



Technische Hochschule
Ingolstadt

Fakultät Informatik

Kapitel 1: Einleitung und Grundlagen

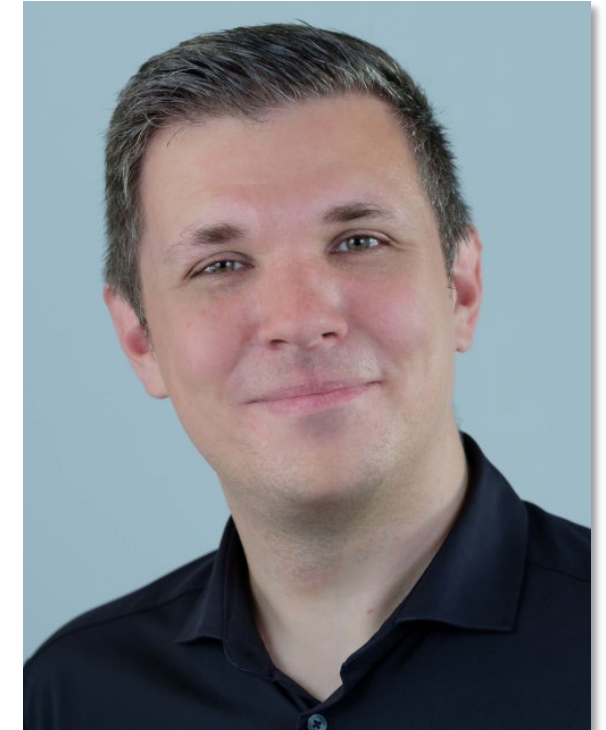
FFI_NW WS 2024

Vorlesung „Netzwerke“

02.10.2024

Prof. Dr. Michael Jarschel

- Büro: B109
- Sprechstunde: Montags von 13:00-14:00 Uhr
- E-Mail: michael.jarschel@thi.de
- Vergangenheit:
 - Promotion an der Julius-Maximilians Universität Würzburg (Lehrstuhl für Kommunikationsnetze)
Fokus: Software Defined Networking
 - **2014-2016** Research Engineer Software-Defined Networks bei Nokia Technology & Innovation München
 - **2016-2021** (Senior) Research Engineer bei Nokia Bell Labs
Fokus: Telco Cloud, Edge Computing, Hardware Acceleration



- **Bitte schreiben Sie sich selbst in den Moodle-Kursraum ein:**
- **Kurs:**
 - Netzwerke
 - <https://moodle.thi.de/course/view.php?id=8432>
 - FFI_NW_2726
 - Einschreibeschlüssel: **NW#WS24**
- **Hier finden Sie die Unterlagen zum Kurs**
- **Die Unterlagen erhalten Sie begleitend zur Vorlesung**



- **7-Versuche beginnend ab dem 21.10. in zwei Gruppen:**

- FFI_NWP.1: Mittwochs 14:00 – 15:40 Uhr
- FFI_NWP.2: Montags 09:55 – 11:25 Uhr

- Jeweils in G115 (Rechnernetzelabor)

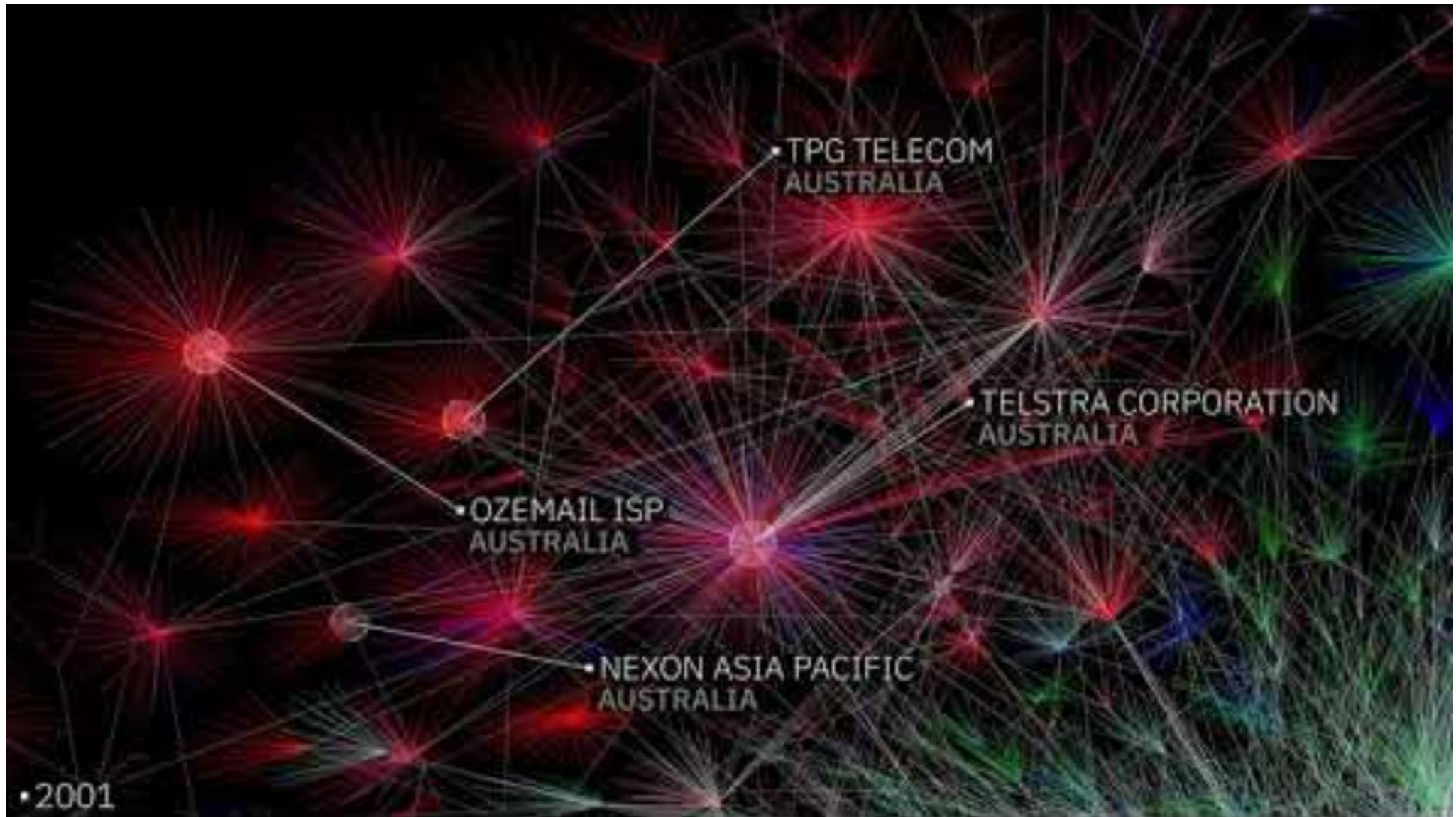
Woche	FFI_NWP.1	FFI_NWP.2
1 (21.10. - 25.10.)	V1	V1
2 (28.10. - 01.11.)	V2	V2
3 (04.11. - 08.11.)	V3	V3
4 (11.11. - 15.11.)	V4	V4
5 (18.11. - 22.11.)	V5	V5
6 (25.11. - 29.11.)	V6	V6
7 (02.12. - 06.12.)	V7	V7
8 (09.12. - 13.12.)	V8	V8

- **Bestehen ist Zulassungsvoraussetzung für die Klausur!**

- **Anmeldung:**

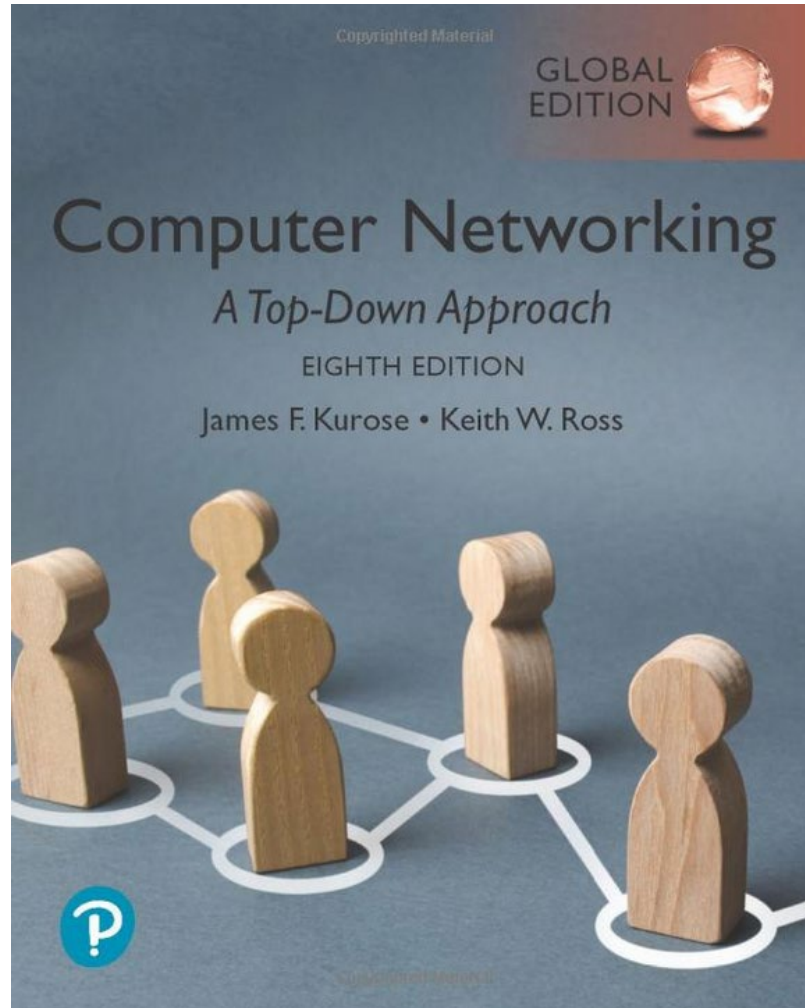
<https://faecheranmeldung.thi.de/>

vom 07.10., 18:00 Uhr, bis 13.10., 23:50 Uhr



<https://www.youtube.com/watch?v=DdaElt6oP6w>

Der Inhalt des Foliensatzes basiert auf bzw. ist adaptiert aus:



Computer Networking: A Top-Down Approach

8th edition [Global Edition]
Jim Kurose, Keith Ross
Pearson, 2021

ISBN-10 : 1292405465
ISBN-13 : 978-1292405469

Sämtliches Material: Copyright 1996-2021
J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

Mehrere Ausgaben (auch deutsche Editionen) in der
Bibliothek verfügbar

Jim Kurose erklärt das Internet in 5 Schwierigkeitsgraden



<https://www.youtube.com/watch?v=0EqKnvzo3no>

Unsere Ziele:

- Einen Überblick über Netze bekommen
- Einführung in die Terminologie
 - mehr Tiefe/Details *später...*

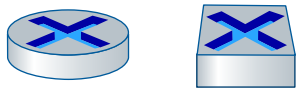
Übersicht:

- Was *ist* das Internet? Was *ist* ein Protokoll?
- **Netzrand (Edge):** Hosts, Zugangsnetze, physische Medien
- **Kernnetz:** Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur
- **Leistung:** Verlust, Verzögerung, Durchsatz
- Protokollschichten, Dienstmodelle
- Geschichte



Milliarden von vernetzten **Geräten**:

- **Hosts** = Endsysteme
- betreiben *vernetzte Apps* am Rand des Internets



Paket Switches: leiten Pakete weiter (Blöcke von Daten)

- *Router, Switches*

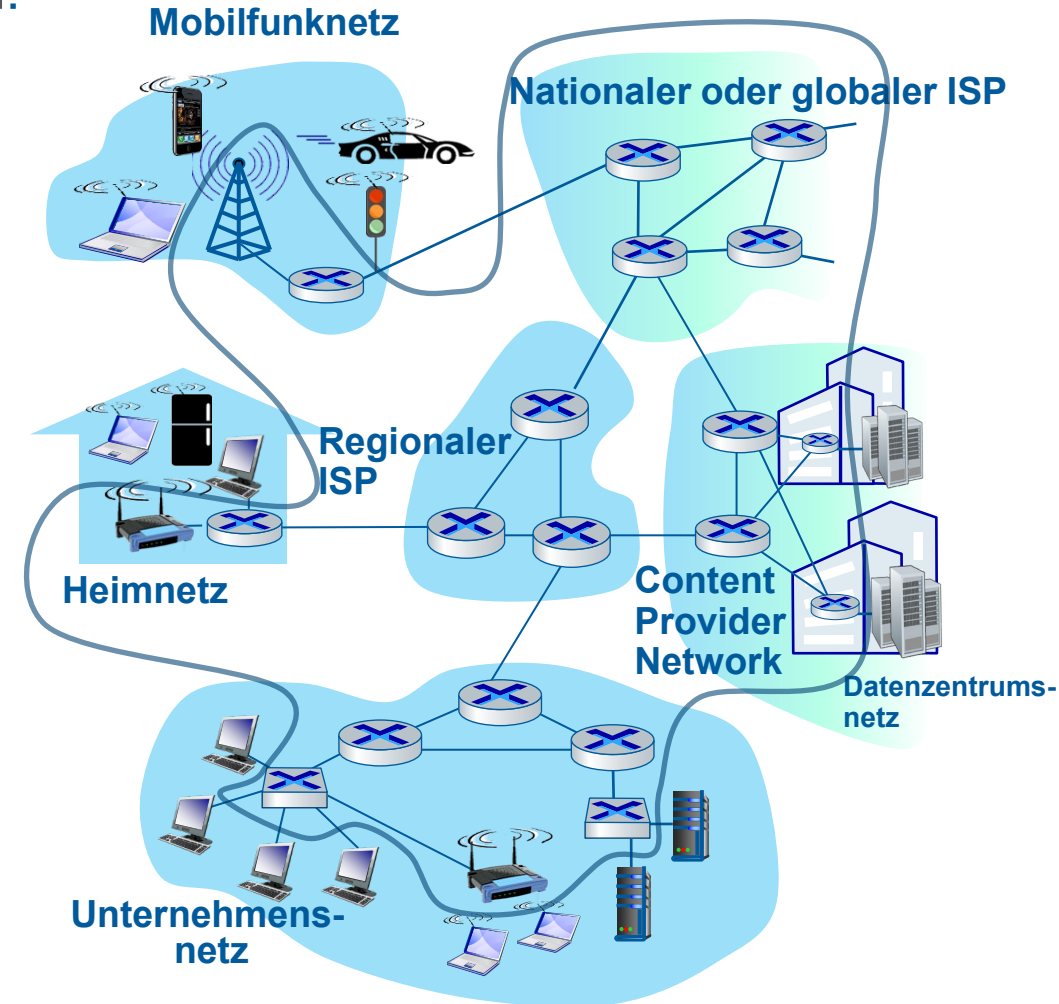


Kommunikationsverbindungen (Links)

- Glasfaser, Kupfer, Funk, Satelliten
- Übertragungsrate: *Bandbreite*

Netze

- Sammlung von Geräten, Routern, Links: von einer Organisation betrieben



Vernetzte Geräte



Amazon Echo



Internet
Kühlschrank



IP Bilderrahmen



Herzschrittmacher + Überwachung



Smart-Meter

Fahrräder



Sicherheitskamera



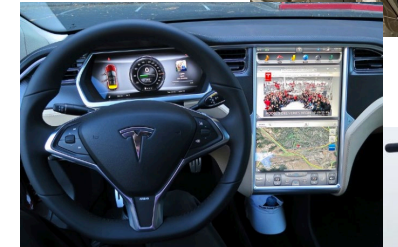
Slingbox: Vernetztes
Kabelfernsehen



Toaster mit
Wettervorhersage



AR Brillen



Autos



Scooter



IP Telefone



Spielkonsolen



Sensor-
Matratze



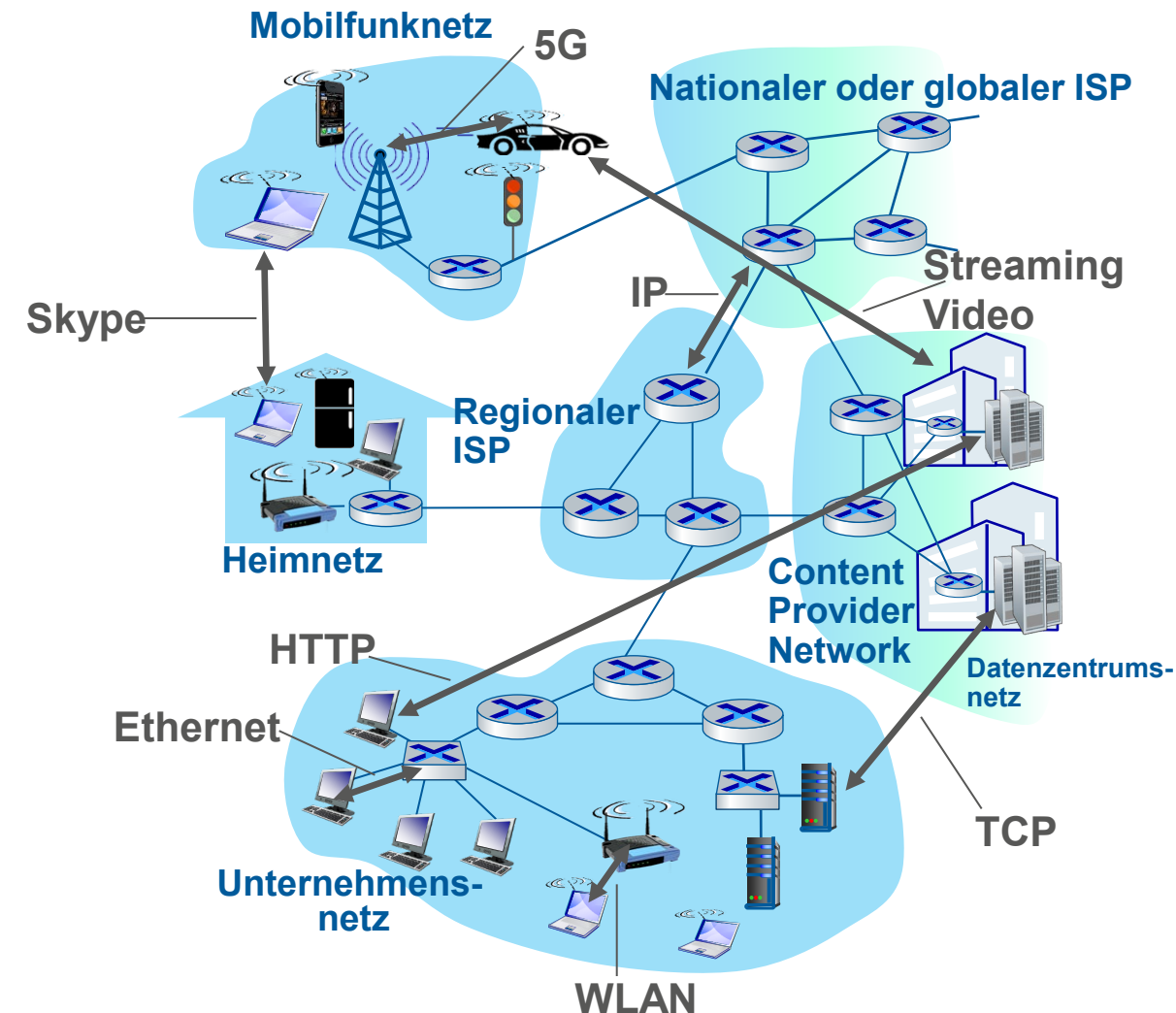
Fitbit



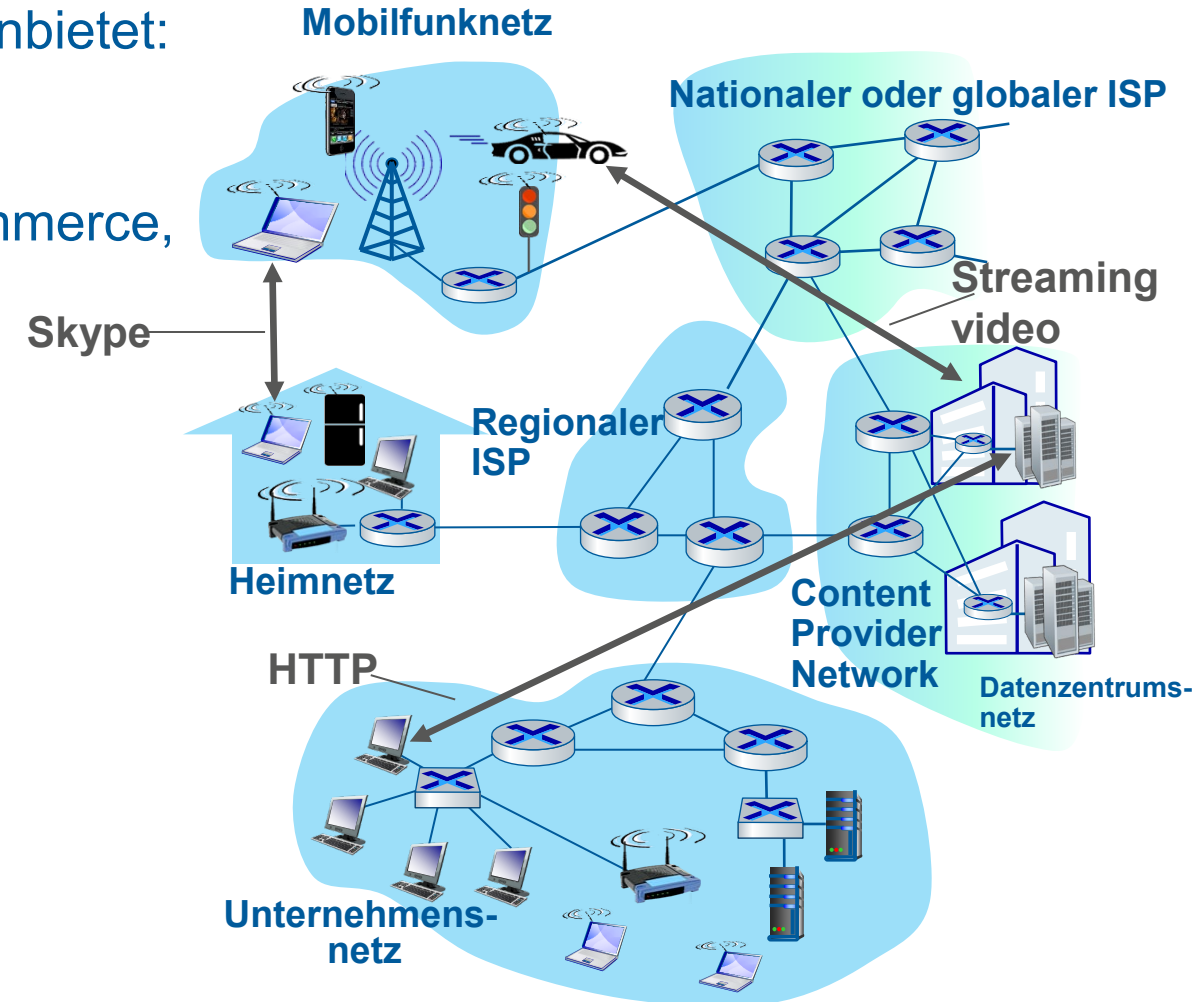
Windeln

Weitere?

- **Internet: “Netz von Netzen”**
 - Vernetzte Anbieter (ISPs)
 - **Protokolle** sind *überall*
 - kontrollieren Senden, Empfang von Nachrichten
 - z.B., HTTP (Web), Streaming Video, Skype, TCP, IP, WLAN, 5G, Ethernet
 - **Internet Standards**
 - RFC: Request for Comments
 - IETF: Internet Engineering Task Force
 - IEEE: Ethernet, WLAN
 - 3GPP: Mobilfunknetze



- **Infrastruktur**, die Dienste an Applikationen anbietet:
Web, Streaming Video, Multimedia,
Telefonkonferenzen, Email, Spiele, E-Commerce,
soziale Medien, vernetzte Geräte...
- liefert **Programmierschnittstelle** für verteilte Anwendungen:
 - Einstiegspunkte, die es sendenden/empfangenden Applikationen erlauben sich zu “verbinden”, nutzen des Internet Transportdienstes
 - bietet Dienstoptionen, ähnlich zur Post



Menschliche Protokolle:

- “Wie spät ist es?”
- “Ich habe eine Frage.”
- Begrüßungen

Regeln für:

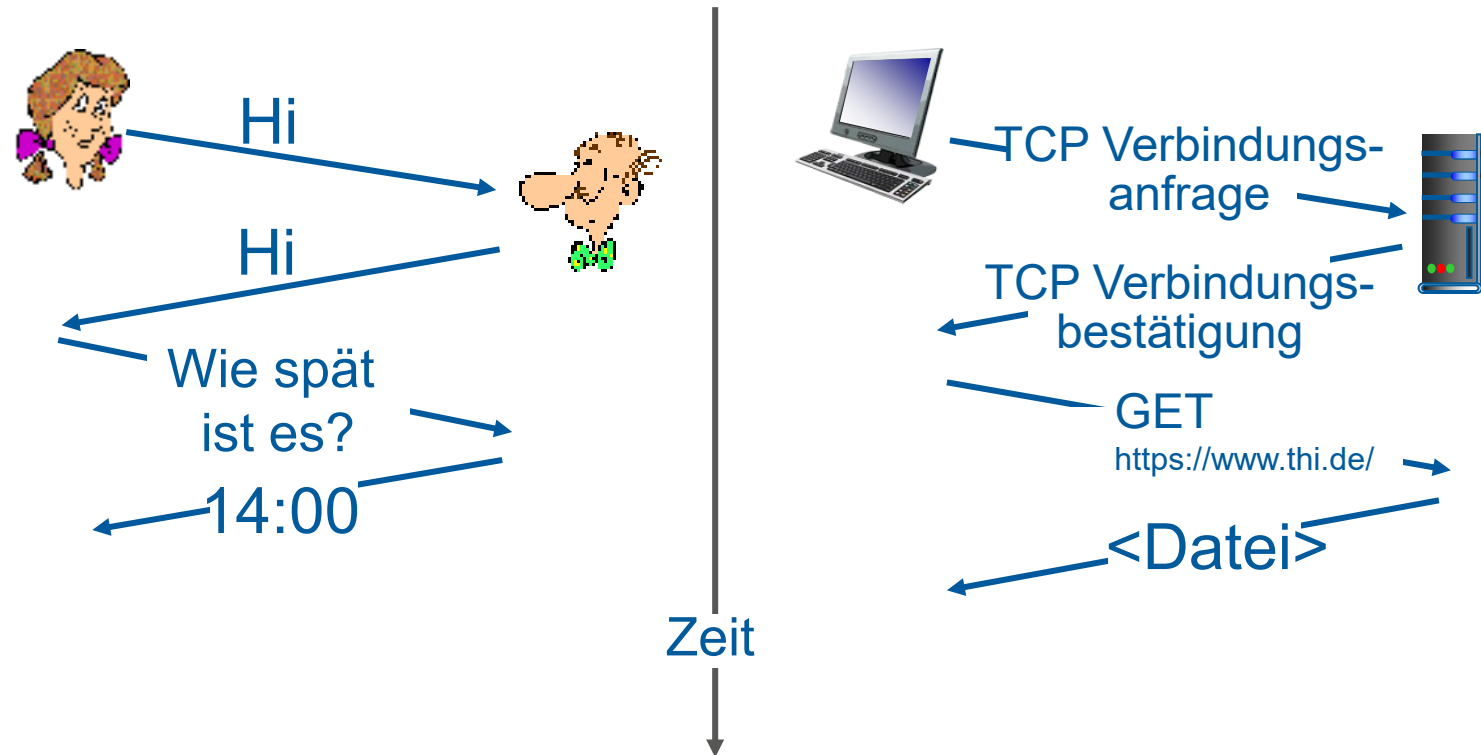
- ... senden spezifischer Nachrichten
- ... spezifische Aktionen, die beim Empfang von Nachrichten oder anderer Ereignisse ausgelöst werden

Netzprotokolle:

- Computer (Geräte) statt Menschen
- Sämtliche Kommunikation im Internet wird durch Protokolle gelenkt

Protokolle definieren das **Format**, die **Reihenfolge** von zwischen Netzgeräten ausgetauschten **Nachrichten** und **Folgeaktionen** bei Nachrichtenübermittlung bzw. Empfang

Ein menschliches Protokoll und ein Computerprotokoll:

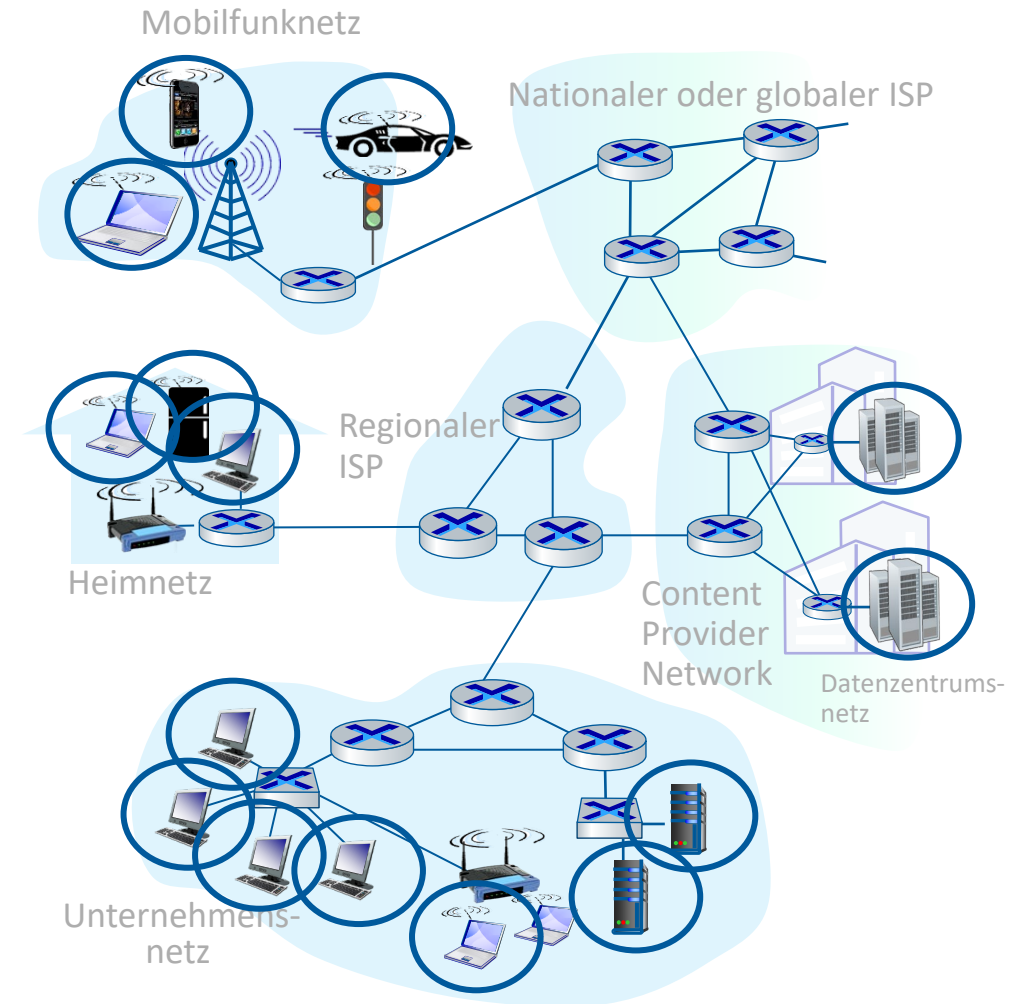




- Was ist das Internet?
- Was ist ein Protokoll?
- **Netzrand (Edge): Hosts, Zugangsnetze, physische Medien**
- Kernnetz: Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur
- Leistung: Verlust, Verzögerung, Durchsatz
- Protokollschichten, Dienstmodelle
- Geschichte

Netzrand (Edge):

- Hosts: Clients und Server
- Server oft in Datenzentren

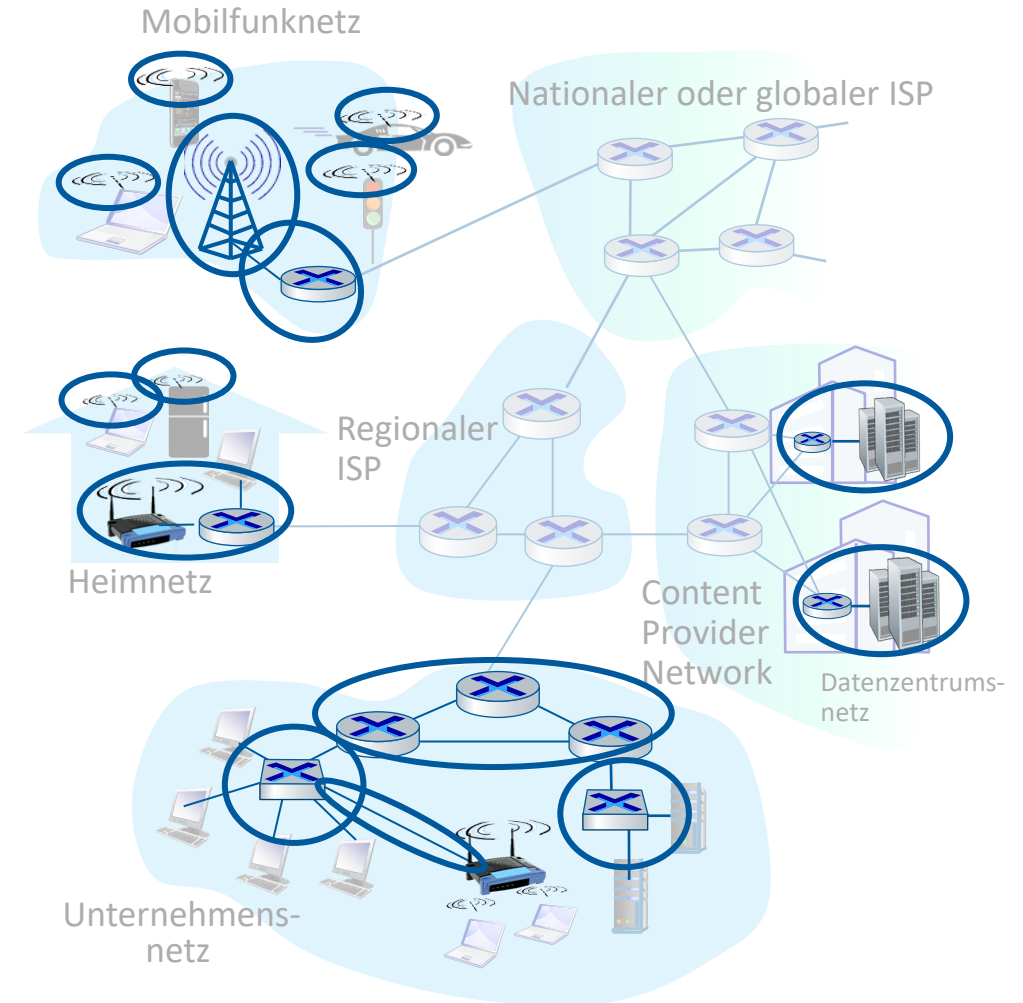


Netzrand (Edge):

- Hosts: Clients und Server
- Server oft in Datenzentren

Zugangsnetze, physische Medien:

- kabelgebundene, drahtlose
Kommunikationsverbindungen



Netzrand (Edge):

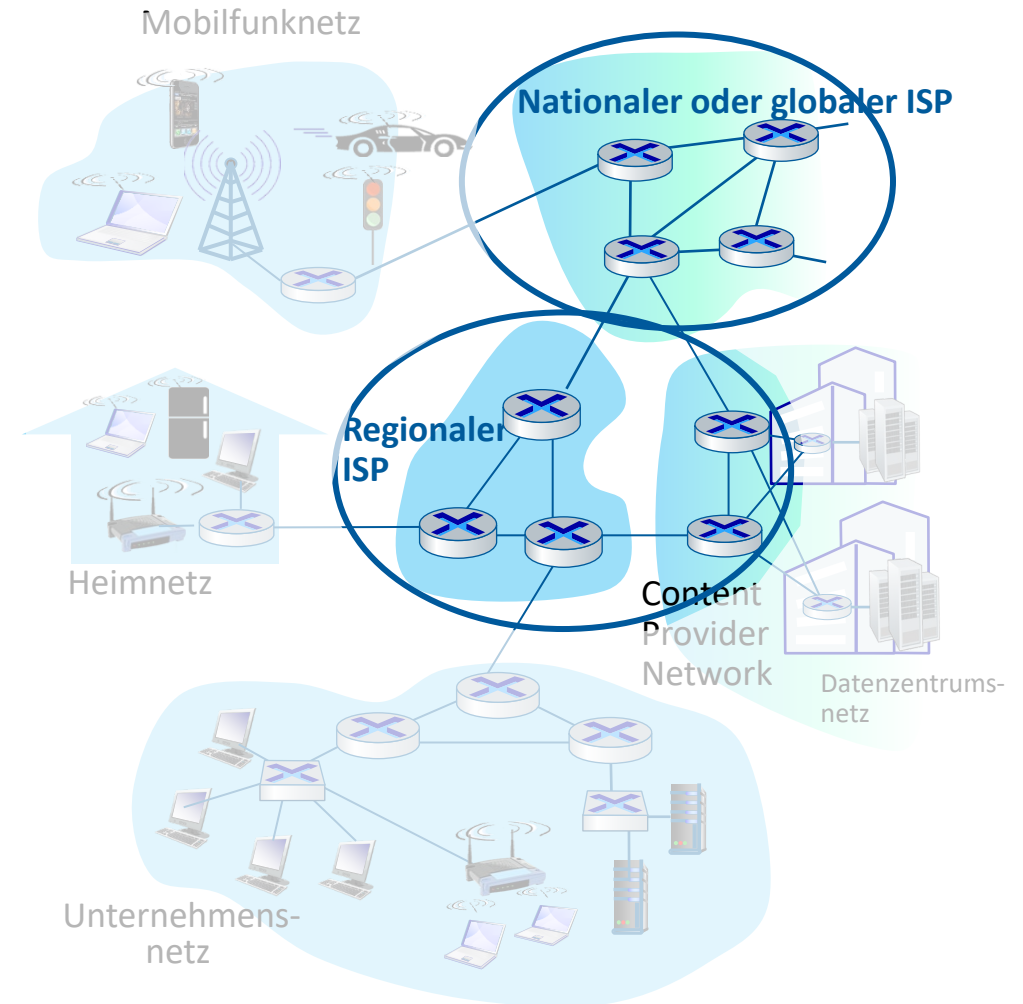
- Hosts: Clients und Server
- Server oft in Datenzentren

Zugangsnetze, physische Medien:

- kabelgebundene, drahtlose
Kommunikationsverbindungen

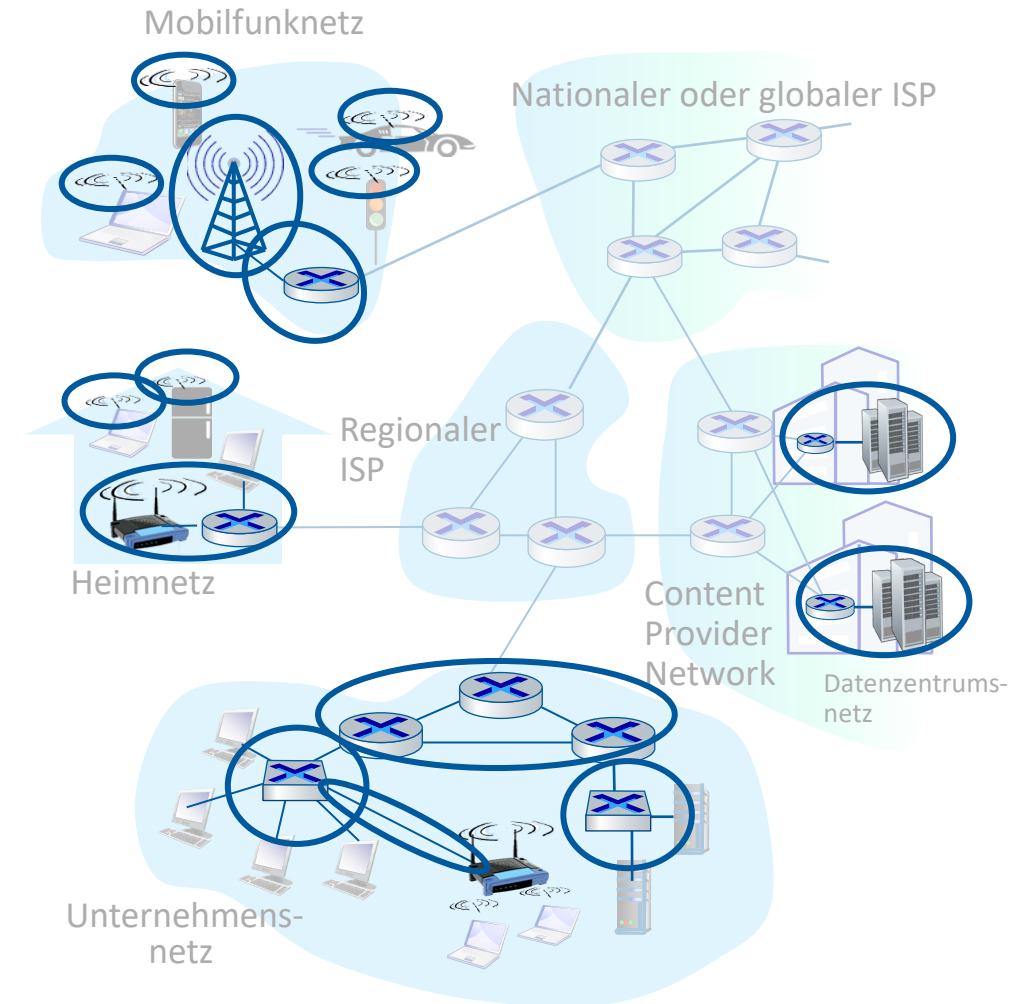
Kernnetz:

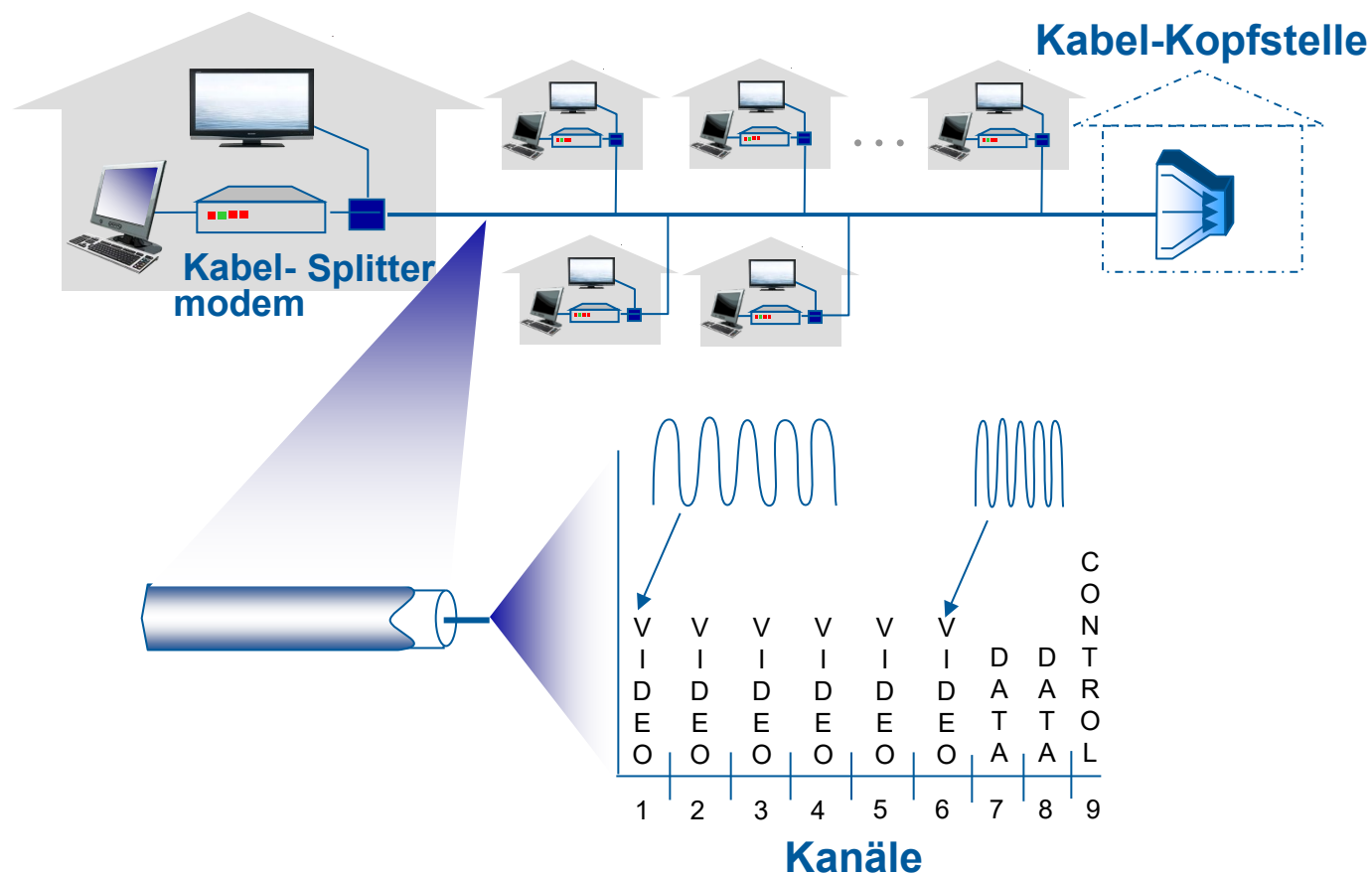
- verbundene Router
- Netz aus Netzen



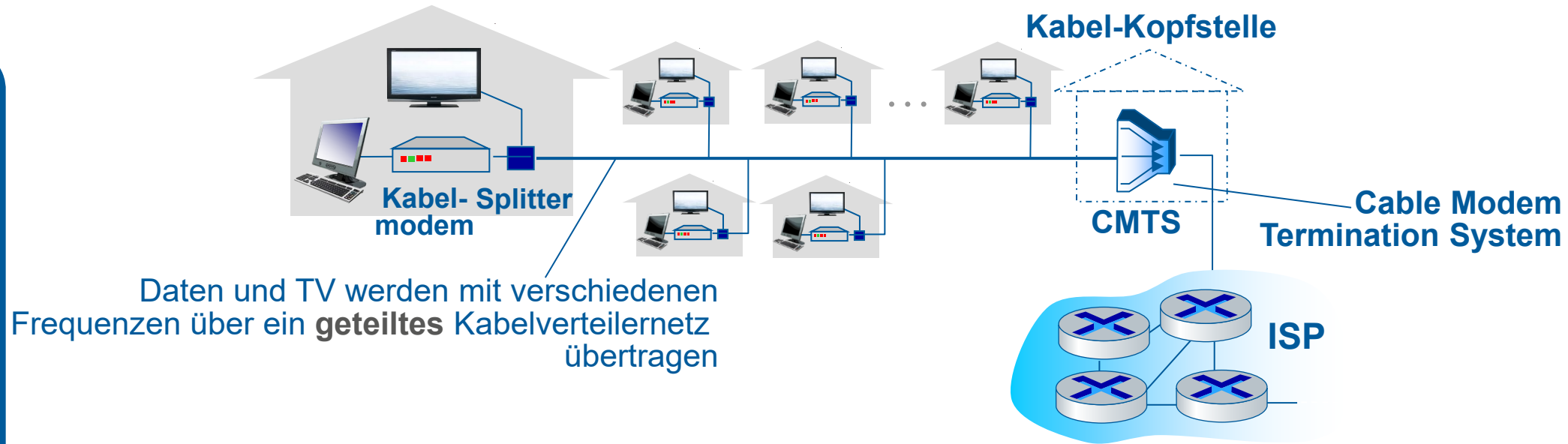
Frage: Wie verbindet man die Endsysteme mit dem Zugangsrouter?

- Wohnungszugangsnetze
- Institutionszugangsnetze (Hochschule, Firma)
- Mobile Zugangsnetze (WLAN, 4G/5G)

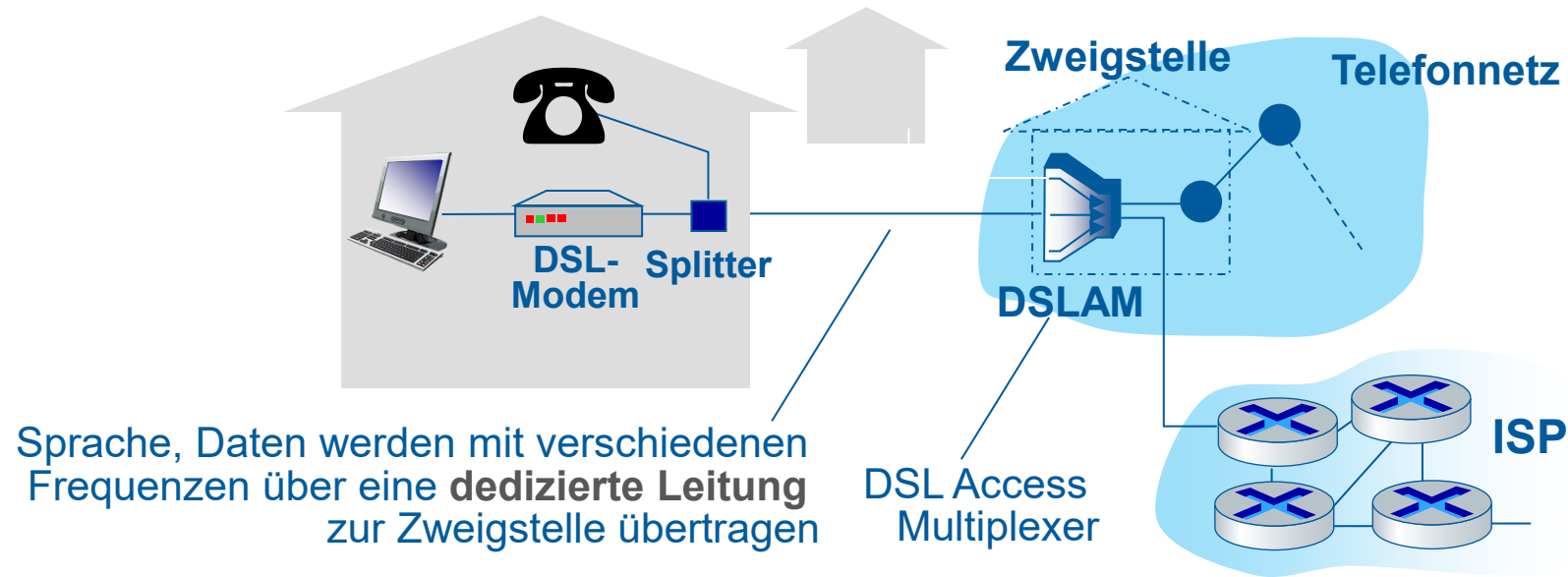




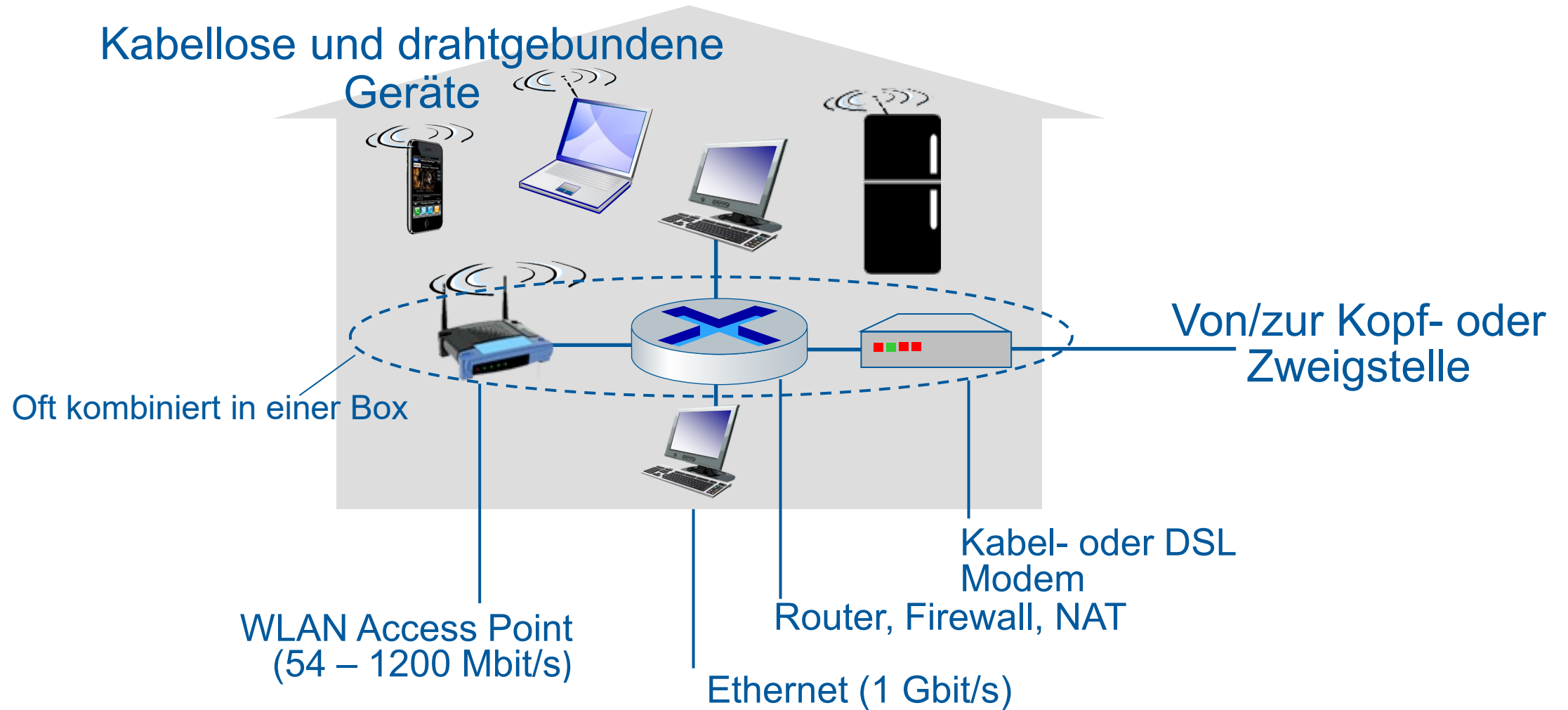
Frequency Division Multiplexing (FDM): Verschiedene Kanäle in verschiedenen Frequenzbändern



- **HFC: Hybrid Fiber Coax**
 - Asymmetrisch: bis zu 40 Mbit/s – 1.2 Gbit/s Downstream Übertragungsrate, 30-100 Mbit/s Upstream Übertragungsrate
- **Kabelnetz** & Glasfaser verbinden Häuser mit ISP Router
 - Häuser **teilen Zugangsnetz** bis zur Kabel Kopfstelle



- nutzt **bestehende** Telefonleitung zum DSLAM (in der Zweigstelle)
 - Daten über DSL gehen zum Internet
 - Sprache über DSL geht (ging) zum Telefonnetz
- 24-52 Mbps dedizierte Downstream Übertragungsrate (mehr mit VDSL)
- 3.5-16 Mbps dedizierte Upstream Übertragungsrate (mehr mit VDSL)

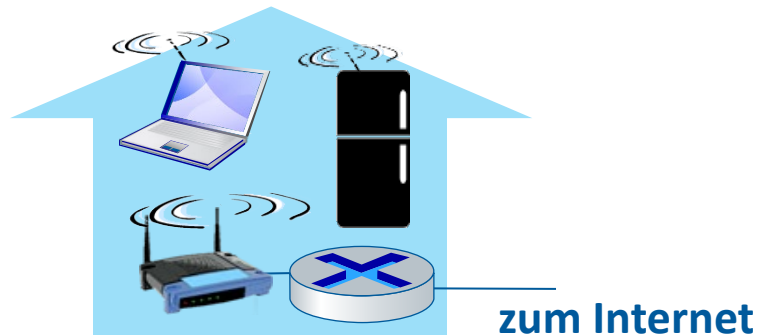


Geteiltes **drahtloses** Zugangsnetz verbindet Endsystem mit Router

- via Basisstation bzw. “Access Point”

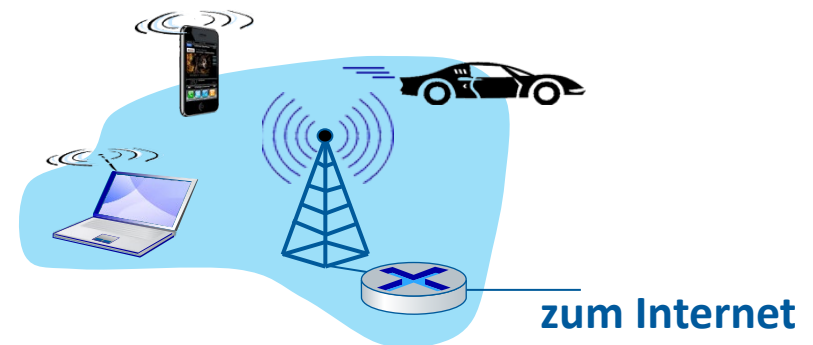
Wireless Local Area Network (WLAN)

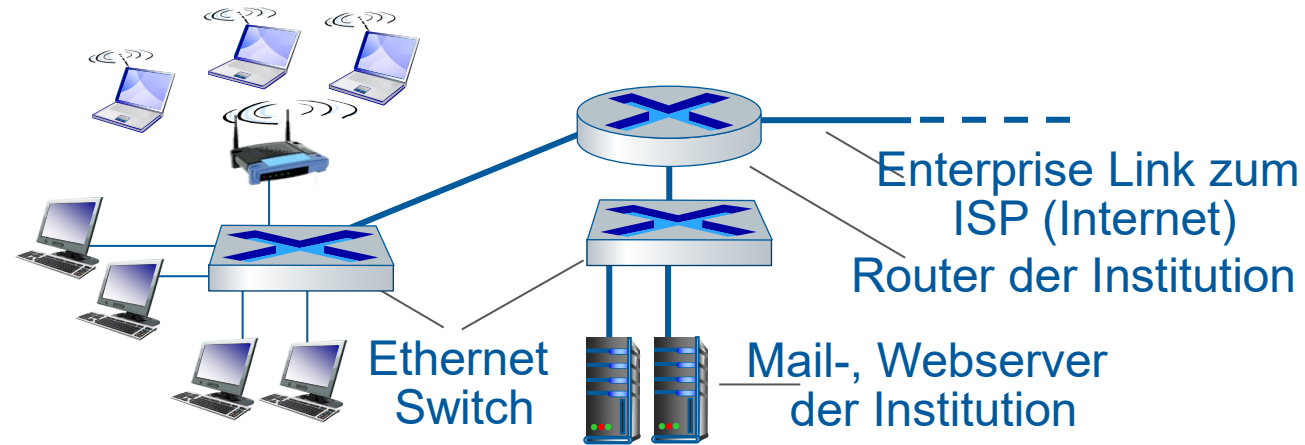
- typischerweise in und um Gebäude (~30 m)
- 802.11b/g/n/ax (WLAN): bis zu 11, 54, 450, 1200 Mbit/s Übertragungsrate



Mobilfunknetze

- betrieben von Mobilfunkbetreibern (mehrere 10 km Reichweite)
- Vielfaches von 10 bzw. 100 Mbit/s
- 4G(LTE)/5G zelluläre Netze



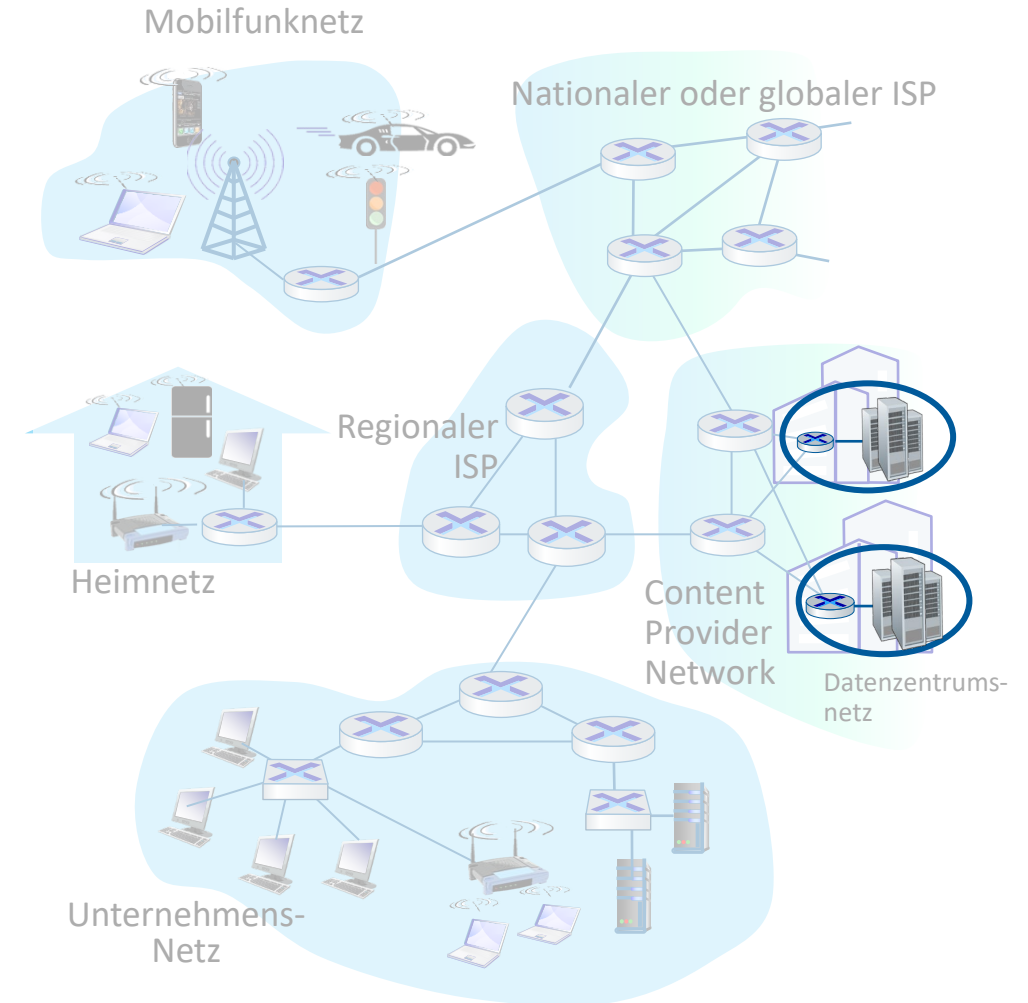


- Firmen, Universitäten, usw.
- Mix von drahtgebundenen und drahtlosen Verbindungstechnologien, verbindet eine Mischung von Switchen und Routern (Unterschied folgt)
 - Ethernet: drahtgebundener Zugang mit 100Mbit/s, 1Gbit/s, 10Gbit/s
 - WLAN: drahtlose Access Points mit 11, 54, 450, 1200 Mbit/s

- Links mit hoher Bandbreite (10x bis 100x Gbit/s) verbinden hunderte oder tausende von Servern untereinander und mit dem Internet

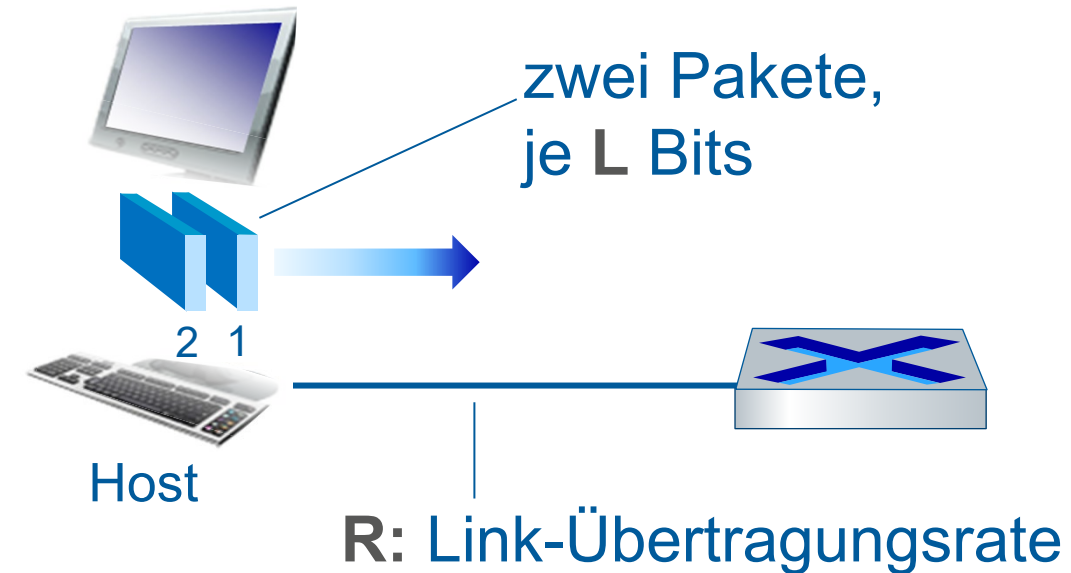


SuperMUC (LRZ in Garching)



Host-Sendefunktion:

- übernimmt Nachricht von Applikation
- Unterteilt Nachricht in kleinere Blöcke, **Pakete** genannt, einer Länge von **L** Bits
- überträgt Paket ins Zugangsnetz mit **Übertragungsrate R**
 - Verbindungsübertragungsrate, bzw. **Link-Kapazität oder Link-Bandbreite**



$$\text{Paket Übertragungsverzögerung} = \frac{\text{benötigte Zeit um ein } L\text{-bit Paket auf Link zu übertragen}}{R} = \frac{L \text{ (Bits)}}{R \text{ (Bit/s)}}$$

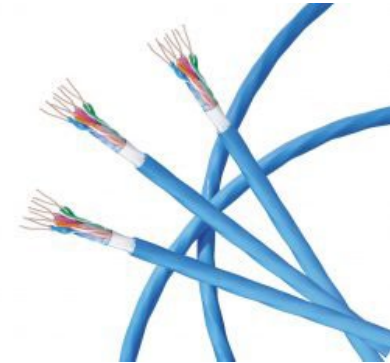
Wiederholung: Maßeinheiten für Datenraten

- **1 kbit/s = 1 kb/s = 1 kbps = 1.000 bit/s**
 - 1 kByte/s = 8 kbps = 8000 bit/s
- **1 Mbit/s = 1 Mbps = 1.000.000 bit/s**
- **1 Gbit/s = 1 Gbps = 1.000.000.000 bit/s**
- **Hinweis:**
 - Bei **Übertragungsraten** wird mit 10-er Potenzen gerechnet:
 - k = 1.000 (also 10^3)
 - M = 1.000.000 (also 10^6)
 - G = 1.000.000.000 (also 10^9)
 - Bei **Datenvolumen** (Speicherplatz) wird in 2-er Potenzen gerechnet:
 - 1 Kibibyte = 2^{10} = 1.024 Byte
 - 1 Mebibyte = 2^{20} = 1.048.576 Byte
 - 1 Gibibyte = 2^{30} = 1.073.741.824 Byte

- **Bit:** wird zwischen Sender/Empfänger-Paar übertragen
- **Physischer Link:** das was zwischen Sender und Empfänger liegt
- **gerichtete Medien:**
 - Signal breitet sich entlang eines fixen Medium aus: Kupfer, Glasfaser
- **ungerichtete Medien:**
 - Signale breiten sich frei aus, z.B., Funk

Twisted pair (TP)

- Zwei isolierte Kupferkabel
 - Kategorie 5: 100 Mbit/s, 1 Gbit/s Ethernet
 - Kategorie 6: 10Gbps Ethernet



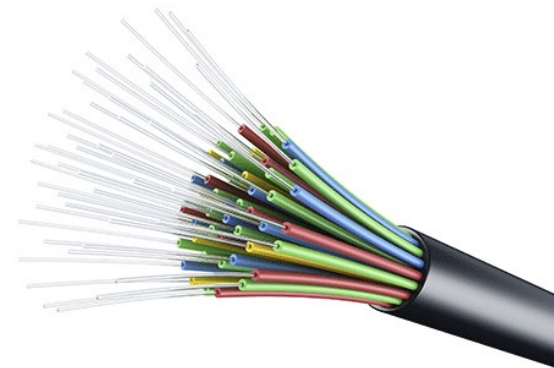
Koaxialkabel:

- zwei konzentrische Kupferleiter
- bidirektional
- Breitband:
 - Mehrere Frequenzkanäle auf Kabel
 - 100x Mbps pro Kanal



Glasfaserkabel:

- Glasfaser überträgt Lichtimpulse, jeder Impuls ist ein Bit
- Hochgeschwindigkeitsbetrieb:
 - Hochgeschwindigkeits-Punkt-zu-Punkt Übertragung (10x-100x Gbit/s)
- Geringe Fehlerrate:
 - Große Distanzen zwischen Repeatern
 - Immun gegen elektromagnetische Störungen



Funk:

- Signal wird in verschiedenen “Bändern” des elektromagnetischen Spektrums übertragen
- Kein physisches “Kabel”
- Übertragung, “halb-duplex” (Sender zu Empfänger)
- Umweltbedingte Ausbreitungstörungen:
 - Reflektionen
 - Blockierung durch Objekte
 - Interferenz/Rauschen

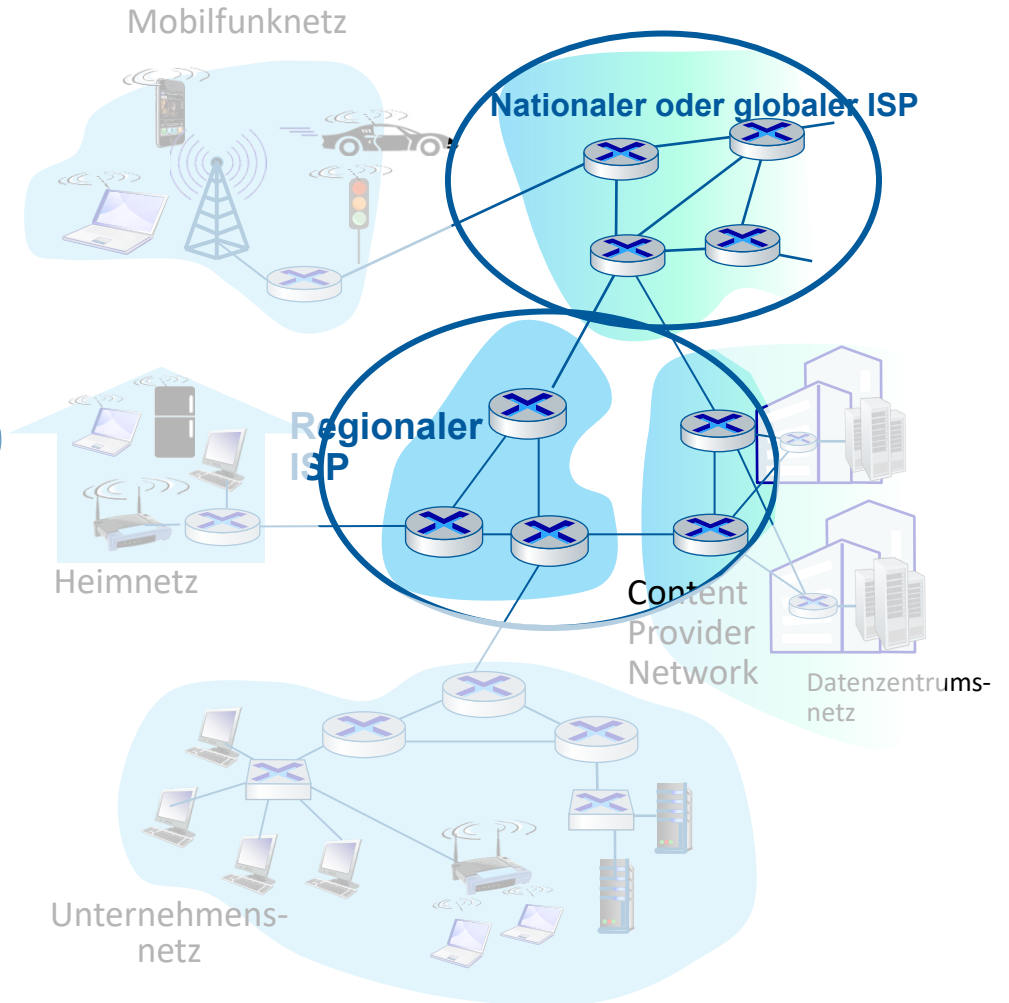
Arten von Funkübertragung:

- Wireless LAN (WLAN)
 - 10-100x Mbit/s; 10x of meters
- Mobilfunk (z.B., 4G)
 - 10x Mbit/s über ~10km
- Bluetooth: Kabelersatz
 - Kurze Distanzen, beschränkte Raten
- Terrestrische Mikrowellen
 - Punkt-zu-Punkt; 45 Mbit/s Kanäle
- Satellit
 - Bis zu 45 Mbit/s pro Kanal
 - ~270 ms Ende-zu-Ende Verzögerung
- Satellit (LEO) (low earth orbit)
 - aktuell ~130 Mbit/s (Starlink)
 - ~45 ms Ende-zu-Ende Verzögerung



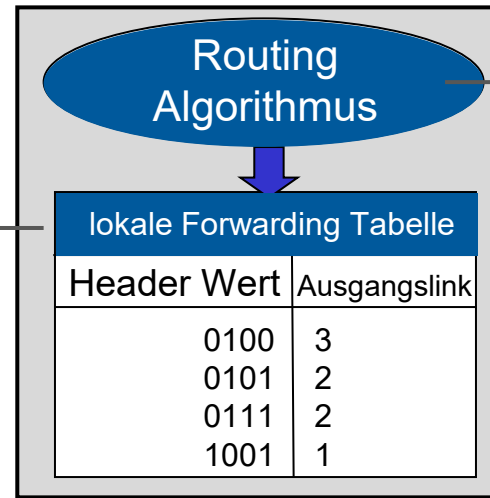
- Was ist das Internet?
- Was ist ein Protokoll?
- Netzrand (Edge): Hosts, Zugangsnetze, physische Medien
- Kernnetz: **Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur**
- Leistung: Verlust, Verzögerung, Durchsatz
- Protokollschichten, Dienstmodelle
- Geschichte

- Netz untereinander vermaschter Router
- **Paketvermittlung:** Host unterteilen Nachrichten den Applikationsschicht in **Pakete**
 - Netz **leitet (forwarding)** Pakete von einem Router zum nächsten über Verbindungen auf dem Weg (Pfad) von der **Quelle zum Ziel**



Forwarding:

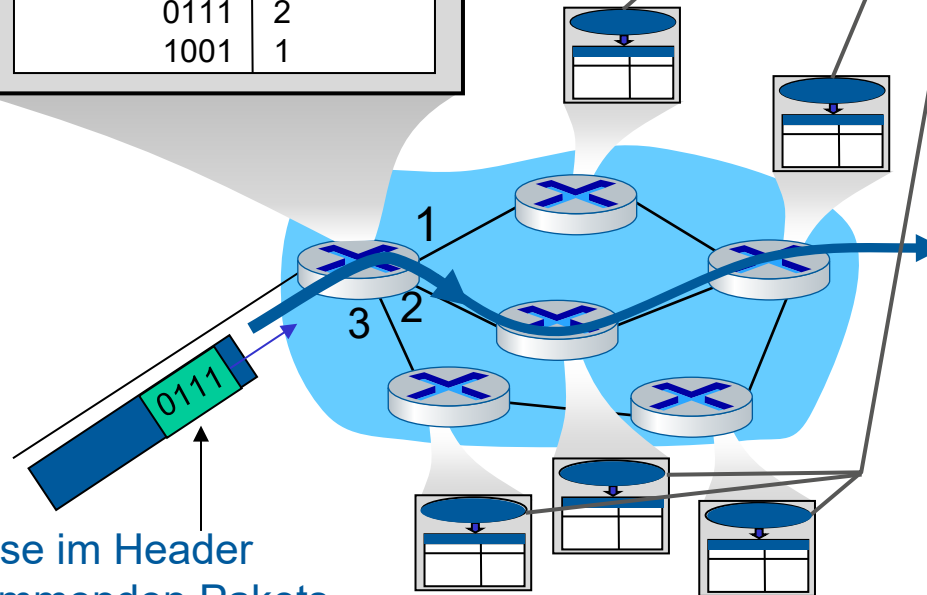
- auch “Switching”
- **lokale** Aktion: bewege ankommende Pakete vom Eingangslinke des Routers zum passenden Ausgangslinke des Routers

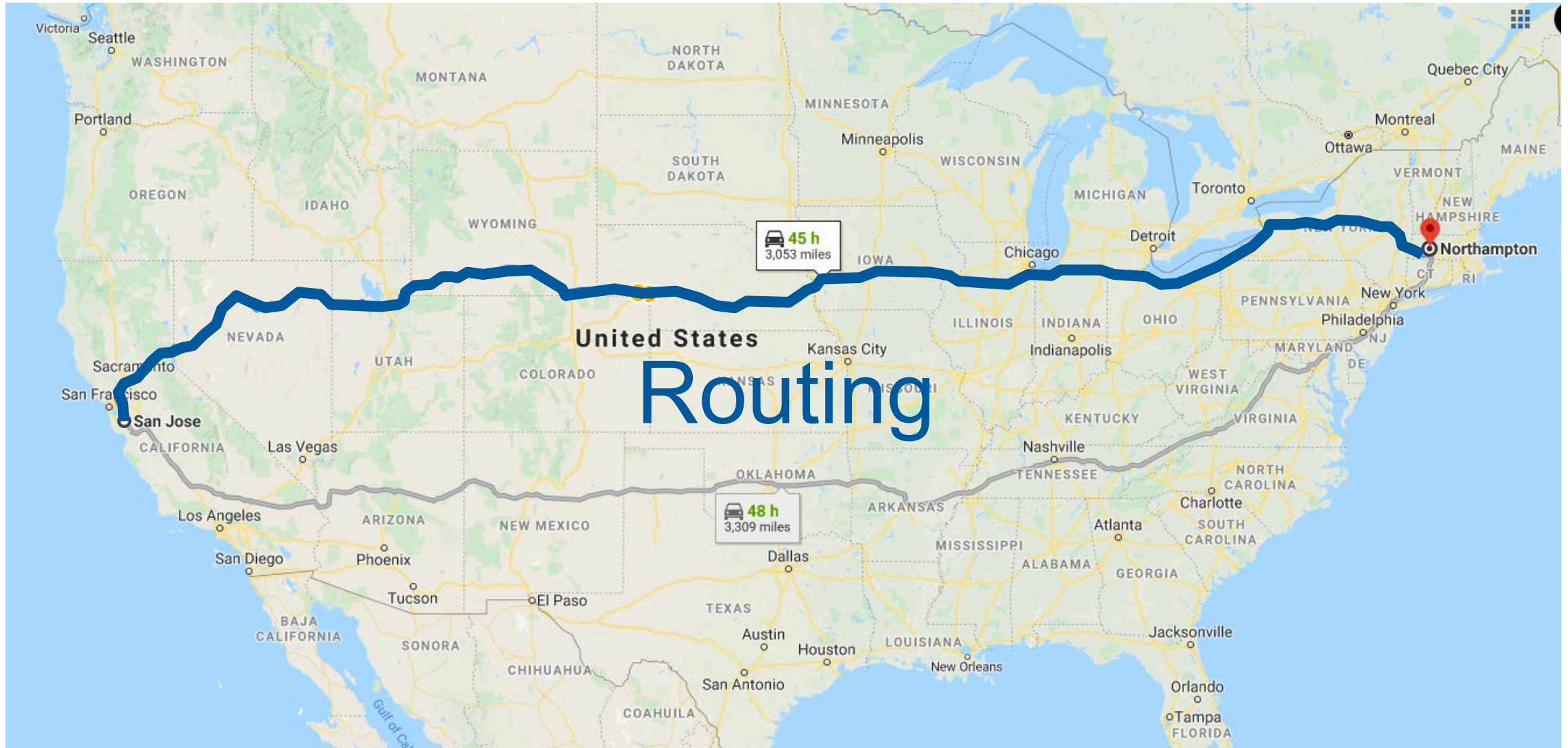


Zieladresse im Header
des ankommenden Pakets

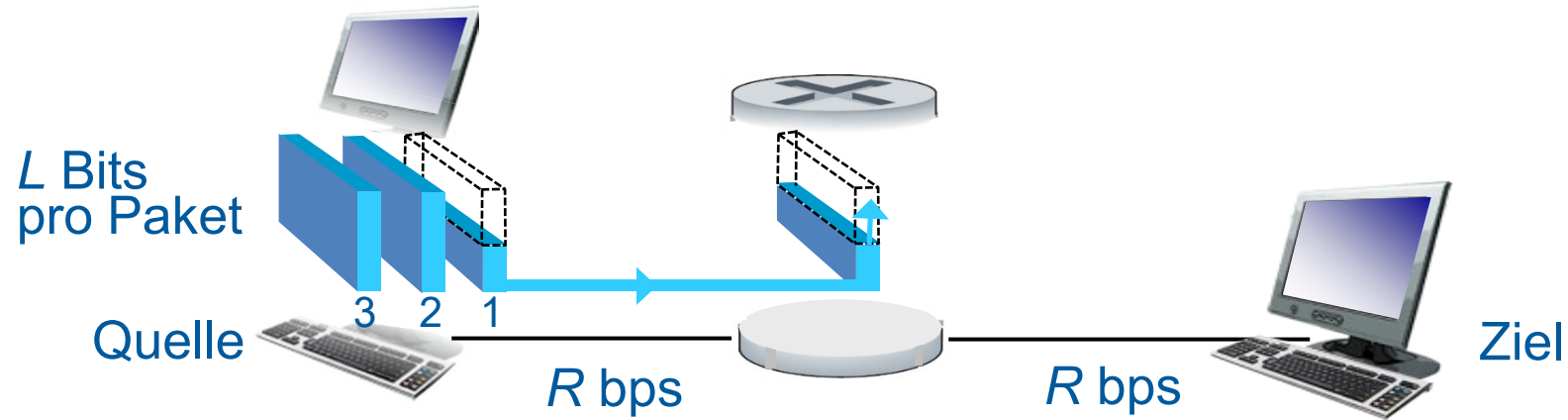
Routing:

- **globale** Aktion: bestimmen des Pfades von Quelle zum Ziel, den die Pakete nehmen sollen
- Routing Algorithmen





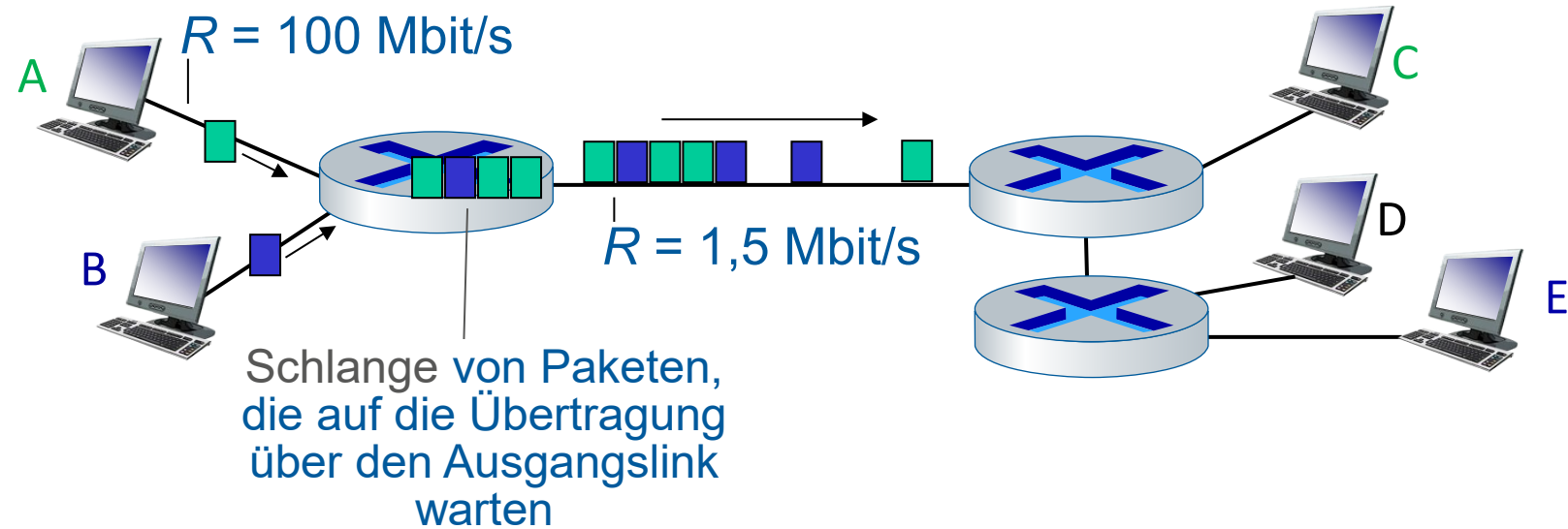




- **Packet Übertragungsverzögerung: es dauert L/R Sekunden ein L -Bit Paket auf einen Link mit R bps zu übertragen (legen)**
- **Store and Forward: *ganzes* Paket muss am Router angekommen sein, bevor es auf den nächsten Link übertragen werden kann**

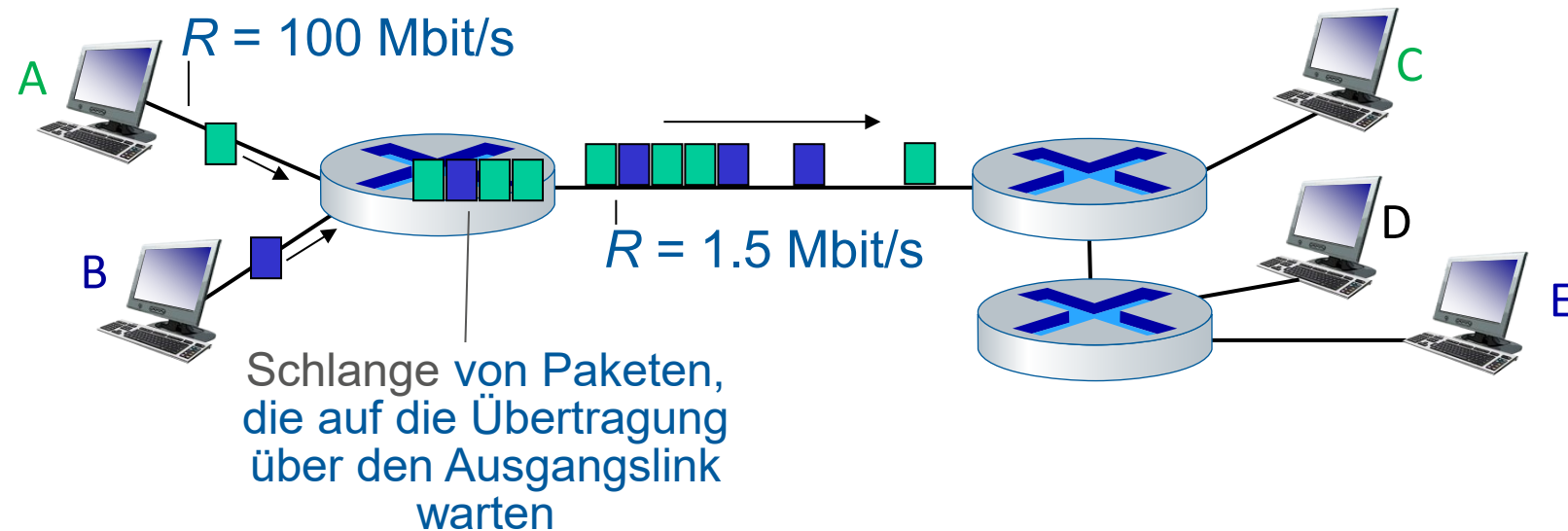
1-Hop Rechenbeispiel:

- $L = 10$ Kbit
- $R = 100$ Mbit/s
- Übertragungsverzögerung = 0,1 ms



Wartezeit entsteht, wenn Aufgaben schneller ankommen als sie erledigt werden können:



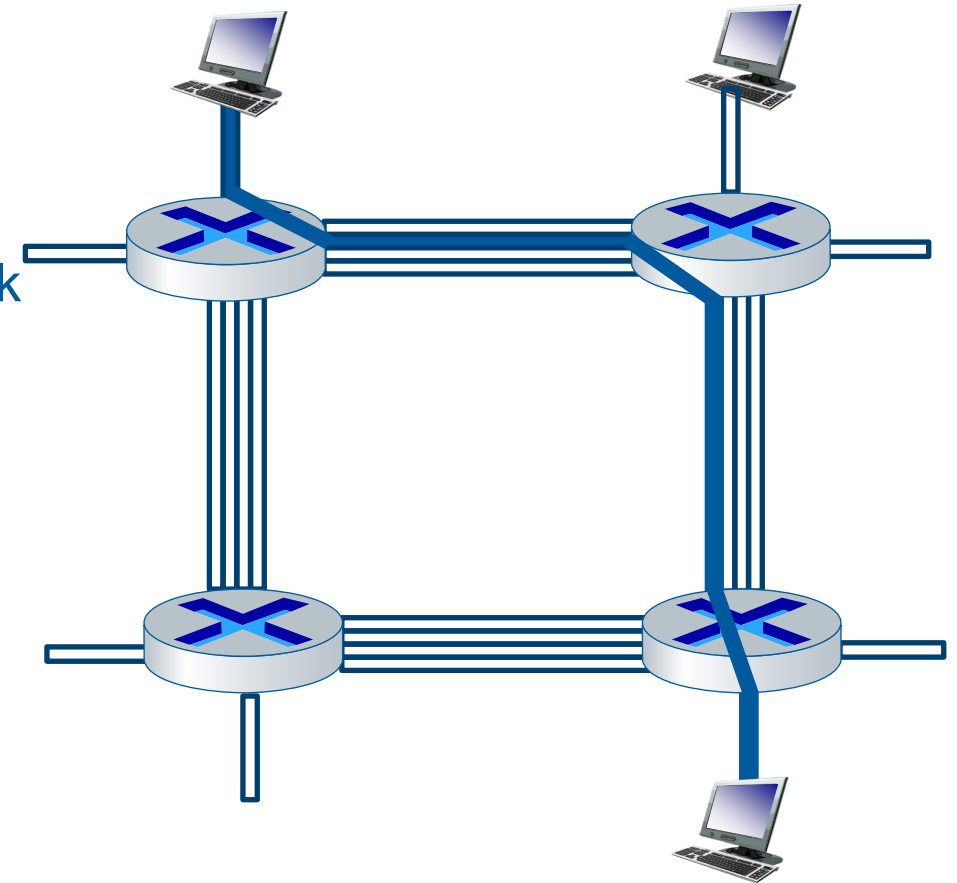


Warten und Paketverlust: falls die Ankunftsrate (in bit/s) zu einem Link die Übertragungsrate (bit/s) des Links für einige Zeit übersteigt:

- werden Pakete in der Warteschlange warten bis sie auf dem Ausgangslink übertragen werden
- können Pakete verworfen werden (Verlust), falls der Speicher (Buffer) des Routers voll läuft

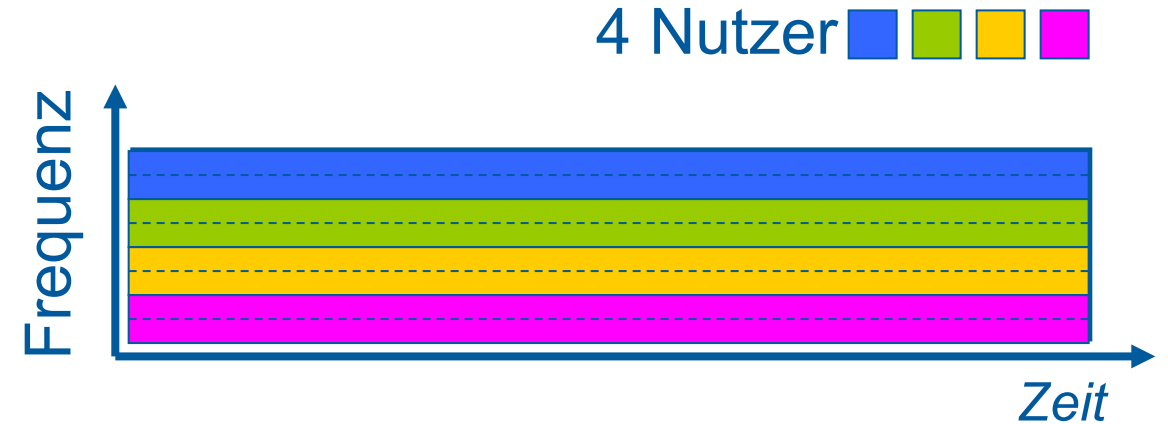
Ende-Ende Ressourcen werden für einen “Anruf” zwischen Quelle und Ziel reserviert

- im Diagramm, hat jeder Link vier Leitungen
 - Anruf bekommt 2. Leitung auf dem oberen Link und die 1. im rechten Link
- dedizierte Ressourcen: kein Teilen
 - Schaltkreis-artige (garantierte) Leistung
- ohne Anruf bleibt ein Leitungssegment ungenutzt
(kein Teilen)
 - typisch für traditionelle Telefonnetze



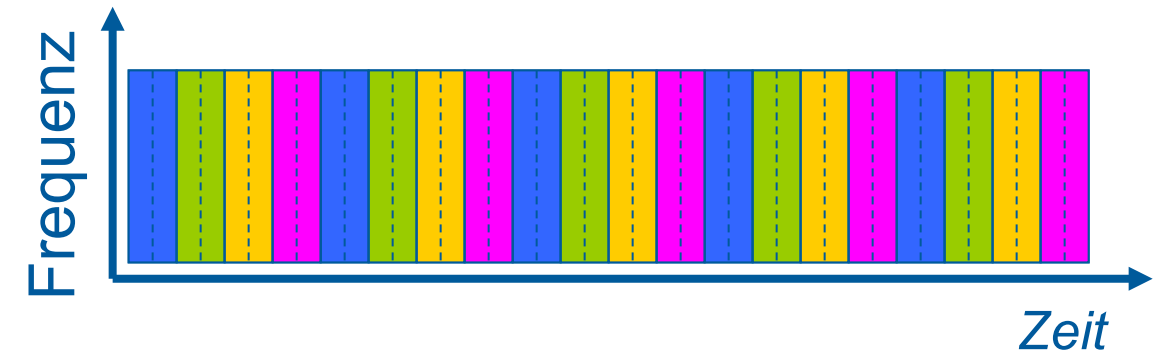
Frequency Division Multiplexing (FDM)

- Optische, elektromagnetische Frequenzen werden in (enge) Frequenzbänder unterteilt
- Jeder Anruf bekommt sein eigenes Band und kann mit der maximalen Rate dieses engen Bands übertragen



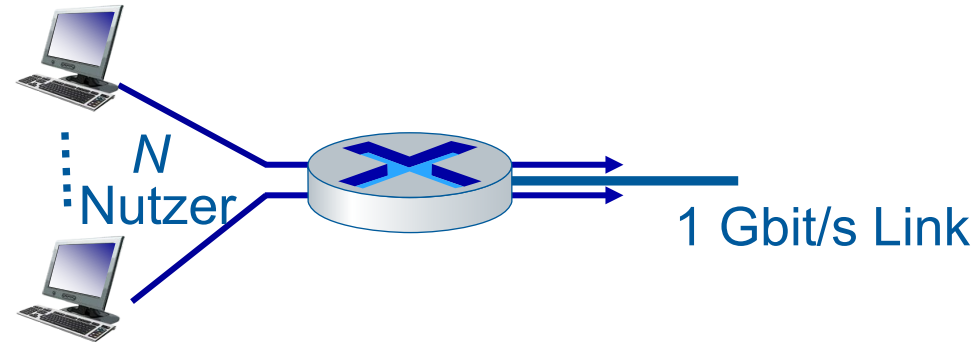
Time Division Multiplexing (TDM)

- Zeit unterteilt in Slots
- Jeder Anruf bekommt periodische(n) Slot(s) und kann mit der maximalen Rate des breiteren Frequenzbandes (nur) während dieses Slots übertragen



Beispiel:

- 1 Gbit/s Link
- jeder Nutzer:
 - 100 Mbit/s wenn “aktiv”
 - aktiv 10% der Zeit



Frage: Wieviele Nutzer können das Netz mit Leitungs- bzw. Paketvermittlung nutzen?

- **Leitungsvermittlung:** 10 Nutzer
 - **Paketvermittlung:** bei 35 Nutzern ist die Wahrscheinlichkeit für > 10 gleichzeitig aktive Nutzer weniger als 0.0004
- X: aktive Nutzer (Zufallsvariable)
 $P(X=k)$: Wahrscheinlichkeit von k aktiven Nutzern

Frage: Wie bekommen wir den Wert 0.0004?

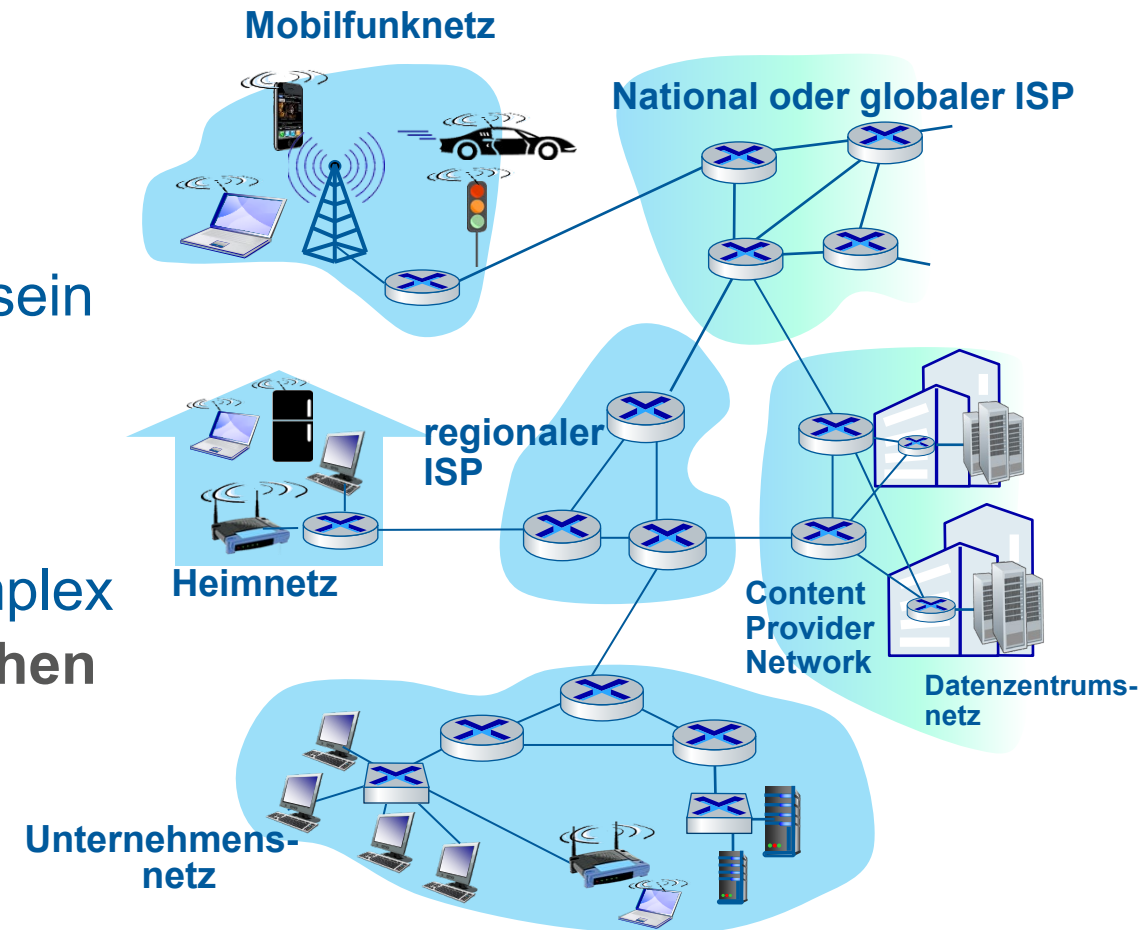
Antwort: Wahrscheinlichkeitstheorie

$$\begin{aligned} P(k > 10) &= P(X=11) + P(X=12) + \dots + P(X=35) \\ &= \sum_{k=11}^{35} \left(\frac{35!}{k!(35-k)!} \cdot (0.1)^k \cdot (0.9)^{35-k} \right) \approx 0.0004 \end{aligned}$$

Ist Paketvermittlung der klare Sieger?

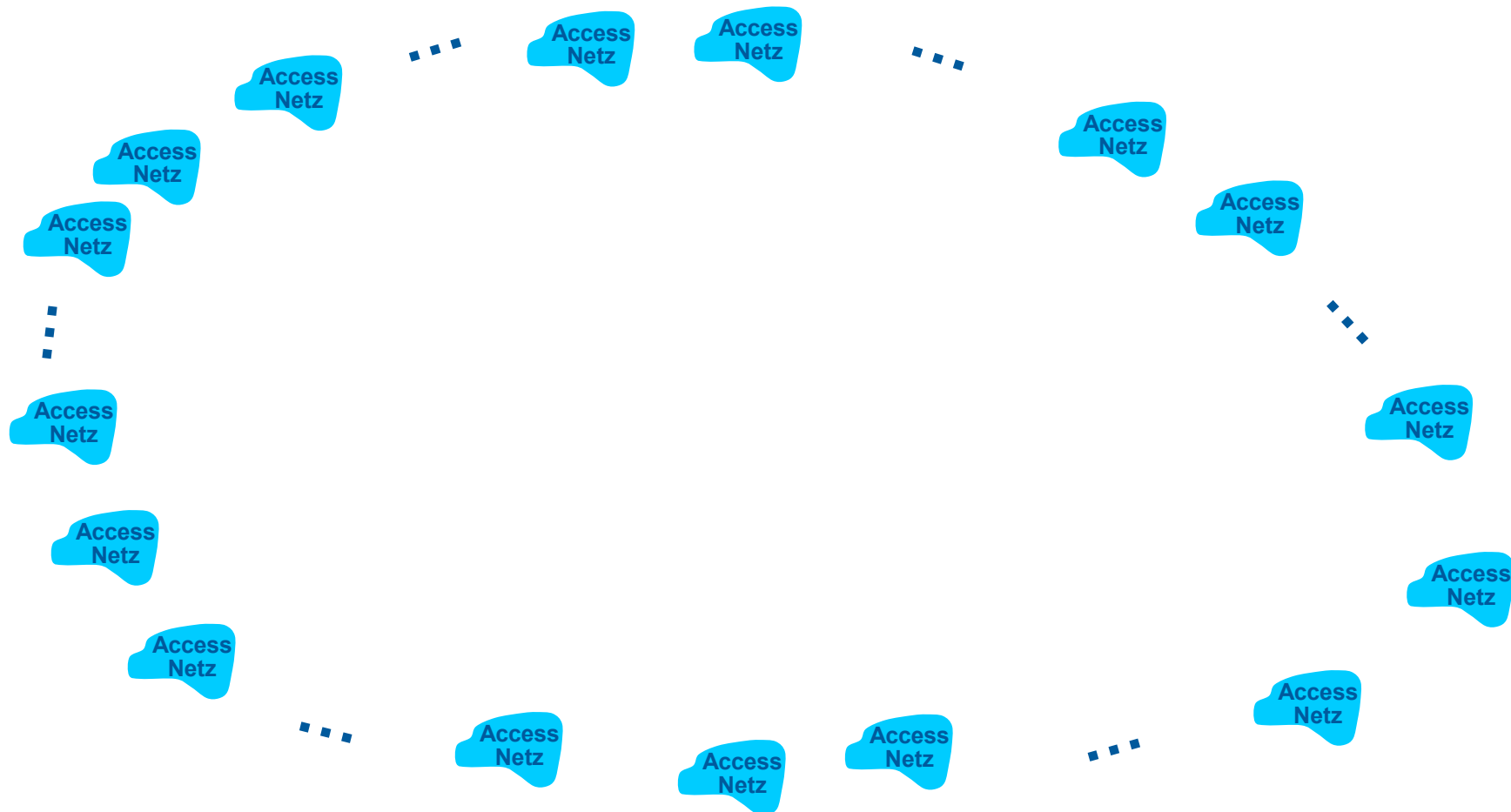
- großartig für schubartige Datenübertragung (“bursty”) – manchmal gibt es Daten zu senden, manchmal nicht
 - Teilen von Ressourcen
 - einfacher, kein Anrufsaufbau
- **exzessiver Stau möglich:** Paketverzögerung und –verlust auf Grund von überlaufenden Puffern
 - Protokolle für zuverlässige Datenübertragung und Staukontrolle benötigt
- **Frage:** Wie kann man “leitungs-artiges” Verhalten mit Paketvermittlung erreichen?
 - “It’s complicated.” Wir werden und verschiedene Techniken anschauen, die versuchen Paketvermittlung so “leitungs-artig” wie möglich zu machen.

- Hosts verbinden sich mit dem Internet via **Access** Internet Service Providers (ISPs)
- Access ISPs müssen wiederum verbunden sein
 - so dass zwei *beliebige* Hosts (*überall!*) Pakete zueinander senden können
- resultierendes Netz von Netzen ist sehr komplex
 - Entwicklung getrieben von **wirtschaftlichen Aspekten und nationaler Politik**

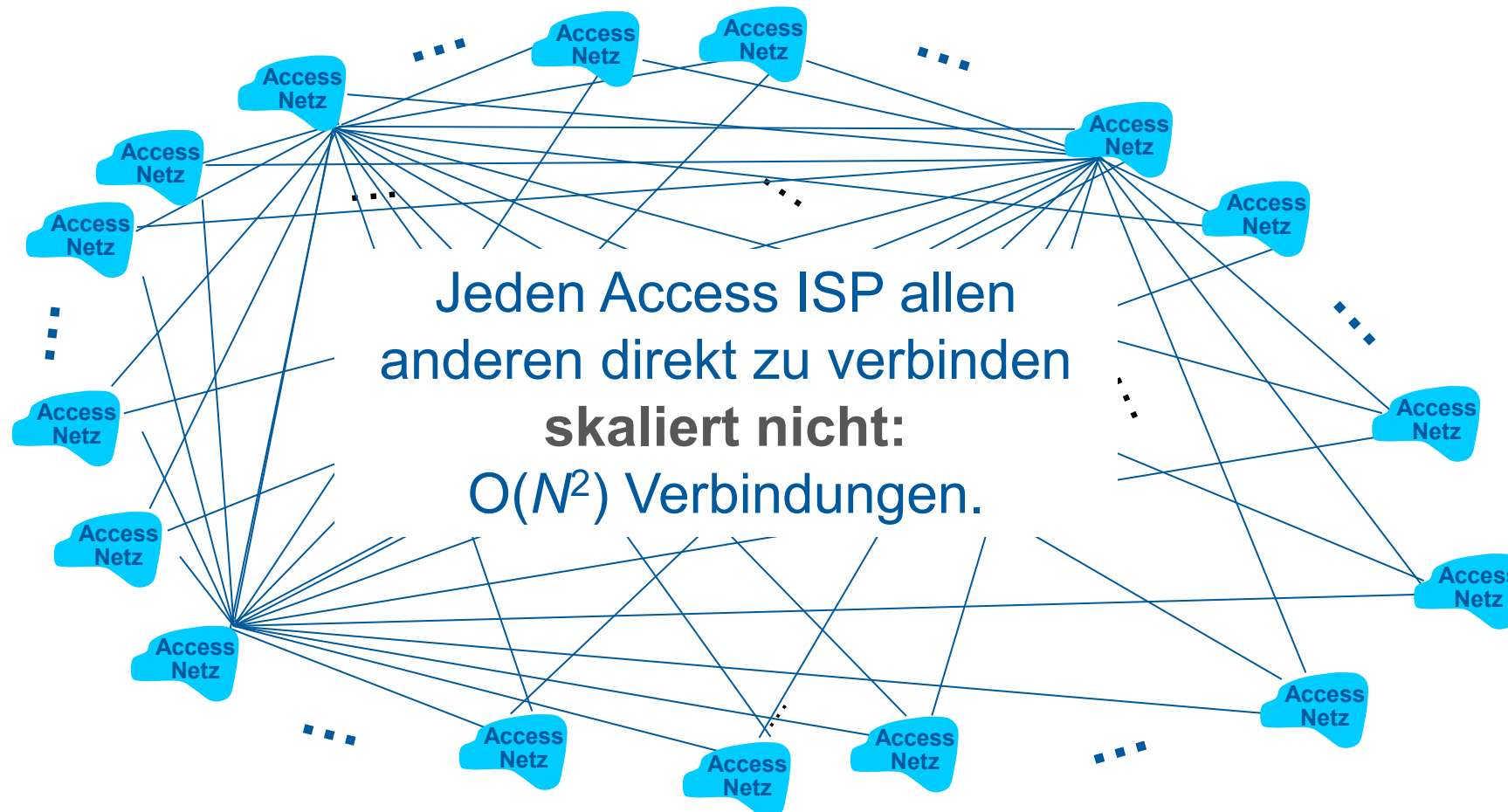


Schauen wir uns die aktuelle Internetstruktur **schrittweise** an!

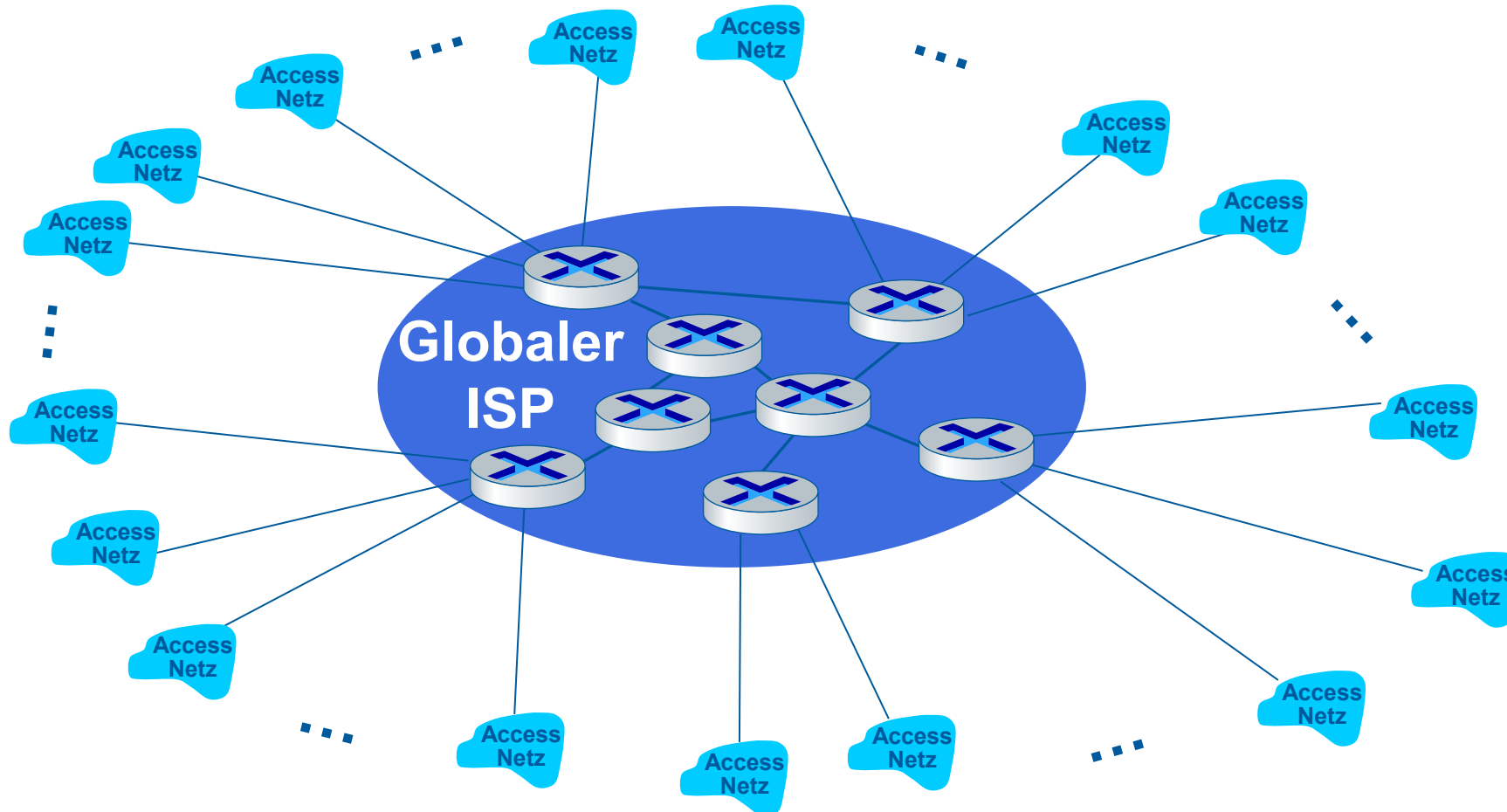
Frage: Wie verbindet man die *Millionen* von Access ISPs untereinander?



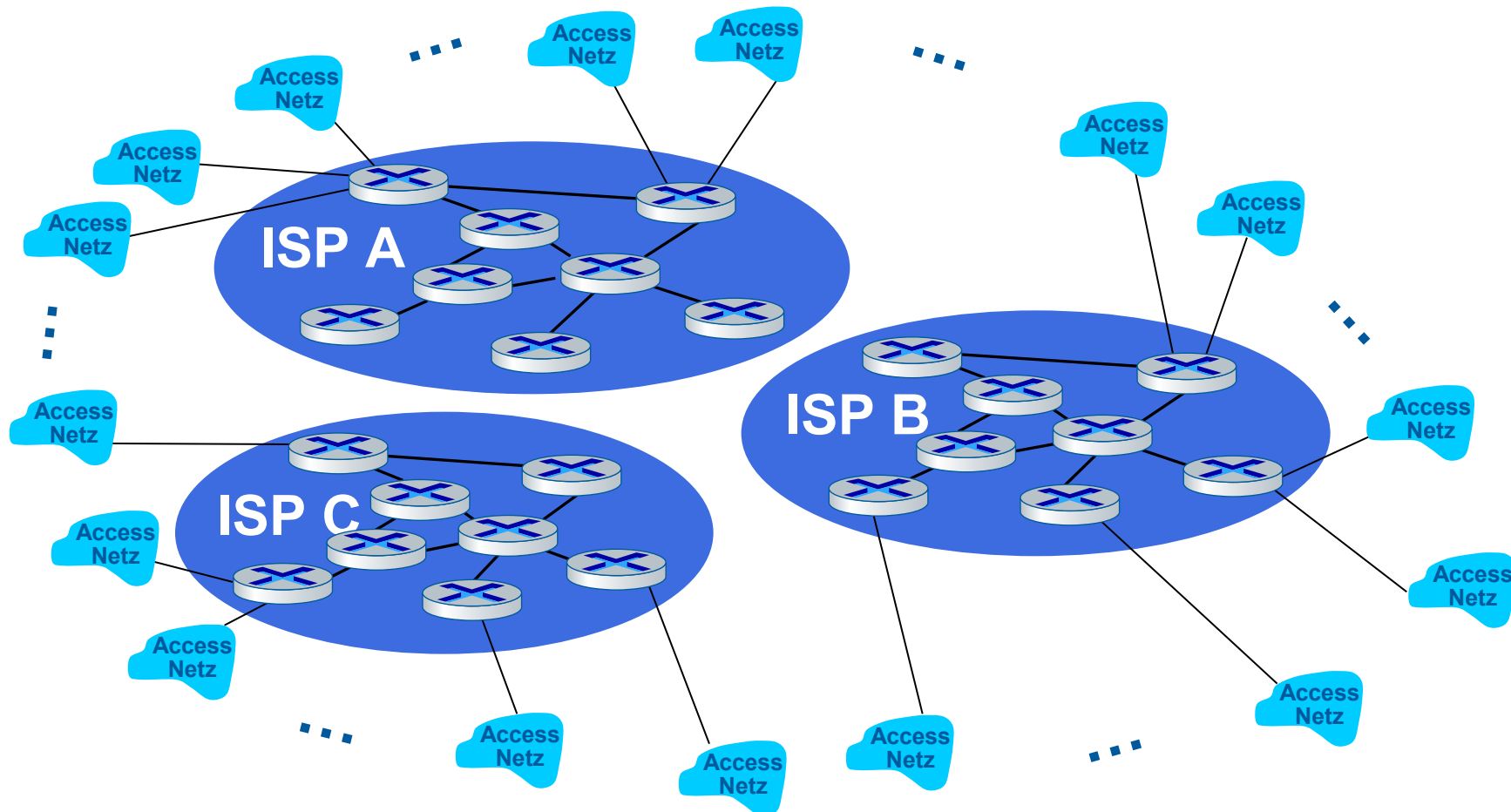
Frage: Wie verbindet man die *Millionen* von Access ISPs untereinander?



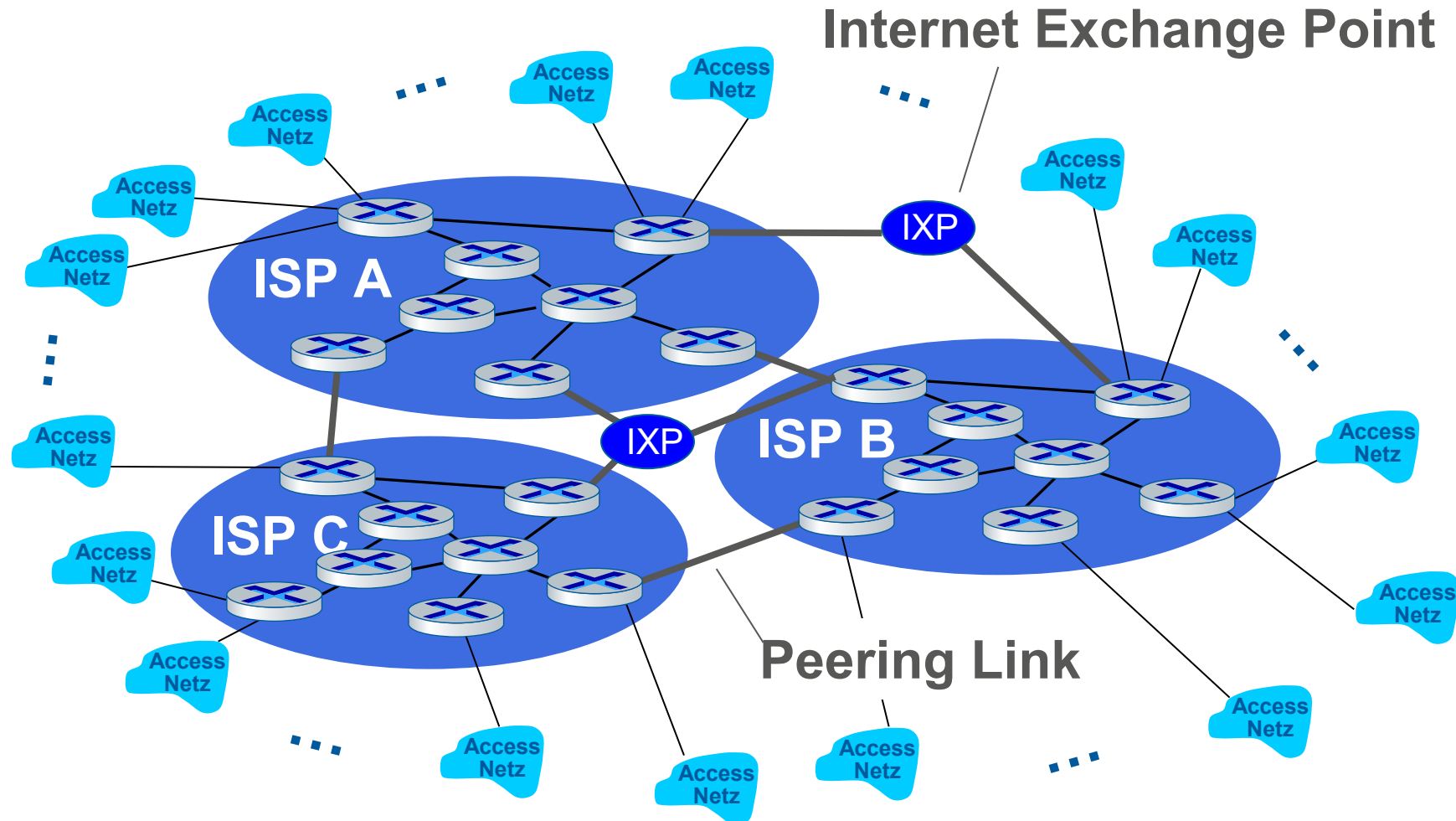
Option: Jeden Access ISP mit einem einzelnen globalen ISP verbinden?
Kunden- und Anbieter-ISPs haben einen Geschäftsabkommen.



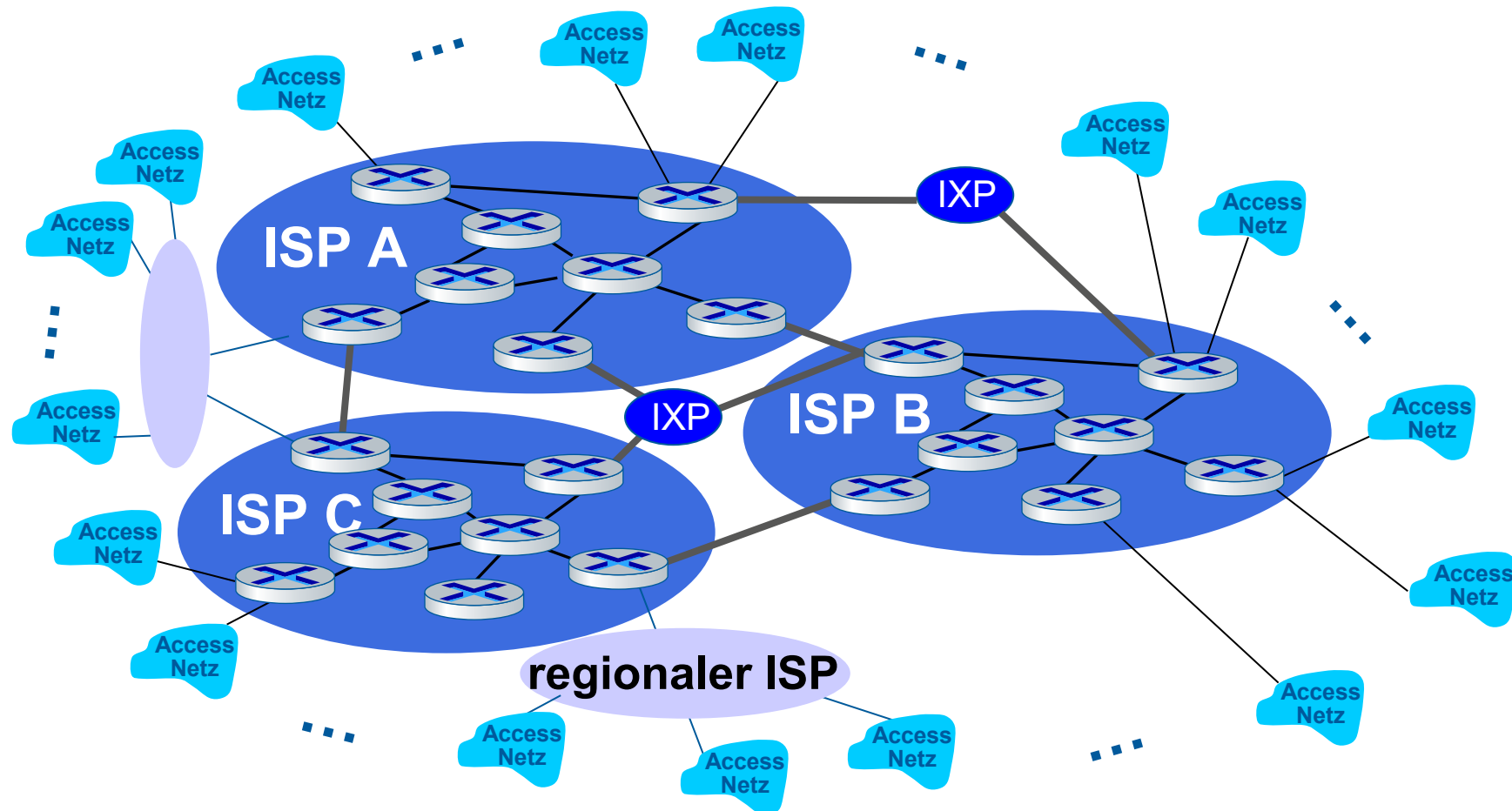
Aber, wenn ein globaler ISP gute Geschäfte macht, wird es Konkurrenz geben



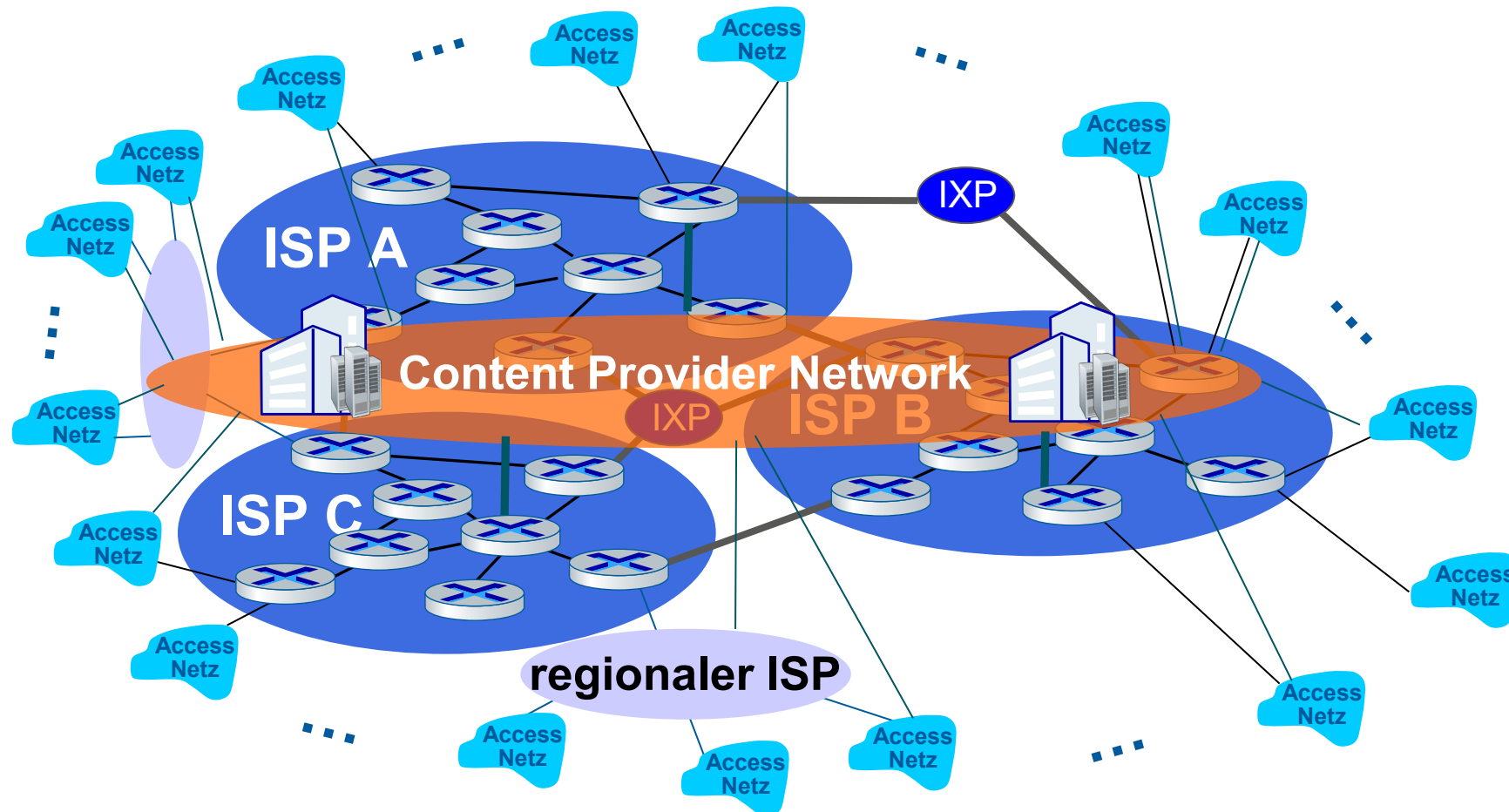
Aber, wenn ein globaler ISP gute Geschäfte macht, wird es Konkurrenz geben
die verbunden werden will

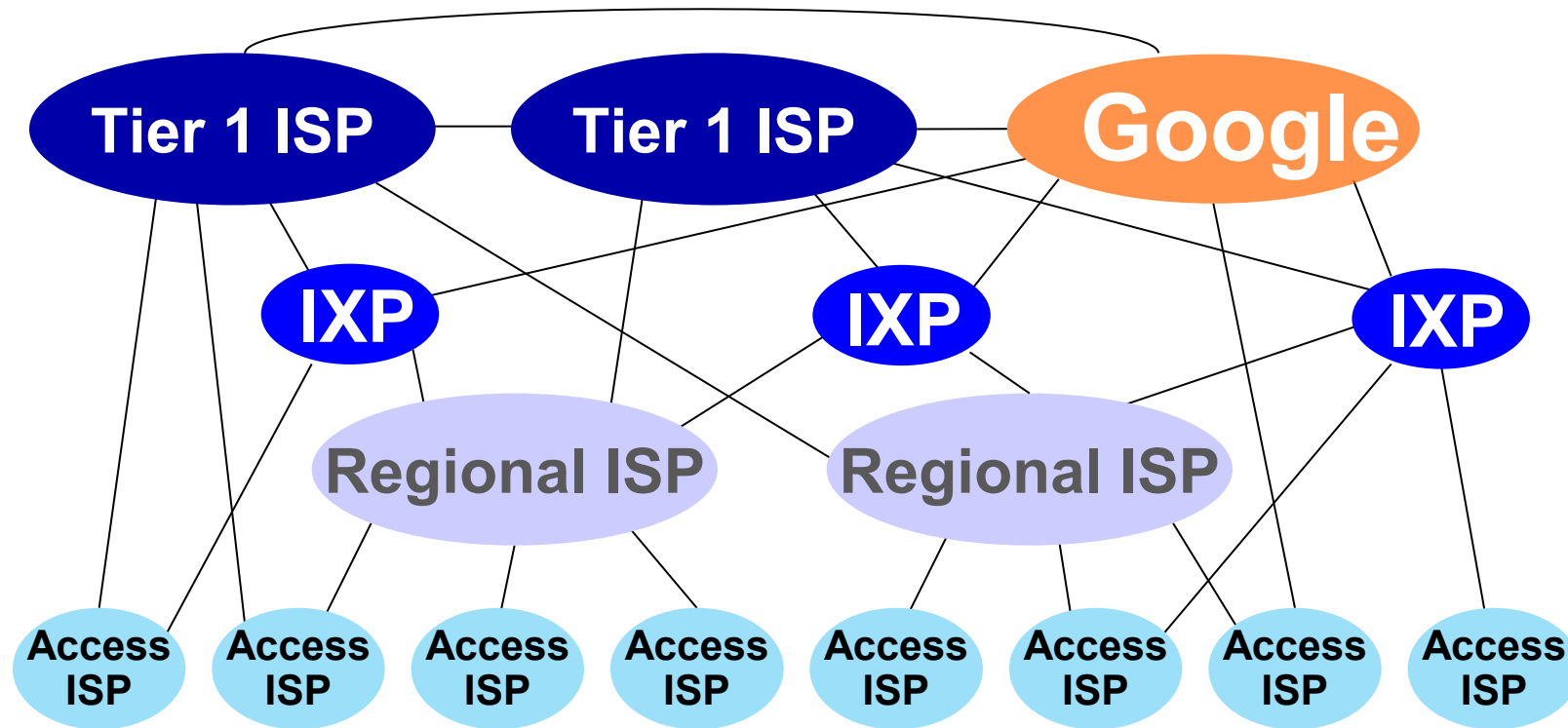


... und es mag regionale Netze geben, die Access Netze mit den ISPs verbinden



... und Inhaltenanbieter (z.B., Google, Microsoft, Akamai) können Ihre eigenen Netze betreiben, um Dienste und Inhalte näher zu den Nutzern zu bringen





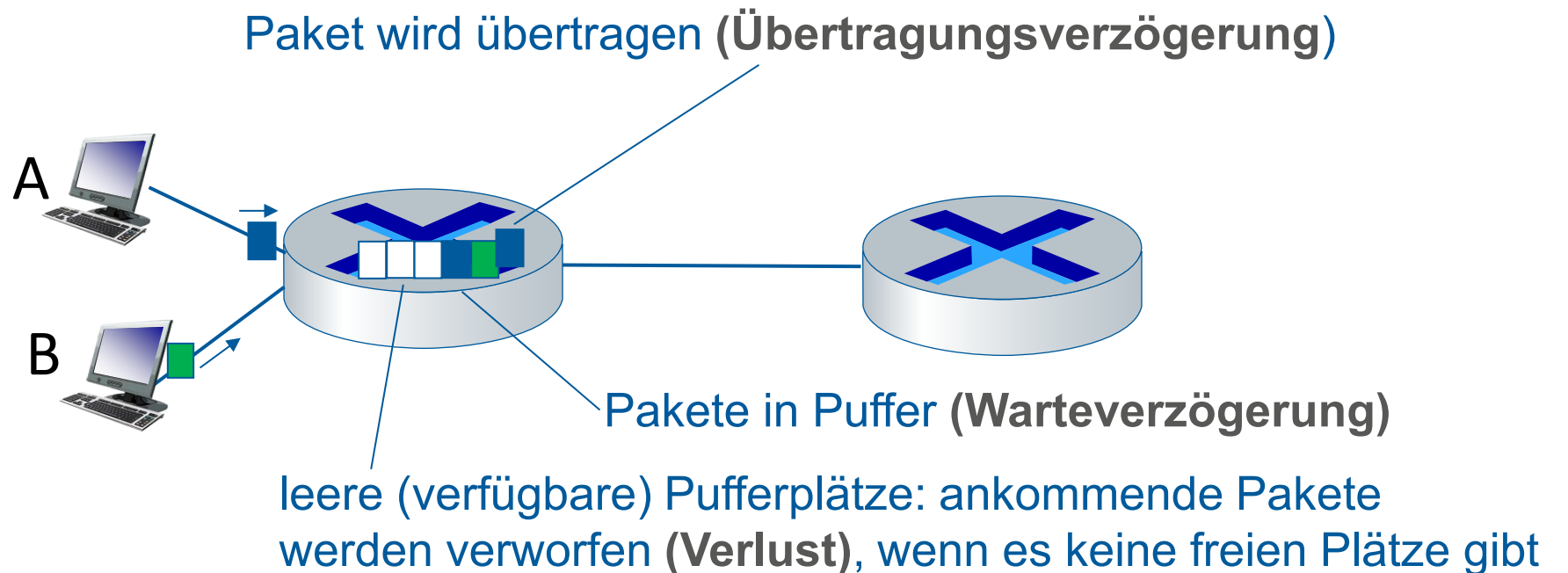
Im “Zentrum”: eine kleine Zahl von sehr gut verbundenen, großen Netzen

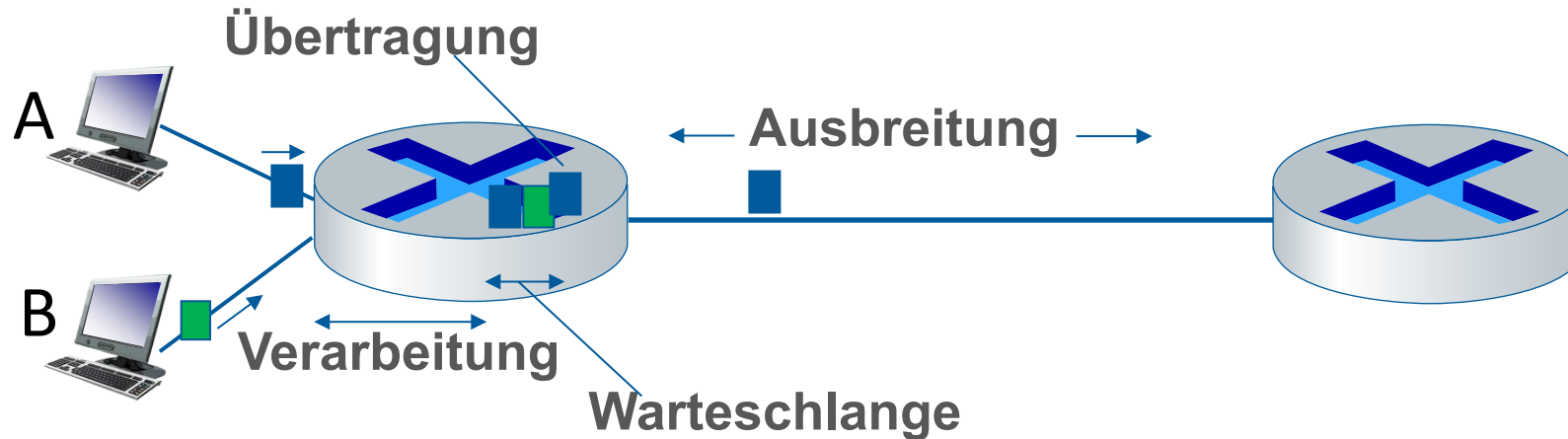
- **“Tier-1” kommerzielle ISPs** (z.B., Level 3, Sprint, AT&T, NTT), nationale & internationale Abdeckung
- **Content Provider Networks** (z.B., Google, Facebook): private Netze, die Datenzentren mit dem Internet verbinden, oft unter Umgehung von Tier-1 und regionalen ISPs



- Was ist das Internet?
- Was ist ein Protokoll?
- Netzrand (Edge): Hosts, Zugangsnetze, physische Medien
- Kernnetz: Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur
- **Leistung: Verlust, Verzögerung, Durchsatz**
- Protokollschichten, Dienstmodelle
- Geschichte

- **Pakete warten in Router-Puffern**, dass sie zur Übertragung an die Reihe kommen
 - Die Warteschlange wächst, wenn die Ankunftsrate eines Links (kurzzeitig) die Bandbreite des Links übersteigt
- **Paketverlust findet statt, wenn der Speicher (Puffer) voll ist**





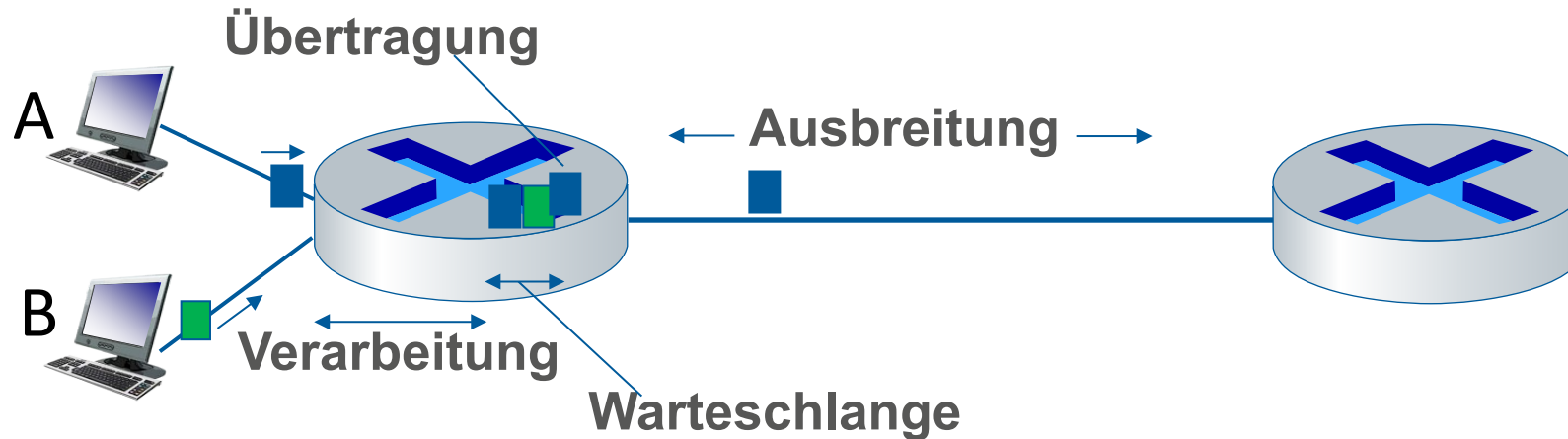
$$d_{\text{Knoten}} = d_{\text{Verarbeitung}} + d_{\text{Warteschlange}} + d_{\text{Übertragung}} + d_{\text{Ausbreitung}}$$

$d_{\text{Verarbeitung}}$: Verarbeitung im Knoten

- Bitfehler Überprüfung
- Ausgangslink bestimmen
- typischerweise $< 1 \text{ ms}$

$d_{\text{Warteschlange}}$: Warteverzögerung

- Wartezeit am Ausgangslink auf Übertragung
- Hängt von der Lastsituation des Knoten (Routers) ab



$$d_{\text{Knoten}} = d_{\text{Verarbeitung}} + d_{\text{Warteschlange}} + d_{\text{Übertragung}} + d_{\text{Ausbreitung}}$$

$d_{\text{Übertragung}}$: **Übertragungsverzögerung:**

- L : Paketlänge (Bits)
- R : Link Übertragungsrate (bps)

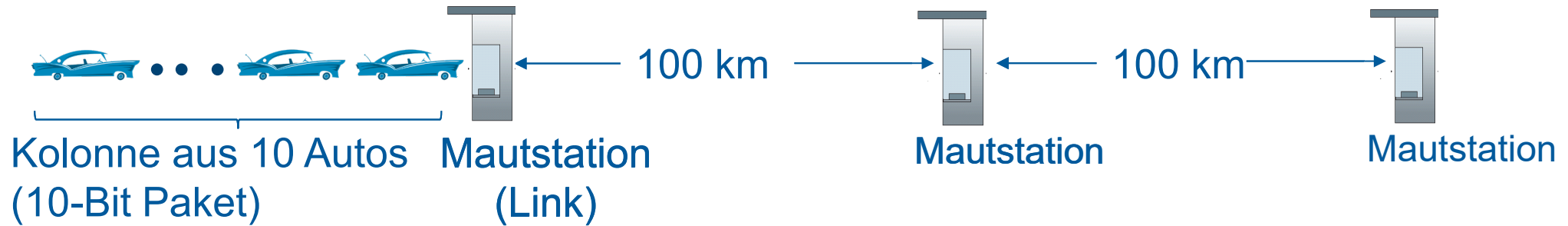
$$d_{\text{Übertragung}} = L/R$$

$d_{\text{Ausbreitung}}$: **Ausbreitungsverzögerung:**

- d : Länge des physischen Link
- s : Ausbreitungsgeschwindigkeit ($\sim 2 \times 10^8$ m/s)

$$d_{\text{Ausbreitung}} = d/s$$

$d_{\text{Übertragung}}$ und $d_{\text{Ausbreitung}}$
sehr verschieden

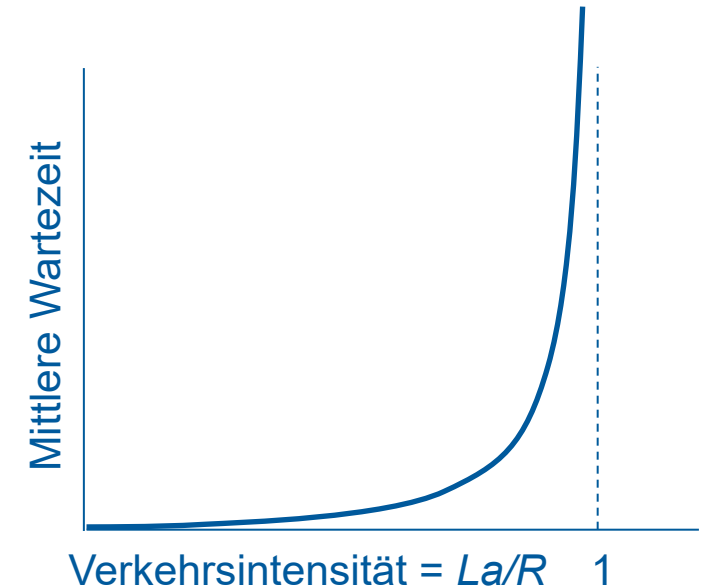


- Auto ~ Bit; Kolonne ~ Paket; Mautzahlung ~ Linkübertragung
- Mautstation benötigt 12 s für ein Auto (Bit Übertragungszeit)
- “Ausbreitung” mit 100 km/h
- **Frage:** Wie lange dauert es bis die Kolonne vor der zweiten Mautstation steht?
- Zeit die gesamte Kolonne durch die Mautstation auf die Autobahn zu “schieben” = $12\text{s} \cdot 10 = 120\text{ s}$
- Zeit, die das letzte Auto benötigt, um von der ersten zur zweiten Mautstation zu fahren: $100\text{km} / (100\text{km/h}) = 1\text{ h}$
- **Antwort:** 62 Minuten

- a : durchschnittliche Paketankunftsrate
- L : Paketlänge (Bits)
- R : Link Bandbreite (Bitübertragungsrate)

$$\frac{L \cdot a}{R} : \frac{\text{Ankunftsrate von Bits}}{\text{Verarbeitungsrate von Bits}}$$

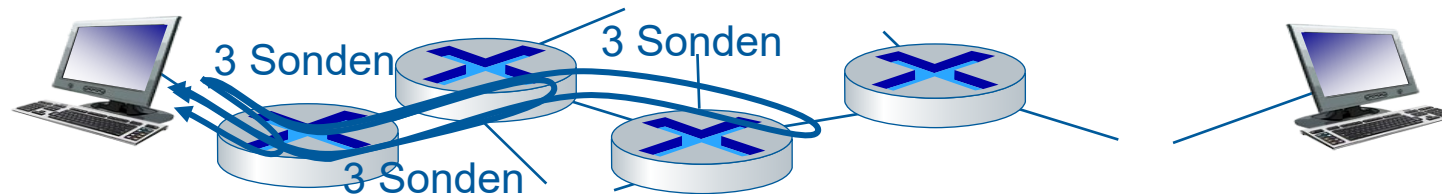
“Verkehrsintensität”



- $La/R \sim 0$: kurze mittlere Wartezeit
- $La/R \rightarrow 1$: lange mittlere Wartezeit
- $La/R > 1$: mehr “Arbeit” kommt an als erledigt werden kann
→ Mittlere Wartezeit unendlich!



- Wie sehen “echte” Internet Laufzeiten & Verluste aus?
- **Traceroute**-Programm: stellt Verzögerungsmessung von der Quelle zu allen Routern entlang des Ende-zu-Ende Pfades zum Ziel zur Verfügung.
Für alle i :
 - sendet drei Pakete die Router i auf dem Weg zum Ziel erreichen (mit Time-To-Live Feld mit Wert i)
 - Router i wird jeweils eine Antwort an den Sender zurückschicken
 - Der Sender misst die Zeitdauer zwischen Übertragung und Antwort

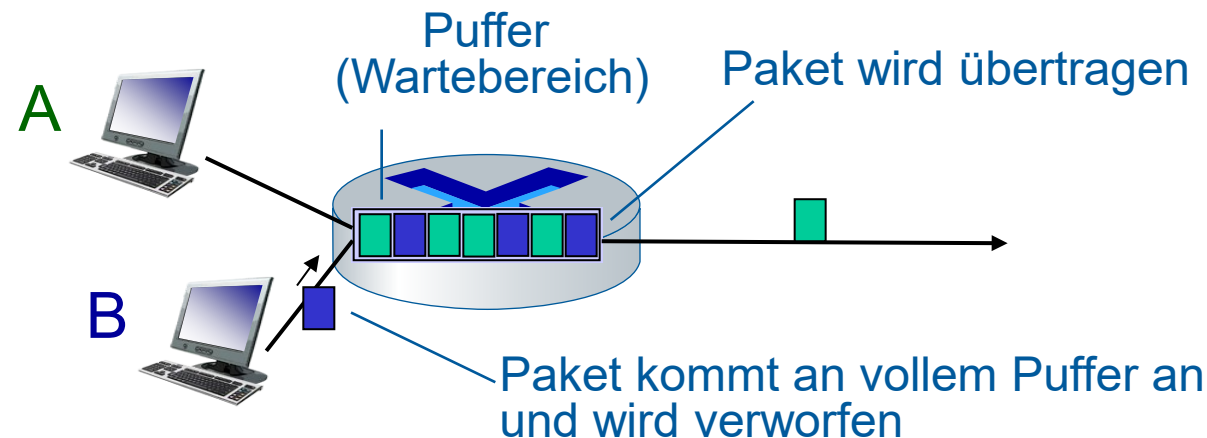


traceroute (Linux/macOS) / tracert (Windows): THI (mein Büro) nach stanford.edu

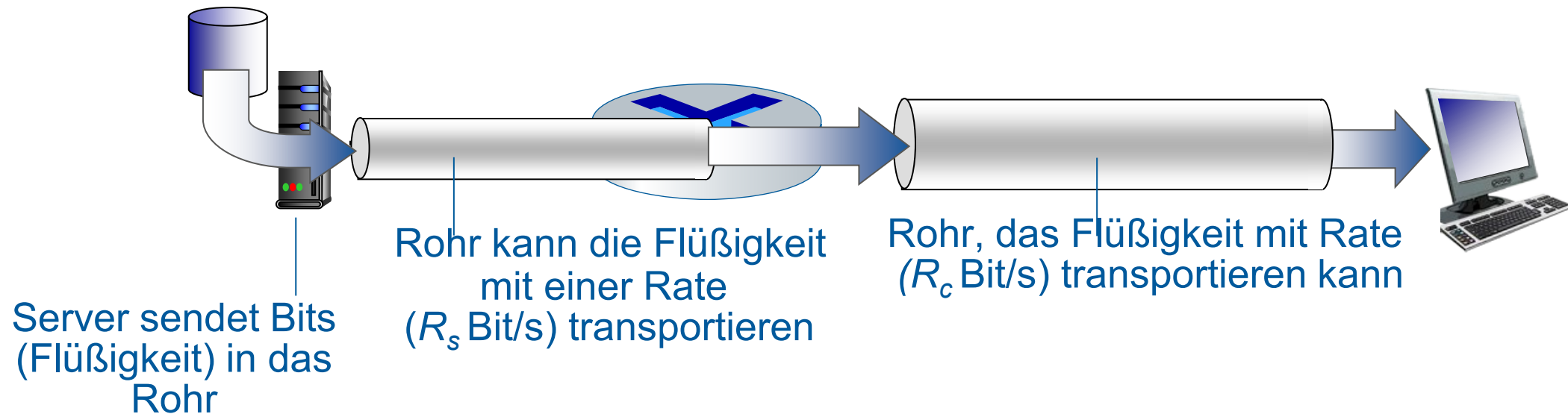
3 Verzögerungsmessungen zum 1. Hop

1	4 ms	3 ms	4 ms	10.80.23.254	
2	*	*	*	Request timed out.	* bedeutet keine Antwort (Sonde verloren, Router antwortet nicht)
3	1 ms	1 ms	1 ms	10.200.1.10	
4	1 ms	1 ms	1 ms	172.17.201.10	
5	1 ms	1 ms	1 ms	194.94.240.1	
6	7 ms	7 ms	7 ms	cr-erl2-pwether10459.x-win.dfn.de [188.1.235.57]	DFN (Deutsches Forschungsnetz) Erlangen
7	10 ms	10 ms	10 ms	cr-fra2-be11.x-win.dfn.de [188.1.144.222]	DFN (Deutsches Forschungsnetz) Frankfurt
8	20 ms	20 ms	20 ms	dfn.mx1.fra.de.geant.net [62.40.124.217]	
9	22 ms	34 ms	25 ms	ae7.mx1.ams.nl.geant.net [62.40.98.186]	
10	114 ms	114 ms	113 ms	internet2-gw.mx1.ams.nl.geant.net [62.40.124.47]	Transatlantik-Link
11	*	*	*	Request timed out.	
12	*	*	*	Request timed out.	
13	125 ms	125 ms	126 ms	ae-20.4079.rts.clev.net.internet2.edu [162.252.70.129]	Internet2 Cleveland
14	125 ms	197 ms	125 ms	ae-3.4079.rts3.eqch.net.internet2.edu [162.252.70.131]	
15	125 ms	126 ms	125 ms	ae-1.4070.rts.chic.net.internet2.edu [64.57.28.104]	Internet2 Chicago
16	136 ms	136 ms	135 ms	ae-3.4079.rts.kans.net.internet2.edu [162.252.70.141]	Internet2 Kansas City
17	170 ms	169 ms	170 ms	ae-5.4079.rts.salt.net.internet2.edu [162.252.70.145]	Internet2 Salt Lake City
18	170 ms	170 ms	169 ms	ae-1.4079.rts.losa.net.internet2.edu [162.252.70.114]	Internet2 Los Angeles
19	*	*	*	Request timed out.	
20	174 ms	169 ms	173 ms	hpr-lax-agg10--i2.cenic.net [137.164.26.200]	
21	177 ms	177 ms	177 ms	hpr-svl-agg10--lax-agg10-100ge.cenic.net [137.164.25.74]	
22	177 ms	177 ms	177 ms	hpr-stan--svl-hpr3-100ge.cenic.net [137.164.27.61]	
23	177 ms	178 ms	178 ms	woa-west-rtr-vl3.SUNet [171.66.255.132]	Stanford University Network
24	*	*	*	Request timed out.	
25	200 ms	182 ms	197 ms	web.stanford.edu [171.67.215.200]	

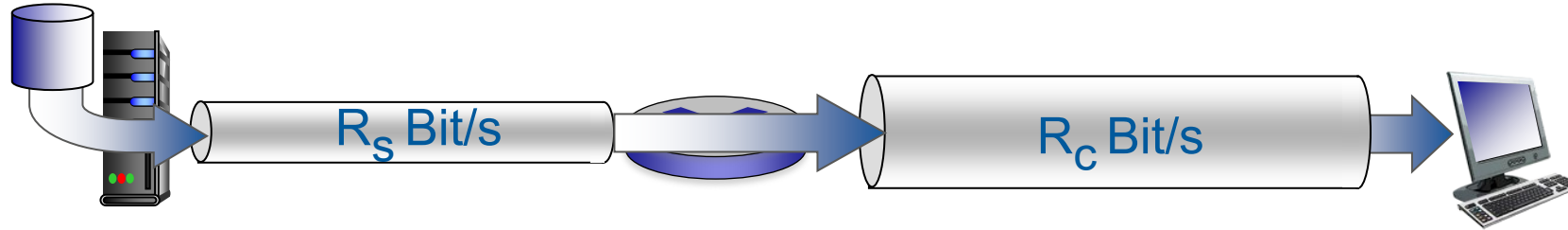
- Warteschlange (Puffer) vor dem Link hat eine endliche Kapazität
- Paket, das bei Ankunft eine volle Warteschlange vorfindet, wird verworfen (ist verloren)
- Verlorene Pakete können vom vorherigen Knoten, vom Quellhost, oder gar nicht erneut übertragen werden



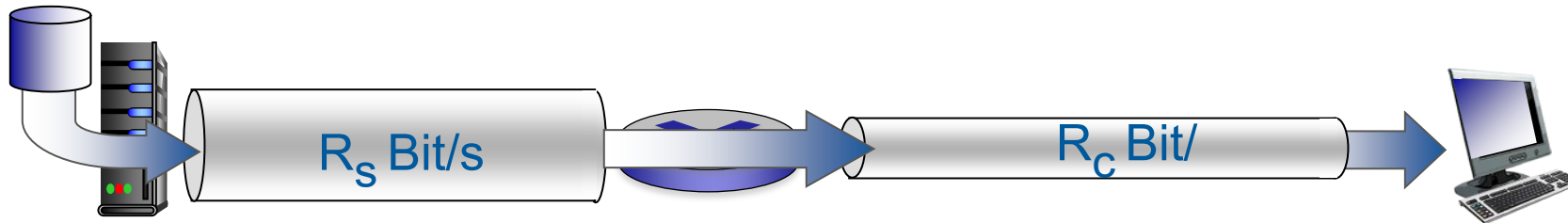
- **Durchsatz:** Rate (Bit/Zeiteinheit) mit der Bits vom Sender zum Empfänger geschickt werden
 - **Momentanwert:** Rate zu beliebigem Zeitpunkt
 - **Durchschnittsrate:** Rate über einen längeren Zeitraum hinweg



$R_s < R_c$ Wie hoch ist der durchschnittliche Ende-zu-Ende Durchsatz?

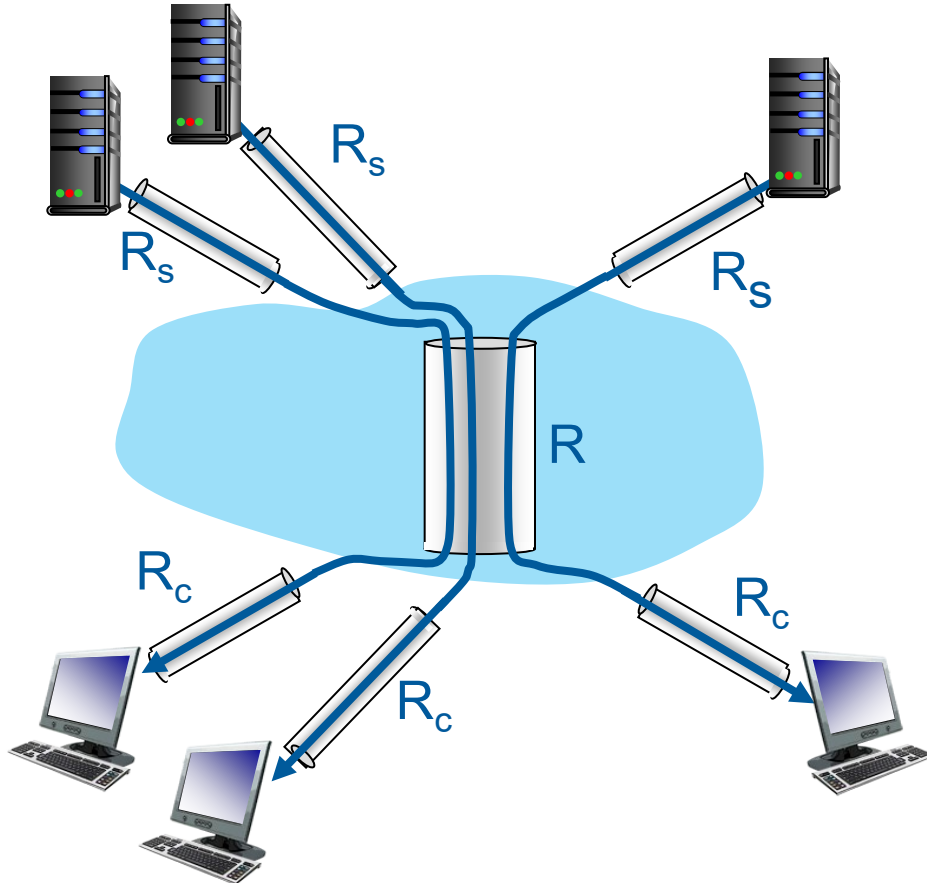


$R_s > R_c$ Wie hoch ist der durchschnittliche Ende-zu-Ende Durchsatz?



Flaschenhals Link

Link auf dem Ende-zu-Ende Pfad, der den
Ende-zu-Ende Durchsatz beschränkt



10 Verbindungen teilen sich den
Flaschenhals-Link mit R Bit/s im
Backbone (fair) auf

- Ende-zu-Ende Durchsatz pro Verbindung: $\min(R_c, R_s, R/10)$
- In der Praxis: R_c oder R_s sind oft die Flaschenhalse



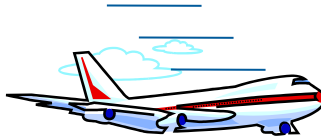
- Was ist das Internet?
- Was ist ein Protokoll?
- Netzrand (Edge): Hosts, Zugangsnetze, physische Medien
- Kernnetz: Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur
- Leistung: Verlust, Verzögerung, Durchsatz
- **Protokollschichten, Dienstmodelle**
- Geschichte



Netze sind komplex mit vielen “Teilen”:

- Hosts
- Router
- Links über verschiedene Medien
- Applikationen
- Protokolle
- Hardware, Software

Frage: Gibt es eine Hoffnung auf eine **Organisations**struktur des Netzes?



Ende-zu-Ende Transport von Person mit Gepäck →



Wie würde man das System Flugverkehr definieren?

- eine Abfolge von Schritten unter Nutzung vieler Dienste



Schichten: jede Schicht implementiert einen Dienst

- mit ihren eigenen internen Aktionen
- sich auf die Dienste der darunter liegenden Schichten verlassend

Ansatz für das Design komplexer Systeme:

- klare Struktur ermöglicht Identifizierung, in Beziehung setzen von Systemteilen
 - Geschichtetes **Referenzmodell**
- Modularisierung vereinfacht Wartung und Aktualisierung des Systems
 - Änderung in der Dienst-*Implementierung*: transparent für den Rest des Systems
 - z.B., Änderung des Boardingprozesses beeinflusst nicht den Rest des Systems

Zwei der Schichten fehlen im Internet Modell!

- **Präsentation:** erlaubt Anwendungen die Bedeutung von Daten zu interpretieren, z.B., Verschlüsselung, Komprimierung, maschinen-spezifische Konventionen
- **Sitzung:** Synchronisierung, Kontrollpunkte, Wiederherstellen von Datenaustausch
- Dem Internet Stapel “fehlen” diese Schichten!
 - diese Dienste müssen, *sofern benötigt*, in der Applikation implementiert werden
 - Benötigt?



Das 7-Schichten ISO/OSI
Referenzmodell

- **Anwendung (Application):** unterstützen Netzanwendungen
 - HTTP, IMAP, SMTP, DNS
- **Transport (Transport):** Prozess-zu-Prozess Datenübertragung
 - TCP, UDP
- **Vermittlung (Network):** Routen von Datagrammen von Quelle zum Ziel
 - IP, Routingprotokolle
- **Sicherung (Link):** Datenübertragung zwischen benachbarten Netzelementen
 - Ethernet, 802.11 (WiFi), PPP
- **Bitübertragung (Physical):** Bits “auf der Leitung”

Anwendung

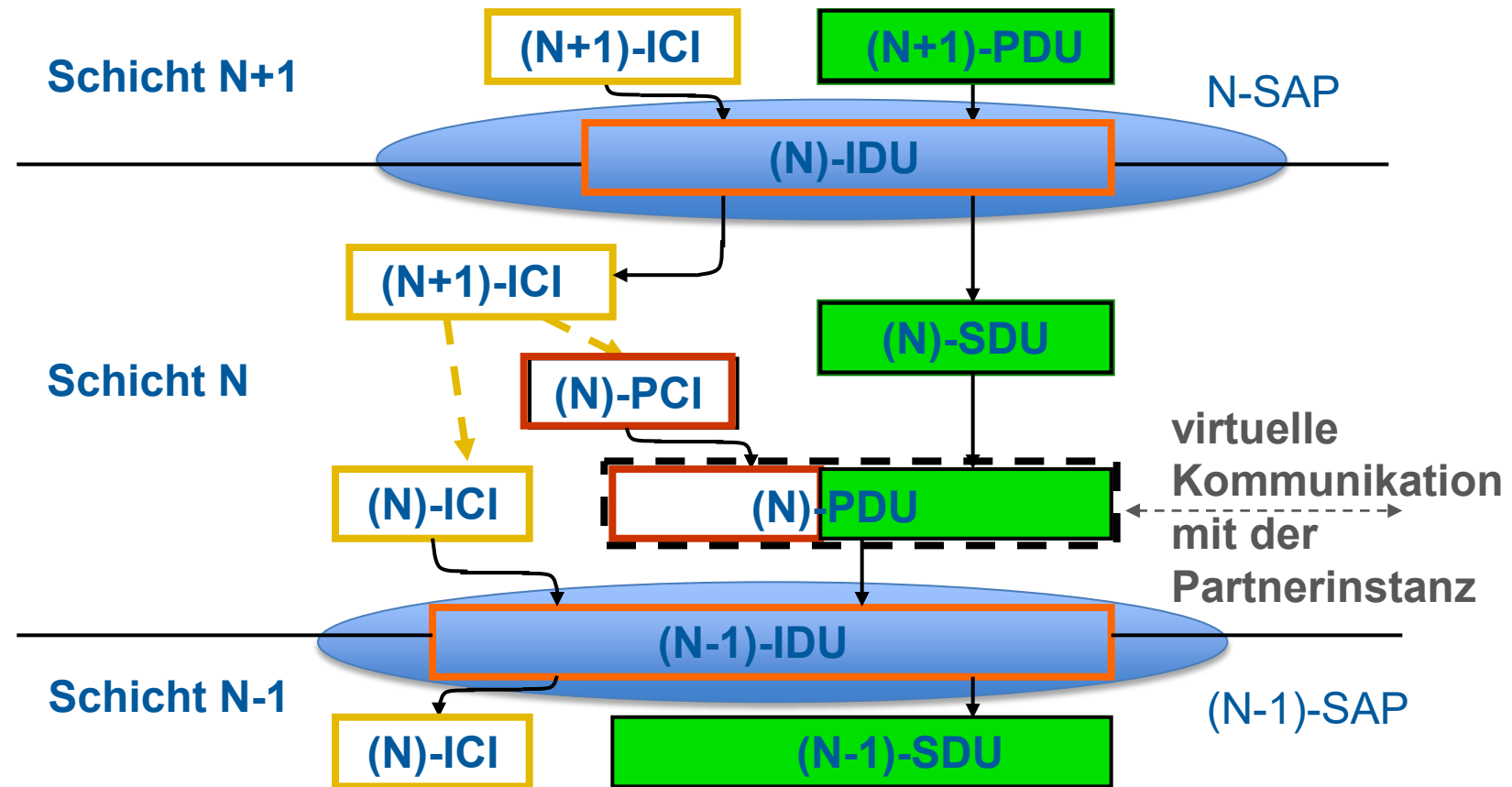
Transport

Vermittlung

Sicherung

Bitübertragung

Bildung der Nachrichtepakete (Data Unit)



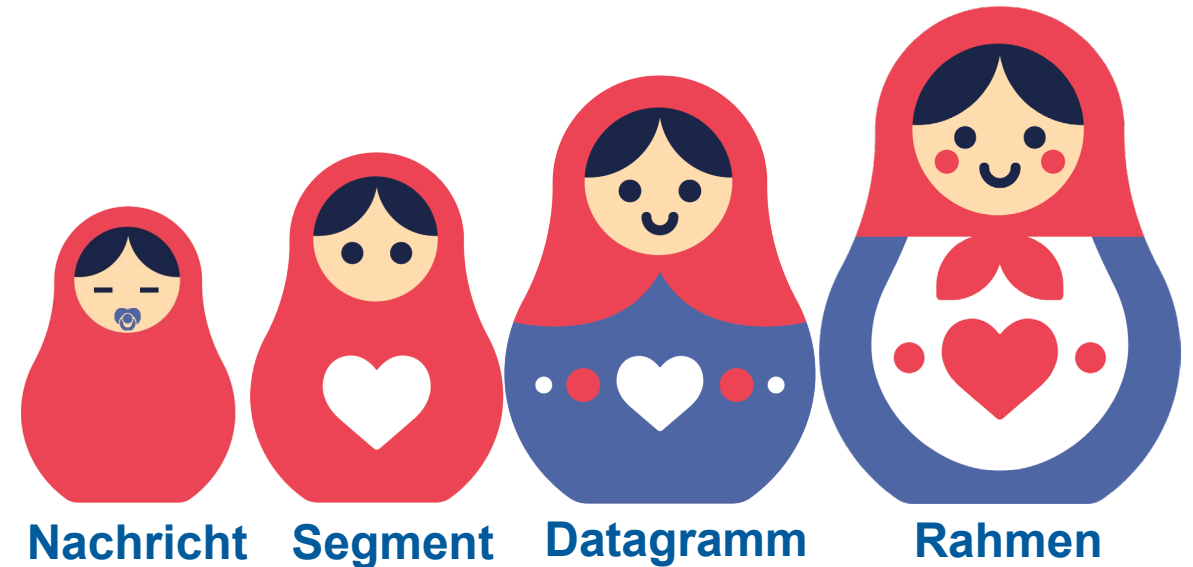
vertikale Steuerinformation
horizontale Steuerinformation

Nutzinformation
(für untergeordnete Instanz transparent)

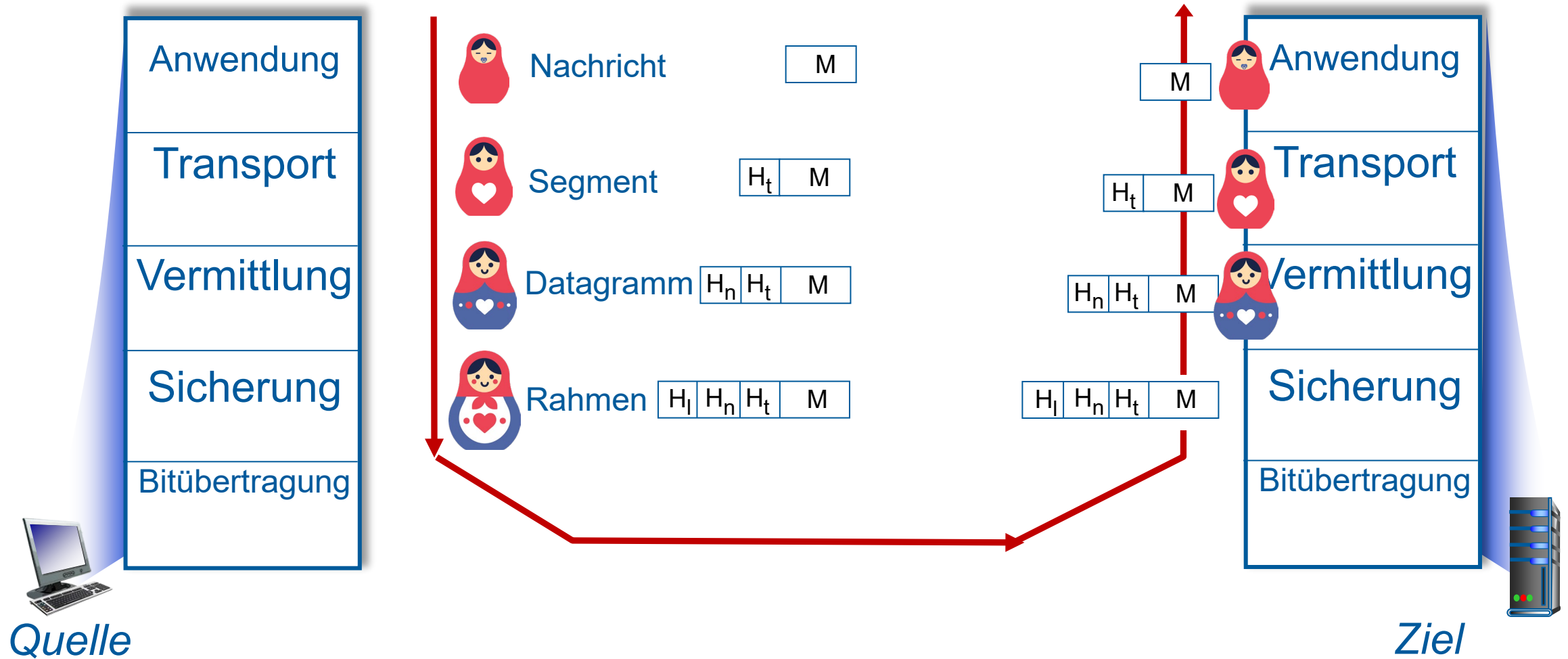
ICI: Interface Control Information
IDU Interface Data Unit

SDU: Service Data Unit
PDU: Protocol Data Unit
PCI Protocol Control Information

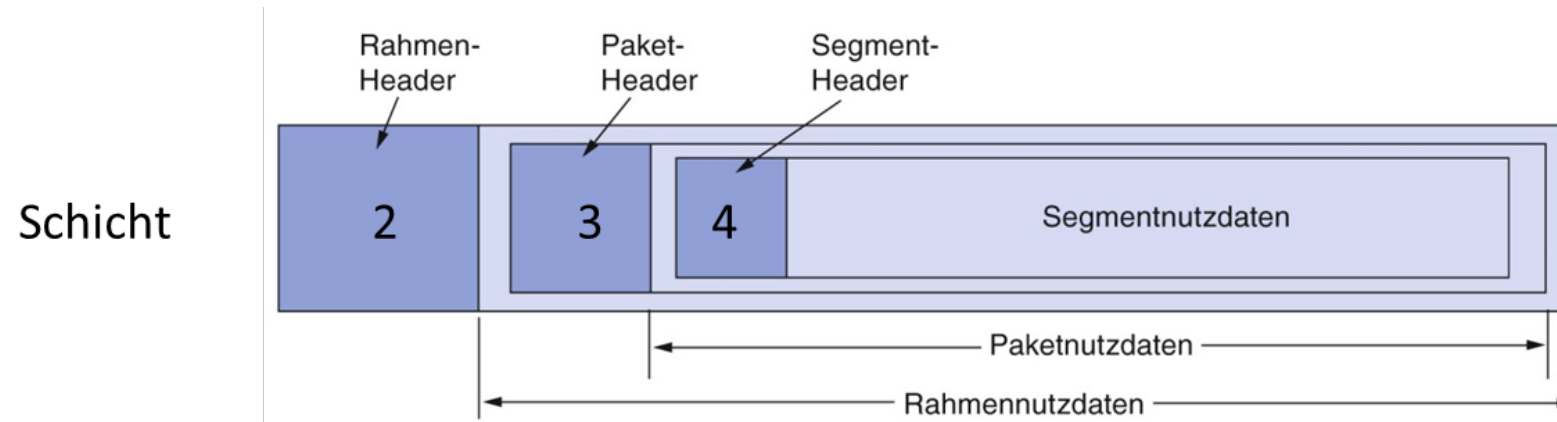
Matryoshka Puppen



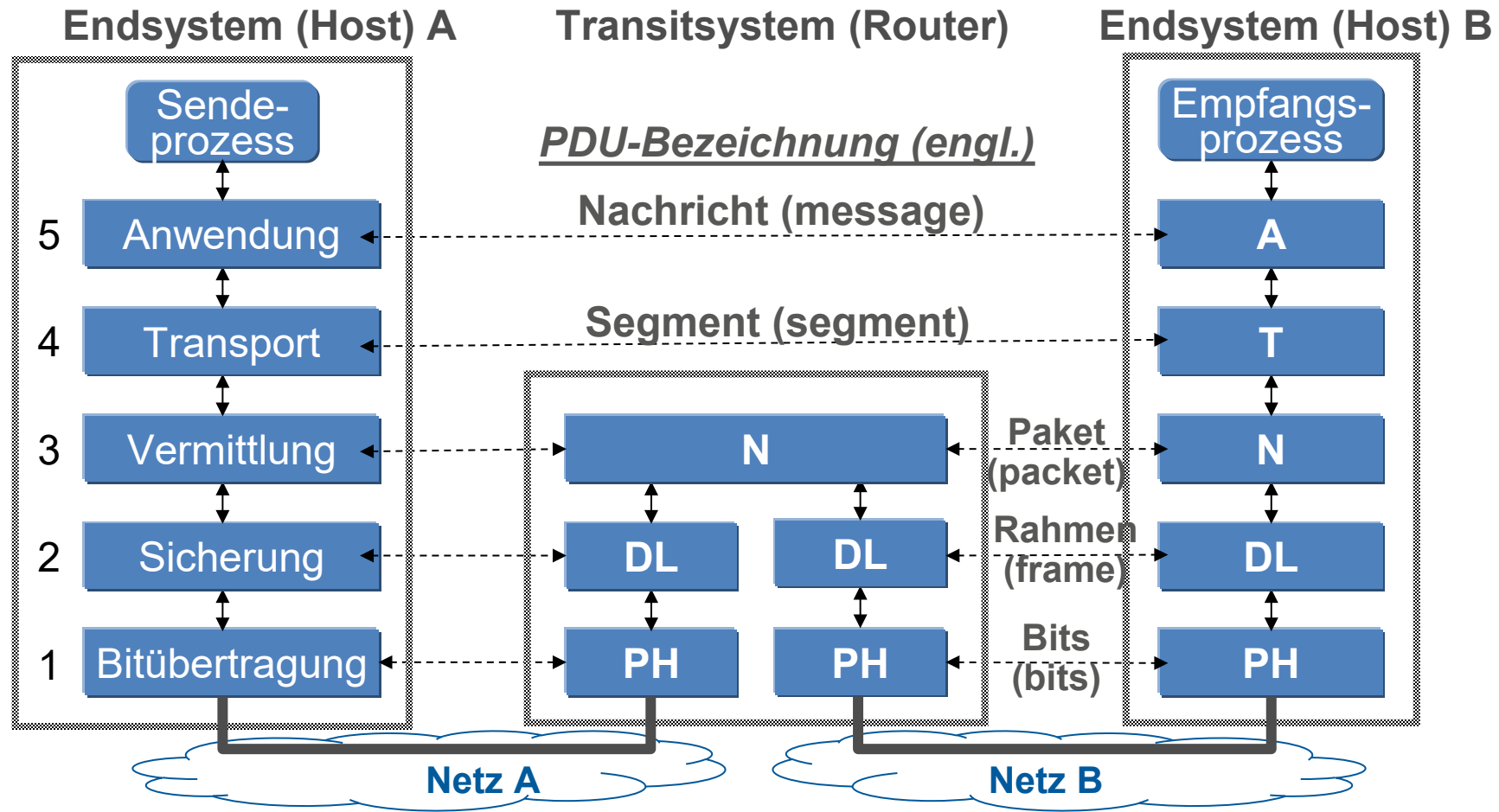
<https://dribbble.com/shots/7182188-Babushka-Boi>



Struktur eines Ethernet-Frames mit TCP-IP

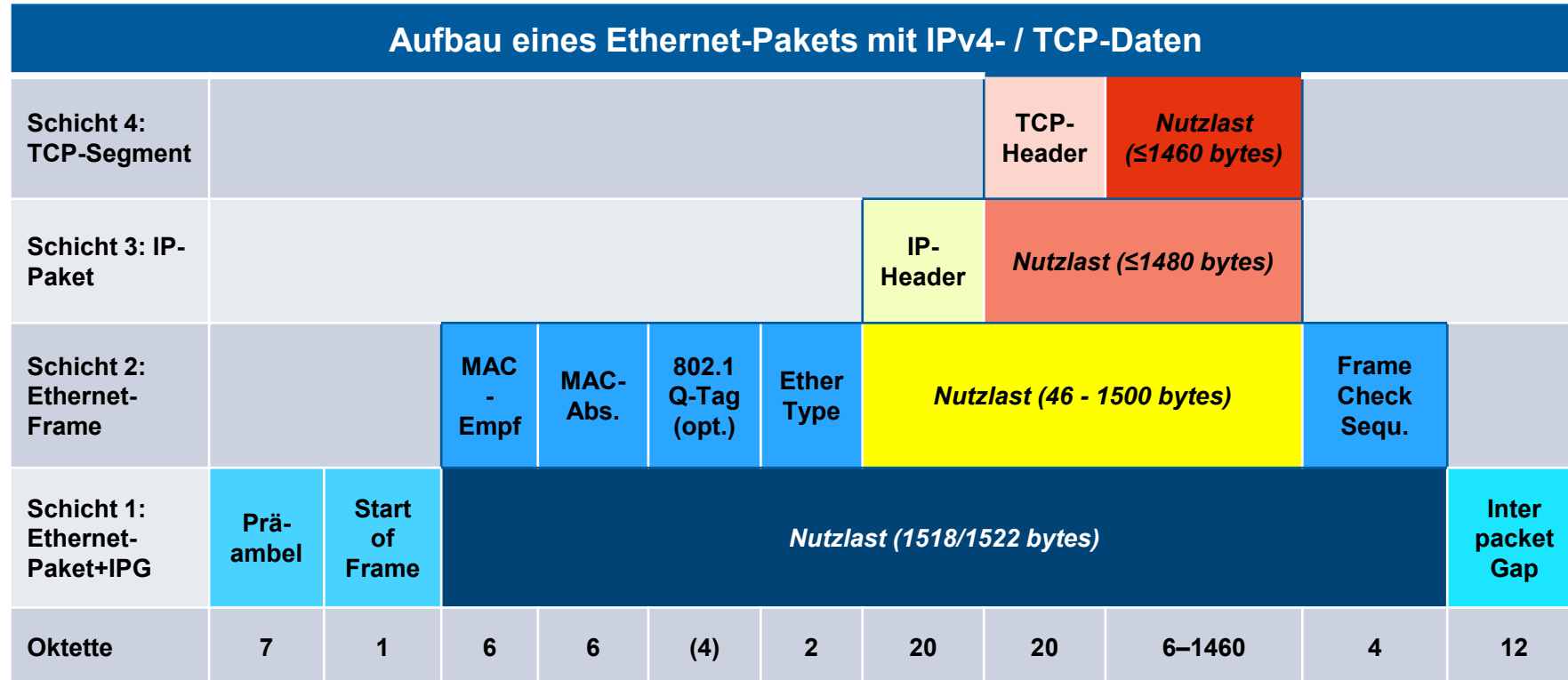


- Prinzip: „Einwickeln“ der Daten der Schicht (N) mit Header in Schicht (N-1)
- (N)-PDU → (N-1)- SDU
- (N)- SDU + (N)- PCI → (N)-PDU
Nutzdaten + Header → „Paket“



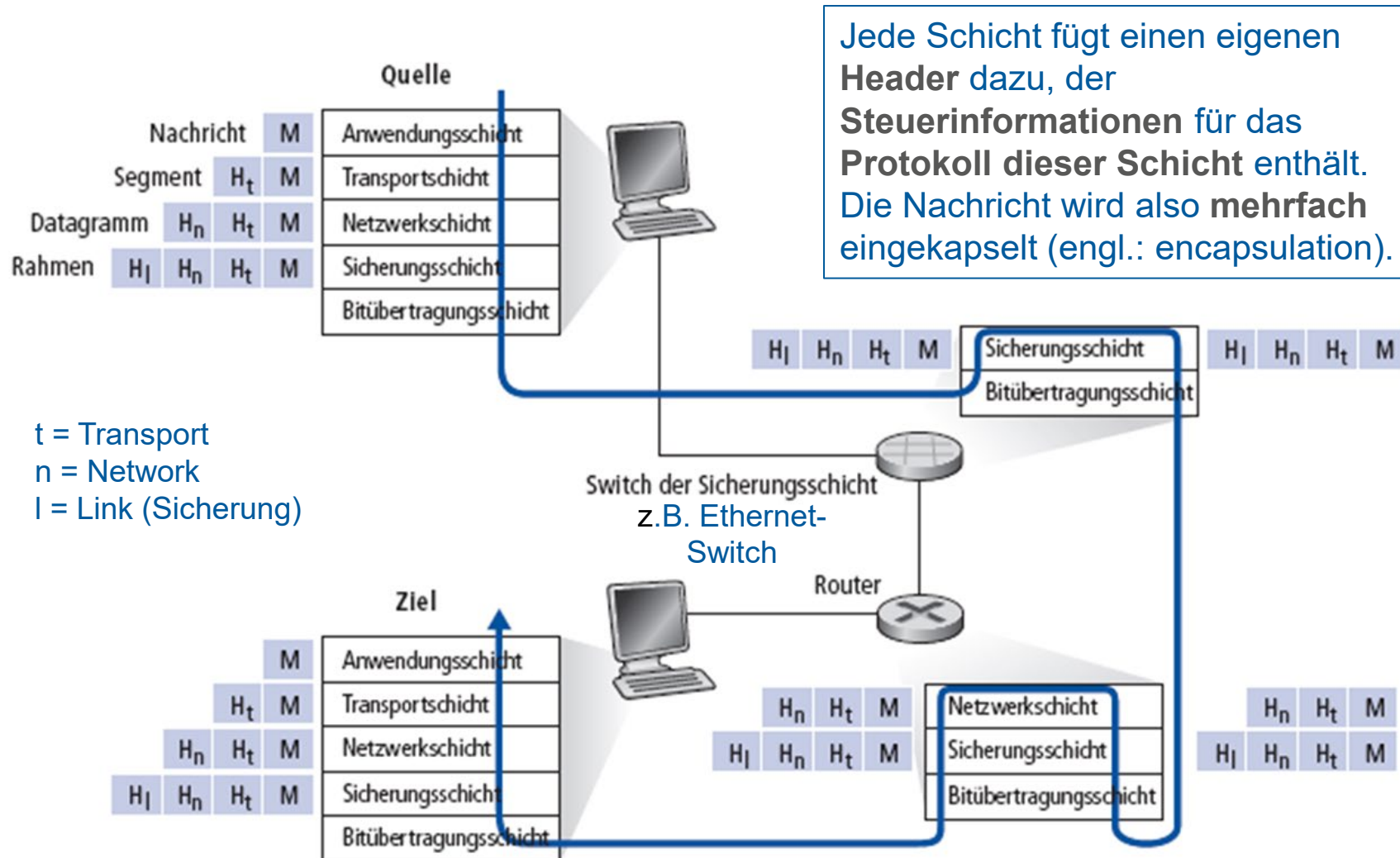
PH = Physical, DL = Data Link, N = Network

Struktur eines Ethernet-Frames mit TCP-IP



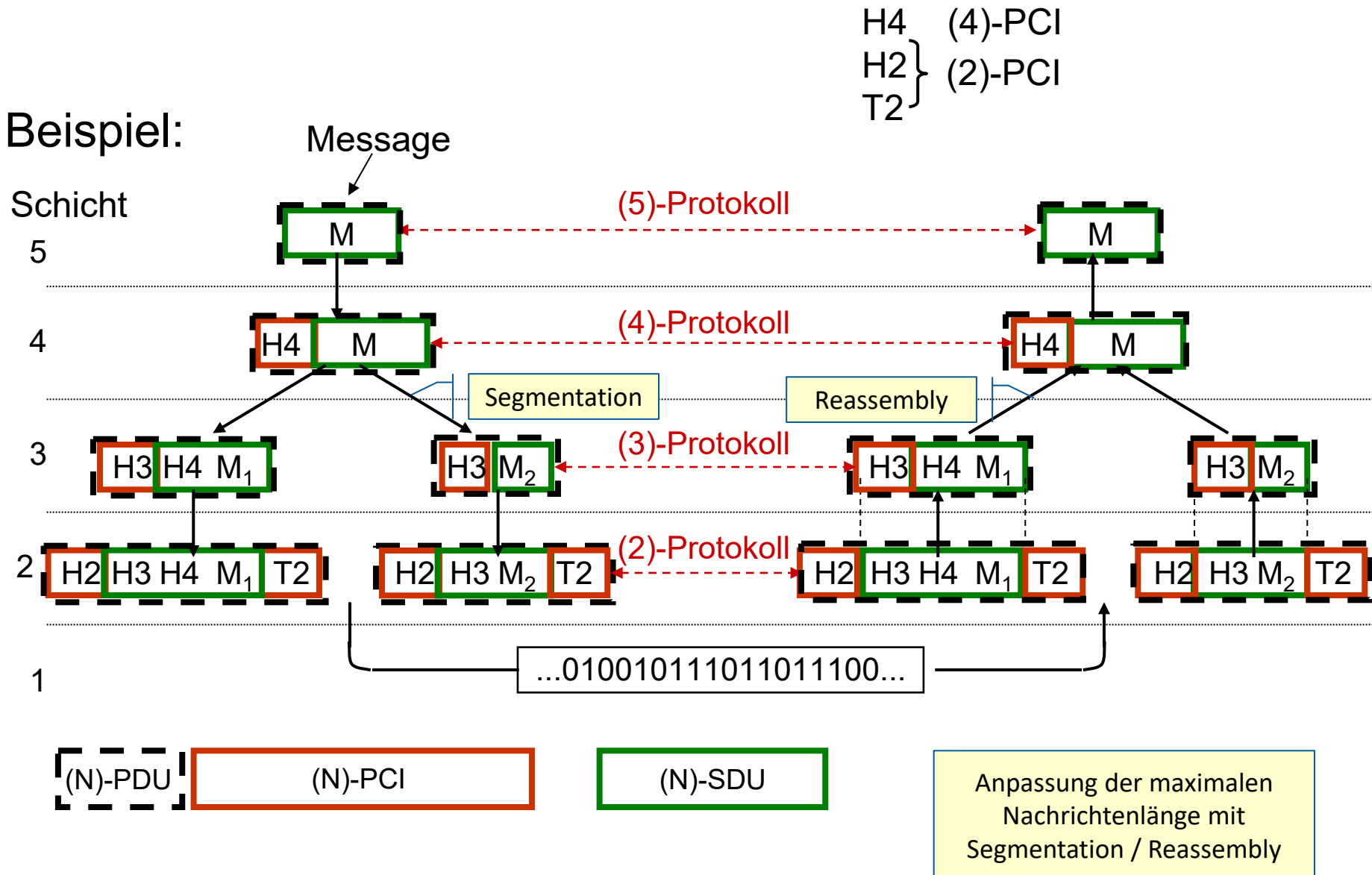
- Prinzip: „Einwickeln“ der Daten der Schicht (N) mit Header in Schicht (N-1)
- (N)-PDU → (N-1)- SDU
- (N)- SDU + (N)- PCI → (N)-PDU
Nutzdaten + Header → „Paket“

Konzept der Einkapselung der Daten



Hinweis: Ethernet-Switch vermittelt auf Schicht 2, Router auf Schicht 3

Beispiel:



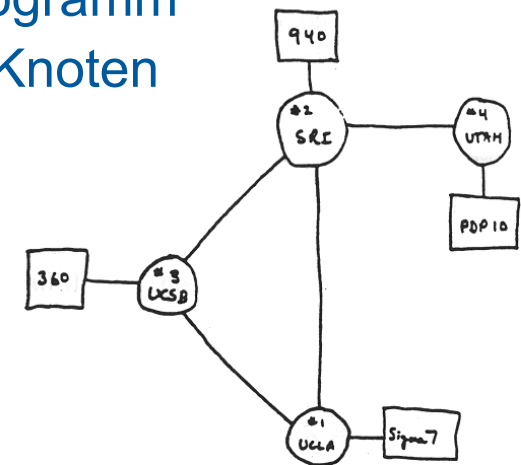


- Was ist das Internet?
- Was ist ein Protokoll?
- Netzrand (Edge): Hosts, Zugangsnetze, physische Medien
- Kernnetz: Paket/Leitungsvermittlung, Internetstruktur
- Leistung: Verlust, Verzögerung, Durchsatz
- Protokollschichten, Dienstmodelle
- **Geschichte**

1961-1972: Frühe Paketvermittlungsprinzipien

- **1961:** Kleinrock – Warteschlangentheorie zeigt die Effektivität von Paketvermittlung
- **1964:** Baran – Paketvermittlung in militärischen Netzen
- **1967:** ARPAnet finanziert von der Advanced Research Projects Agency
- **1969:** erster ARPAnet Knoten in Betrieb

- **1972:**
 - ARPAnet öffentliche Demo
 - NCP (Network Control Protocol) erstes Host-zu-Host Protokoll
 - Erstes E-Mail Programm
 - ARPAnet hat 15 Knoten



THE ARPA NETWORK

1972-1980: Internetworking, neue und proprietäre Netze

- **1970:** ALOHAnet Funknetz in Hawaii
- **1974:** Cerf and Kahn - Architektur zur Verbindung von Netzen
- **1976:** Ethernet bei Xerox PARC
- **späte 70er:** proprietäre Architekturen: DECnet, SNA, XNA
- **1979:** ARPAnet hat 200 Knoten

Cerf und Kahn's Architekturprinzipien:

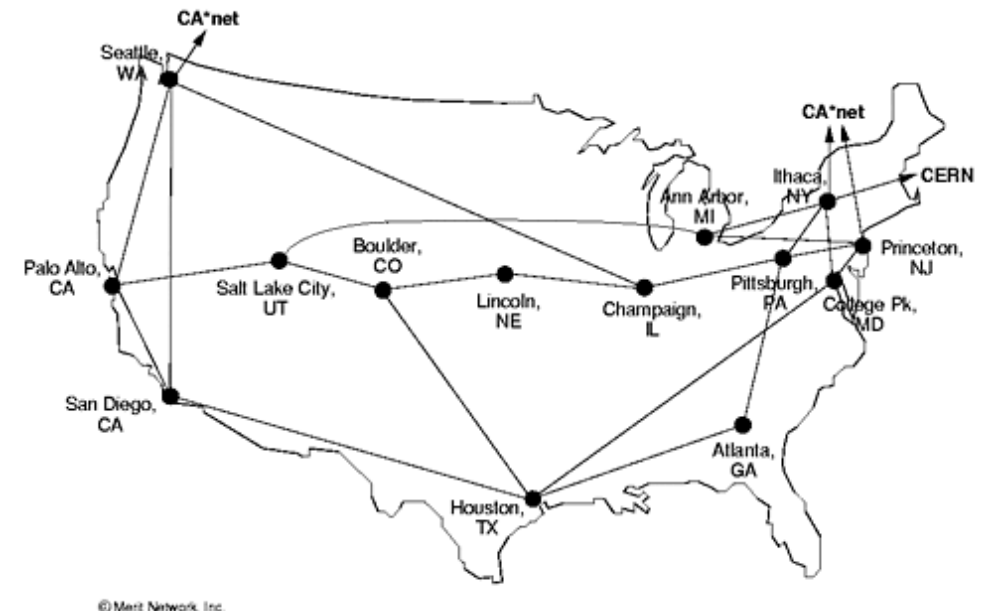
- Minimalismus, Autonomie – keine internen Änderungen benötigt um Netze zu vernetzen
- Best-effort Dienstmodell
- Zustandsloses Routing
- Dezentrale Kontrolle

definiert die heutige Internetarchitektur

1980-1990: neue Protokolle, Ausbreitung von Netzen

- **1983:** Ausrollen von TCP/IP
- **1982:** SMTP E-Mail Protokoll definiert
- **1983:** DNS zur Name-zu-IP-Adress Übersetzung definiert
- **1985:** FTP-Protokoll definiert
- **1988:** TCP Staukontrolle
- **Neue nationale Netze:** CSnet, BITnet, NSFnet, Minitel
- **100000 Hosts an einen Verbund aus Netzen angeschlossen**

NSFNET T1 Network 1991



1990er, 2000er: Kommerzialisierung, das Web, neue Anwendungen

- **frühe 1990er:** ARPAnet abgeschaltet
- **1991:** NSF entfernt Restriktionen zur kommerziellen Nutzung von NSFnet (abgeschaltet, 1995)
- **frühe 1990er:** Web
 - Hypertext [Bush 1945, Nelson 1960's]
 - HTML, HTTP: Berners-Lee
 - **1994:** Mosaic, später Netscape
 - **späte 1990er:** Kommerzialisierung des Webs
- **späte 1990er – 2000er:**
 - mehr “Killer Apps”: Instant Messaging, P2P File Sharing
 - Netzsicherheit wird wichtig
 - ~50 Millionen Hosts, 100 Millionen+ Nutzer
 - Backbone-Links mit Gigabitgeschwindigkeit

2005-heute: Skalierung, SDN, Mobilität, Cloud

- Agressiver Ausbau von Breitbandzugängen (10-100te Mbit/s)
- 2008: Software-Defined Networking (SDN)
- Zunehmende Verfügbarkeit von drahtlosen Hochgeschwindigkeitsnetzen: 4G/5G, WLAN
- Dienstanbieter (Google, Meta, Microsoft) bauen ihre eigenen Netze
 - Umgehung des kommerziellen Internets, um “nahe” am Endkunden zu sein und “sofortigen” Zugang zu sozialen Medien, Suche, Videos, ... zu ermöglichen.
- Unternehmen betreiben ihre Dienste in der Cloud (z.B., Amazon Web Services, Microsoft Azure)
- Aufstieg des Smartphones: Mehr mobile als verdrahtete Geräte im Internet (2017)
- ~18 Milliarden Geräte mit dem Internet verbunden (2017)