der dem in der Mitte des Quantisierungsintervalls liegenden Analogwert entspricht (maximaler Quantisierungsfehler =  $a/2$ )

## Codierung

- Die Quantisierungsintervalle werden durch die Zuordnung eines - im Prinzip frei wählbaren - (Binär-) Codes gekennzeichnet und unterschieden.
- **Grundprinzip:** Anstelle des ursprünglichen Analogsignals wird die - mit dem Quantisierungsfehler behaftete - digitale Darstellung übertragen.
- Beim PCM (siehe weiter hinten) wird ein reiner Binärcode (Darstellung als Binärzahl) als Codierung des Digitalwertes gewählt.

## Ungleichförmige Quantisierung

- Bei gleichförmiger Quantisierung sind alle Intervalle gleich groß und von der Größe des Momentanwerts des Signals unabhängig.
- Quantisierungsfehler machen sich bei gleichförmiger Quantisierung bei kleinen Signalwerten sehr stark bemerkbar (Quantisierungsrauschen).
- Bei ungleichförmiger Quantisierung sind die Quantisierungsintervalle bei großer Signalamplitude größer und bei kleiner Amplitude kleiner als im gleichförmigen Fall.
  - *Kompressor:* Die ungleichförmige Intervallgröße wird durch einen dem Quantisierer vorgeschalteten (Signal-) Kompressor erzielt.
  - *Expander:* Auf der Empfangsseite wird in inverser Funktion ein Expander eingesetzt. Wiederherstellung der ursprünglichen Größenverteilung der Signale (Dynamik der Signale).
  - *Kompander:* Kombination von Kompressor und Expander.

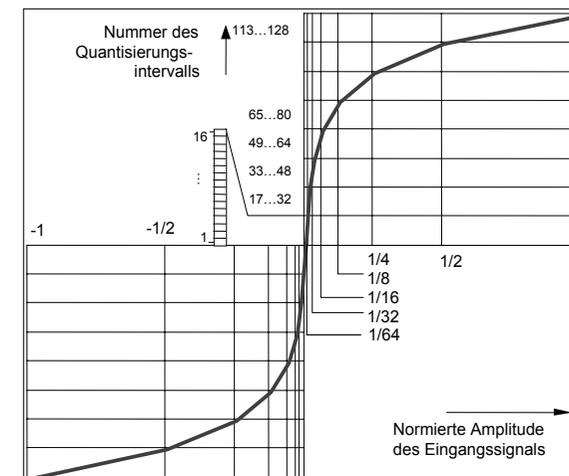
## PCM-Fernsprechkanal - Quantisierung

- **Amplitudenquantisierung:**
  - Zahl der benötigten Quantisierungsintervalle wird bei der akustischen Sprachkommunikation (Fernsprechen) durch den Grad der Silbenverständlichkeit beim Empfänger bestimmt.
  - Mit „Sicherheitszuschlag“ wurden 256 Quantisierungsintervalle genormt.
  - Bei binärer Codierung reichen dafür 8 Bit Codewortlänge aus:
    - $2^8 = 256$
  - Die Übertragungsgeschwindigkeit (Bitrate) für einen digitalisierten Fernsprechkanal ergibt sich somit wie folgt

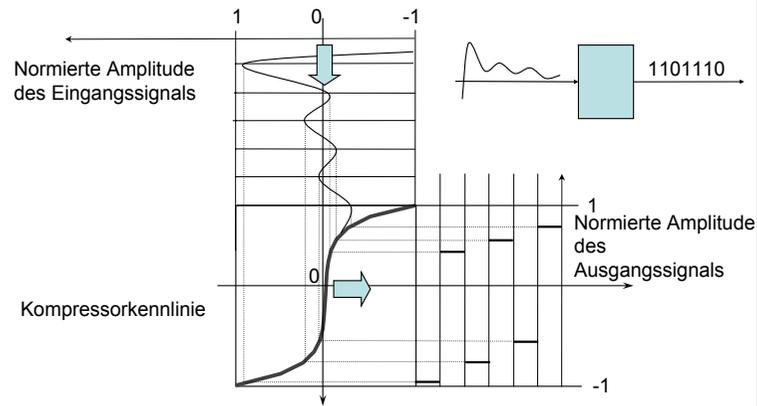
$$\begin{aligned} \text{Bitrate} &= \text{Abtastfrequenz} \times \text{Codewortlänge} \\ \text{kbit/s} &= 8000/\text{s} \quad \times 8 \text{ bit} \\ &= \mathbf{64\text{kbit/s}} \end{aligned}$$

k(kilo) = 1000 ! (ebenso M(Mega): 1 Mbit/s = 1000000 bit/s)

## 13 Segment-Kompressor-Kennlinie



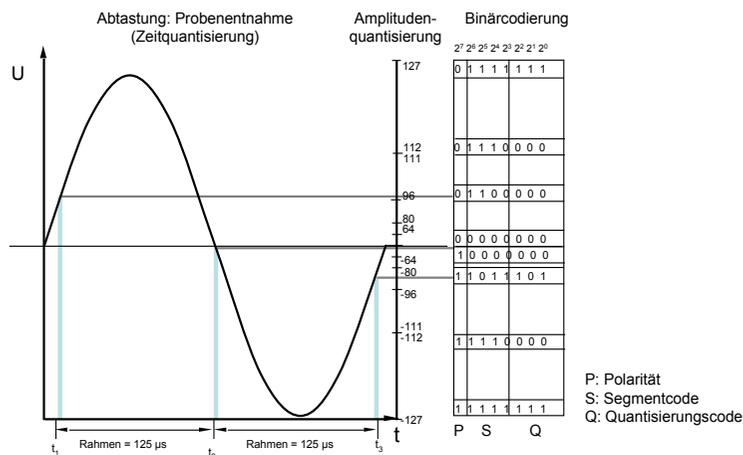
## Kompressorkennlinie - Prinzip



## PCM-Systeme

- Die praktische Gestaltung technischer PCM-Systeme wird durch das Fernsprechen bestimmt (obwohl grundsätzlich jede Art analoger - nach Digitalisierung - und digitaler Daten unter Verwendung digitaler PCM Übertragungssysteme übertragbar ist).
- Praktisch eingesetzte PCM-Systeme bauen im Übertragungsbereich auf der Mehrfachnutzung der Übertragungswege durch Zeitmultiplexverfahren auf.
- Doppelbedeutung von PCM:
  - Spezielles Umsetzverfahren für analoge Signale
  - Starres Zeitmultiplexverfahren für Fernübertragung
- Aus historischen Gründen hat ITU zwei PCM-Übertragungssysteme genormt.
- Behandelt wird das für die Deutsche Telekom AG verbindliche CEPT-System.

## Zusammenhang bei der PCM-Technik



## PCM-30-System – Deutsche Telekom AG

- Für jedes System sind Systemparameter festzulegen, z.B.:
  - kleinste Übertragungseinheit pro Zeitabschnitt (Bit, Byte, n-bit-Wort, Block)
  - Häufigkeit der Zeitscheibenzuteilung an einen Übertragungskanal
  - Synchronisierhilfen
  - Melde- und Signalisierdaten
- Struktur des genormten PCM-30 Kanalgrundsystems der Deutschen Telekom AG:
  - pro Zeitscheibe: 8 bit
  - Übertragungszeit pro Kanal: ca. 3,9µs
  - Verschachtelungsgrad (die Periode): 32 Kanäle
- Als Übertragungseinheit der Multiplexstruktur ist die Struktur mit 32 verschachtelten Kanälen aufzufassen, sie wird **Pulsrahmen (pulse frame, frame)** genannt.



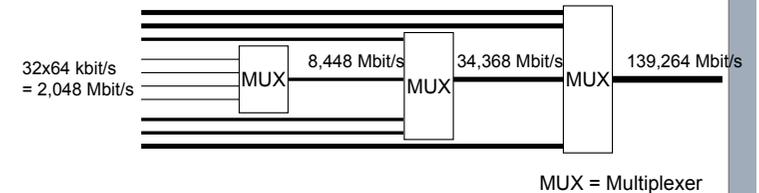
## PCM-Multiplexsysteme - Rahmenstruktur

- Die 32 Zeitabschnitte sind mit 0 bis 31 nummeriert. Ein Abschnitt ist ca. 3,9 ms lang. Die gesamte Rahmendauer ist bei PCM30 mit 125 Mikrosekunden genormt.
  - Im Zeitabschnitt 0 werden abwechselnd Rahmenkennworte (u.a. zur Rahmenidentifizierung, Synchronisierung) und Meldeworte (u.a. zur Überwachung der Digitalsignalleitung) übertragen.
  - Der Kennzeichenabschnitt 16 dient zur Übertragung vermittlungstechnischer Daten, wie Wählzeichen usw.
  - Die 30 übrigen Zeitabschnitte nehmen jeweils 8 bit (einen Abtastwert) eines 64kbit/s digitalen Fernsprechsignals auf; daher der Name PCM30.
  - Feste Zuordnung des Platzes im Rahmen für eine 64kbit/s Fernsprechverbindung. Reservierung beim Verbindungsaufbau ("Wählverbindung").
- Hinweis: Anstelle von Fernsprechsensignalen können beliebige andere digitalisierte analoge und digitale Daten in Einheiten von 8 bit über ein digitales PCM-System übertragen werden!



## Über PCM 30 hinausführende Systeme

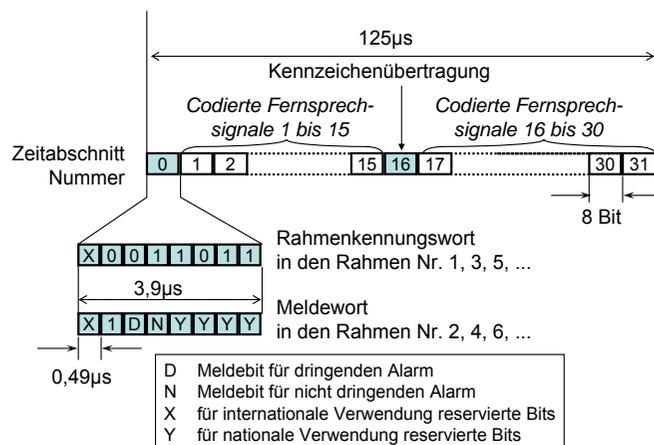
- Zeitmultiplex wie in PCM 30 kann auch für mehr Kanäle genutzt werden (z.B. PCM 120)
- Plesiochrone Digitale Hierarchie (PDH)
  - hierarchisches Zeitmultiplex
  - Schwankungen der Rate werden durch Stopfbits kompensiert



- Synchrone Digitale Hierarchie (SDH)
  - synchrone 125µs Rahmen
  - Grundrate von 155,52 Mbit/s, Vielfache hiervon werden unterstützt
  - Datenblöcke können über Rahmengrenzen gehen
  - Pointer im Rahmenkopf zeigen auf den Anfang des nächsten Datenblocks



## Pulsrahmen des Systems PCM 30



## 11.6. Zusammenfassung der Signalkonversionen

- *Analog → Analog*:
  - ursprüngliches Telefon (englisch: POT = Plain Old Telephone)
  - Analoger Rundfunk
- *Analog → Digital*:
  - PCM-Konversion
  - Digitale Telefonie
- *Digital → Analog*:
  - Digitaldatenübertragung über analoges Fernsprechnet (MODEM-Technik)
  - Übertragung digitaler Daten mittels Funk-/Satellitentechnik
- *Digital → Digital*:
  - Leitungscodierung im Basisbandverfahren
- Mehrere Signalkonversionen können hintereinander ausgeführt werden (wobei *Analog → Analog* und *Analog → Digital* nie verlustfrei sind).