
Rechnernetze II

SoSe 2025

Roland Wismüller
Betriebssysteme / verteilte Systeme
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 15. April 2025



Rechnernetze II

SoSe 2025

1 *Wide Area Networks (WANs)*



Inhalt

- ➔ Einführung
- ➔ Etwas Theorie zur Signalübertragung
- ➔ Telefonnetz
- ➔ Protokolle für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen: HDLC, PPP
- ➔ Protokolle für paketvermittelte WANs: *Frame Relay*, ATM
- ➔ *Last Mile*: ADSL, DOCSIS, GPON

- ➔ Tanenbaum, Kap. 1.5.2, 2.1, 2.5.1-2.5.4, 3.6
- ➔ Peterson, Kap. 2.3, 3.3
- ➔ Kurose, Ross, Kap. 5.8-5.10
- ➔ CCNA, Kap. 2, 3, 4, 6



Charakteristika von WANs

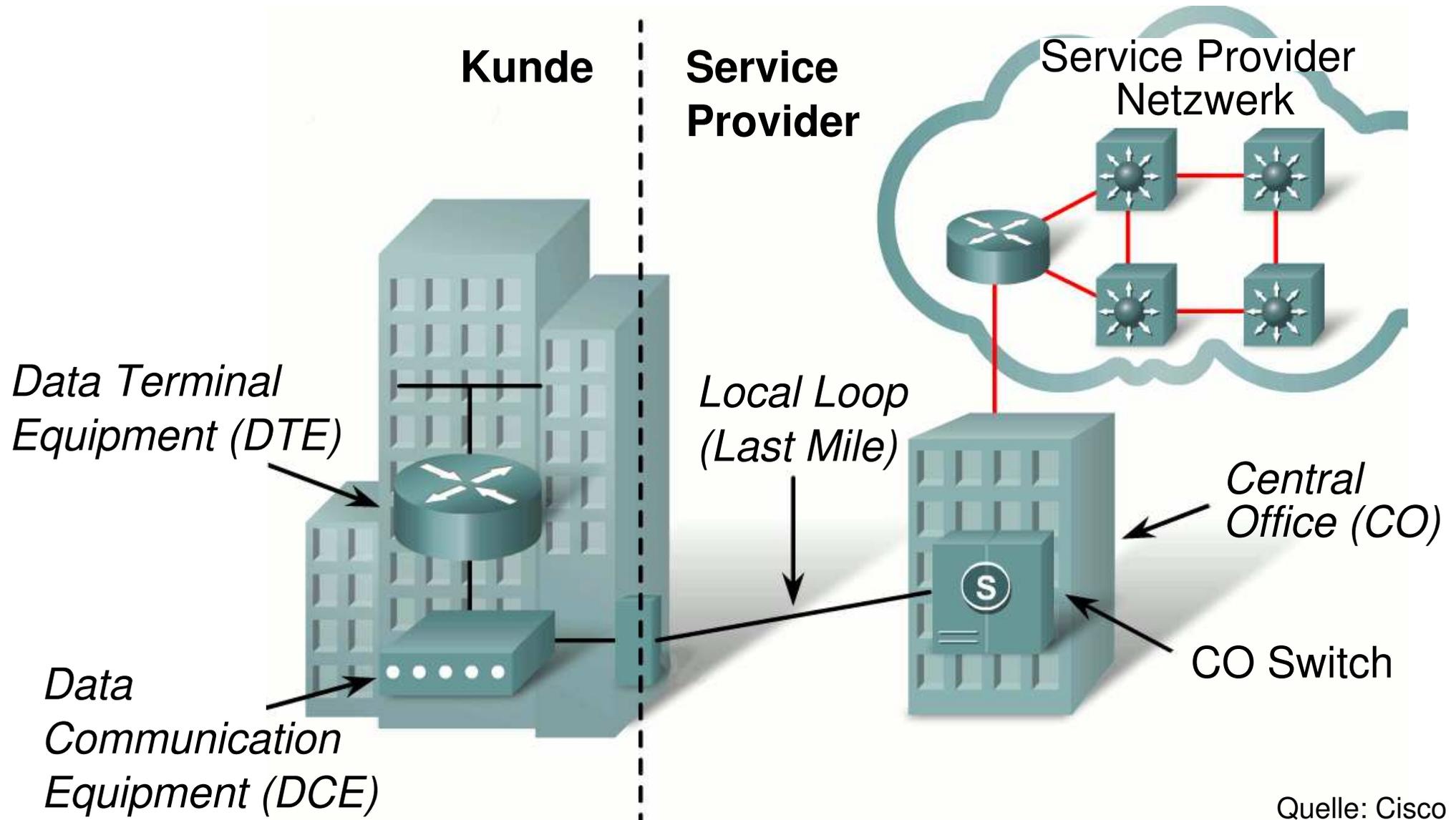
- ➔ Verbinden Geräte (typ. Router) über größere geographischer Entfernung
- ➔ Nutzen Dienste von Kabelbetreibern (*Carrier*)
 - ➔ z.B. Telefonanbieter, Kabelfernseh-Anbieter, ...
- ➔ Nutzen verschiedene Typen serieller Verbindungen

Einsatz von WANs

- ➔ Kommunikation zwischen Firmenstandorten
- ➔ Kommunikation zwischen verschiedenen Firmen
- ➔ Entfernter Zugang für Firmenmitarbeiter
- ➔ Internet-Zugang für Haushalte
- ➔ ...



Typische Anbindung an ein WAN



Quelle: Cisco



WAN Protokolle

- ➔ WANs decken nur die OSI-Schichten 1 und 2 ab
- ➔ Typische Protokolle der Bitübertragungsschicht:
 - ➔ EIA/TIA-232 (RS-232): bis zu 64 kb/s, kurze Distanz
 - ➔ EIA/TIA-449/530 (RS-422): bis 2 Mb/s, längere Distanzen
 - ➔ HSSI (*High-Speed Serial Interface*): bis 52 Mb/s
 - ➔ V.35: ITU-T Standard, bis 2,048 Mb/s
- ➔ Typische Protokolle der Sicherungsschicht:
 - ➔ HDLC, PPP: für dedizierte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
 - ➔ ISDN: leitungsvermittelt
 - ➔ Frame Relay, X.25, ATM: virtuelle Leitungsvermittlung



Optionen für WAN-Verbindungen

- ➔ Nutzung einer privaten Infrastruktur
 - ➔ dedizierte Verbindungen
 - ➔ eigene bzw. gemietete Leitungen (Standleitung)
 - ➔ vermittelte Verbindungen
 - ➔ leitungsvermittelt (Einwahlverbindung), z.B. ISDN
 - ➔ paketvermittelt (virtuelle Leitungsvermittlung), z.B. Frame Relay

- ➔ Nutzung des öffentlichen Internets
 - ➔ Zugang z.B. über DSL (☞ **1.6.1**) oder Kabelmodem
 - ➔ Einsatz von VPNs (☞ **4.1** und **RN_I, 5.9**)



Problem bei der Signalübertragung:

- ➔ Bandbreite der Leitungen ist begrenzt
 - ➔ höhere Frequenzen werden stark gedämpft
 - ➔ höchste nutzbare Frequenz abhängig von Leitungsart und -länge
 - ➔ Störungen durch Einstrahlung von aussen und Übersprechen
- ➔ Frage: Welche Übertragungsrate (bit/s) ist auf einer Leitung mit gegebener Grenzfrequenz (Bandbreite) möglich?
- ➔ Antworten liefern:
 - ➔ Nyquist-Theorem
 - ➔ Shannon'sches Theorem



Nyquist-Theorem (Abtasttheorem)

- ➔ Ein Signal mit Bandbreite H [Hz] kann mit $2 \cdot H$ (exakten) Abtastwerten pro Sekunde vollständig rekonstruiert werden
- ➔ Die maximal sinnvolle Abtastrate ist daher $2 \cdot H$ [1/s]
- ➔ Folgerung für Übertragung mit 1 Bit pro Abtastung:
 - ➔ maximale Datenübertragungsrate = $2 \cdot H$ [bit/s]
- ➔ Höhere Übertragungsraten sind möglich, wenn pro Abtastung mehr als 1 Bit gewonnen wird
 - ➔ im einfachsten Fall: unterscheide 2^n Spannungspegel für n Bits
 - ➔ Übertragungsrate ist dann begrenzt durch das **Rauschen** der Leitung



Shannon'sches Theorem

- ➔ Max. Datenübertragungsrate = $H \cdot \log_2(1 + S/N)$
- ➔ S/N = **Rauschabstand (Signal/Rauschverhältnis)**
 - ➔ (Leistungs-)Verhältnis von Signalstärke zu Rauschen
 - ➔ definiert maximale Genauigkeit der Abtastung

Zur Unterscheidung von Übertragungs- und Abtastrate

- ➔ Einheit **bit/s** für Übertragungsrate
- ➔ Einheit **Baud** (Zeichen/s) für Abtastrate



Gewinnung mehrerer Bits pro Abtastung

- ➔ Einfachster Fall: betrachte nur Spannungspegel (Amplitude)
 - ➔ z.B. Gigabit-Ethernet: 5 Spannungspegel (2 Bits + Redundanz)
- ➔ Vereinfachung durch Modulation von zwei Welleneigenschaften
 - ➔ Welleneigenschaften: Amplitude, Frequenz, Phase
- ➔ Typisch: Modulation von Amplitude und Phase
 - ➔ **QPSK** (*Quadrature Phase Shift Keying*)
 - ➔ **QAM** (*Quadrature Amplitude Modulation*)
- ➔ In der Praxis bis zu 15 Bit pro Abtastung möglich

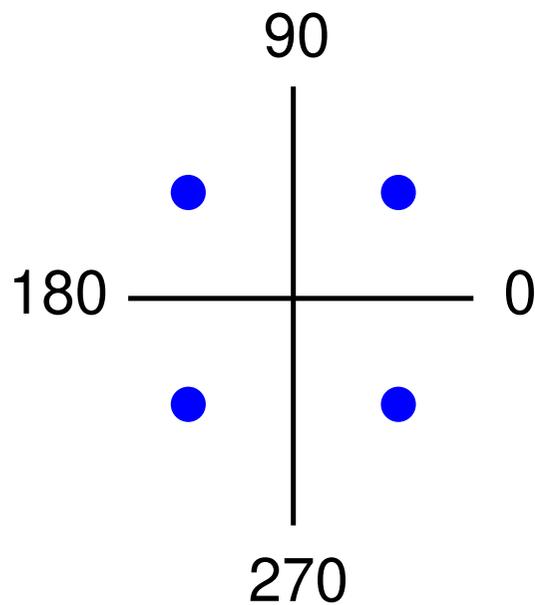


Modulationsverfahren QPSK und QAM

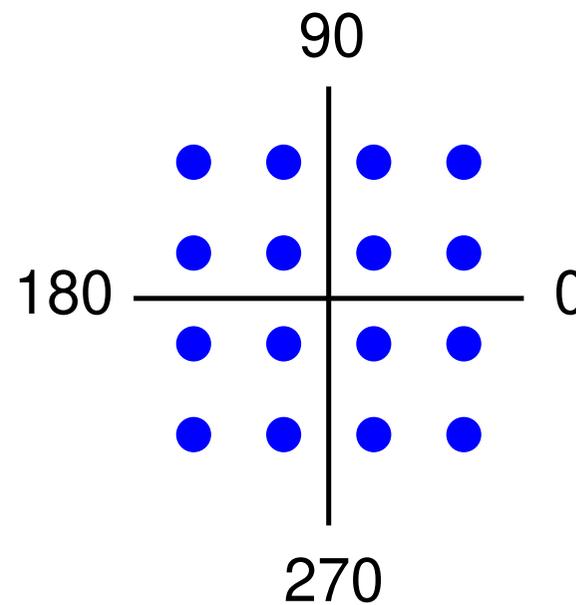
➔ Funktionsprinzip:

➔ jeweils n Bits bestimmen **Amplitude** und **Phase** des Signals

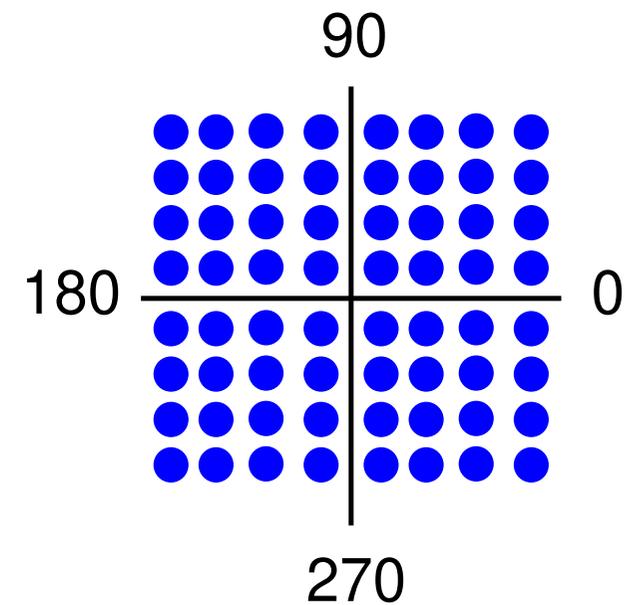
➔ Beispiele:



QPSK (2 Bit)



16-QAM (4 Bit)



64-QAM (6 Bit)

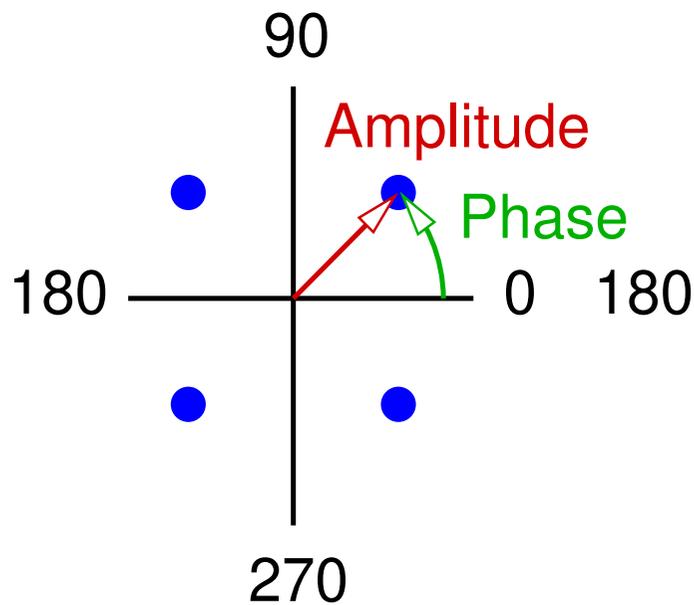


Modulationsverfahren QPSK und QAM

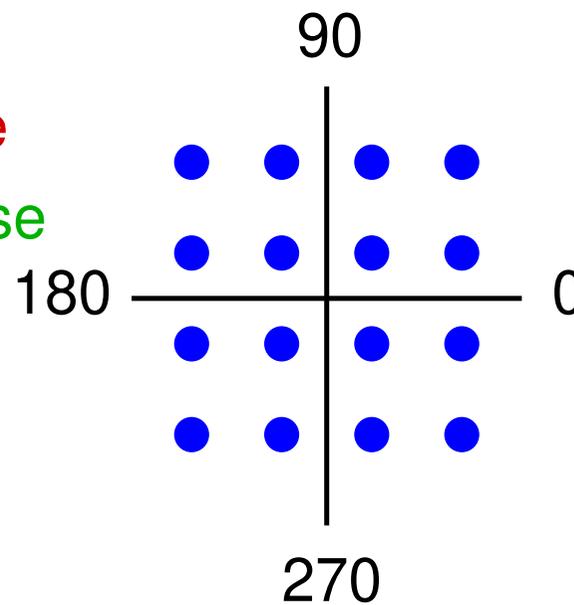
➔ Funktionsprinzip:

➔ jeweils n Bits bestimmen **Amplitude** und **Phase** des Signals

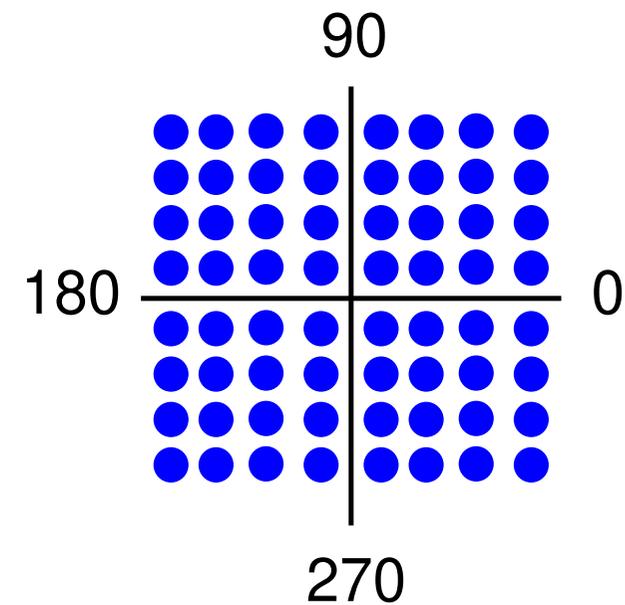
➔ Beispiele:



QPSK (2 Bit)



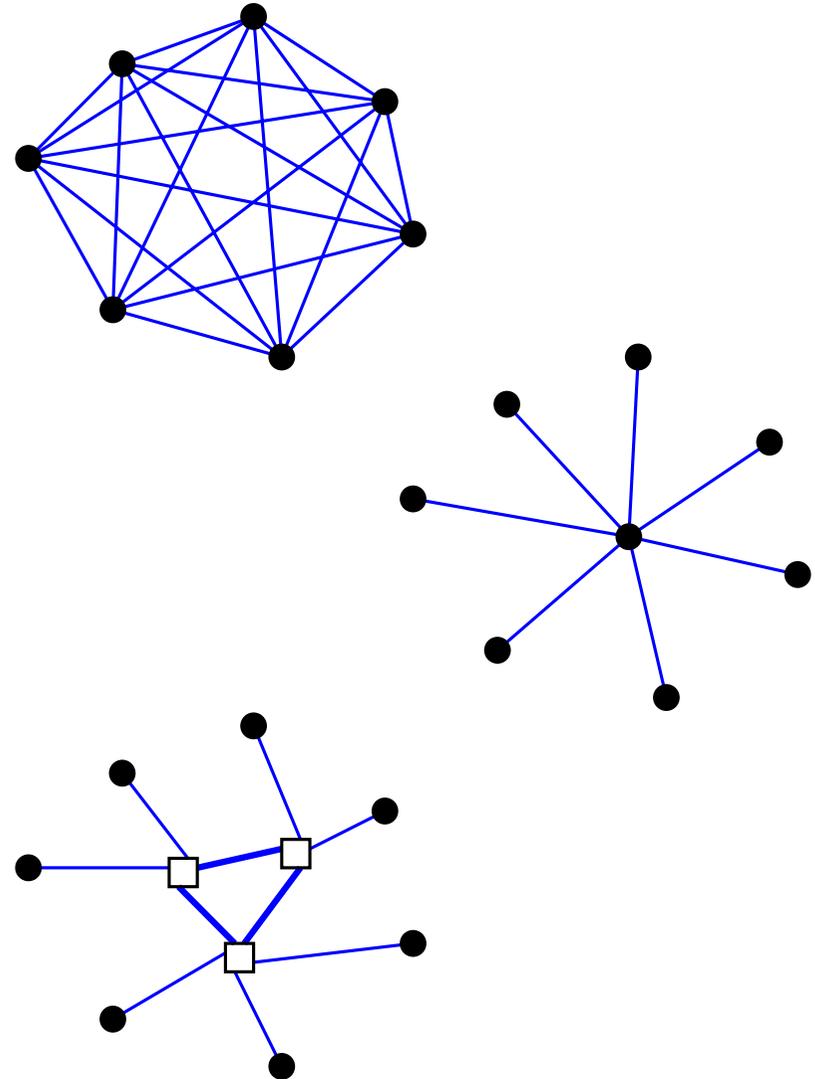
16-QAM (4 Bit)



64-QAM (6 Bit)

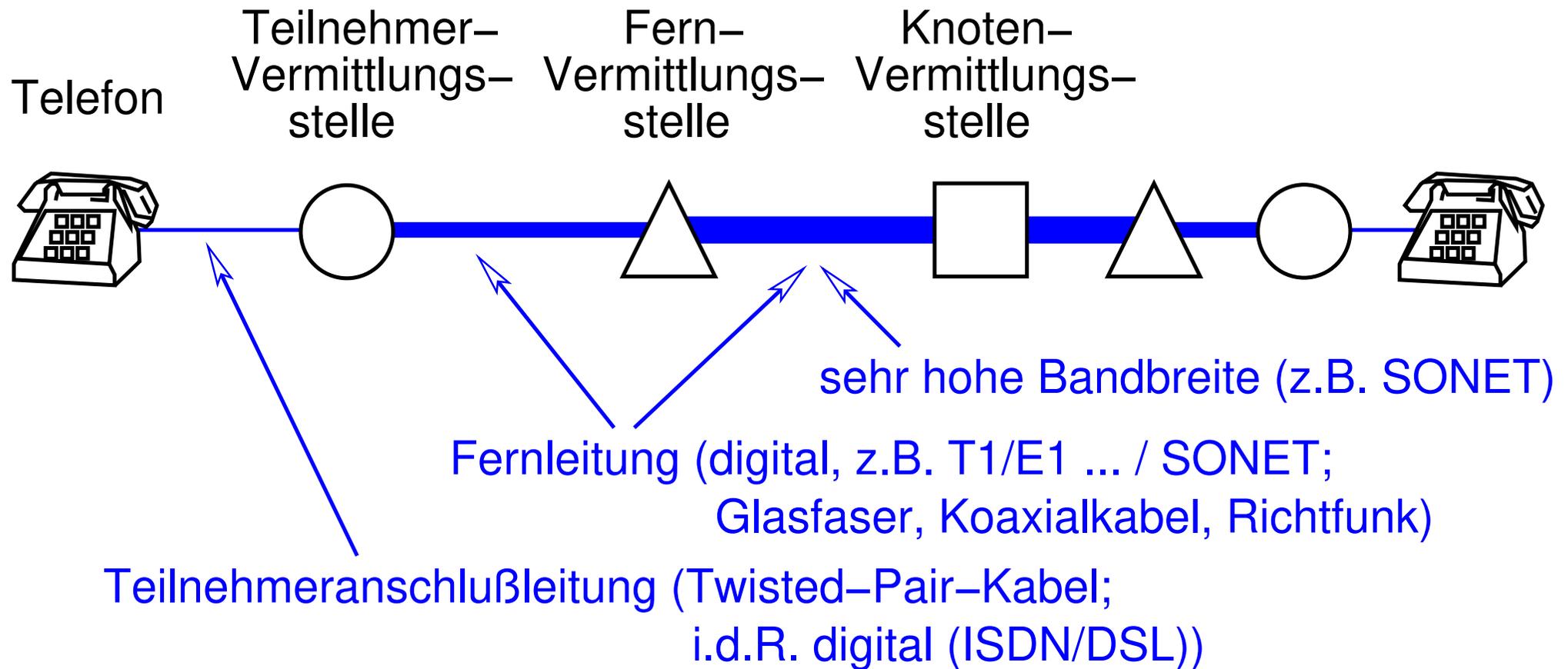
Struktur des Telefonnetzes:

- ➔ Zu Beginn: vollständige Vernetzung
 - ➔ mit wachsender Teilnehmerzahl unpraktikabel
- ➔ Bell (1878): erstes Vermittlungsamt
 - ➔ Stern-Topologie
- ➔ Danach: Vernetzung der Vermittlungen
 - ➔ Hierarchie von Vermittlungen





Typischer Leitungsweg bei mittlerer Entfernung:



➔ Sprachübertragung direkt digital (ISDN) oder über *Voice over IP* (VoIP, **7.2**) und DSL



Digitale Übertragung und Multiplexing

- ➔ PCM (*Pulse Code Modulation*): Sprachsignale werden im *Codec* digitalisiert:
 - ➔ 8000 Abtastungen/s (alle $125 \mu s$)
 - ➔ 7 oder 8 Bit pro Abtastung
- ➔ Zusätzlich Übertragung von Steuerinformation (Signalisierung)
- ➔ Multiplexing mehrerer Gespräche auf eine Leitung
 - ➔ Zeitmultiplexing: byte- oder bitweise
- ➔ Beispiele: T1/E1, SONET



SONET (*Synchronous Optical Network*)

- ➔ Vorherrschender Standard für Fernübertragung auf Glasfaser
- ➔ Wichtige Eigenschaft: synchrones Netzwerk
 - ➔ Takte aller Teilnehmer sind genau synchronisiert
 - ➔ Daten kommen beim Empfänger in dem Zeitabstand an, in dem Sender sie geschickt hat
- ➔ Leitungsvermittelt
- ➔ Steuer- und Verwaltungsinformation werden in den Datenstrom eingestreut
- ➔ Im Folgenden: Framing, Multiplexing

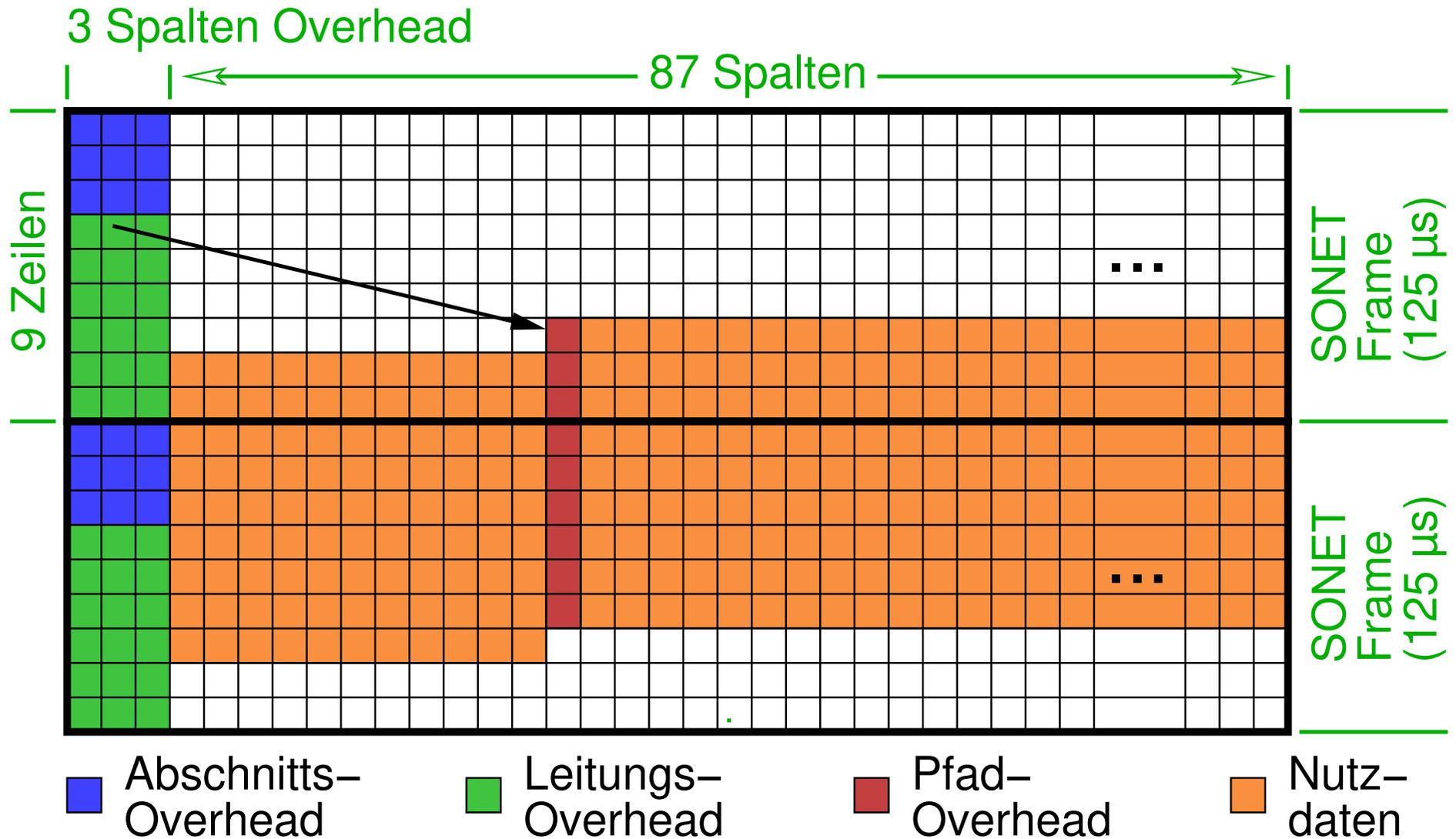


SONET Framing (STS-1: niedrigste Datenrate)

- ➔ Feste Framegröße: 810 Byte
- ➔ Alle $125 \mu s$ Übertragung eines Frames
 - ➔ permanent, d.h. ggf. Frames ohne Nutzdaten
 - ➔ damit: 51,84 MBit/s Datenrate
- ➔ Kein Bit- oder Bytestuffing
- ➔ Erkennung des Frame-Anfangs durch 2-Byte-Muster
 - ➔ wenn dieses alle $125 \mu s$ (d.h. alle 810 Bytes) auftaucht, ist Empfänger synchronisiert
- ➔ Nutzdaten können an beliebiger Stelle des Frames beginnen

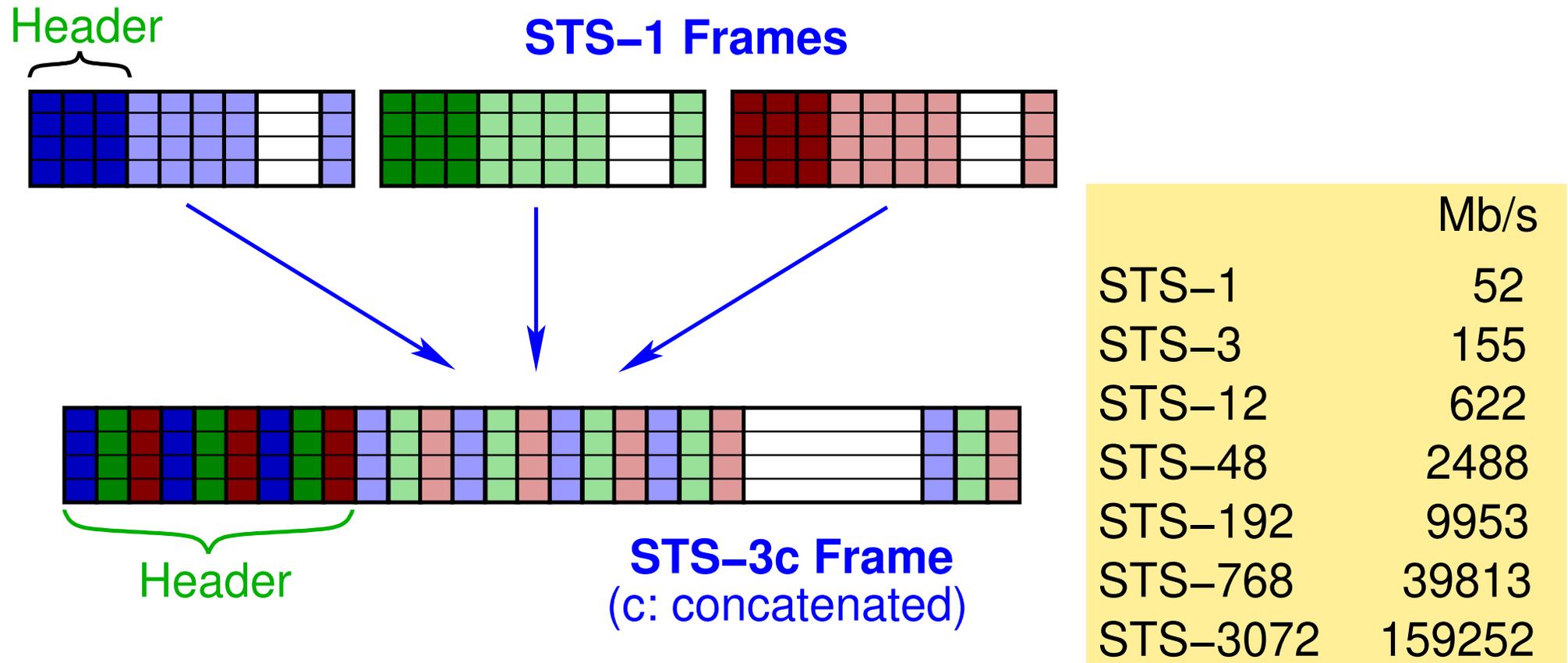


SONET: Aufbau eines STS-1 Frames





SONET: spaltenweises (= byteweises) Multiplexing



➔ STS-x: elektrische, OC-x optische Übertragung

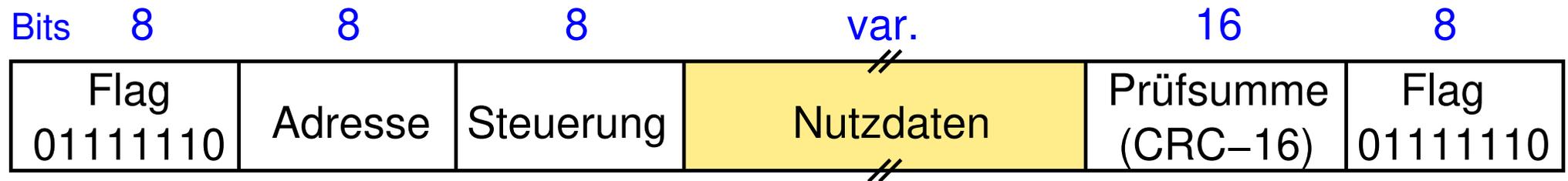


1.4.1 HDLC: *High Level Data-Link Control*

- ➔ Weit verbreitetes Schicht-2-Protokoll (ISO/IEC 13239:2002)
 - ➔ viele Variationen/Ableger: z.B. LAP (Teil von X.25)
- ➔ Eigenschaften:
 - ➔ bitorientert, Framing mit Bitstuffing
 - ➔ zuverlässige Übertragung (Übertragungsfehler, Reihenfolge)
 - ➔ *Sliding-Window*-Algorithmus mit Fenstergröße 7
 - ➔ akkumulative und negative ACKs
 - ➔ Flußkontrolle
- ➔ Drei verschiedene Frame-Typen:
 - ➔ *I-Frame*: zur Datenübertragung, mit Sequenznummer
 - ➔ *S-Frame*: Steuerung des Datenflusses
 - ➔ *U-Frame*: Steuer- und Datenframes ohne Sequenznummer



Frame-Format



- ➔ **Adresse** zur Unterstützung von Punkt-zu-Multipunkt-Verbindungen
- ➔ **Steuerung**: enthält je nach Frame-Typ
 - ➔ Sequenz-Nummer des Frames
 - ➔ Sequenz-Nummer für (negative) Bestätigung
 - ➔ Kommando
- ➔ Der Datenteil kann beliebig lang sein
- ➔ Erweiterung (Cisco):
 - ➔ 16-Bit Feld nach Steuerung: übertragenes Schicht-3-Protokoll

Rechnernetze II

SoSe 2025

15.04.2025

Roland Wismüller
Betriebssysteme / verteilte Systeme
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 15. April 2025



- ➔ KI Chat-Bot zur Vorlesung, mit Verlinkung auf Vorlesungsvideos
- ➔ Erreichbar unter <https://lecturelinker.bshef12.bs.informatik.uni-siegen.de>
 - ➔ nur aus dem Uni-Netz
 - ➔ Anmeldung mit ZIMT-Zugangsdaten über CAS erforderlich
- ➔ Einschreibelink für RN-2: <https://lecturelinker.bshef12.bs.informatik.uni-siegen.de/dashboard?passphrase=panicky-low-twilight>
- ➔ Link auch im Moodle-Kurs



1.4.2 PPP: Punkt-zu-Punkt Protokoll

- ➔ Protokoll der Sicherungsschicht im Internet
 - ➔ für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
 - ➔ z.B. Modemverbindung, Standleitung
 - ➔ oft auch PPP über Ethernet (PPPoE)
- ➔ Anforderungen / Aufgaben:
 - ➔ Unterstützung verschiedener Leitungsarten
 - ➔ seriell, parallel, synchron, asynchron, ...
 - ➔ Framing und Fehlererkennung
 - ➔ Unterstützung verschiedener Vermittlungsschicht-Protokolle
 - ➔ Aushandeln von Adressen der Vermittlungsschicht
 - ➔ Authentifizierung
- ➔ Nicht: Fehlerbehandlung, Reihenfolgeerhaltung, Flußkontrolle



PPP Frame-Format

Bytes	1	1	1	1 oder 2	var.	2 oder 4	1
	Flag	Adresse	Steuerung	Protokoll	Nutzdaten	Prüfsumme	Flag
	01111110	11111111	00000011				01111110

- ➔ Basis: HDLC Frame-Format
- ➔ Eindeutige Framekennzeichnung durch *Byte-* oder *Bit-Stuffing*
- ➔ **Adresse** und **Steuerung** ungenutzt / für Erweiterungen
- ➔ **Protokoll** zum Demultiplexen empfangener Frames
 - ➔ an höhere Protokolle, z.B. IP, AppleTalk, DECnet, ...
 - ➔ an Teilprotokolle von PPP, z.B. LCP, NCP
- ➔ Max. Länge des Datenteils kann bei Verbindungsaufbau ausgehandelt werden (Default: 1500 Bytes)
- ➔ **Prüfsumme**: CRC, Länge wird ausgehandelt



LCP *Link Control Protocol*

- ➔ Für Initialisierung, „Wartung“ und Abschalten der Leitung
- ➔ Verbindungsaufbau:
 - ➔ Aushandeln der Leitungsoptionen
 - ➔ Initiator schlägt vor (*configure request*)
 - ➔ Partner nimmt an (*ack*) oder lehnt ab (*nak, reject*)
 - ➔ ggf. Authentifizierung
 - ➔ danach: Konfiguration der Vermittlungsschicht durch NCP
- ➔ Weitere spezielle LCP Frames für
 - ➔ Prüfen der Verbindung (*echo request / reply*)
 - ➔ Trennen der Verbindung (*terminate request / ack*)



Authentifizierung

- ➔ Optional, Aushandlung bei Verbindungsaufbau
 - ➔ einseitige und wechselseitige Authentifizierung möglich
- ➔ PAP (Password Authentication Protocol)
 - ➔ einmalige Übertragung von Nutzernamen und Passwort
 - ➔ im Klartext!
- ➔ CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol)
 - ➔ 3-Wege Handshake: *Challenge*, *Response*, (N)ACK
 - ➔ *Response* ist Hashwert über Passwort und *Challenge*
 - ➔ Authentifizierung kann jederzeit wiederholt werden
- ➔ Keine Verschlüsselung bzw. Authentifizierung der Daten!



NCP *Network Control Protocol*

- ➔ Familie von Protokollen
 - ➔ spezifisch für jeweiliges Vermittlungsschicht-Protokoll
- ➔ NCP erst nach Verbindungsaufbau mit LCP verwendbar
- ➔ spezielles NCP für IP: IPCP (*IP Control Protocol*)
 - ➔ Ausgehandelt werden können u.a.:
 - ➔ IP-Adresse
 - ➔ DNS-Server
 - ➔ TCP/IP-Header-Kompression
- ➔ Nach Konfiguration mit NCP: PPP durch Vermittlungsschicht-Protokoll nutzbar

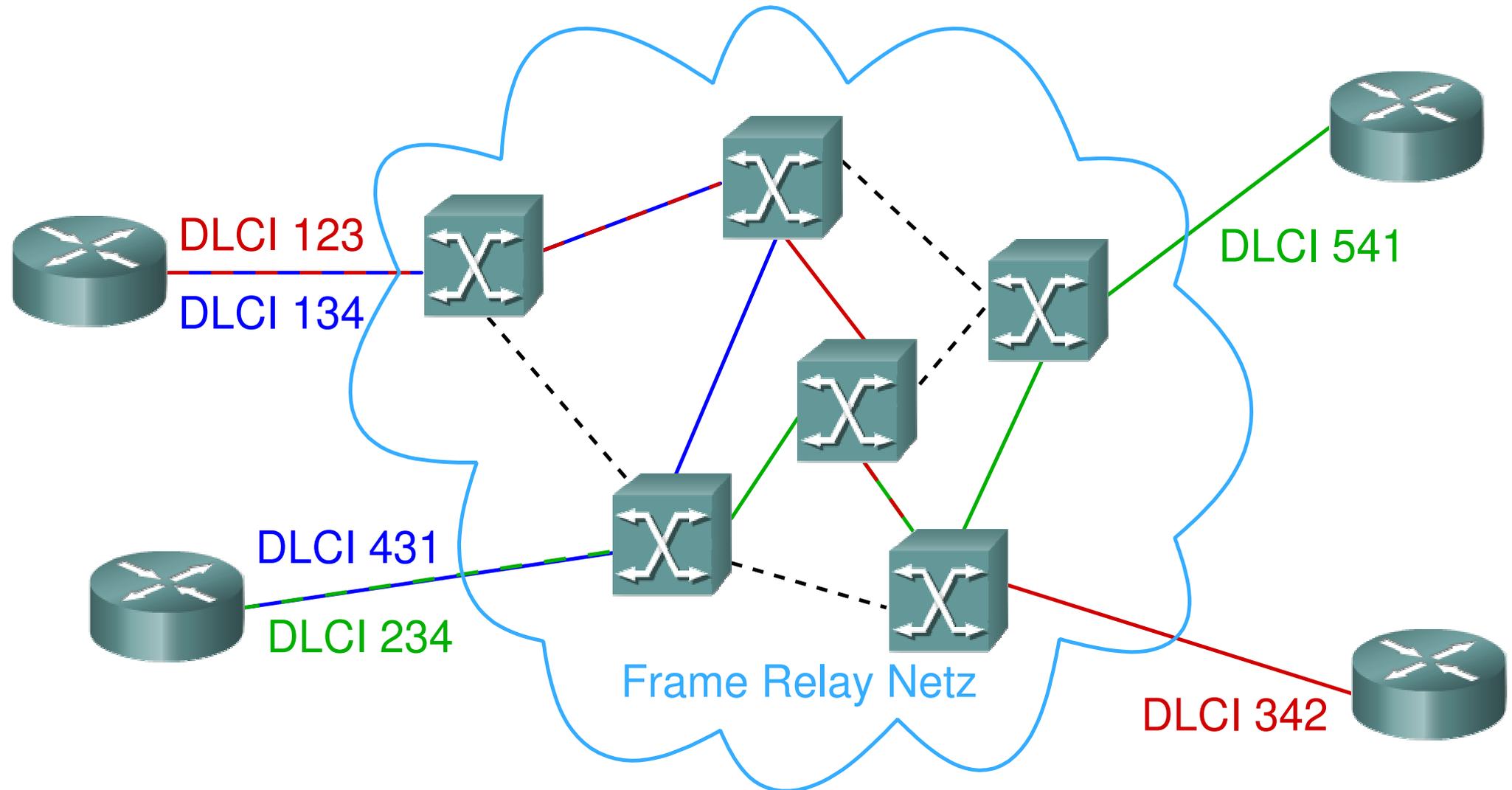


1.5.1 *Frame Relay*

- ➔ Paketvermittelte Übertragungstechnik für virtuelle Verbindungen
- ➔ Wurde von vielen Netzanbietern als Alternative zu Standleitungen angeboten
- ➔ Basiert auf dem älteren X.25-Protokoll, ursprünglich für ISDN entwickelt
- ➔ Eigenschaften:
 - ➔ unzuverlässig, keine Flußkontrolle, einfache Überlastkontrolle
 - ➔ *Switched* und *Permanent Virtual Circuits* (SVC, PVC)
 - ➔ nur lokal gültige Verbindungs-Identifikatoren
 - ➔ DLCI: *Data Link Connection Id*



Virtuelle Verbindungen



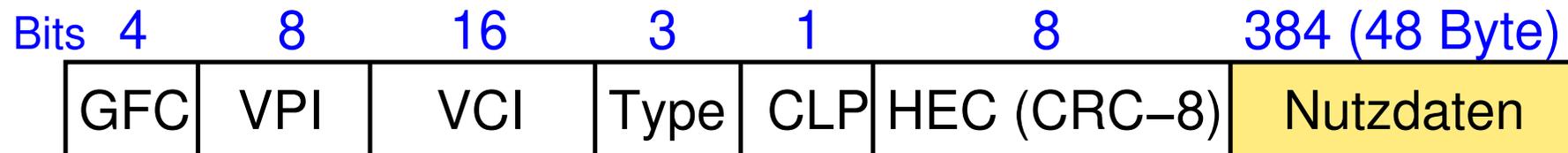


1.5.2 ATM, *Asynchronous Transfer Mode*

- ➔ Entwickelt Anfang der 90'er Jahre
 - ➔ Ziel: Eignung für alle Arten digitaler Kommunikation (Telefonie, Video, Computernetze, ...)
- ➔ Verbindungsorientiert und paketvermittelt
 - ➔ Aufbau virtueller Verbindungen
- ➔ Zellen ($\hat{=}$ Frames) fester Länge
 - ➔ 53 Byte: 5 Byte Header, 48 Byte Nutzdaten
 - ➔ einfaches Forwarding in Hardware
 - ➔ *Quality-of-Service* Garantien vereinfacht
 - ➔ Leitung durch Zelle nur kurz belegt



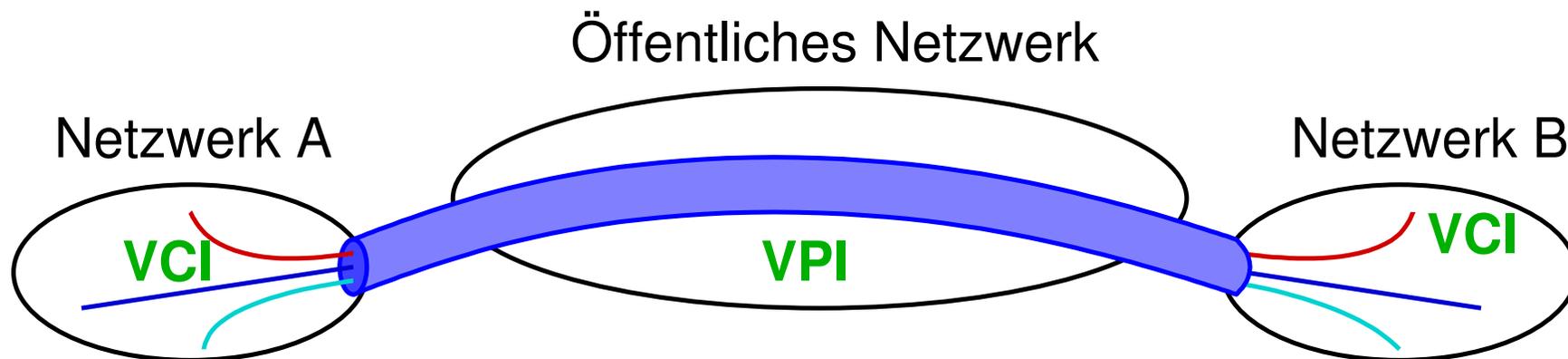
Zellenformat



- ➔ **GFC:** *Generic Flow Control* (meist ungenutzt)
- ➔ **VPI:** *Virtual Path Identifier*, **VCI:** *Virtual Circuit Identifier*
 - ➔ hierarchischer Bezeichner für virtuelle Verbindung
- ➔ **Type:** Steuer-/Benutzerdaten; bei Benutzerdaten: je ein Bit für Überlastkontrolle und Signalisierung
- ➔ **CLP:** *Cell Loss Priority* im Überlastfall
- ➔ **HEC:** *Header Error Check:* CRC-8 des Headers

VPI und VCI

- ➔ VPI zum Aufbau einer „Leitung“ durch das öffentliche Netz
- ➔ Innerhalb dieser Leitung werden durch VCI mehrere Verbindungen gemultiplext
- ➔ VCI zur Identifikation innerhalb der lokalen Netze



- ➔ Vgl. hierarchischer Aufbau von IP-Adressen

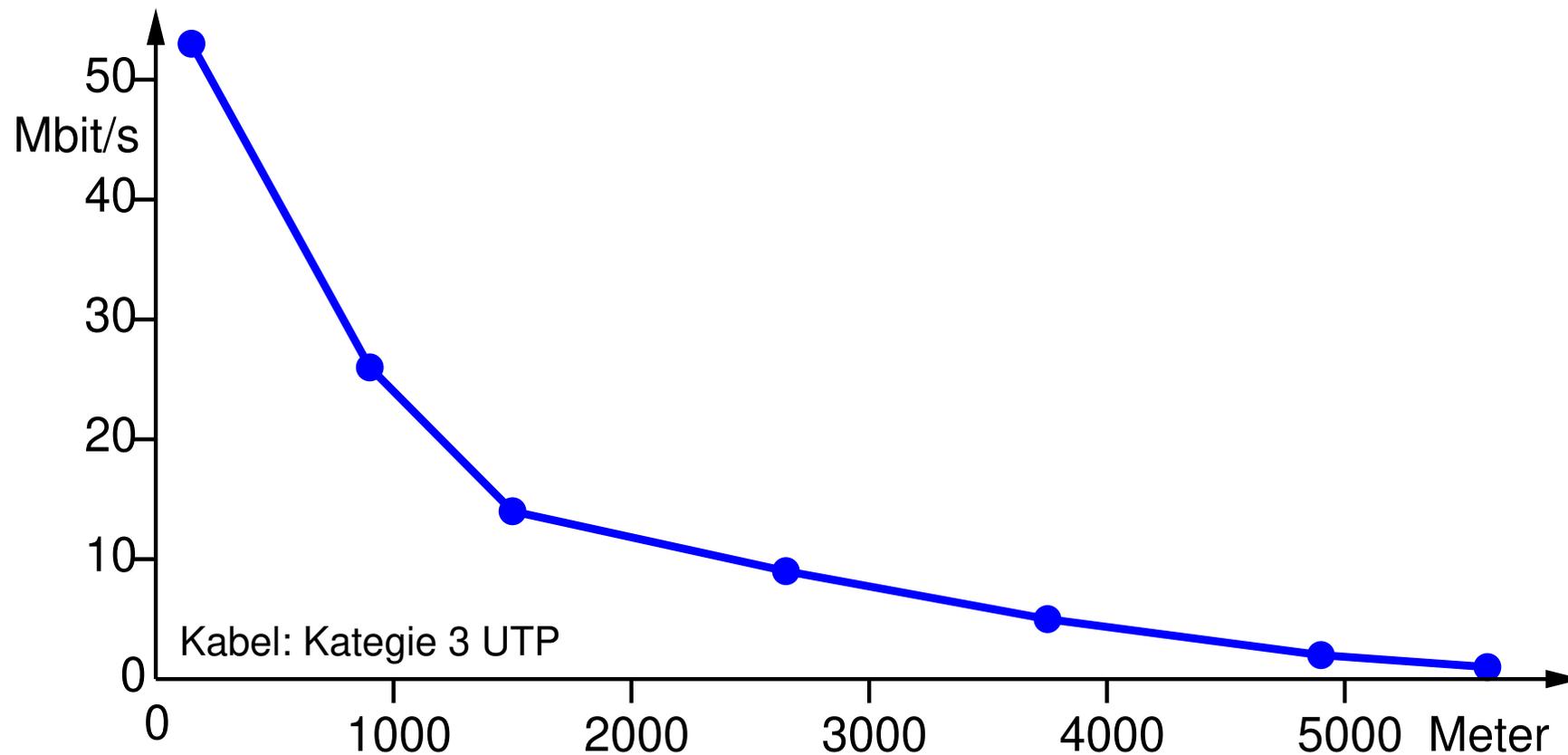


AAL: ATM Adaptionsschicht

- ➔ Schicht zur Anpassung von ATM an andere Dienste
 - ➔ mehrere Typen, je nach Anforderungen
- ➔ AAL 1: verbindungsorientiert, konstante Bitrate
 - ➔ z.B. unkomprimierte Sprache
- ➔ AAL 2: verbindungsorientiert, variable Bitrate, zeitsynchron
 - ➔ z.B. komprimiertes Audio / Video
- ➔ AAL 3/4: paketorientiert, variable Bitrate, keine Echtzeit
 - ➔ Hauptaufgabe: Pakete in Zellen zerlegen und zusammenbauen
 - ➔ z.B. für X.25, IP
- ➔ AAL 5: wie AAL 3/4, aber mit weniger Overhead

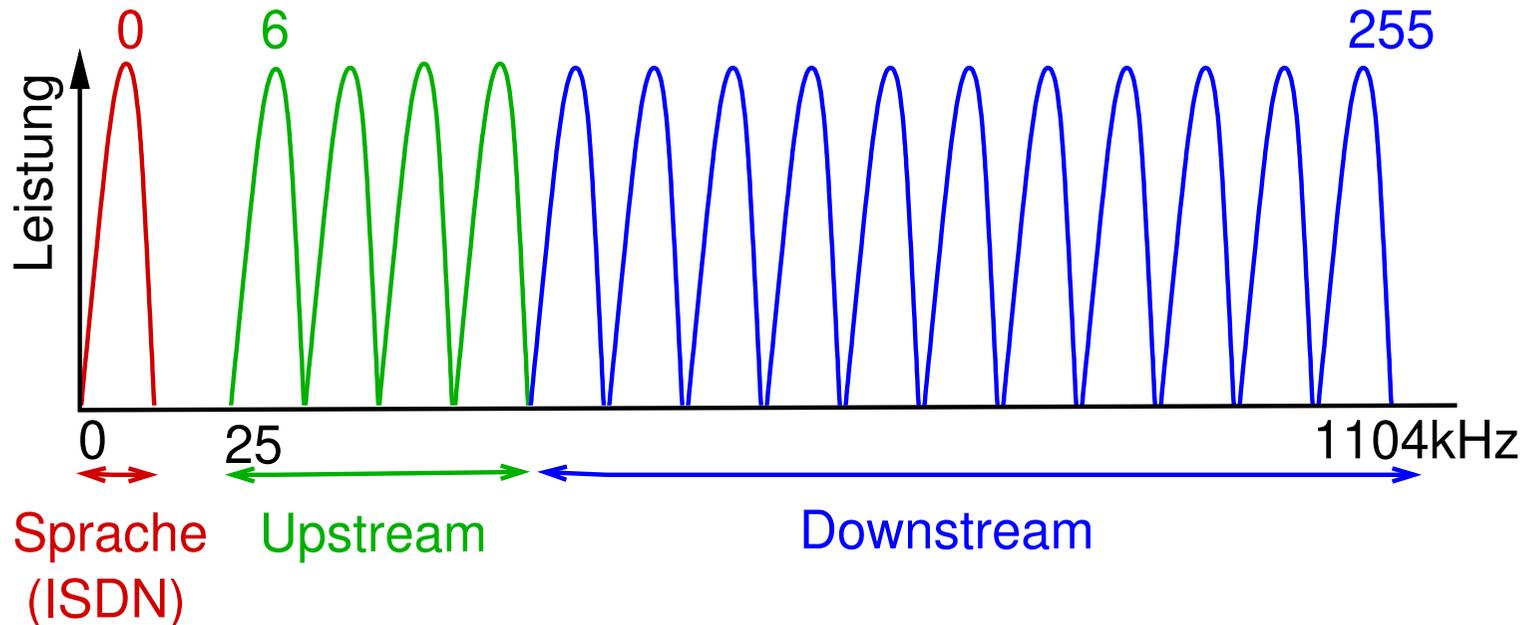
1.6.1 ADSL

- ➔ Ziel: Internet-Zugang über Telefon-Teilnehmeranschlußleitung
- ➔ Maximale Übertragungsrate abhängig von der Entfernung zur Teilnehmervermittlung:



Übertragungstechnik: DMT (Discrete MultiTone)

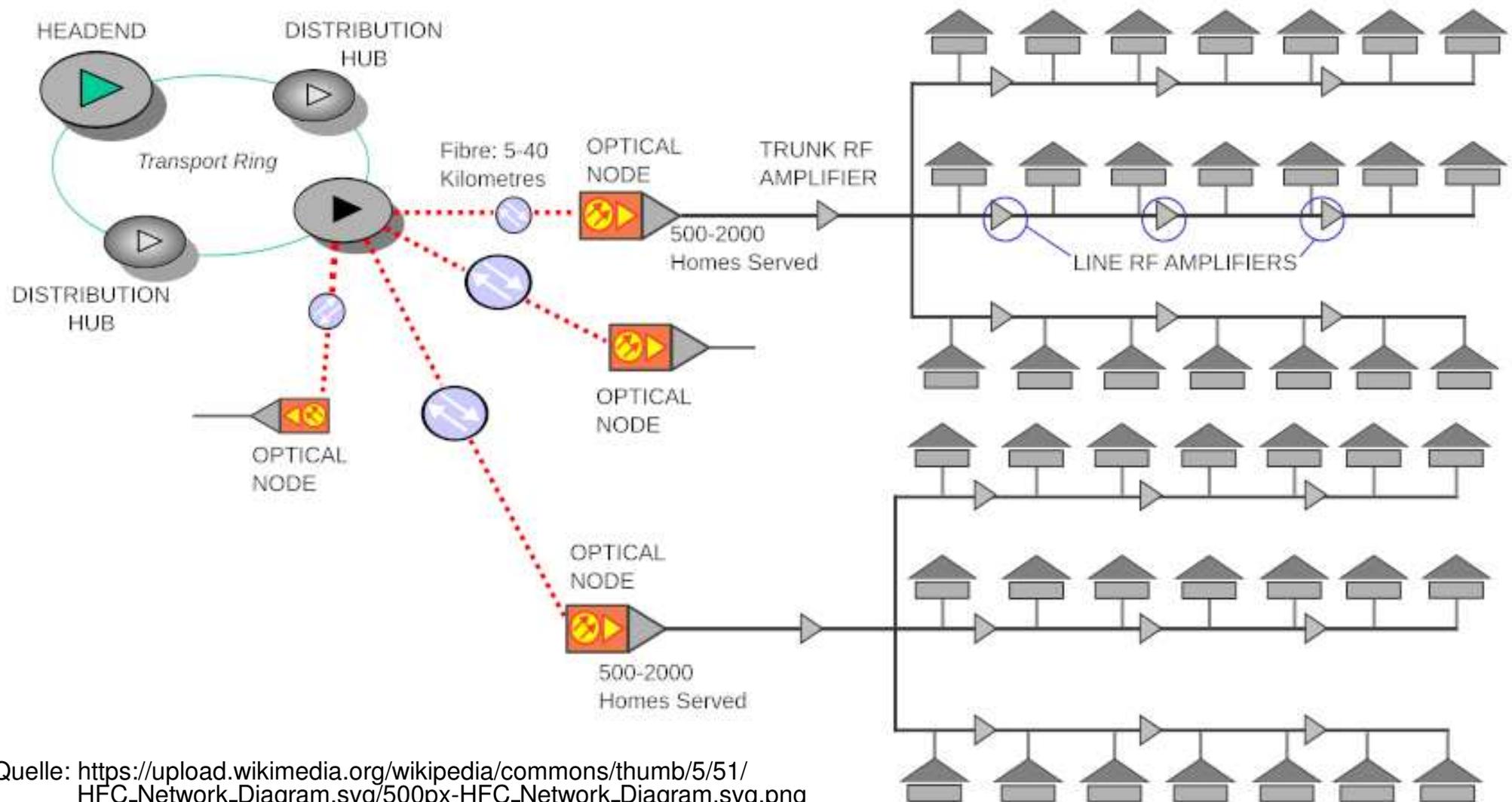
- ➔ Einteilung in 256 Frequenzkanäle, je 4 kHz breit:



- ➔ Aufteilung in Up- und Downstream flexibel
 - ➔ meist 80-90% für Empfangskanal
- ➔ Auf jedem Kanal: QAM (4000 Baud, max. 15 Bit pro Zeichen)
 - ➔ Kanäle werden beim Verbindungsaufbau ausgemessen

1.6.2 Data Over Cable Service Interface Spec. (DOCSIS)

➔ Breitbandanschluß über das Kabelfernseh-Netz



Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/HFC_Network_Diagram.svg/500px-HFC_Network_Diagram.svg.png

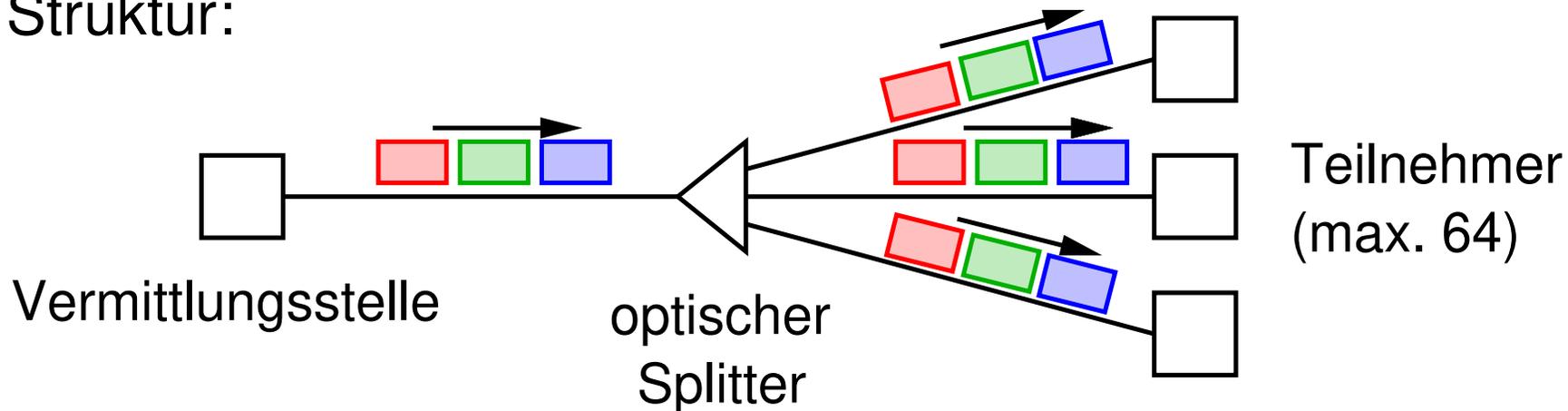


- ➔ Datenraten (DOCSIS 3.1):
 - ➔ max. 10 Gb/s downstream, 1 Gb/s upstream
- ➔ Übertragung mit OFDM (ähnlich DMT,  **3.1.1**)
 - ➔ downstream: 400-1800 MHz, bis 3800 bzw. 7600 Unterkanäle
 - ➔ upstream: 5-400 MHz, bis 1900 bzw. 3800 Unterkanäle
 - ➔ Trägerabstand der Unterkanäle: 50 bzw. 25 kHz
- ➔ Modulationsverfahren: QAM
 - ➔ bis 4096-QAM (12 Bit / Abtastung)
- ➔ Medienzugriffskontrolle (upstream):
 - ➔ FDMA / TDMA: Kabelnetz teilt Frequenz und Zeitschlitz zu
 - ➔ S-CDMA: Mischung aus TDMA und CDMA ( **3.1.1**)
- ➔ Datenübertragung ist verschlüsselt (ab DOCSIS 3.0: 128 Bit AES)
 - ➔ downstream-Übertragung erfolgt als Broadcast

1.6.3 Gigabit Passive Optical Network (GPON)

➔ ITU-T G.984 Standard für Glasfasernetze

➔ Struktur:



➔ downstream: Broadcast, upstream: TDMA

➔ über eine Faser mit zwei verschiedenen Wellenlängen

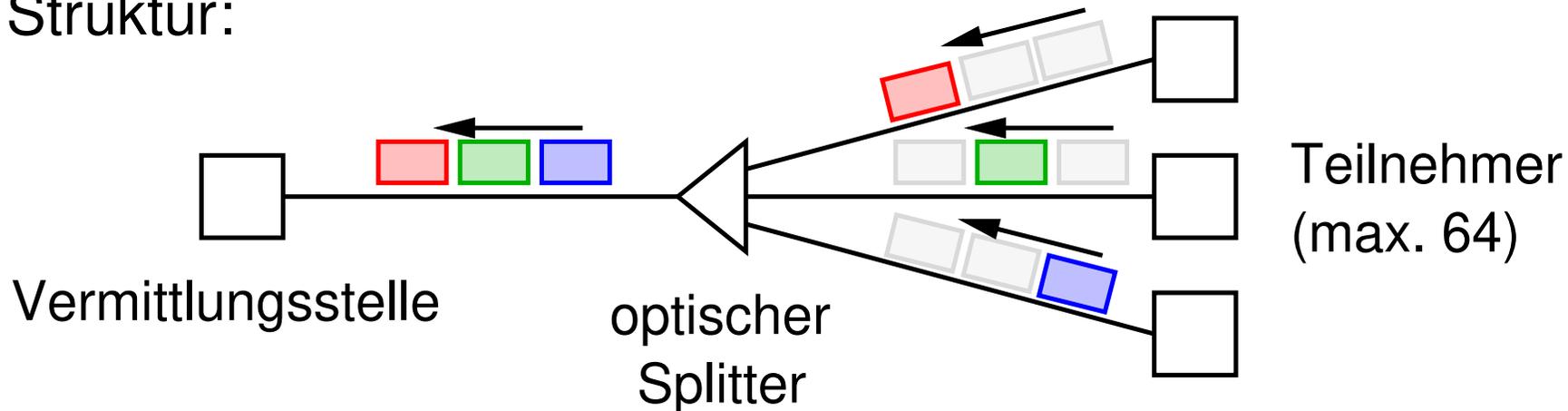
➔ Übertragungsraten: 2.5 Gb/s downstream, 1.25 Gb/s upstream

➔ Übertragung eines GPON-Frames alle 125 μ s

1.6.3 Gigabit Passive Optical Network (GPON)

➔ ITU-T G.984 Standard für Glasfasernetze

➔ Struktur:



➔ downstream: Broadcast, upstream: TDMA

➔ über eine Faser mit zwei verschiedenen Wellenlängen

➔ Übertragungsraten: 2.5 Gb/s downstream, 1.25 Gb/s upstream

➔ Übertragung eines GPON-Frames alle $125 \mu\text{s}$



- ➔ GPON-Frame kann mehrere ATM-Zellen oder GEM-Frames enthalten
 - ➔ Header enthält u.a. Information zu TDMA-Zeitlots
- ➔ GEM (*GPON Encapsulation Method*)
 - ➔ verbindungsorientiert
 - ➔ adressiert Teilnehmer über Port-IDs
 - ➔ fragmentiert Nutzdaten
 - ➔ kapselt u.a. E1/T1-Daten oder Ethernet-Frames
- ➔ Übertragung mit AES (128 Bit) verschlüsselt
- ➔ Neben GPON auch EPON (*Ethernet Passive Optical Network*)
 - ➔ überträgt Ethernet-Frames direkt



- ➔ Nyquist-Theorem
 - ➔ Signal mit Bandbreite H : max. $2 \cdot H$ Abtastungen / s
- ➔ Shannon'sches Theorem
 - ➔ Leitung mit Bandbreite H und Rauschabstand S/N :
max. Datenübertragungsrate $H \cdot \log_2(1 + S/N)$
- ➔ bit/s versus Baud
- ➔ Telefonnetz (T1/E1, SONET)
 - ➔ synchrone Netze (garantierte, konstante Datenrate)
 - ➔ bit- bzw. byteweises Multiplexing
 - ➔ mehrere Datenströme über ein Kabel
 - ➔ taktbasiertes Framing (kein Bit-/Bytestuffing)



- ➔ PPP: Sicherungsschicht-Protokoll im Internet
 - ➔ unzuverlässig, keine Flußkontrolle
 - ➔ optionale Authentifizierung (PAP, CHAP)
 - ➔ Aushandlung von Parametern für Vermittlungsschicht
- ➔ *Frame Relay*: virtuelle Verbindungen
- ➔ ATM: Zellenvermittlung, virtuelle Verbindungen

- ➔ ADSL: 256 Kanäle á 4 kHz, jeweils mit QAM
- ➔ DOCSIS: OFDM, QAM, TDMA bzw. CDMA für upstream
- ➔ GPON: zwei Wellenlängen, TDMA für upstream