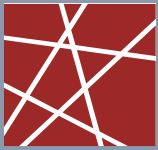




Motivierende Fragen

- ❑ 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?



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>





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



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



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)

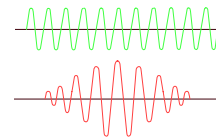
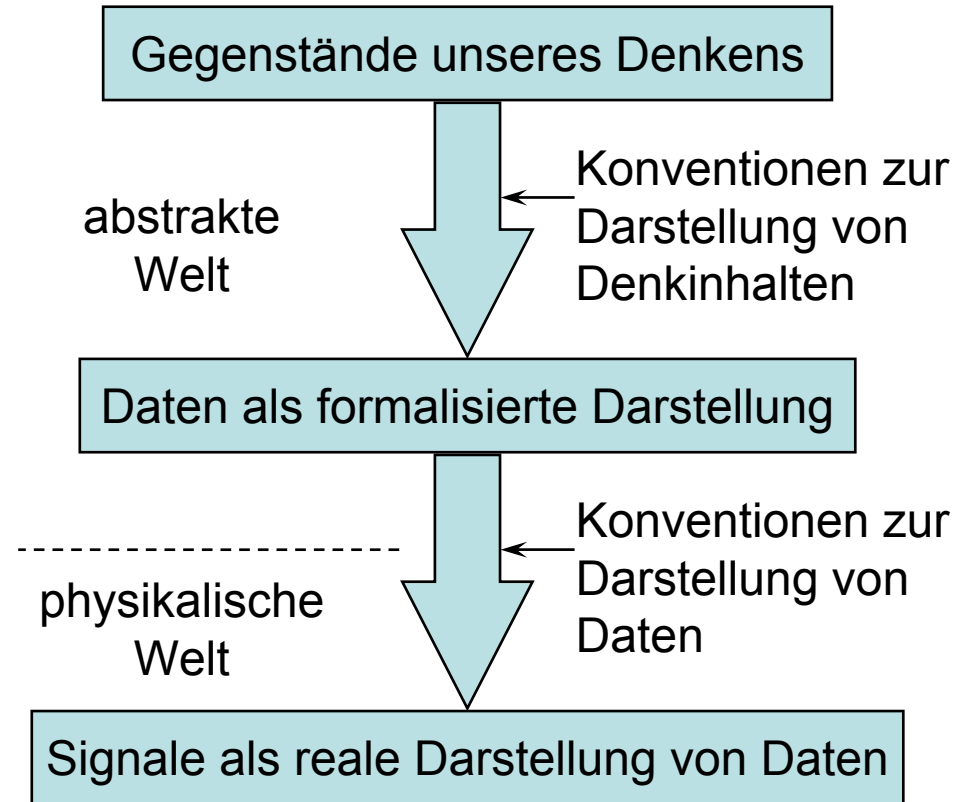
11.6. Zusammenfassung der Signalkonversionen



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

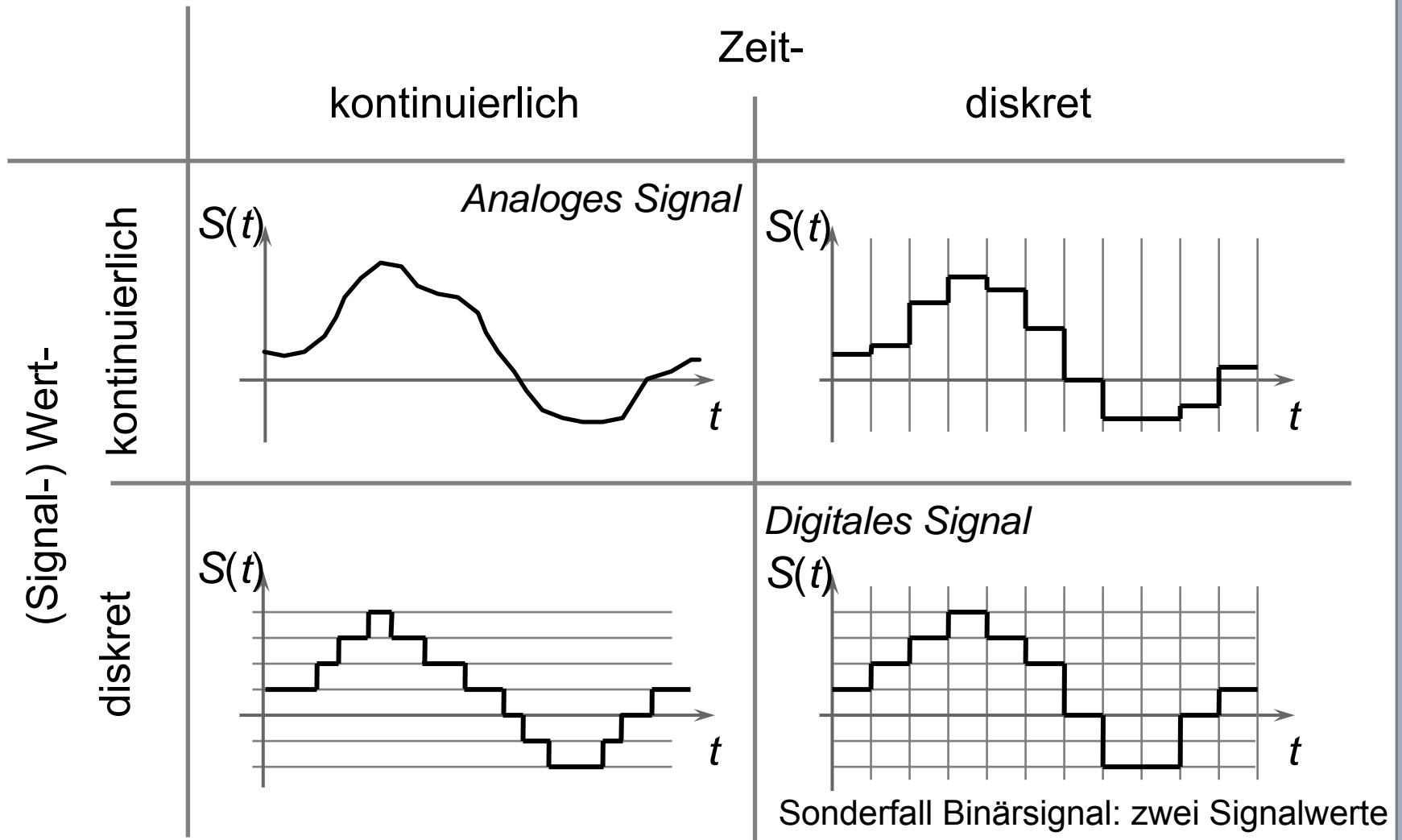
- ❑ Grundsatz:
 - Jedes ortsabhängige Signal ist in zeitabhängiges Signal überführbar („Lesen“, Abtasten) und umgekehrt („Schreiben“, Aufzeichnen)

- ❑ Fokus in der Vorlesung auf zeitabhängigen Signalen und Wellen



- 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





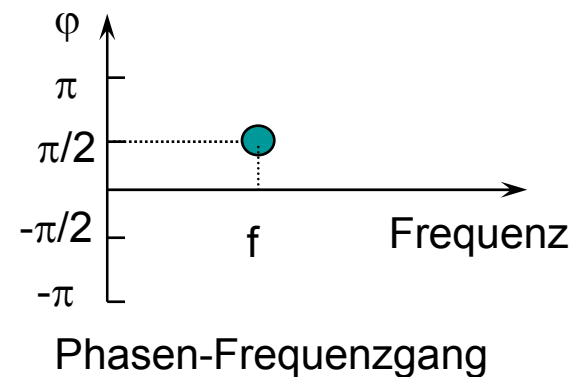
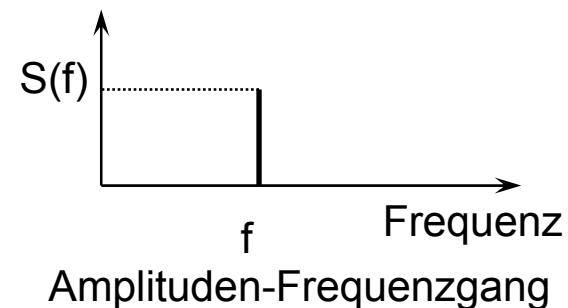
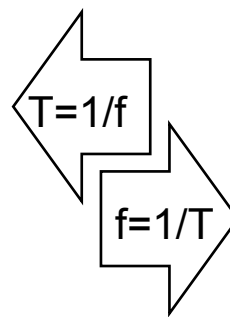
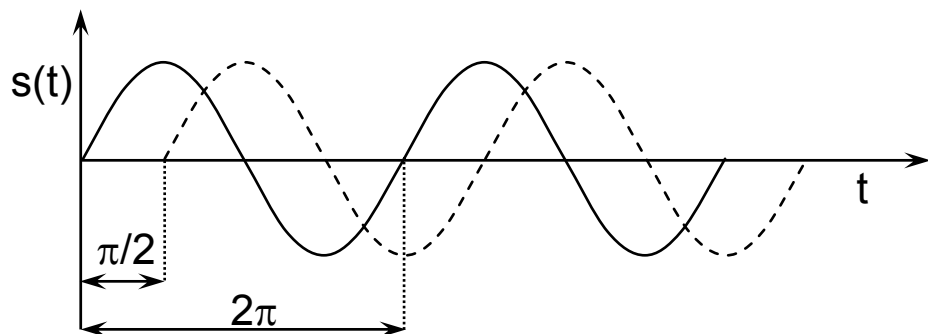
11.1.2. Beschreibung von Signalen Zeitdarstellung/Frequenzdarstellung

□ 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.



Übergang zwischen Zeit- und Frequenzfunktion



Periodische Signale

□ Kenngrößen periodischer Signale:

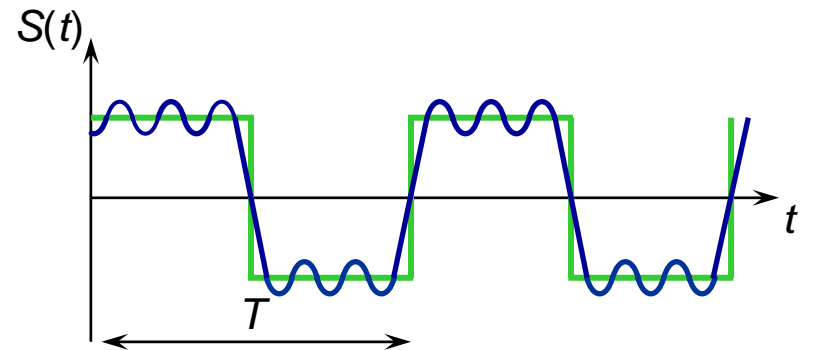
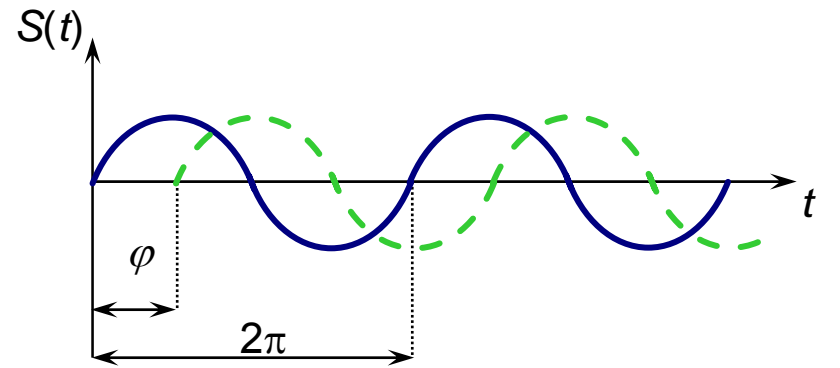
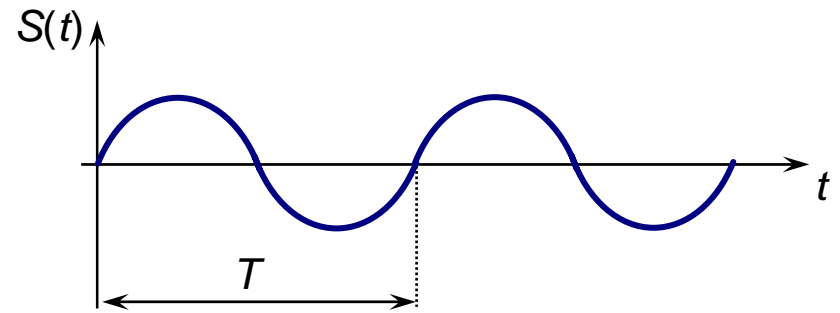
Periode T , Frequenz $1/T$,
Amplitude $S(t)$, Phase φ

□ 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:

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

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

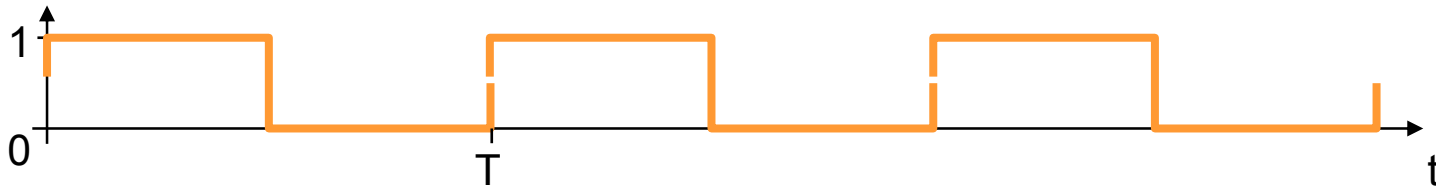
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

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

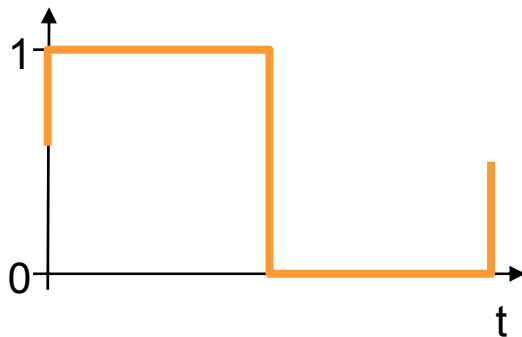


Periodische Signale: Fourier-Analyse

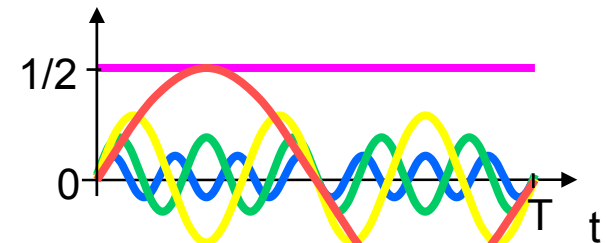
- Fourier-Reihe einer idealen Rechteckschwingung mit Periode T:



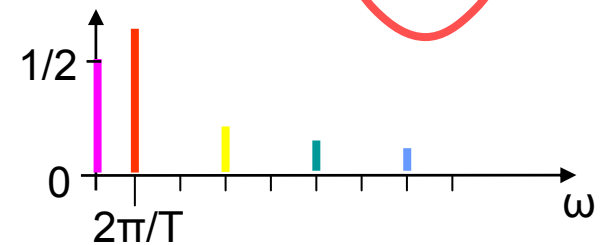
$$g(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$



Harmonische
im Zeitbereich:



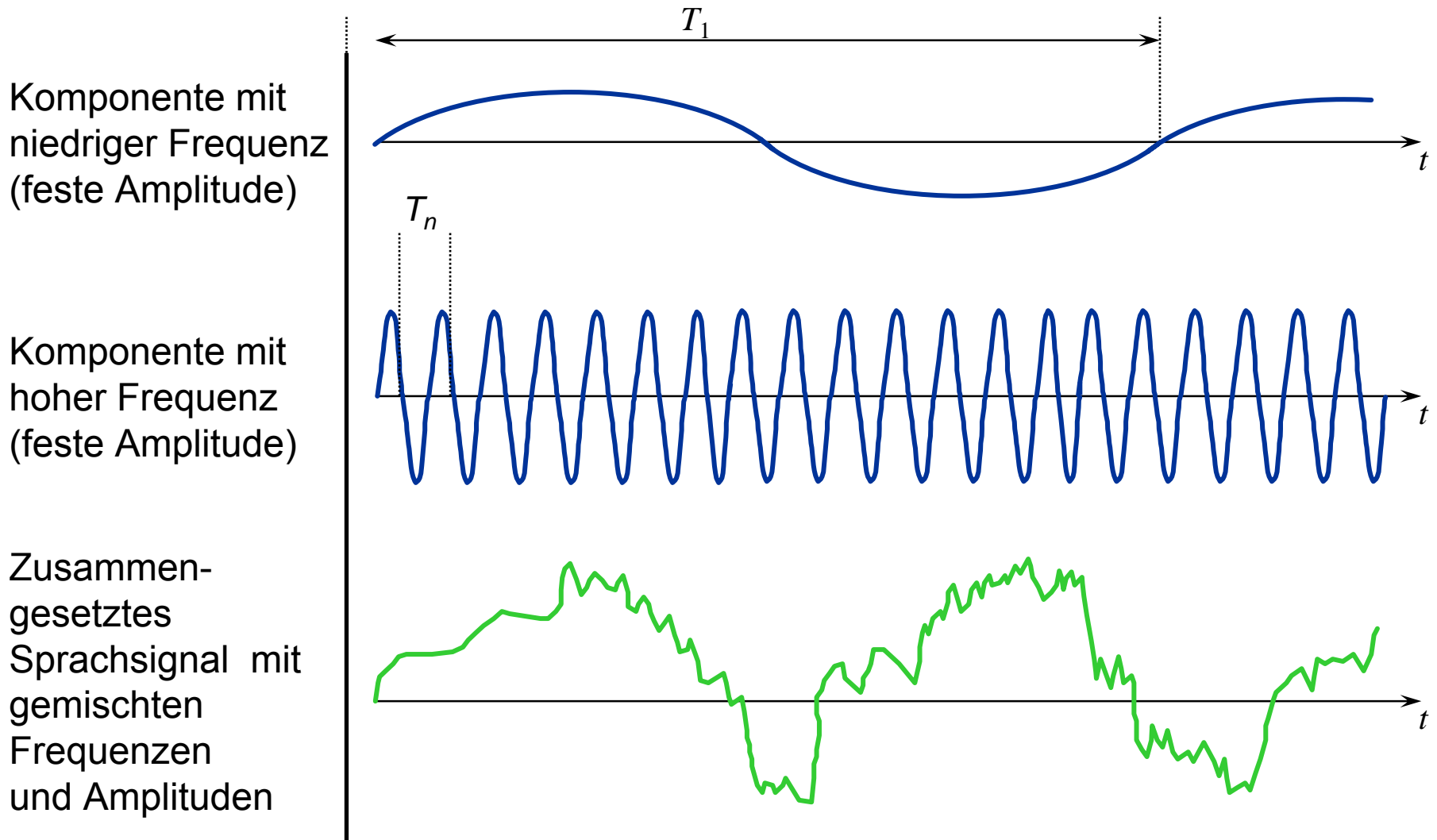
Fourier-Spektrum:



- unendlich viele Fourierkoeffizienten ungleich null → unendliche Bandbreite



Zusammengesetzte Signale



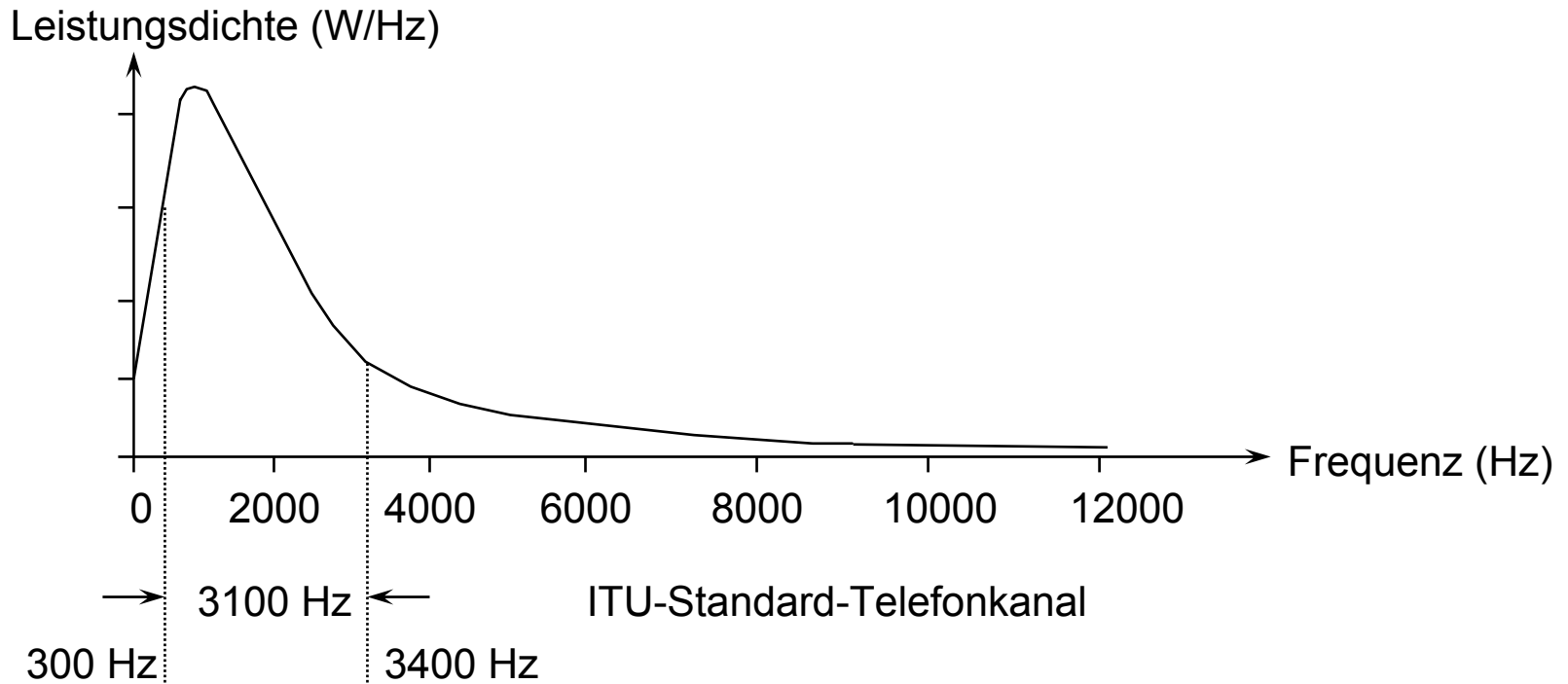


Frequenzspektrum eines Signals

□ 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

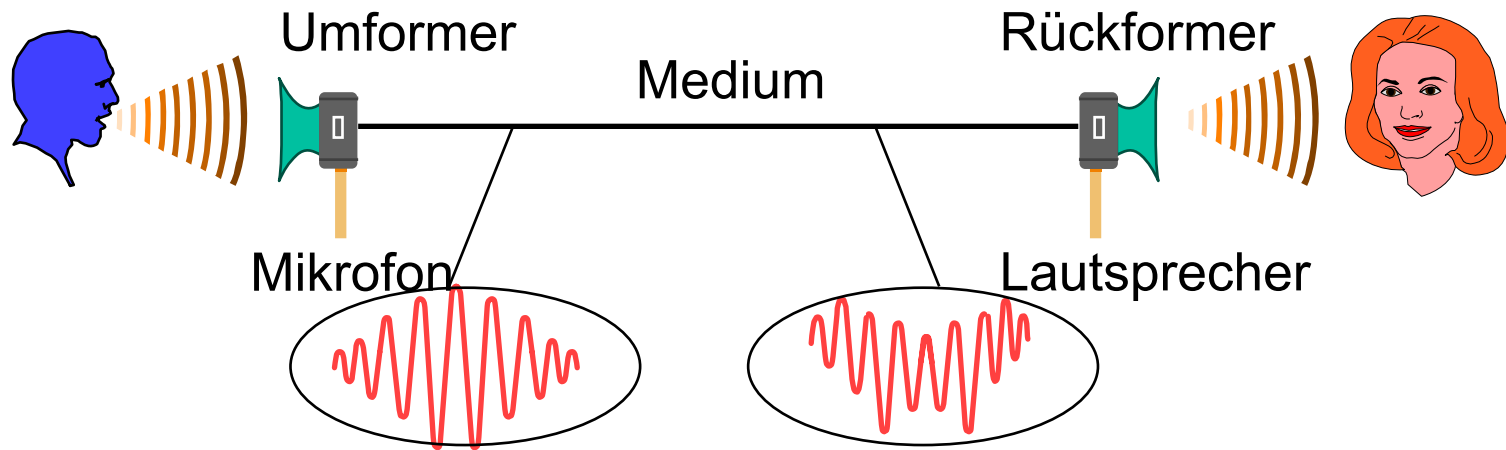




Signalumformung akustisch-elektrisch

- Beispiel: Telefon
 - zeitabhängiges Signal, physikalische Größe

analoges akustisches Signal → analoges elektrisches Signal → analoges akustisches Signal



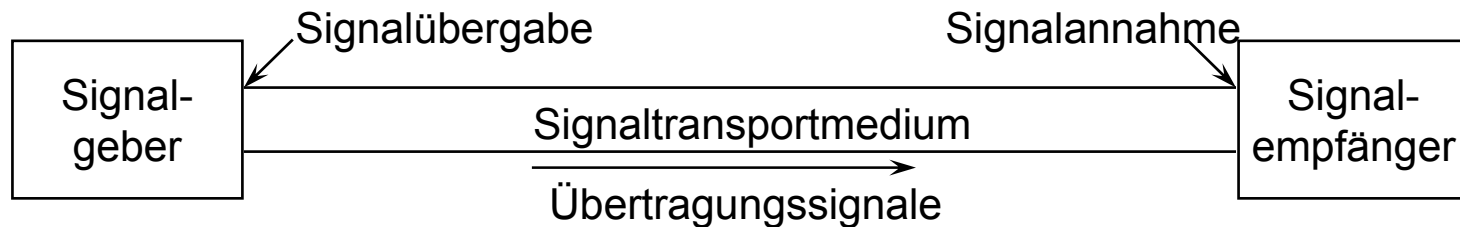
Klassisches Modell des Übertragungssystems Telefon



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

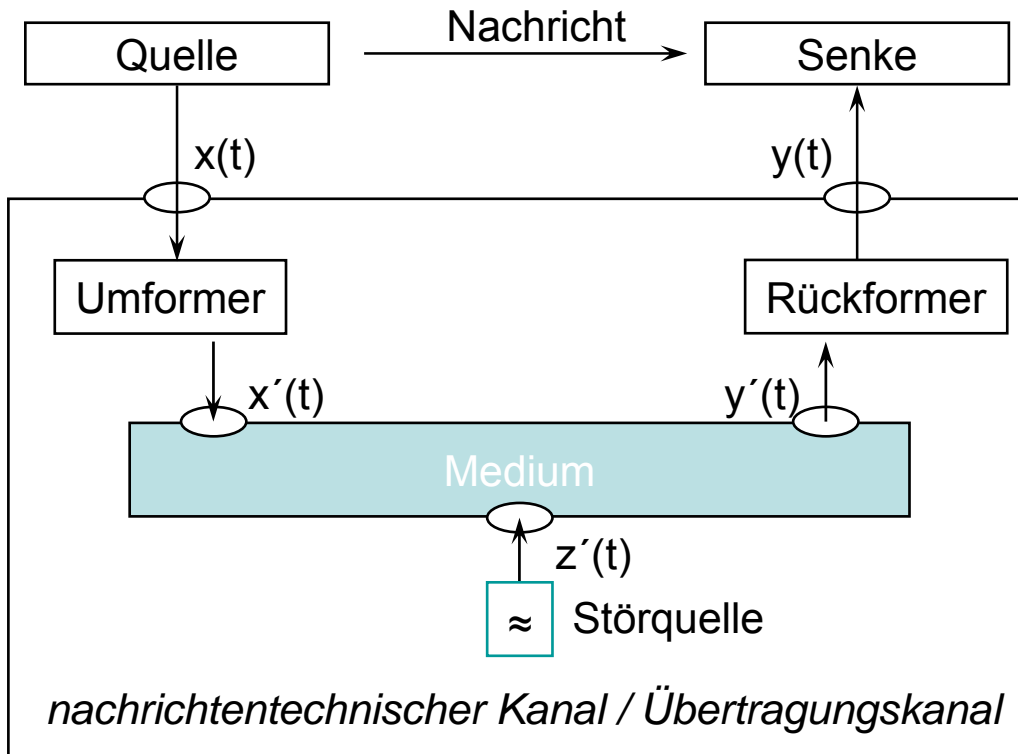
= Übertragungsweg

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:
 $y'(t) = F(x'(t); z'(t))$



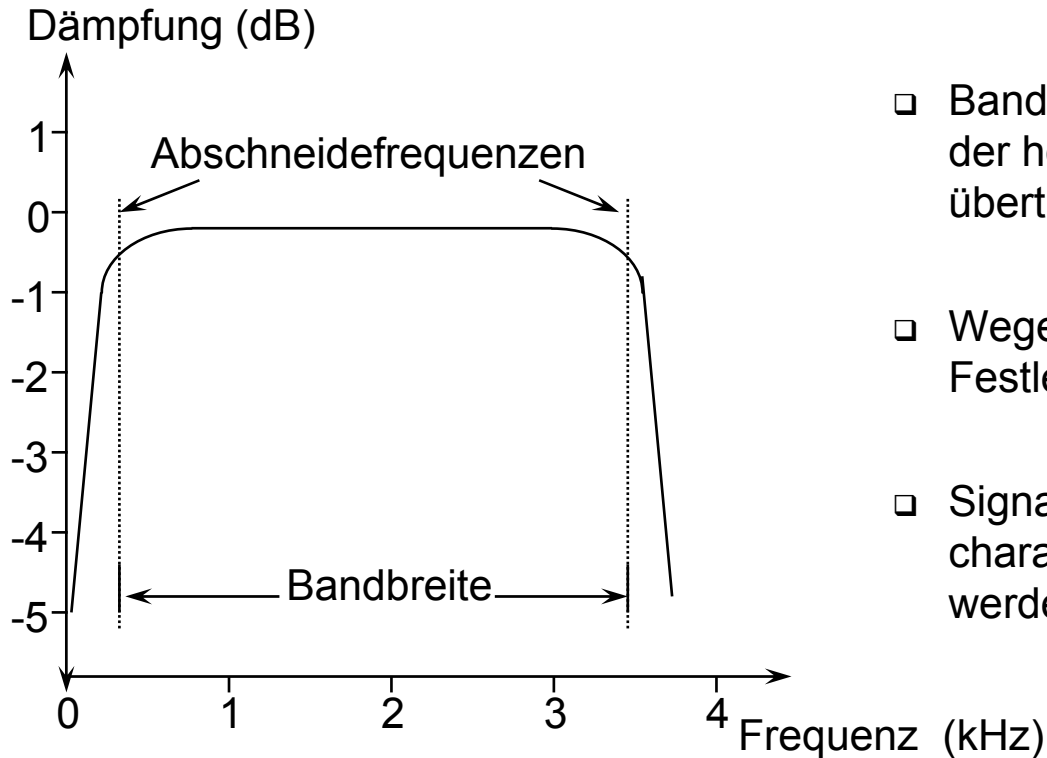
Bandbegrenztes Medium

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.

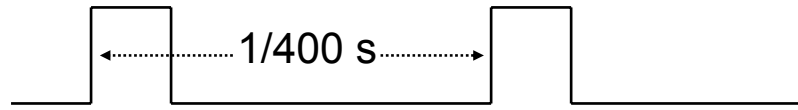




Einfluss der Bandbreite eines Übertragungssystems auf ein digitales Signal

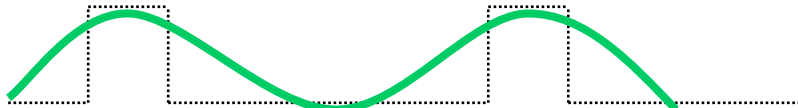
Bitcode: 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0

Schrittfrequenz
2000 Schritte/s



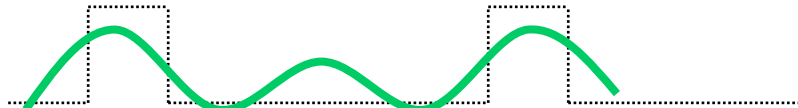
Ideal, würde aber **unendliche** Bandbreite benötigen!

Bandbreite 500 Hz



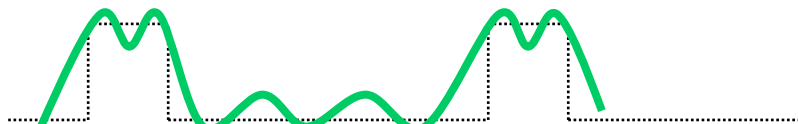
nur 1. Harmonische

Bandbreite 900 Hz



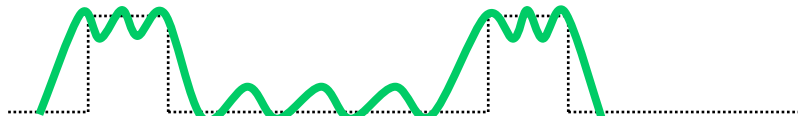
1.+2. Harmonische

Bandbreite 1300 Hz



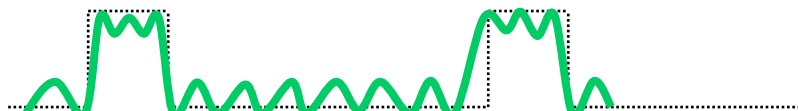
1.-3. Harmonische

Bandbreite 1700 Hz



1.-4. Harmonische

Bandbreite 2100 Hz



1.-5. Harmonische

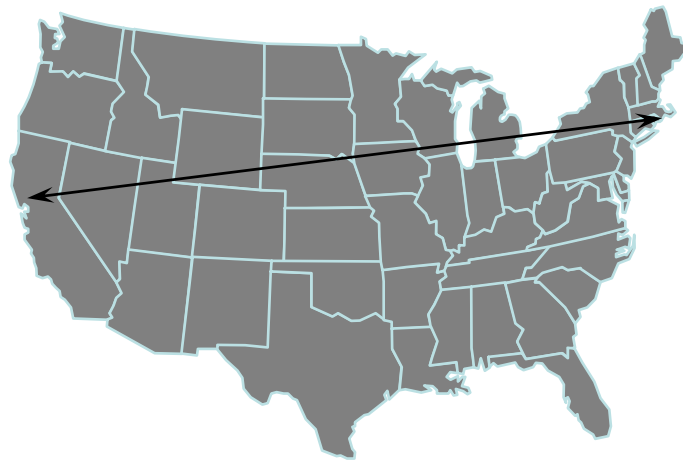
□ Später:

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



Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Signalen

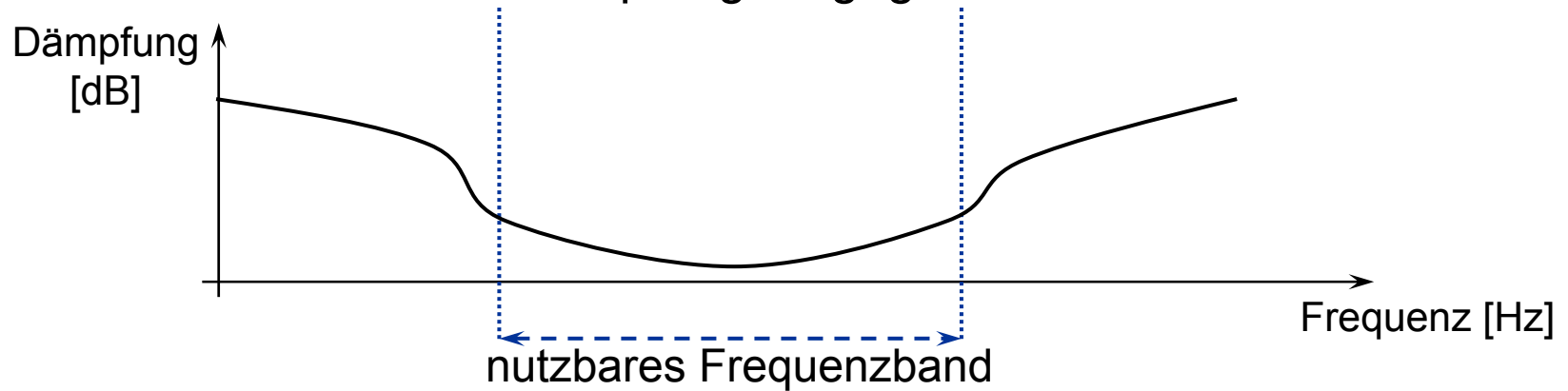
- ❑ Optimum: Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) im Vakuum
- ❑ Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen: etwa $2/3 c = 2 \cdot 10^8$ m/s
- ❑ Durch die begrenzte Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat das Medium eine Speicherkapazität.
- ❑ Beispiel: Datenübertragung von MIT nach Berkeley:
 - Strecke: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



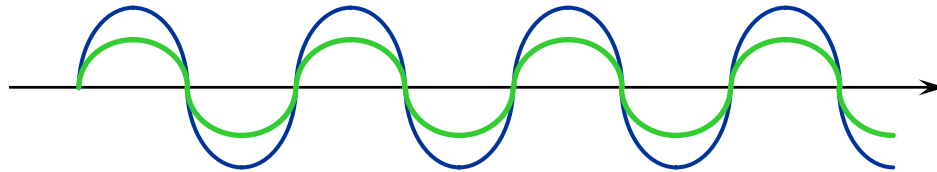


Kenngrößen medienbedingter Abweichungen

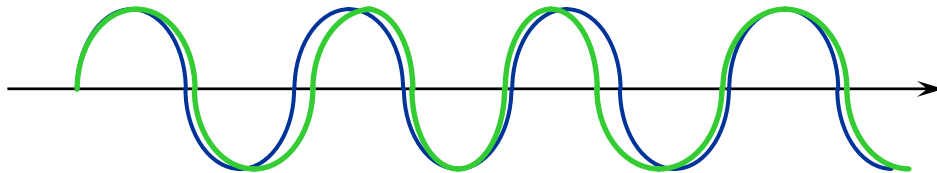
- **Bandbreite:** durch die Dämpfung vorgegeben



- **Dämpfungsverzerrung:** Amplitudenschwund, Amplitudensprünge

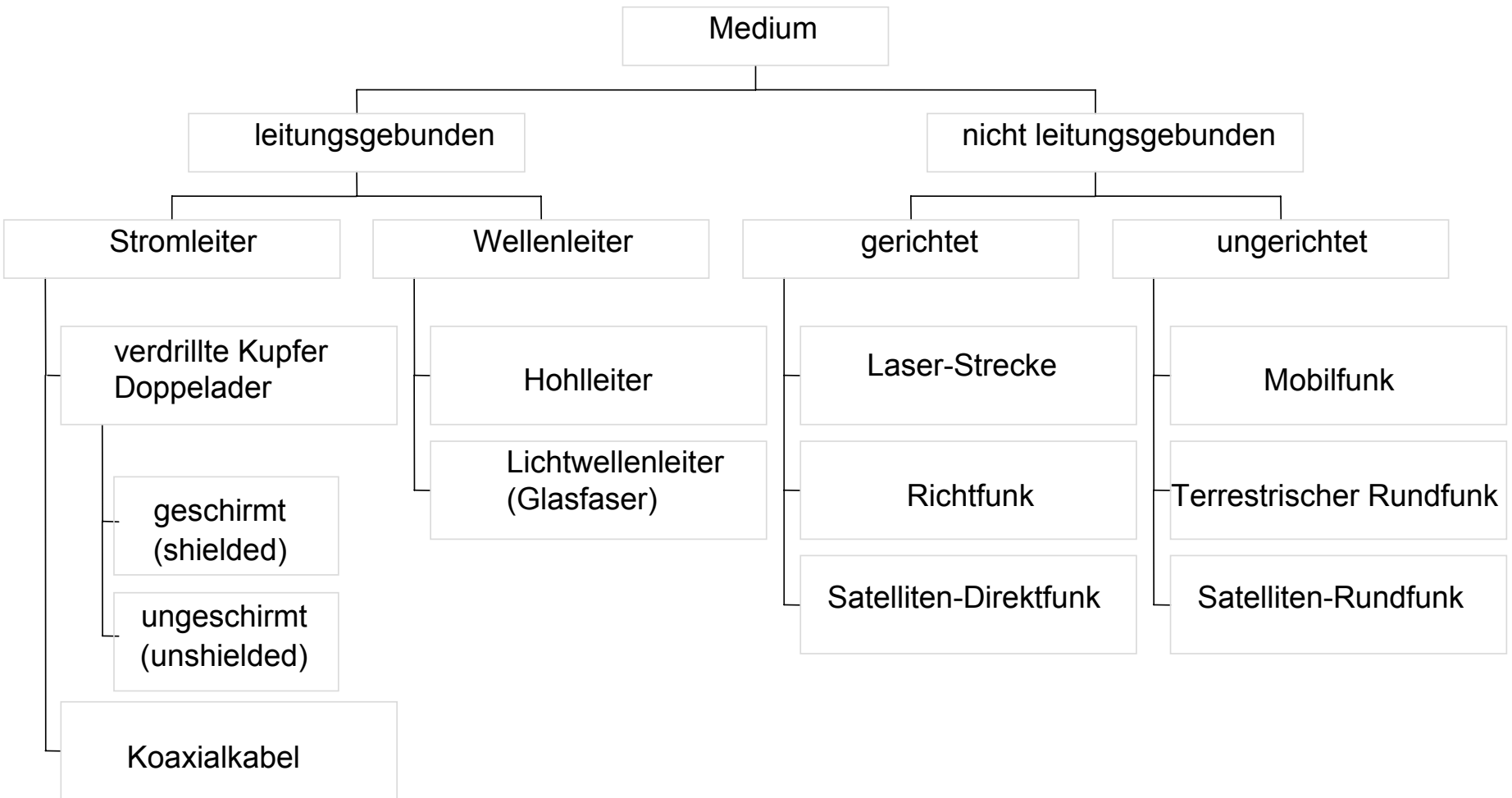


- **Laufzeitverzerrung:** Frequenzverwerfung, Phasenschwankungen (Jitter)





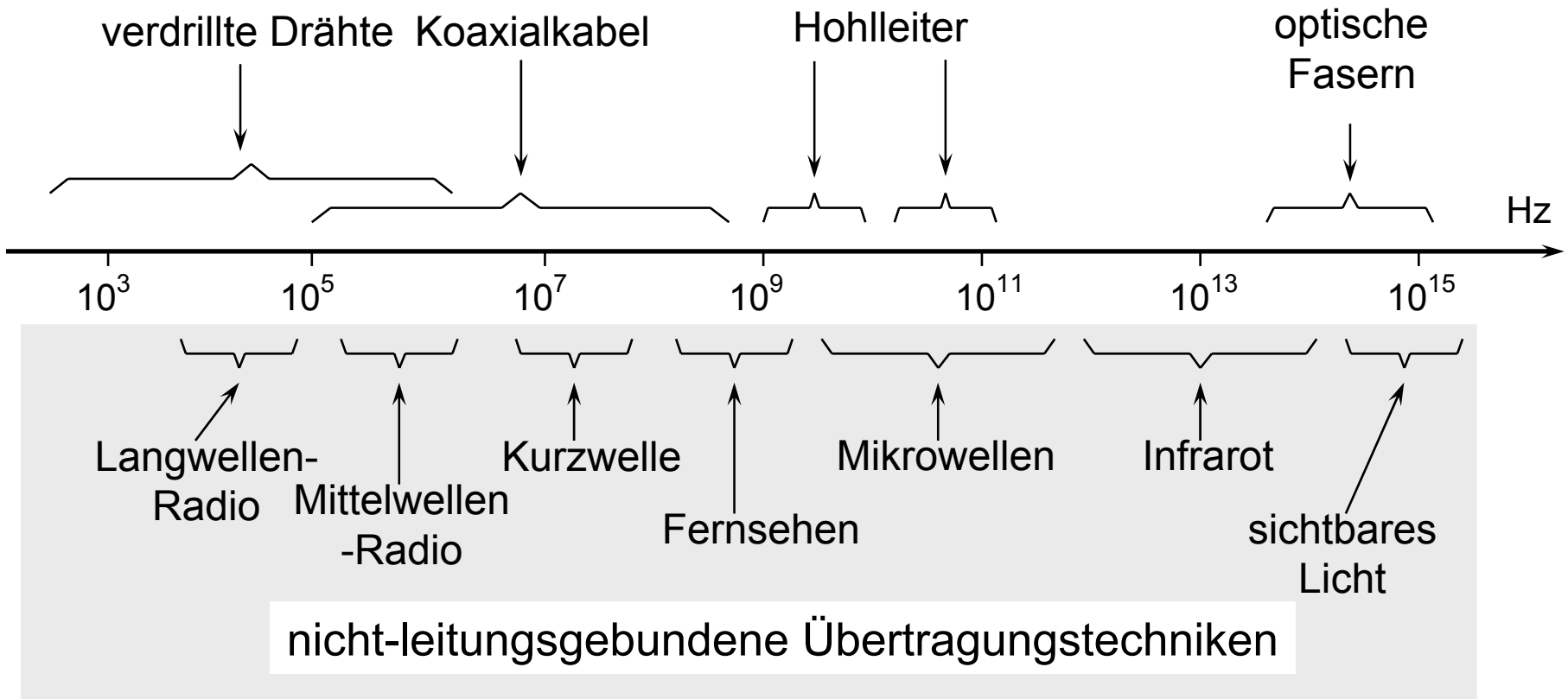
11.3. Medien: Klassifikation





Nutzung des elektromagnetischen Spektrums

leitungsgebundene Übertragungstechniken

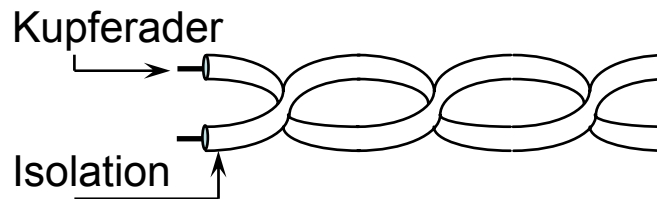




11.3.1. leitungsgebundene Medien - Kupfer-Doppeladern

□ *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, 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)



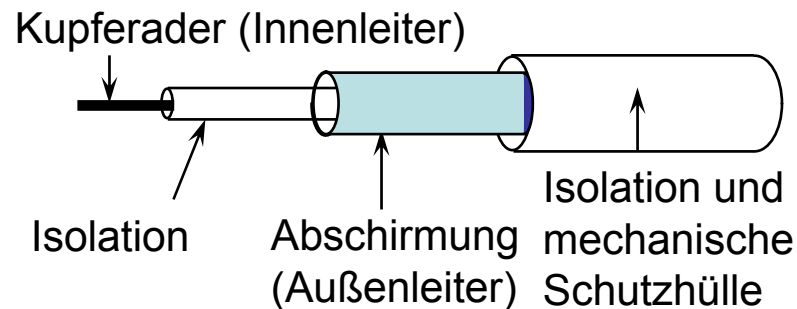
Hinweis: Die Verwendung einer Doppelader ist aus elektrischen Gründen notwendig. Hin- und Rückleiter im elektrischen Stromkreis!



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



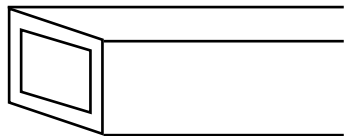


Hohlleiter

□ *Hohlleiter* sind

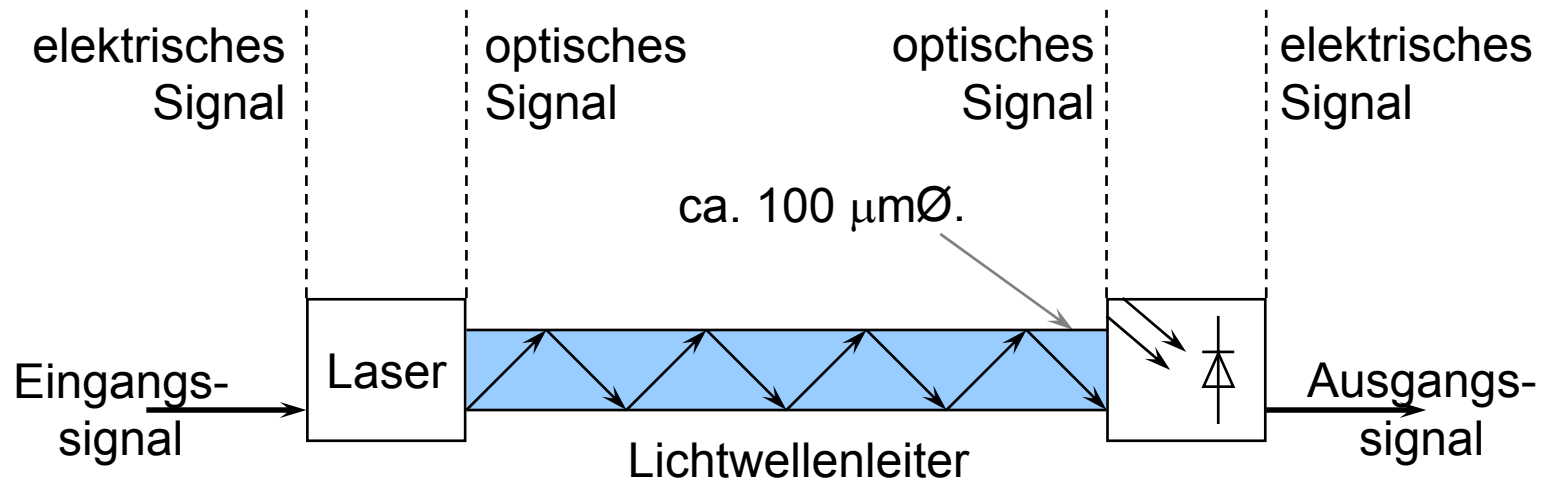
- mit Luft gefüllte, gestreckte metallische Hohlkörper
- mit runden, elliptischen oder rechteckigen Querschnitten.
- Sie bewirken eine geführte Ausbreitung höchstfrequenter elektromagnetischer Wellen (Mikrowellen) im Inneren des Hohlkörpers durch fortlaufende Reflexion.
- Sie sind allerdings heutzutage 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)



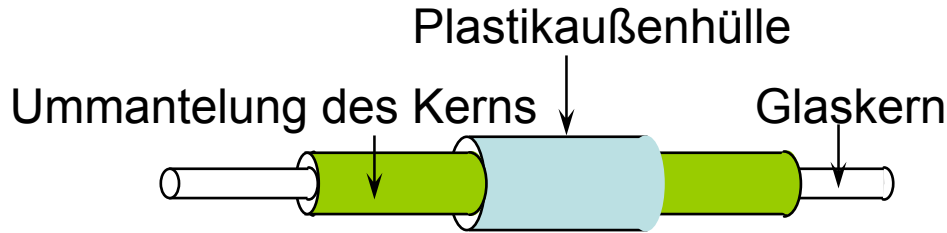


Lichtwellenleiter (Glasfaser)

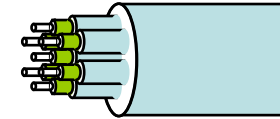




Glasfaser - Typen



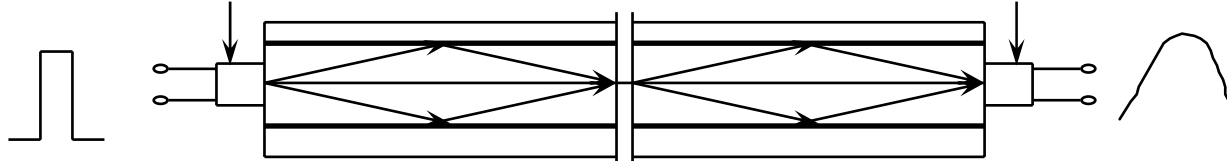
Single core



Multicore

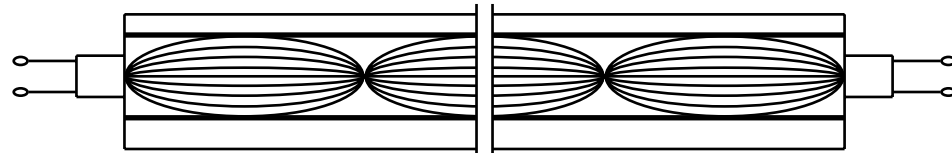
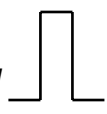
Optischer Sender

Optischer Empfänger



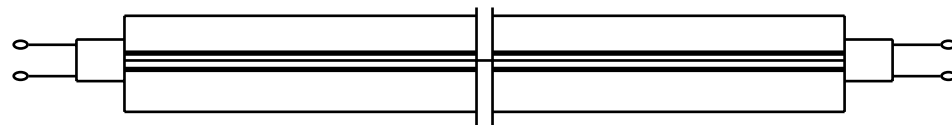
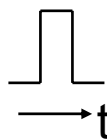
(i) Multimode-Faser mit Stufenindex

Elektrisches
Eingabesignal



Elektrisches
Ausgabesignal

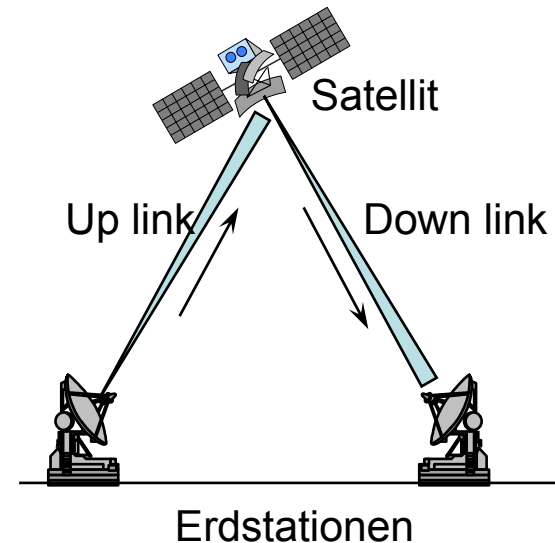
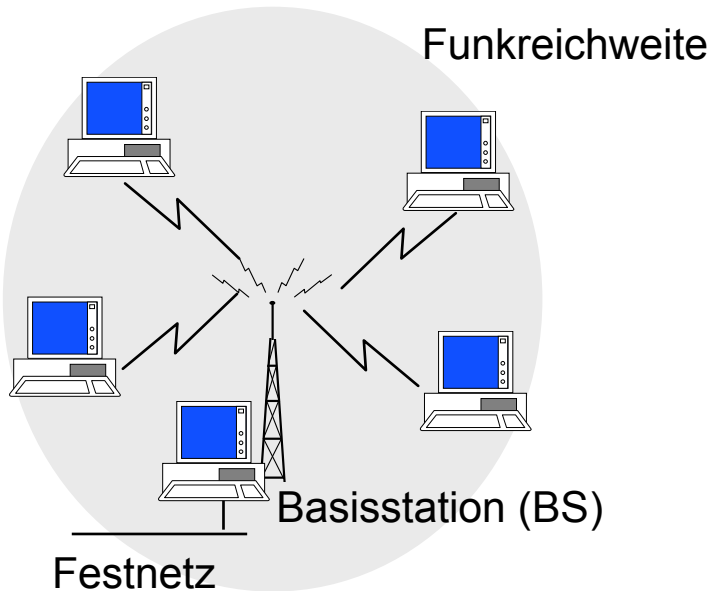
(ii) Multimode-Faser mit Gradientenindex



(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

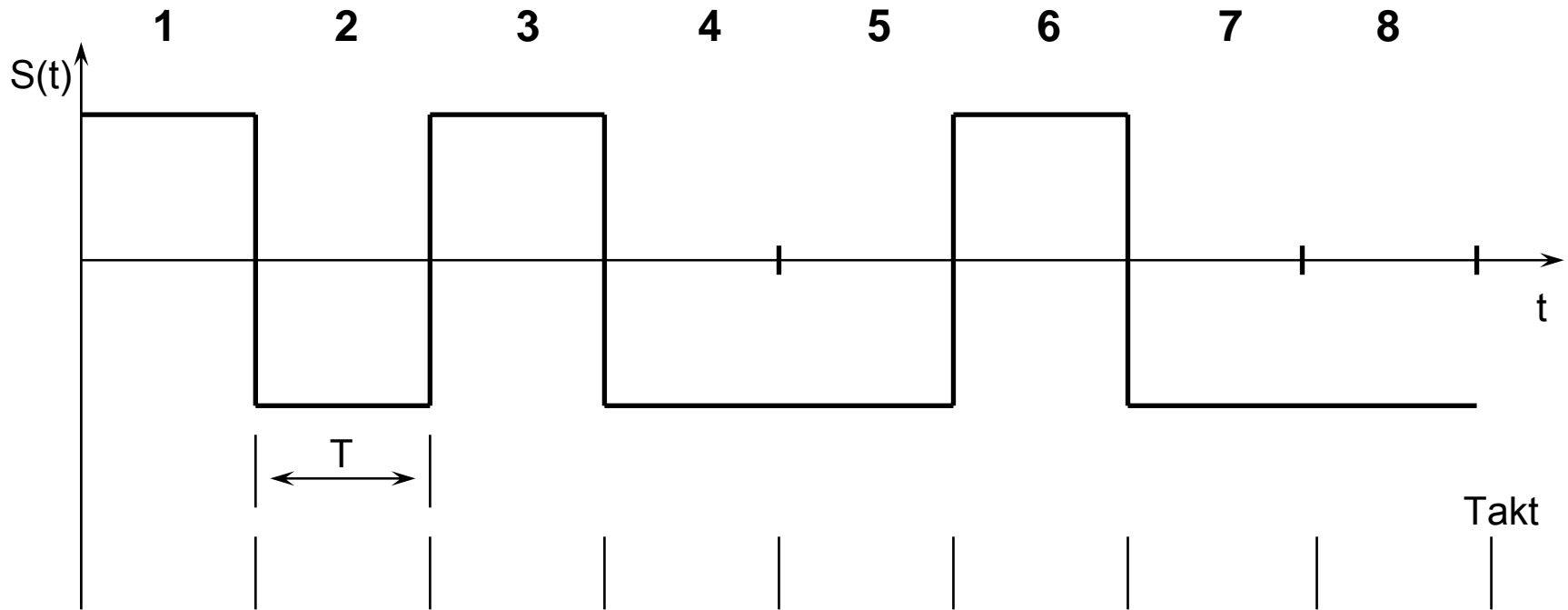
□ **Schrittgeschwindigkeit:**

- bei isochronen Digitalsignalen: Kehrwert der Schrittdauer: $1/T$
- Einheit: **baud** = 1/s (nach Jean-Maurice-Emile Baudot, franz. Ingenieur)

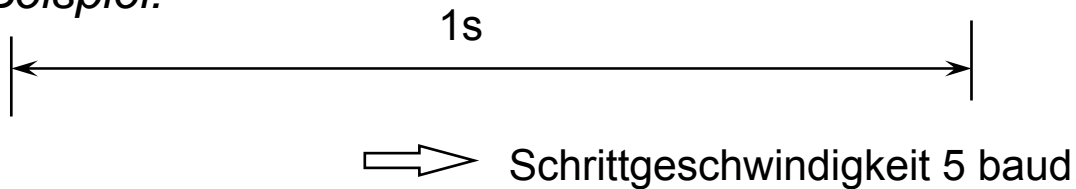


Schrittgeschwindigkeit - Beispiel

Schrittfolge:



Beispiel:





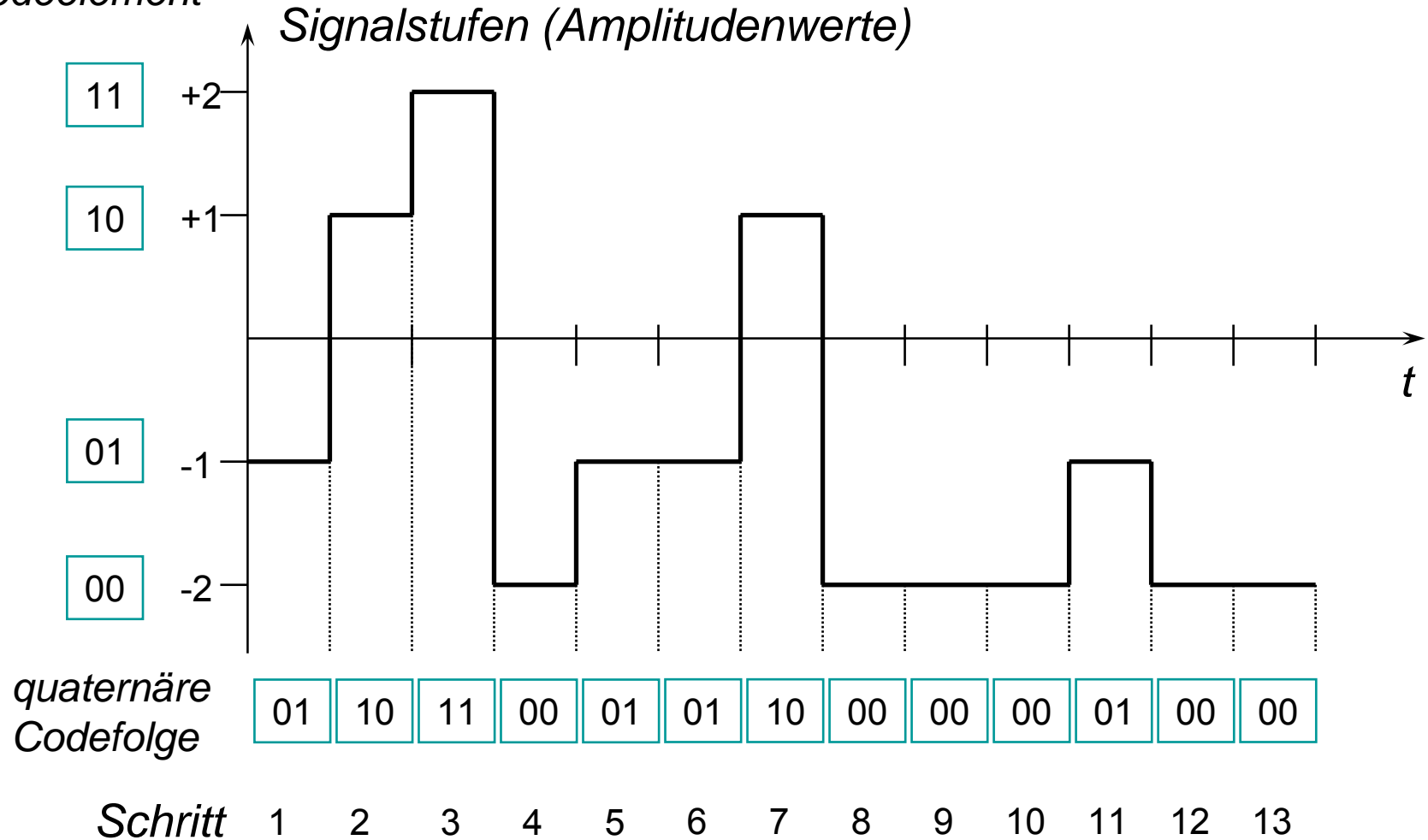
Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

- **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 (Schrittschläge).
 - 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 Schrittschlag 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.

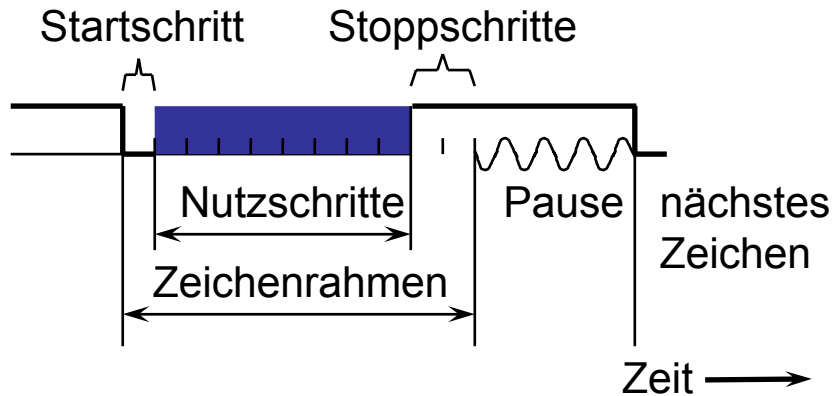
□ **Verfahren zur Erzielung von Gleichlauf (Synchronisation):**

- 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)



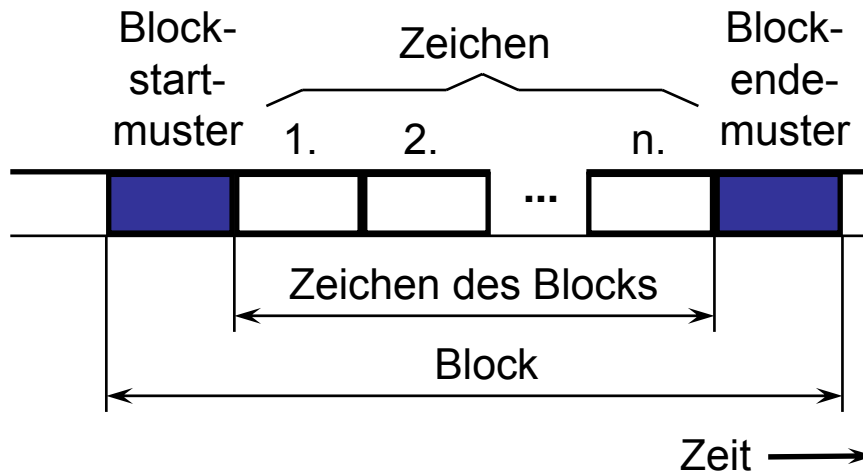
Voraussetzung:

- Ruhepegel
- feste Zahl von Nutzschritten

Nachteil:

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

Blocksynchronisation (Synchronbetrieb)



Voraussetzung:

- Blockstart-/endemuster eindeutig

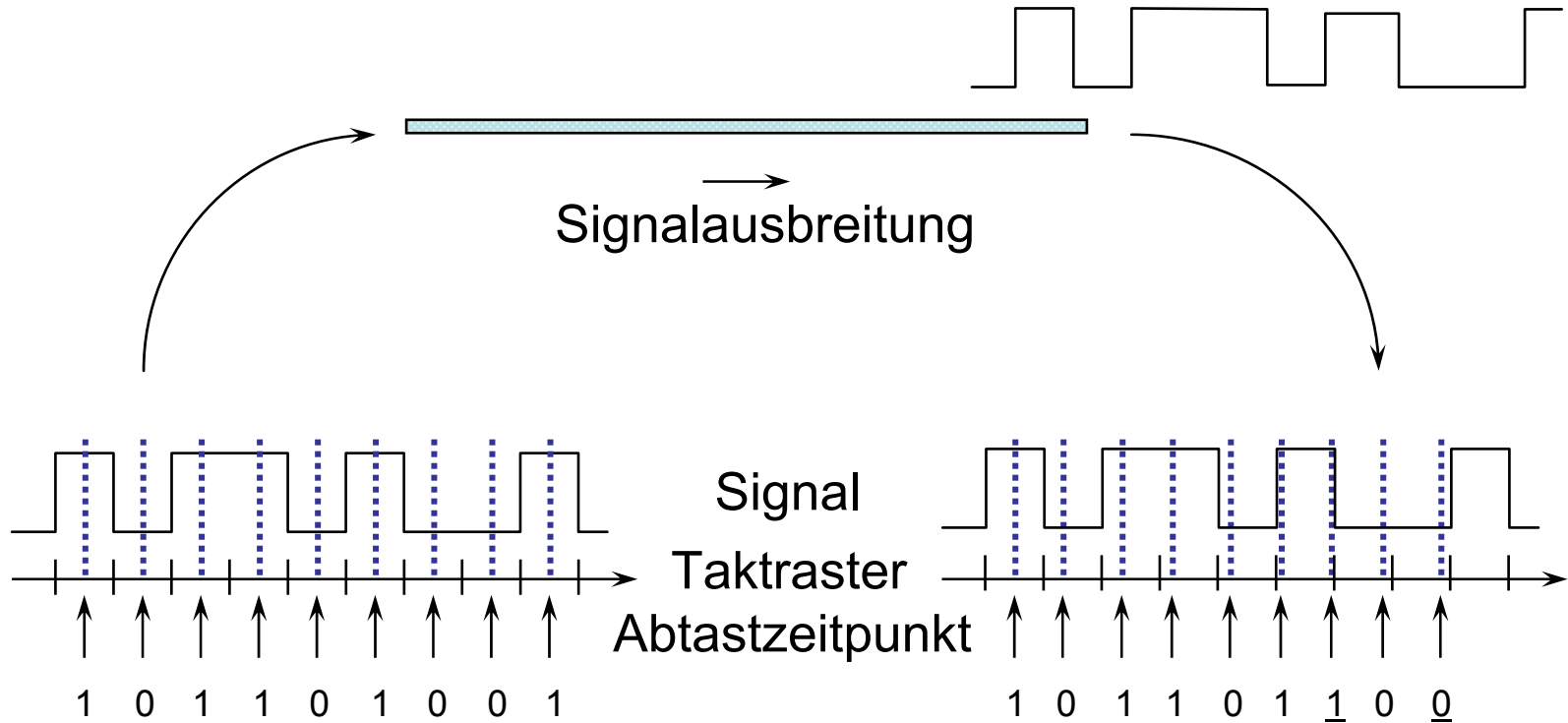
Maßnahme:

- Modifikation/Rückgängigmachen entsprechender Muster im Block (Bitstopfen)



Bitfehler durch fehlerhafte Synchronisation

- Beispiel:





Übertragungsstörung durch Rauschen

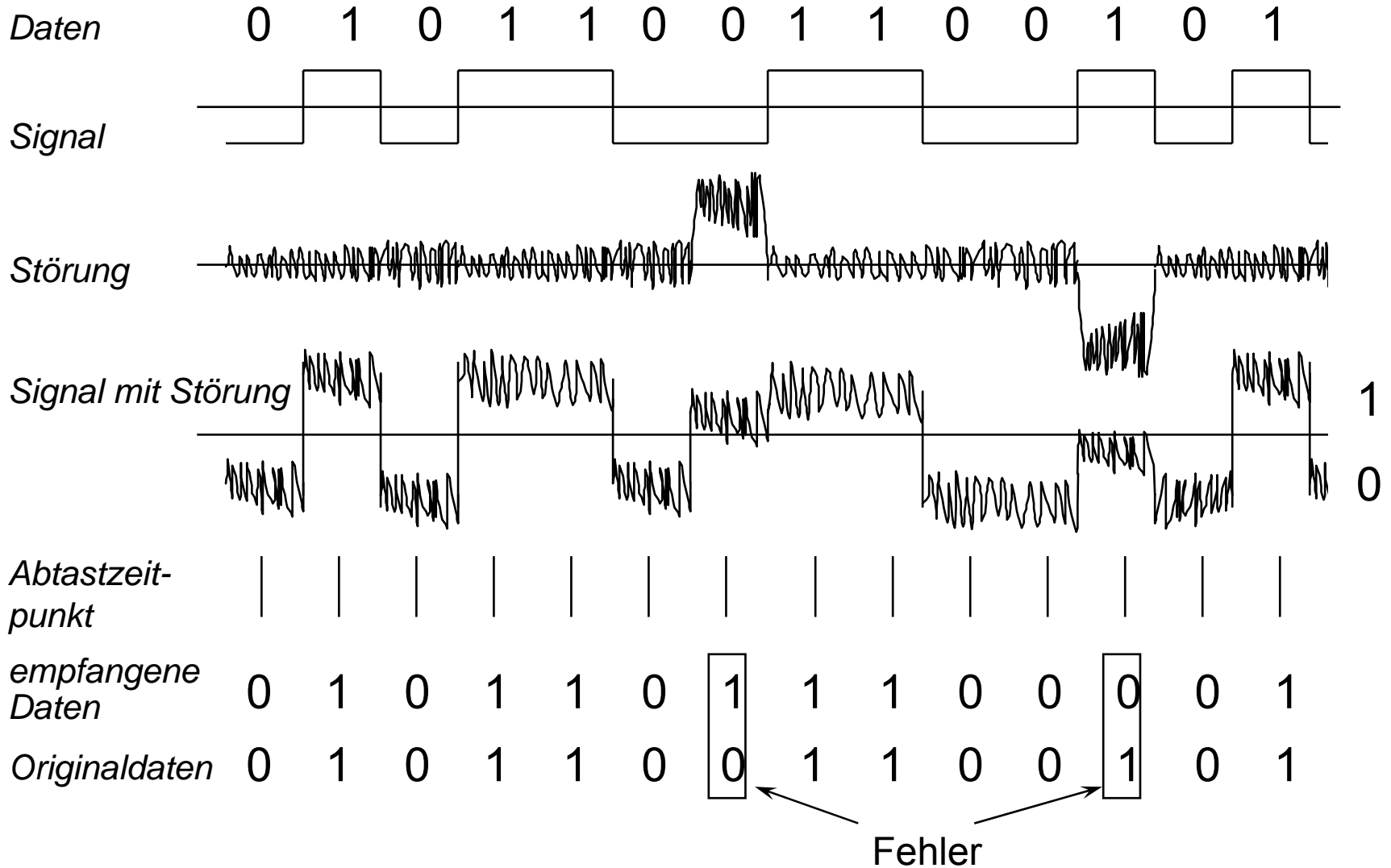
- Neben der systematischen Beeinflussung des Signals durch
 - Dämpfung
 - Laufzeitverzerrungenkönnen Signalstörungen durch
 - transiente, stochastische Prozesse
 - weißes Rauschen
 - Impulsstörungenauftreten.

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



Bitfehler durch transiente Störungen

□ Beispiel:





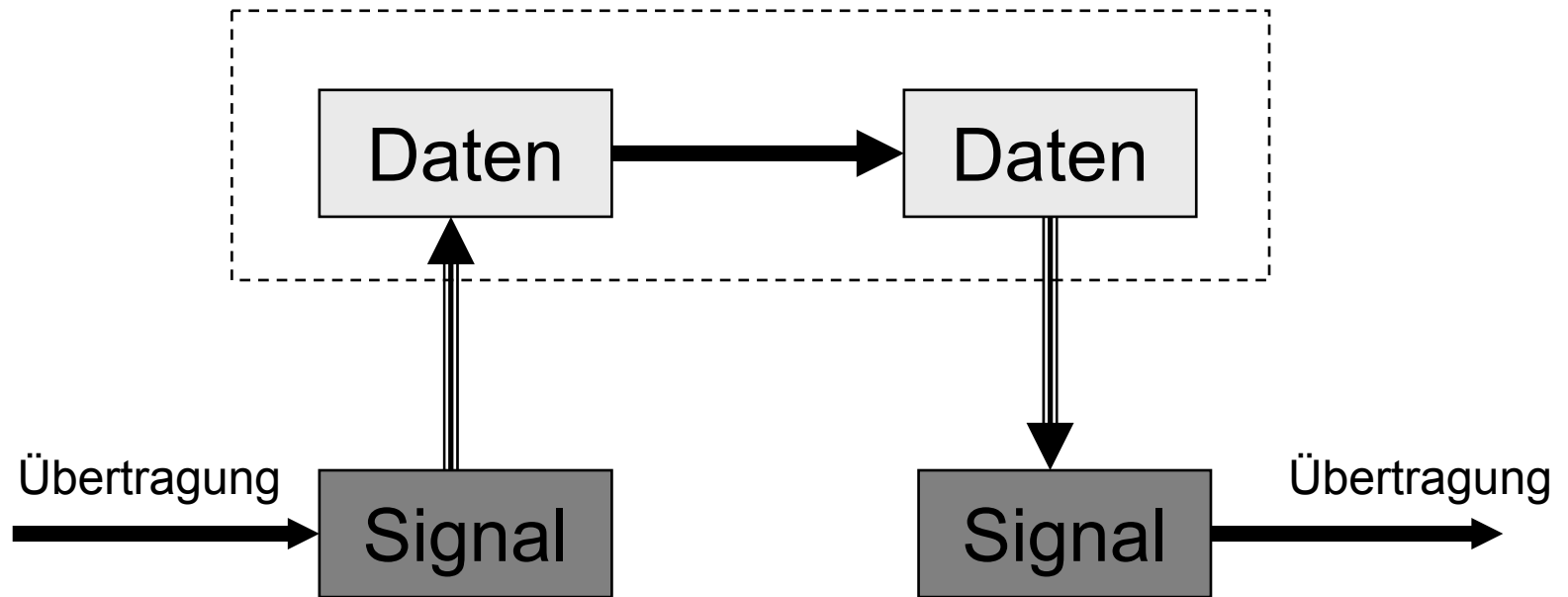
Nyquist-Kriterium und Shannon-Kanalkapazität

- 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)

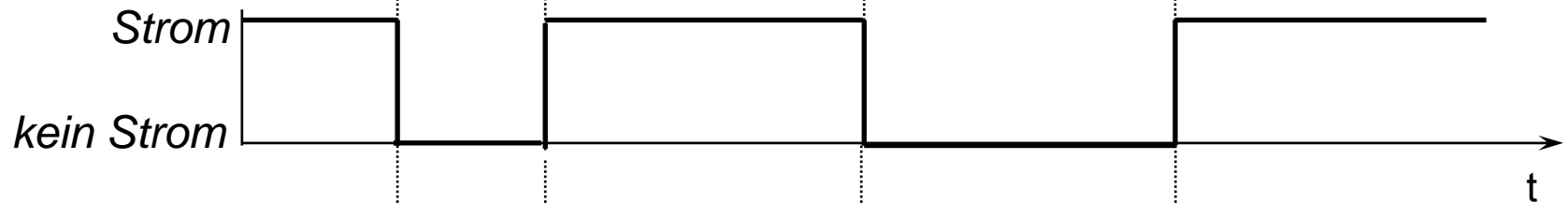


Einfachstrom/Doppelstrom-Verfahren

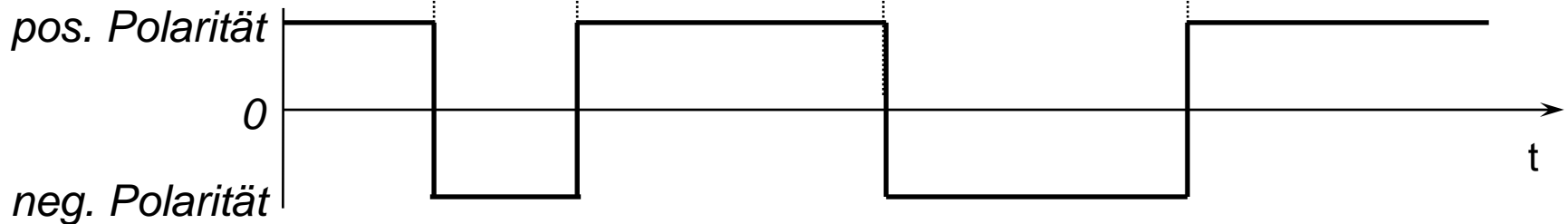
Zu übertragende Daten:

1 0 1 1 0 0 1 1

Einfachstrom:



Doppelstrom:



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



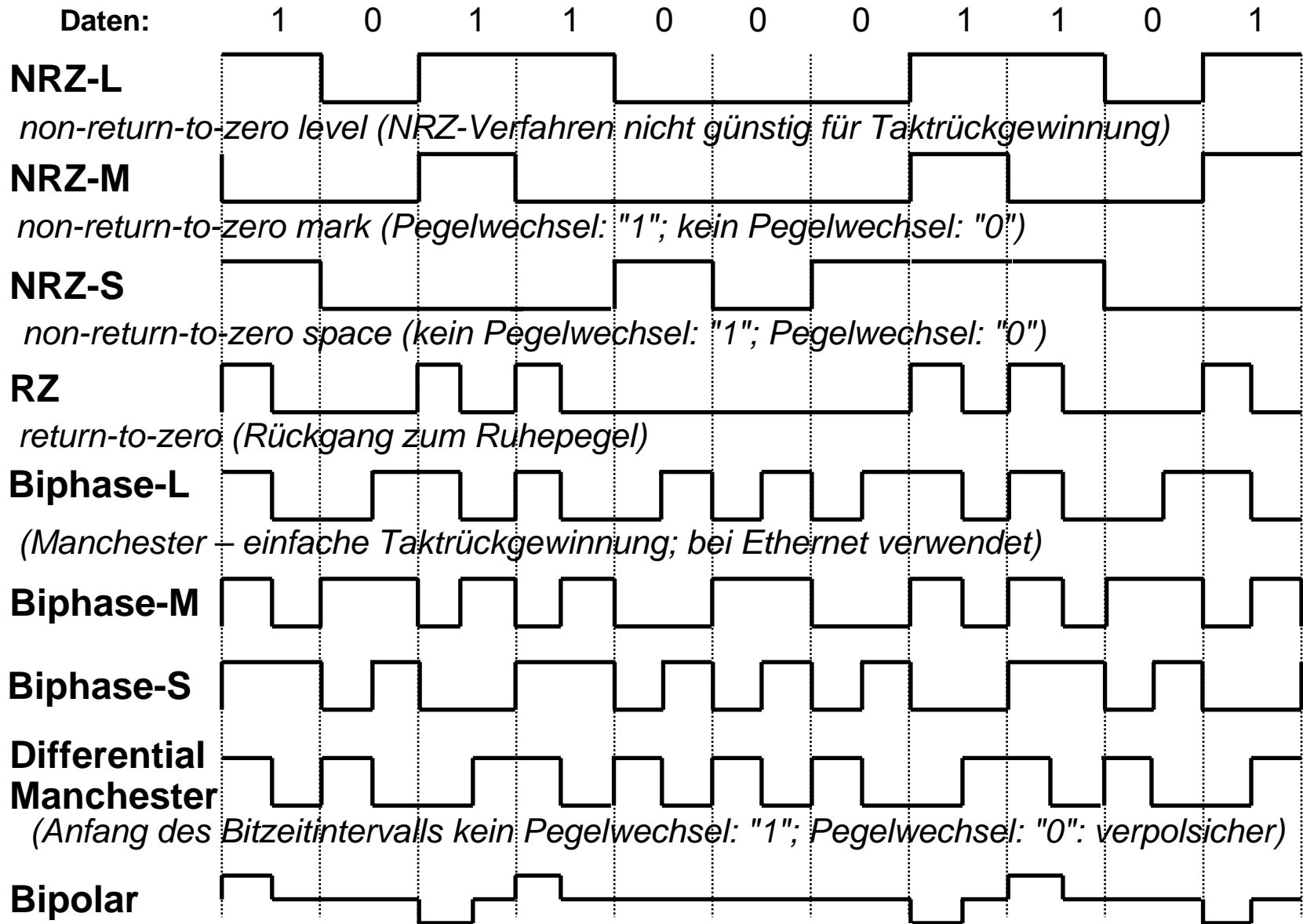
Moderne Basisbandverfahren

- ❑ 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

- ❑ **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





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

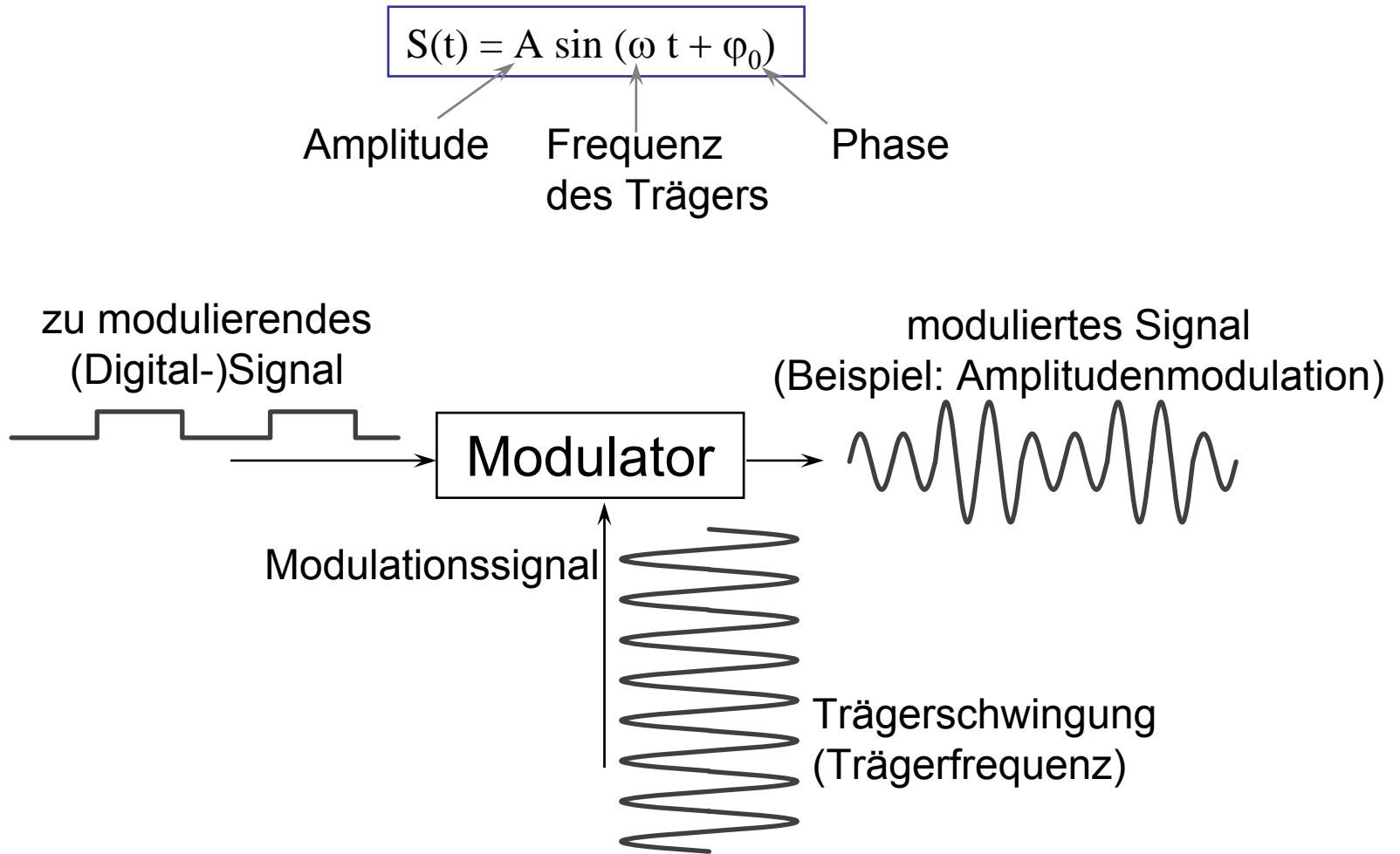


Übertragungsverfahren mit Träger - Begriffe

- ❑ 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)



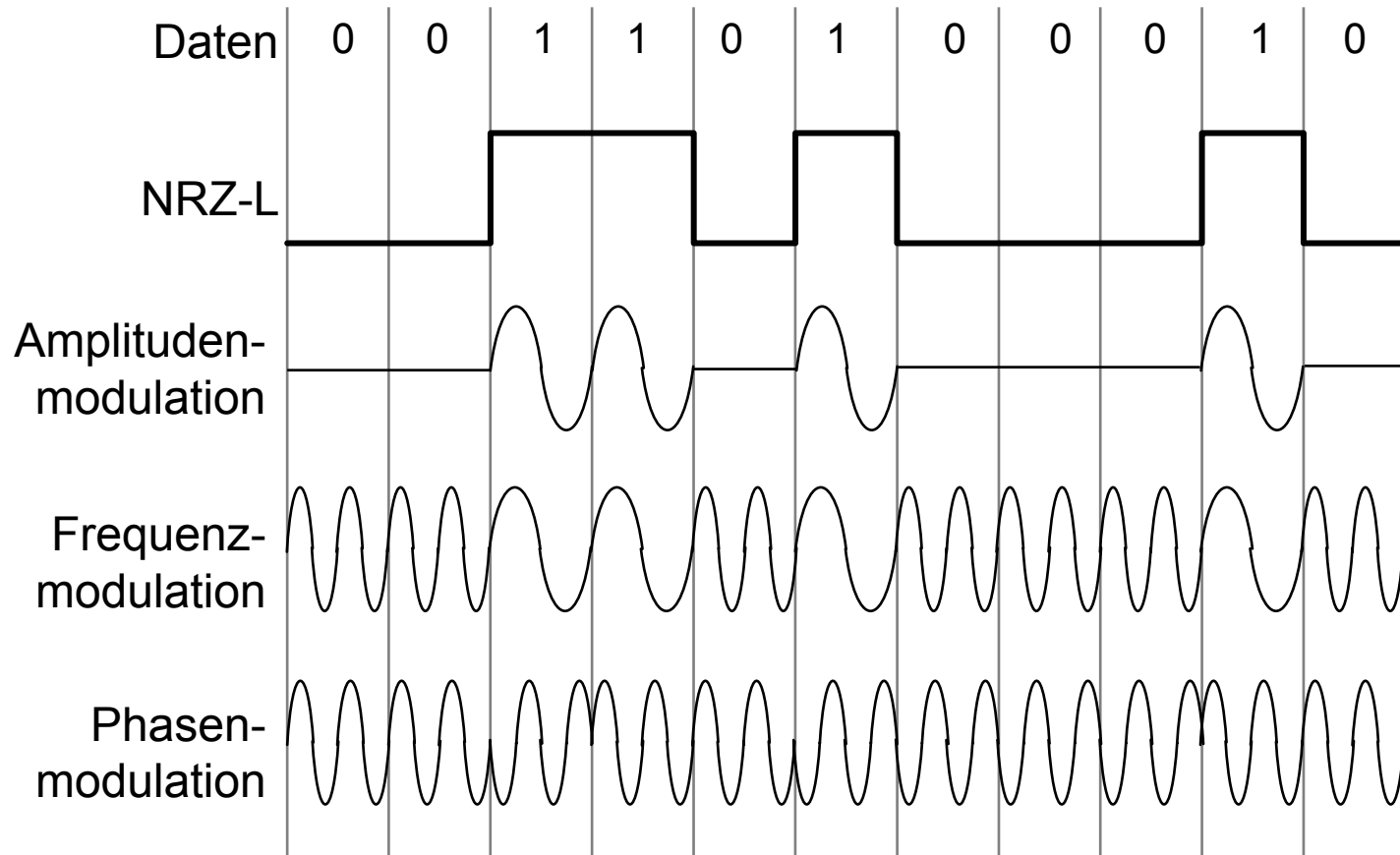
Prinzip der Schwingungsmodulation



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

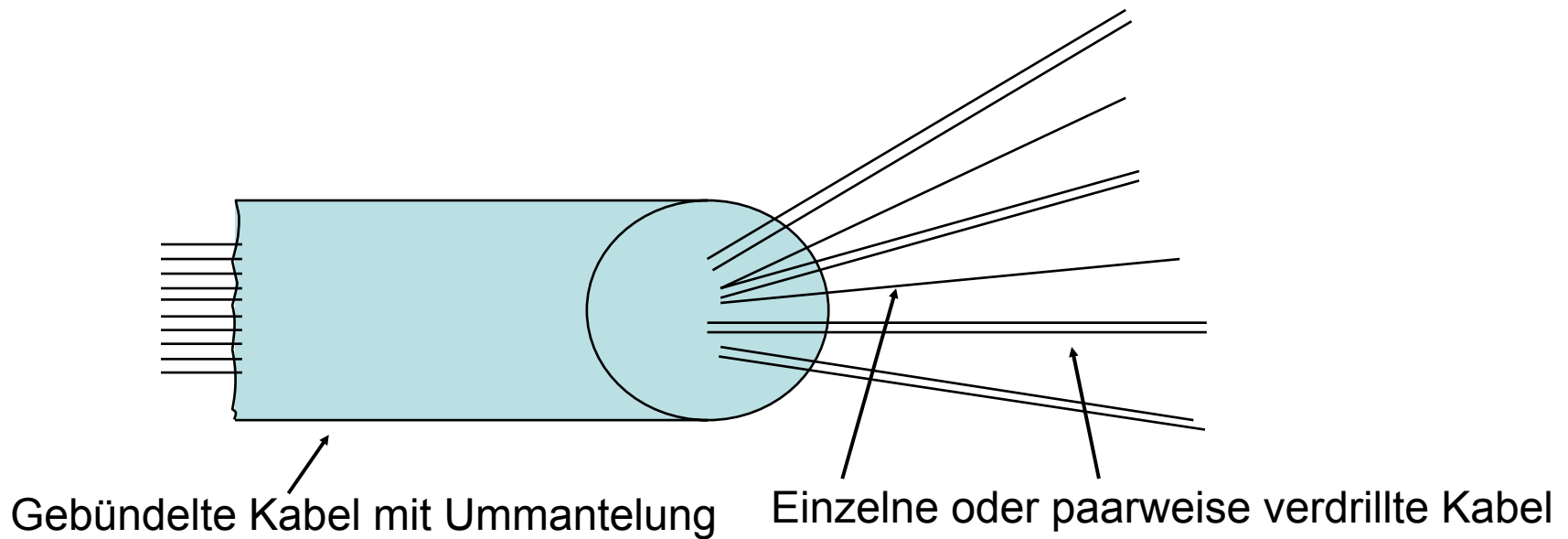


Raummultiplex

- Bündelung vieler Einzelübertragungswege heißt:

Raummultiplex

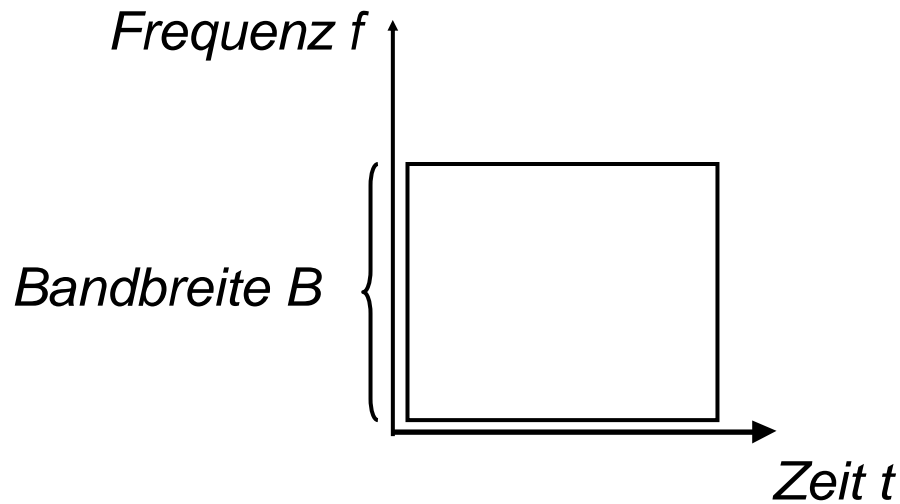
- Beispiele: mehrspurige Autobahn, Leitungsnetz zwischen Fernvermittlungsstellen der Telekom





Übertragungskapazität eines Nachrichtenübertragungssystems

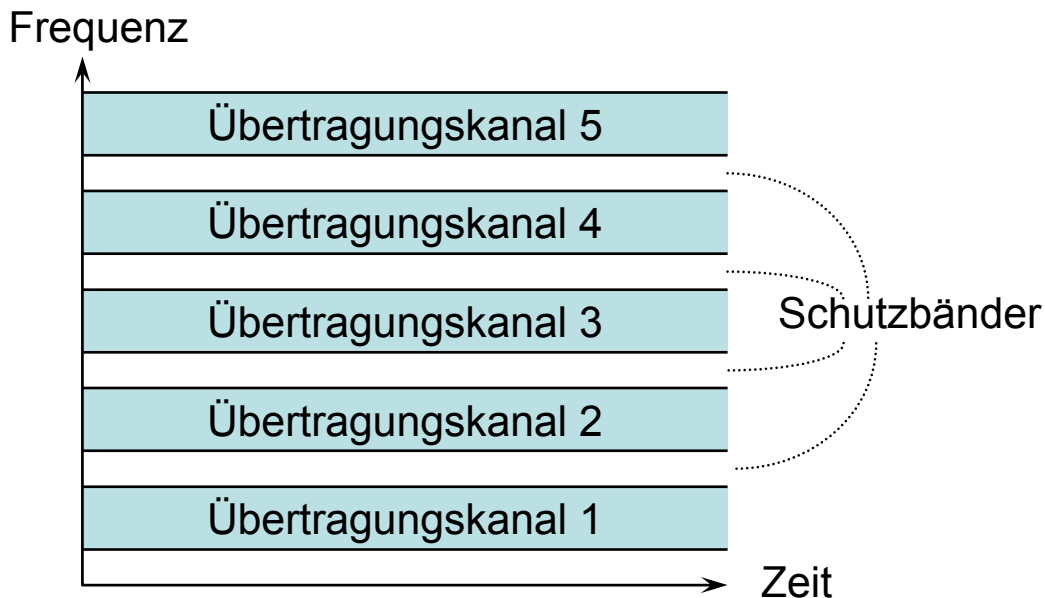
- Zeitgesetz der Nachrichtenübertragungstechnik:
 - integrale **Übertragungskapazität** eines Systems = Produkt der Bandbreite (Frequenzbereich) und der zur Verfügung stehenden Zeit
(Achtung: idealer Fall ohne Störungen bei binärem Signal)





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.



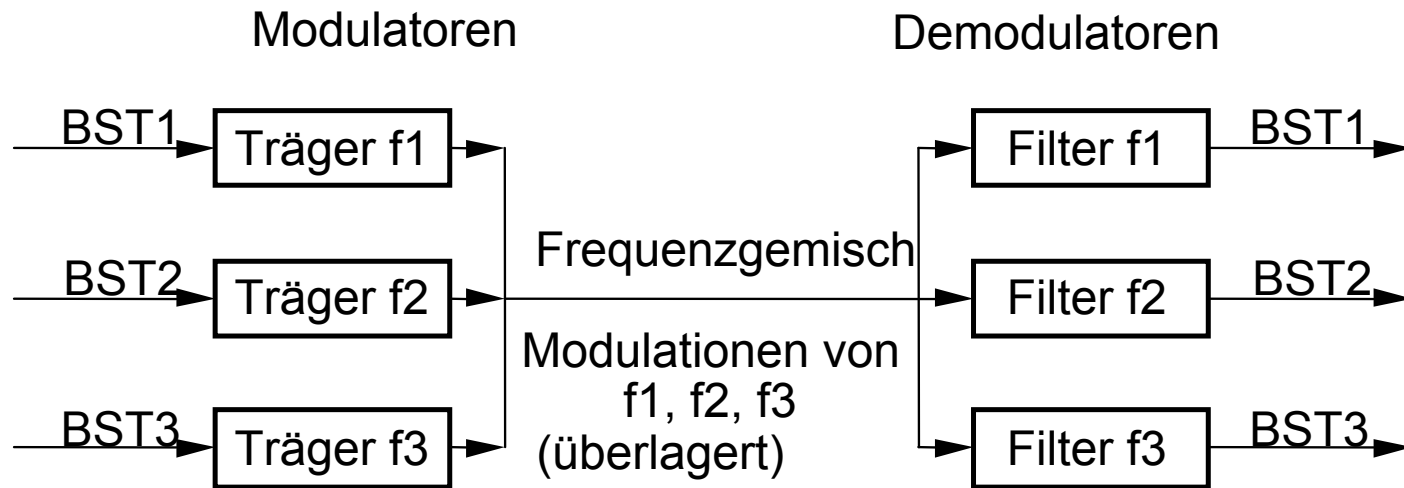
*Nutzung der Übertragungskapazität eines Übertragungsweges
im Frequenzmultiplex*



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

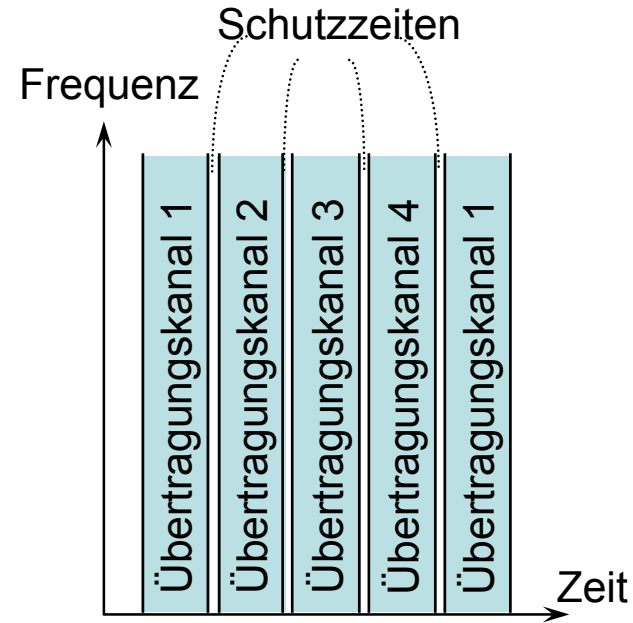


Schema der technischen Realisierung eines Frequenz-Multiplexsystems
BSTx = Bitstrom x



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.

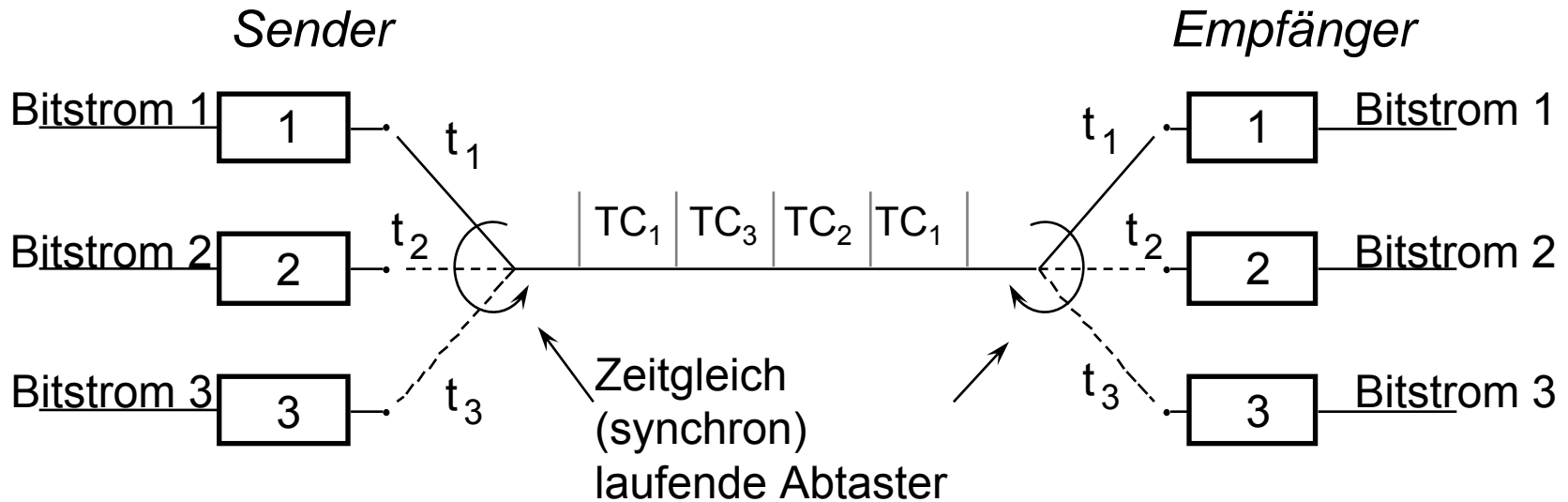


Nutzung der Übertragungskapazität im Zeitmultiplex



Eignung des starren Zeitmultiplex

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

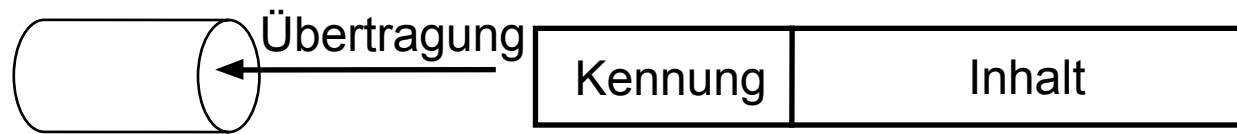


- Festes Zeitmultiplex mit starrer Zeitscheibenzuteilung.
- Übertragungseinheit z. B. ein Bit, ein Byte (Oktett).
- Jedem Sender wird periodisch eine Zeitscheibe (time slot, time slice) TC_1 , TC_2 TC_n zugeteilt. Sender, Abtaster und Detektionsmechanismus beim Empfänger laufen im gleichen Takt: synchrone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

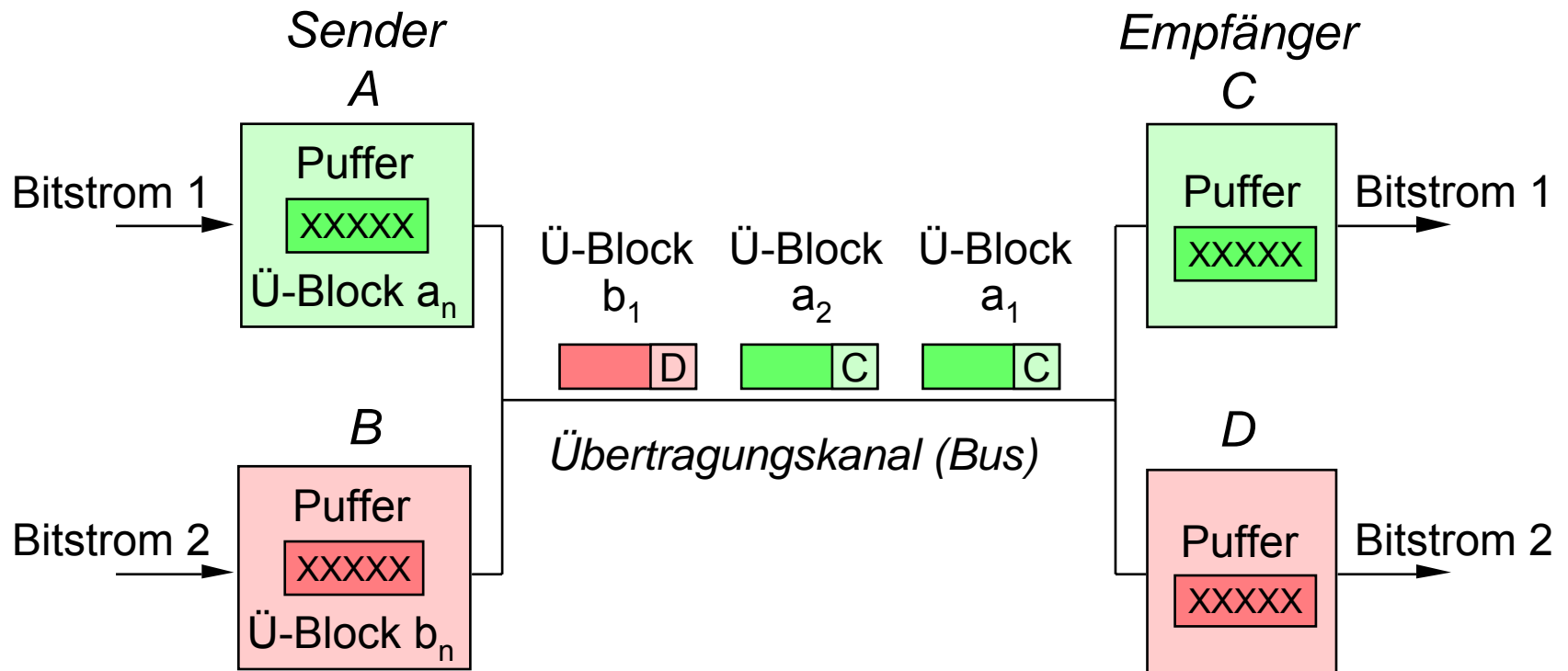


Schematischer Aufbau eines Übertragungsblocks mit Kennung

- ❑ 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:**

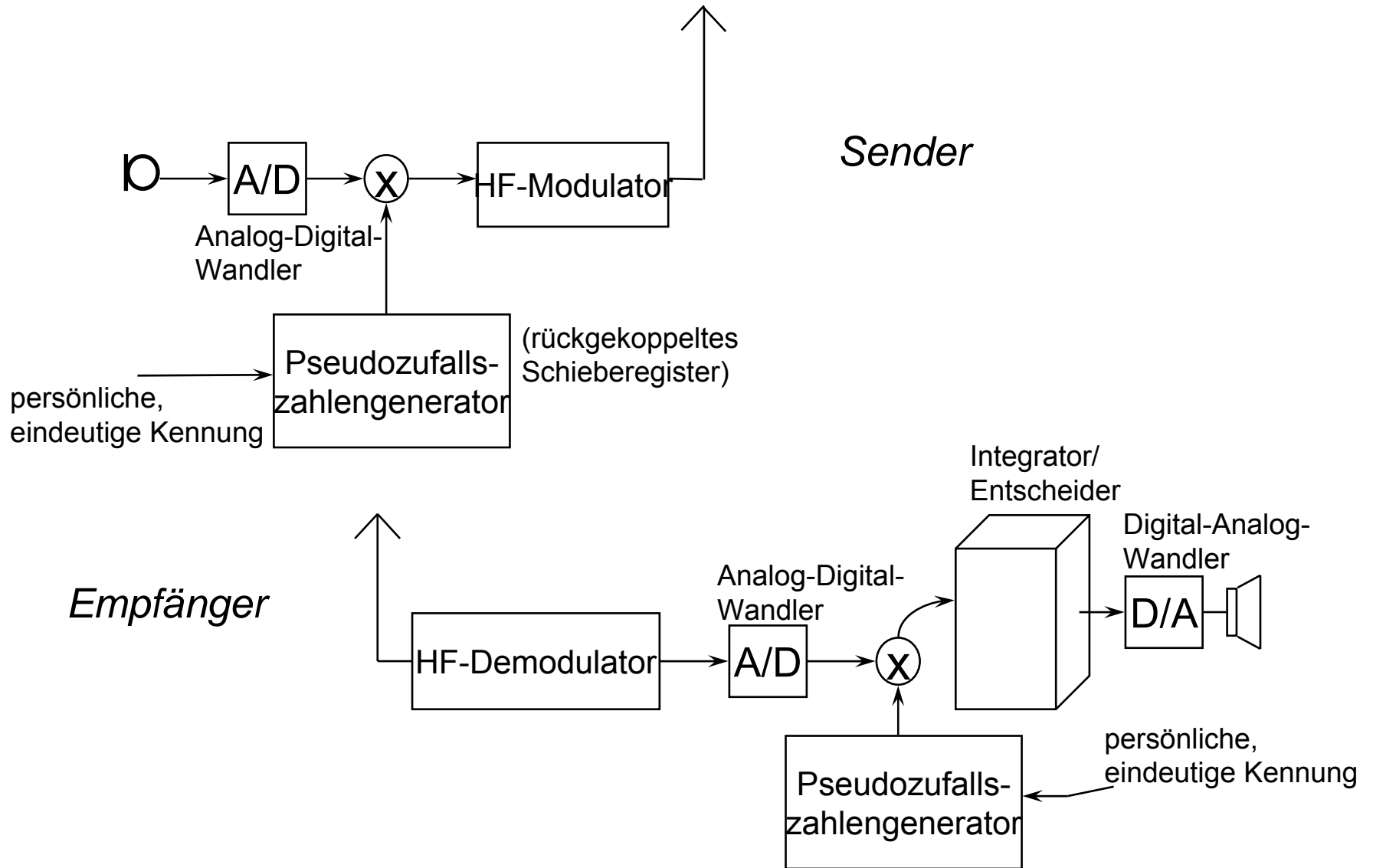
- höhere Komplexität der Implementierung wg. Signalregenerierung

□ **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

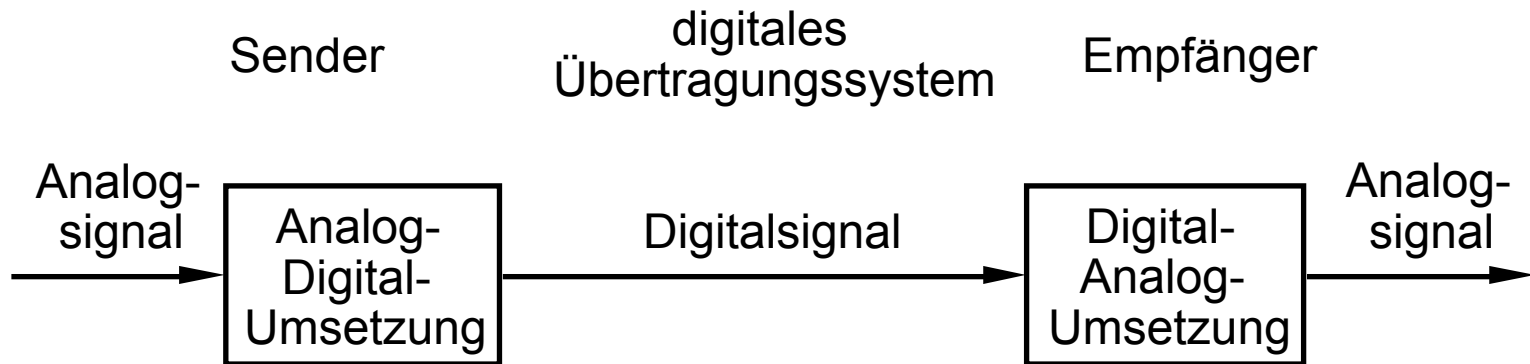




11.4.4. Digitale Übertragung analoger Daten

- 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*



- ❑ 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 von Shannon und Raabe (1939):

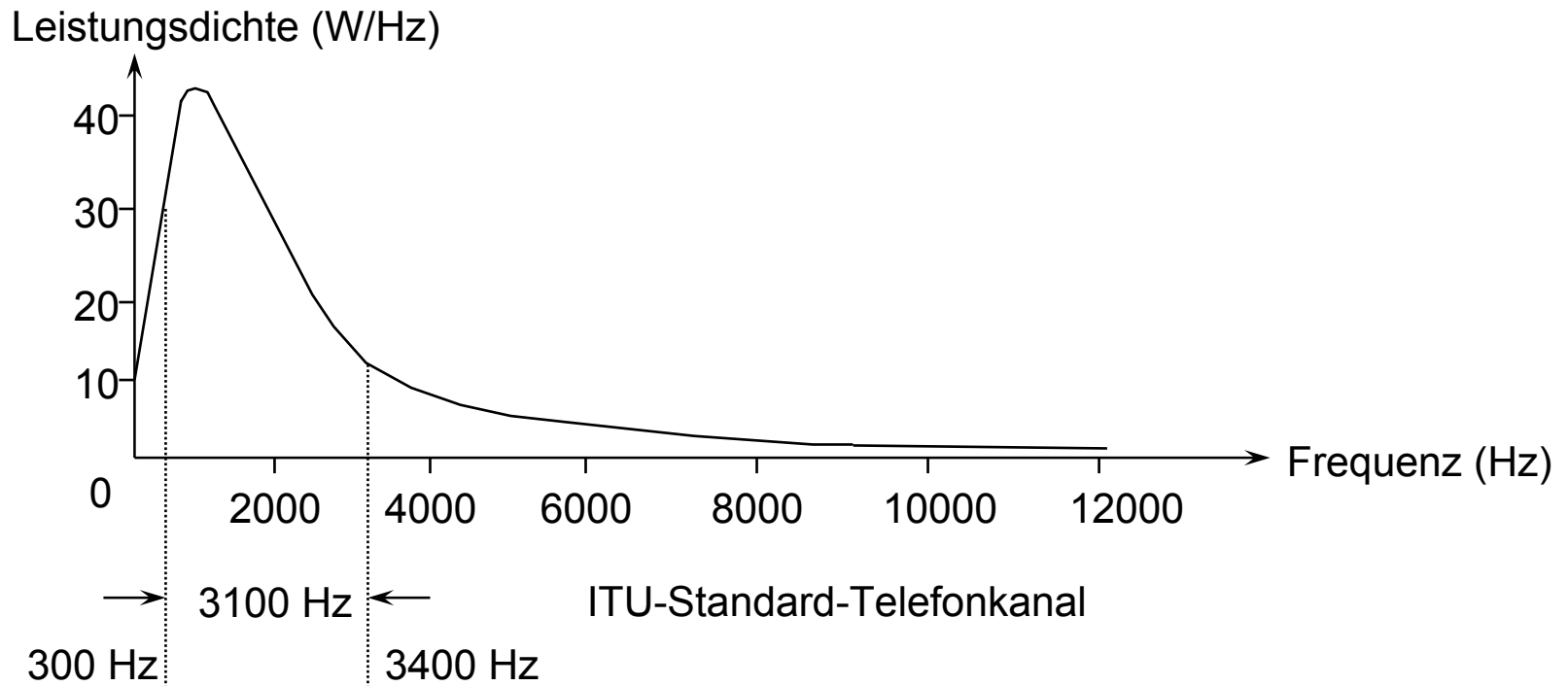
- Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs der abgetasteten Analogsignale ist eine Mindestabtasthäufigkeit (Abtastfrequenz f_A) erforderlich (bei periodischem Abtastzyklus).
- **Abtasttheorem:** Eine Signalfunktion, die nur Frequenzen im Frequenzband B (bandbegrenztetes Signal) enthält, wobei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

$$f_A = 8 \text{ kHz}$$

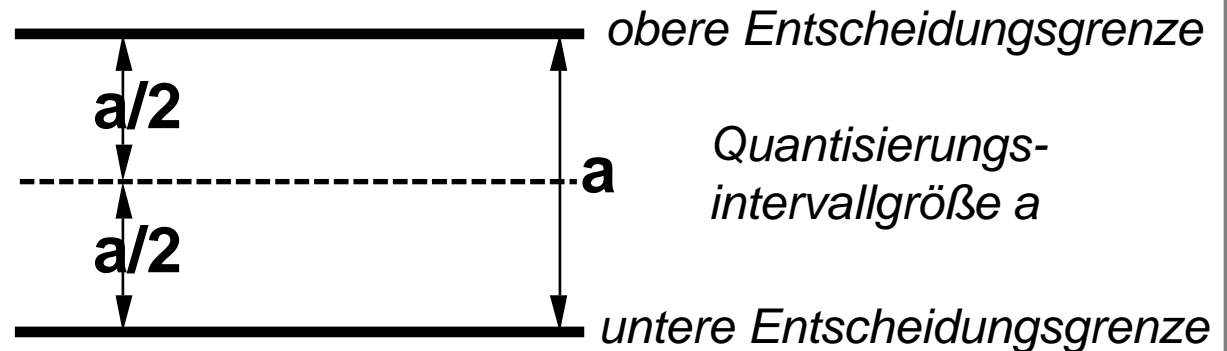
□ *Abtastperiode*

- $T_A = 1/f_A = 1/8000\text{Hz} = 125 \mu\text{s}$
- 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 = $a/2$)



- ❑ 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.



□ 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)

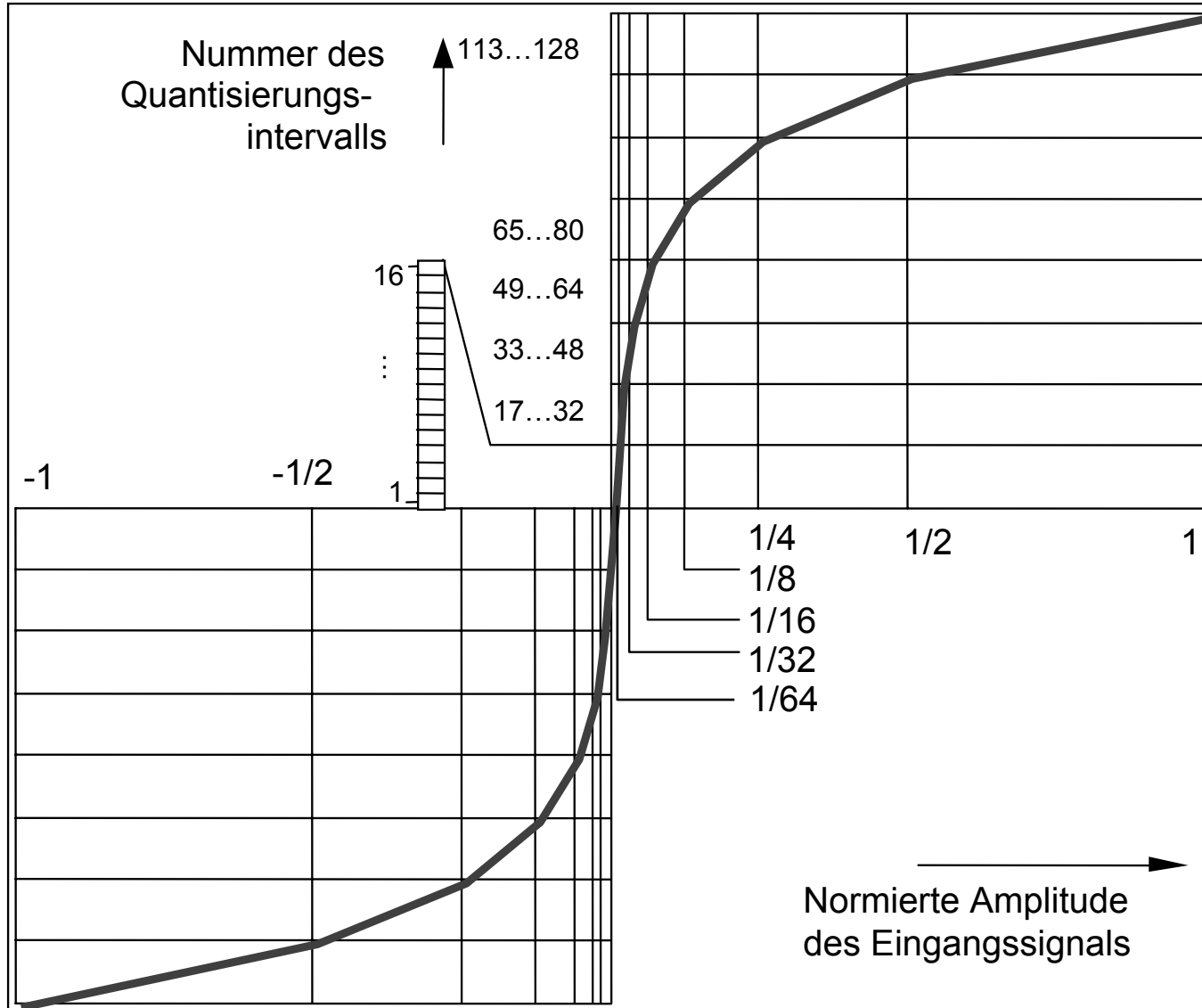


Ungleichförmige Quantisierung

- ❑ 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.

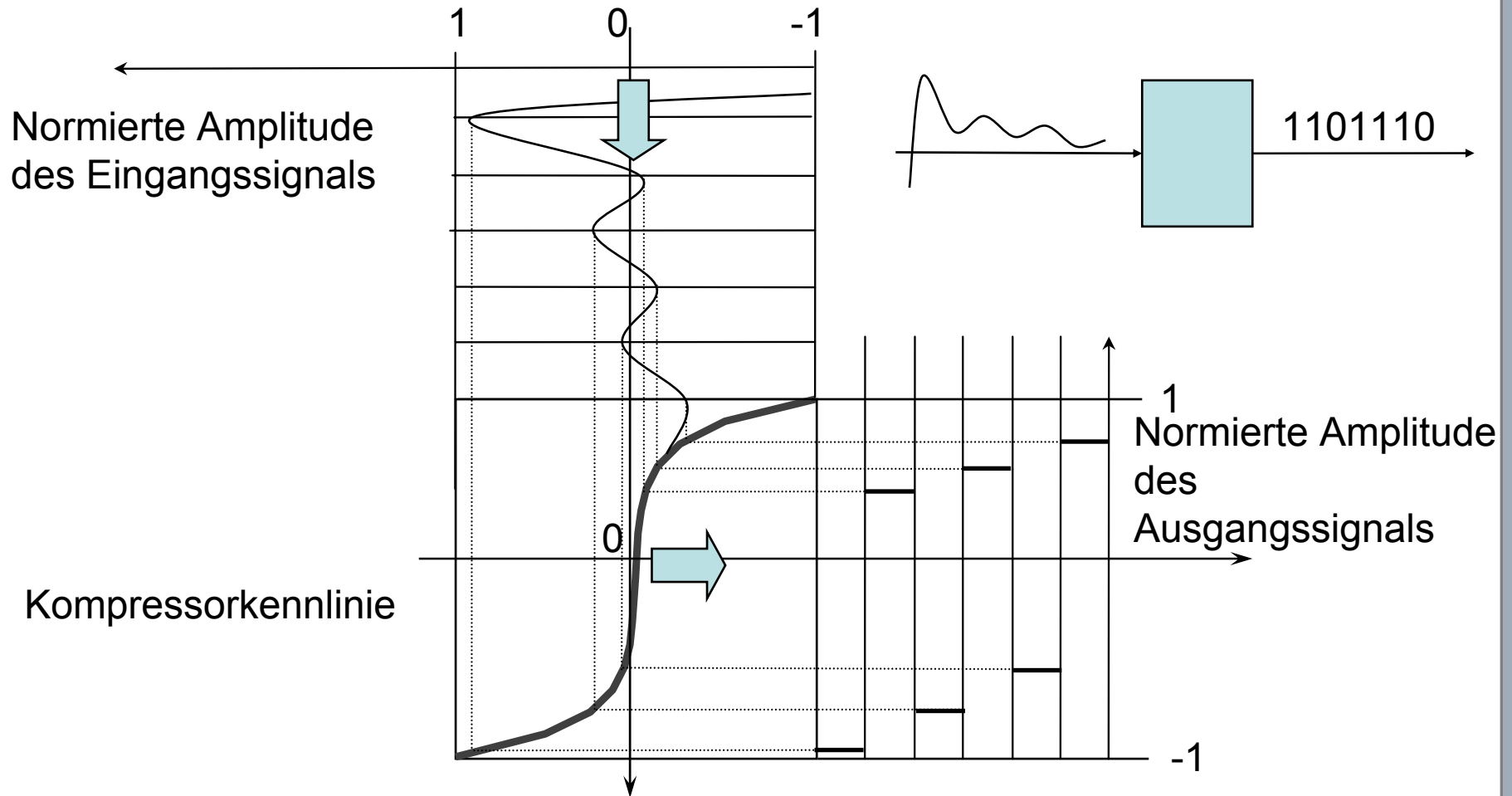


13 Segment-Kompressorkennlinie



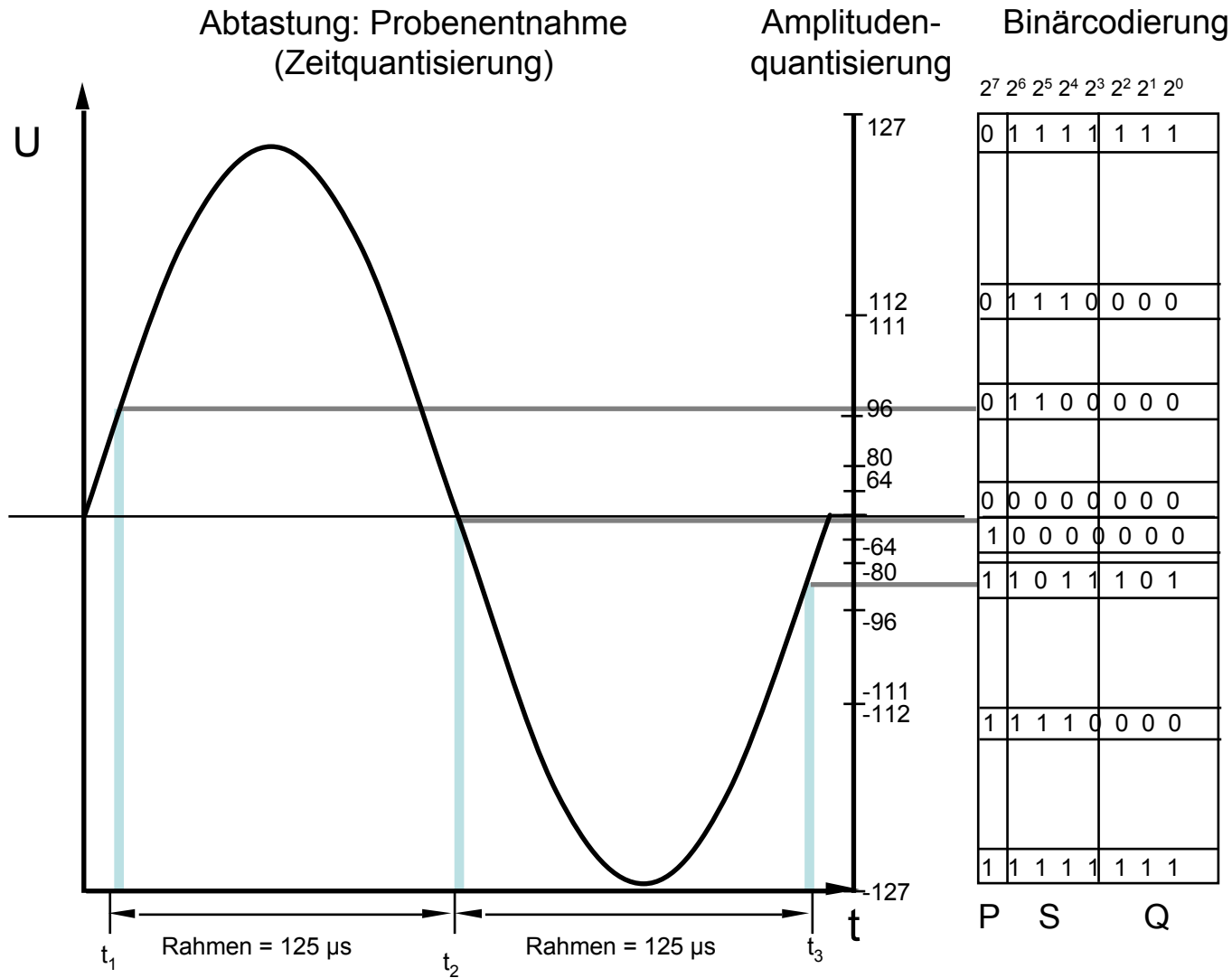


Kompressorkennlinie - Prinzip





Zusammenhang bei der PCM-Technik



P: Polarität
 S: Segmentcode
 Q: Quantisierungscode



- ❑ 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.

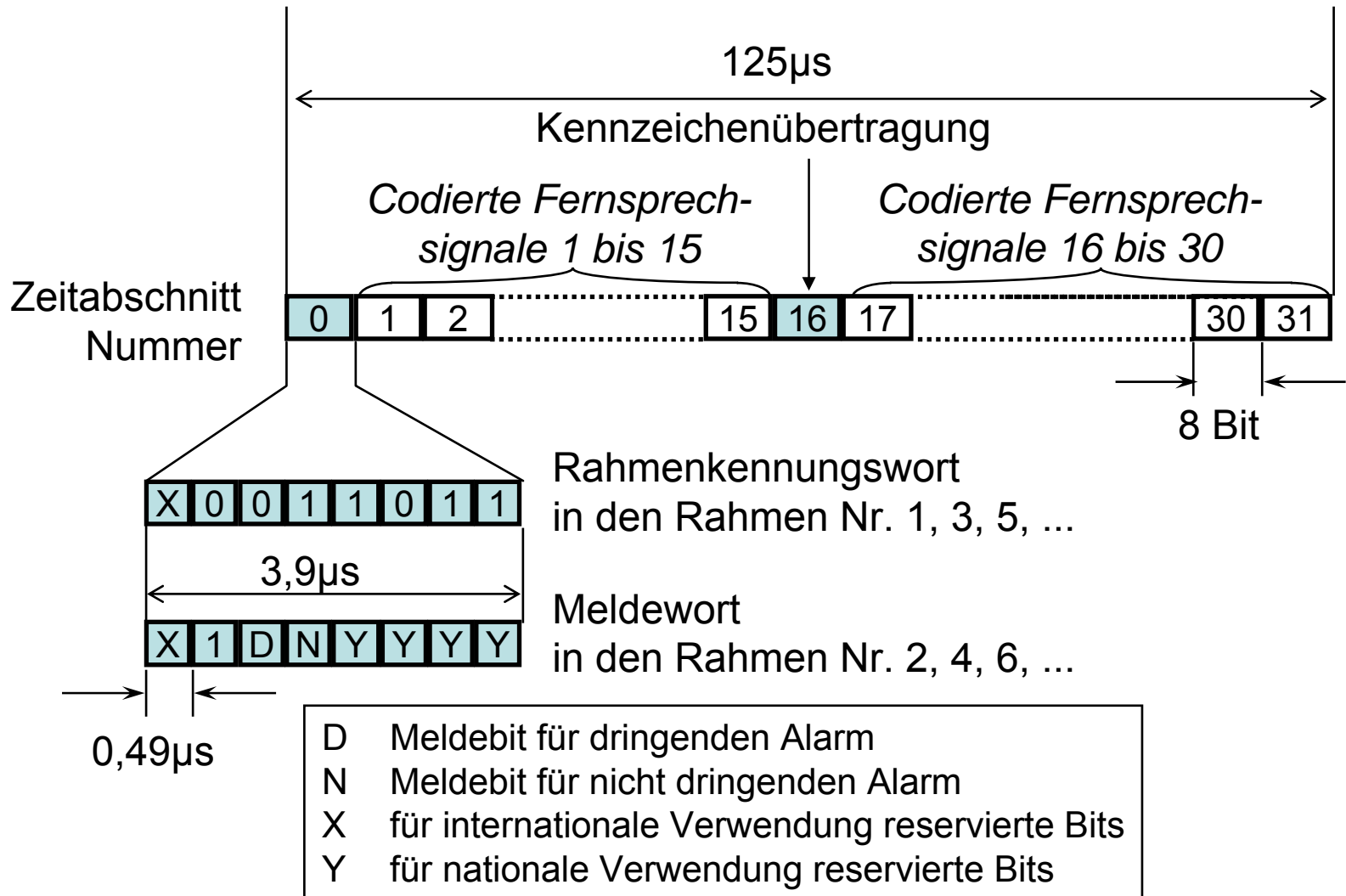


PCM-Multiplexsysteme - Rahmenstruktur

- 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!



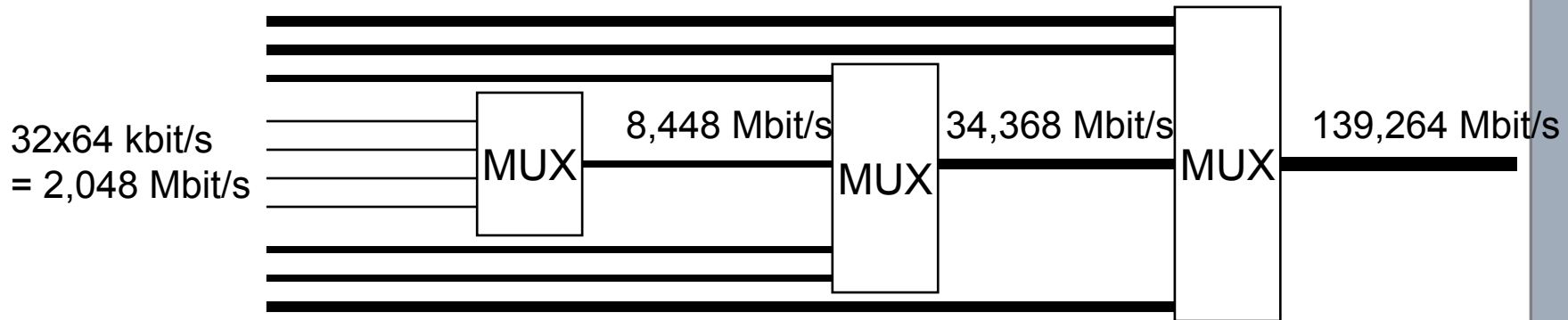
Pulsrahmen des Systems PCM 30





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



MUX = Multiplexer

- 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).