

Vorlesung Einführung in Rechnernetze

3. Physikalische Grundlagen

Prof. Dr. Martina Zitterbart

Dipl.-Inform. Martin Florian, Markus Jung (M.Sc.), Matthias Flittner (M.Sc.)
[zitterbart | florian | m.jung | flittner]@kit.edu

Institut für Telematik, Prof. Zitterbart



© Peter Baumung

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

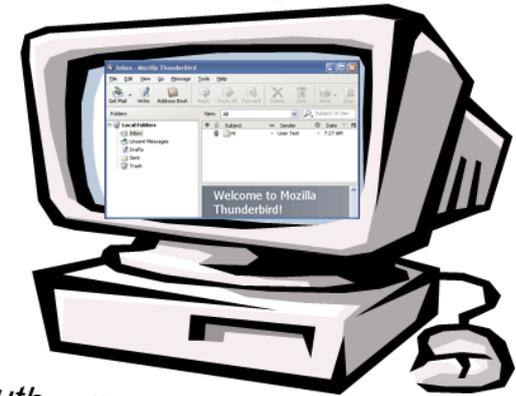
1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

Einordnung

Sender



Empfänger



Server zur
Namensauflösung



...1011010010...

E-Mail-Server example.com?
192.168.66.6

Authentifizierung,
Verschlüsselung

neue E-Mails?
E-Mails!

Ende-zu-Ende-
Kommunikation

Sendender
E-Mail-Server

Zwischensystem
(Vermittlungssystem)

Dateneinheit

Empfangs-
E-Mail-Server

Speicher

■ Pingo-Link für diese Vorlesung:

→ <http://pingo.upb.de/6466>

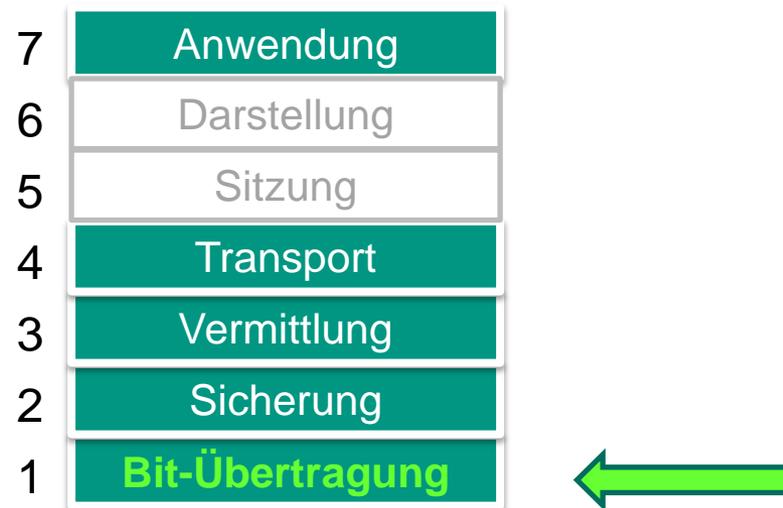


<http://pingo.upb.de/>



Einordnung

- Wir befinden uns auf Schicht 1 des OSI-Referenzmodells

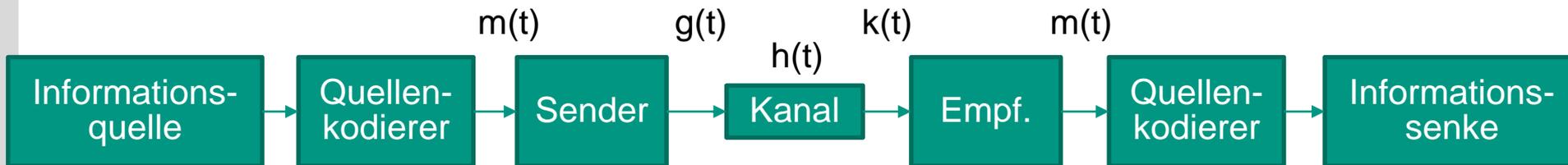


1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

System zur Datenübertragung

■ Grundlegendes System



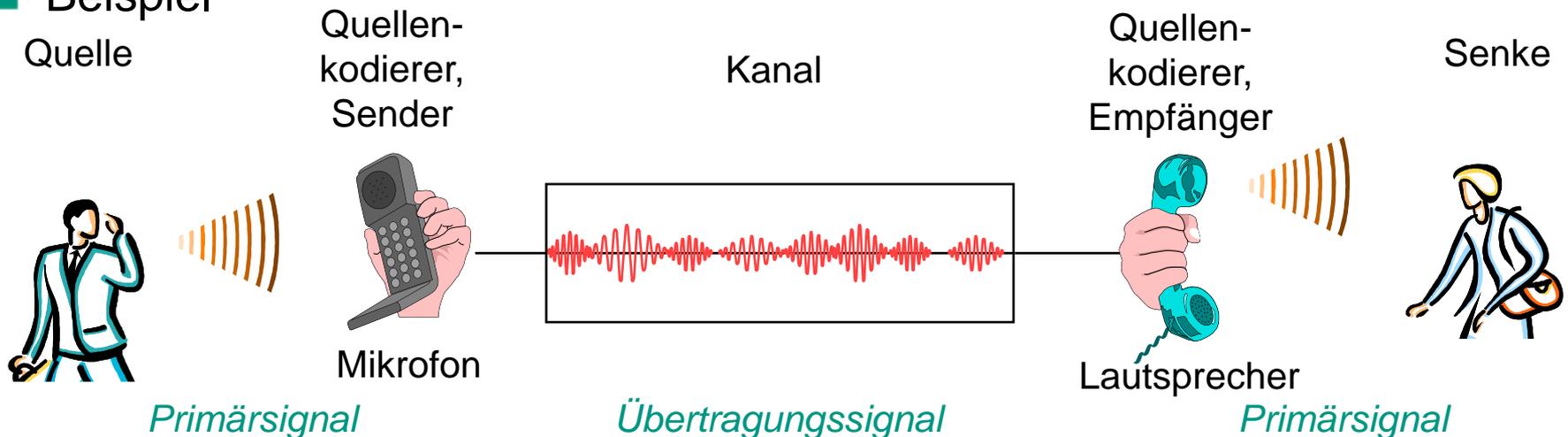
■ Quellenkodierer

- Umwandlung von Primärsignal in elektrisches/optisches Signal

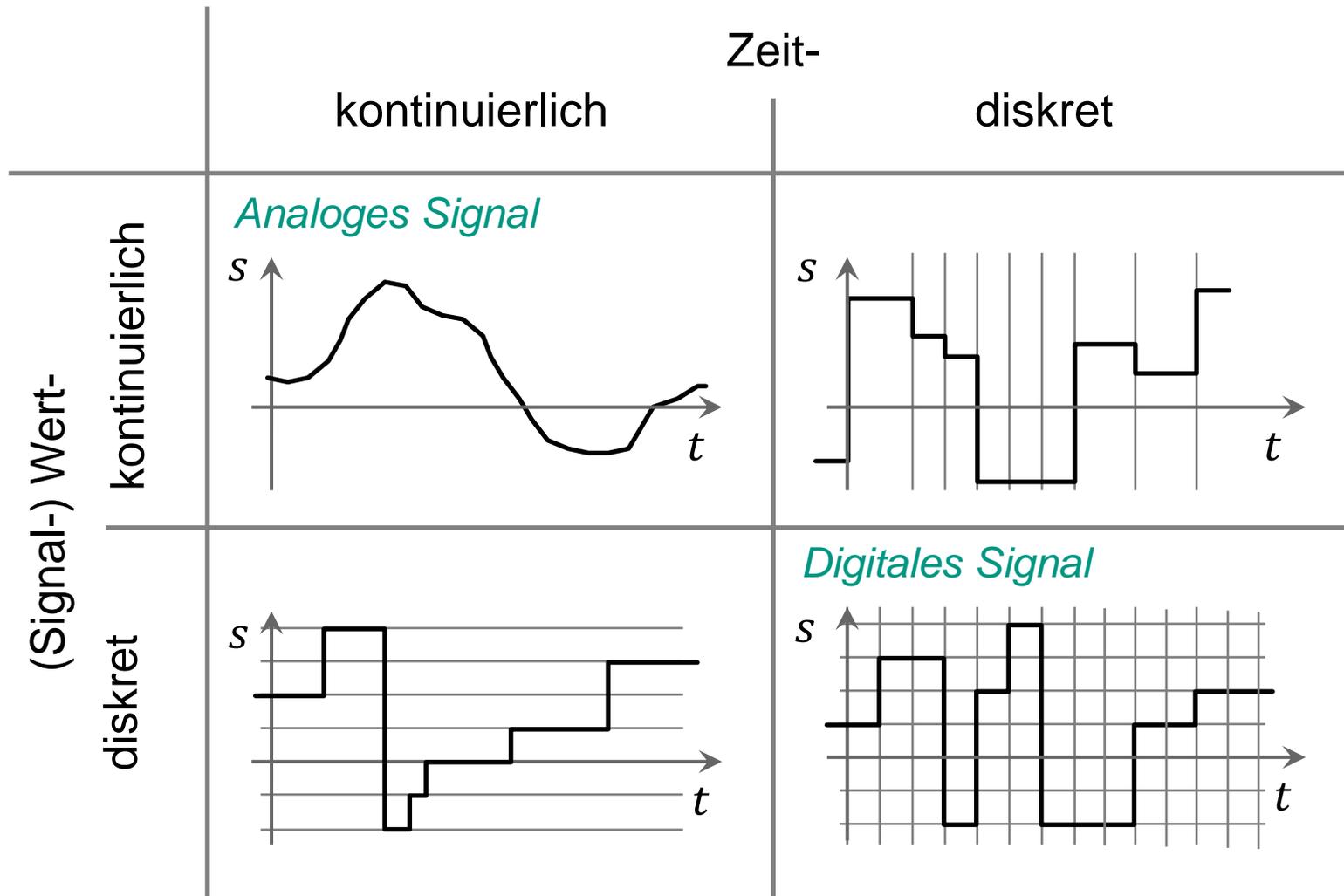
■ Sender

- Bringt Nachrichtensignal in geeignete Form für Übertragungskanal

■ Beispiel



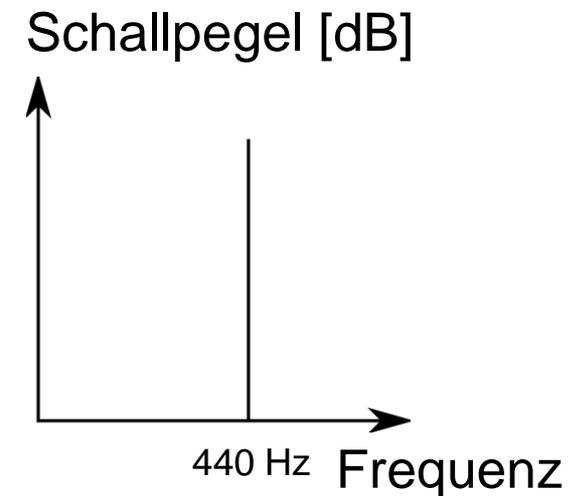
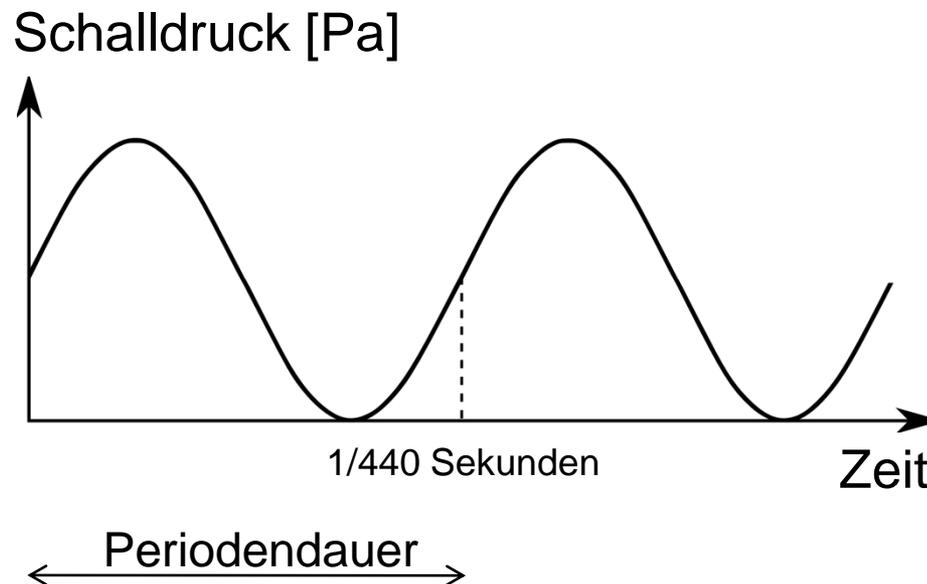
Einteilung der Signale in Signalklassen



- Motivation aus der Akustik
 - Ein *reiner Ton* (auch: einfacher Ton, Sinuston) besteht aus genau einer Frequenz (kann praktisch nur elektronisch erzeugt werden)
 - Kammerton a hat die Frequenz 440 Hz
- Darstellung des Kammertons a

im Zeitbereich

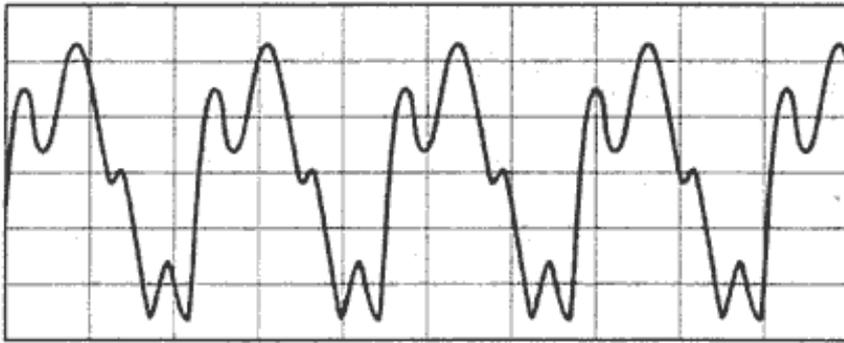
im Frequenzbereich



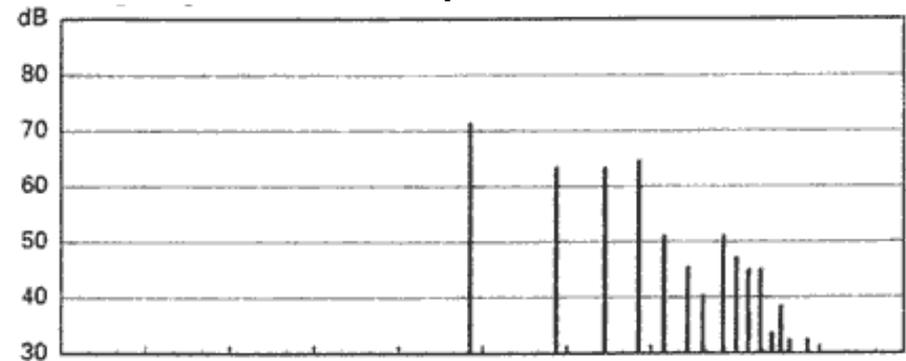
Überlagerung von Frequenzen

- Zurück zur Akustik
 - *Klänge* sind definiert als Grundton, dem noch weitere Töne mit ganzzahligem Vielfachen der Grundfrequenz überlagert sind
 - Beispiel: Kammerton a bei einer Geige

im Zeitbereich



im Frequenzbereich



Quelle: www.laermorama.ch

- *Geräusche* enthalten sehr viele Frequenzen und nicht nur ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz
- Wie bestimmt man die Frequenzen eines Signals?
 - Antwort darauf gibt die Fourier-Reihe/Transformation

Signale und ihre Darstellung

■ Für uns relevant: periodische Signale

- Haben eine **Periodendauer** T , d.h. die Intensität $s(t)$ des Signals wiederholt sich nach T Zeiteinheiten

$$s(t + T) = s(t), \quad -\infty < t < \infty$$

- Zusammenhang mit der **Frequenz** f des Signals: $f = \frac{1}{T}$

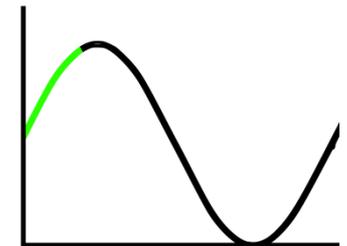
■ Phase φ des Signals

- Zum Zeitpunkt t gilt

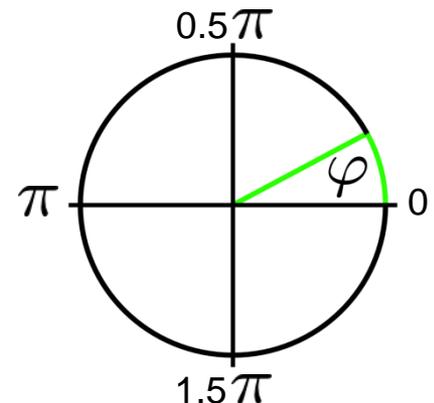
$$\varphi(t) = \underbrace{2\pi f t}_{\omega}$$

- ω ist die Winkelgeschwindigkeit

im Zeitbereich



auf dem
Einheitskreis



Fourier-Reihe: Sinus-Kosinus-Form

- Eine periodische Funktion lässt sich als Summe von Sinus-/Kosinuskurven unterschiedlicher Frequenzen darstellen.
- Nach Fourier gilt für eine *periodische* Funktion $x(t)$

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(2\pi n f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

- mit
$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \qquad B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

- und f_0 der Kehrwert der Periode von $x(t)$

Fourier-Reihe: Amplituden-Phasen-Form

- Häufig wird auch die Amplituden-Phasen-Form der Fourier-Reihe verwendet

$$x(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n)$$

- hierbei ist C die Amplitude und θ der Winkel
- Es gilt der folgende Zusammenhang zur Sinus-Kosinus-Form

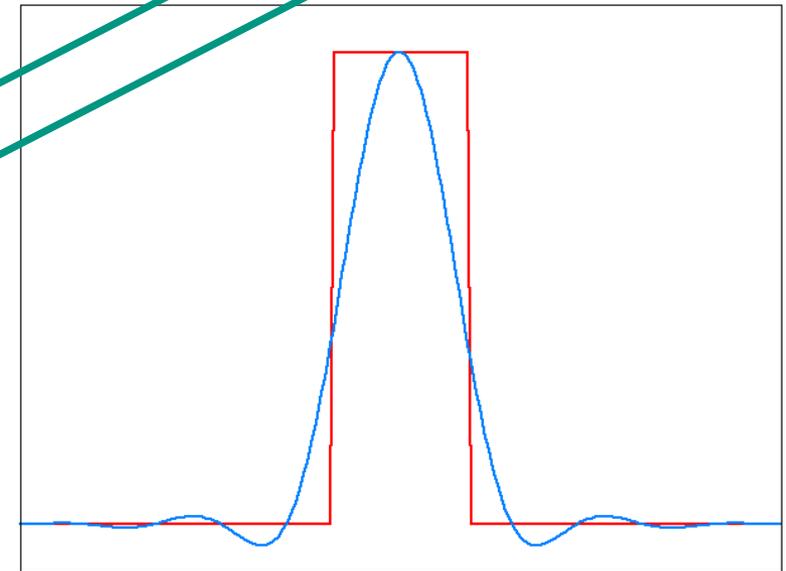
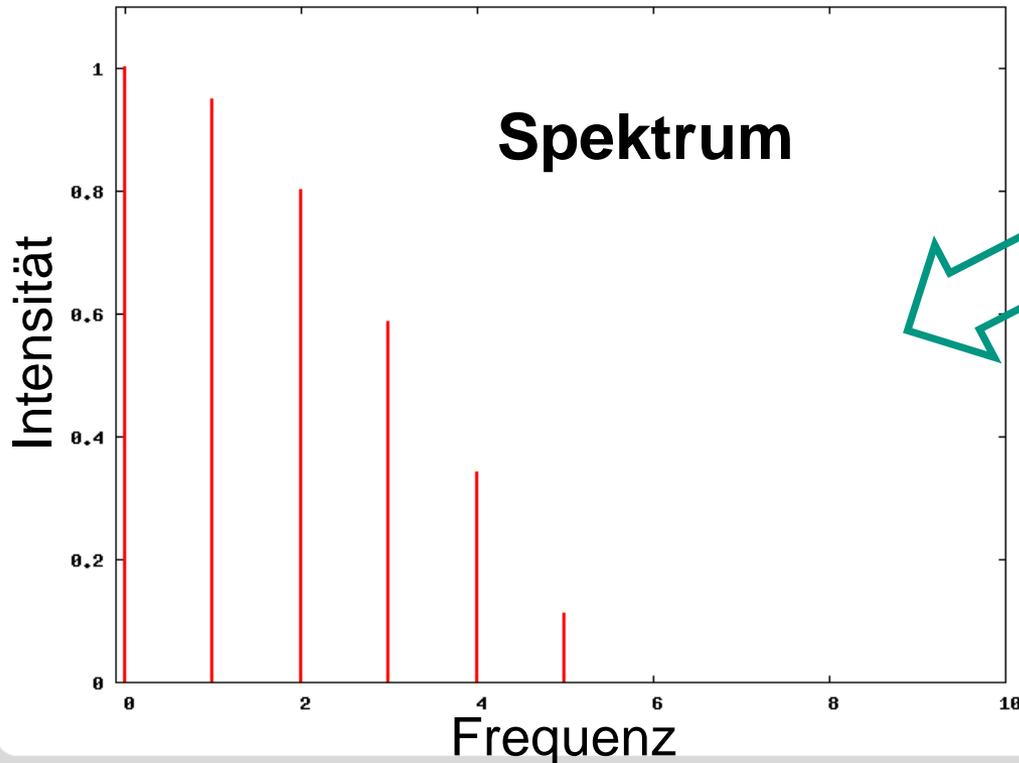
$$C_0 = A_0 \quad C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{-B_n}{A_n} \right)$$

Beispiel: Fourier-Reihe I

- Wir bilden die Fourier-Reihe eines Rechteck-Signals mit $n = 5$ harmonischen Schwingungen, d.h.

$$x(t) = \frac{C_0}{2} \sum_{n=1}^5 C_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n)$$

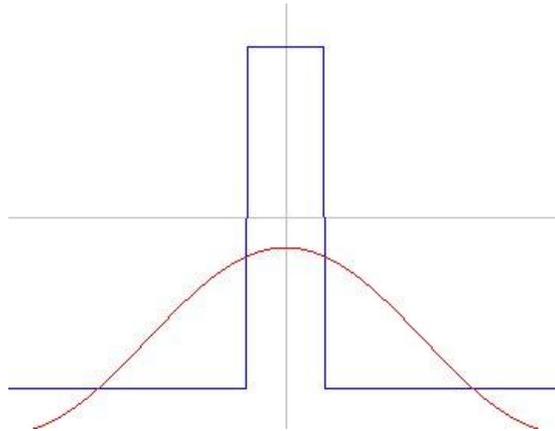
n	$C_n / \max(C_n)$	θ_n
0	1.0	0.0
1	0.94753	0.012037
2	0.79996	0.024074
3	0.58464	0.036110
4	0.34036	0.048147
5	0.10891	0.060184



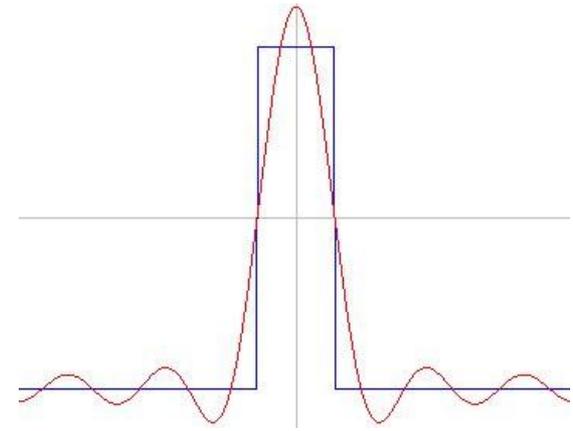
Beispiel: Fourier-Reihe II

- Auswirkungen der Anzahl harmonischer Schwingungen n

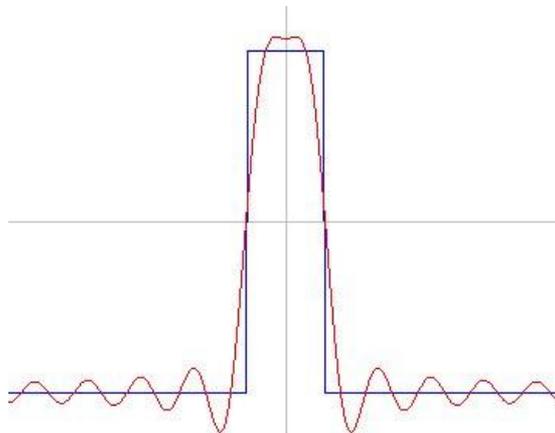
$n = 1$



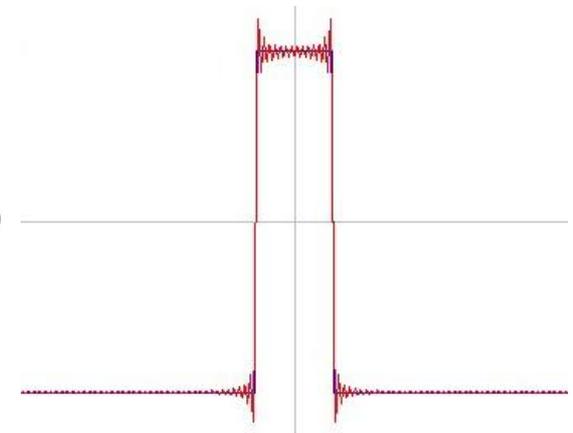
$n = 5$



$n = 10$



$n = 100$



■ Dezibel (dB)

- Die Einheit *Bell* (*B*) ist nach Alexander Graham Bell benannt
 - „dezi“ → $\text{dB} = 1/10 * B$
- Gibt das dimensionslose Verhältnis zweier Größen an
 - Das Verhältnis *L* zweier Größen P_1 und P_2 in dB ist definiert als

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

- P_2 ist dabei eine Referenzgröße; Beispiele:

- variabel

- Signal-Rausch-Abstand (Signal-Noise-Ration; SNR)

$$\text{SNR [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Signalenergie}}{\text{Rauschenergie}} \right)$$

- fest gewählt

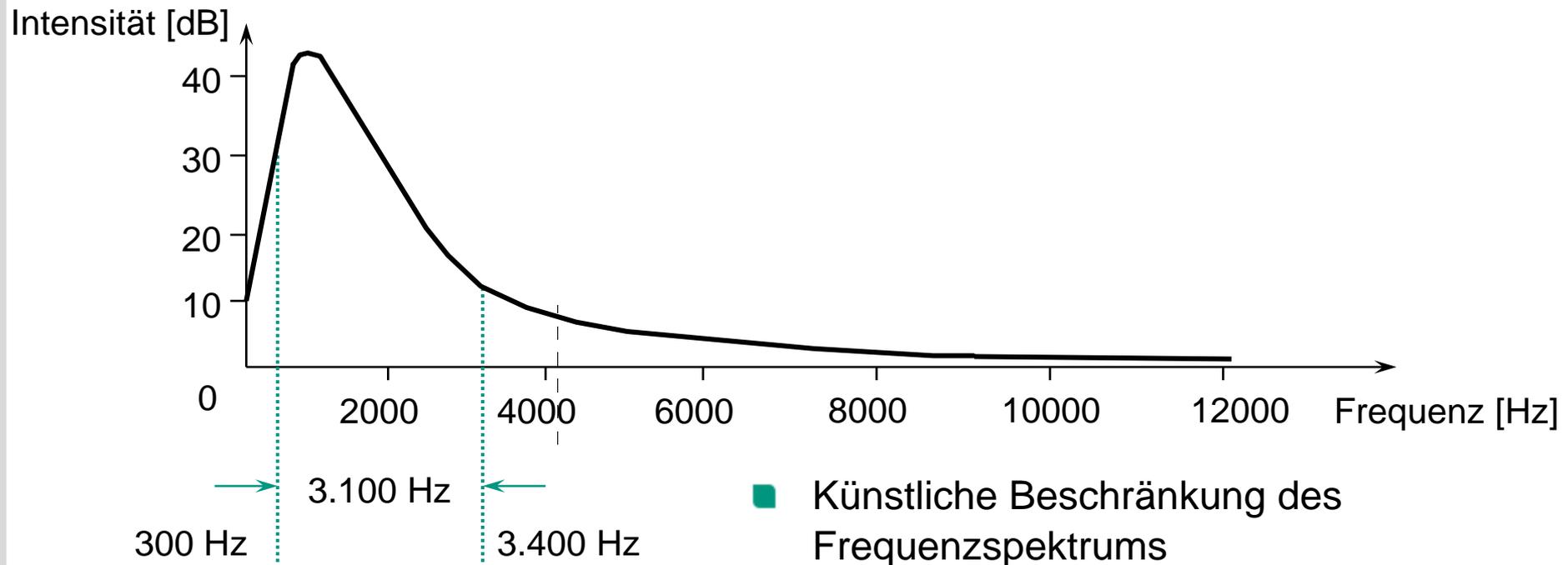
- Leistungspegel [dBm]: P_2 entspricht 1 mW
- Schallpegel [dB]: P_2 entspricht 0,00002 Pa (Schalldruck eines gerade noch wahrnehmbaren Tons der Frequenz 1 kHz)

<http://pingo.upb.de/>



Frequenzspektrum eines Signals

- Analoge Signale umfassen in der Regel ein kontinuierliches Frequenzspektrum
 - Beispiel: ITU-Standardtelefonkanal
Kontinuierliches **Frequenzspektrum** der menschlichen **Stimme**



Bandbegrenzte Medium

■ Ausgangssituation

- physikalische Medien übertragen stets nur ein endliches Frequenzband

- Signale müssen an die Übertragungscharakteristik des Mediums angepasst werden

■ Bandbreite von Übertragungskanälen

- Frequenzbereich, der über ein Medium (einschließlich der im Übertragungskanal enthaltenen Filter, Verstärker usw.) übertragen werden kann

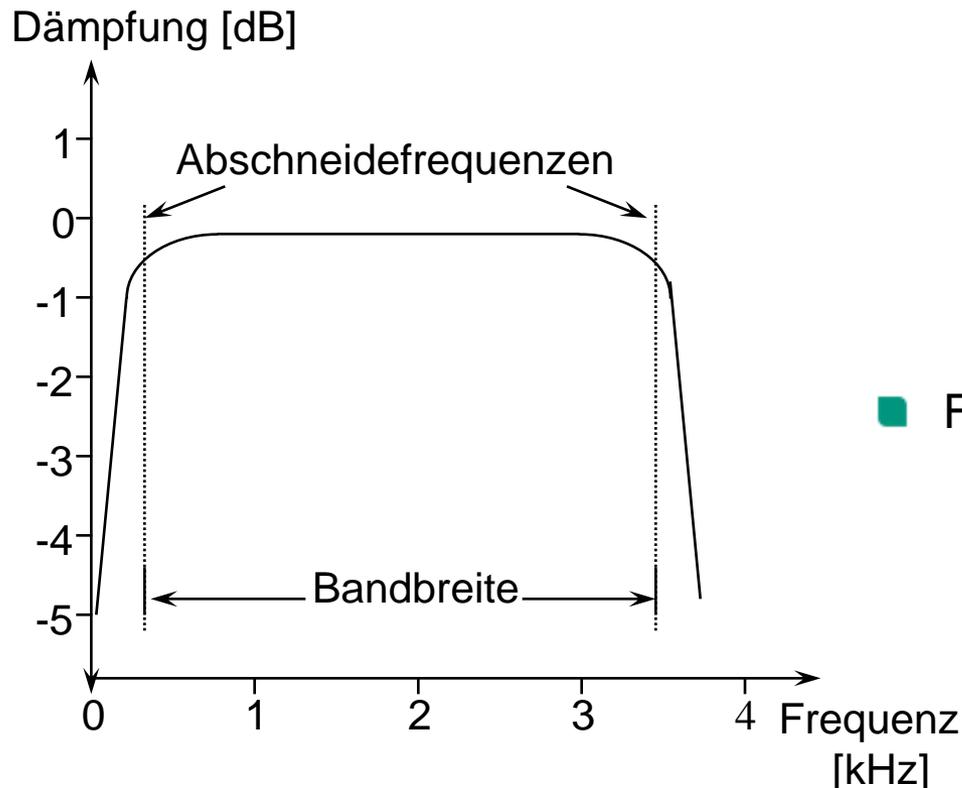
- Differenz der höchsten und niedrigsten Frequenzen

- Gemessen in Hz

■ Festlegung von Abschneidefrequenzen

- obere Grenzfrequenz f_G und

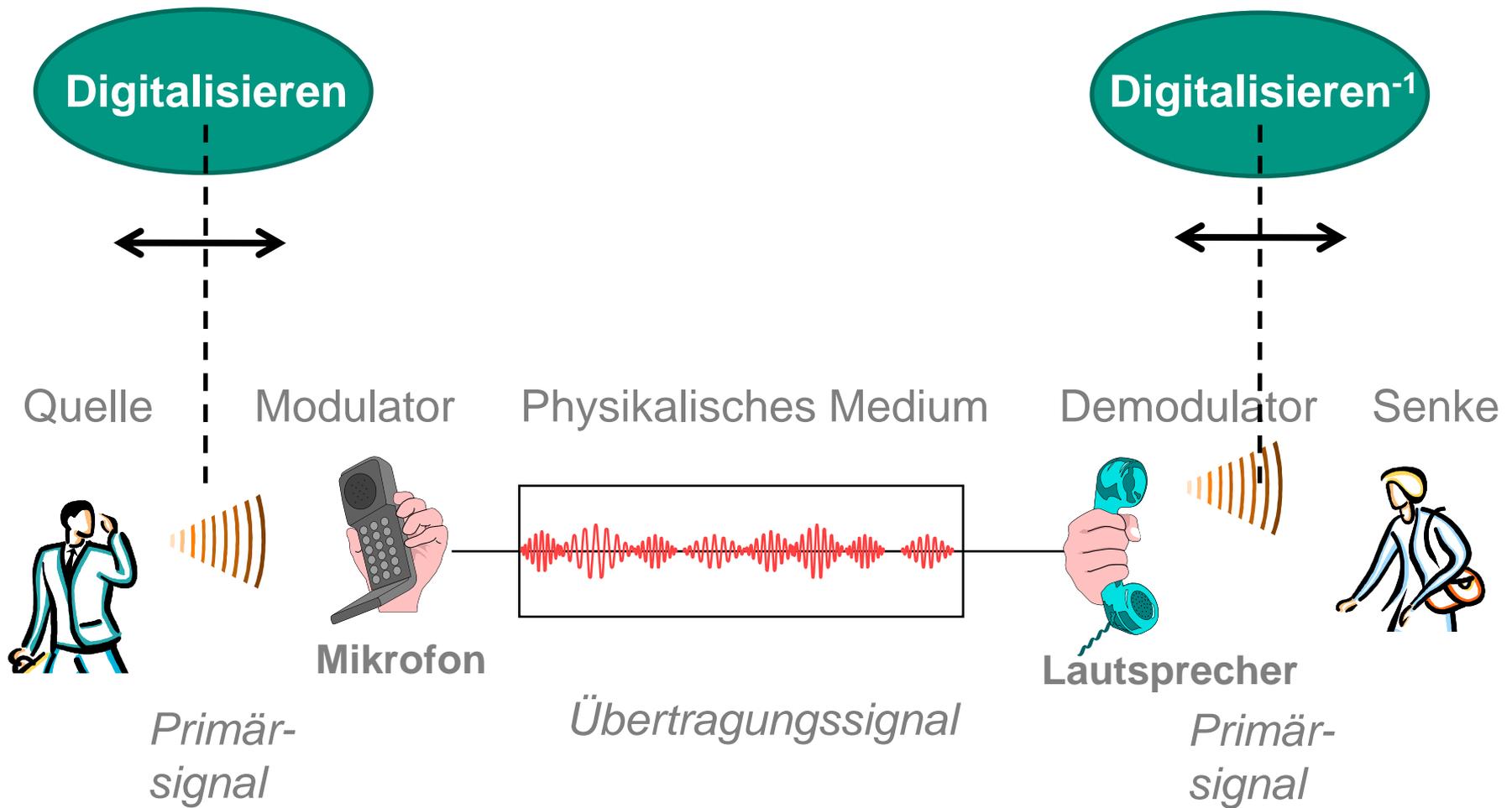
- untere Grenzfrequenz



1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

Digitalisierung analoger Signale



■ Pulse Code Modulation (PCM)

- Wandlung analoger Signale in digitale Signale (z.B. bei digitalen Fernsprechanaläen)

- Abtastung \Rightarrow zeitdiskretes Signal
- Quantisierung \Rightarrow zeit- und wertdiskretes Signal

■ z.B. Digitalisierung von Sprache

- Vorgaben
 - Frequenzspektrum der menschlichen Stimme
 - Fähigkeiten eines Fernsprechanals

■ Abtasttheorem von Shannon und Raabe

- Die Abtastfrequenz f_A muss größer als die doppelte obere Grenzfrequenz f_{Grenz} des übertragenen Signals sein, also

$$f_A > 2 \times f_{\text{Grenz}}$$

Abtastung und Quantisierung

■ Abtastung und Quantisierung

- Umwandlung analoger in digitale Signale

■ Abtastung

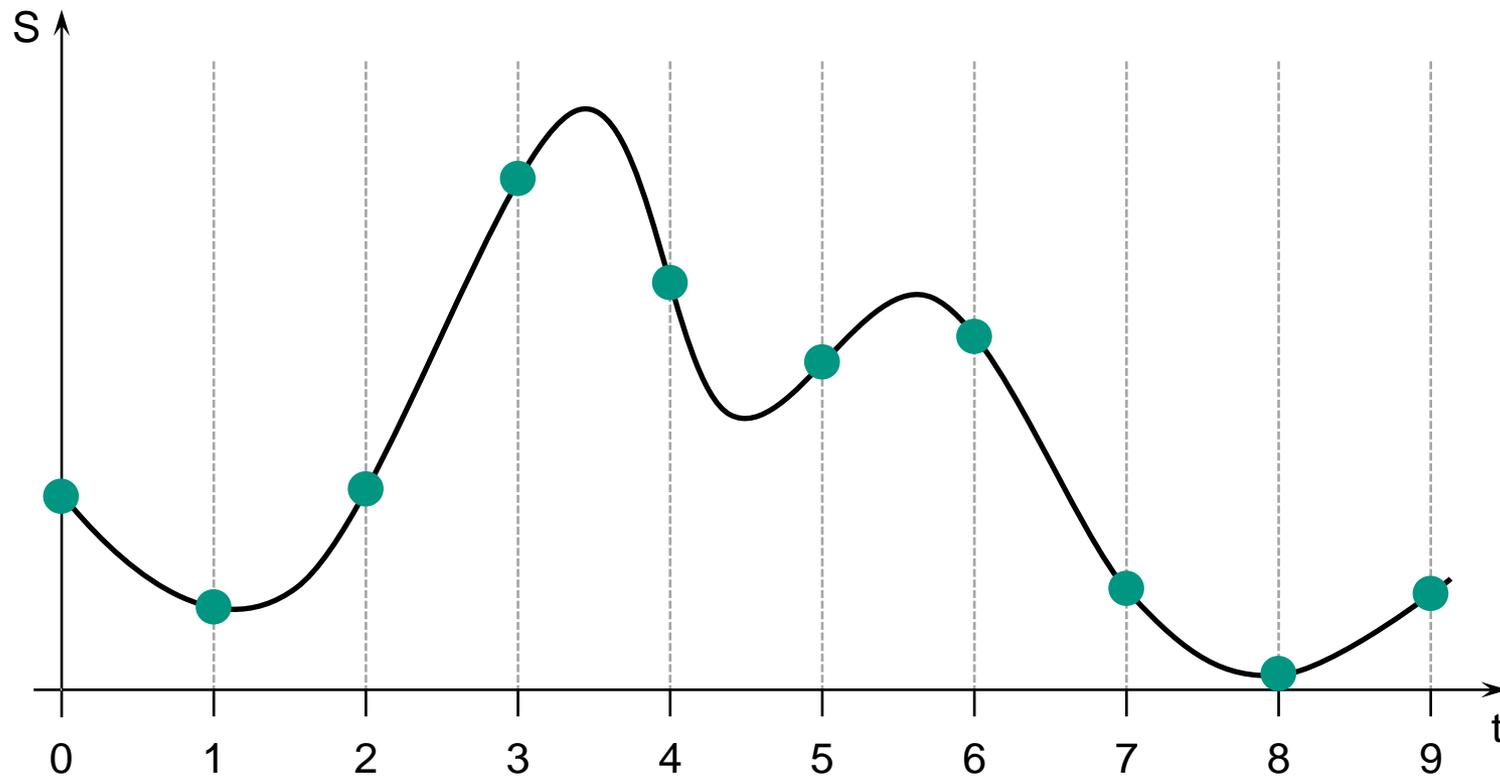
- Übergang zeitkontinuierlich → zeitdiskret
- Signal wird zu **diskreten Zeitpunkten** abgetastet
 - Üblicherweise periodisch mit konstanter Abtastfrequenz f_A

■ Quantisierung

- Übergang wertkontinuierlich → wertdiskret
- Signalwerte auf **endliche Menge** (digitaler) Werte abgebildet
 - Beispiel: Elektrische Spannung 0..1V → 0..255

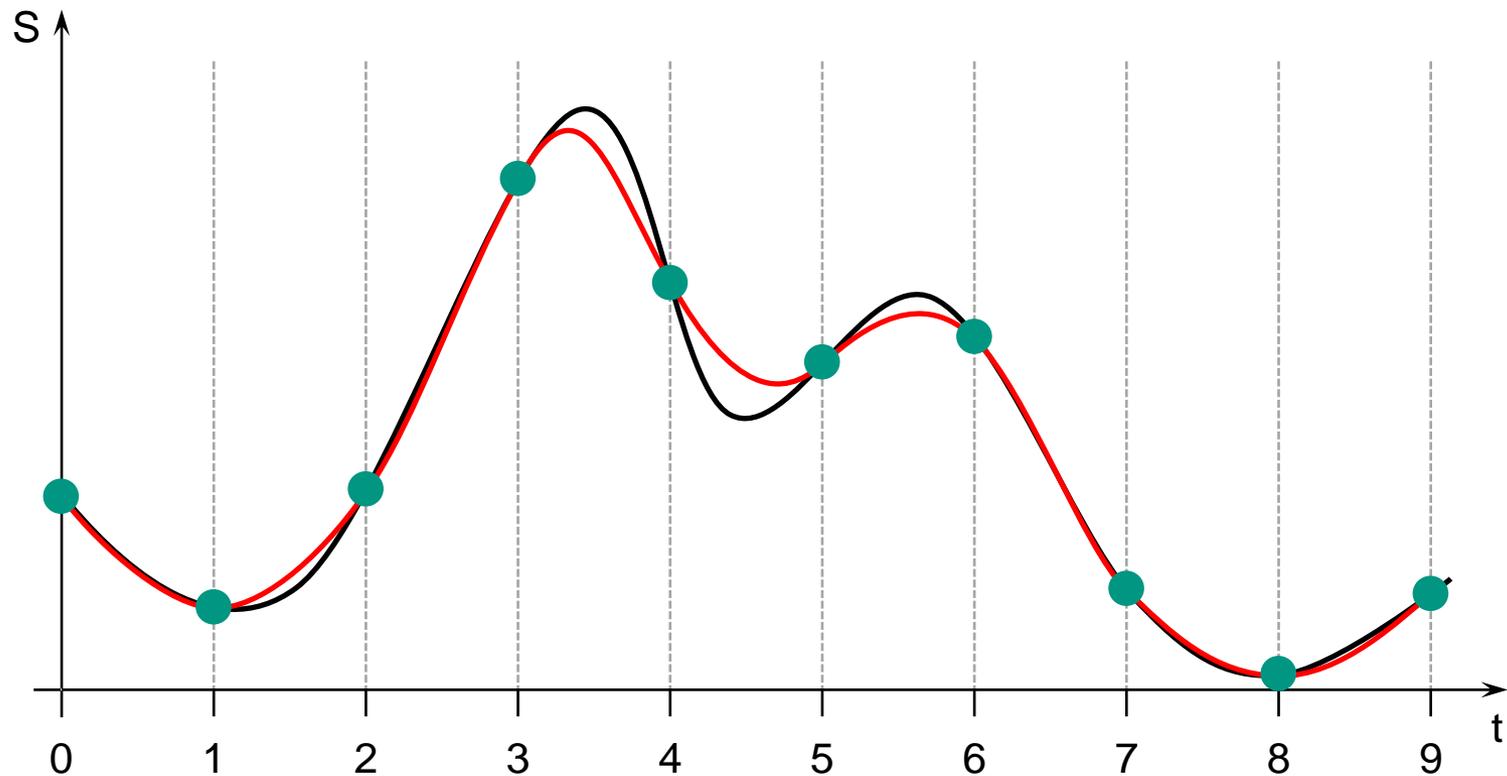
Abtastung

- Hier: Abtastung zu äquidistanten Zeitpunkten mit Abtastfrequenz f_A
- Bei zu geringer Abtastfrequenz: Informationsverlust



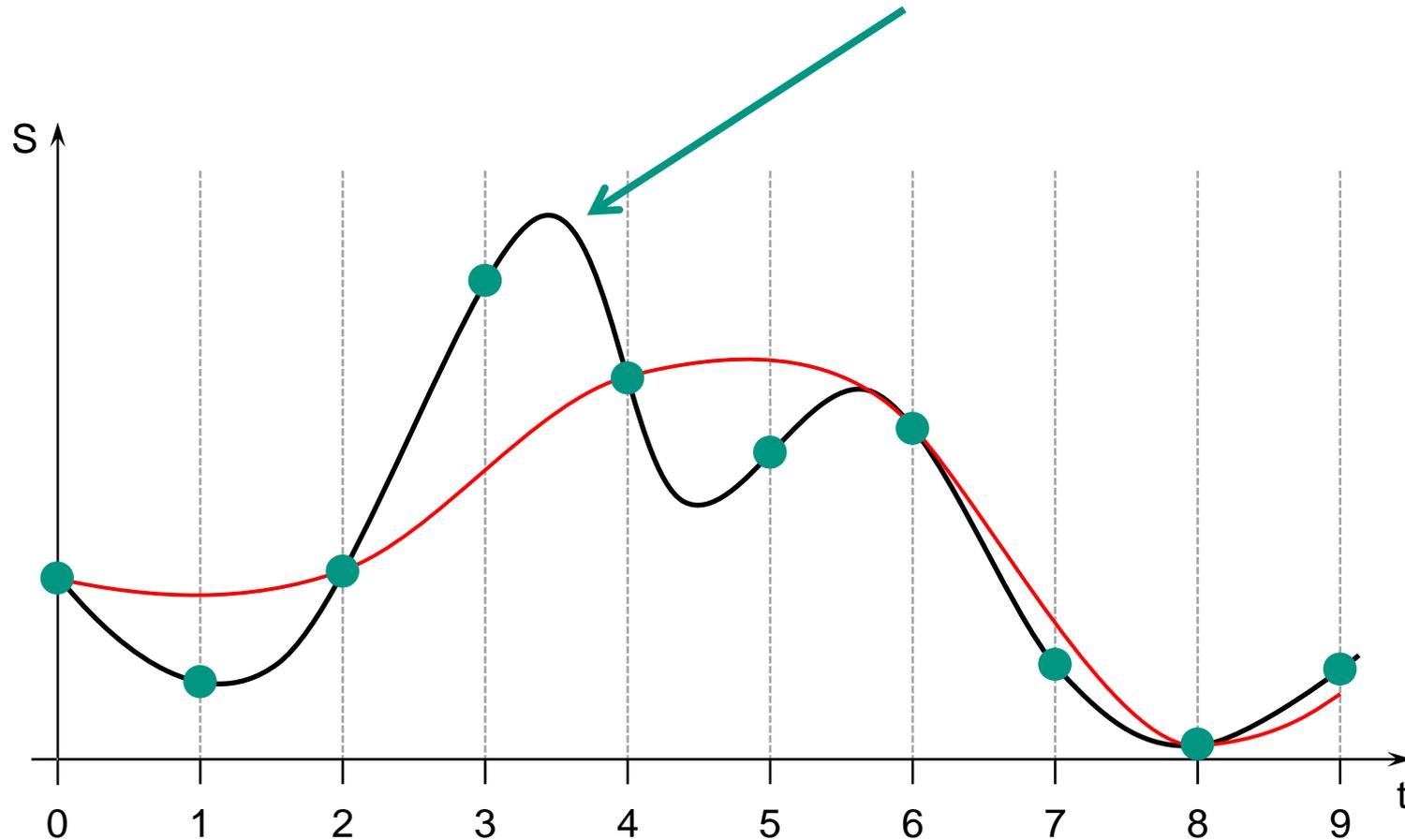
Abtastung

- Hier: Abtastung zu äquidistanten Zeitpunkten mit Abtastfrequenz f_A
- Bei zu geringer Abtastfrequenz: Informationsverlust



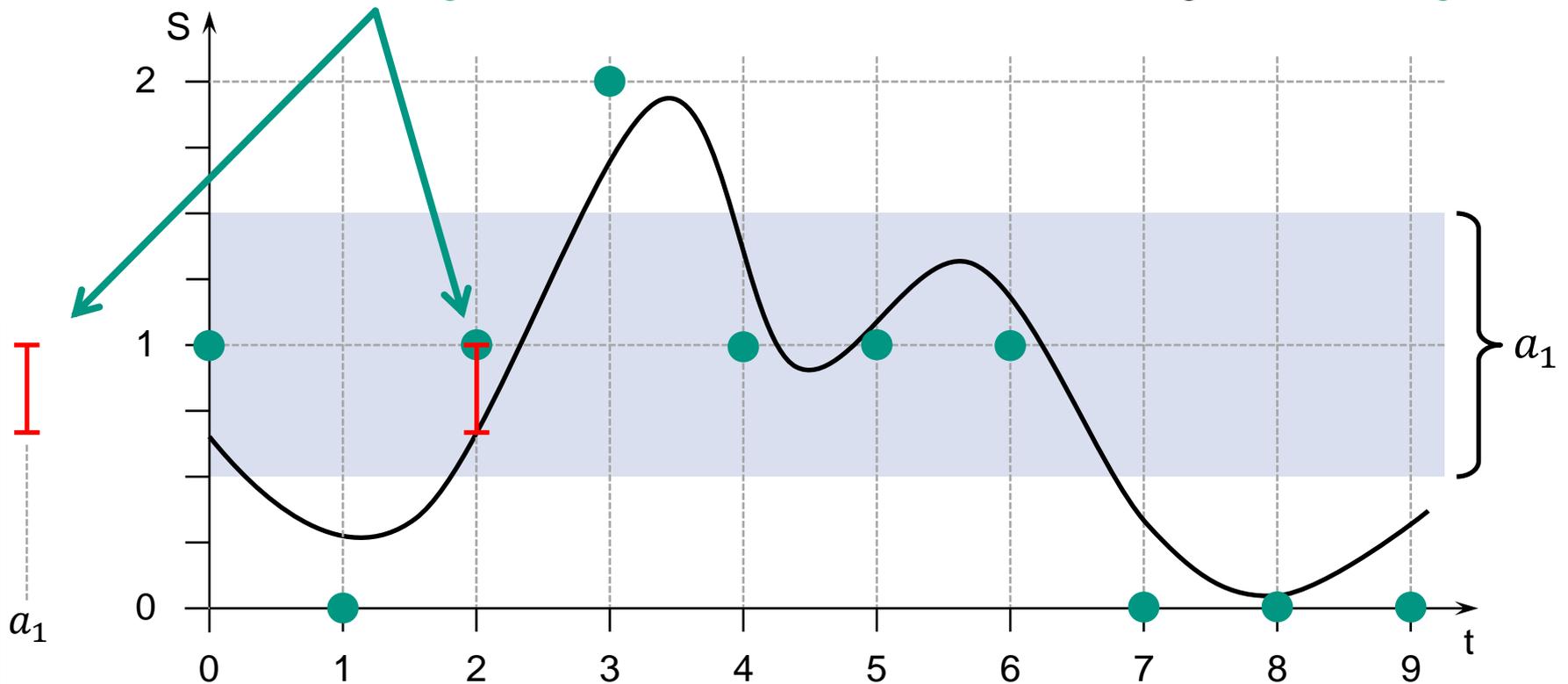
Abtastung

- Hier: Abtastung zu äquidistanten Zeitpunkten mit Abtastfrequenz f_A
- Bei zu geringer Abtastfrequenz: Informationsverlust



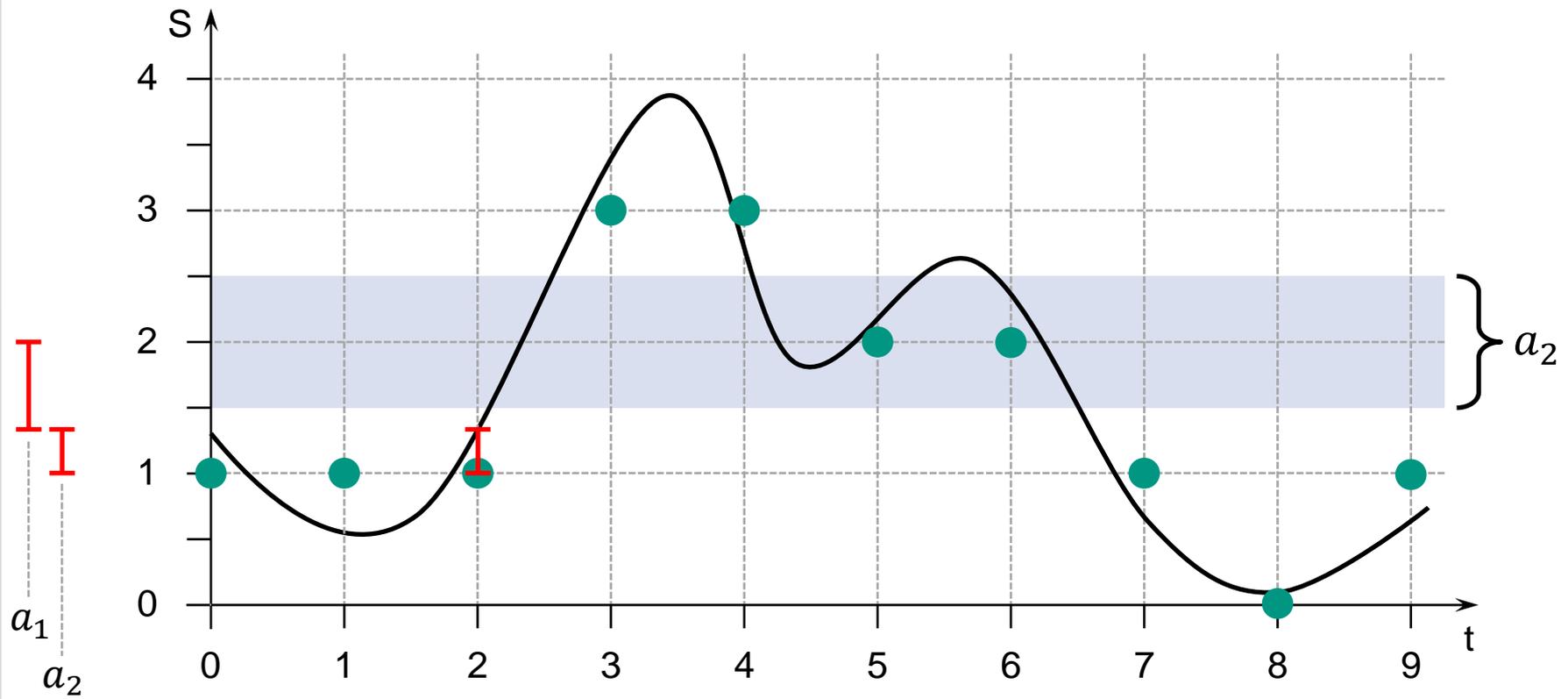
Quantisierung

- Wertebereich des Eingangssignals unterteilt in **disjunkte Intervalle**
 - Jedem Intervall ist **diskreter Wert** zugeordnet
- Lineare Quantisierung: Ein Wert stellt ein **Quantisierungsintervall a** dar
 - **Quantisierungsfehler**: Keine exakte Übereinstimmung, **Abweichung bis $\pm \frac{a}{2}$**



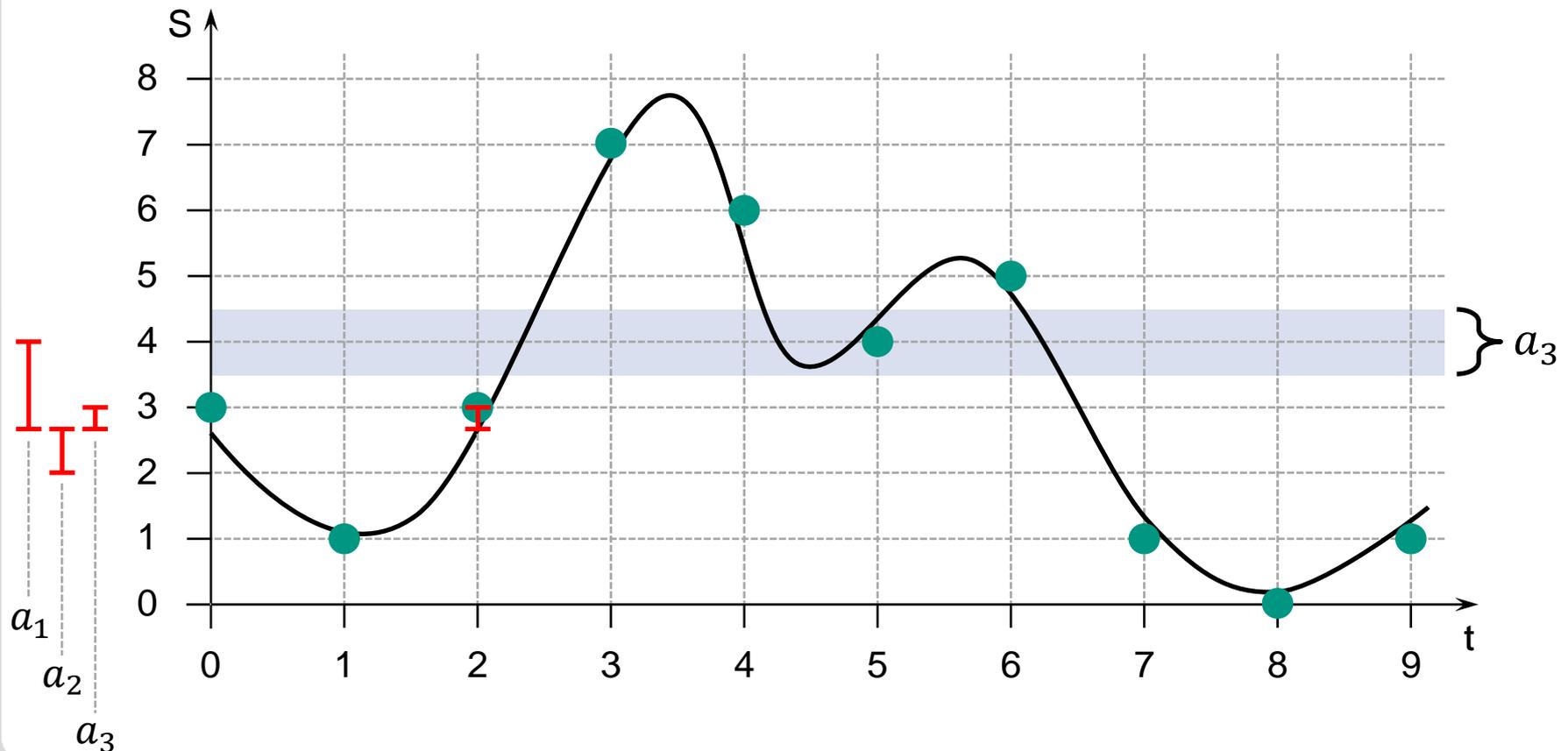
Quantisierung

- Wertebereich des Eingangssignals unterteilt in **disjunkte Intervalle**
 - Jedem Intervall ist **diskreter Wert** zugeordnet
- Lineare Quantisierung: Ein Wert stellt ein **Quantisierungsintervall a** dar
 - **Quantisierungsfehler**: Keine exakte Übereinstimmung, **Abweichung bis $\pm \frac{a}{2}$**



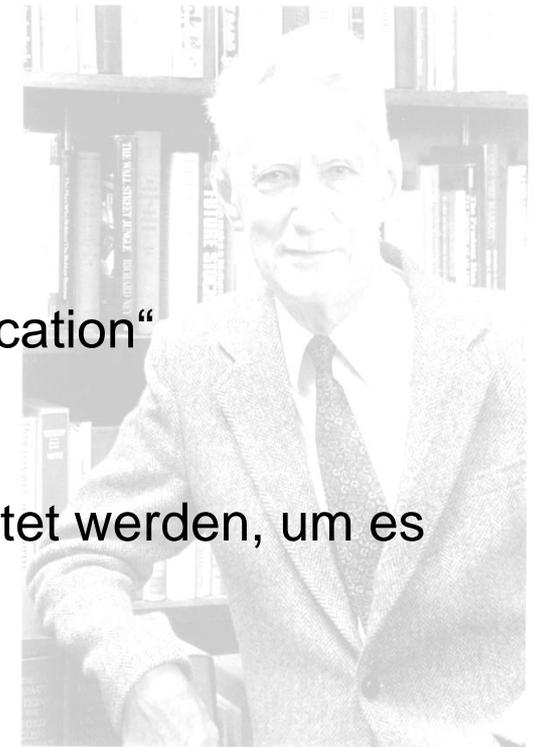
Quantisierung

- Wertebereich des Eingangssignals unterteilt in **disjunkte Intervalle**
 - Jedem Intervall ist **diskreter Wert** zugeordnet
- Lineare Quantisierung: Ein Wert stellt ein **Quantisierungsintervall a** dar
 - **Quantisierungsfehler**: Keine exakte Übereinstimmung, **Abweichung bis $\pm \frac{a}{2}$**



Exkurs ... zur Informationstheorie

- C.E. Shannon (1916 – 2001)
Begründer der Informationstheorie
 - sollte besser *Kommunikationstheorie* heißen, da die Semantik der zu übertragenden Daten nicht interpretiert wird
 - 1941-1956: Bell Labs
 - 1949: „The Mathematical Theory of Communication“
 - Ab 1956: MIT
- **Abtasttheorem**
 - Wie häufig muss ein analoges Signal abgetastet werden, um es ohne Verluste rekonstruieren zu können?
- **Kanalkapazität**
 - „man kann Rauschen durch erhöhte Bandbreite bekämpfen“
- **Informationsgehalt**
 - Empfänger weiß über den Zustand des Systems weniger als der Sender



„In jedem Taschentelefon – Handy genannt – geht ein Stück Shannon durch die Straße.“
H. Zemanek; „Claude E. Shannon“, it+ti, 4/2001

■ Problem

- Wie häufig muss ein analoges Signal periodisch abgetastet werden, um es verlustfrei in ein zeitdiskretes Signal umzuwandeln?

■ Abtasttheorem nach Shannon

Wird das Signal $x(t)$ periodisch mit einer Frequenz abgetastet, die größer ist als das Doppelte der höchsten im Signal auftretenden Frequenz f_G , lässt sich aus den so erfassten Werten das ursprüngliche Signal rekonstruieren

■ Die folgenden Signale werden verwendet

- $x(t)$ ist bandbegrenztetes Signal mit Grenzfrequenz f_G
- $p(t)$ ist Abtastsignal mit einer Abtastfrequenz von f_A und damit Intervallen zwischen den Abtastzeitpunkten $T_s = 1/f_A$
- $x_s(t) = x(t) * p(t)$ ist das abgetastete Signal

■ Damit gilt

- $x(t)$ kann aus $x_s(t)$ exakt wiedergewonnen werden, wenn $f_A > 2f_G$

Beispiel: Digitalisierung von Sprache

■ Pulse Code Modulation (PCM) für digitale Fernsprechübertragung

- Grenzfrequenz 3.400 Hz
- Abtastfrequenz 8.000 Hz (> 6.800 Hz)
 - Abtastperiode

$$T_A = \frac{1}{f_A} = \frac{1}{8000} \text{ Hz} = 125 \mu\text{s}$$

- Kodierung der Signalwerte: 256 **Quantisierungsintervalle**
 - Bei binärer Codierung 8 Bit erforderlich
- Resultierende **Datenrate** für einen digitalisierten Fernsprechkanal

$$8000/s * 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$$

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. **Digitale Signale**
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

■ Schrittdauer

- 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 Digitalsignal

- Ein Digitalsignal ist isochron, wenn die Signalparameter-Zustandswechsel nur zum Schritt-Takts erfolgen

■ Anisochrones Digitalsignal

- Ein nicht-isochrones Digitalsignal

■ Schrittgeschwindigkeit (Baudrate)

- Zahl der Signalparameter-Zustandswechsel in einer Zeiteinheit
- Einheit: baud ($1/s$) (nach Jean Maurice Baudot)
- Bei isochronen Digitalsignalen
 - Kehrwert der Schrittdauer $1/T$
- Auch als *Baudrate* bezeichnet

■ Übertragungsgeschwindigkeit (Datenrate)

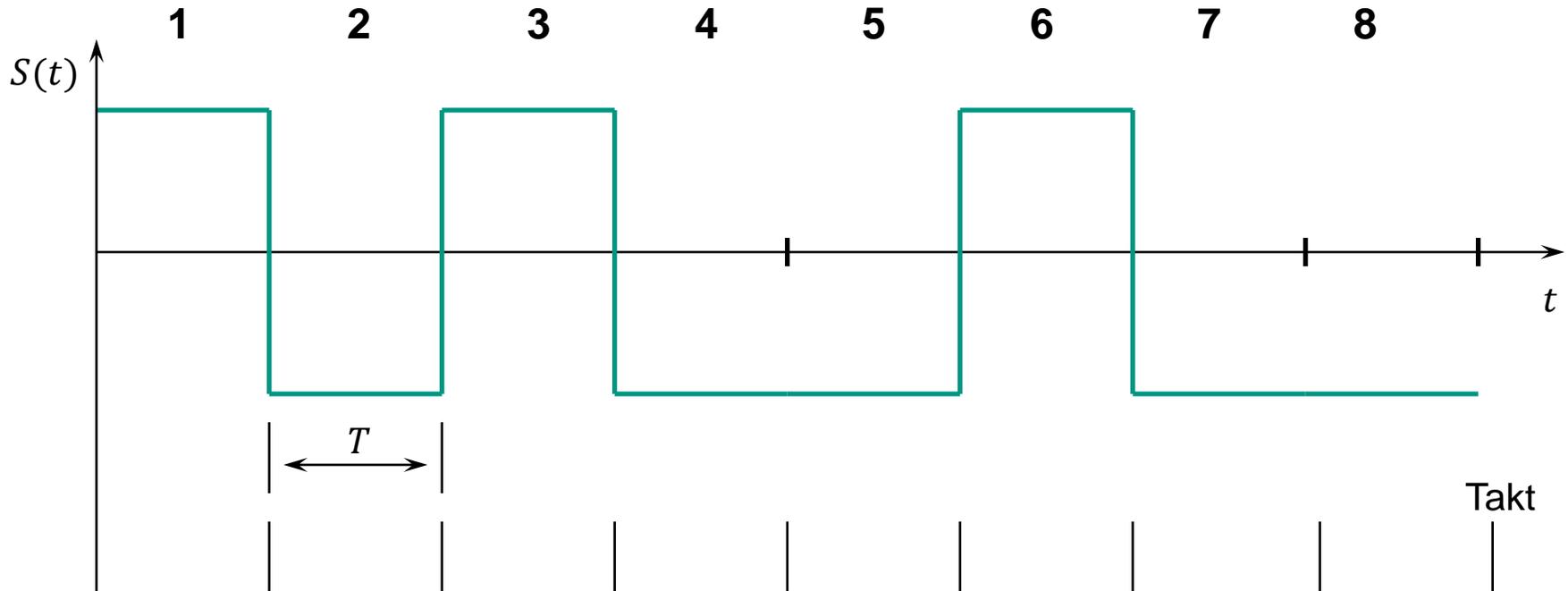
- Anzahl der übertragbaren Bitstellen pro Zeiteinheit
- Einheit: bit/s

■ Schrittgeschwindigkeit = Übertragungsgeschwindigkeit?

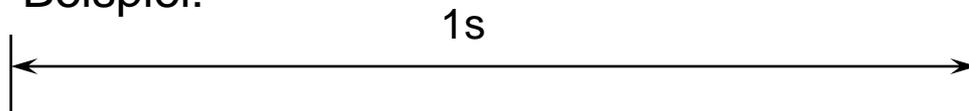
- Nur für binäre Signale, bei denen jeder Schritt als Signalelement genau ein Bit als Codeelement darstellt

Schrittgeschwindigkeit – Beispiel

Schrittfolge:



Beispiel:



⇒ Schrittgeschwindigkeit 5 baud

■ Zweiwertiges Digitalsignal (Binärsignal)

- Digitales Signal mit nur zwei Werten des Signalparameters

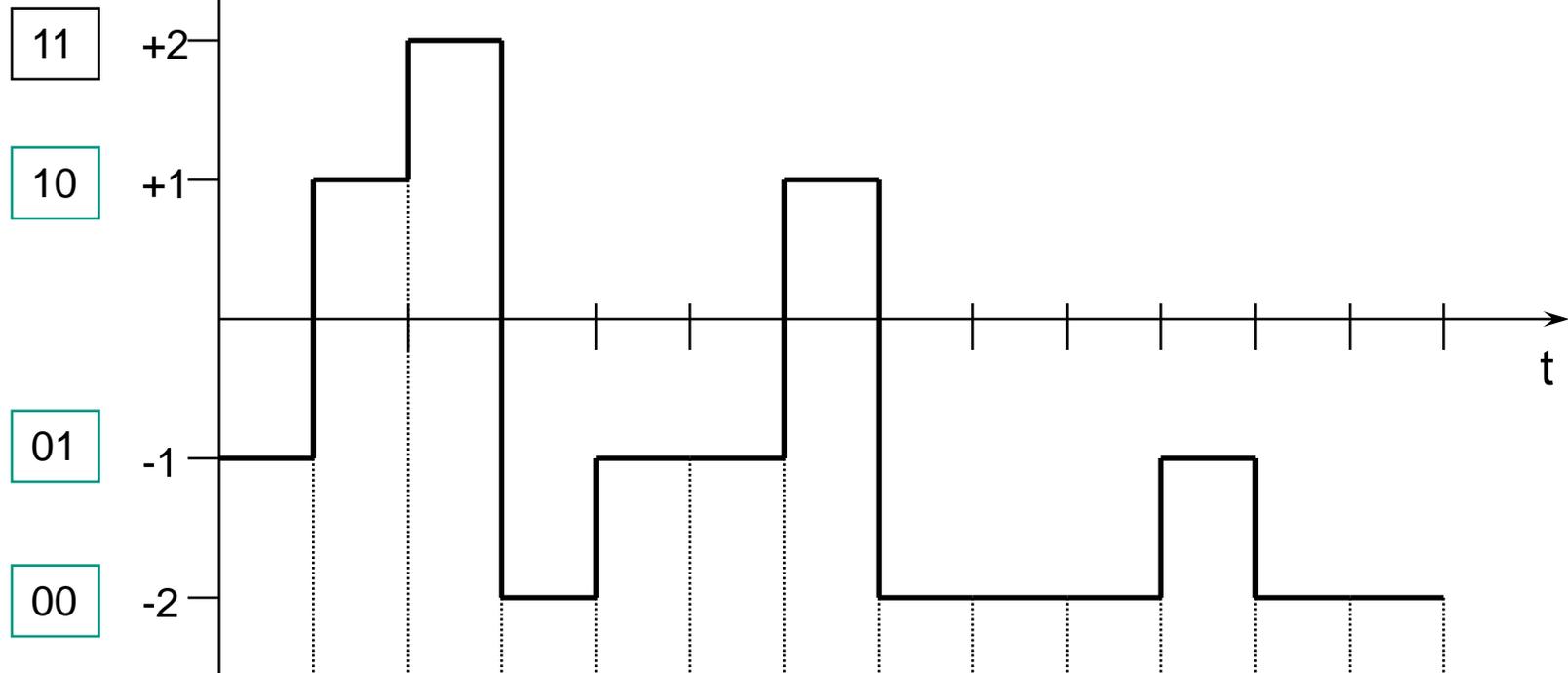
■ Mehrwertiges (mehrstufiges) Digitalsignal

- Die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen
 - Beispiel: 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)

Mehrwertige Digitalsignale – Beispiel

zugeordnetes
quaternäres
Codeelement

Signalstufen (Amplitudenwerte)



quaternäre
Codefolge

01	10	11	00	01	01	10	00	00	00	01	00	00
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Schritt

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

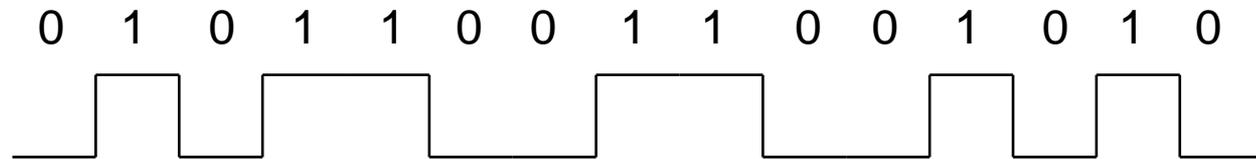
1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

- Umformung des Signals $m(t)$ in Eingangssignal $g(t)$ des Kanals bzw. Rückformung des Signals $h(t)$ in $m(t)$

- Zwei grundlegende Varianten

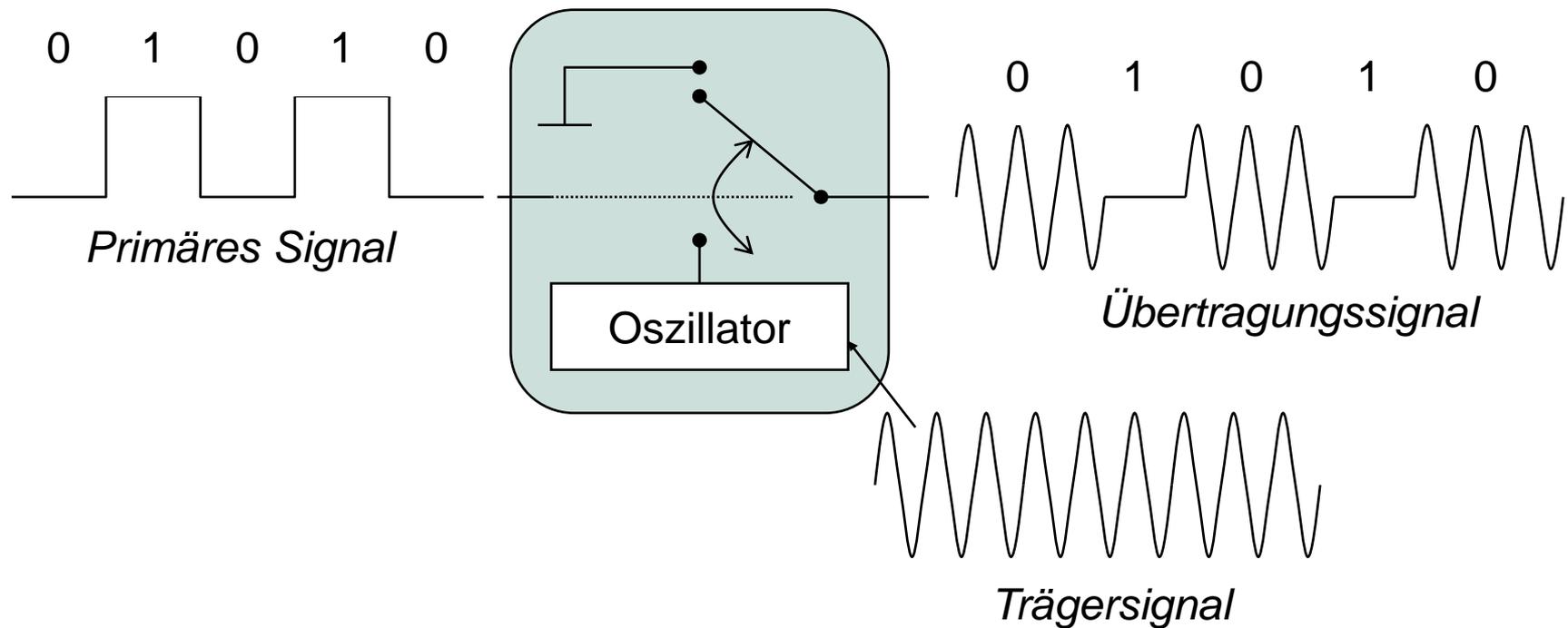
- **Basisbandübertragung**

- Direkte Übertragung des Quellensignals über das Medium
- Z.B. zwei Spannungswerte (+V, -V) für 0 und 1

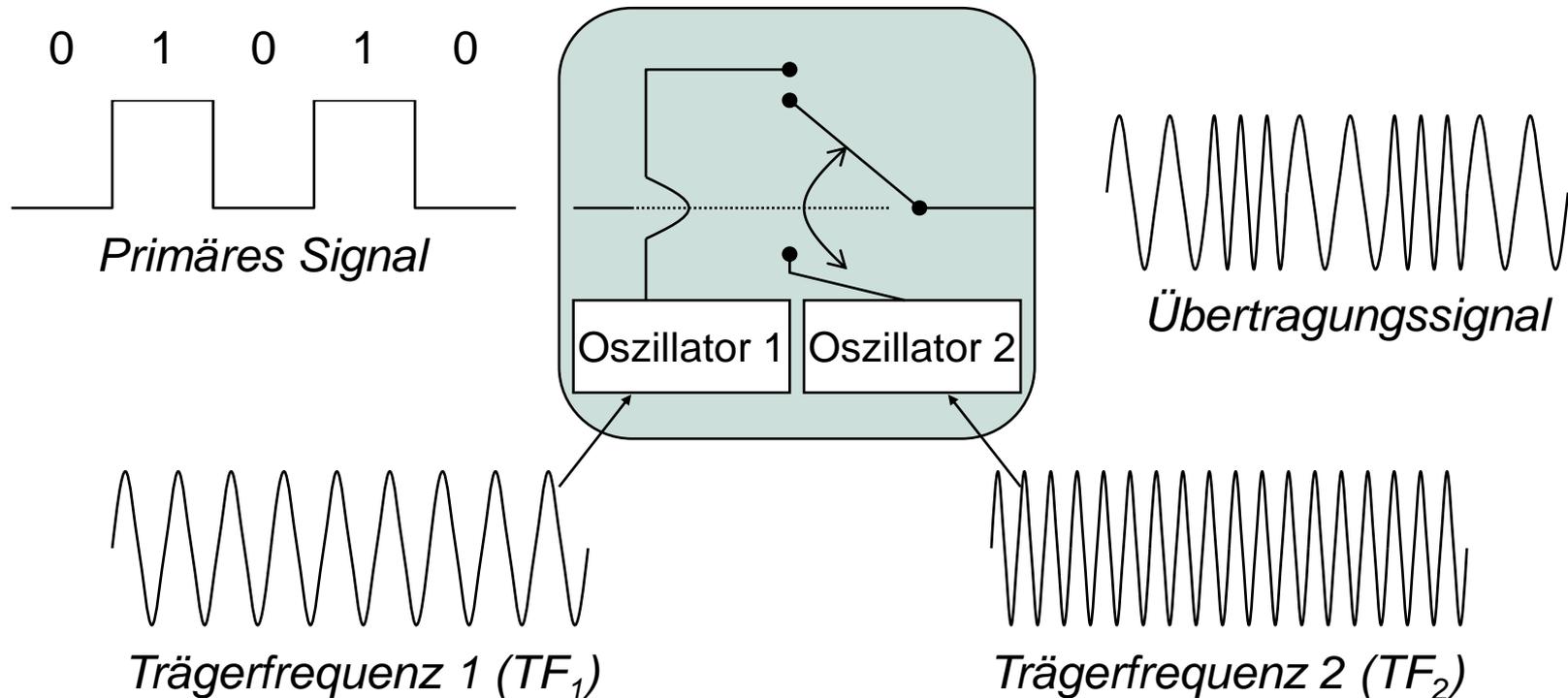


- **Modulation auf Trägerfrequenz**

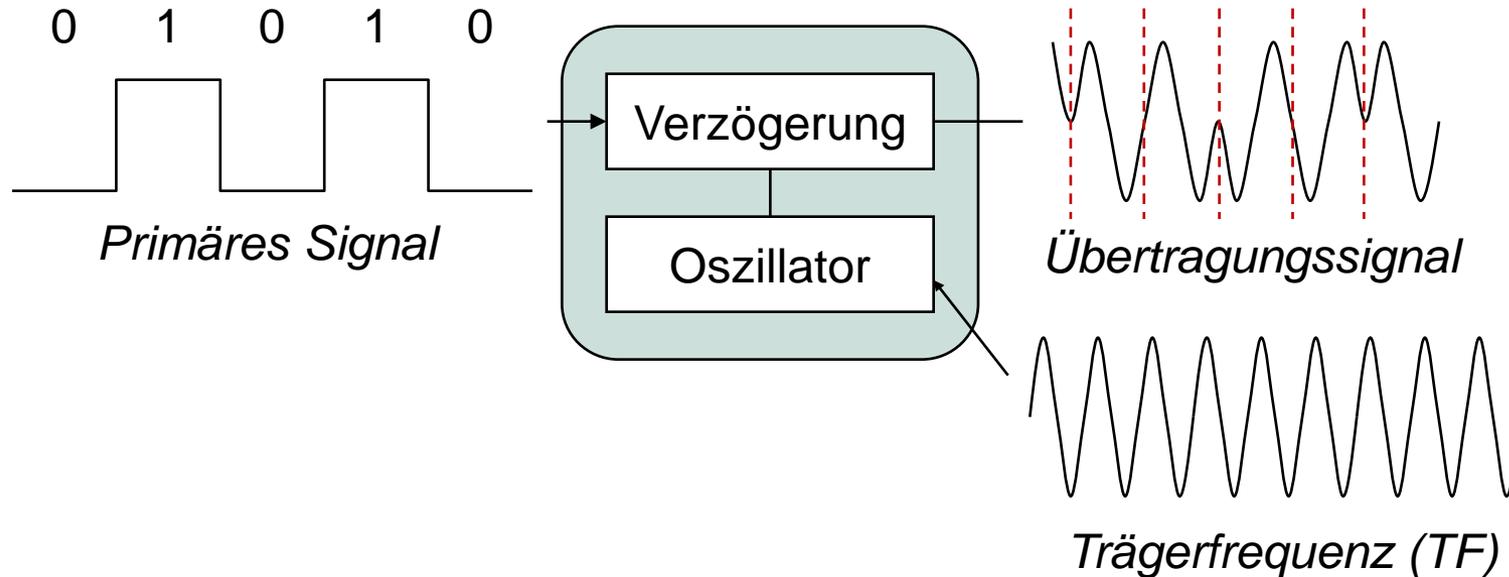
- **Digital:** *Digitale Daten* → *analoges Signal*
 - Amplituden-Umtastung (*Amplitude Shift Keying, ASK*)
 - Frequenz-Umtastung (*Frequency Shift Keying, FSK*)
 - Phasen-Umtastung (*Phase Shift Keying, PSK*)
- **Analog:** *Analoge Daten* → *analoges Signal*
 - Amplitudenmodulation (*Amplitude Modulation, AM*)
 - Frequenzmodulation (*Frequency Modulation, FM*)
 - Phasenmodulation (*Phase Modulation, PM*)



- Veränderung der Amplitude des Trägersignals
 - Einfache Methode: On-Off-Keying
 - Ein- und Ausschalten des Trägersignals
- Anwendung
 - DCF77 Signal der Funkuhr
 - Periodische Abschwächung auf 25% der Nennleistung → Synchronisation



- Umschalten zwischen verschiedenen Trägerfrequenzen
 - z.B. Binary Frequency Shift Keying (BFSK) - zwei Frequenzen TF_1 und TF_2
- Anwendung
 - Telekommunikation allgemein
 - Drahtlose Telegrafie (älteste Anwendung)



- Umschalten durch Phasensprung
 - Z.B. Phasensprung bei der Übertragung einer „0“

Umtastung: Zusammenfassung

■ Amplitudenumtastung

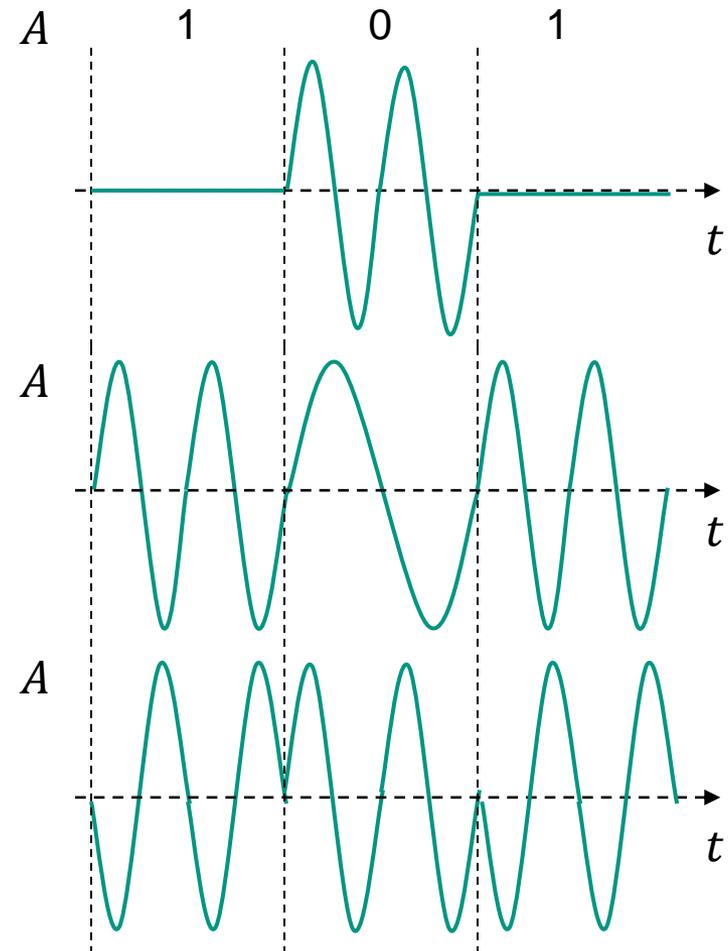
- technisch einfach
- benötigt wenig Bandbreite
- stör anfällig

■ Frequenzumtastung

- größere Bandbreite
- mit oder ohne Phasensprünge

■ Phasenumtastung (differentiell)

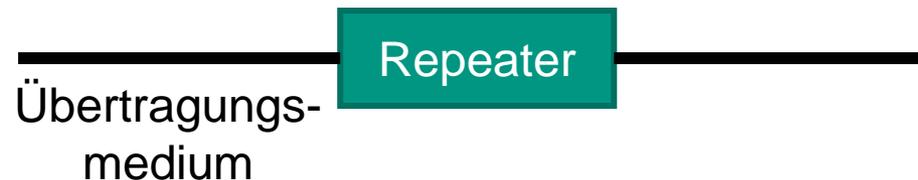
- komplexe Demodulation mit Trägerrückgewinnung
- relativ störungssicher



1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. **Übertragungsmedien**
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

- Aufgabe
 - Physikalische Verbindung benachbarter Kommunikationssysteme
- Randbedingungen
 - Überbrückbare Distanz
 - „Verlängerung“ durch Einsatz von Repeatern
 - Arbeiten als Signalverstärker



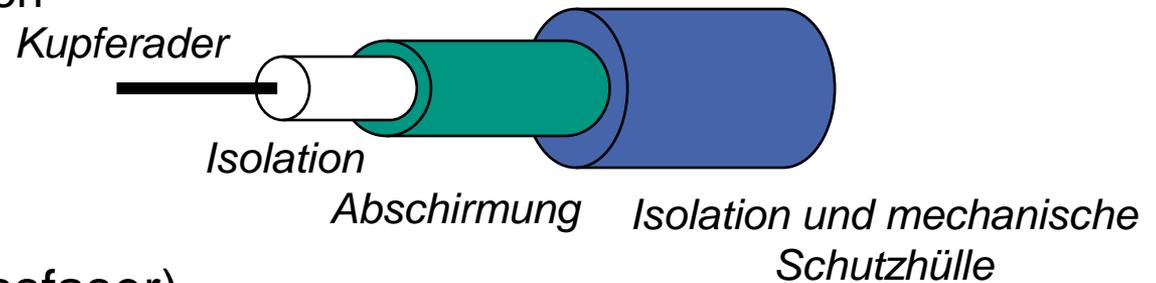
- Netze verwenden unterschiedliche Übertragungsmedien
 - **Drahtgebundene** (z.B. Glasfaser)
 - **Drahtlose** (z.B. bei WLAN oder UMTS am Zugang)

Beispiele drahtgebundener Medien

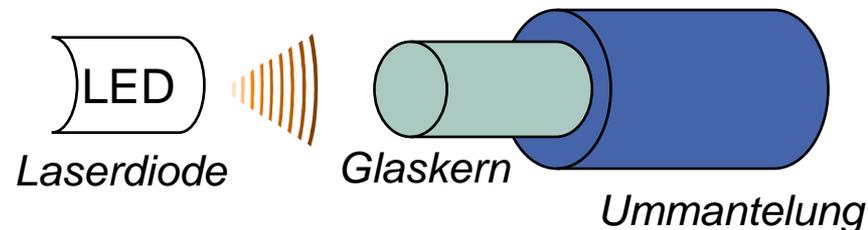
- Verdrillte Aderpaare
 - Z.B. bei Ethernet



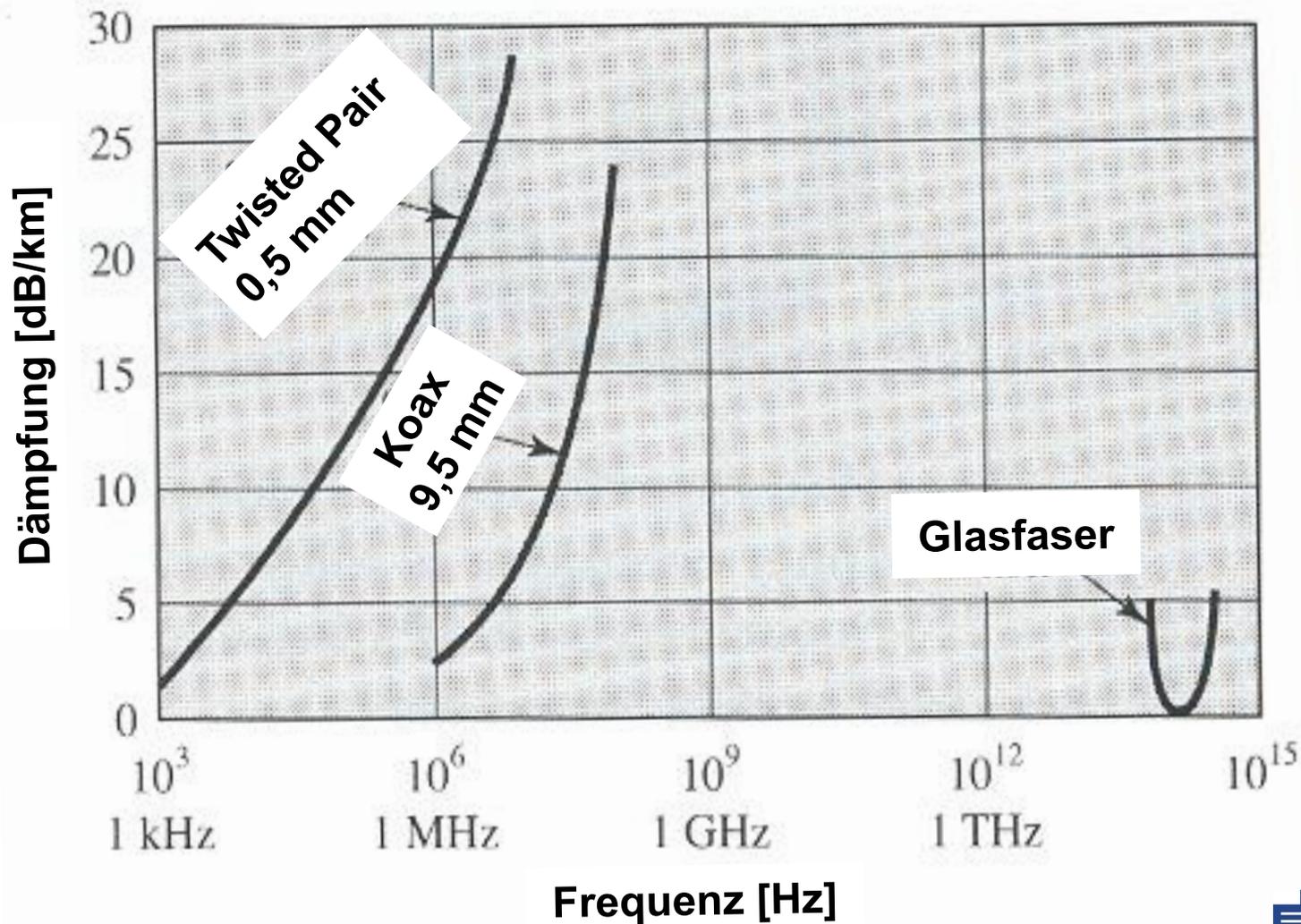
- Koaxialkabel
 - Z.B. Kabelfernsehen



- Lichtwellenleiter (Glasfaser)
 - Z.B. Backbone



Vergleich von Übertragungsmedien bzgl. Dämpfung



[Stal10]

■ Bisher näher betrachtet

- Verdrilltes Adernpaar, Koaxialkabel, Lichtwellenleiter
 - Verbinden benachbarte Kommunikationssysteme
 - Können große Distanzen überbrücken (Repeater)

■ Noch nicht betrachtet

- Zuverlässigkeit und **Robustheit**
 - Auswirkungen eines Kabelbruchs auf das gesamte Netz
 - Wie kann es zu einem Kabelbruch kommen?
 - Routen zwischen zwei Endsystemen nicht mehr gültig
 - Automatische Adaption des Netzes möglich?
 - Adäquate Routingverfahren nötig
(siehe **Kapitel 8 „Netzkopplung und Vermittlung“**)

Beispiel: Kabelbruch in Asien

■ Kabelbruch 15 km vor der Küste Taiwans nach einem Seebeben der Stärke 6,7

- Mindestens 6 Kabel von China Telecom beschädigt
- Auswirkungen
 - Reparatur des Unterseekabels wird 2-3 Wochen dauern
 - Internetverbindung nach Asien stark eingeschränkt
 - Neue Routen sollen beschädigten Abschnitt meiden

■ Einige Zahlen

- Ca. 100 Millionen Internetnutzer sind betroffen
- Antwortzeiten zum Teil verdreifacht, falls Verbindung überhaupt hergestellt werden kann
- Internet-Telefonate zwischen
 - Taiwan und USA gingen auf ca. 40% zurück
 - China/Japan und USA gingen auf ca. 10% zurück
- Internetverkehr in Vietnam auf ca. 30% zurückgegangen



Video: Verlegung des ersten Tiefseekabels



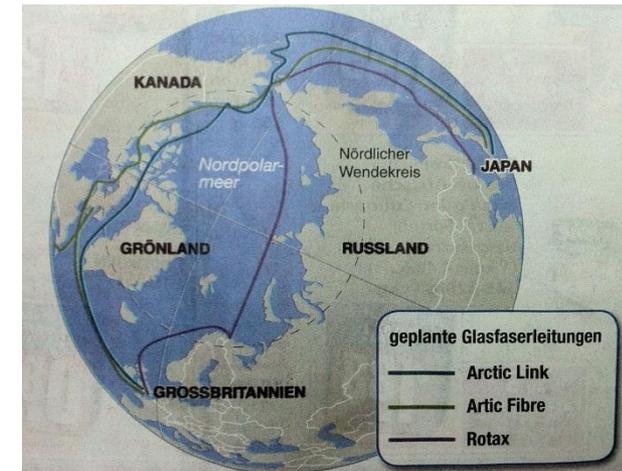
- Trans Atlantic Telephone cable Number 14“
 - Verbindet seit 2001 Europa mit Nordamerika
 - Gesamtkosten: 1,2 Milliarden Euro
 - 15000 Kilometer, 2 ca. 5 cm dicke Kabelstränge
 - Befindet sich 1 Meter tief im Meeresboden
 - Verstärker alle 50-70 Kilometer erforderlich
 - Doppelte Kabeltrassen



<https://www.tat-14.com/tat14/stations.jsp>

Tiefseekabel durch die Arktis

- Klimaerwärmung reduziert Eis auf den arktischen Seewegen
 - Dadurch Möglichkeit, Kabel zu verlegen
- Ziel: Ausfallsicherheit und politische Unabhängigkeit
 - Ermöglichung einer Datenroute nach China, die nicht durch die USA führt
- Mehrere geplante Projekte / Routen von Großbritannien nach Japan
 - Arctic Fibre: via Nordwestpassage über Neufundland
 - Arctic Link: via Beringstraße, an Grönland vorbei
 - Rotax: entlang der russischen Küste
- Kosten pro Projekt: 600 Mio. – 2 Mrd. US \$
- Investoren sind nur schwer zu finden
 - Bislang keine Engpässe zwischen GB und Japan



Quelle: BNN, 12.04.2012

Beispiel: Neue Glasfaser durch Bodensee

- Am 19. November 2007 neues Glasfaser-Kabel im Bodensee verlegt
 - Verbesserung des Datentransfers zwischen Nord- und Südufer
 - Zwischen Konstanz und Friedrichshafen
 - Länge: 26 km
 - Liegt in Tiefen bis 200m abseits der Ankerlinien
 - 192 einzelne Glasfasern im ca. 2,5 cm dicken Kabel



■ Historisches

- 1856: Erste Telegrafenerbindung zwischen Deutschland und der Schweiz durch Seekabel im Bodensee
- 1892: Neues Kabel kann Telegramme und Telefongespräche übertragen
- 1906: Erstes „Pupin-Kabel“ der Welt zur Verbesserung der Sprachqualität
- 1955-1987: Weitere Kupfer- und erstes Glasfaserkabel für Telefonverkehr

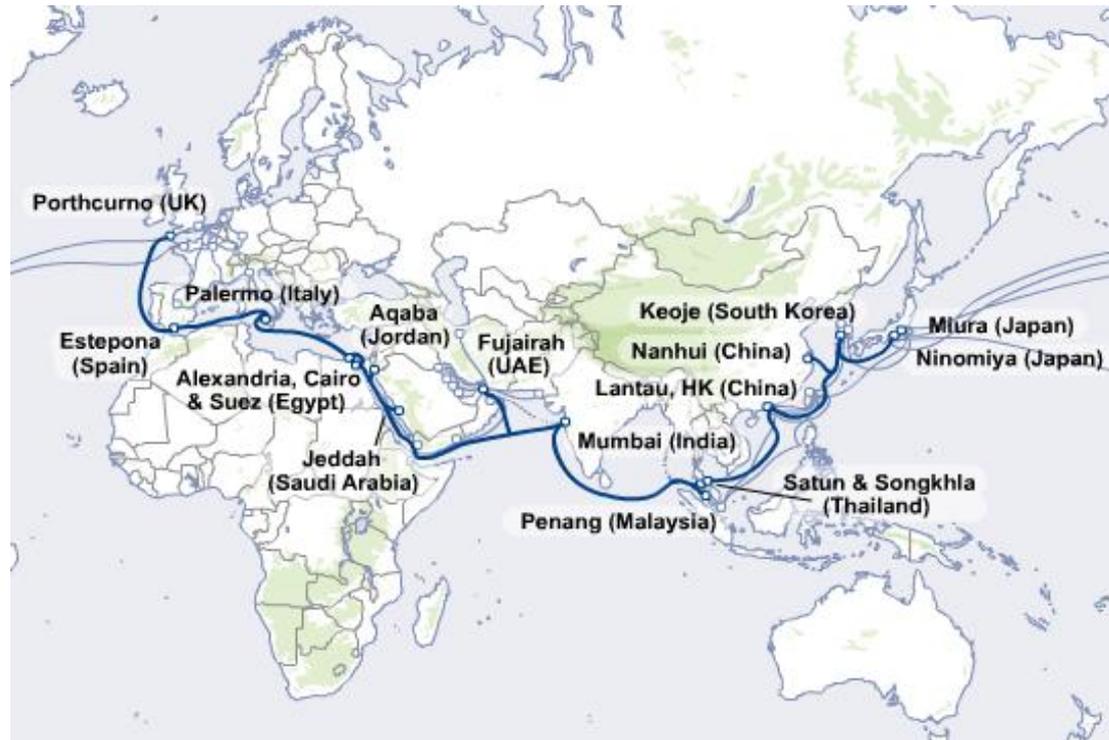


[Hei08a]

Beispiel: Beschädigte Seekabel

- 30.01.2008: Zwei Glasfaser-Backbones im Mittelmeer beschädigt
 - Ägypten nur noch mit 30 Prozent seiner normalen Bandbreite angeschlossen
 - Indien nur noch mit 40 Prozent seiner normalen Bandbreite
 - Flag Telecom Group Betreiberin des FEA-Kabels (Flag Europe Asia)
 - Reicht von Großbritannien bis Japan (rund 27.000 km)
 - Beide Kabel Kapazität von fast 620 Gigabit pro Sekunde

[Hei08b]



[Flag08]

Weitere Beispiele: Seekabel

- 01.02.2008: Riss des FALCON-Kabels um Arabische Halbinsel 56 km vor Dubai
 - Verbindungen nach Ägypten, Vereinigte Arabische Emirate (VAE), Katar, Kuwait, Bahrain, Iran, Irak und Oman gestört
 - Verantwortlich war ankerndes Schiff
 - Bergung eines fünf Tonnen schweren Ankers
- 01.02.2008: Ausfall Glasfaser-Backbone zwischen Katar und VAE
 - Probleme mit Stromversorgung
- 19.12.2008: Ausfall der Seekabel SEA-ME-WE 4, SEA-ME-WE 3 und FLAG-FEA im Mittelmeer
 - Vermutlich durch ankerndes Schiff zwischen Sizilien und Ägypten
 - Umrouten des meisten Verkehrs zw. Europa und Asien über USA
- Transsibirische Überlandleitung zwischen Europa und Asien in Planung
 - Soll Datenleitungen per Seekabel oder über Nordamerika verkürzen
 - Laufzeitverkürzung Dateneinheit von >300 ms auf etwa 160 ms



[Hei08c,Hei08e]



[Hei08d]



[Hei09]



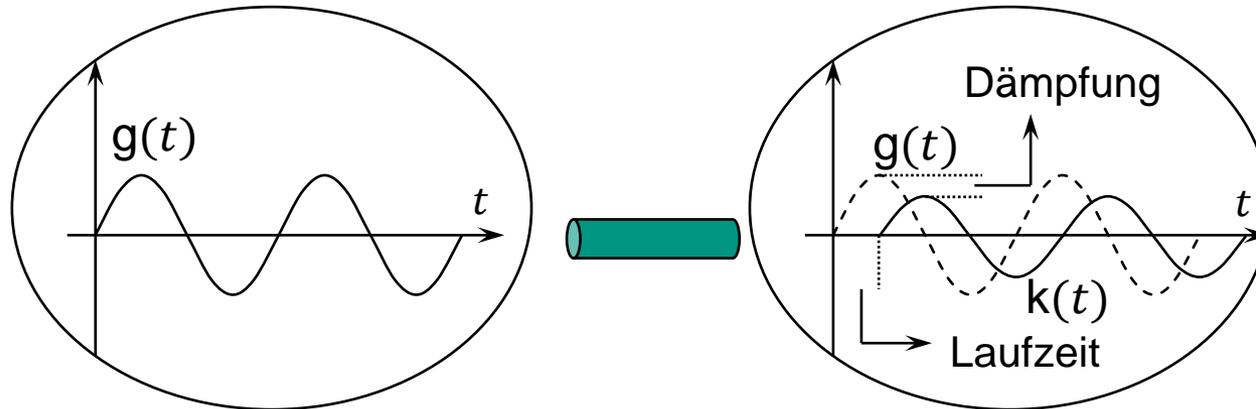
[Hei08f]

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

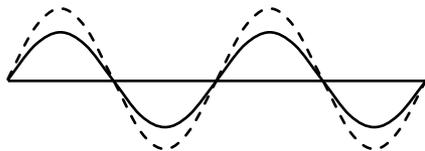
1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

Übertragungsstörungen

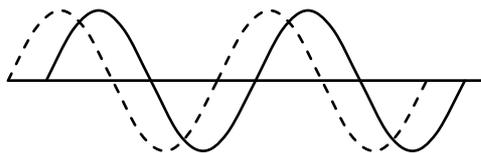
- Signalübertragungen über ein Medium unterliegen Störungen



- Dämpfungsverzerrung



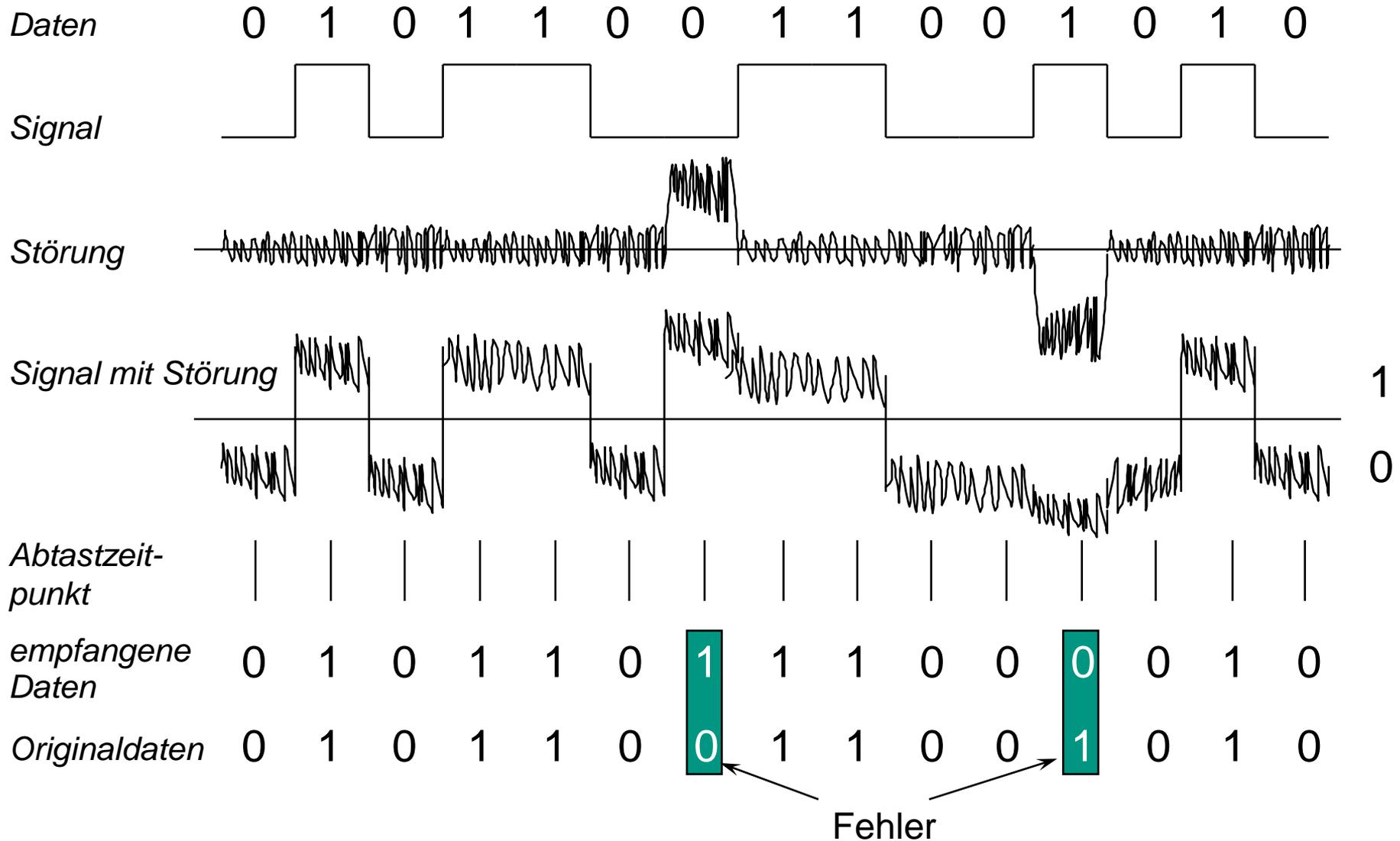
- (Lauf-)zeitverzerrung



- Neben der systematischen Beeinflussung des Signals durch
 - Dämpfung
 - Laufzeitverzerrung

- können **Signalstörungen** auftreten durch
 - transiente, stochastische Prozesse
 - weißes Rauschen
 - Überlagerung von Nutzsignalen (Funk) und Nebensprechen (Kabel: gegenseitige Medienbeeinflussung)
 - Echobildung (durch zeitverschobenes Eingabesignal)
 - Brummsignale (niederfrequente Störsignale)
 - Störimpulse (kurzzeitig mit hoher Amplitude)
 - ...

Beispiel: Auswirkung von Störungen



1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

- Allgemeines Verständnis von „Übertragungsdauer“
 - Wie lange dauert es, Daten vom Sender zum Empfänger zu transportieren?
- Achtung: Setzt sich aus **verschiedenen Komponenten** zusammen
 - Diese hängen jeweils von unterschiedlichen Eigenschaften ab
- Wichtigste Komponenten aus Sicht der Bit-Übertragungsschicht
 - **Sendezeit** t_s
Dauer, um Daten „auf das Medium zu legen“
 - **Ausbreitungsverzögerung** t_a
Dauer, bis Daten über das Medium beim Empfänger eintreffen
 - oft auch als Verzögerung oder Laufzeit bezeichnet

Sendezeit

- **Sendezeit t_s : Zeit zwischen Beginn und Abschluss der Sendung**

- Nur auf Senderseite betrachtet

- Abhängig von

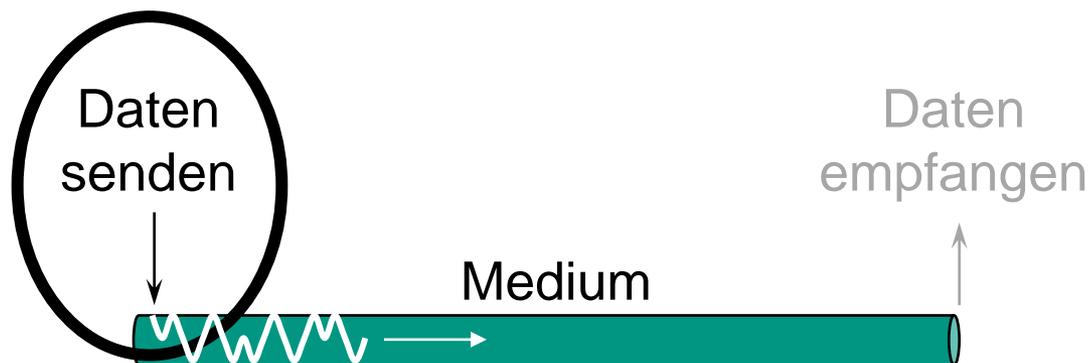
- Datenmenge X

- Datenrate r des Mediums (Leitung/Verbindung)

- Anzahl der pro Zeiteinheit übertragenen Daten (z.B. bit/s)

$$t_s = \frac{X}{r}$$

- **Achtung: Nach Abschluss der Sendung sind die Daten noch nicht beim Empfänger!**
 ⇒ Ausbreitungsverzögerung

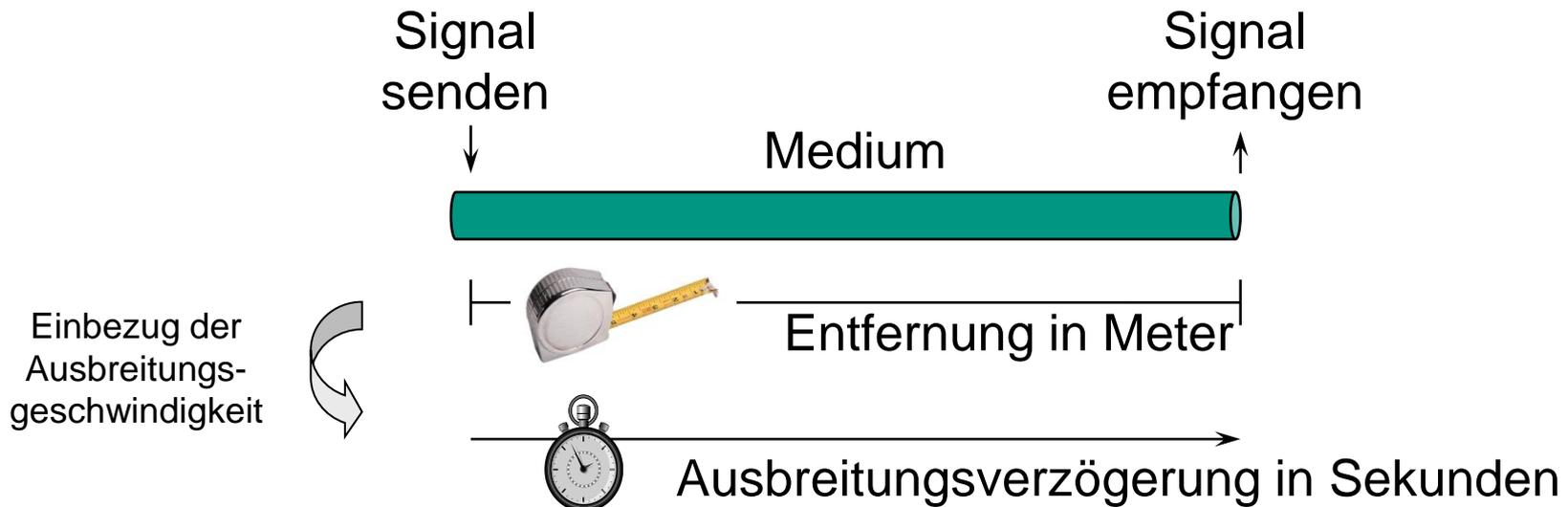


Ausbreitungsverzögerung

- Ausbreitungsverzögerung t_a : Zeitspanne zwischen Absenden eines Signals und dessen Eintreffen am anderen Ende des Mediums

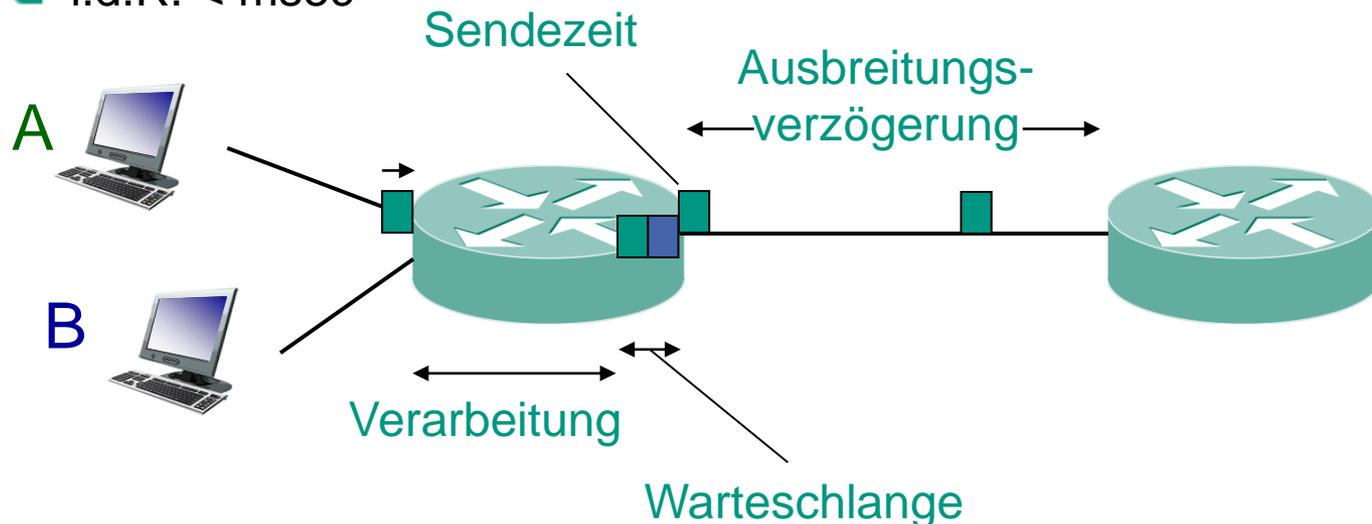
$$t_a = \frac{d}{v}$$

- Abhängig von
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit v
 - physikalische Signalgeschwindigkeit
 - in üblichen Medien (Kabel, Glasfaser) etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit
 - Länge des Mediums d

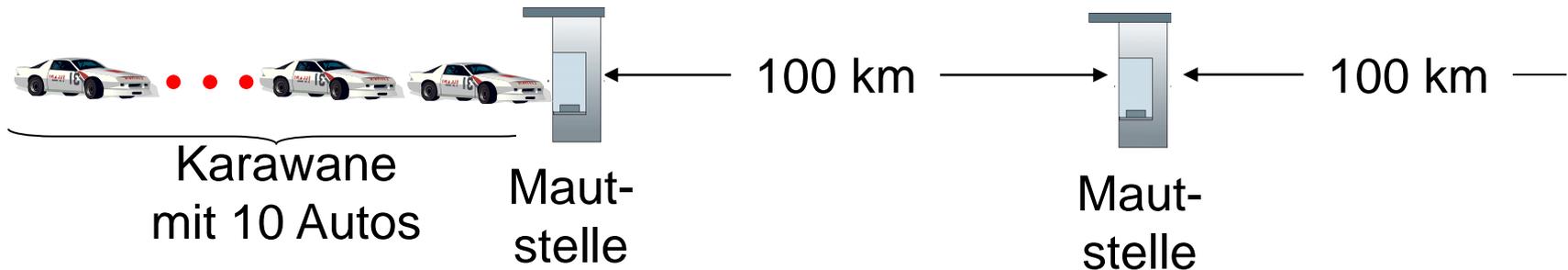


Verzögerungen in einem Router im Überblick

- Übertragungsdauer
 - Sendezeit + Ausbreitungsverzögerung
- Weitere Verzögerungen in einem Router
 - Pufferung der Daten in Warteschlange
 - Warten bis Ausgangslink für Übertragung verfügbar
 - Abhängig von Last für diesen Übertragungsabschnitt
 - Verarbeitung
 - Überprüfung hinsichtlich Bitfehler, Bestimmung des Ausgangslinks ...
 - i.d.R. < msec



Analogon: Karawane von Autos



- „Ausbreitungsgeschwindigkeit“ der Autos: 100 km/h
- Mautstelle benötigt 12 Sekunden für Abfertigung („Sendezeit“)
- Auto~Bit, Karawane~Paket
- Frage
 - Wie lange dauert es, bis die Karawane vollständig bei der zweiten Mautstelle angekommen ist?
- Abfertigung der kompletten Karawane an der Mautstelle
 - 10*12 Sekunden
- Zeit die das letzte Auto benötigt um von Mautstelle 1 nach Mautstelle 2 zu gelangen
 - $100 \text{ km} / (100 \text{ km/h}) = 1 \text{ Stunde}$
- Antwort
 - 62 Minuten

<http://pingo.upb.de/>



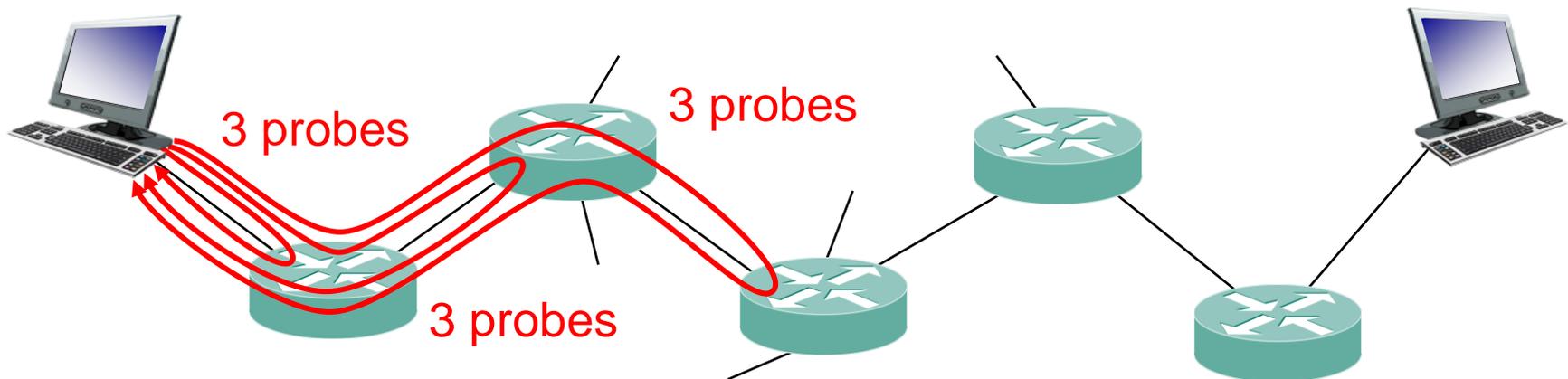
<http://pingo.upb.de/>



Reale Verzögerungen im Internet?

■ Messen mit dem Programm **traceroute**

- Misst die Verzögerung eines Pakets von der Quelle zu den Routern auf dem Pfad zum Ziel
- Für alle i
 - Sende drei Pakete die Router i auf dem Pfad zum Ziel erreichen
 - Router i sende Pakete zurück zur Quelle
 - Quelle misst Zeit zwischen dem Senden und Empfangen des Pakets



Reale Verzögerungen im Internet – Ein Beispiel

traceroute: gaia.cs.umass.edu → www.eurecom.fr

3 Messungen

1	cs-gw (128.119.240.254)	1 ms	1 ms	2 ms
2	border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu (128.119.3.145)	1 ms	1 ms	2 ms
3	cht-vbns.gw.umass.edu (128.119.3.130)	6 ms	5 ms	5 ms
4	jn1-at1-0-0-19.wor.vbns.net (204.147.132.129)	16 ms	11 ms	13 ms
5	jn1-so7-0-0-0.wae.vbns.net (204.147.136.136)	21 ms	18 ms	18 ms
6	abilene-vbns.abilene.ucaid.edu (198.32.11.9)	22 ms	18 ms	22 ms
7	nycm-wash.abilene.ucaid.edu (198.32.8.46)	22 ms	22 ms	22 ms
8	62.40.103.253 (62.40.103.253)	104 ms	109 ms	106 ms
9	de2-1.de1.de.geant.net (62.40.96.129)	109 ms	102 ms	104 ms
10	de.fr1.fr.geant.net (62.40.96.50)	113 ms	121 ms	114 ms
11	renater-gw.fr1.fr.geant.net (62.40.103.54)	112 ms	114 ms	112 ms
12	nio-n2.cssi.renater.fr (193.51.206.13)	111 ms	114 ms	116 ms
13	nice.cssi.renater.fr (195.220.98.102)	123 ms	125 ms	124 ms
14	r3t2-nice.cssi.renater.fr (195.220.98.110)	126 ms	126 ms	124 ms
15	eurecom-valbonne.r3t2.ft.net (193.48.50.54)	135 ms	128 ms	133 ms
16	194.214.211.25 (194.214.211.25)	126 ms	128 ms	126 ms
17		*	*	*
18		*	*	*
19	fantasia.eurecom.fr (193.55.113.142)	132 ms	128 ms	136 ms

Seekabel



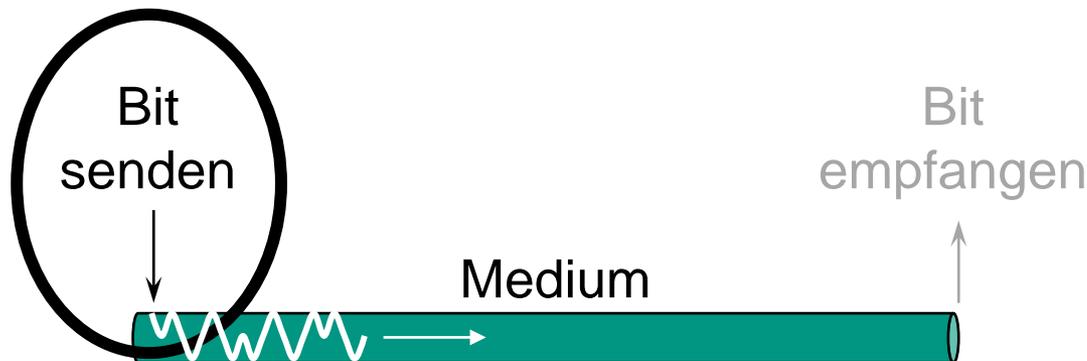
* Keine Antwort (Paketverlust oder Router antwortet nicht)

traceroute-Messungen aus verschiedenen Ländern und Netzen sind durchführbar mit www.traceroute.org

„Welche Länge hat ein Bit auf der Leitung?“

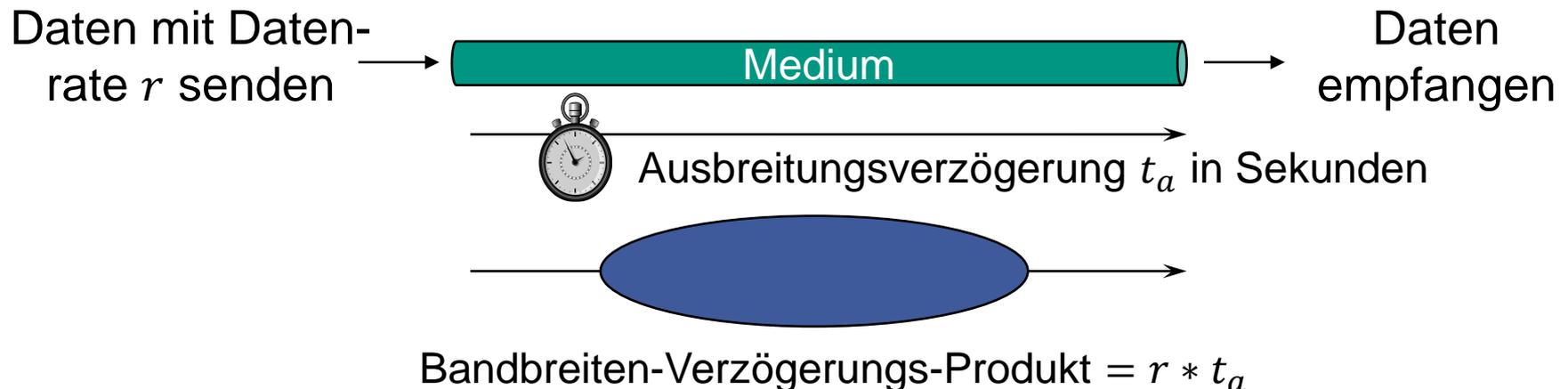
- Welche physikalische Länge (in Metern) hat ein Bit auf der Leitung?
 - Abhängig von Datenrate r und Ausbreitungsgeschwindigkeit v
 - „Wie weit sind die ersten Signalschwingungen des Bits schon gewandert, bevor das Bit vollständig auf das Medium gelegt wurde?“

$$\text{phys. Länge 1 Bit} = \frac{1 \text{ Bit}}{r} * v$$



Bandbreiten-Verzögerungsprodukt-Produkt

- Welche Datenmenge kann sich gleichzeitig „auf dem Medium“ befinden?
 - Übertragungsmedium als Datenspeicher!
 - Abhängig von Datenrate r und Ausbreitungsverzögerung t_a
 - „Wie lange braucht das erste Bit, bevor es am anderen Ende der Leitung ankommt und wie viel Daten können bis dahin noch zusätzlich auf die Leitung gegeben werden?“
- Auch als **Bandbreiten-Verzögerungs-Produkt** bezeichnet
 - Datenrate wird häufig auch (ungenau) als Bandbreite bezeichnet



- Typischerweise gemessen in

Einheit		Bezeichnung
bit/s		„bit pro Sekunde“ / „ <i>bit per second</i> “
kbit/s	1000 bit/s	„Kilo bit pro Sekunde“
Mbit/s	10^6 bit/s	„Mega bit pro Sekunde“
Gbit/s	10^9 bit/s	„Giga bit pro Sekunde“
Tbit/s	10^{12} bit/s	„Tera bit pro Sekunde“
Pbit/s	10^{15} bit/s	„Peta bit pro Sekunde“

- Achtung: Stets Multiplikator (1000 vs. 1024) beachten
- In der Übertragungstechnik ist 1 Kbit/s meist 1000 bit/s

Entwicklung der Datenraten in LAN, MAN & WAN

- um 1960: Erste Modems, **wenige hundert bit/s**
 - Nur von Telcos zugelassene Geräte erlaubt.
- 1968: Akustikkoppler, **300 bit/s**
 - Alle erlaubt, da keine direkte Verbindung mit Leitung.
- 1981: Smartmodem (von Hayes Communications), **300 bit/s**
- 1989: Deutschland-Einführung ISDN, **64 kbit/s** B-Kanal
- 1995: LAN: Fast Ethernet, **100 Mbit/s**
- 1996: Modems mit **56 kbit/s** (K56flex/X2, ab 1998 V.90)
- 1998: LAN: Gigabit Ethernet, **1 Gbit/s**
- 1999: Deutschland-Start von DSL, **768 kbit/s**
- 2002: LAN: Erste 10 Gigabit Ethernet Typen, **10 Gbit/s**
- 2006: Asymmetric DSL2+, bis zu **16 Mbit/s**
- 2006: **6,4 TBit/s** über 1000 km Glasfaser
 - DWDM mit 160 verschiedenen Wellenlängen
- 2010: LAN: 100 Gigabit Ethernet, **100 Gbit/s**



Download
100 MByte:
1 Monat

sowieso
schwierig:
~ 10 MByte
Festplatten



Download
100 MByte:
< 4 h



Download
100 MByte:
< 1 min



Download
100 MByte:
1/8 ms

Beispiel: Bandbreiten-Verzögerungs-Produkt

■ Mobilfunk

■ AMPS	$r = 13 \text{ kbit/s}$	$d = 3 \text{ km}$	$t_a = 15 \mu\text{s} \rightarrow \sim 0,2 \text{ bit}$
■ GSM	$r = 300 \text{ kbit/s}$	$d = 3 \text{ km}$	$t_a = 15 \mu\text{s} \rightarrow 4,5 \text{ bit}$
■ UMTS	$r = 14,4 \text{ Mbit/s}$	$d = 3 \text{ km}$	$t_a = 15 \mu\text{s} \rightarrow 216 \text{ bit}$

■ Wireless Local Area Networks (WLAN)

■ Infrarot	$r = 4 \text{ Mbit/s}$	$d = 10 \text{ m}$	$t_a = 50 \text{ ns} \rightarrow 0,2 \text{ bit}$
■ Bluetooth	$r = 2,1 \text{ Mbit/s}$	$d = 100 \text{ m}$	$t_a = 500 \text{ ns} \rightarrow 1,05 \text{ bit}$
■ 802.11g	$r = 54 \text{ Mbit/s}$	$d = 150 \text{ m}$	$t_a = 750 \text{ ns} \rightarrow 40,5 \text{ bit}$
■ 802.11n	$r = 248 \text{ Mbit/s}$	$d = 250 \text{ m}$	$t_a = 1,25 \mu\text{s} \rightarrow 310 \text{ bit}$
■ 802.16 (WiMax)	$r = 70 \text{ Mbit/s}$	$d = 50 \text{ km}$	$t_a = 250 \mu\text{s} \rightarrow 17,5 \text{ kbit}$
■ Long Term Evol. (LTE)	$r = 300 \text{ Mbit/s}$	$d = 75 \text{ km}$	$t_a = 375 \mu\text{s} \rightarrow 112,5 \text{ kbit}$

■ Satelliten und Interplanetar

■ Geostationär (GEO)	$r = 50 \text{ Mbit/s}$	$d = 35 \text{ 863 km}$	$t_a = 179 \text{ ms} \rightarrow \sim 9 \text{ Mbit}$
■ Mars	$r = 1 \text{ Mbit/s}$	$d = 45 \text{ Mio. km bis } 400 \text{ Mio. km}$	
<ul style="list-style-type: none"> ■ $t_a = 225 \text{ s bis } 33 \text{ min} \rightarrow 225 \text{ Mbit bis } 2 \text{ Gbit}$ 			
■ Jupiter	$r = 1 \text{ Mbit/s}$	$d = 590 \text{ Mio. km bis } 970 \text{ Mio. km}$	
<ul style="list-style-type: none"> ■ $t_a = 49 \text{ min bis } 81 \text{ min} \rightarrow \sim 3 \text{ Gbit bis } \sim 5 \text{ Gbit}$ 			
■ Pluto	$r = 1 \text{ Mbit/s}$	$d = 4.275 \text{ Mio. km bis } 7.525 \text{ Mio. km}$	
<ul style="list-style-type: none"> ■ $t_a = \sim 6 \text{ h bis } 10,5 \text{ h} \rightarrow \sim 21 \text{ Gbit bis } \sim 38 \text{ Gbit}$ 			

→ Unterschiedliche Rahmenbedingungen erfordern ganz unterschiedliche Protokolle

Annahme: Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = 200.000 \text{ km/s}$

Weiteres zur Übertragungsdauer

- Je nach Betrachtungsweise spielen noch weitere Komponenten bei der Übertragungszeit eine Rolle
 - Zeit für Protokollbearbeitung
 - Daten codieren, mit Prüfsummen versehen, etc.
 - Dauer der Bearbeitung in Zwischensystemen
 - insbesondere bei Paket-basierter Übertragung
 - Daten auspacken, prüfen, nächsten Hop bestimmen, neue Prüfsummen berechnen, etc.
 - Wartezeit in Warteschlangen
 - etc.

- Stets beachten, was genau im Kontext gesucht/betrachtet wird

<http://pingo.upb.de/>



Zusammenfassung Übertragungsdauer

- Sendezeit [s] = $\frac{\text{Datenmenge}}{\text{Datenrate}}$
- Ausbreitungsverzögerung (t_a) [s] = $\frac{\text{Länge Medium}}{\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}}$
- phys. Länge 1 Bit [m] = $\frac{1 \text{ Bit}}{\text{Datenrate}} * \text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}$
- Bandbreiten–Verz.–Produkt [bit] = $\text{Datenrate} * \text{Ausbreitungsverz. } (t_a)$

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. **Kanalkapazität**
9. Zusammenfassung

- Zusammenhang Datenrate vs. Bandbreite
 - Was für eine Datenrate kann auf einem Kanal unter den existierenden Bedingungen erzielt werden?

- Fehlerfreier Kanal
 - Datenrate ist durch die Bandbreite limitiert
 - Nach Nyquist gilt
 - Für eine Schrittrate von $2B$ ist ein Signal der Bandbreite B ausreichend
 - Max. Schrittgeschwindigkeit [baud] = $2 * \text{Bandbreite [Hz]}$
 - Umkehrung gilt auch
 - Bei binären Signalen: Datenrate = $2B$ bit/s
 - Datenrate $C = 2B \log_2 M$
 - M : Anzahl der Signalwerte
 - Erhöhung von M führt zu Erhöhung der erzielbaren Datenrate

■ Beobachtung

- Bei höherer Datenrate werden Bits „kürzer“ und damit verfälschen Störungen mehr Bits als bei niedriger Datenrate

■ Shannon-Hartley-Gesetz

- Gibt eine obere Grenze für die auf einer Datenleitung erzielbare Datenrate in Abhängigkeit des Signal-Rausch-Abstandes (SNR)

- $C = B \log_2 (1 + S/R)$

- C ist die Datenrate in bit/s
- B ist die Bandbreite (gemessen in Hz) des Kanals
- S ist Energie des Signals
- R ist Energie der Störquelle

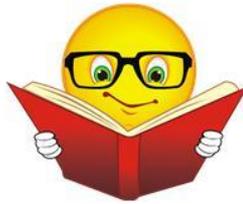
- $\text{SNR [dB]} = 10 \log_{10} \frac{S}{R}$

1. Einführung
2. Netzwerkarchitekturen
3. **Physikalische Grundlagen**
4. Protokollmechanismen
5. Die Sicherungsschicht: HDLC
6. Die Sicherungsschicht: Lokale Netze
7. Netzkopplung und Vermittlung
8. Die Transportschicht
9. Sicherheit
10. Anwendungssysteme

1. Signale und ihre Darstellung
2. Digitalisierung analoger Signale
3. Digitale Signale
4. Übertragungsverfahren
5. Übertragungsmedien
6. Übertragungsstörungen
7. Übertragungsdauer
8. Kanalkapazität
9. Zusammenfassung

- Computer arbeiten mit **digitaler Darstellung** analoger Signale
 - Umwandlung durch **Abtastung** (zeitliche Diskretisierung) und
 - **Quantisierung** (Diskretisierung des Wertebereiches)
 - **Abtasttheorem: Informationsverlust** bei zu geringer Abtastfrequenz
- (Periodische) Signale sind **als Kosinus-Summe darstellbar**
 - Zerlegung in unterschiedliche Frequenzen → **Frequenzbereich**
- Signale unterliegen Störungen
 - **Bandbreite** und **Rauschen** limitieren die mögliche **Kanalkapazität**
 - Eigenschaften des **Übertragungsmediums** sind zu beachten
- Signalausbreitung „braucht Zeit“: **Verzögerungen**
 - Folge: Medium „speichert“ Daten, Bits haben eine „Länge“
 - Außerdem wichtig: **Sendezeit** (durch Datenrate bestimmt)

- 3.1 Erläutern Sie die Funktionsweise der Digitalisierung analoger Daten
- 3.2 Welche Rolle spielt in diesem Kontext das Abtasttheorem?
- 3.3 Wie groß ist die Standard-Datenrate eines Sprachkanals und aus welchen Zusammenhängen leitet sie sich ab?
- 3.4 Erläutern Sie den Unterschied zwischen Übertragungs- und Schrittgeschwindigkeit und nennen Sie deren Einheiten.
- 3.5 Aus welchen Einzelkomponenten setzt sich die Übertragungszeit zusammen und wovon hängen diese jeweils ab?
- 3.6 Wie „lang“ ist eine Dateneinheit von 850 bit bei einer Datenrate von 1 Mbit/s?
- 3.7 Wie viele bits befinden sich gleichzeitig auf einer 1000 Mbit/s schnellen Glasfaserverbindung mit 1000 Kilometern Länge?
- 3.8 Nennen Sie unterschiedliche Umtastverfahren und erklären Sie deren Arbeitsweise.



- [ALSS03] S. Abeck, P. Lockemann, J. Schiller, J. Seitz; **Verteilte Informationssysteme**; dpunkt.verlag GmbH; 2003
- Kapitel 6
- [Flag08] Flag Telecom; <http://www.flagtelecom.com/>
- [Haaß97] W. Haaß; **Handbuch der Kommunikationsnetze**; Springer Verlag, 1997
- Gute knappe Zusammenfassung zu Übertragungsmedien und Multiplexverfahren
- [Hals05] F. Halsall; **Computer Networking and the Internet**; Addison-Wesley, 2005
- Kapitel 1
- [Hei08a] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/99240>
- [Hei08b] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/102751>
- [Hei08c] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/102870>
- [Hei08d] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/102931>
- [Hei08e] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/103135>
- [Hei08f] heise Newsticker; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/105984>
- [Hei09] heise Newsticker, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/120760>
- [Stal10] W. Stallings; **Data & Computer Communications**; Prentice Hall, 2010
- Kapitel 3 bis 5