

Lehrstuhl für Netzarchitekturen und Netzdienste
Institut für Informatik
TU München – Prof. Carle

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>



Technische Universität München



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

1. Einführung und Motivation
 - Bedeutung, Beispiele
2. Begriffswelt und Standards
 - Dienst, Protokoll, Standardisierung
3. Direktverbindungsnetze
 - Fehlererkennung, Protokolle
 - Ethernet
4. Vermittlung
 - Vermittlungsprinzipien
 - Wegwahlverfahren
5. Internet-Protokolle
 - IP, ARP, DHCP, ICMP
 - Routing-Protokolle
6. Transportprotokolle
 - UDP, TCP
7. Verkehrssteuerung
 - Kriterien, Mechanismen
 - Verkehrssteuerung im Internet
8. Anwendungsorientierte Protokolle und Mechanismen
 - Netzmanagement
 - DNS, SMTP, HTTP
9. Verteilte Systeme
 - Middleware
 - RPC, RMI
 - Web Services
10. Netzsicherheit
 - Kryptographische Mechanismen und Dienste
 - Protokolle mit sicheren Diensten: IPSec etc.
 - Firewalls, Intrusion Detection
- 11. Nachrichtentechnik**
 - **Daten, Signal, Medien, Physik**
12. Bitübertragungsschicht
 - Codierung
 - Modems



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)

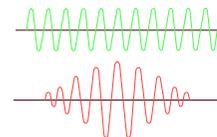
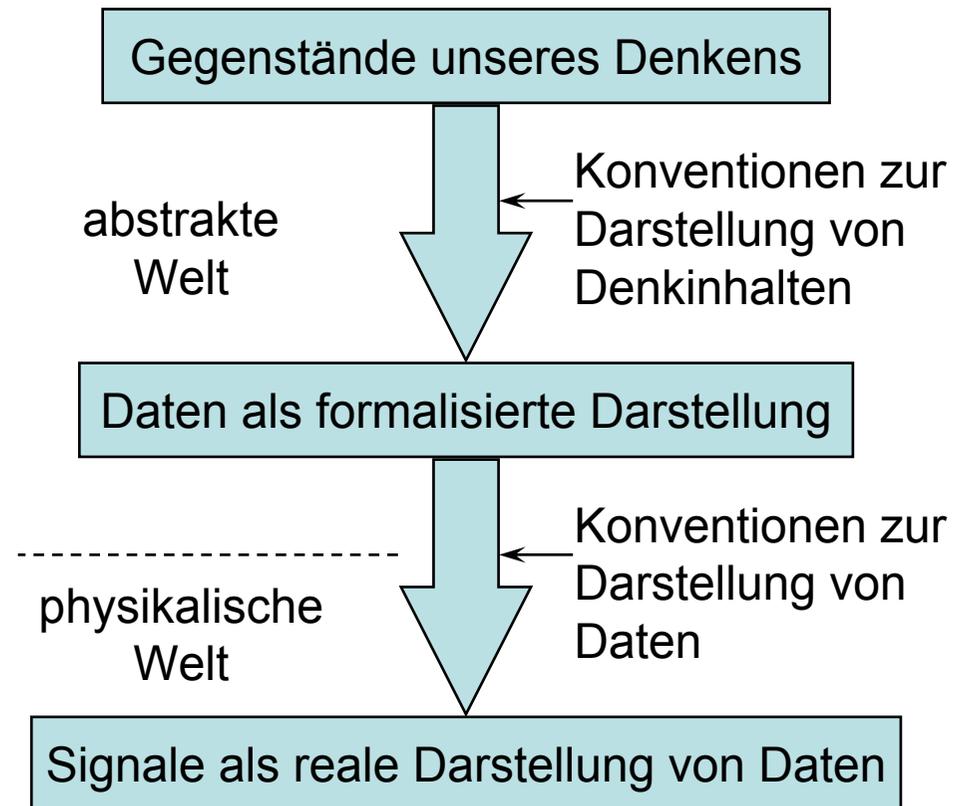
11.6. Zusammenfassung der Signalkonversionen



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. 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



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



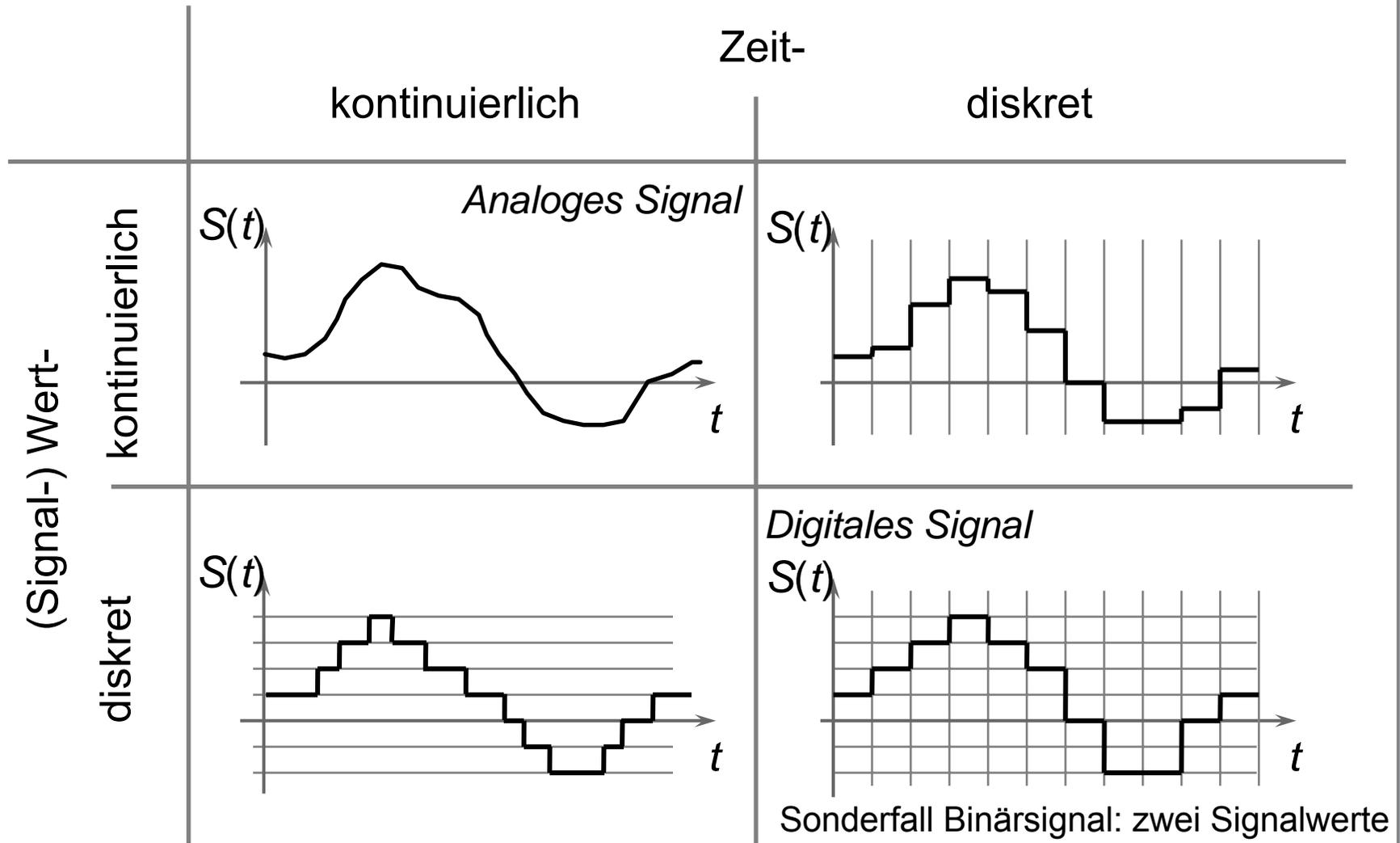
Signalparameter

- 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



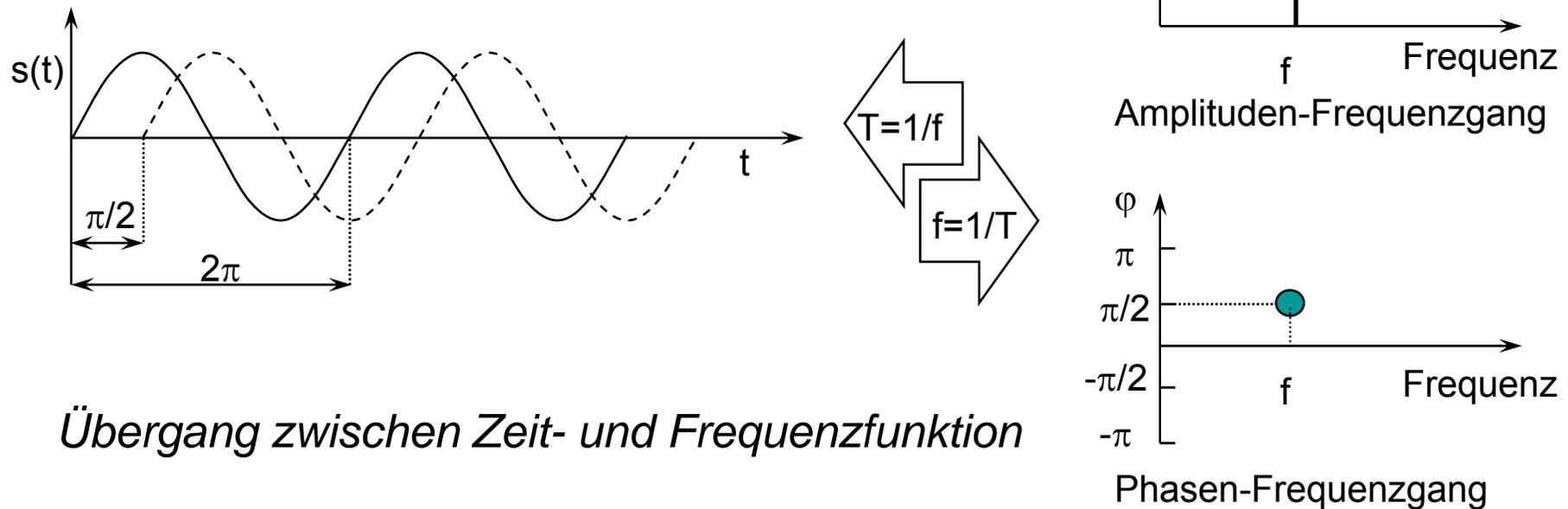
Signalklassen





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.





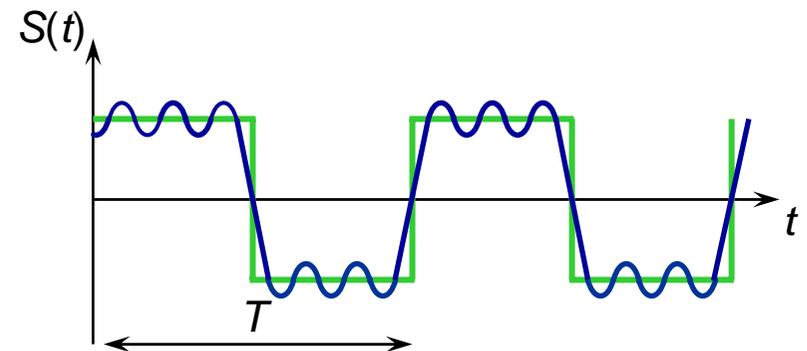
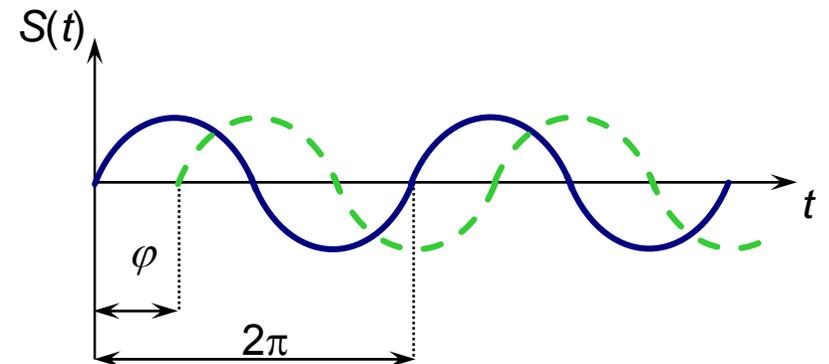
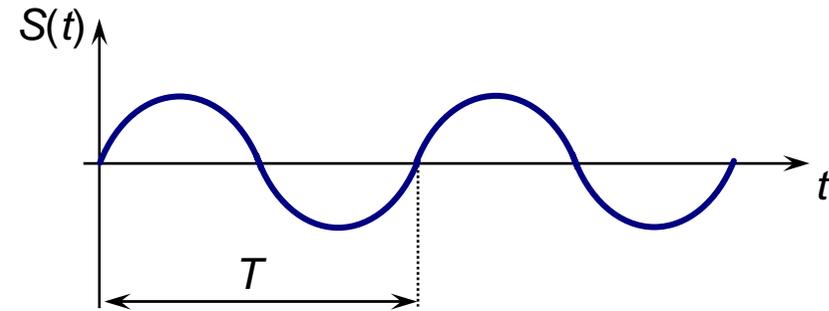
Periodische Signale

□ Kenngrößen periodischer Signale:

Periode T , Frequenz $1/T$,
Amplitude $S(t)$, Phase φ

□ Beispiele:

- Sinus-Schwingung
- Phasendifferenz φ
- 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:

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

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

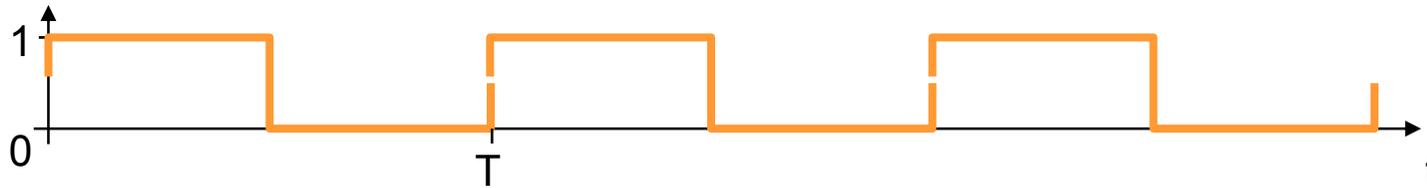
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

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

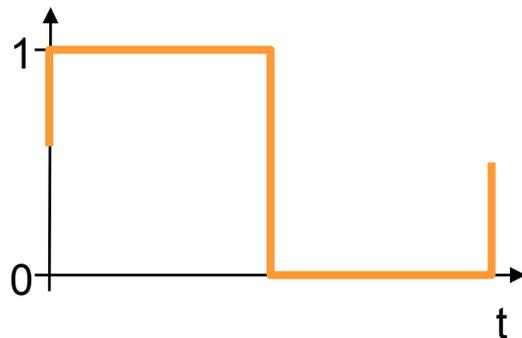


Periodische Signale: Fourier-Analyse

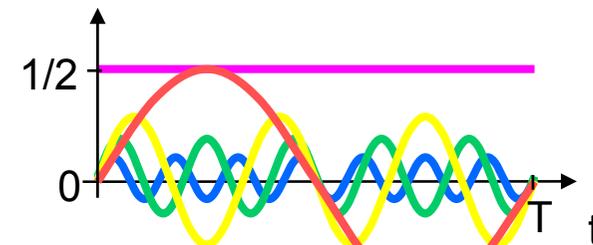
- Fourier-Reihe einer idealen Rechteckschwingung mit Periode T:



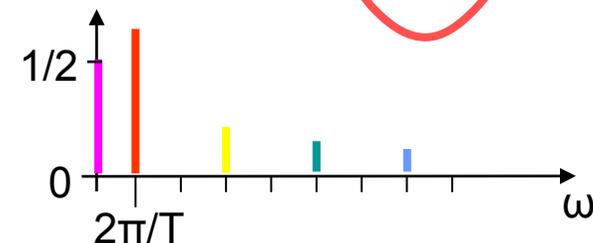
$$g(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$



Harmonische
im Zeitbereich:



Fourier-Spektrum:

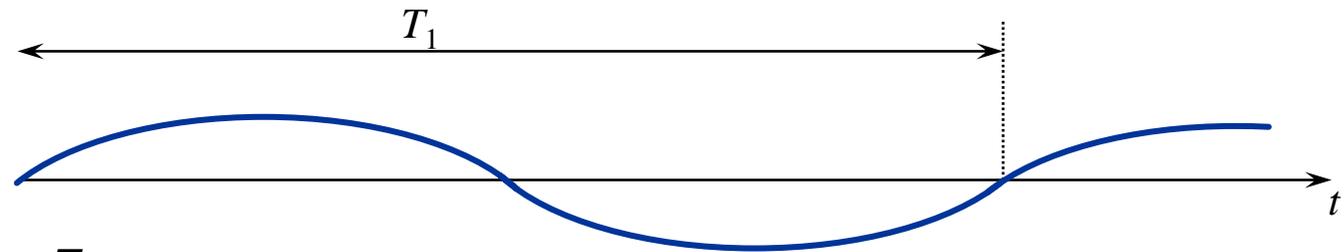


- unendlich viele Fourierkoeffizienten ungleich null → unendliche Bandbreite

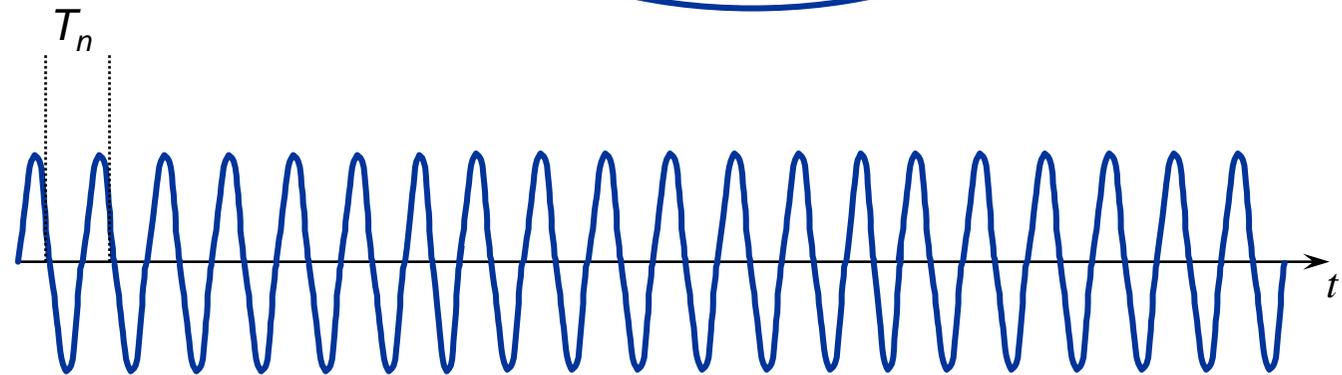


Zusammengesetzte Signale

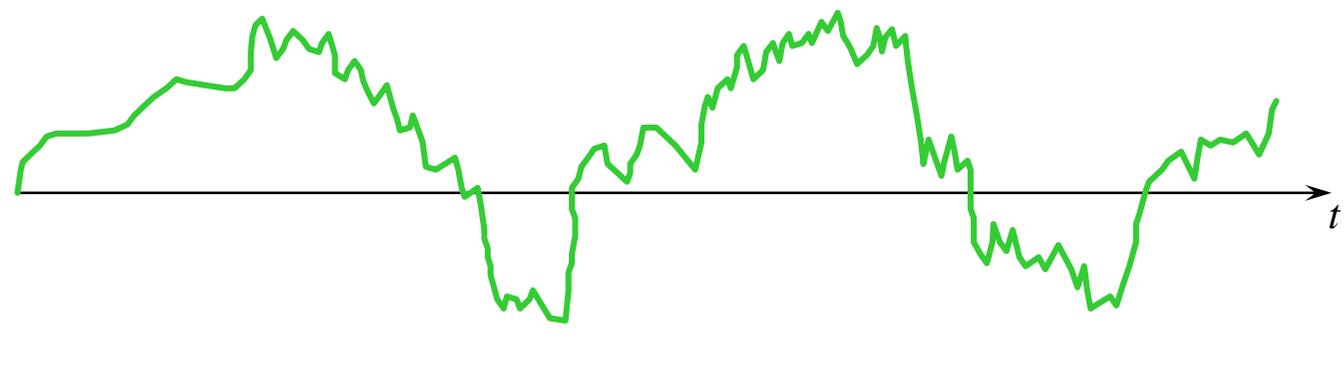
Komponente mit
niedriger Frequenz
(feste Amplitude)



Komponente mit
hoher Frequenz
(feste Amplitude)



Zusammen-
gesetztes
Sprachsignal mit
gemischten
Frequenzen
und Amplituden



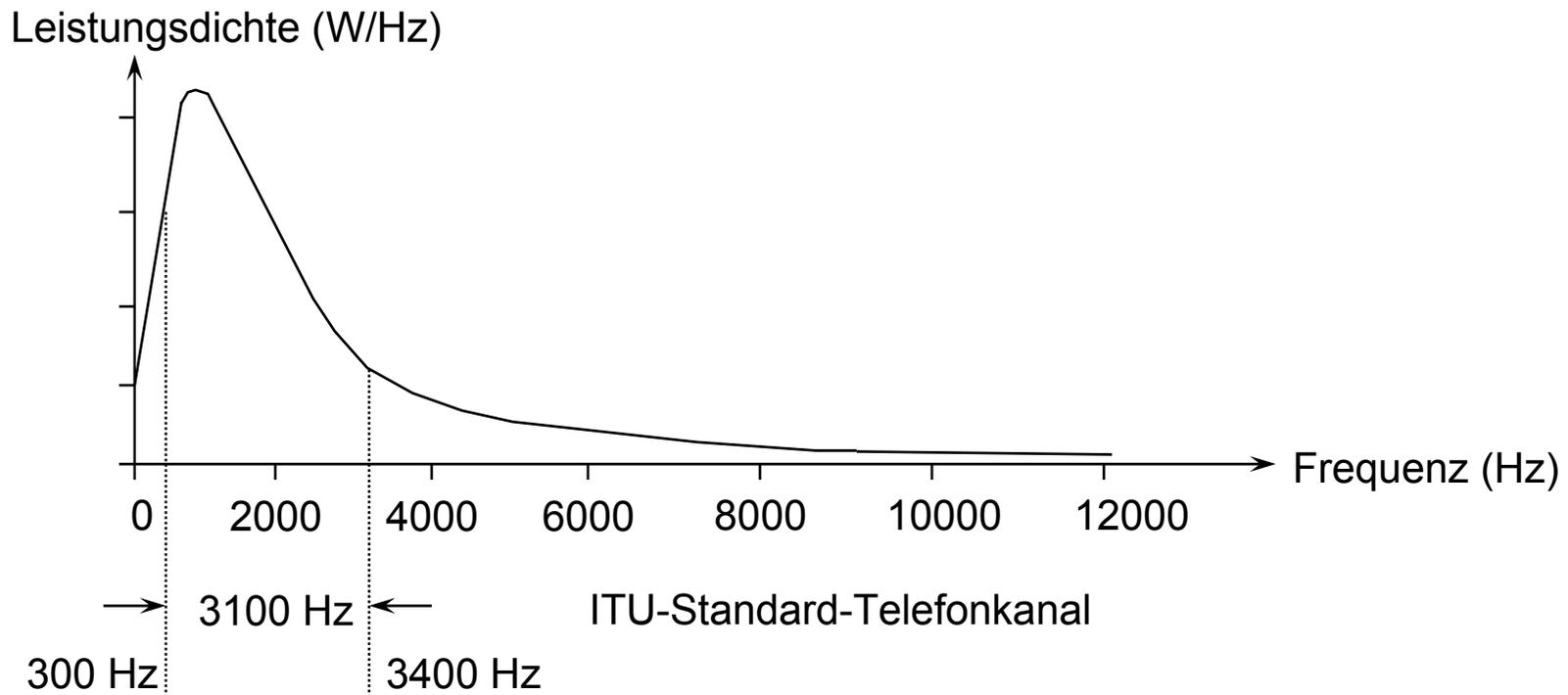


Frequenzspektrum eines Signals

□ Bandbegrenztes 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

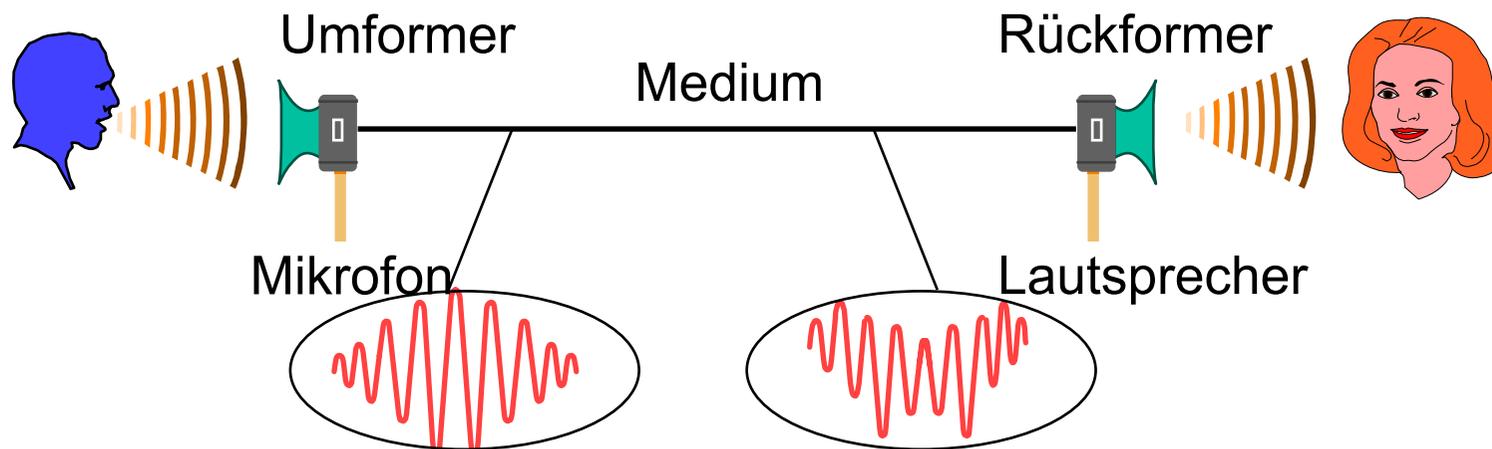




Signalumformung akustisch-elektrisch

- Beispiel: Telefon
 - zeitabhängiges Signal, physikalische Größe

analoges akustisches Signal → analoges elektrisches Signal → analoges akustisches Signal



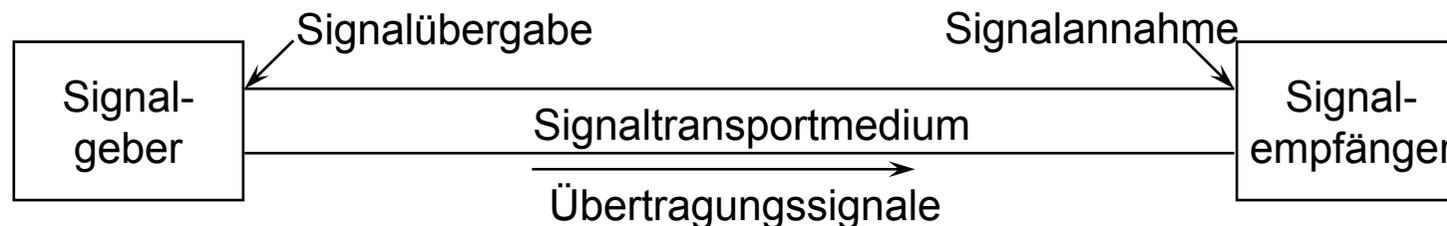
Klassisches Modell des Übertragungssystems Telefon



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

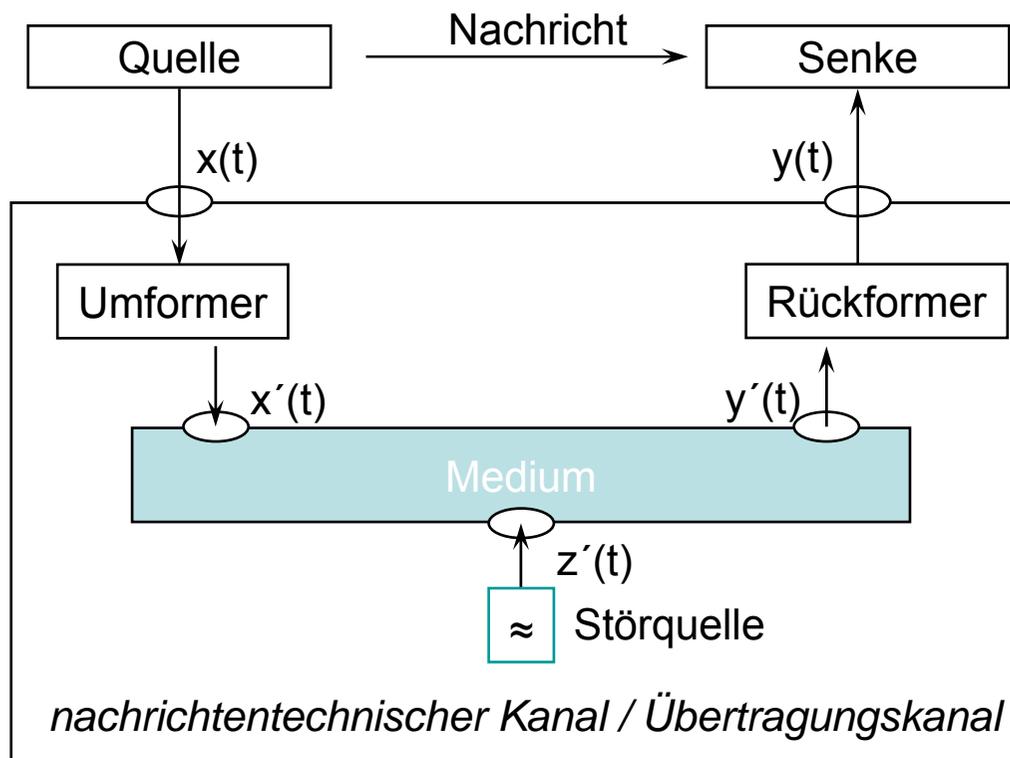
= Übertragungsweg

Signalübertragung wird in der Nachrichtentechnik als Nachrichtenübertragung bezeichnet.



Übertragungssystem: physikalisches Medium

- Verwendung eines physikalischen Mediums zur Übertragung von Nachrichten.



Primärsignale $x(t)$, $y(t)$:
quellen-/senkenbezogene
physikalische Größen.

Signale $x'(t)$, $y'(t)$, $z'(t)$:
leitungsbezogene
physikalische Größen.

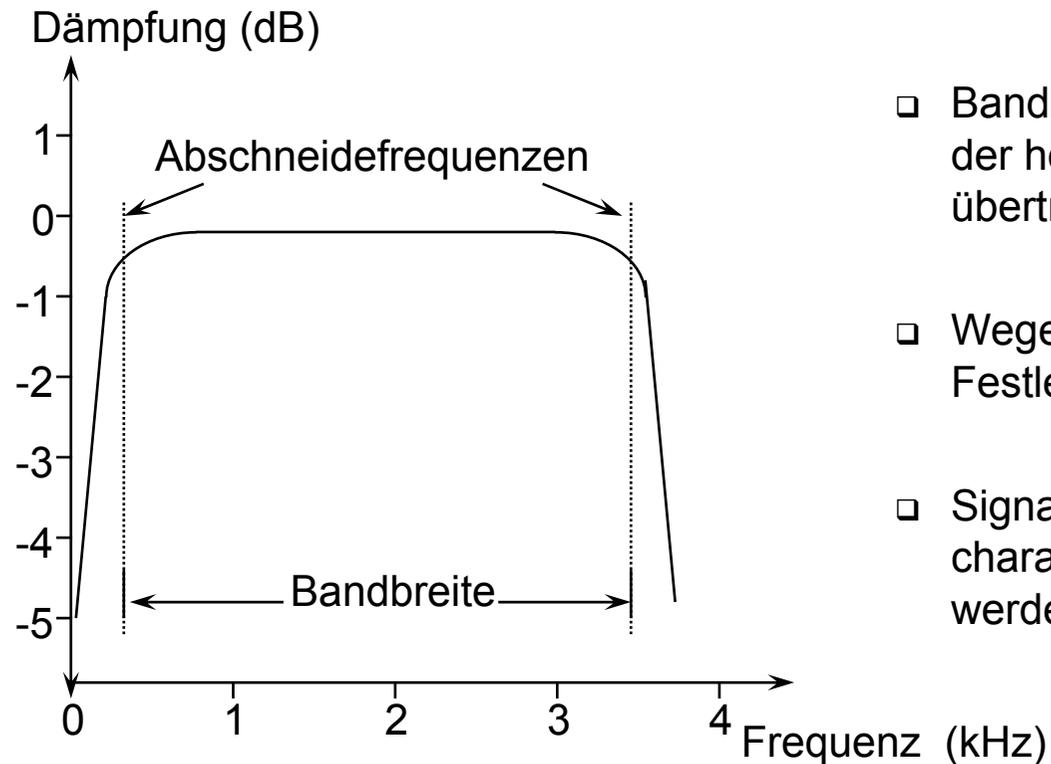
Physikalisches Medium,
z.B. elektrische Leitung:
 $y'(t) = F(x'(t); z'(t))$



Bandbegrenztes Medium

Bandbreite eines Mediums:

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



Bandbreite von Übertragungswegen:

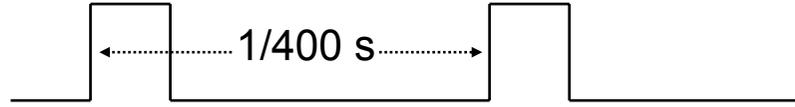
- Bandbreite in Hz: Frequenzbereich, der über ein Medium (einschließlich der im Übertragungssystem enthaltenen Filter, Verstärker usw.) übertragen werden kann.
- Bandbreite ergibt sich aus der Differenz der höchsten und niedrigsten übertragbaren Frequenzen.
- Wegen nicht-idealer Bandbegrenzungen Festlegung von Abschneidefrequenzen.
- Signale müssen an die Übertragungscharakteristik des Mediums angepasst werden.



Einfluss der Bandbreite eines Übertragungssystems auf ein digitales Signal

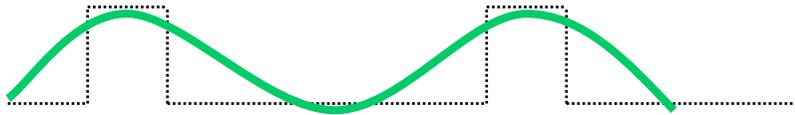
Bitcode: 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0

Schrittfrequenz
2000 Schritte/s



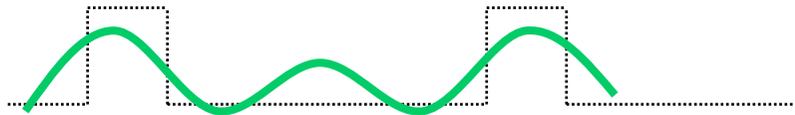
Ideal, würde aber **unendliche** Bandbreite benötigen!

Bandbreite 500 Hz



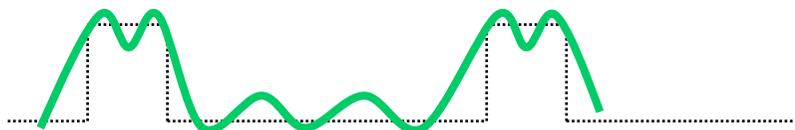
nur 1. Harmonische

Bandbreite 900 Hz



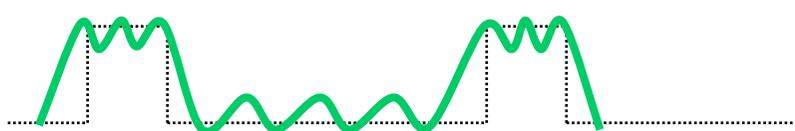
1.+2. Harmonische

Bandbreite 1300 Hz



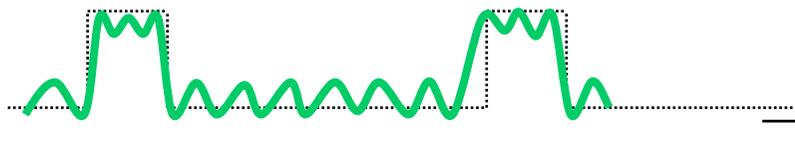
1.-3. Harmonische

Bandbreite 1700 Hz



1.-4. Harmonische

Bandbreite 2100 Hz



1.-5. Harmonische

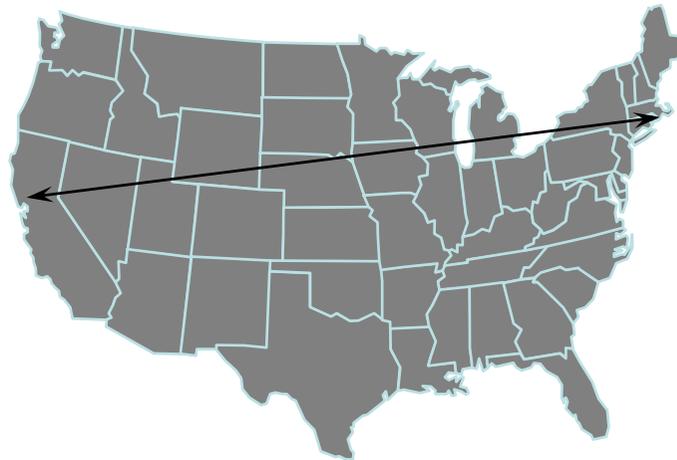
□ Später:

- Nyquist-Theorem zur Ermittlung der notwendigen minimalen Bandbreite zur Übertragung zeitdiskreter Signale mit gegebener Schrittgeschwindigkeit



Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Signalen

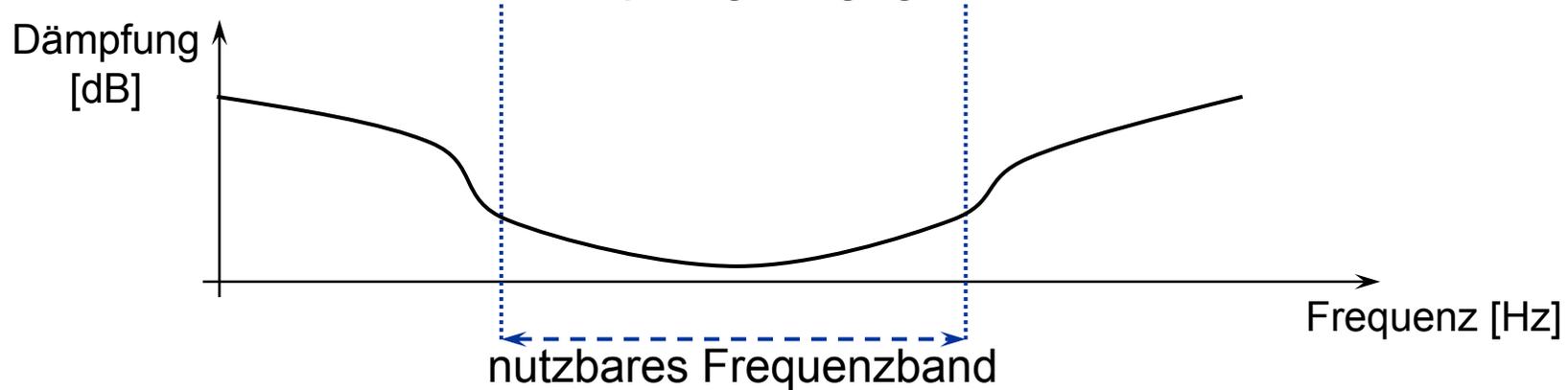
- Optimum: Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) im Vakuum
- Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen: etwa $2/3 c = 2 \cdot 10^8$ m/s
- Durch die begrenzte Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat das Medium eine Speicherkapazität.
- Beispiel: Datenübertragung von MIT nach Berkeley:
 - Strecke: 5000 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



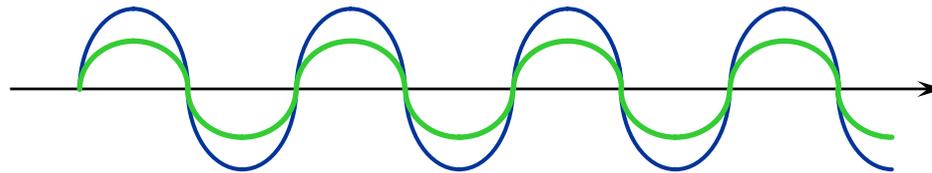


Kenngrößen medienbedingter Abweichungen

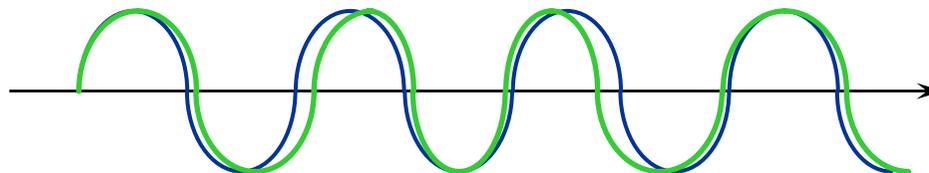
- **Bandbreite:** durch die Dämpfung vorgegeben



- **Dämpfungsverzerrung:** Amplitudenschwund, Amplitudensprünge

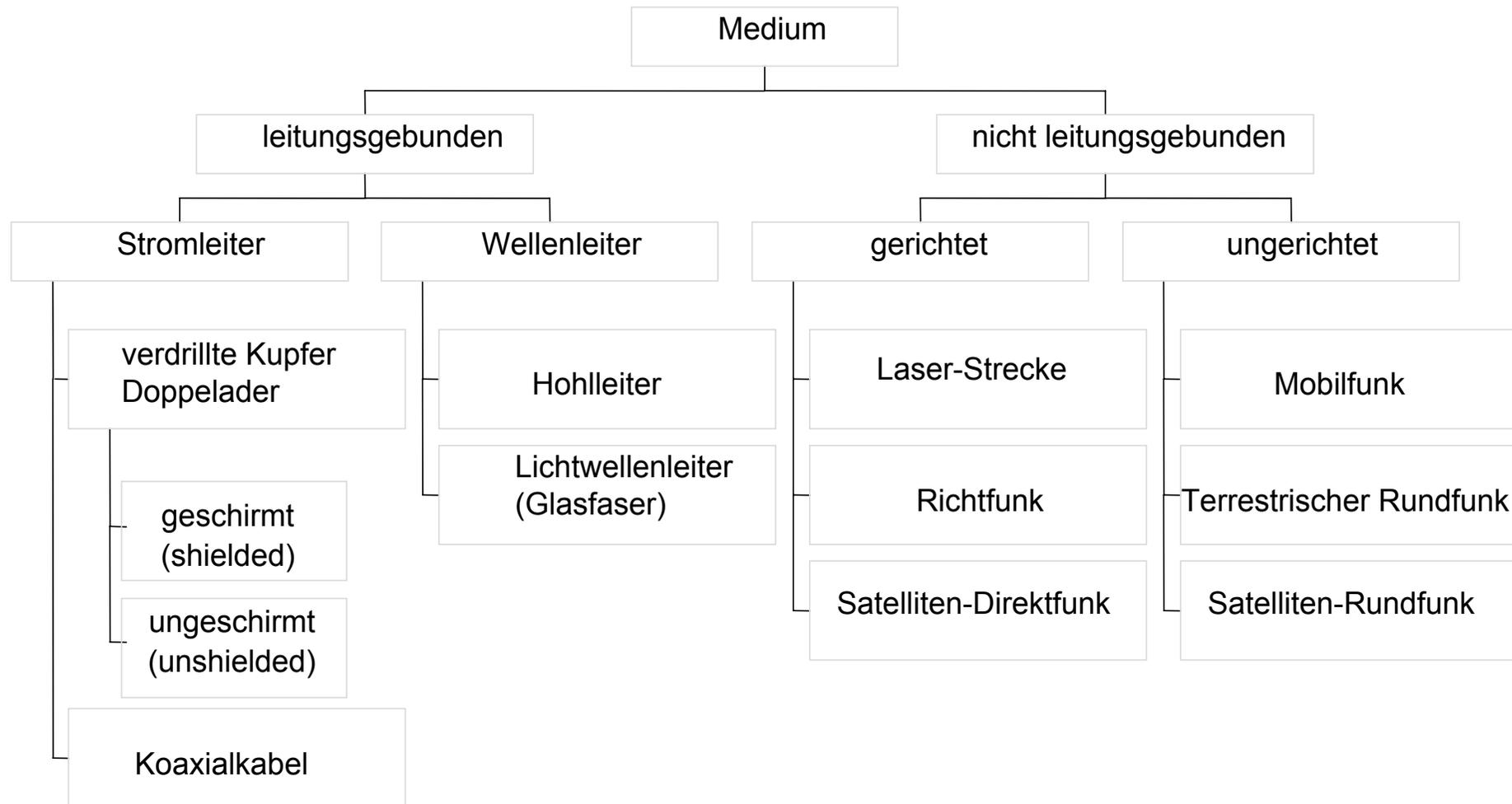


- **Laufzeitverzerrung:** Frequenzverwerfung, Phasenschwankungen (Jitter)





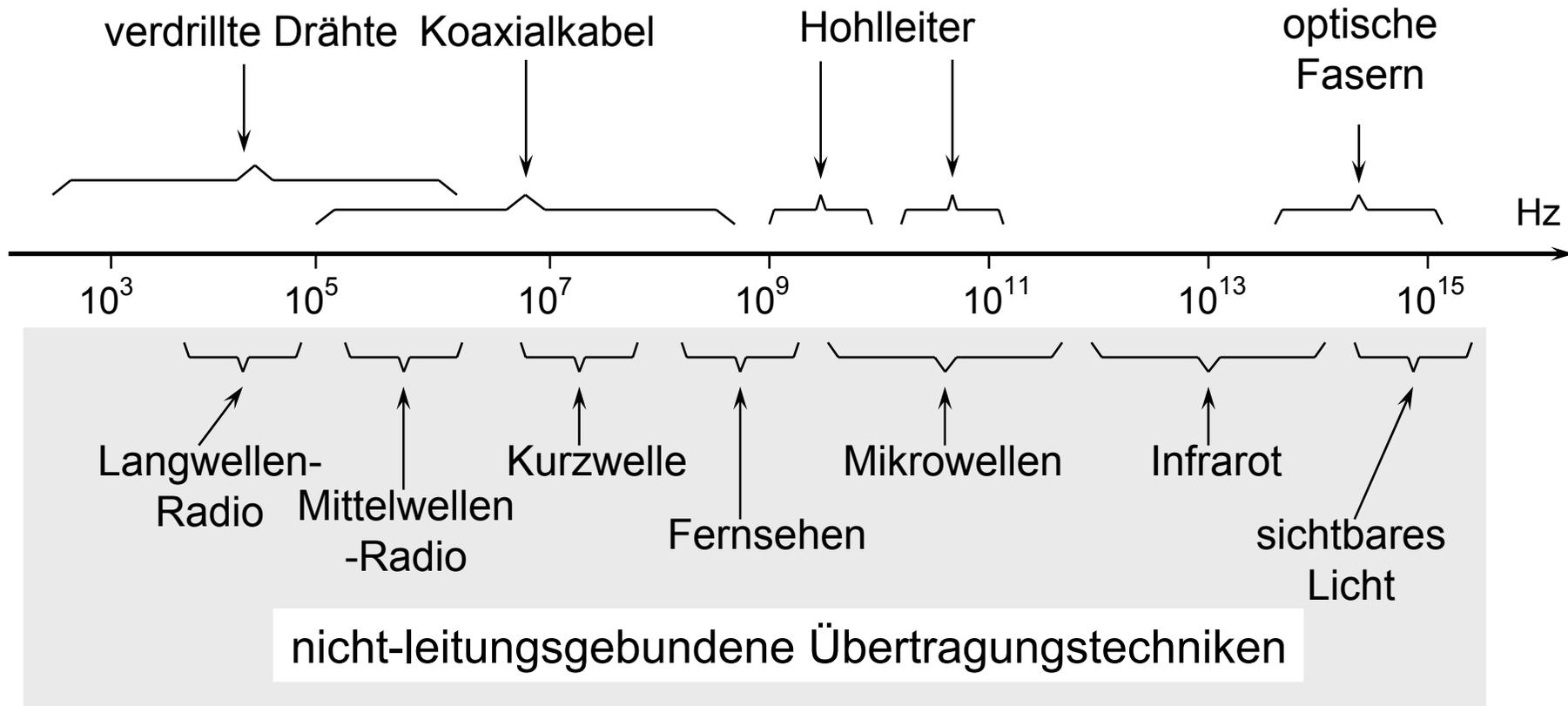
11.3. Medien: Klassifikation





Nutzung des elektromagnetischen Spektrums

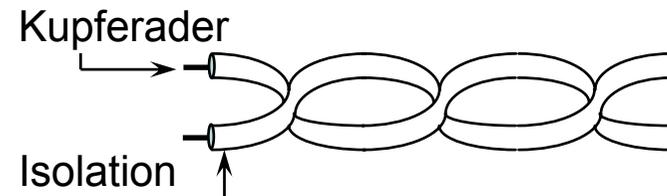
leitungsgebundene Übertragungstechniken





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 (sog. Kategorien), z. B. CAT 3, 4, 5, 6, 7, für Betriebsfrequenzen z.B. bis zu 600 MHz (CAT 7)
 - Häufig UTP, aber auch mit zusätzlicher Kupferummantelung (STP, shielded twisted pair)
 - ggf. auch zusätzliche Gesamtabschirmung (in Form einer Geflechschirmung) in einem Kabel mit mehreren Doppeladern: screened/unshielded twisted pair (S/UTP) und screened/shielded twisted pair (S/STP)

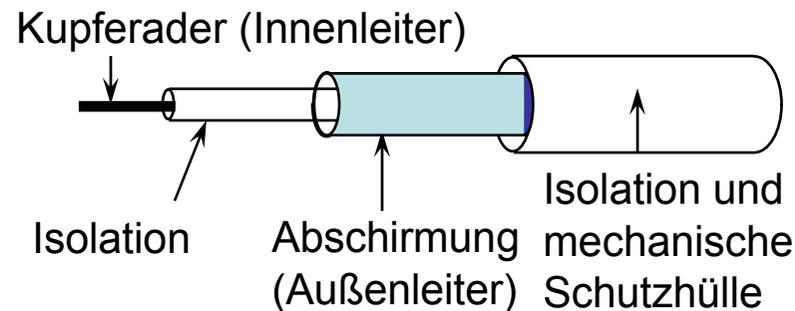


Hinweis: Die Verwendung einer Doppelader ist aus elektrischen Gründen notwendig. Hin- und Rückleiter im elektrischen Stromkreis!



Koaxialkabel

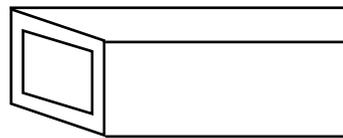
- *Koaxialkabel (coax)*
 - Gehören zur Kupferkabeltechnik, da Innenleiter aus Kupfer besteht.
 - *Außenleiter* umschließt *Innenleiter* zylindrisch.
 - Dazwischen befindet sich ein *Dielektrikum* aus Kunststoffen oder Gasen.
 - Die Signalausbreitung erfolgt im Dielektrikum zwischen den beiden Leitern.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





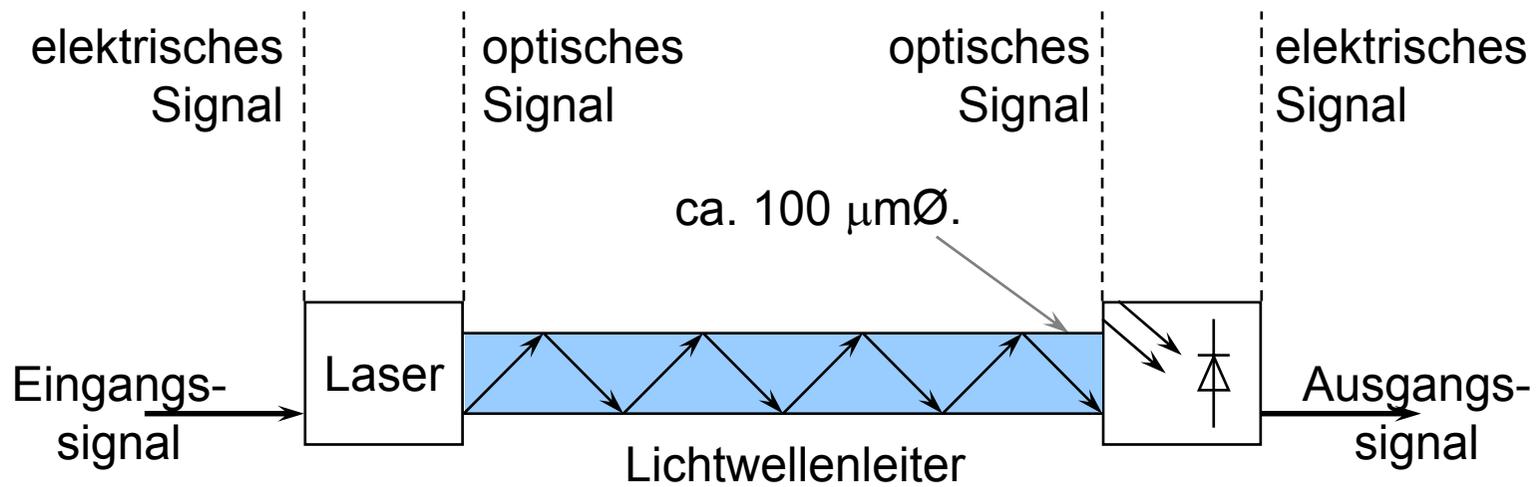
Hohlleiter

- *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 z.B. in der Richtfunk-/Radartechnik (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)



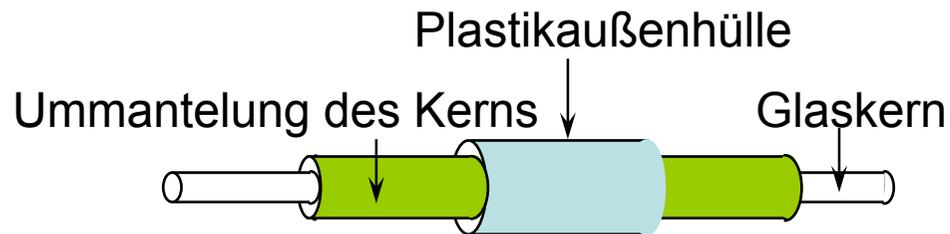


Lichtwellenleiter (Glasfaser)

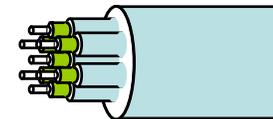




Glasfaser - Typen



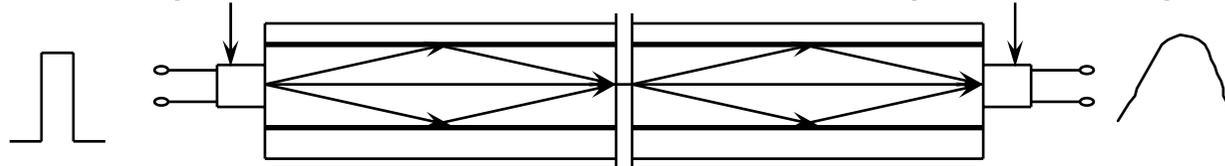
Single core



Multicore

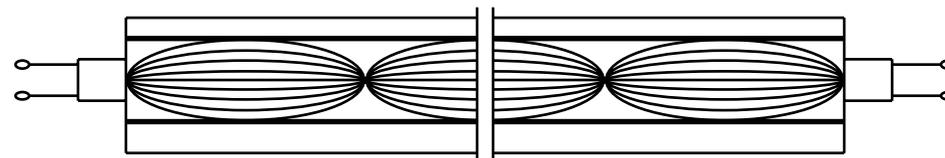
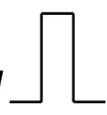
Optischer Sender

Optischer Empfänger



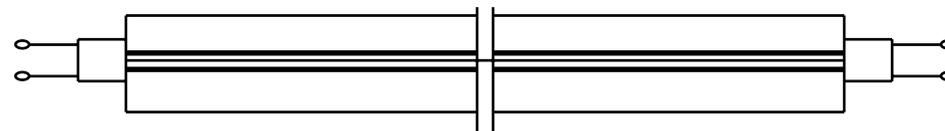
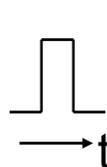
(i) Multimode-Faser mit Stufenindex

Elektrisches
Eingabesignal



Elektrisches
Ausgabesignal

(ii) Multimode-Faser mit Gradientenindex

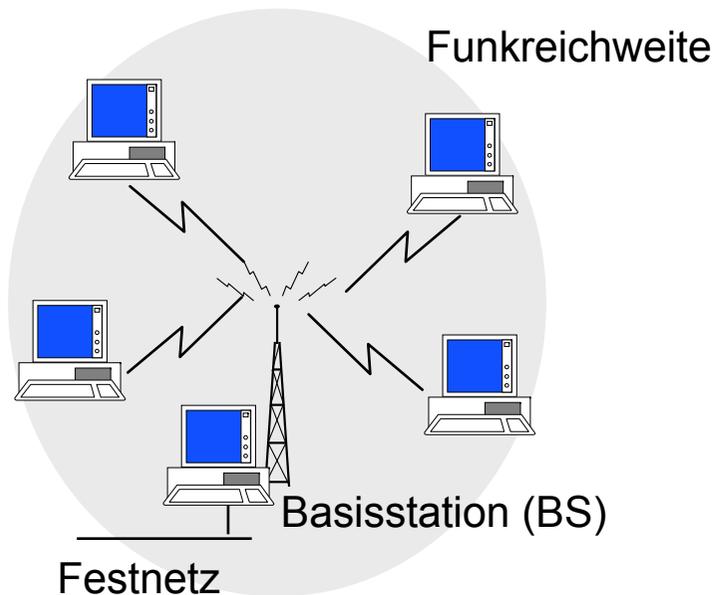


(iii) Monomode-Faser

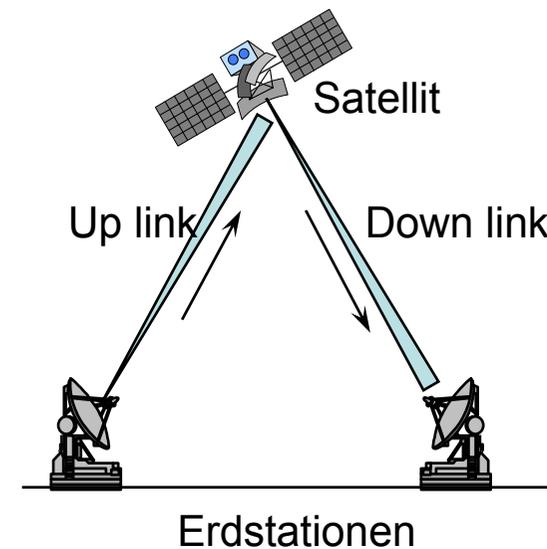




11.3.2. nicht leitungsgebundene Medien Funk- und Satellitentechnik



- 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



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



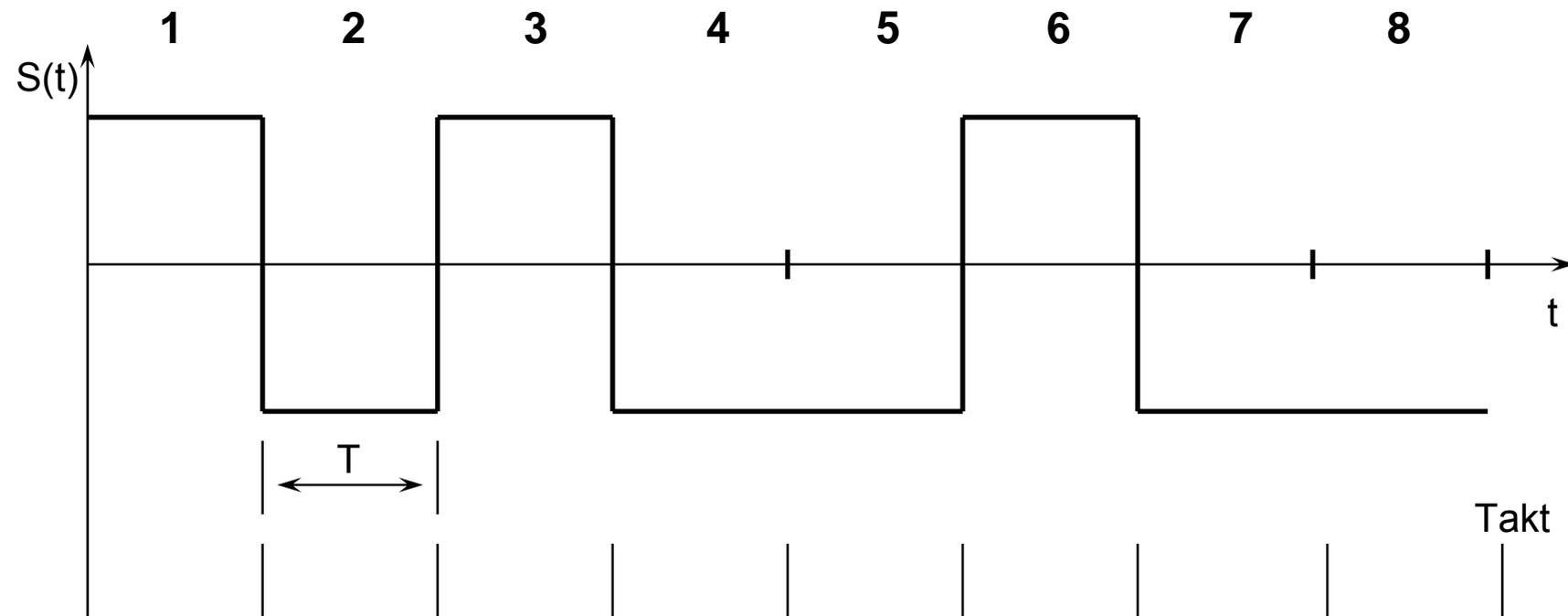
11.4.1. Digitale Signalübertragung

- **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)

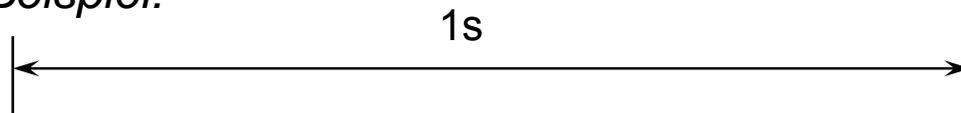


Schrittgeschwindigkeit - Beispiel

Schrittfolge:



Beispiel:



⇒ Schrittgeschwindigkeit 5 baud



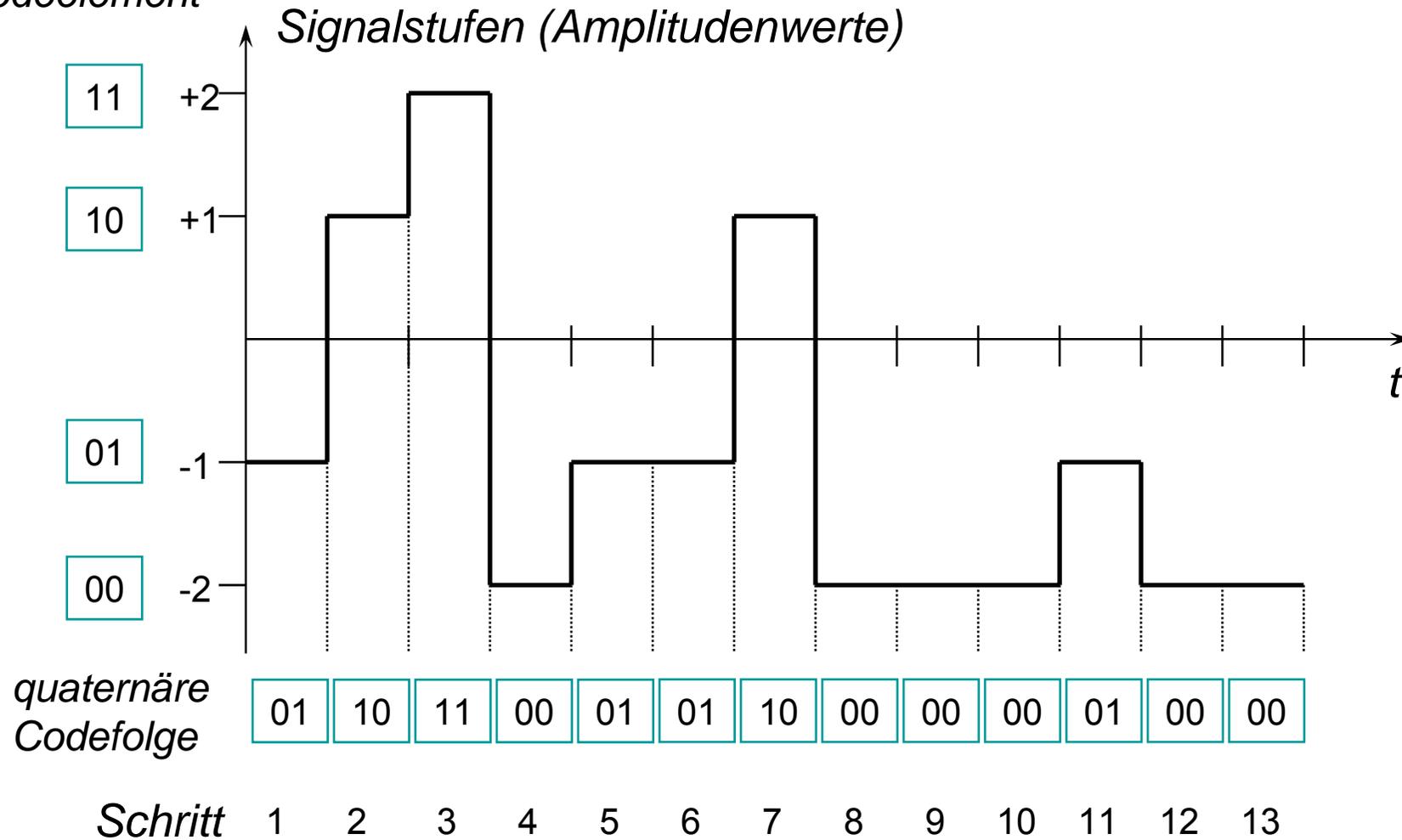
Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

- **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





Schritt- versus Übertragungsgeschwindigkeit

- **Schrittgeschwindigkeit** v_s (**symbol rate**, modulation rate, digit rate)
 - Gibt - anschaulich - die Zahl der ggf. nur potenziellen Signalparameter-Zustandswechsel an (Schrittumschläge).
 - Für isochrone Digitalsignale gilt: $v_s = 1/T$ (T: Schrittdauer)
 - **Einheit: 1/s = baud** (Abk. bd)

- **Übertragungsgeschwindigkeit** Φ (**Einheit: bit/s**)
 - Für zweiwertige Signale (binäre Signale):
Jeder Schrittumschlag codiert ein Bit. Deshalb gilt in diesem Fall:
$$v_s \text{ (in baud)} = \Phi \text{ (in bit/s)}$$
Die Übertragungsgeschwindigkeit wird in diesem Fall als *Bitrate (bit rate)* bezeichnet.
 - Für mehrstufige Signale (mit n möglichen Wertestufen):
Übertragungsgeschwindigkeit Φ (in bit/s): $\Phi = v_s * \log_2(n)$
Bei DIBIT-Codierung: 1 baud = 2 bit/s (quaternäres Signal)
Bei TRIBIT-Codierung: 1 baud = 3 bit/s (oktonäres Signal)



Synchronisation bzgl. Abtastzeitpunkte

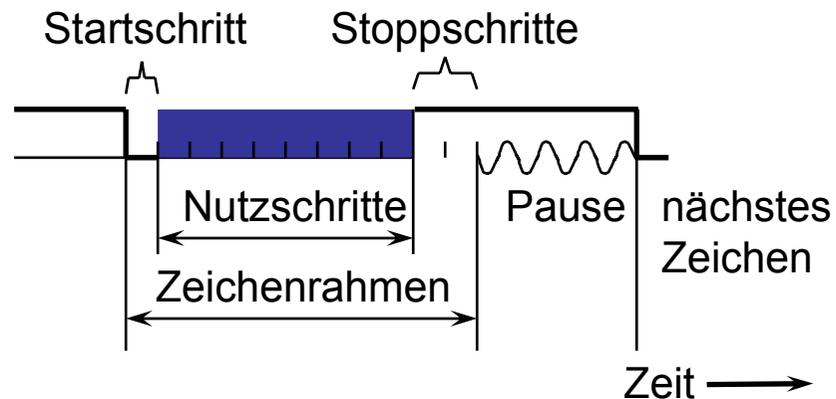
- **Abtastzeitpunkte:**
 - Zeitpunkte, an denen die Senke den Signalverlauf $y'(t)$ für das aktuelle Zeitintervall zur Ermittlung des Signalwertes abtastet.

- **Verfahren zur Erzielung von Gleichlauf (Synchronisation):**
 - Sende- 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*



Synchronisation durch Taktrasterübertragung

Zeichenweiser Start/Stopp-Betrieb (Asynchronbetrieb)



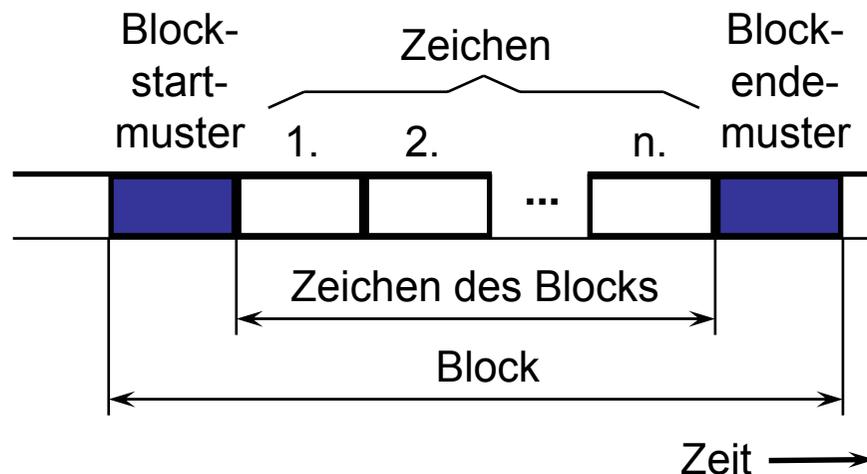
Voraussetzung:

- Ruhepegel
- feste Zahl von Nutzschriften

Nachteil:

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

Blocksynchronisation (Synchronbetrieb)



Voraussetzung:

- Blockstart-/endemuster eindeutig

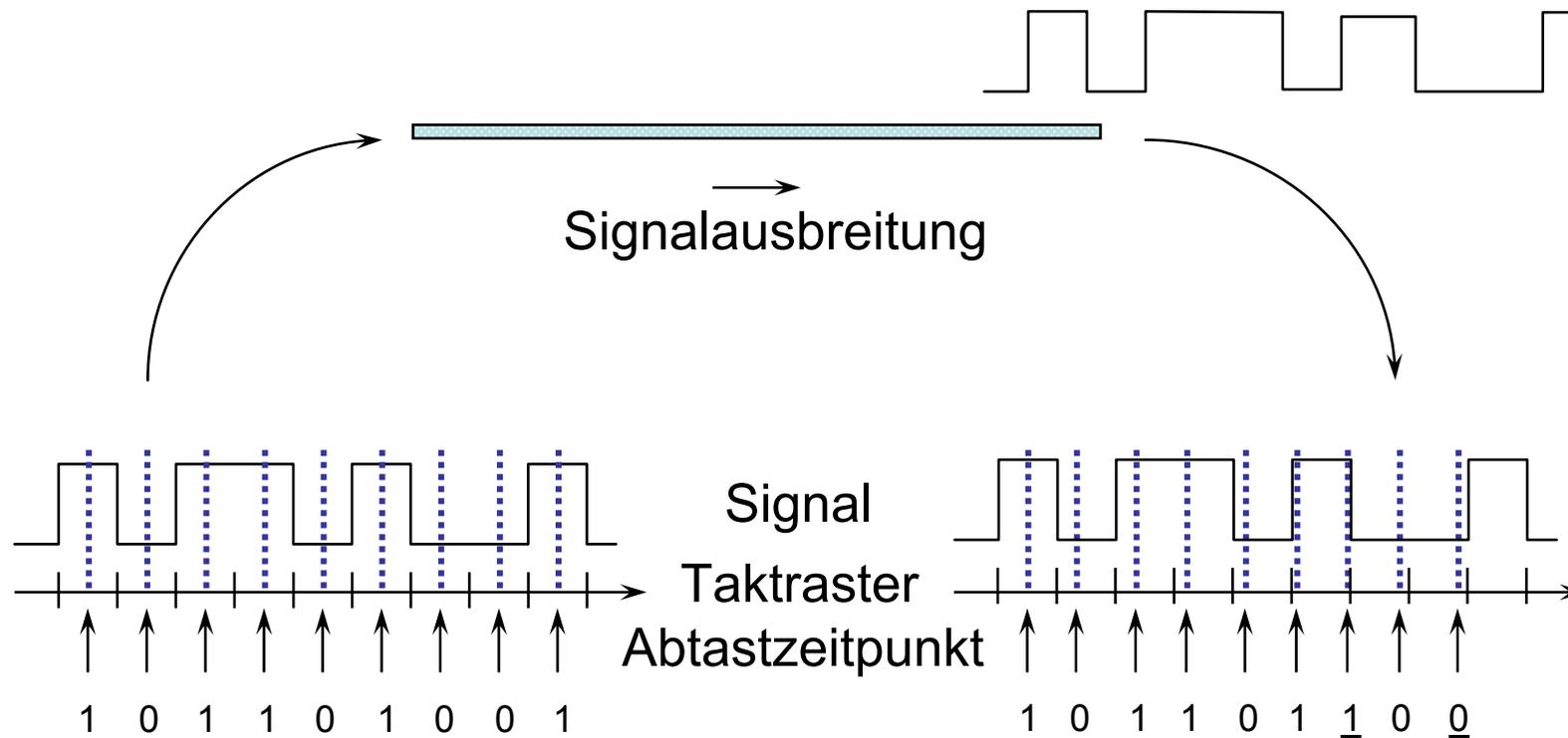
Maßnahme:

- Modifikation/Rückgängigmachen entsprechender Muster im Block (Bitstopfen)



Bitfehler durch fehlerhafte Synchronisation

- Beispiel:





Übertragungsstörung durch Rauschen

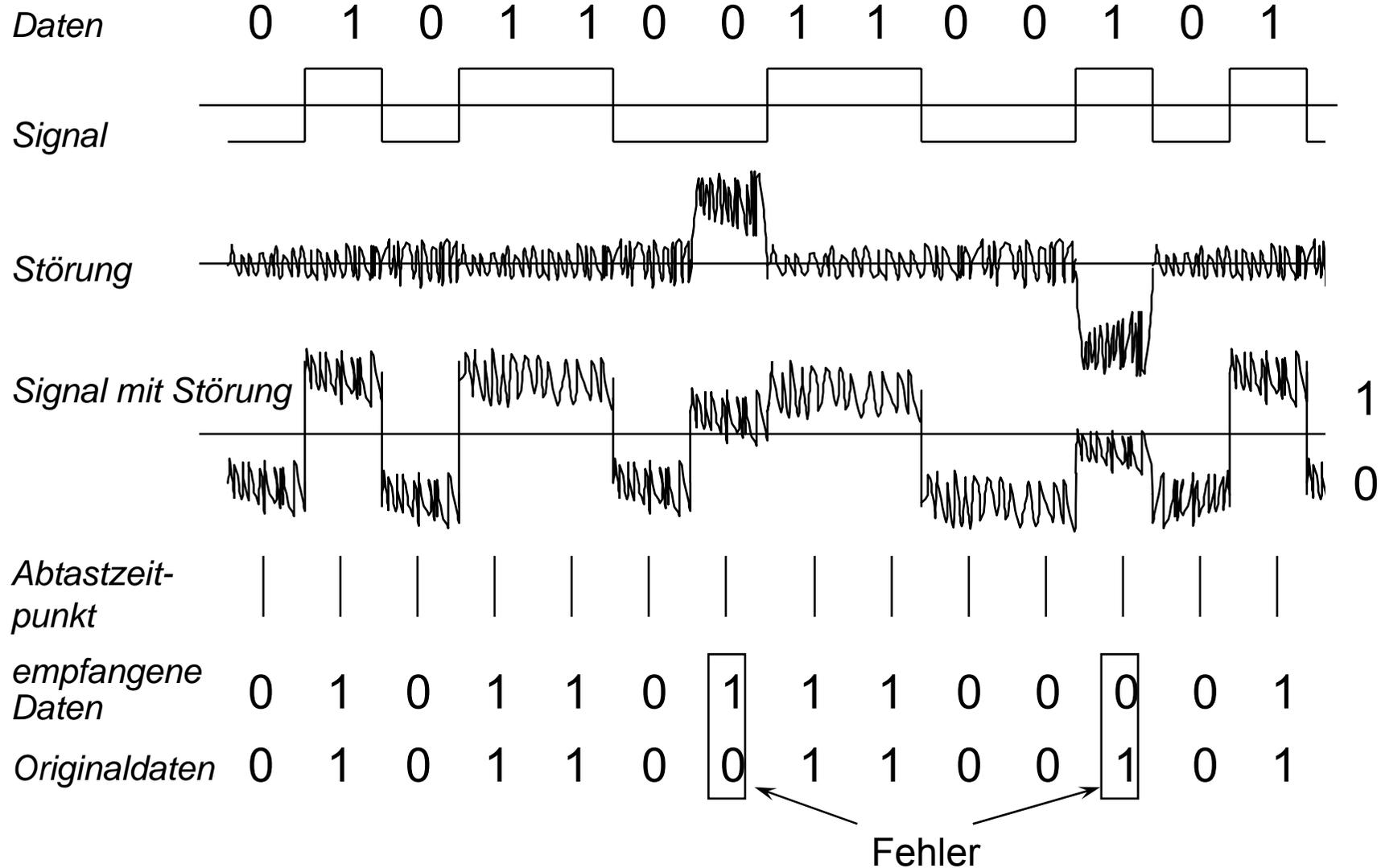
- Neben der systematischen Beeinflussung des Signals durch
 - Dämpfung
 - Laufzeitverzerrungenkönnen Signalstörungen durch
 - transiente, stochastische Prozesse
 - weißes Rauschen
 - Impulsstörungenauftreten.

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



Bitfehler durch transiente Störungen

□ Beispiel:





Nyquist-Kriterium und Shannon-Kanalkapazität

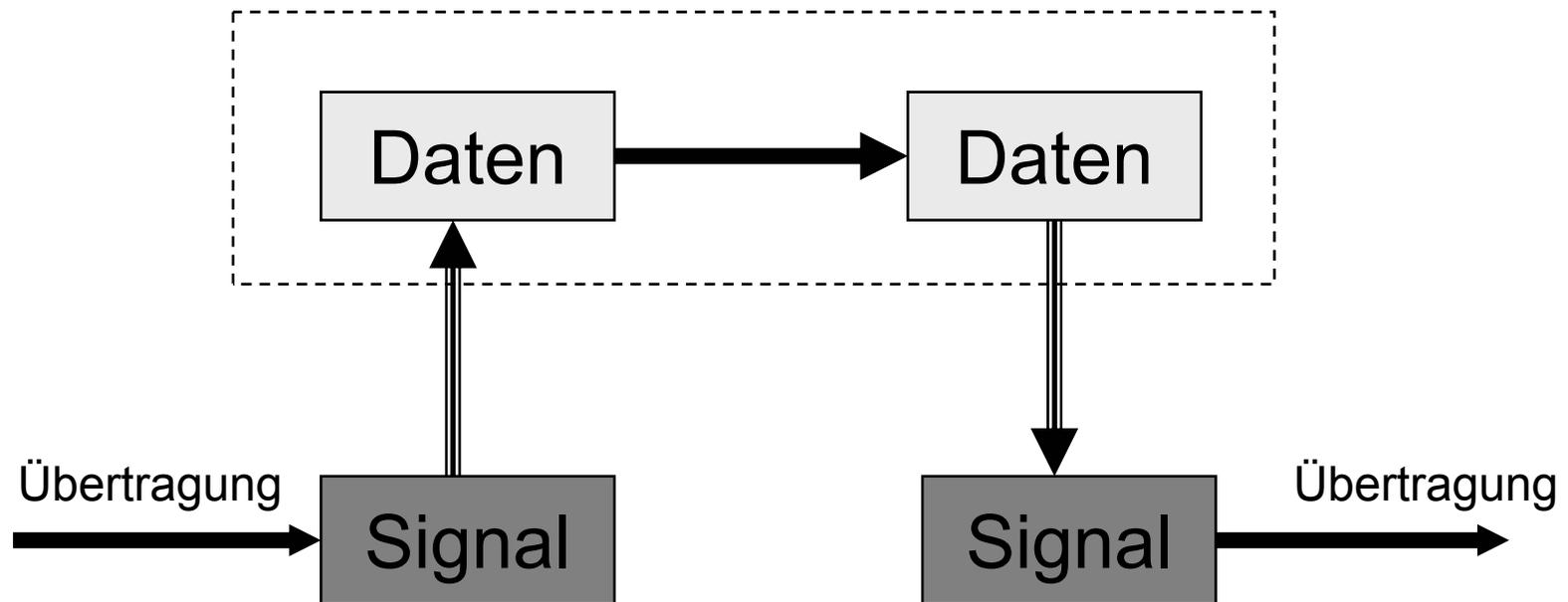
- 1924, H. Nyquist:
Maximale Schrittgeschwindigkeit für einen **Kanal mit eingeschränkter Bandbreite**:
$$v_s = 2 B$$
mit $B =$ Bandbreite des Kanals
- Daraus ergibt sich eine maximale Datenrate für einen **rauschfreien** Kanal:
max. Datenrate = $v_s \text{Id}(n)$
$$= 2 B \text{Id}(n) \quad [\text{bit/s}]$$
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 = $B \text{Id}(1+S/N)$ $[\text{bit/s}]$
mit $S/N =$ Signal-Rauschverhältnis
- Bsp.: Kanal mit 3.000 Hz Bandbreite, $S/N = 1000 = 30\text{dB}$ ¹⁾
→ max. Datenrate: 30.000 bit/s
Durch Verwendung von fehlererkennenden bzw. -korrigierenden Codes (Redundanz!) wird aber mit höherer Rate gesendet!

¹⁾ 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



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)

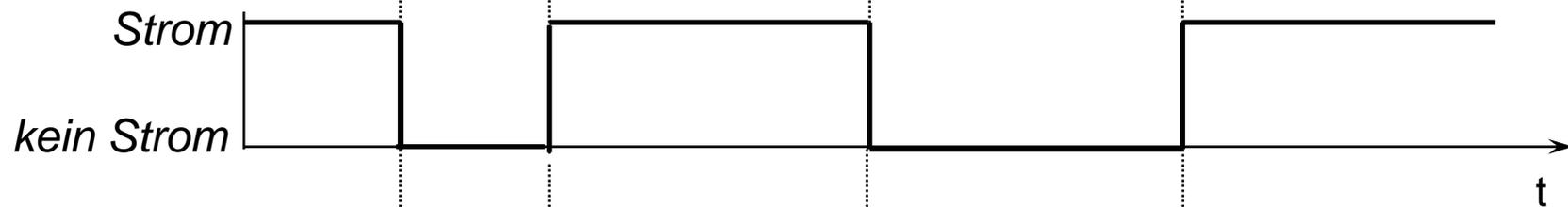


Einfachstrom/Doppelstrom-Verfahren

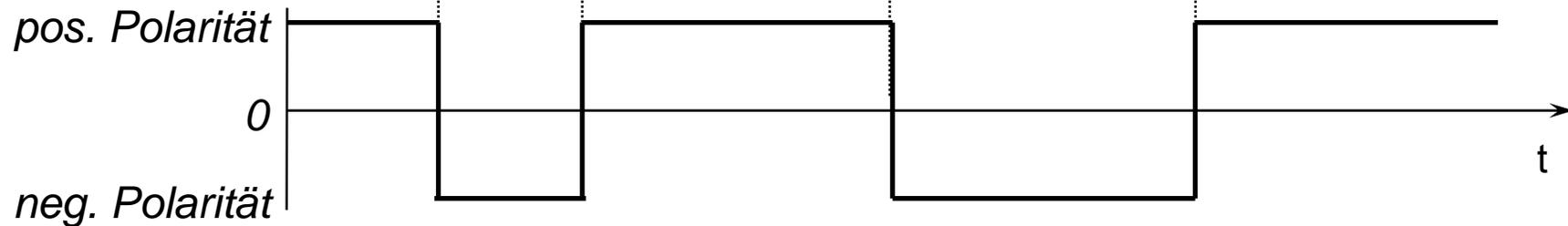
Zu übertragende Daten:

1 0 1 1 0 0 1 1

Einfachstrom:



Doppelstrom:



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

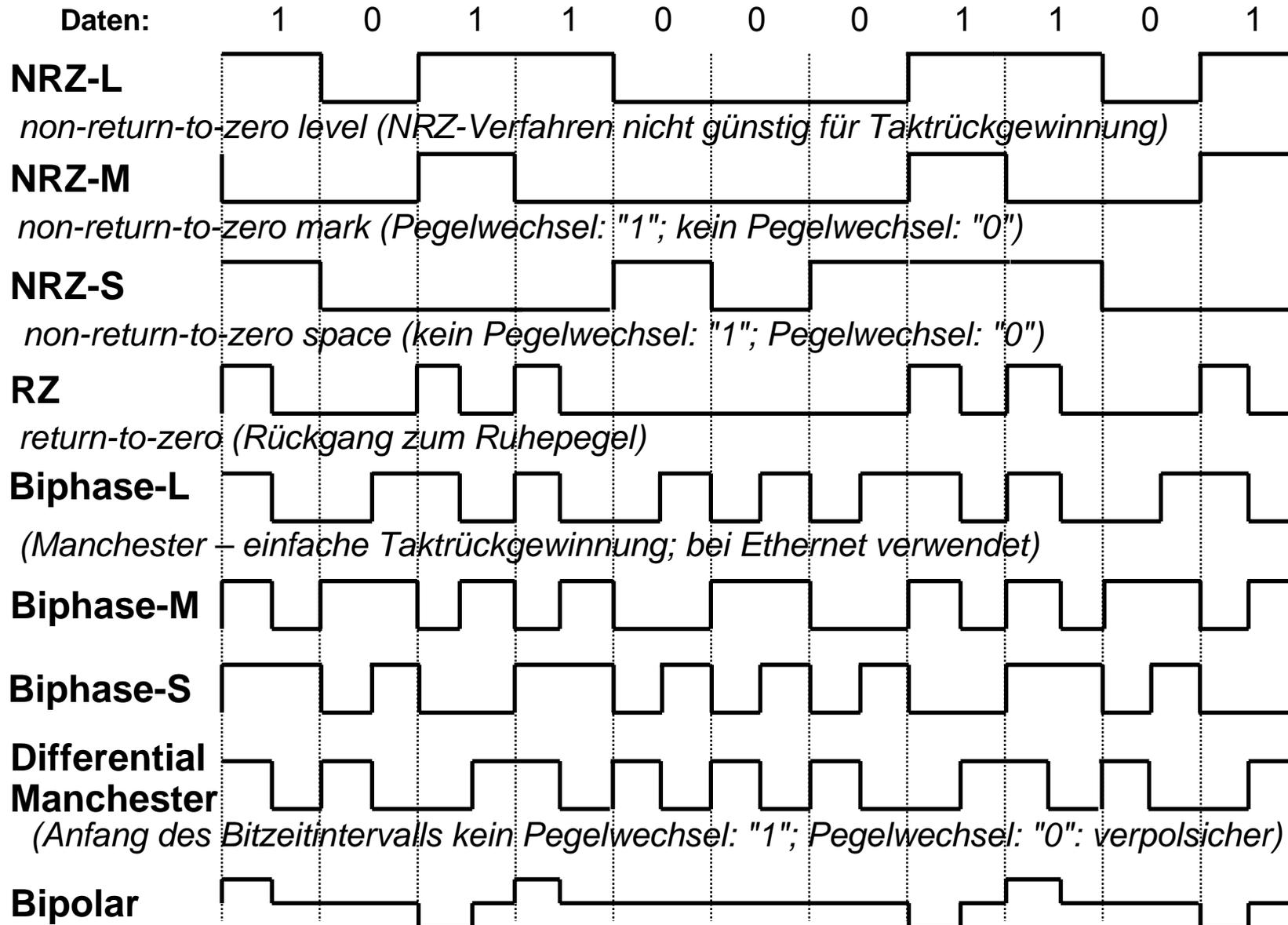


Moderne Basisbandverfahren

- 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
- **Leitungscodes, Übertragungscodes:**
 - Die Zuordnungsvorschrift
digitales Datenelement → *digitales Signalelement*
wird als Signal- bzw. Leitungscodierung bezeichnet.
 - Die sich ergebenden zeit- und wertdiskreten Signalverläufe heißen:
Leitungscodes bzw. Übertragungscodes



Moderne Basisbandverfahren - Beispiele





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

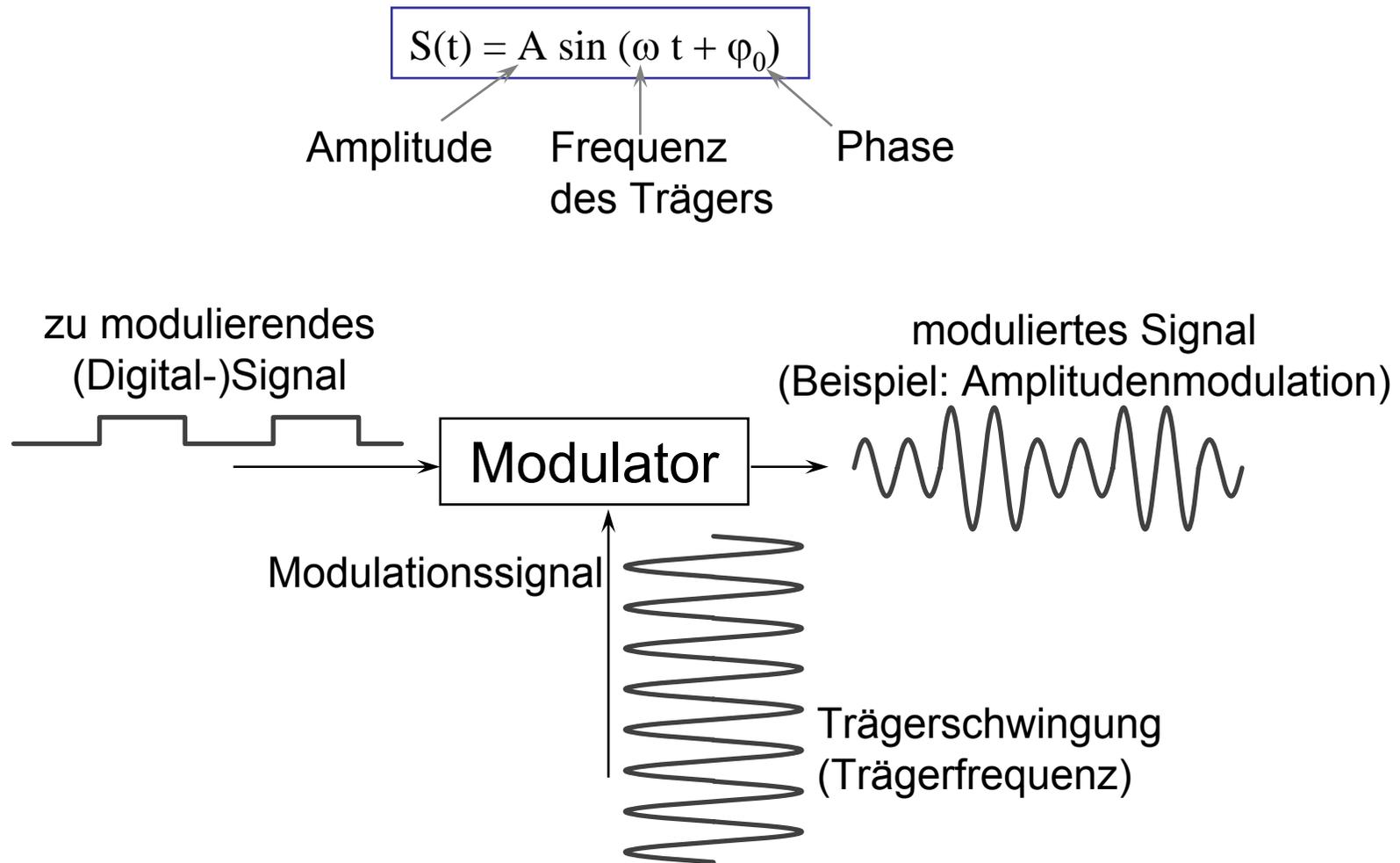


Übertragungsverfahren mit Träger - Begriffe

- 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)



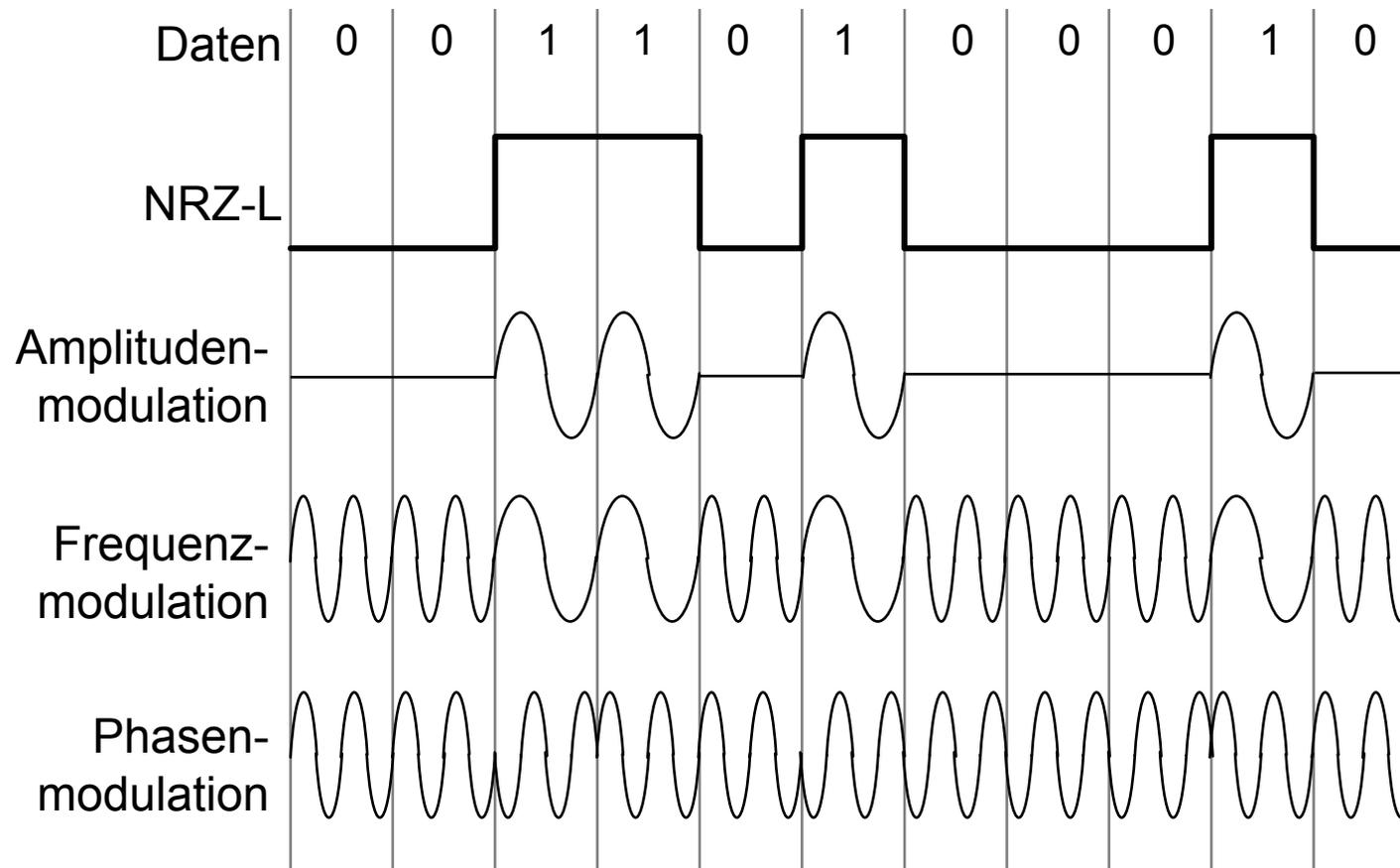
Prinzip der Schwingungsmodulation



Schwingungsmodulation: analoger Signalträger ist Sinusschwingung



Arten der Schwingungsmodulation





Klassisch: Äquivalenzliste nach ITU V.1

		Binärzeichen 0	Binärzeichen 1
<i>Gleichstrom- betrieb</i>	Doppelstrom	negativ	positiv
	Einfachstrom	kein Strom	Strom
<i>Wechsel- strom- betrieb</i>	Amplituden- modulation	kein Ton	Ton
	Frequenz- modulation	hohe Frequenz	tiefe Frequenz
	Phasendifferenz- modulation	keine Phasendrehung	Phasendrehung um 180°
	Phasenmodulation mit Bezugsphase	Gegenphase	Bezugsphase



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 Übertragungskanals in beide Richtungen:
Richtungsmultiplex oder Duplex

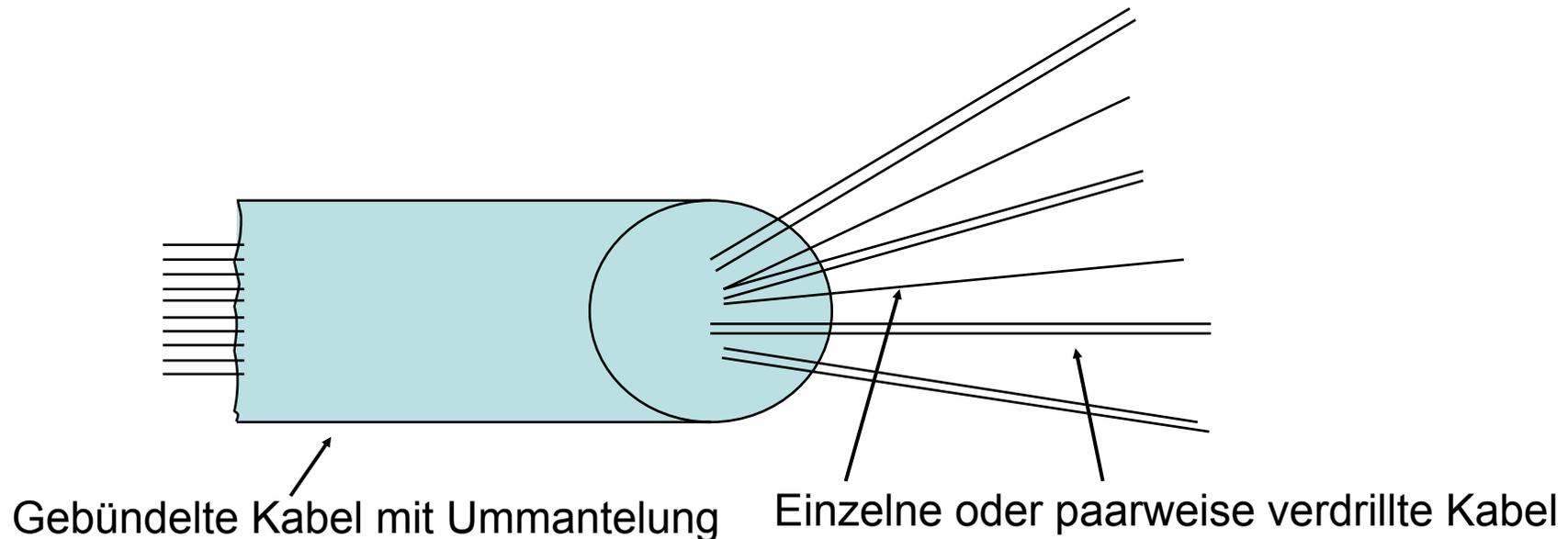


Raummultiplex

- Bündelung vieler Einzelübertragungswege heißt:

Raummultiplex

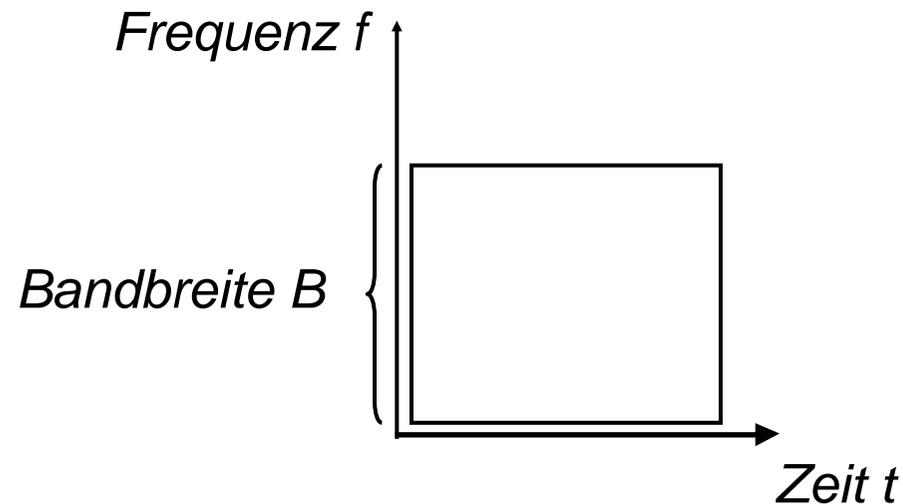
- Beispiele: mehrspurige Autobahn, Leitungsnetz zwischen Fernvermittlungsstellen der Telekom





Übertragungskapazität eines Nachrichtenübertragungssystems

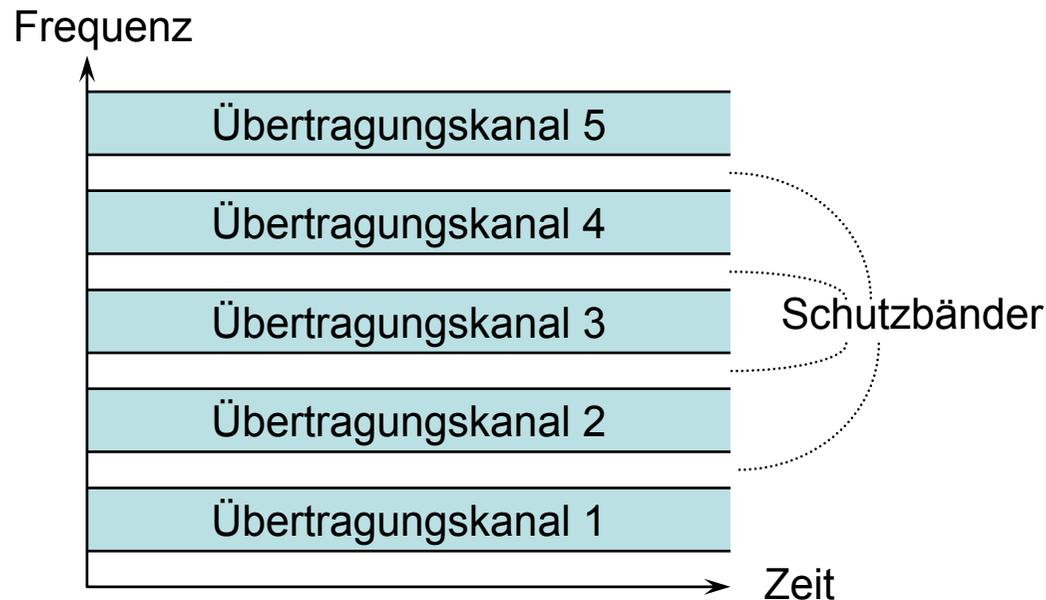
- Zeitgesetz der Nachrichtenübertragungstechnik:
 - integrale **Übertragungskapazität** eines Systems = Produkt der Bandbreite (Frequenzbereich) und der zur Verfügung stehenden Zeit
(Achtung: idealer Fall ohne Störungen bei binärem Signal)





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.



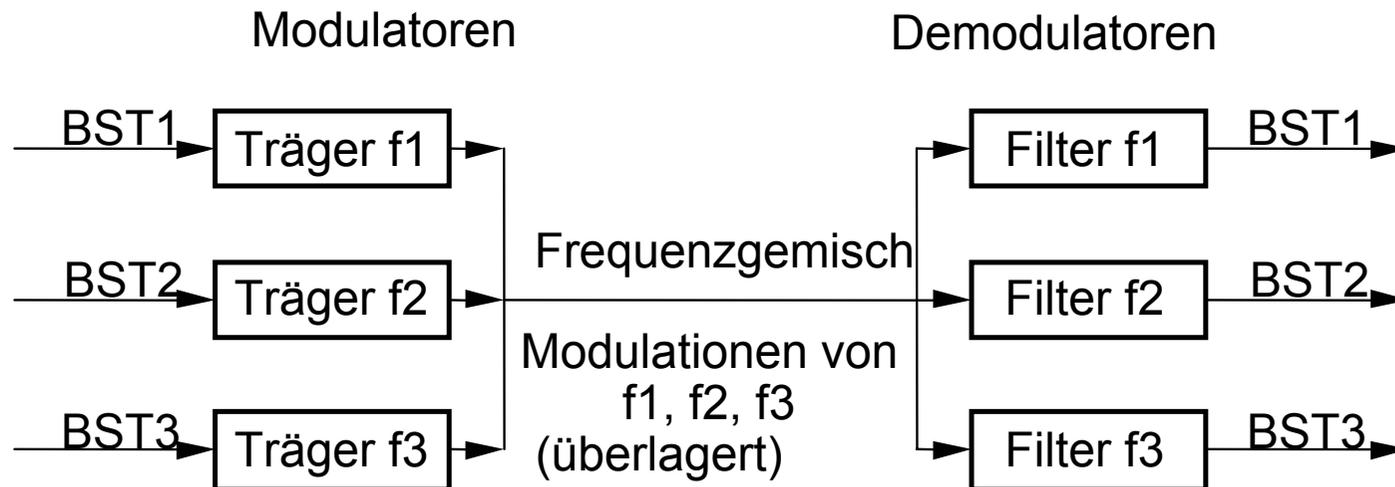
*Nutzung der Übertragungskapazität eines Übertragungsweges
im Frequenzmultiplex*



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

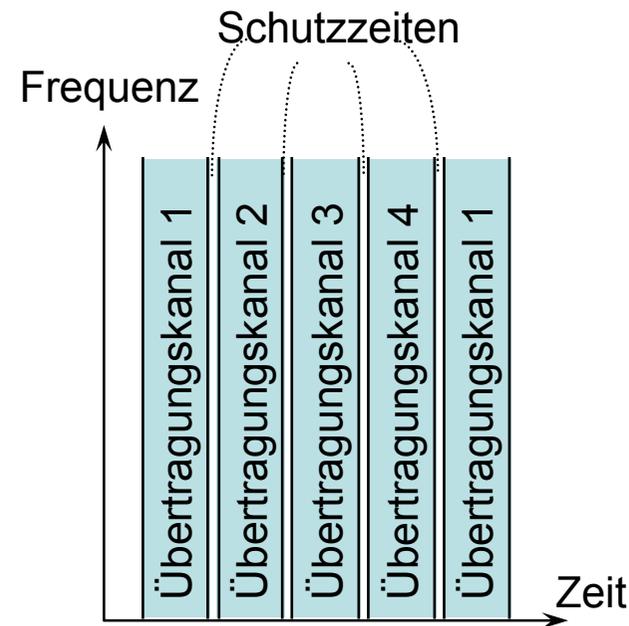


Schema der technischen Realisierung eines Frequenz-Multiplexsystems
BSTx = Bitstrom x



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.

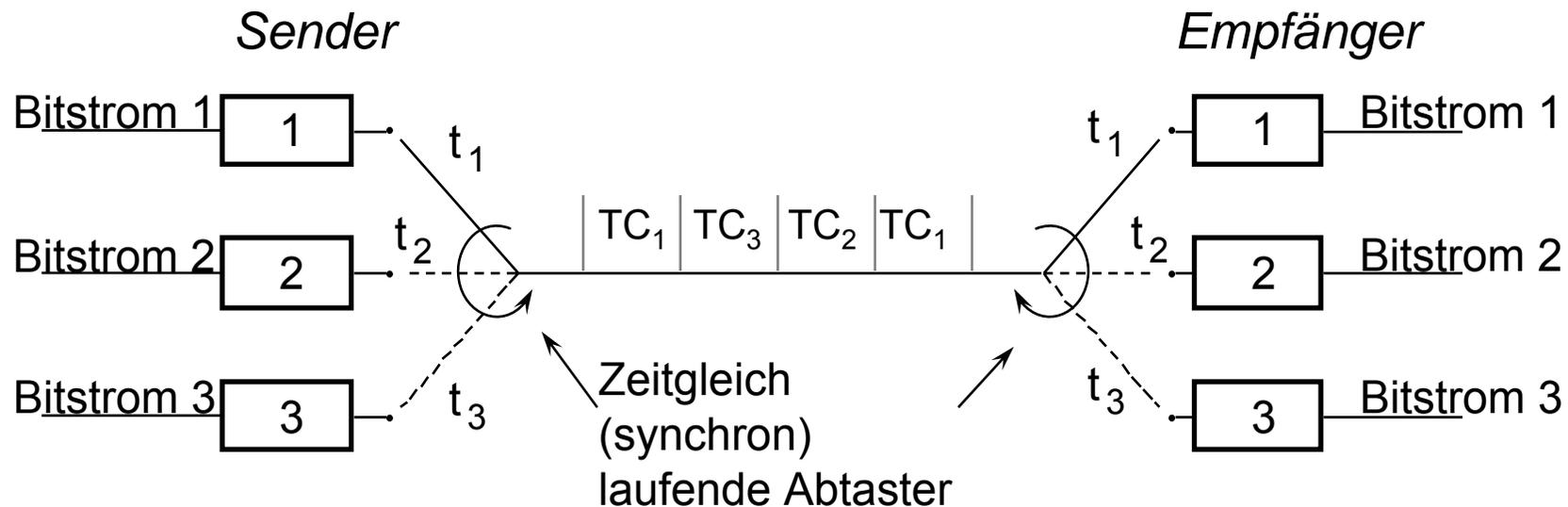


Nutzung der Übertragungskapazität im Zeitmultiplex



Eignung des starren Zeitmultiplex

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

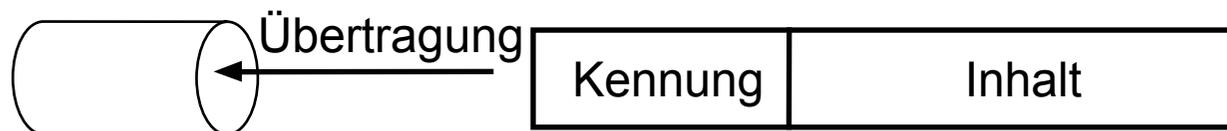


- Festes Zeitmultiplex mit starrer Zeitscheibenzuteilung.
- Übertragungseinheit z. B. ein Bit, ein Byte (Oktett).
- Jedem Sender wird periodisch eine Zeitscheibe (time slot, time slice) TC_1 , TC_2 TC_n zugeteilt. Sender, Abtaster und Detektionsmechanismus beim Empfänger laufen im gleichen Takt: synchrone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



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.).

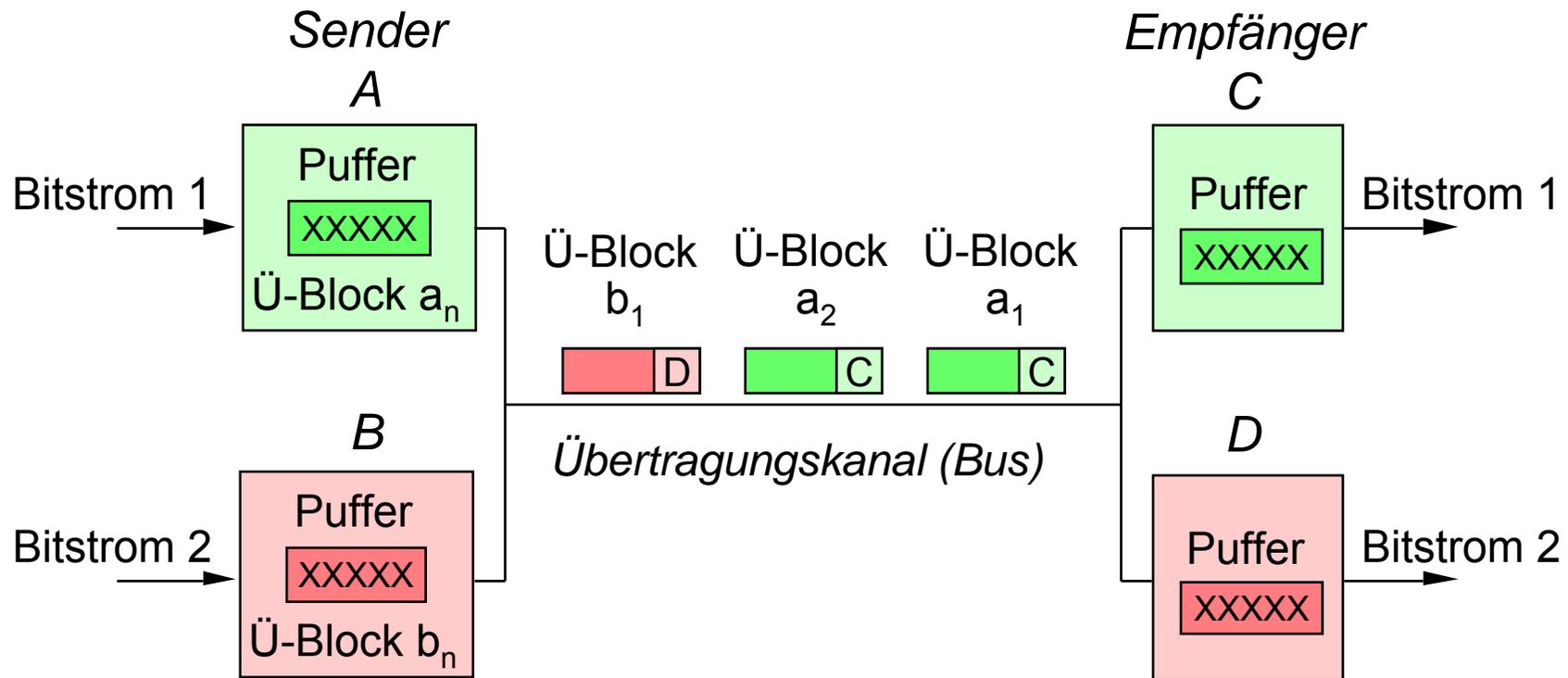


Schematischer Aufbau eines Übertragungsblocks mit Kennung

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



Schema des anforderungsgesteuerten Zeitmultiplex



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



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:**

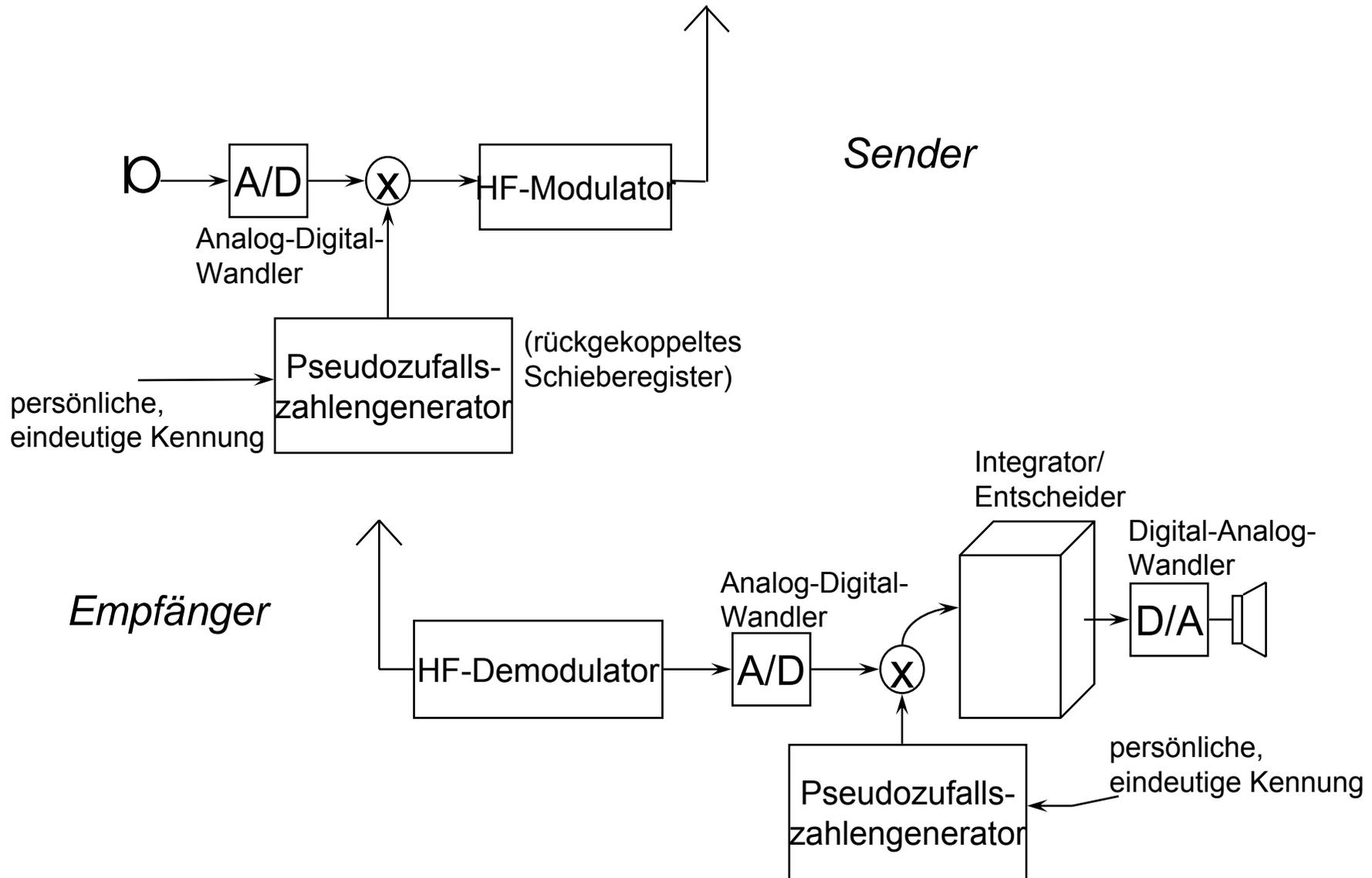
- höhere Komplexität der Implementierung wg. Signalregenerierung

□ **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

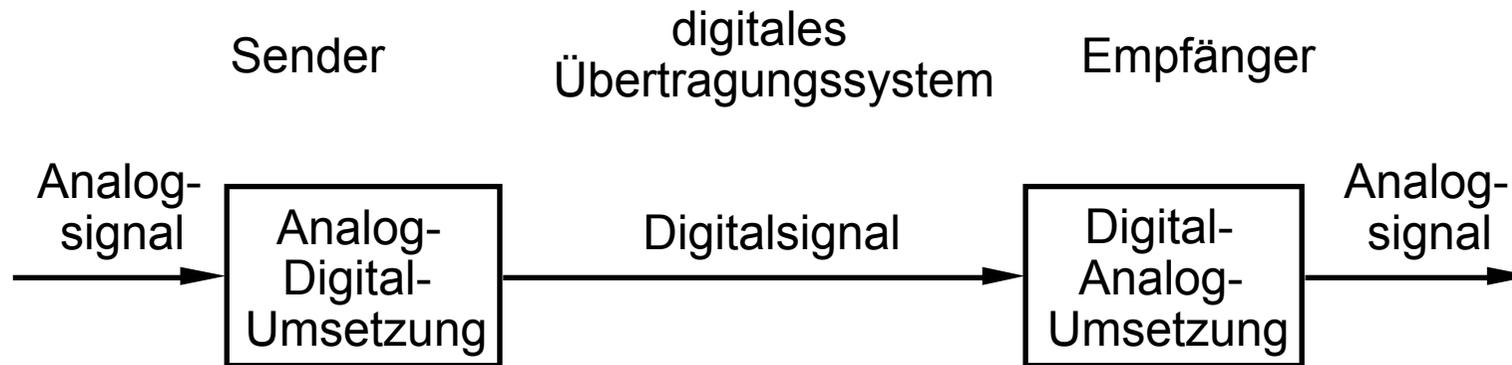




11.4.4. Digitale Übertragung analoger Daten

- 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

analog

wertkontinuierlich →

zeitkontinuierlich →

digital

wertdiskret = Quantisierung

zeitdiskret = Abtastung



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*



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):

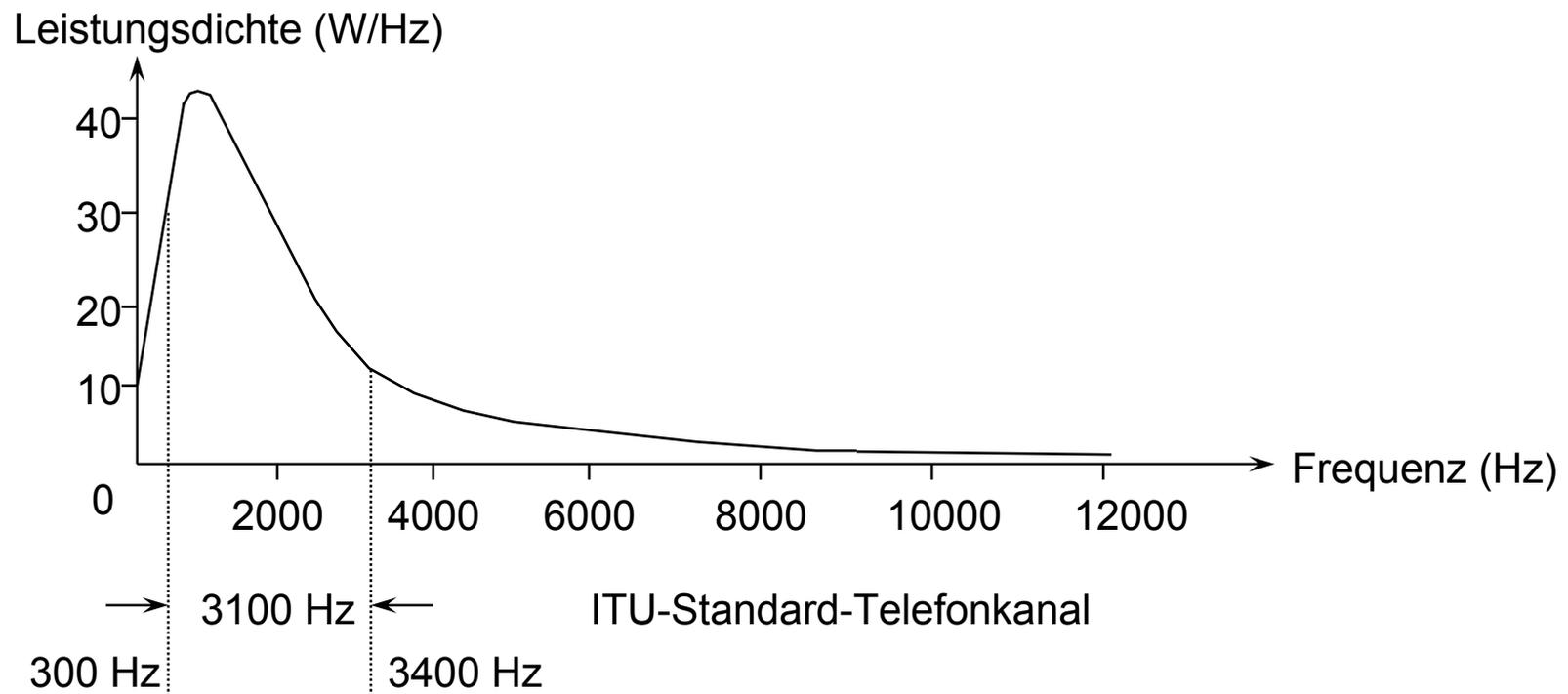
- Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs der abgetasteten Analogsignale ist eine Mindestabtasthäufigkeit (Abtastfrequenz f_A) erforderlich (bei periodischem Abtastzyklus).
- **Abtasttheorem:** Eine Signalfunktion, die nur Frequenzen im Frequenzband B (bandbegrenztetes Signal) enthält, wobei 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 .



Wiederholung: 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





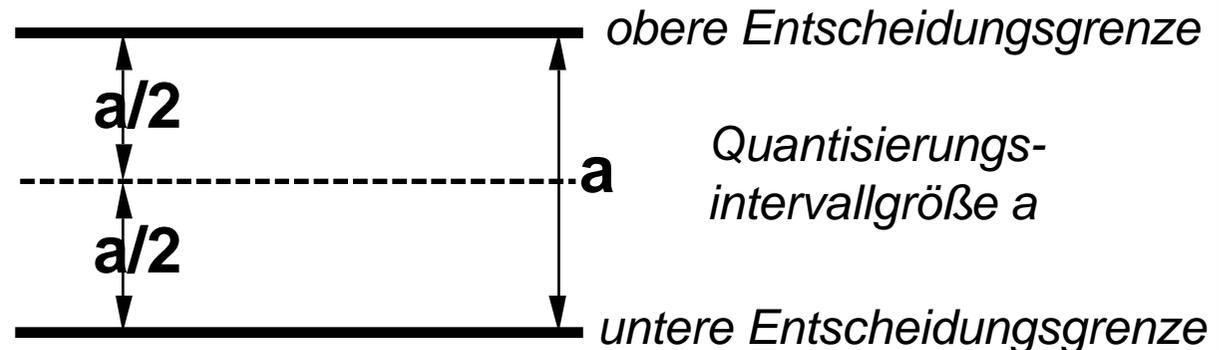
PCM-Fernsprechkanal - Abtastung

- *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.).



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.



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

Bitrate = Abtastfrequenz x Codewortlänge

kbit/s = 8000/s x 8 bit

64kbit/s

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

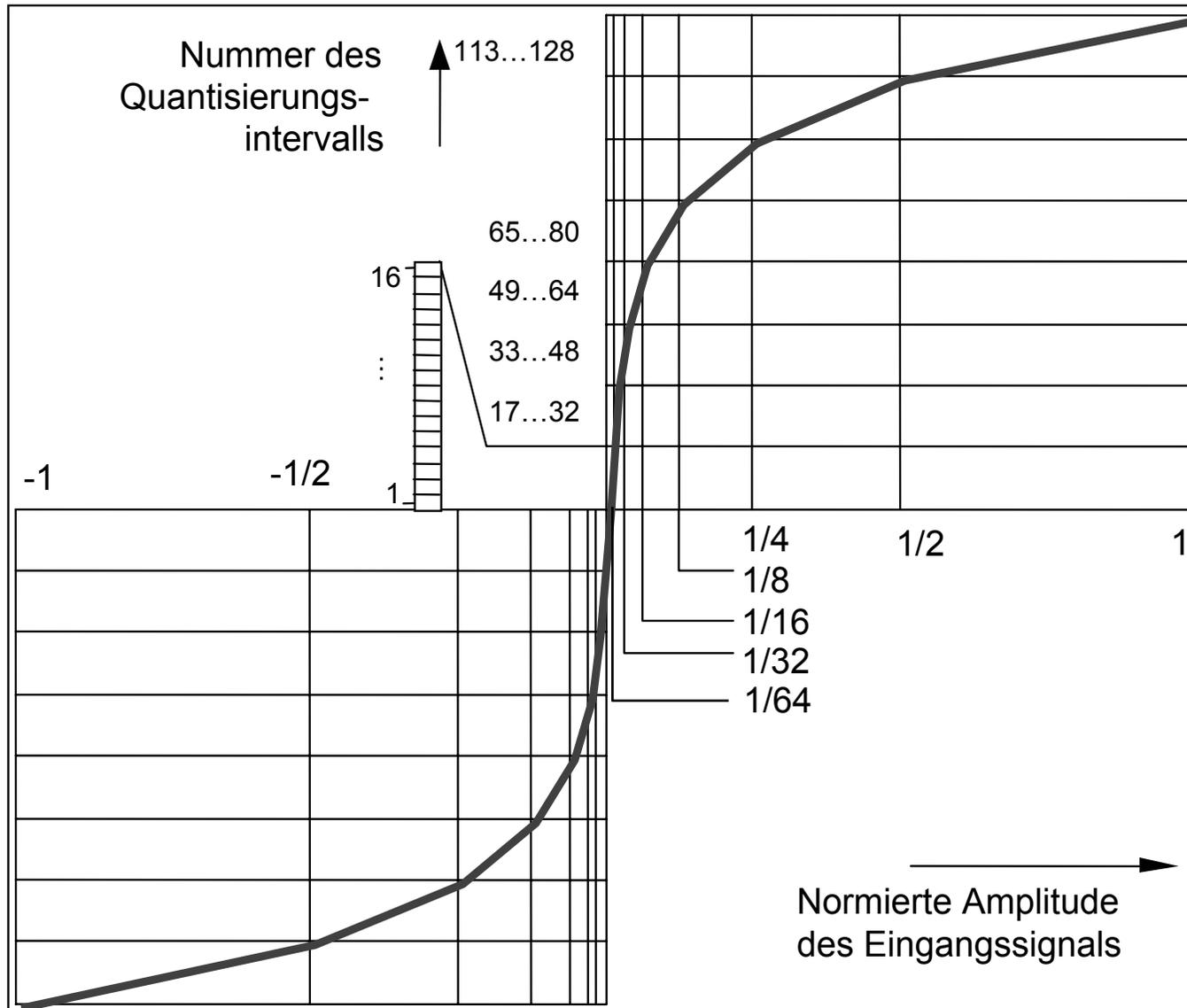


Ungleichförmige Quantisierung

- 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.

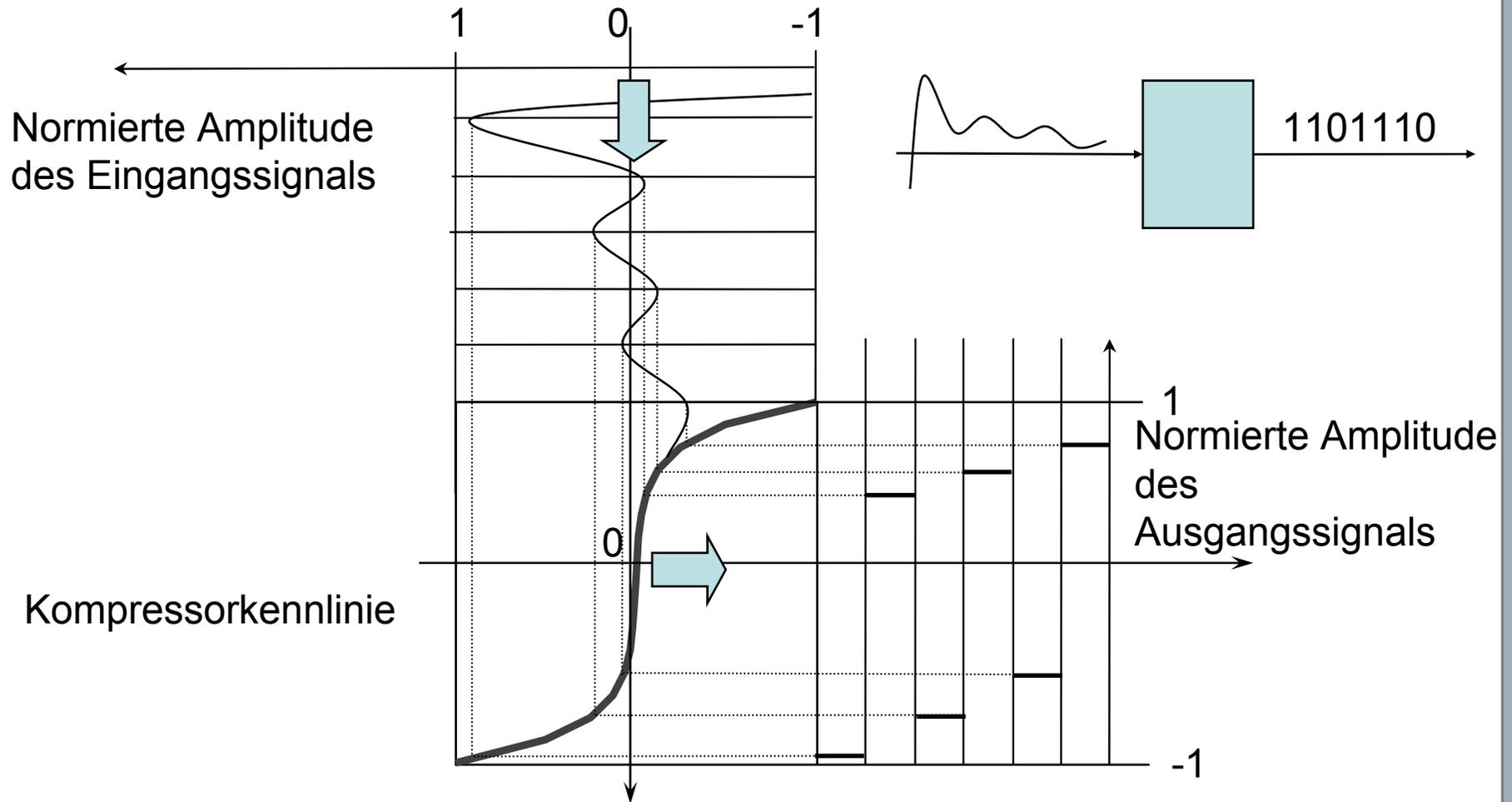


13 Segment-Kompressorkennlinie



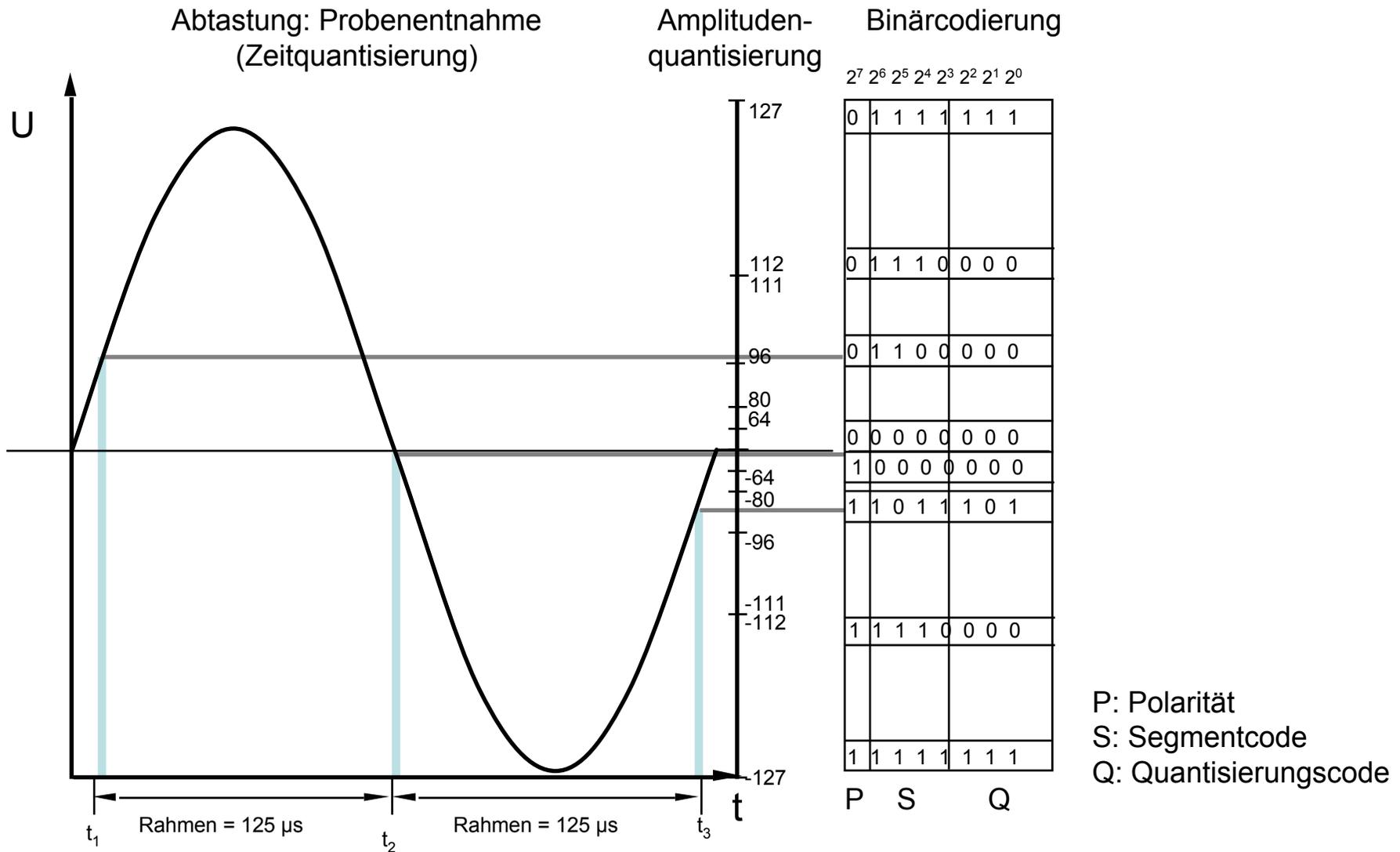


Kompressorkennlinie - Prinzip





Zusammenhang bei der PCM-Technik





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.



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
 - Synchronisierungshilfen
 - Melde- und Signalisierungsdaten
- Struktur des genormten PCM-30 Kanalgrundsystems der Deutschen Telekom AG:
 - pro Zeitscheibe: 8 bit
 - Übertragungszeit pro Kanal: ca. $3,9\mu\text{s}$
 - Verschachtelungsgrad (die Periode): 32 Kanäle
- Als Übertragungseinheit der Multiplexstruktur ist die Struktur mit 32 verschachtelten Kanälen aufzufassen, sie wird **Pulsrahmen (pulse frame, frame)** genannt.

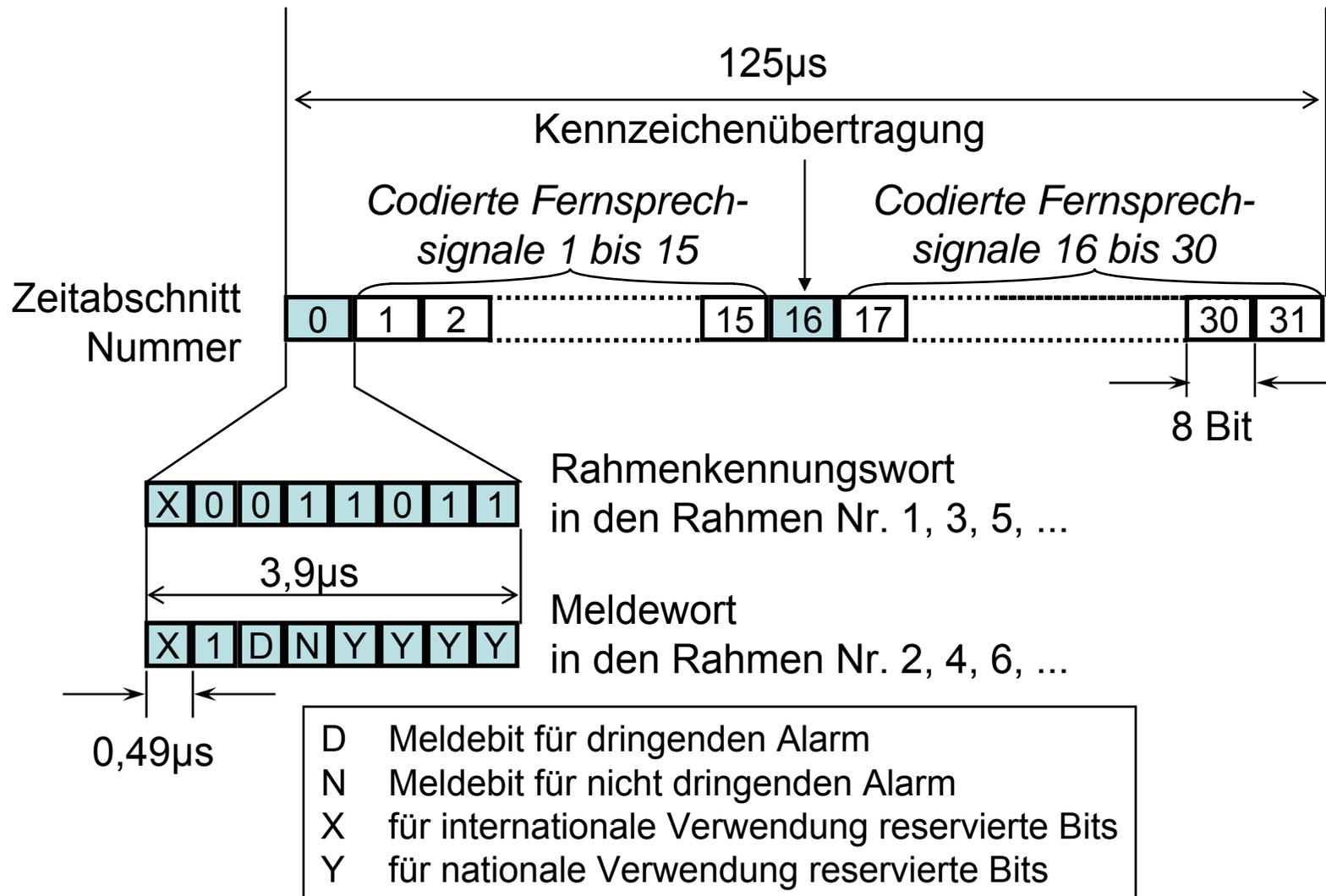


PCM-Multiplexsysteme - Rahmenstruktur

- 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 Fernsprechsignalen können beliebige andere digitalisierte analoge und digitale Daten in Einheiten von 8 bit über ein digitales PCM-System übertragen werden!



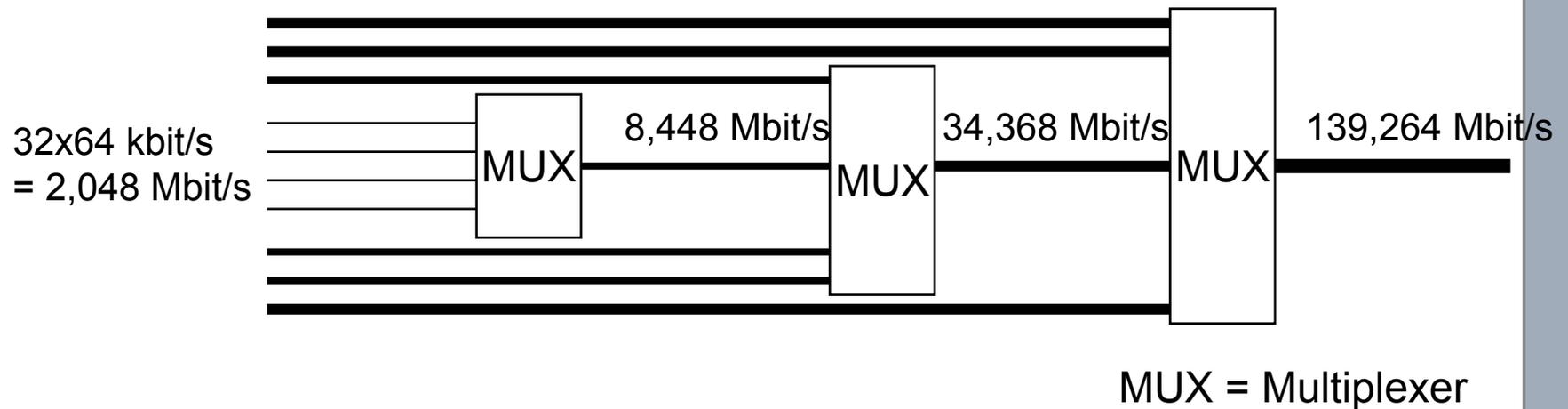
Pulsrahmen des Systems PCM 30





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



- Synchroner 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



11.6. Zusammenfassung der Signalkonversionen

- *Analog* → *Analog*:
 - ursprüngliches Telefon (englisch: POT = Plain Old Telephone)
 - Analoges 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).