

Internet Protocols

Thomas Fuhrmann



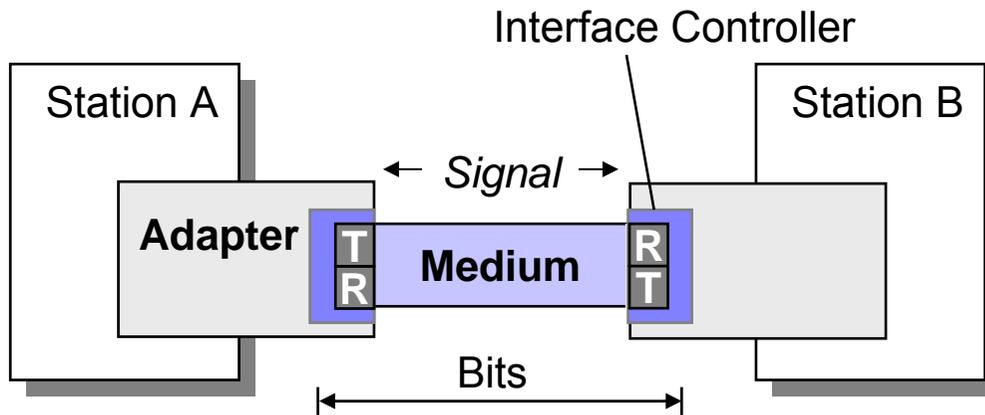
Network Architectures
Computer Science Department
Technical University Munich

Physical Layer

A Brief Overview

Note: The physical layer does not contain (many) protocols. We briefly review the material because it is an important foundation for “Internet Protocols”.

Rechnergestützte Kommunikation



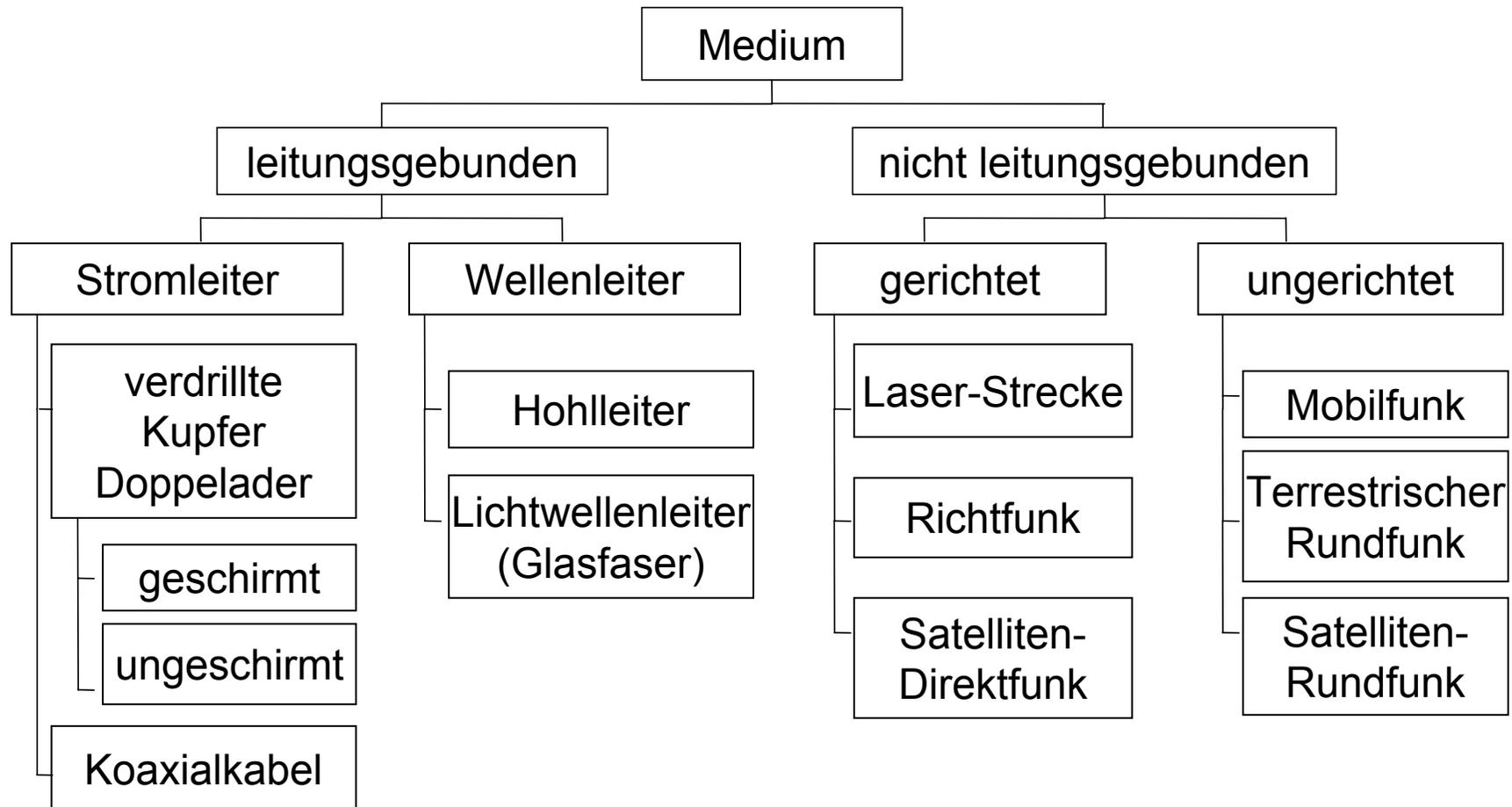
T: Transmitter

R: Receiver

Full duplex: = Both stations can send and receive at the same time

Half duplex = Stations alternate ...

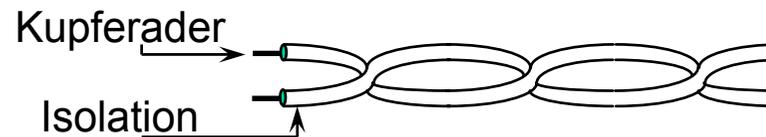
- Aufgabe der physikalischen Schicht:
 - Umwandlung von Bits in Signale (=Kodierung)
 - Transport der Signale zum Kommunikationspartner (Kabel, Funk, etc.)
 - Rückwandlung der Signale in Bits
- Dienst: *Übertragung eines ungesicherten Bitstroms*
- Die physikalische Schicht spezifiziert die physikalischen Eigenschaften der Kommunikation
 - Elektrische Eigenschaften der Kabel, Signalpegel, etc.
 - Optische Eigenschaften der Glasfasern
 - Funkfrequenzen
 - Steckerform und Steckerbelegung



Typical Wireline Examples

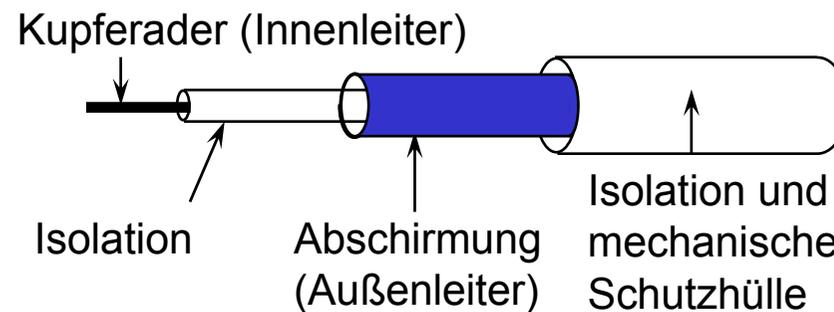
Twisted Pair

Examples: Fast Ethernet,
Telephone (=DSL)



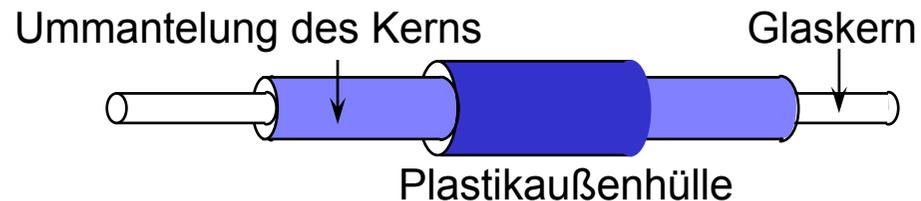
Coax Cable

Examples: 10Base2 Ethernet,
Cable TV, Satellite TV Dishes



Fibre

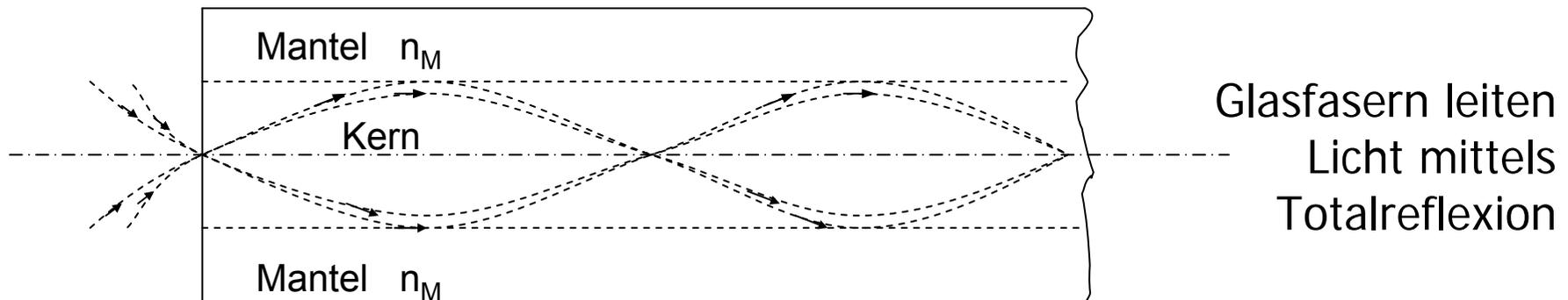
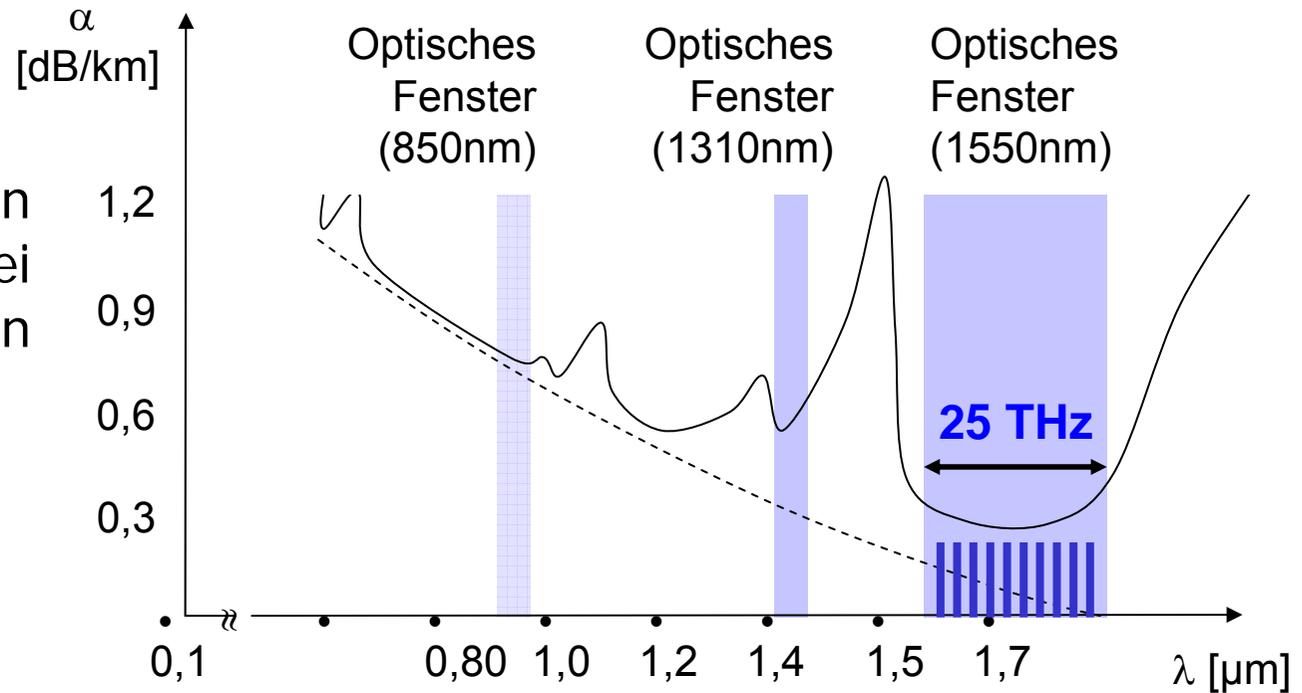
Examples: Gigabit Ethernet,
Wide Area Networks



Die Kabelzuordnungen für Ethernet sind nur typische Beispiele.
Gigabit Ethernet kann z.B. auch über Twisted Pair Kabel laufen.

Beispiel: Glasfasern

Glasfasern lassen besonders Licht bei 1550nm passieren



Signalklassen

Zeitkontinuierliche, wertkontinuierliche Signale

- z.B. analoges Telefon, Schallplatte

Zeitdiskrete, wertkontinuierliche Signale

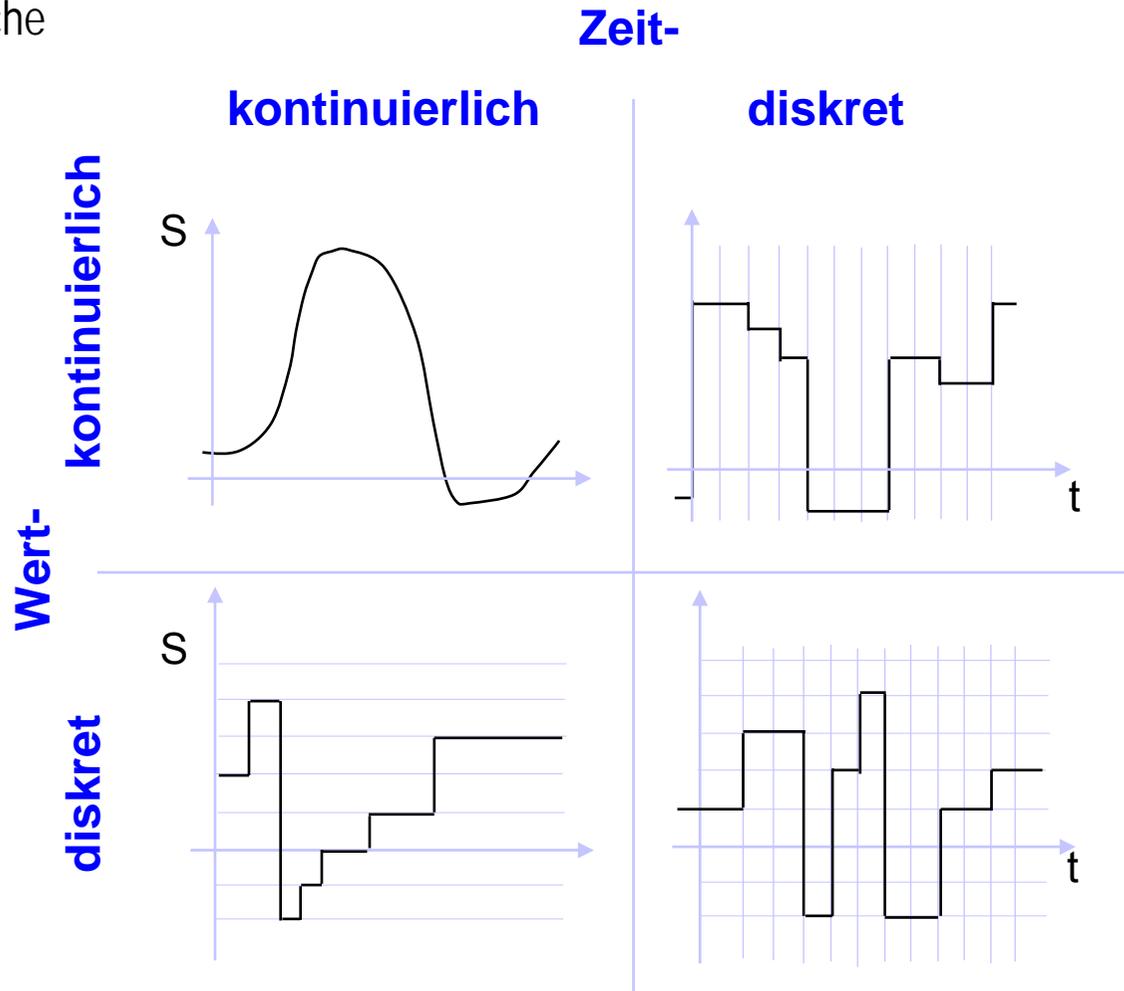
- z.B. Kino-Film

Zeitkontinuierliche, wertdiskrete Signale

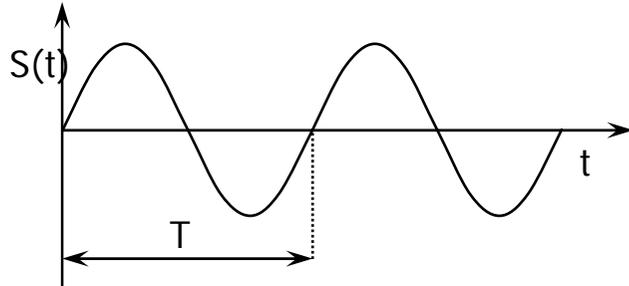
- z.B. Steuerleitungen mit digitalen Signalen (Gerät x ein/aus)

Zeitdiskrete, wertdiskrete Signale

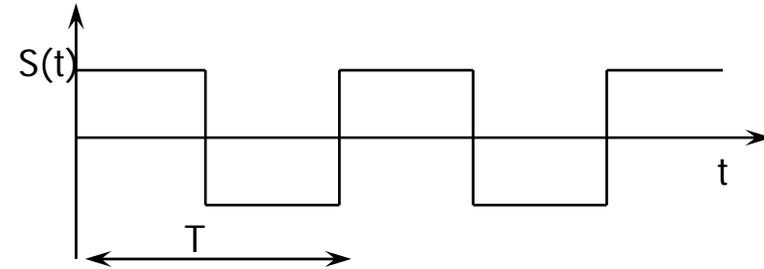
- z.B. digitales Telefon, CD-Player



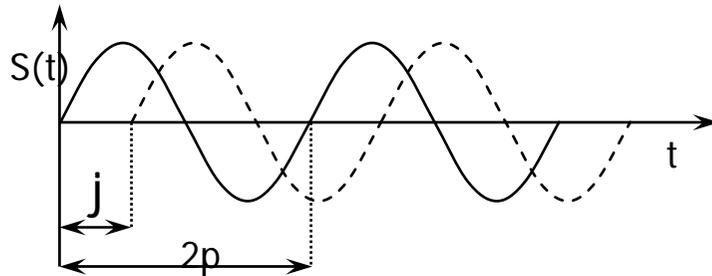
Periodische Signale



Sinus-Schwingung
(zeitkontinuierlich)



Rechteck-Schwingung
(zeitdiskret „idealisiert“)



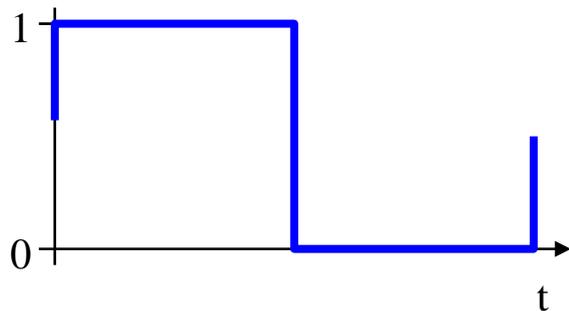
Beispiel von Phasendifferenz j

Periodische Signale werden durch drei Kenngrößen charakterisiert:

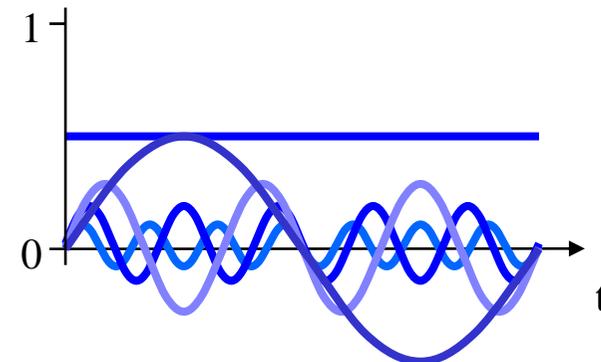
- Periode T bzw. **Frequenz** $f=1/T$
- **Amplitude** $S(t)$
- **Phase** j

Fourier-Zerlegung

Alle (periodischen) Signale können als Überlagerung von Sinus- und Cosinus-Schwingungen dargestellt werden:



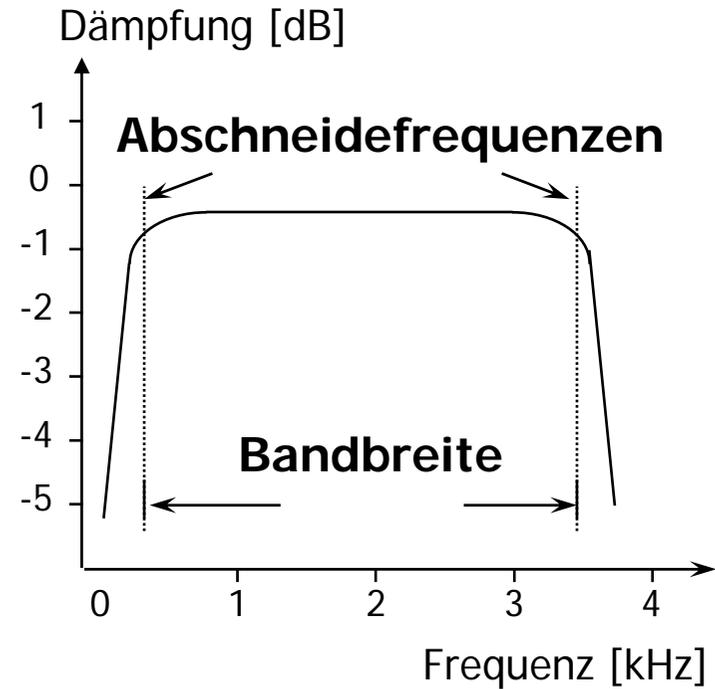
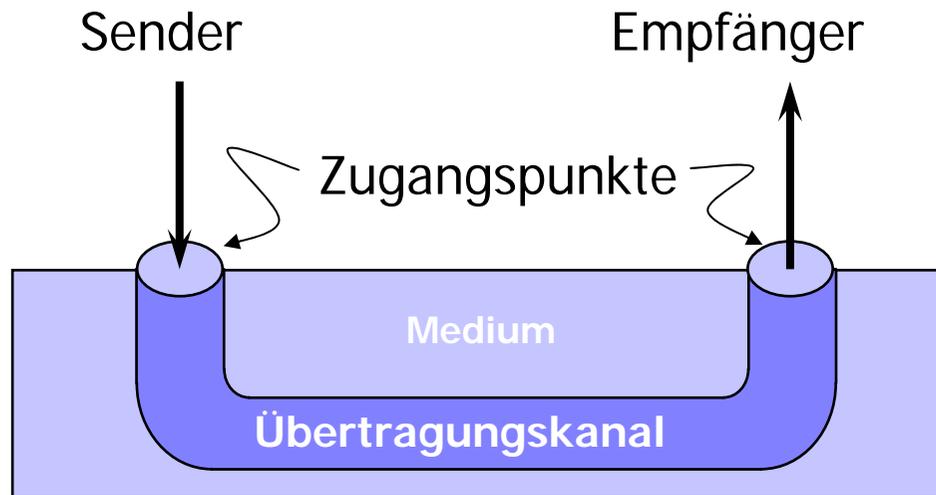
Rechteck-Signal



Fourier-Zerlegung

Je mehr Anteile, d.h. höhere Frequenzen, der Zerlegung „mitgenommen“ werden, desto besser kann ein beliebiges Signal angenähert werden.

Bandbreitenbegrenzung



Jeder physikalische Kanal hat eine begrenzte Bandbreite.
Dadurch werden Signale verändert.

Signal-Verfälschung

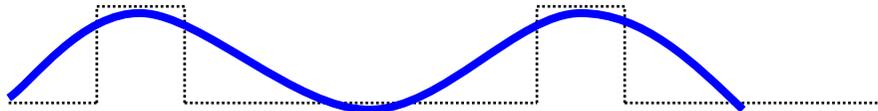
Bitcode: 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0

Schrittfrequenz
2000 Schritte/s



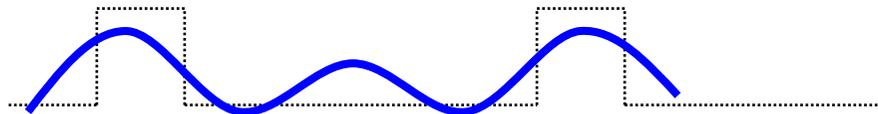
Ideal, würde aber unendliche Bandbreite benötigen!

Bandbreite 500 Hz



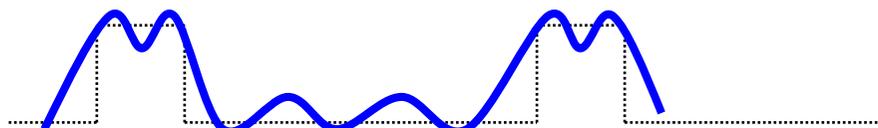
nur 1. Harmonische

... 900 Hz



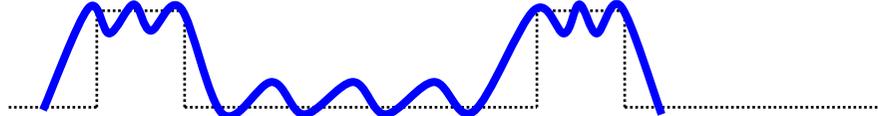
1.+2. Harmonische

... 1300 Hz



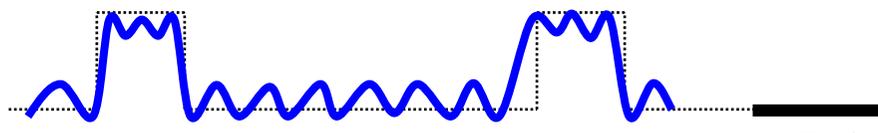
1.-3. Harmonische

... 1700 Hz



1.-4. Harmonische

... 2100 Hz



1.-5. Harmonische

Zeit

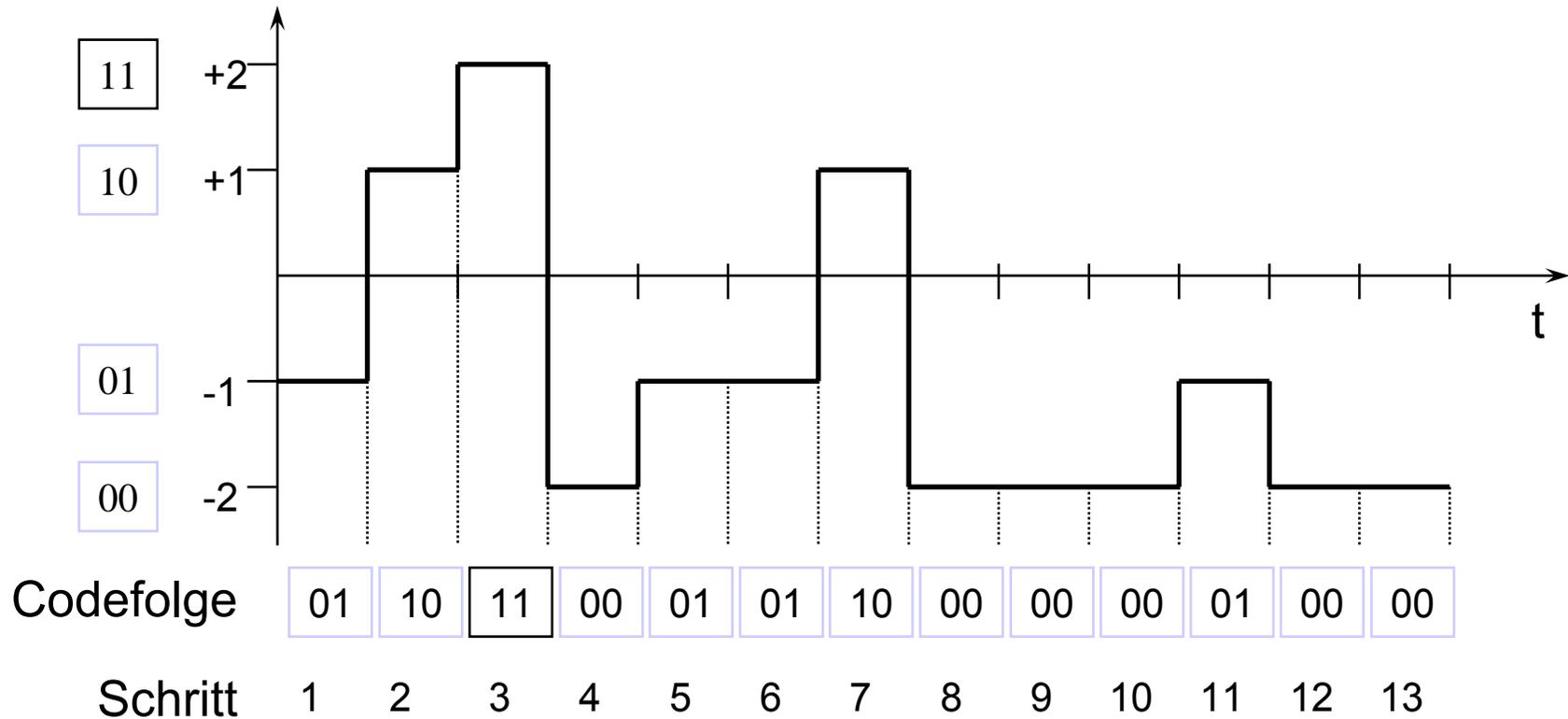
Bandbreite und digitales Signal

- Werden digitale Signale direkt als „Strom ein“ bzw. „Strom aus“ auf einem physikalischen Kanal übertragen, so *verfälscht die begrenzte Bandbreite des Kanals dieses Signal*
- Dadurch ergibt sich eine *maximale Schrittfrequenz* mit der Bits auf den Kanal gegeben werden können (Einheit: Baud)
- *Bei jedem Schritt* können ggf. *mehrere Bits* in Form verschieden hoher Amplituden des Signals übertragen werden (Voraussetzung: wenig Rauschen)

Mehrwertiges Digitalsignal

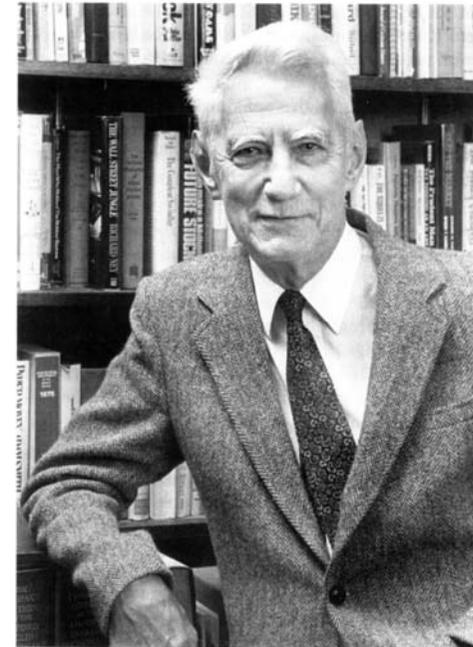
zugeordnetes
Codeelement

Signalstufen
(Amplitudenwerte)



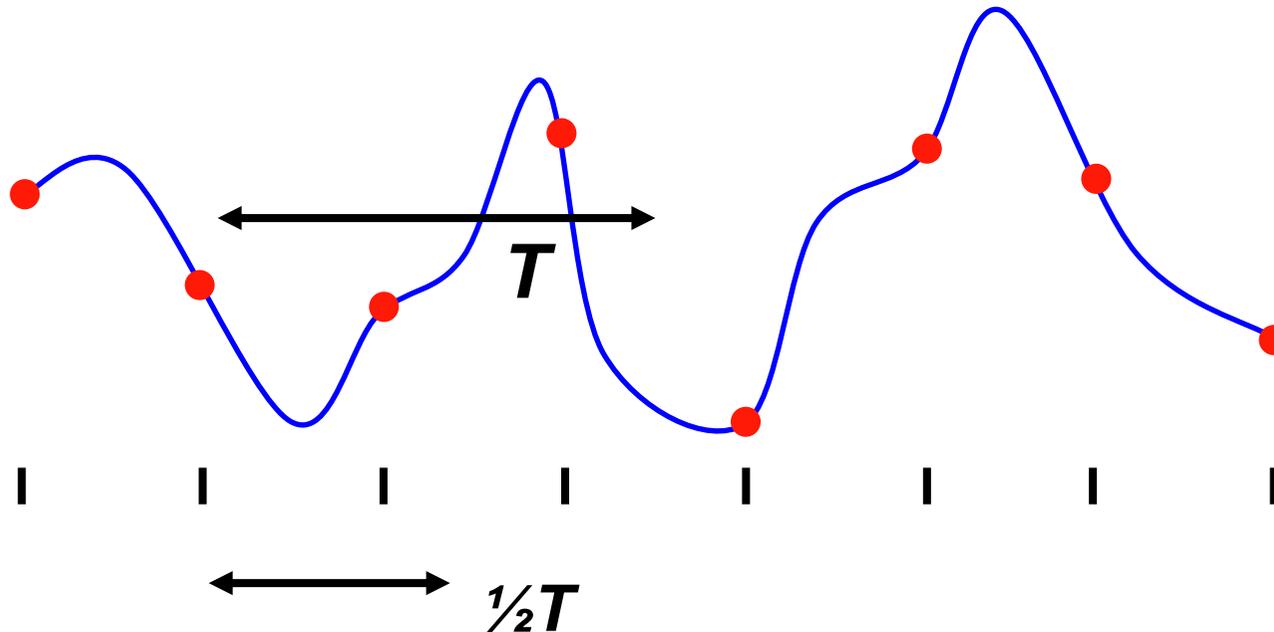
Shannon-Nyquist-Formel

- Abtasttheorem (Nyquist):
Enthält ein Signal f_{\max} als höchste Frequenz muss mit $2f_{\max}$ abgetastet werden, um das Signal vollständig zu erfassen
- Können auf einem Kanal mit Bandbreite f_{\max} pro Schritt b Bits codiert werden, so beträgt die Kapazität des Kanals folglich $2f_{\max}b$ Bit
- Kanalkapazität (Shannon):
Die Anzahl der pro Schritt codierbaren Bits hängt vom Signal-Rausch-Abstand S/N ab: $b = \log_2 \sqrt{1 + S/N}$



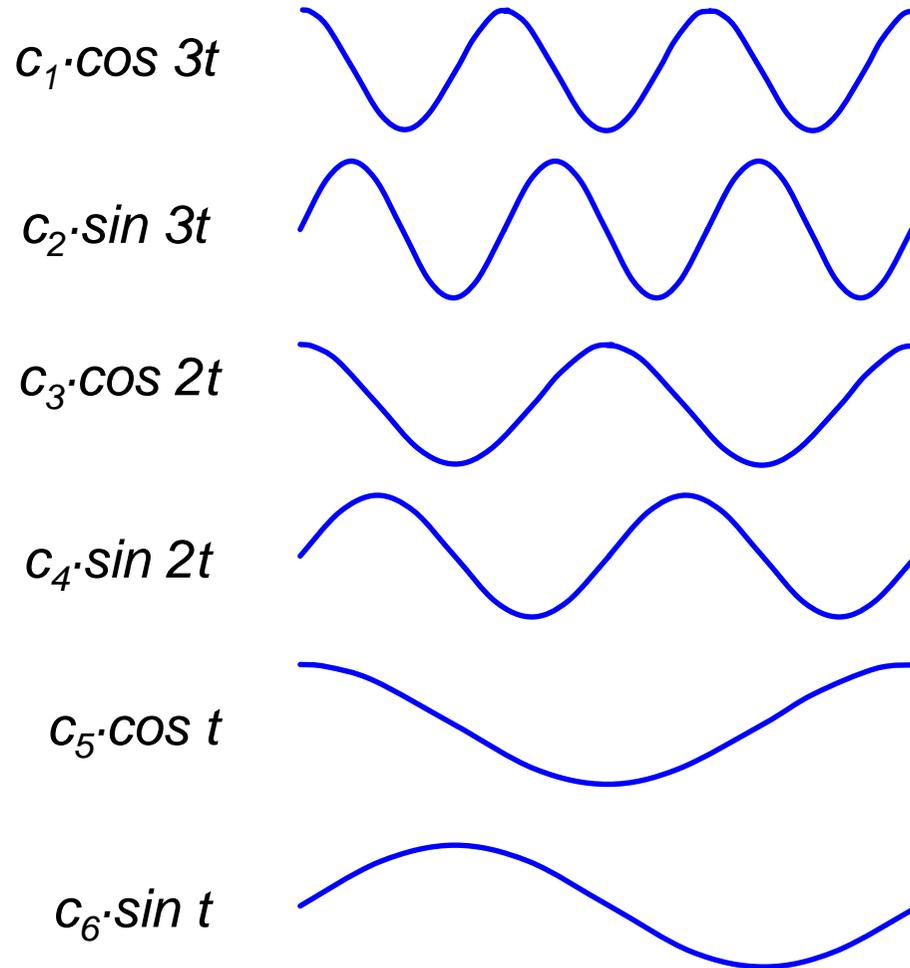
Claude Shannon

Satz von Fourier (1)



Stützstellen, enger als im Abstand $\frac{1}{2}T$ bestimmen eindeutig eine Funktion, deren höchste Fourier-Komponente $f=1/T$ nicht übersteigt.

Satz von Fourier (2)

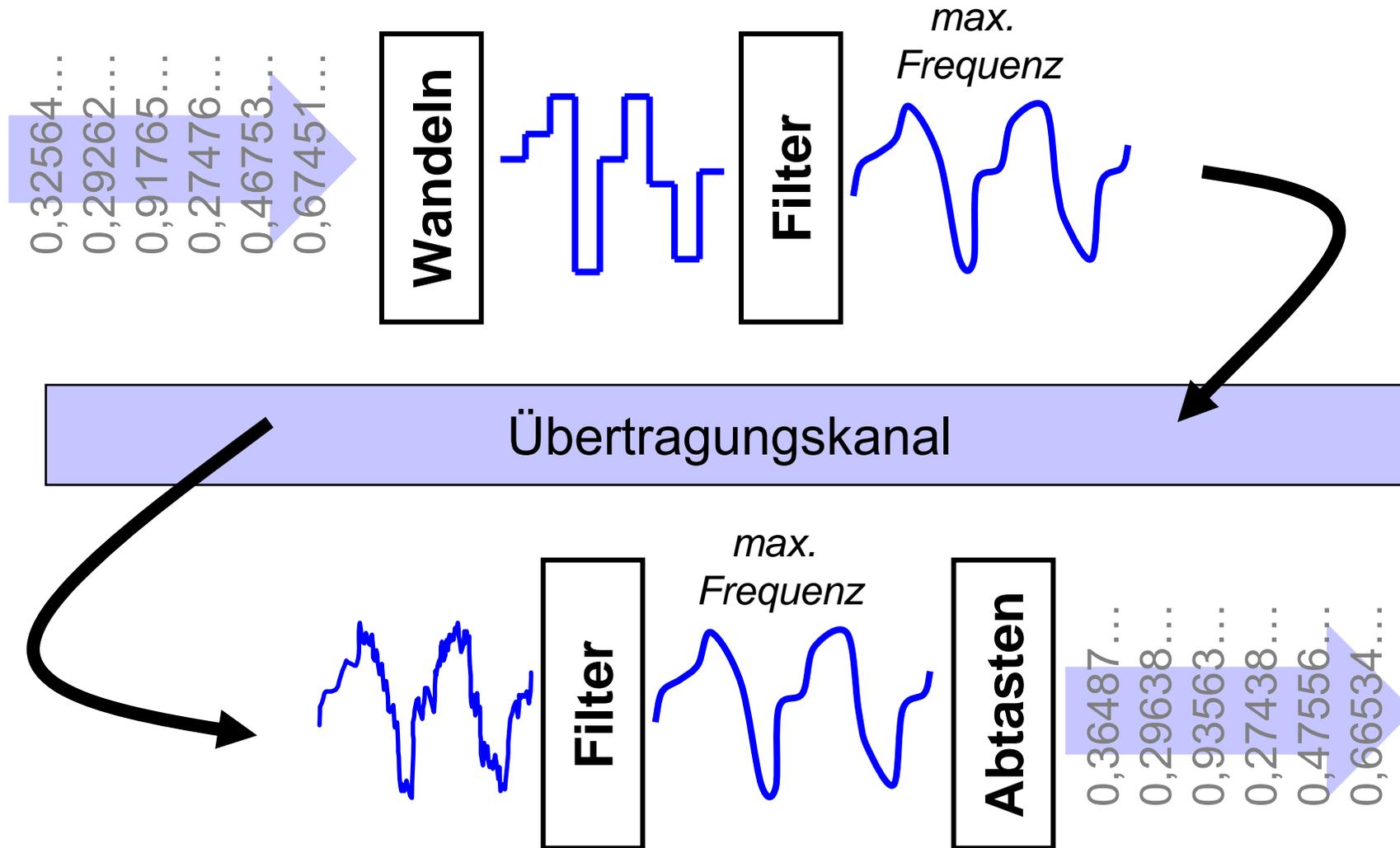


Beispiel:

- Max. 3 Perioden pro Zeiteinheit
- Nyquist: 6 Abtastwerte
- Fourier: 6 Sinus- und Cosinus-Funktionen

⇒ Eindeutig bestimmtes lineares Gleichungssystem

Anwendung von Shannon-Nyquist



Codierung digitaler Signale

Wichtige Eigenschaften die ein Leitungscode aufweisen muss:

- *Taktrückgewinnung*
Den Signalwerten muss neben den eigentlichen Daten auch der Takt entnommen werden, falls keine separate Taktleitung zur Verfügung steht. Taktgehalt eines Codes sollte möglichst unabhängig vom Inhalt der übertragenen Daten sein.
- *Gleichstromanteil*
Auf manchen Übertragungsstrecken darf wegen der angeschlossenen Geräte kein Gleichstrom auftreten. Dies kann meist nicht absolut, sondern nur im statistischen Mittel erfüllt werden.

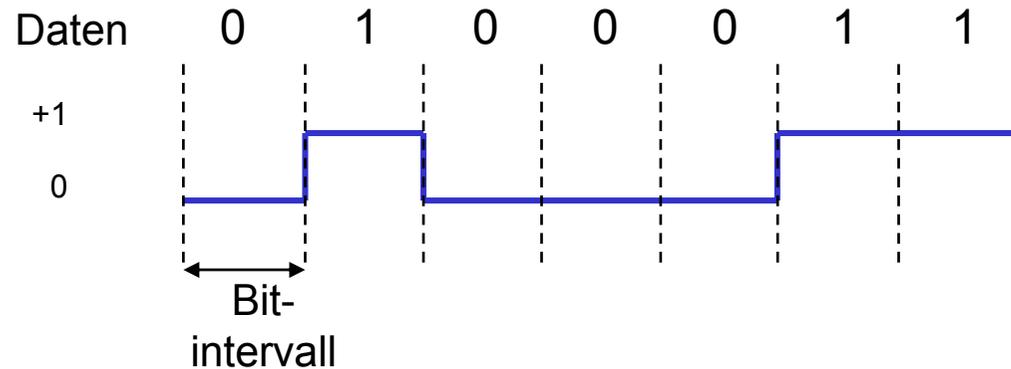
Non-Return to Zero

Kennzeichen

- Binärer Code, d.h. zwei Pegelwerte im Signal
- fester Pegel während eines Bitintervalls
- Signalübergänge (Signalwechsel) erfolgen an den Intervallgrenzen
- "1" hoher Pegel, "0" niedriger Pegel

Bewertung

- Sehr einfach zu implementieren
- Gleichstromkomponente kann hoch sein
- Eignet sich nicht zur Taktrückgewinnung
- NRZ ist Standard innerhalb von Digitalgeräten (Rechnern, usw.)

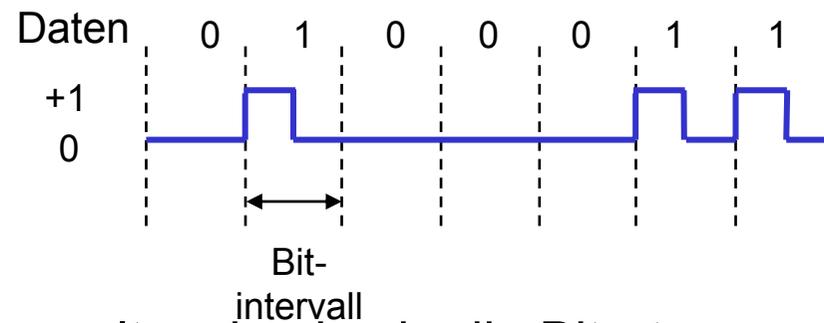


Kennzeichen

- Binärer Code, d.h. zwei Pegelwerte im Signal
- Rechteckimpuls in der ersten Hälfte des Bitintervalls für das Datenelement "1",
- Danach immer Rückkehr in Grundzustand (Zero)

Bewertung

- Die Baudrate (Schrittgeschwindigkeit) ist im Extremfall (Folge von "1") doppelt so hoch wie die Bitrate
- Bei Null-Folge keine Taktrückgewinnung möglich



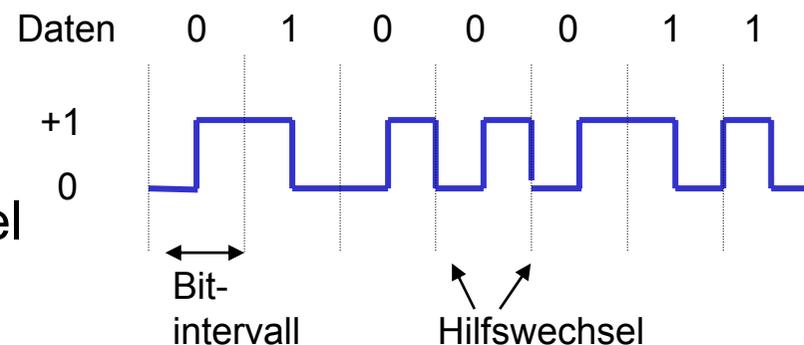
Manchester Codierung

Kennzeichen

- Biphase Code, mindestens ein Signalwechsel pro Intervall, maximal zwei Signalwechsel pro Bit
- 1 = Signalübergang hoher Pegel zu niedrigem Pegel in der Intervallmitte
- 0 = Signalübergang niedriger Pegel zu hohem Pegel in der Intervallmitte
- Erzeugbar über XOR-Verknüpfung von NRZ-kodierten Daten und dem Takt

Bewertung

- Maximal zwei Signalwechsel pro Bit erforderlich (erhöht Baudrate)
- Leichte Taktrückgewinnung, da stets mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall
- Keine Gleichstromkomponente
- Fehlererkennung auf Signalebene: Fehlen eines erwarteten Übergangs erkennbar

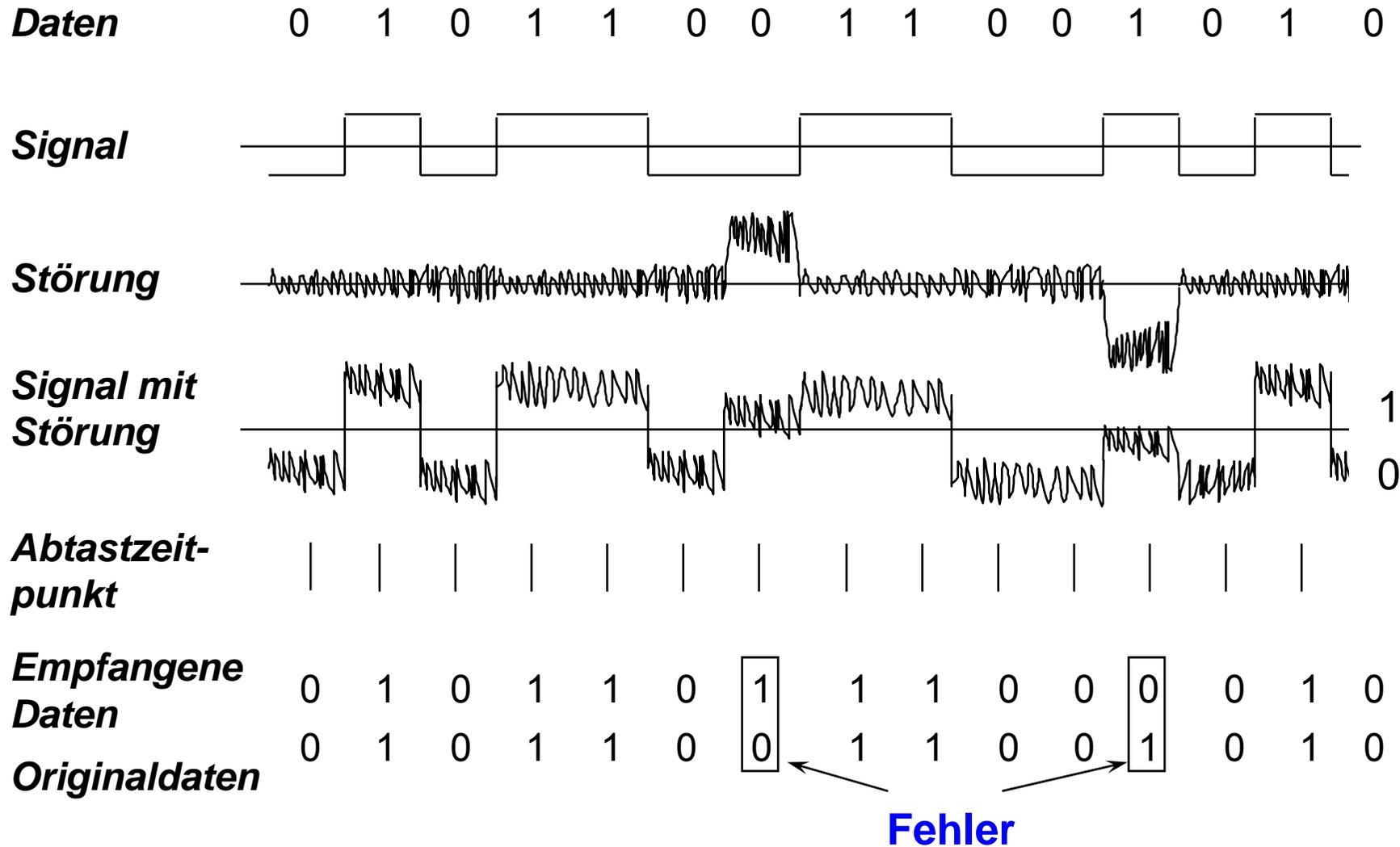


- Beispiel: 4B/5B Code
- Ziel: Vermeidung langer Null bzw. Eins-Folgen um Taktrückgewinnung zu ermöglichen
- 4 Datenbits werden durch 5 Codebits dargestellt (= *Blockcode*)

4-Bit-Daten	5-Bit-Code
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

- Trotz geeigneter Codewahl und Beachten der Kanalkapazität (Bandbreite und Signal-Rausch-Abstand) wird die Datenkommunikation durch zufällige Störungen auf dem Kanal verfälscht
- Der Schutz gegen solche Fehler wird aber nicht von der physikalischen Schicht, sondern von der nächsthöheren Schicht erbracht: Sicherungsschicht

Beispiel: Datenverfälschung



Zusammenfassung

- Schicht 1 (physikalische Schicht) bietet einen **ungesicherten** (= nicht gegen Fehler gesicherten) **Kanal**, der einen Strom aus Datenbits überträgt
- Abhängig von Bandbreite und Signal-Rausch-Abstand hat dieser Kanal eine **Kapazität**, gemessen in **Bit pro Sekunde**
- Die Details der physikalischen Übertragung werden auf den höheren Schichten nicht mehr betrachtet

Data Link Layer

An Overview

Note: Data link layer protocols are not really „Internet Protocols“ but they are an important foundation for the Internet Protocols. Hence we briefly review the material. It is more deeply discussed in e.g. books on computer networks.

Leitungs- und Paketvermittlung

Es gibt zwei grundsätzliche Verfahren der Datenkommunikation:

- Im Internet werden Daten in **Datagrammen** verschickt: Einzelne abgepackte Daten, die unabhängig von einander zum Kommunikationspartner weitergereicht werden können, man spricht von **Paketvermittlung (= packet switching)**.
- Das Telefonnetz basiert auf **Leitungsvermittlung (=circuit switching)**: Beim Verbindungsaufbau wird eine Leitung zwischen den Kommunikationspartnern reserviert über die dann ein Bitstrom übertragen wird.

Leitungs- und Paketvermittlung

Leitungsvermittlung garantiert Bandbreite

- Verbindung wird nur aufgebaut, wenn auf allen beteiligten Systemen genügend Ressourcen zur Verfügung stehen
- Geeignet für Telephonie, Musik- und Video-Übertragung



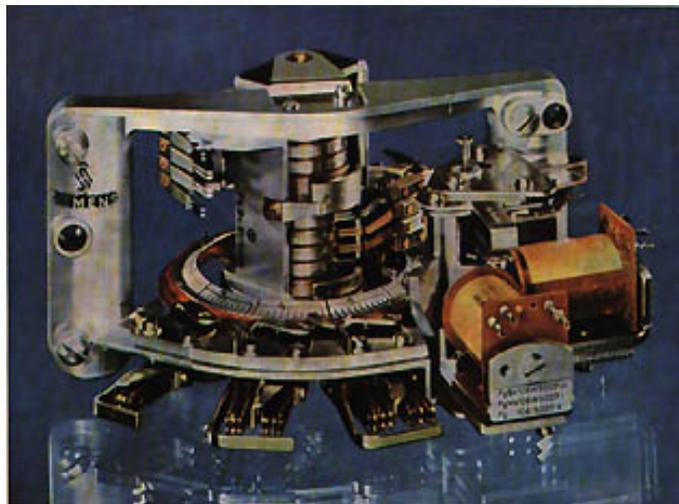
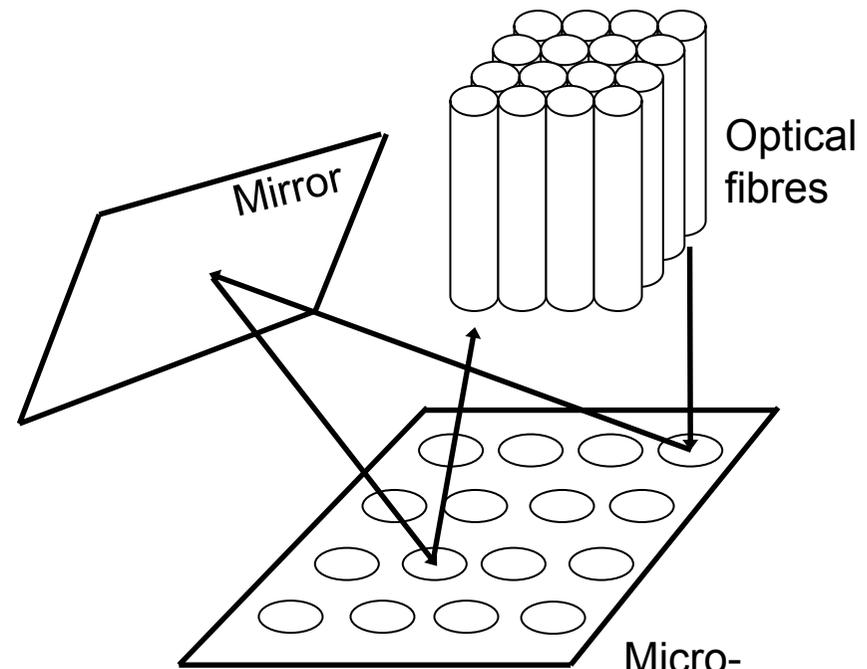
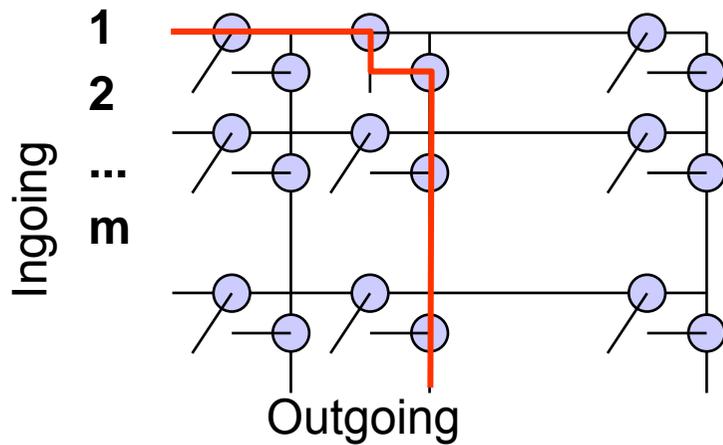
Paketvermittlung kann Bandbreite gewinnen durch statistisches Multiplexen

- Lücken in einem Datenstrom können durch Daten aus einem anderen Strom aufgefüllt werden, z.B. Web-Seite schnell übertragen, dann Pause zum Lesen

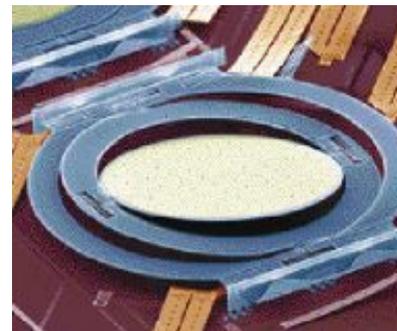


Moderne Kommunikationssysteme basieren auf Paketvermittlung. Kombination mit Ideen der Leitungsvermittlung garantieren z.B. Bandbreite.

Switching – Yesterday and today

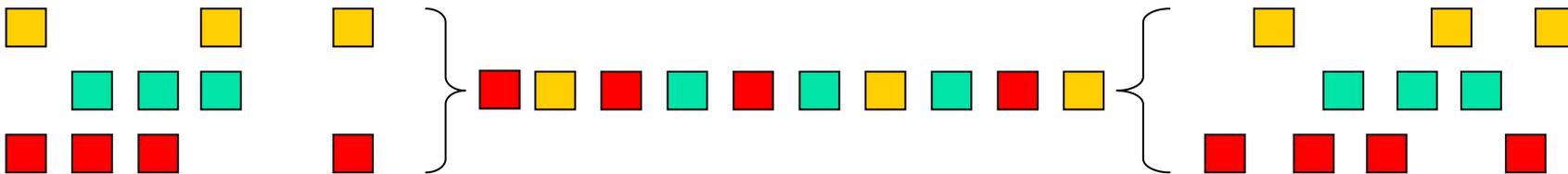
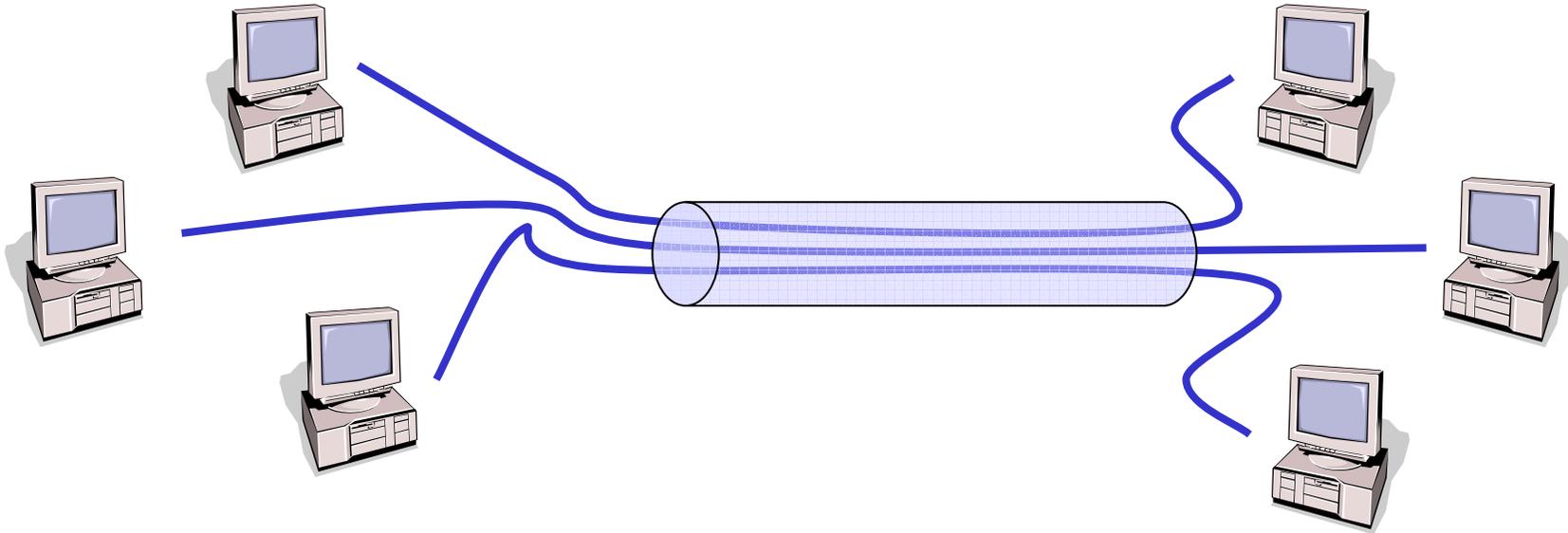


Telephone switching gear

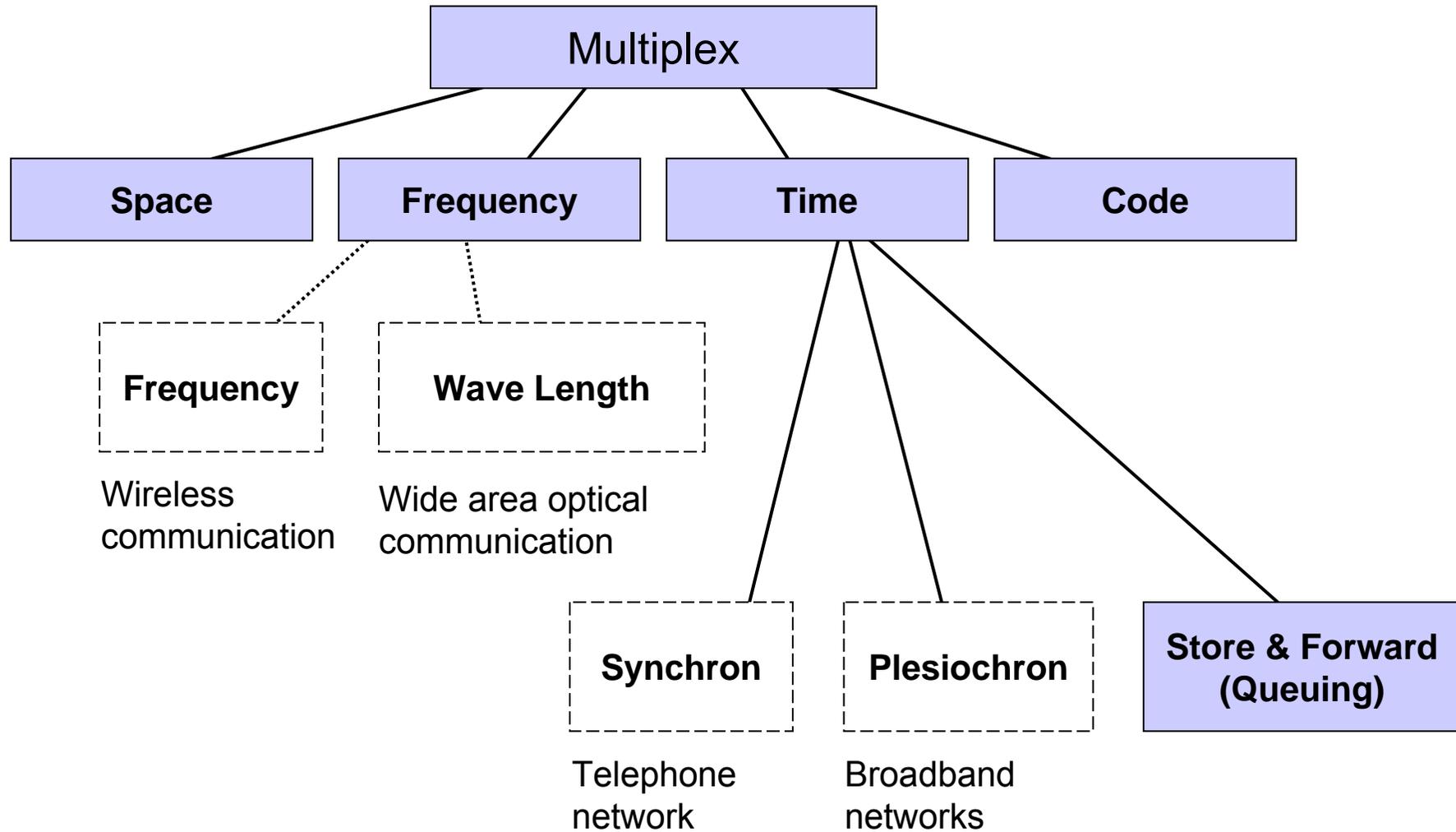


Micro-mechanical mirrors with two axis

Multiplexing Gain

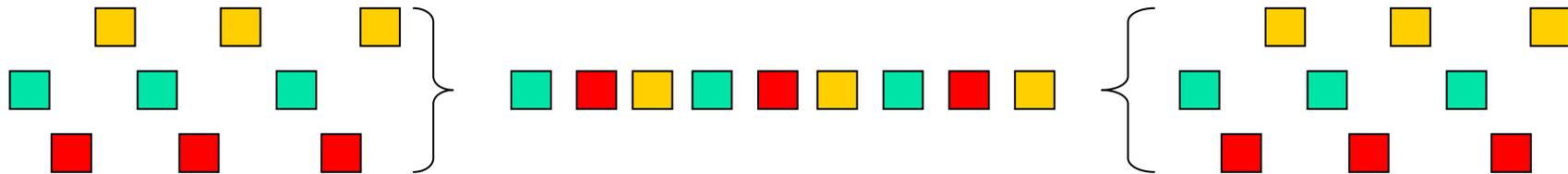


Multiplexing Techniques

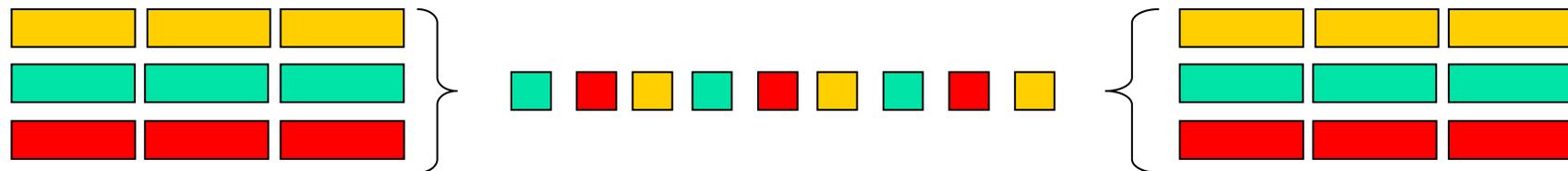


Multiplexing, Store & Forward, and Queuing

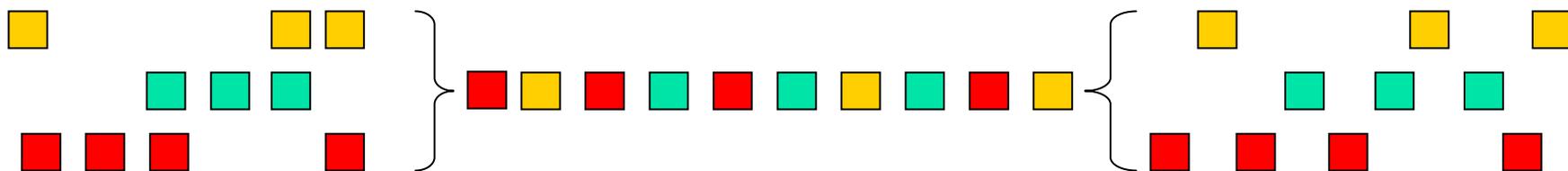
Multiplexing without store & forward:



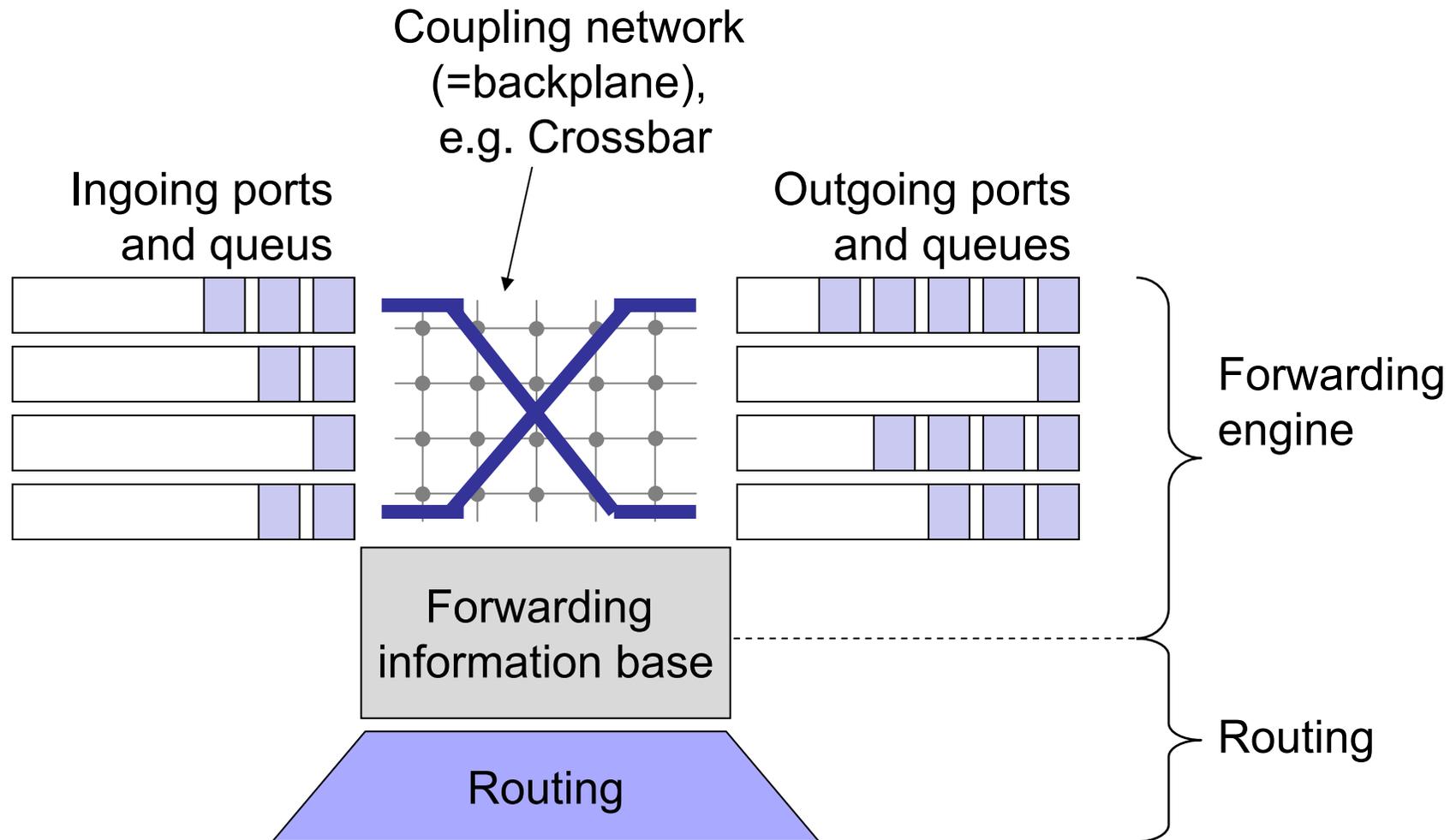
Multiplexing with store & forward, but without queuing:



Multiplexing with queuing:



Schematic Outline of a Switch (and Router)



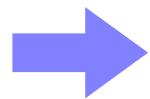
Sicherungsschicht

- Aufgabe von Schicht 2 ist die gegen Bit-Fehler gesicherte Übertragung von Datagrammen
 - Umwandlung eines Datagramms in einen Bitstrom und umgekehrt (**Rahmenbildung**)
 - Erkennen und ggf. Beheben von Fehlern, die in Schicht 1 entstehen (**Sicherung gegen Bitfehler**)
 - Handhabung des Zugriffs auf ein Medium, das sich mehrere Geräte teilen, z.B. gemeinsame Funkfrequenz (Media-Access-Control = **Medienzugangskontrolle**)

Wegen dieser Aufgaben wird Schicht 2 Sicherungsschicht oder auch Medienzugangskontrolle genannt (engl. Data Link Layer)

Rahmenbildung

- Die physikalische Schicht überträgt einen ungesicherten Bitstrom
- Die Netzwerkschicht eines paketvermittelten Kommunikationssystems arbeitet hingegen mit Datagrammen
- D.h. die Sicherungsschicht muss Datagramme in einen kontinuierlichen Bitstrom übersetzen ...
- ... und einen kontinuierlichen Bitstrom wieder korrekt in Datagramme zusammenfassen!

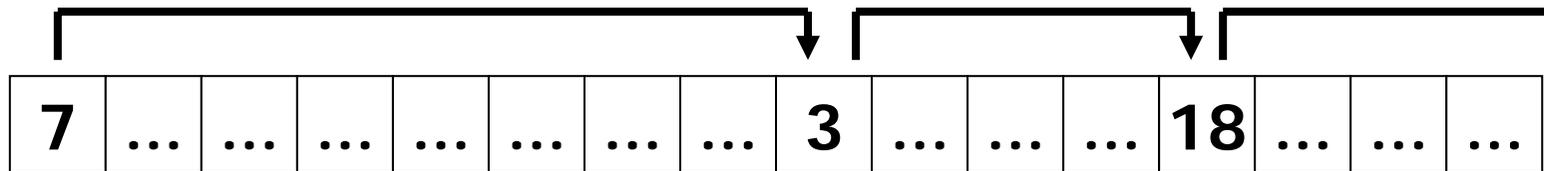


Sichere Erkennung der Rahmen-
grenzen, auch bei Übertragungs-
fehlern!

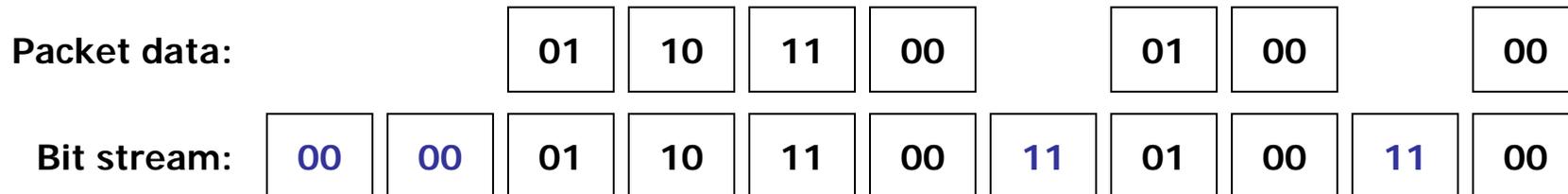


Framing – Two examples ...

Begin each frame by sending the frame's length:



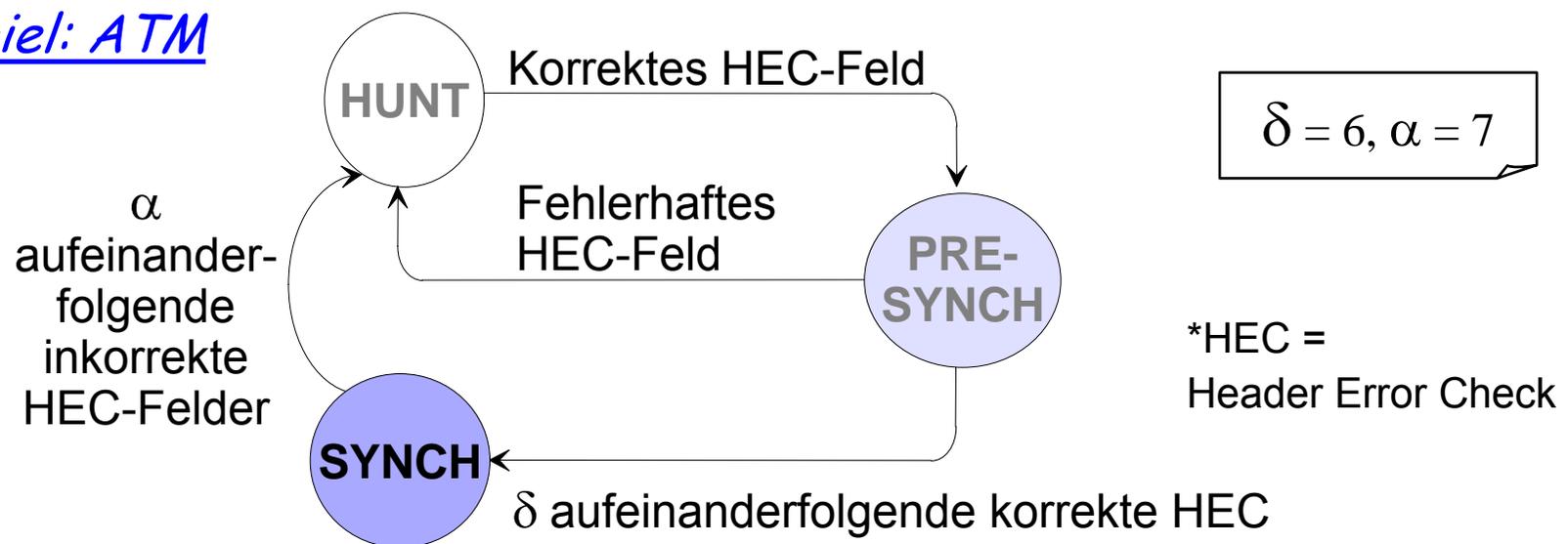
Send a special bit pattern at the beginning of the frames, and mask the pattern inside the frame:



Rahmenbildung mit Prüfsumme

- Rahmen werden gegen Übertragungsfehler im Bitstrom der Physikalischen Schicht gesichert.
- Wird der Bitstrom falsch in Rahmen zerlegt, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls ein Fehler gemeldet.
- Idee: Verschiebe den „Rahmen“ so lange Bit für Bit im Bitstrom, bis korrekte Rahmen erkannt werden.

Beispiel: ATM



Coderegeln-Verletzung, etc.

- Rahmengenrenzen können durch Zusatzinformationen aus der physikalischen Schicht markiert werden
- Beispiel:
 - Manchester-Codierung erzeugt Pegelwechsel in jedem Intervallschritt. Fehlt dieser kann diese Information als Rahmenbegrenzung interpretiert werden
 - Blockcodes: nicht alle Bitkombinationen codieren Daten, freie Codes als Rahmenbegrenzung nutzen
 - Rahmengenrenzen können durch eine Pause (d.h. keine Pegelwechsel für eine gewisse Zeit) angezeigt werden

Fehlertypen, Fehlerursachen

- Verfälschung bei der Bit-Übertragung: **Bitfehler**
 - Rauschen, Signaldämpfung, Störimpulse, etc.
 - Verlust der Bit-Synchronisation
- Verfälschung von Datagrammen: **Paketfehler**
 - Fehlerarten
 - Verlust/Duplizierung einer Dateneinheit
 - Empfang einer Phantom-Dateneinheit
 - Abweichung der Empfangsreihenfolge von Dateneinheiten
 - Fehlerursachen
 - Überlastung von Zwischensystemen
 - Unterschiedliche Wege durch das Netz
 - Verfrühte Datenwiederholung ...

Sicherungs-
schicht

Transport-
schicht

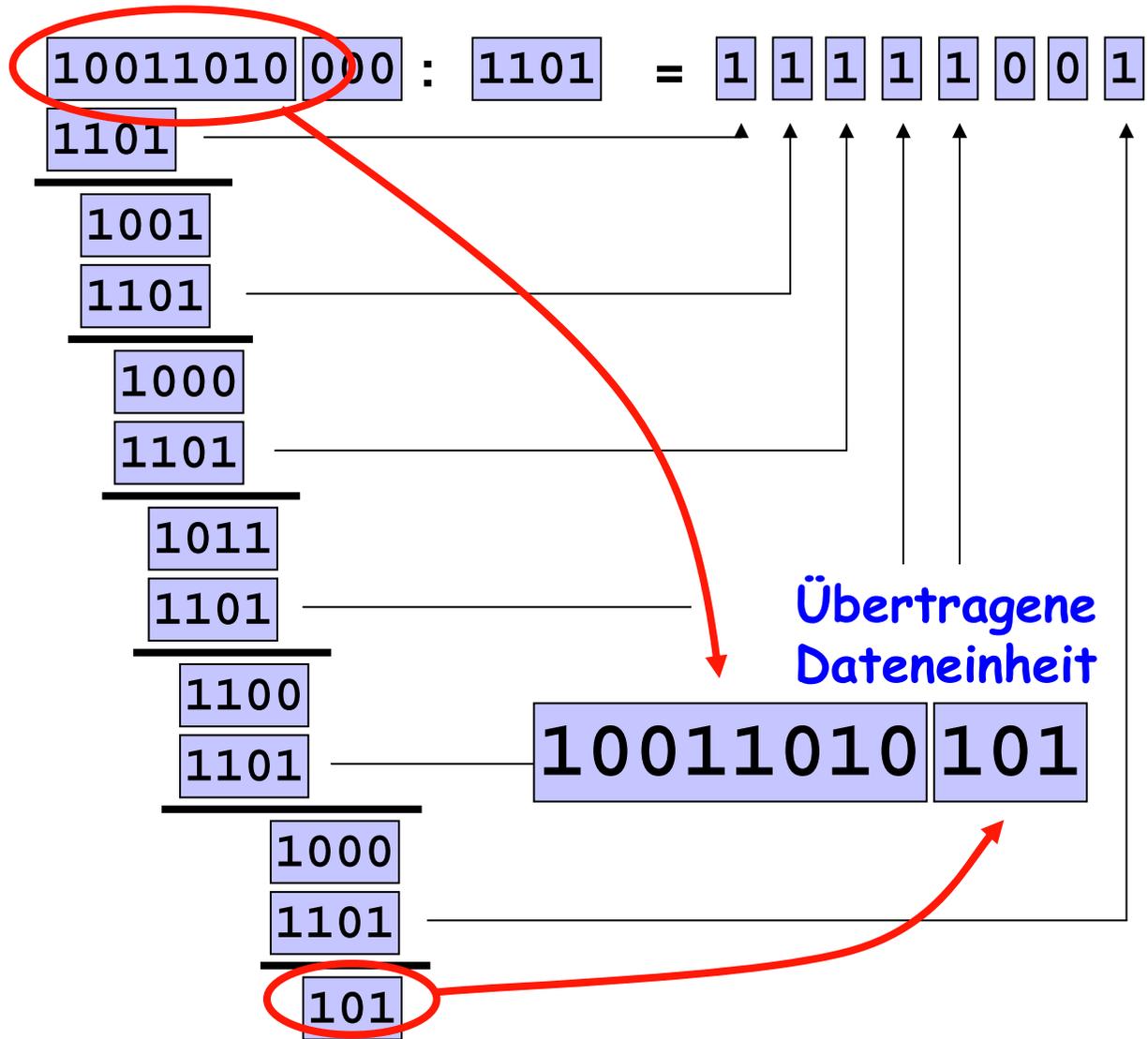
End-to-End Principle

What can be done in the terminal
should be done in the terminal.

- Detecting an (unrecoverable) error in the network would require the network to indicate this error.
- Not all errors can be detected in the network. Thus the terminal has to check things anyway.
- Failures are a good indicator for errors: If the service fails, something has gone wrong. Try to get the service elsewhere.
- Example: Ethernet – Check the frame for errors. If there is an error, just drop the entire frame.

- Die Sicherungsschicht behandelt Bitfehler:
 - **Einzelbitfehler**
 - Z.B. Rauschspitzen, die die Detektionsschwelle bei digitaler Signalerfassung überschreiten
 - **Bündelfehler**
 - Länger anhaltende Störung durch Überspannung, Starkstromschaltprozesse etc.
 - **Synchronisationsfehler**
 - Alle Bits bzw. Zeichen werden falsch erkannt

Cyclic Redundancy Code

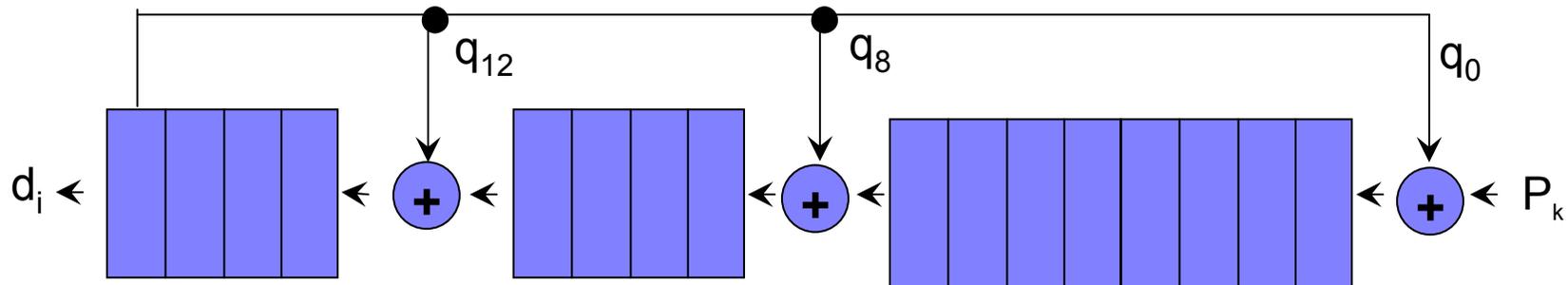


Leistungsfähigkeit von CRC

- International genormt sind u.a. folgende Prüfpolynome
 - CRC-12 $= x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$
 - CRC-16 $= x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
 - CRC-CCITT $= x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
 - CRC-32
 $= x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
- CRC-16 und CRC-CCITT entdecken
 - Alle Einzel- und Doppelfehler,
 - Alle Fehler ungerader Anzahl,
 - Alle Fehlerbursts mit der Länge bis einschl. 16,
 - 99,997 % aller Fehlerbursts mit der Länge 17 (gilt nicht für CRC-16),
 - 99,998 % aller Fehlerbursts mit der Länge 18 und mehr (gilt nicht für CRC-16).

CRC in Hardware

- Realisierung in Hardware
 - Benutzung von rückgekoppelten Schieberegistern.
 - CRC kann während des „Durchschiebens“ durch das Schieberegister berechnet werden.
- Prinzip
 - Dateneinheit durchläuft bitweise das Schieberegister.
 - Rückkopplung erfolgt an den Stellen, an denen das Generatorpolynom auf 1 gesetzt ist.
- Beispiel
 - Schieberegister mit Divisor $Q(x) = x^{16} + x^{12} + x^8 + 1$



Fehlerkontrolle bei Bitfehlern

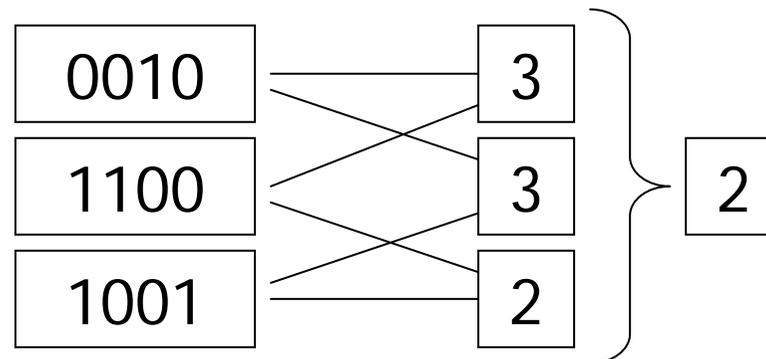
- Problem
 - Wie können *Bitfehler* beim Empfänger oder in netzinternen Zwischensystemen erkannt werden?
- Lösung
 - Verwendung von Codewörtern die sich untereinander hinreichend unterscheiden:
 - Beispiel Nato-Alphabet:

*Alpha Bravo Charlie Delta Echo Foxtrot Golf Hotel
India Juliet Kilo Lima Mike November Oscar Papa
Quebec Romeo Sierra Tango Uniform Victor
Whiskey Xray Yankee Zulu*

Hamming-Abstand

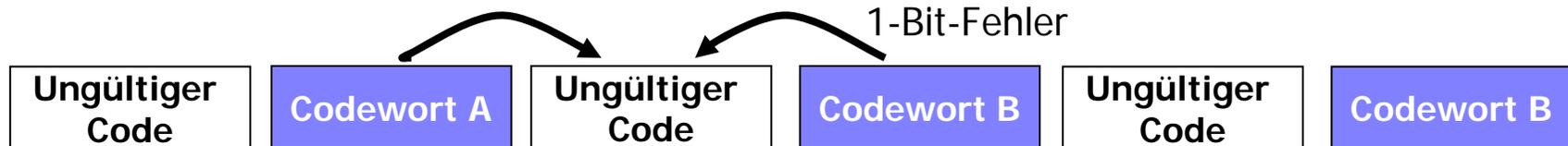
- Hamming-Abstand bezeichnet die Anzahl von Bitstellen an denen sich zwei Codewörter unterscheiden
- Der Hamming-Abstand eines Codes (=Menge aller Codewörter) ist dann der kleinste Hamming-Abstand aller Paare von Codewörtern
- **Beispiel:**

Hamming-
Abstand = 2

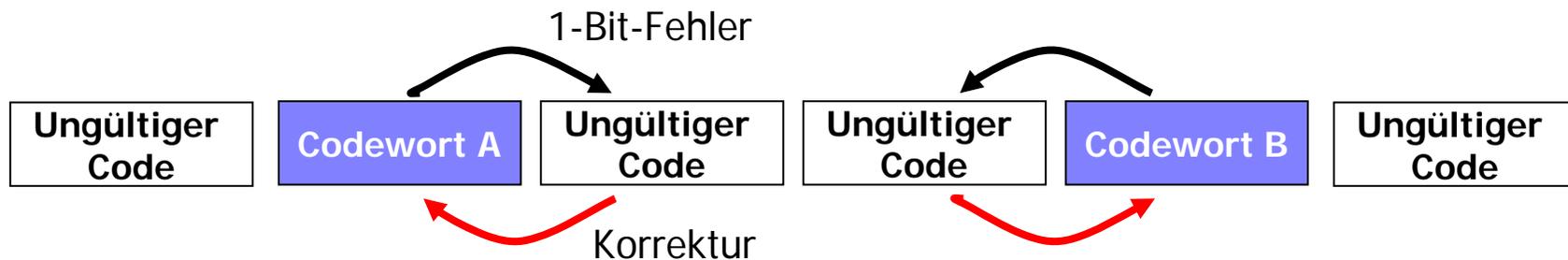


Hamming-Fehlerkontrolle

- Ein Code mit Abstand 1 kann keine Fehler erkennen.
- Ein Code mit Abstand 2 kann 1-Bit-Fehler erkennen:

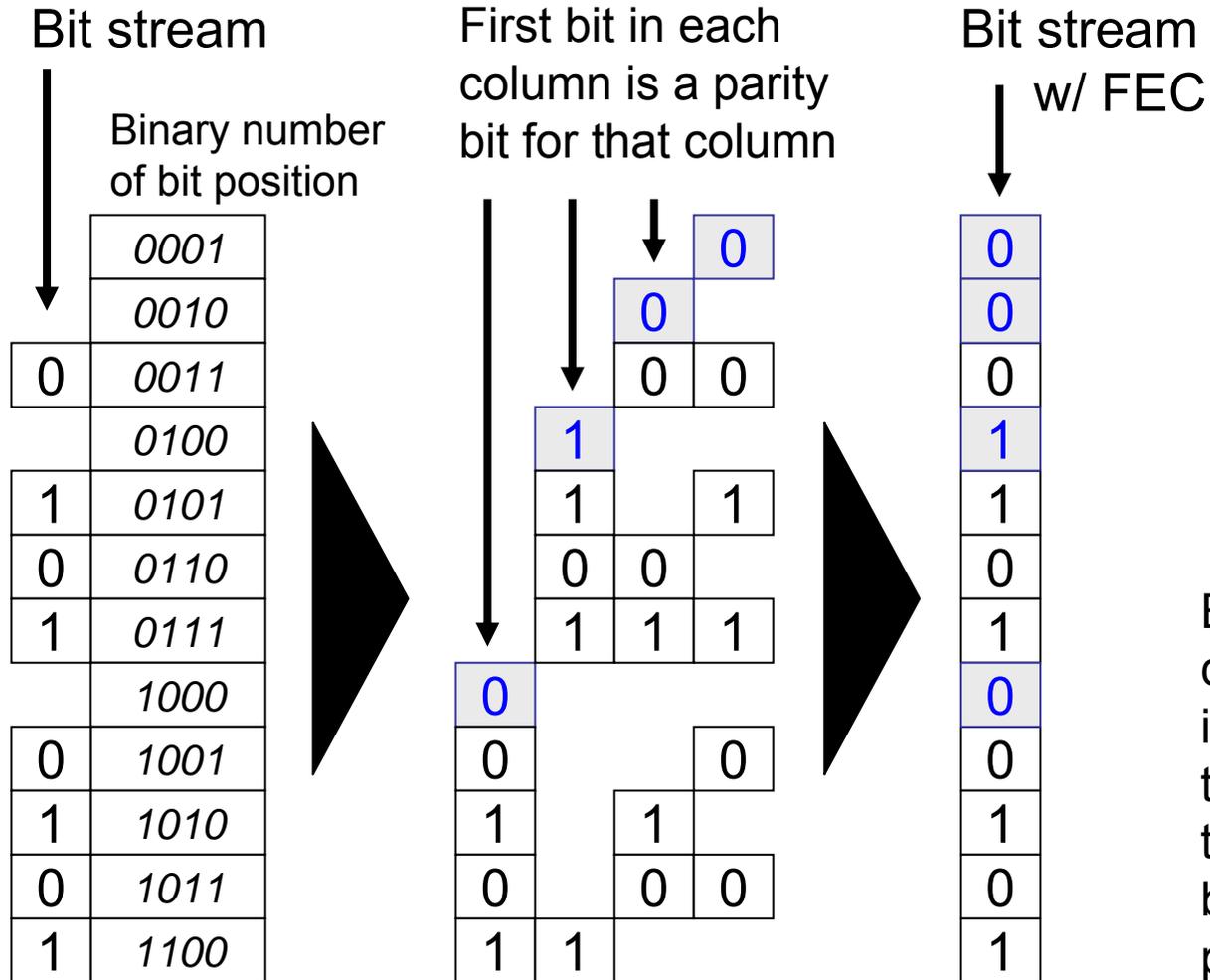


- Ein Code mit Abstand 3 kann 1-Bit-Fehler korrigieren:



- Allgemein gilt:
 - Ein Code mit Hamming-Abstand $e+1$ erkennt e -Bit-Fehler
 - Ein Code mit Hamming-Abstand $2e+1$ korrigiert e -Bit-Fehler
- Aber: Je größer der Hamming-Abstand eines Codes, desto weniger Bit können zum Transport der Nutzdaten verwendet werden
- Die nur für die Fehlerkontrolle hinzugefügten Bits heißen **Redundanzbits**.

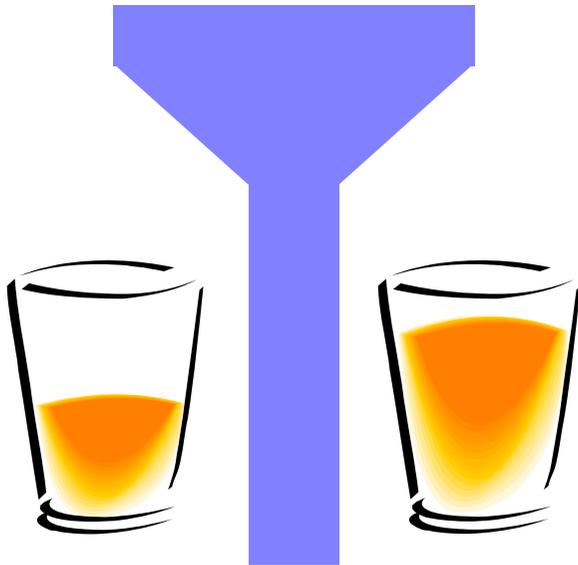
Hamming-Code (as FEC example)



Each bit error causes a mismatch in those parity bits that correspond to the 'one' bits in the binary number of the position of the error.

Forward Error Correction (the big picture)

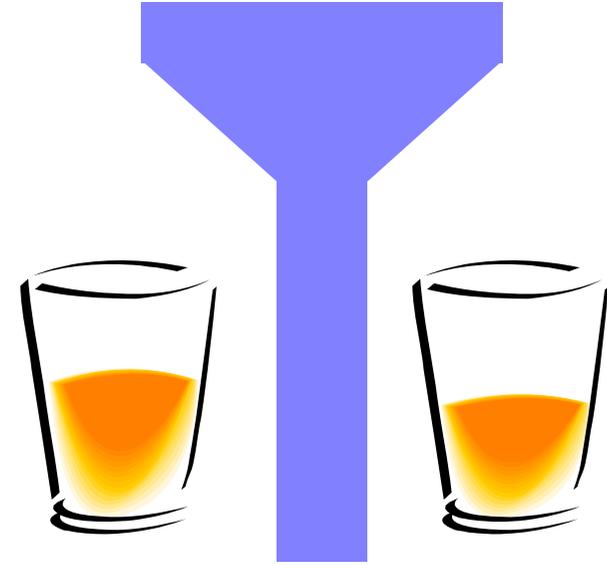
FEC encoder
adds redundancy



Channel drops
arbitrary bits
(units) of data

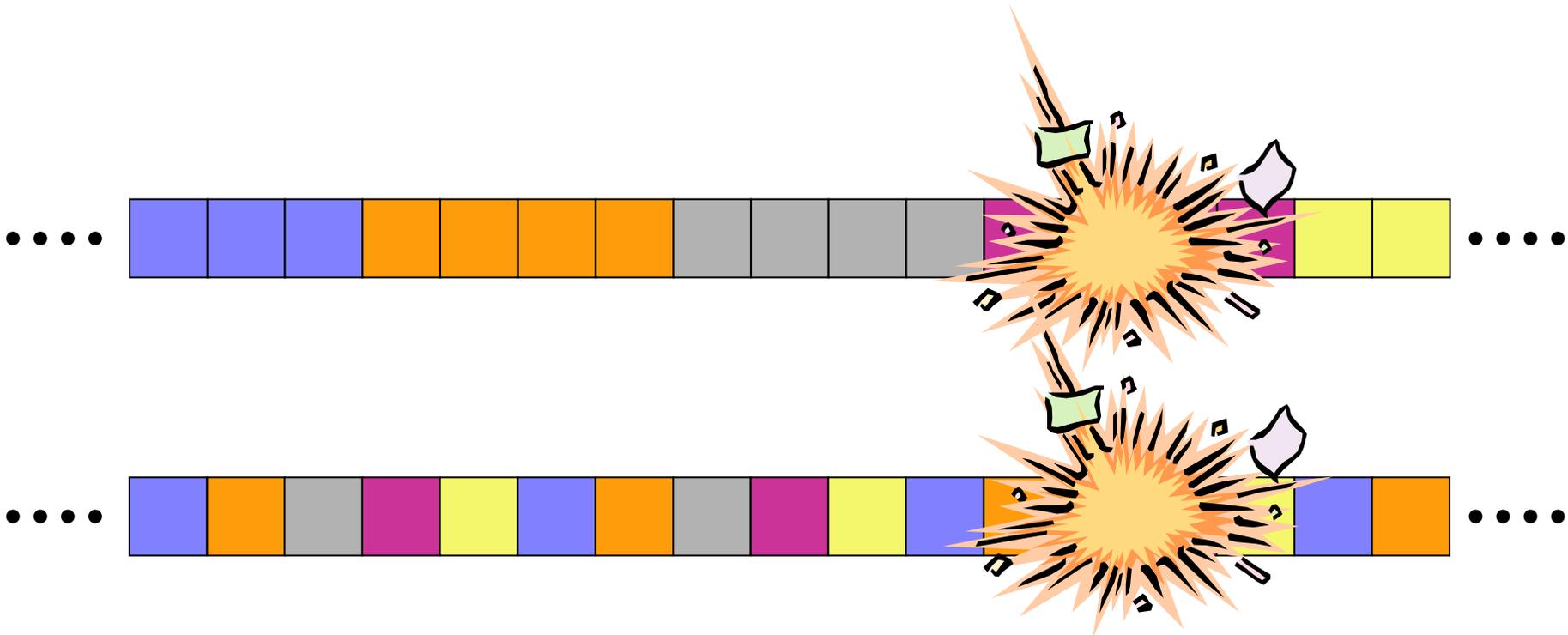


FEC decoder
reconstructs the
original data



Verschränkung

- Viele FEC-Codes arbeiten auf Blöcken fester Größe.
- Ein Bündelfehler könnte einen ganzen Block unbrauchbar machen.
- Lösung: Bündelfehler können durch Verschränkung in Einzelbitfehler umgewandelt werden.



- Der Data-Link-Layer des Internet-Protokollstapels enthält (auch) die Funktionalität der Sicherungsschicht.
- Bitfehler werden erkannt und unter Umständen korrigiert.
- Die Erkennung und Korrektur basiert dabei auf Redundanz, d.h. nicht alle Codes entsprechen korrekten Daten.
- Ein einfacher und zugleich leistungsfähiges Verfahren zur Fehlererkennung ist der Cyclic Redundancy Code.
- Hamming gab ein allgemeines Verfahren zur Konstruktion fehlererkennender und –korrigierender Codes.
- Bündelfehler können durch Verschränkung auf Einzelbitfehler reduziert werden.
- Nicht korrigierbare Fehler werden (oft) auf Paketfehler abgebildet.

Questions?



Thomas Fuhrmann

CS VIII - Network Architectures
Technical University Munich, Germany

IBDS System Architecture
University of Karlsruhe, Germany

fuhrmann@net.in.tum.de