



Institut für Verteilte Systeme
Universität Ulm



universität
uulm



Vernetzte Systeme

CS3160.000 | Wintersemester 2024/2025

Benjamin Erb | Frank Kargl

Institut für Verteilte Systeme

Universität Ulm



Institut für Verteilte Systeme
Universität Ulm



universität
uulm



Kapitel A: Einführung

Vernetzte Systeme | CS3160.000 | Wintersemester 2024/2025

Benjamin Erb | Frank Kargl

Institut für Verteilte Systeme
Universität Ulm



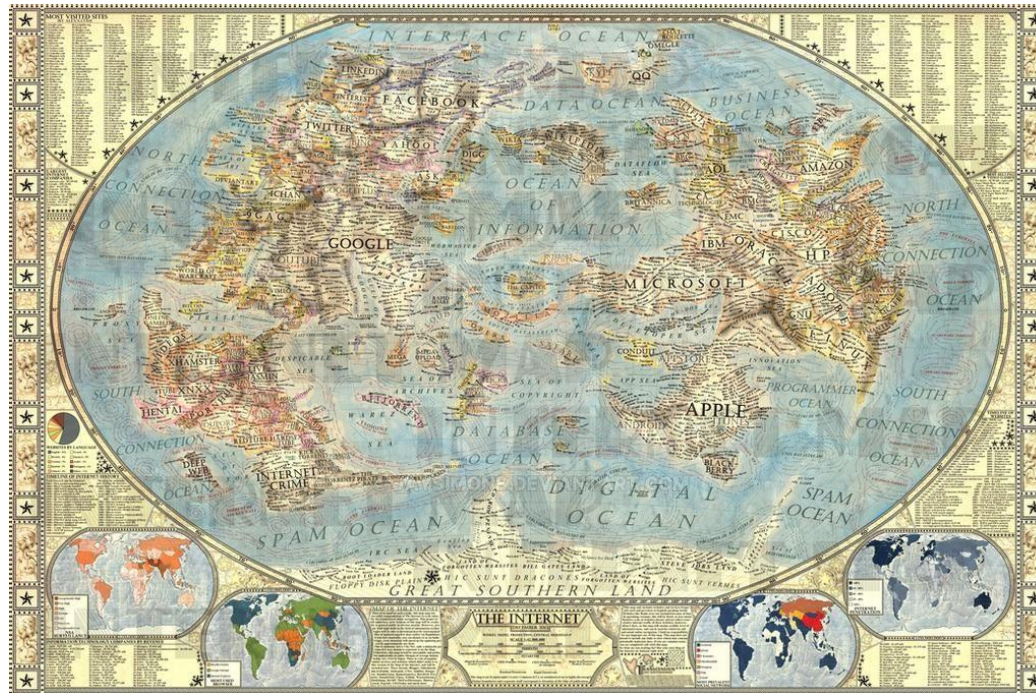
Überblick

A. Einführung

- A.1 Was ist das Internet ([▶](#))
- A.2 Netzwerke ([▶](#))
- A.3 Verzögerungen, Verlust und Durchsatz ([▶](#))
- A.4 Das Schichtenmodell ([▶](#))
- A.5 Netzwerksicherheit ([▶](#))
- A.6 Historischer Überblick ([▶](#))

A.1 Was ist das Internet?

Was ist das Internet? (1)



Bildquelle: <https://www.deviantart.com/jaysimons/art/Map-of-the-Internet-1-0-427143215>



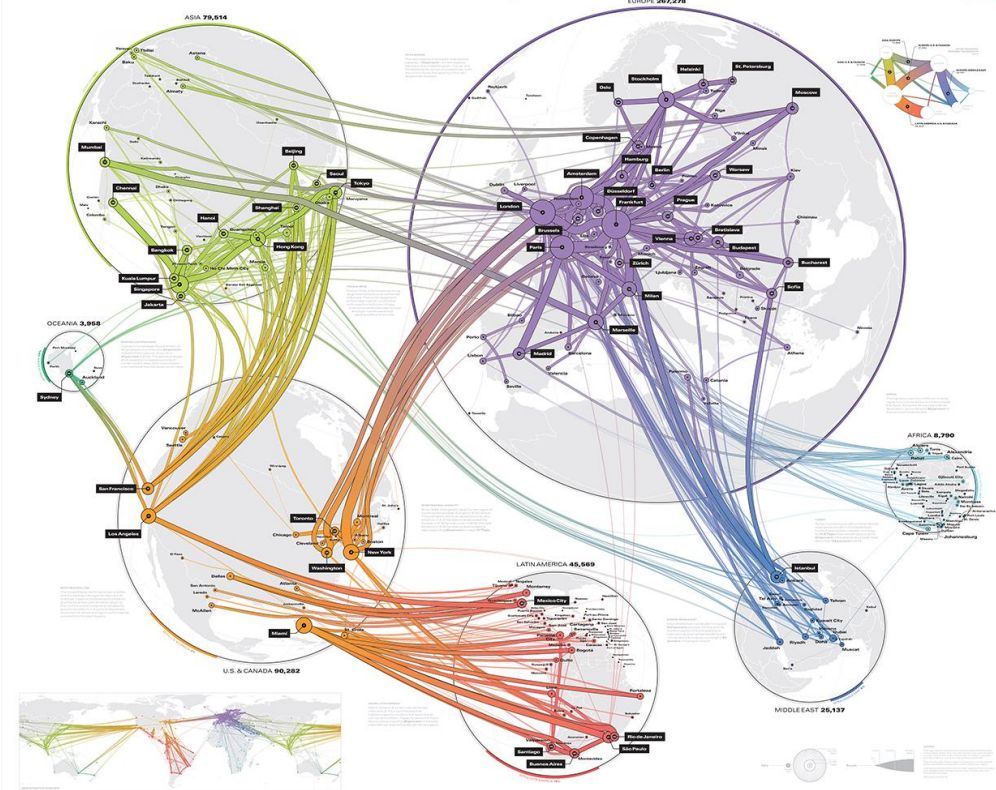
Bildquelle: http://www.facebook.com/note.php?note_id=469716398919

Was ist das Internet? (2)



Bildquelle: <https://xkcd.com/195/>

Global Internet Map 2018



Bildquelle: <http://www.telegeography.com/telecom-maps/global-internet-map/>

Begriffe des Internets (1)

Hosts



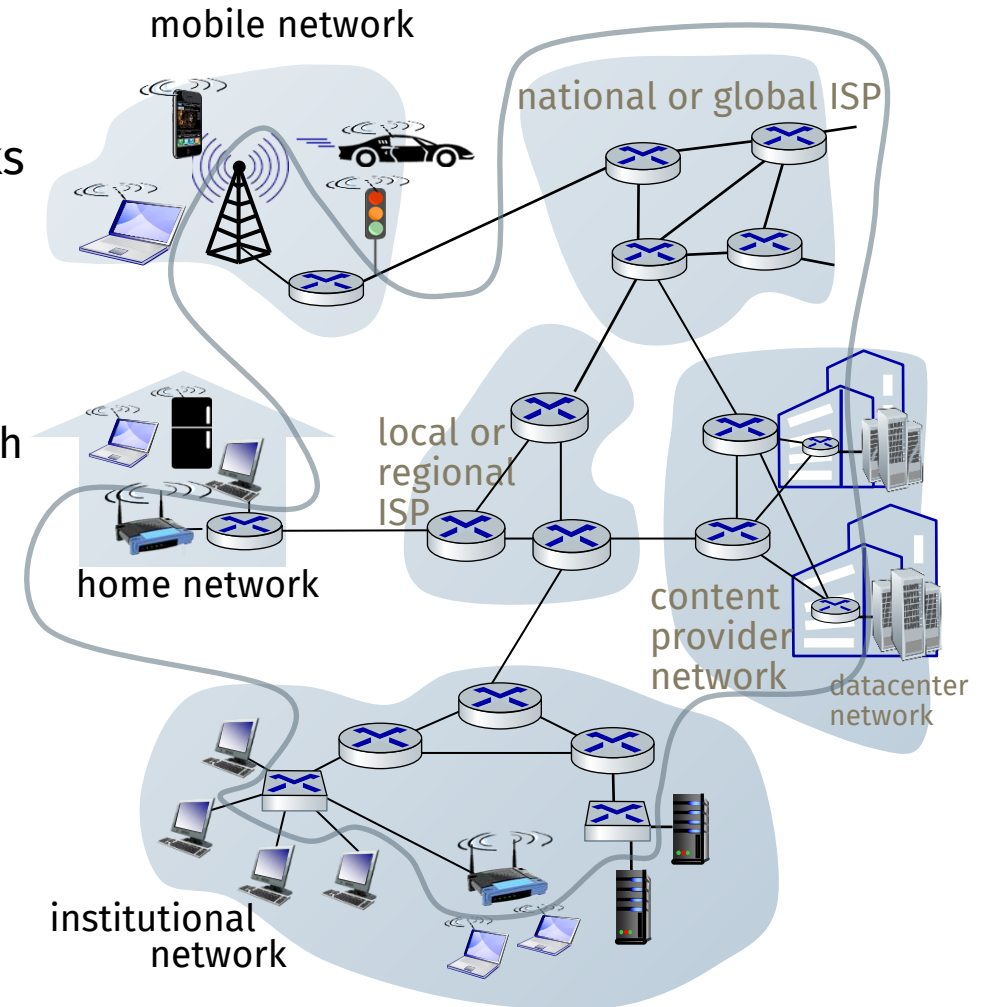
Link-Arten



Router



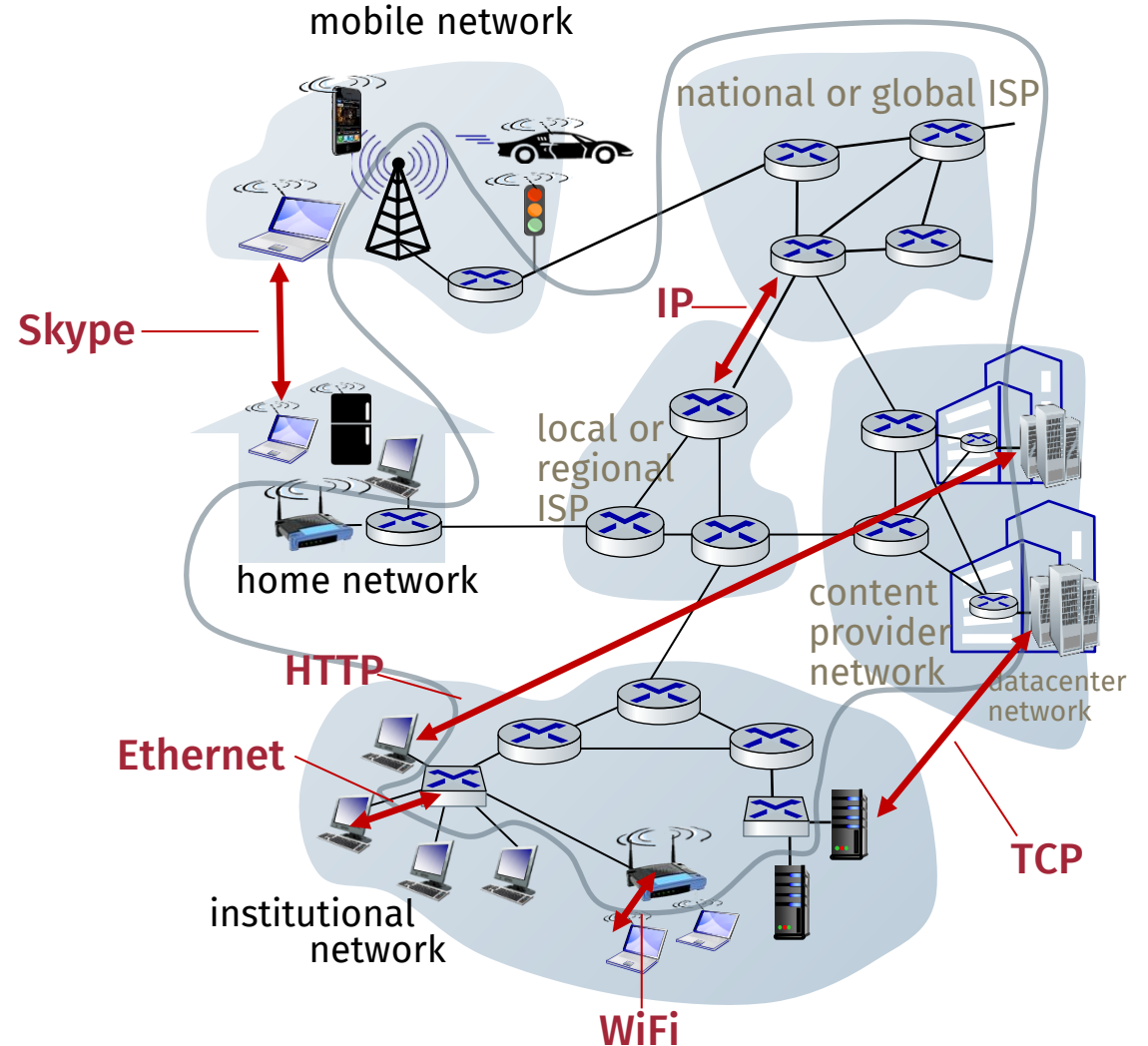
- Endsysteme / hosts
- Zugangsnetzwerke / access networks
 - Kupferkabel, Glasfaser, Satelliten
 - Kabelgebunden oder drahtlos
 - Übertragungsbandbreite / bandwidth
- Router / Switches
 - Packet switching
 - leiten Datenpakete weiter
 - Internet Service Provider (ISP)
- Network **Edge** und Network **Core**



Begriffe des Internets (2)

Innenansicht auf das Internet

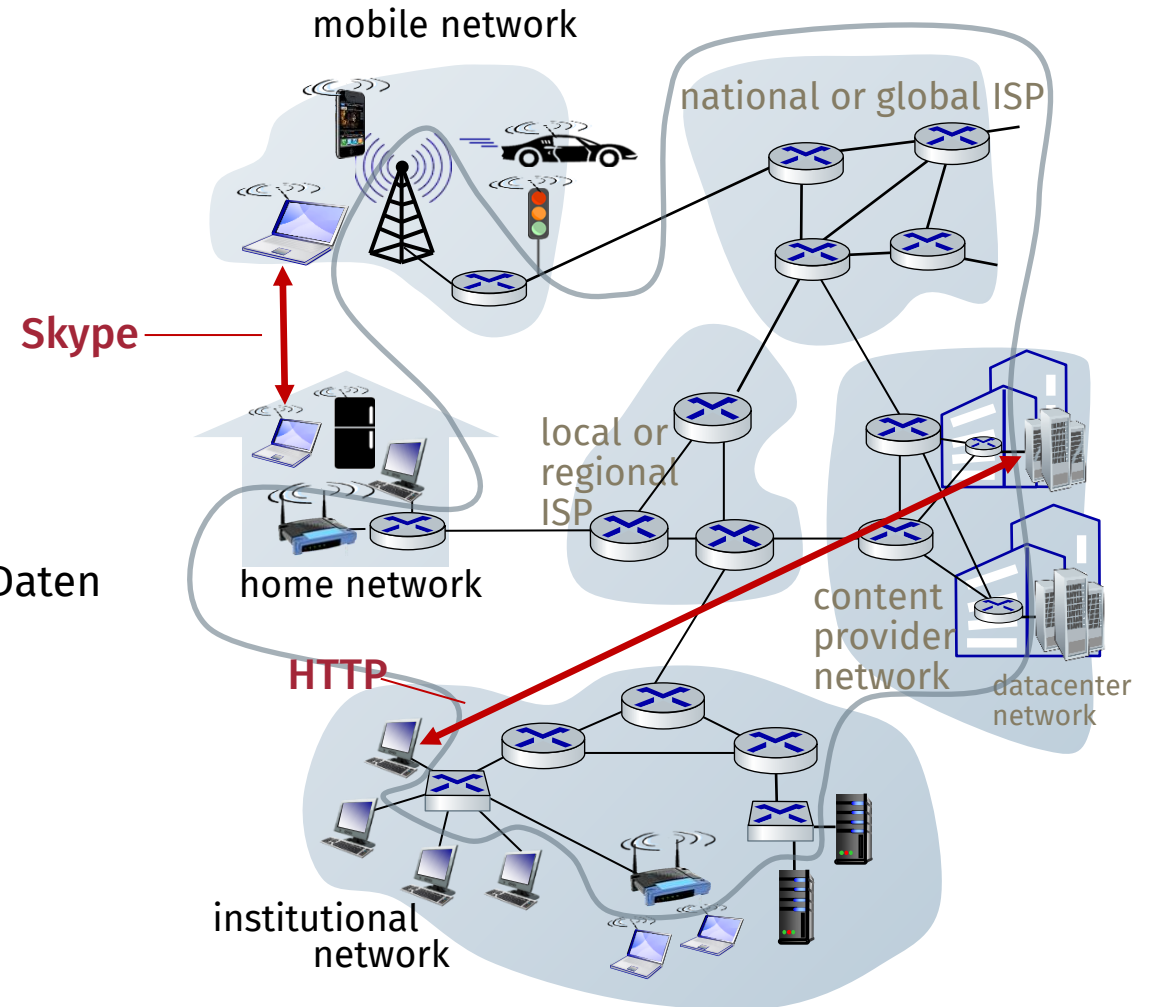
- Internet: „Netzwerk von Netzen“
 - eine Vernetzung von ISPs
- Protokolle kontrollieren Senden und Empfang von Nachrichten (Messages)
 - TCP, IP, HTTP, Skype, 802.11
- Internet Standards
 - RFC: Request For Comments
 - IETF: Internet Engineering Task Force



Begriffe des Internets (3)

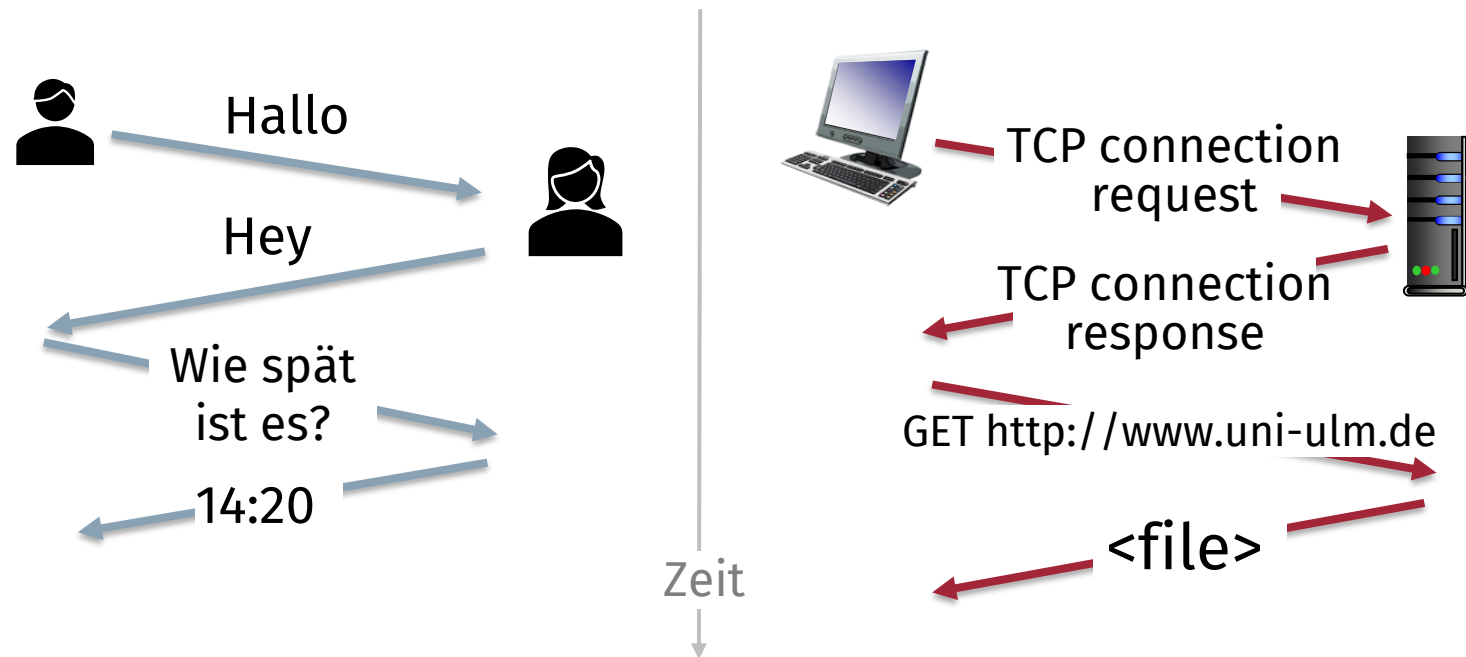
Service-Sicht auf das Internet

- Internet als Infrastruktur für Anwendungen
- Bereitstellung von Diensten für Anwendungen
 - Web, VoIP, Email, Spiele, soziale Netzwerke, eCommerce, ...
- Verwendung von Diensten über Programmierschnittstellen (APIs) in den Anwendungen
 - Schnittstellen zum Senden und Empfangen von Daten
 - Verwendung weiterer Netzwerkdienste



Protokolle

Menschliche Protokolle und Computer-Protokolle



Protokolle legen die **Formate** und **Reihenfolge** von **Nachrichten** fest, die von Netzwerkgeräten gesendet und empfangen werden. Ebenso werden **Aktionen** beim Empfang von Nachrichten geregelt.

A.2 Netzwerke

Netzwerkstruktur

Edge und Core

■ Edge

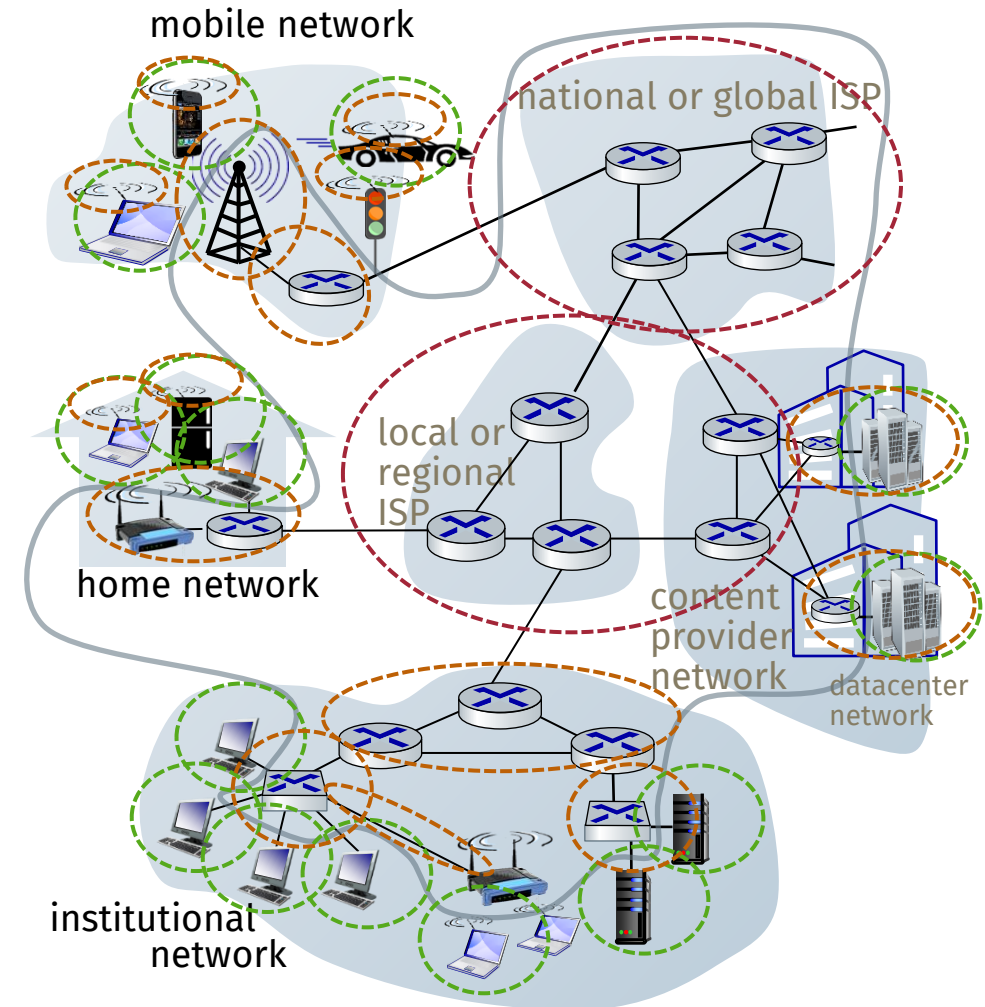
- Hosts: Clients und Server
- Server oft in Rechenzentren

■ Zugangsnetze

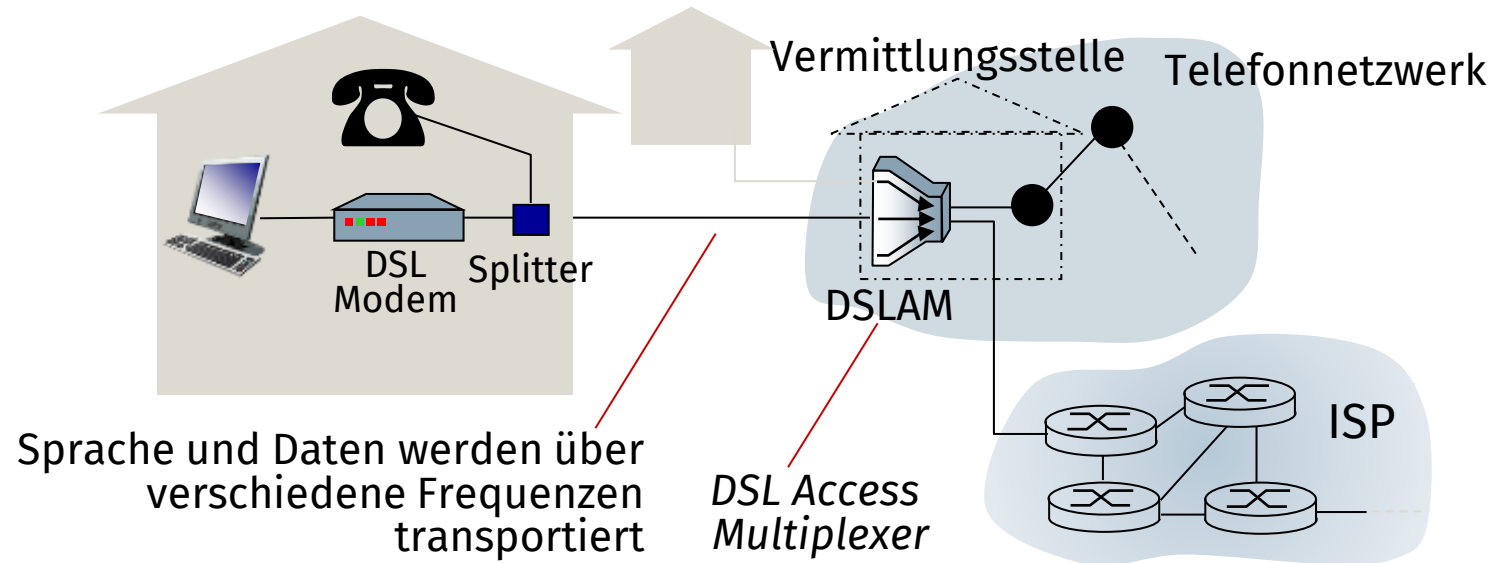
- drahtlos: WLAN, GSM/UMTS/LTE, ...
- drahtgebunden: Ethernet, DSL, Kabel

■ Core

- verbundene Router
- „network of networks“
- Routingprotokolle

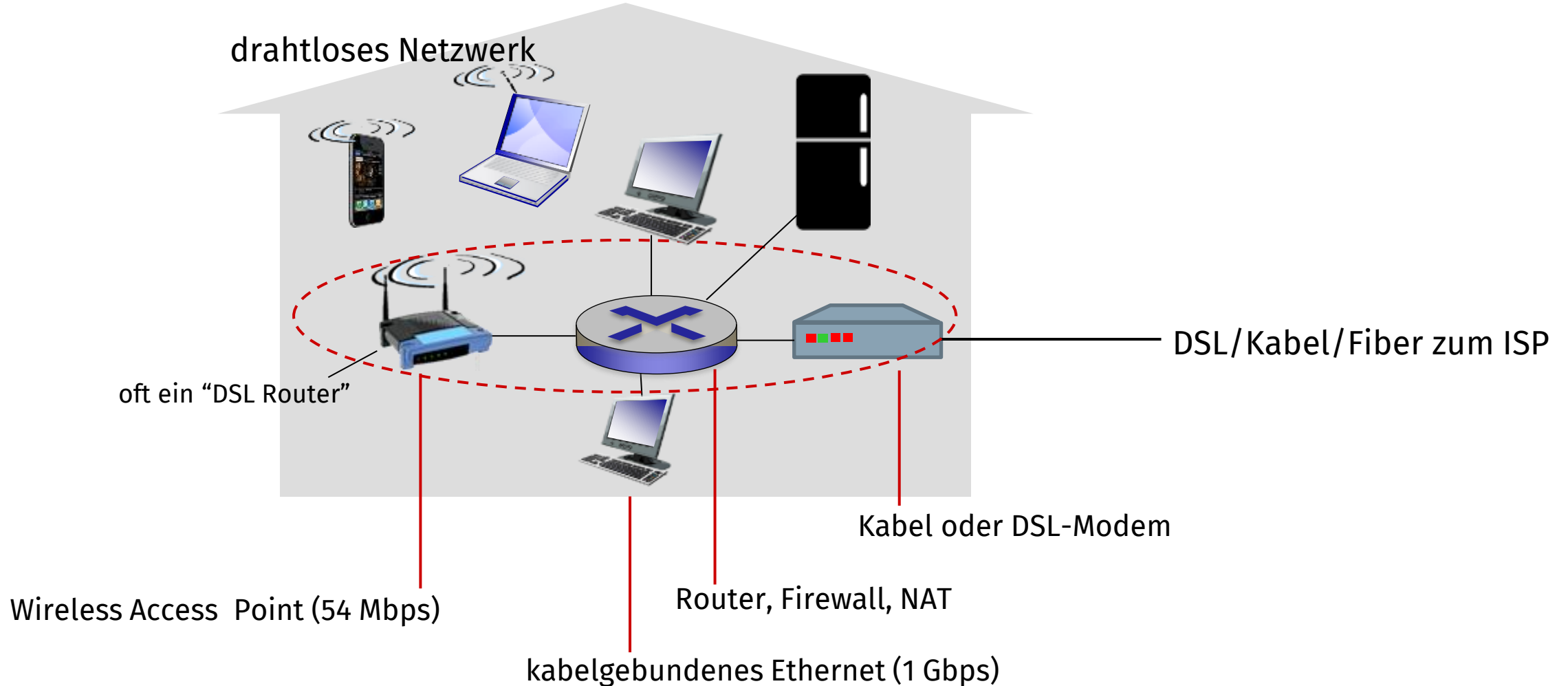


Zugangsnetze: Digital Subscriber Line (DSL)



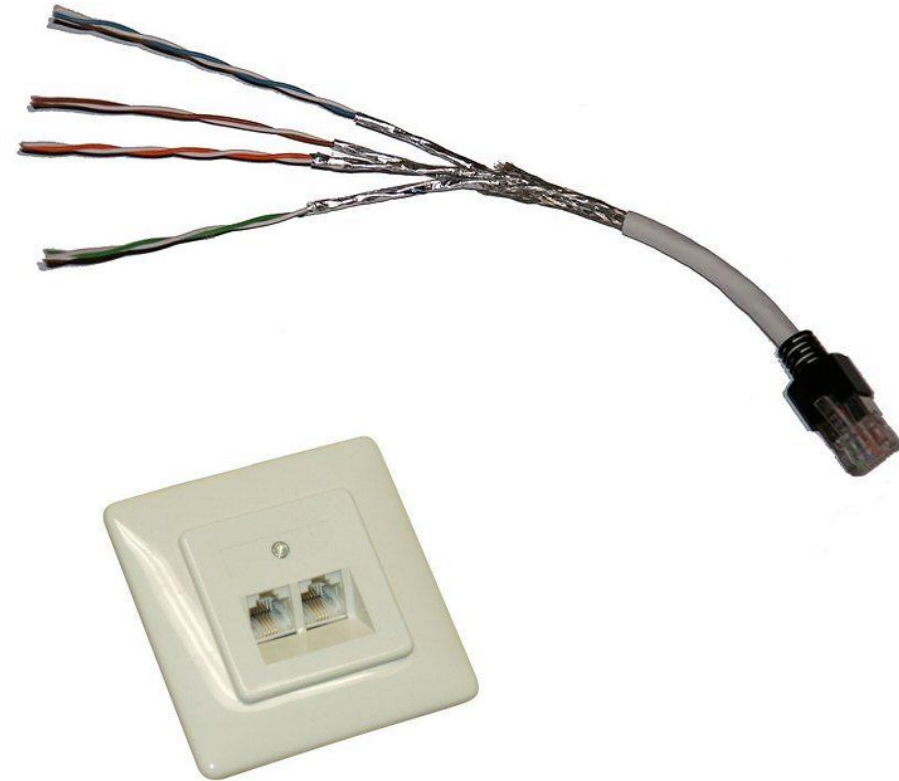
- Breitbandanschluss über bestehende Telefon(kupfer)leitungen an DSLAM in Vermittlungsstelle
- typische Bandbreiten bis 100 Mbps downlink und 5 Mbps uplink

Typisches Heimnetz („Small Office Network“)



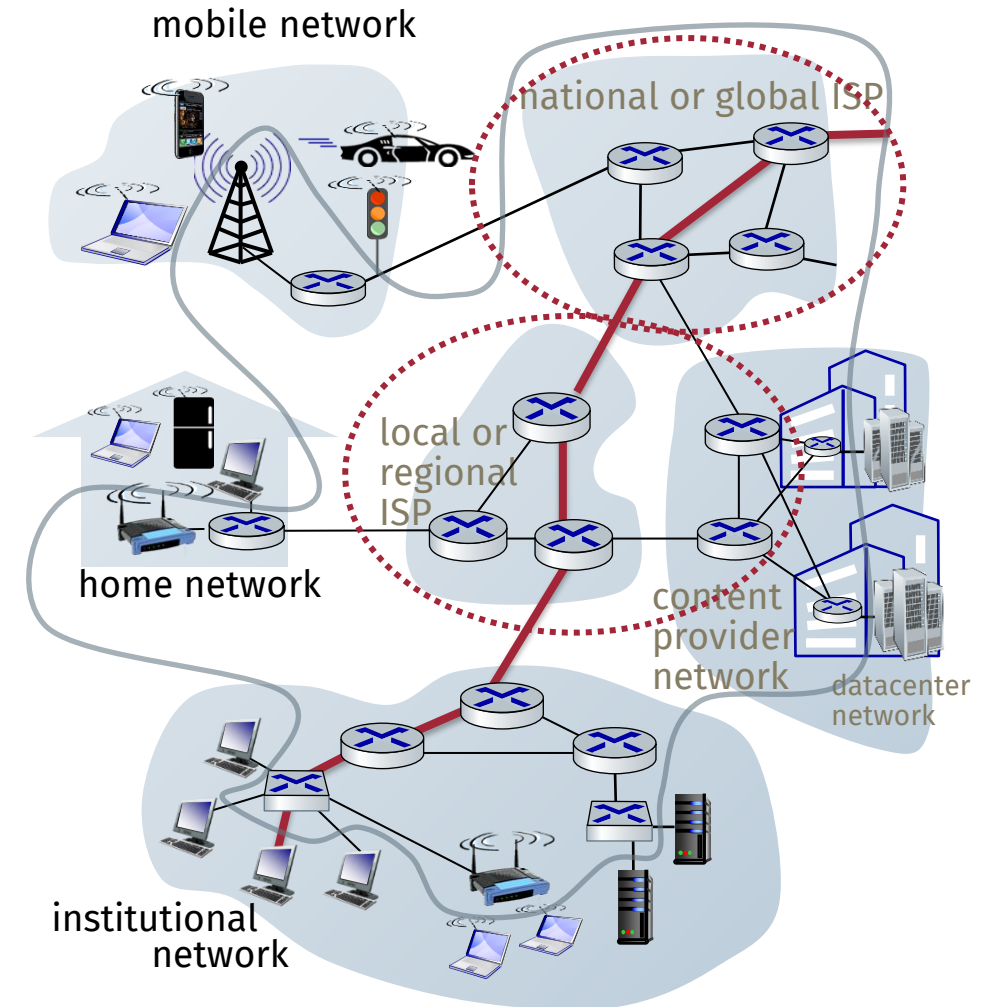
Physikalisches Medium

- Übertragung von Bits vom Sender zum Empfänger (Receiver)
- Übertragungsmedium / Physikalischer Link
 - gerichtetes / drahtgebundenes Medium
 - Kupfer, Glasfaser, Koaxkabel
 - ungerichtetes Medium
 - Radiowellen
- Twisted Pair (TP)
 - isolierte und verdrehte Kupferkabel
 - Category 5: 100 Mbps, 1 Gbps Ethernet
 - Category 6/7: 10/100 Gbps Ethernet
- Koaxialkabel
- Glasfaserkabel



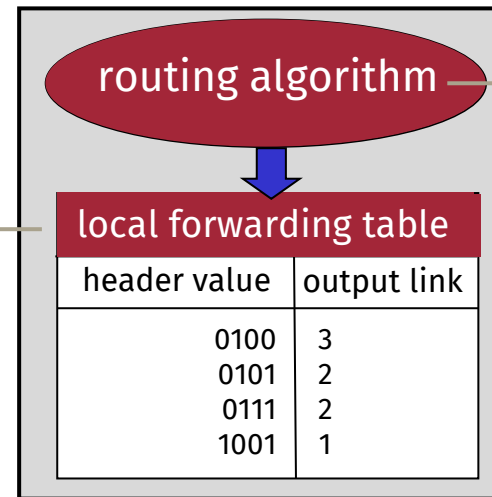
Network Core

- Netz (\triangleq Graph) verbundener Router
- Packet-Switching
 - Hosts teilen Anwendungsdaten in kleinere Pakete auf
 - Router leiten Pakete von der Quelle (Source) zum Ziel (Destination) jeweils an nächsten Router weiter
 - Pakete belegen Link exklusiv

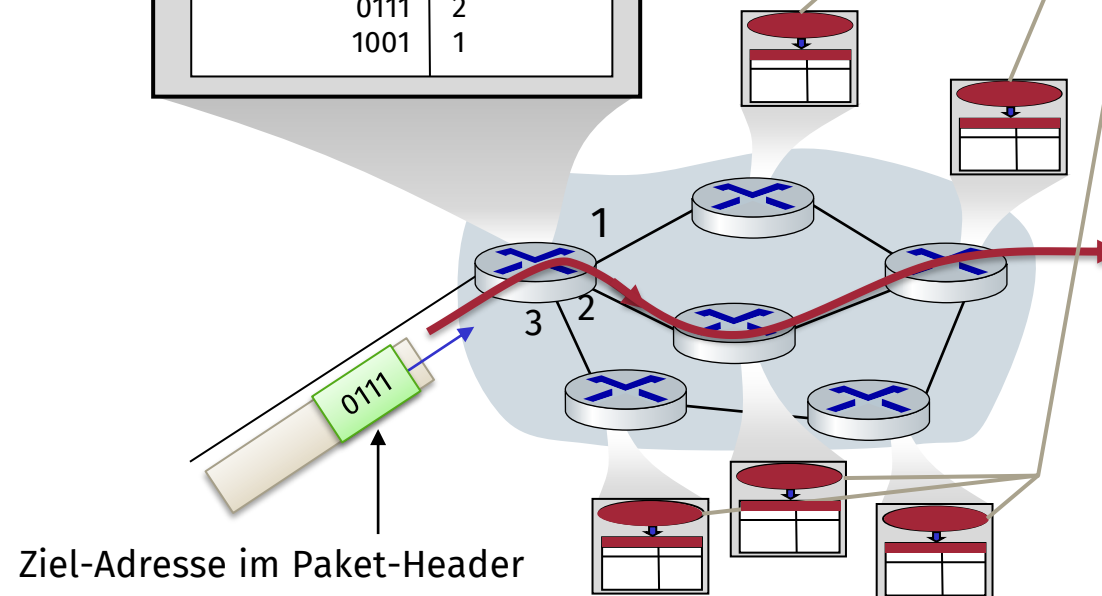


Routing und Forwarding

Routing:
bestimmt für Paket
mit (Quell- und)
Zieladresse den
jeweiligen
Ausgangsport



Forwarding:
Weiterleitung eines Pakets vom
Eingangs-/Input-Port zum
Ausgangs-/Output-Port

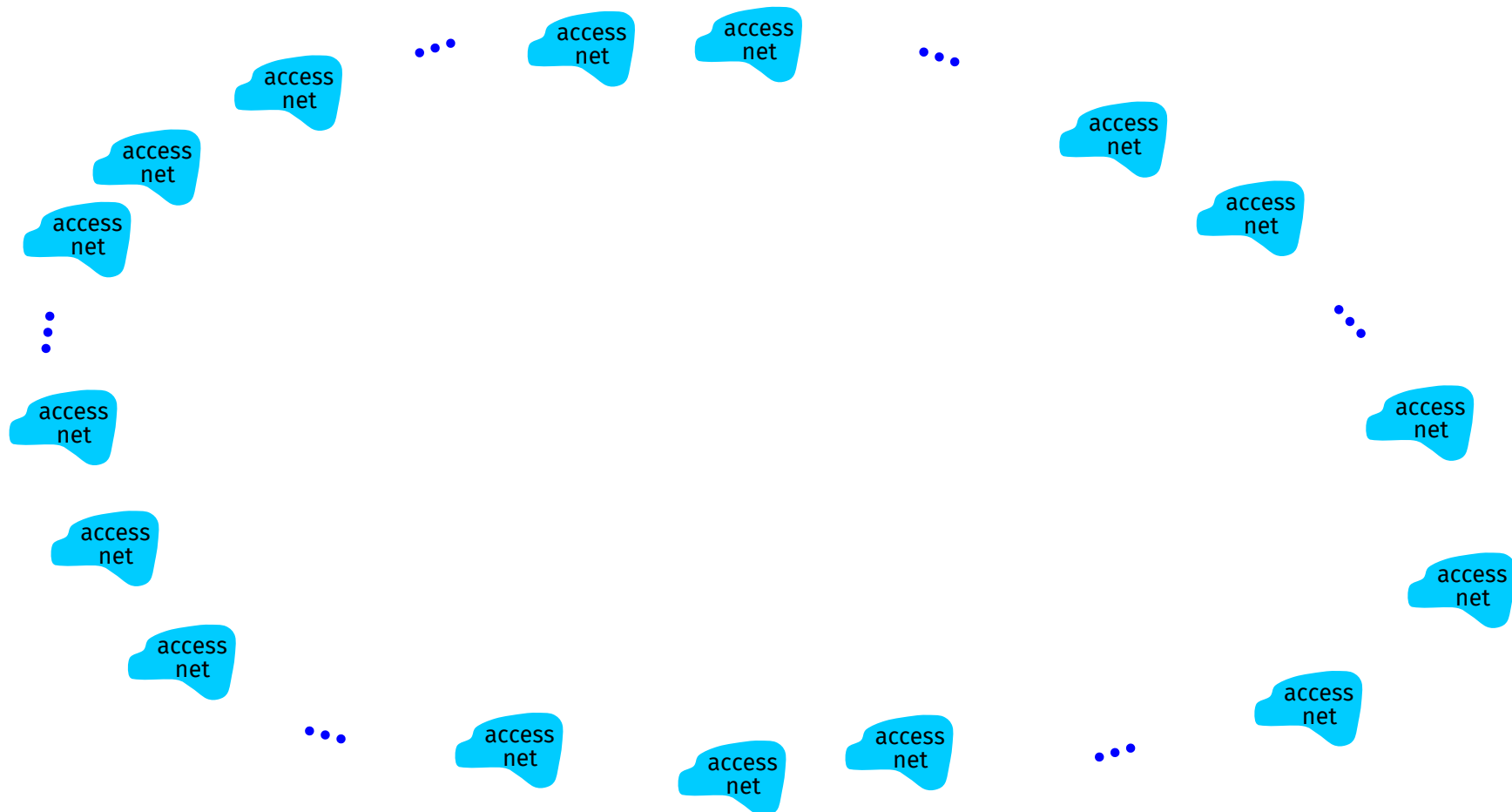


Ziel-Adresse im Paket-Header

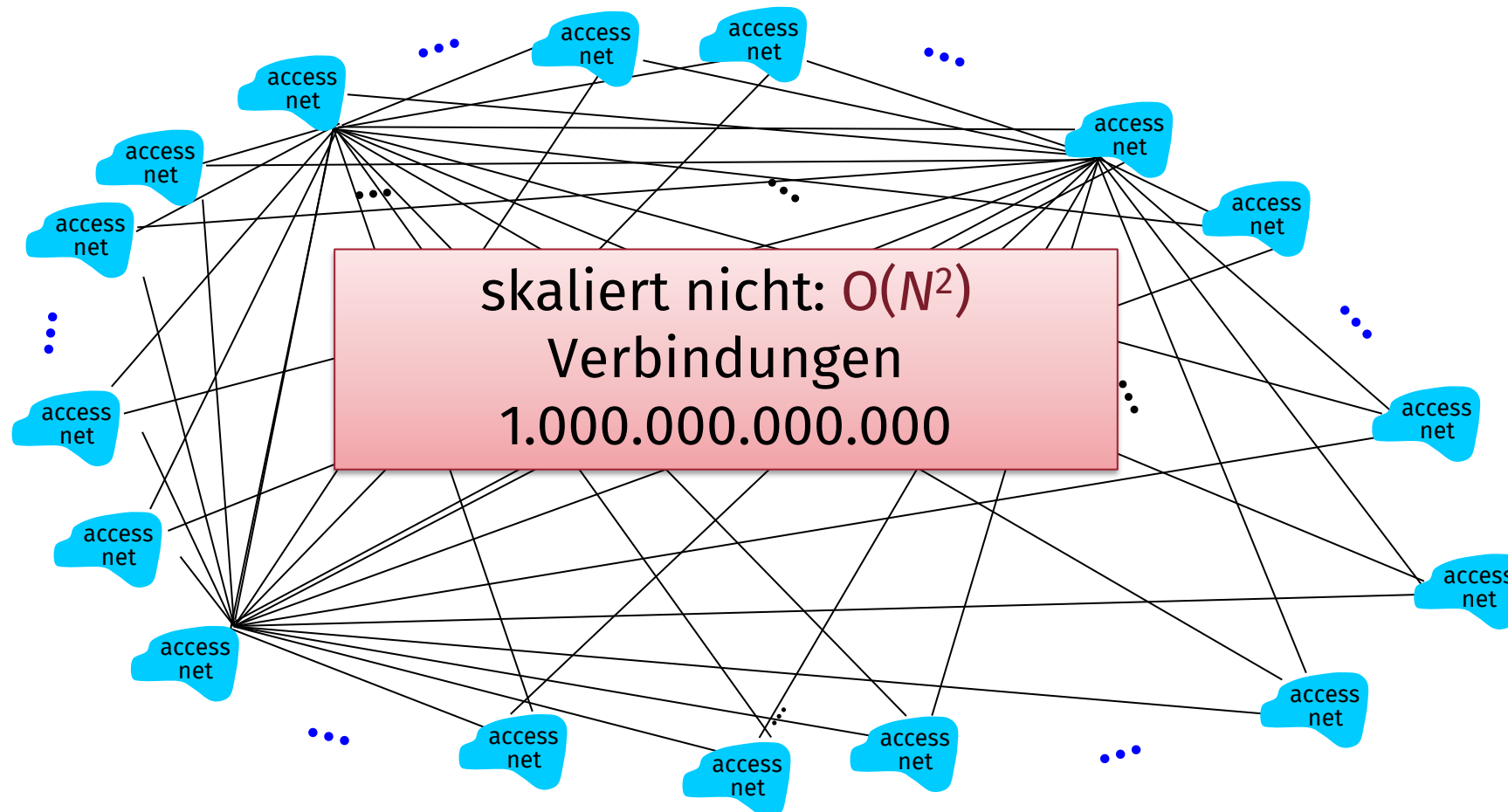
Das Internet - Ein Netz von Netzen

- Endsysteme verbinden sich mit dem Internet via ISPs (Internet Service Provider)
- verschiedene Arten von ISPs
 - Regional, global, Firmen, Universitäten
- ISPs müssen so verbunden sein, dass ein Paket zwischen zwei beliebigen Hosts im Internet übertragen werden kann
- resultierendes Netzwerk sehr komplex
 - wirtschaftliche und politische Interessen

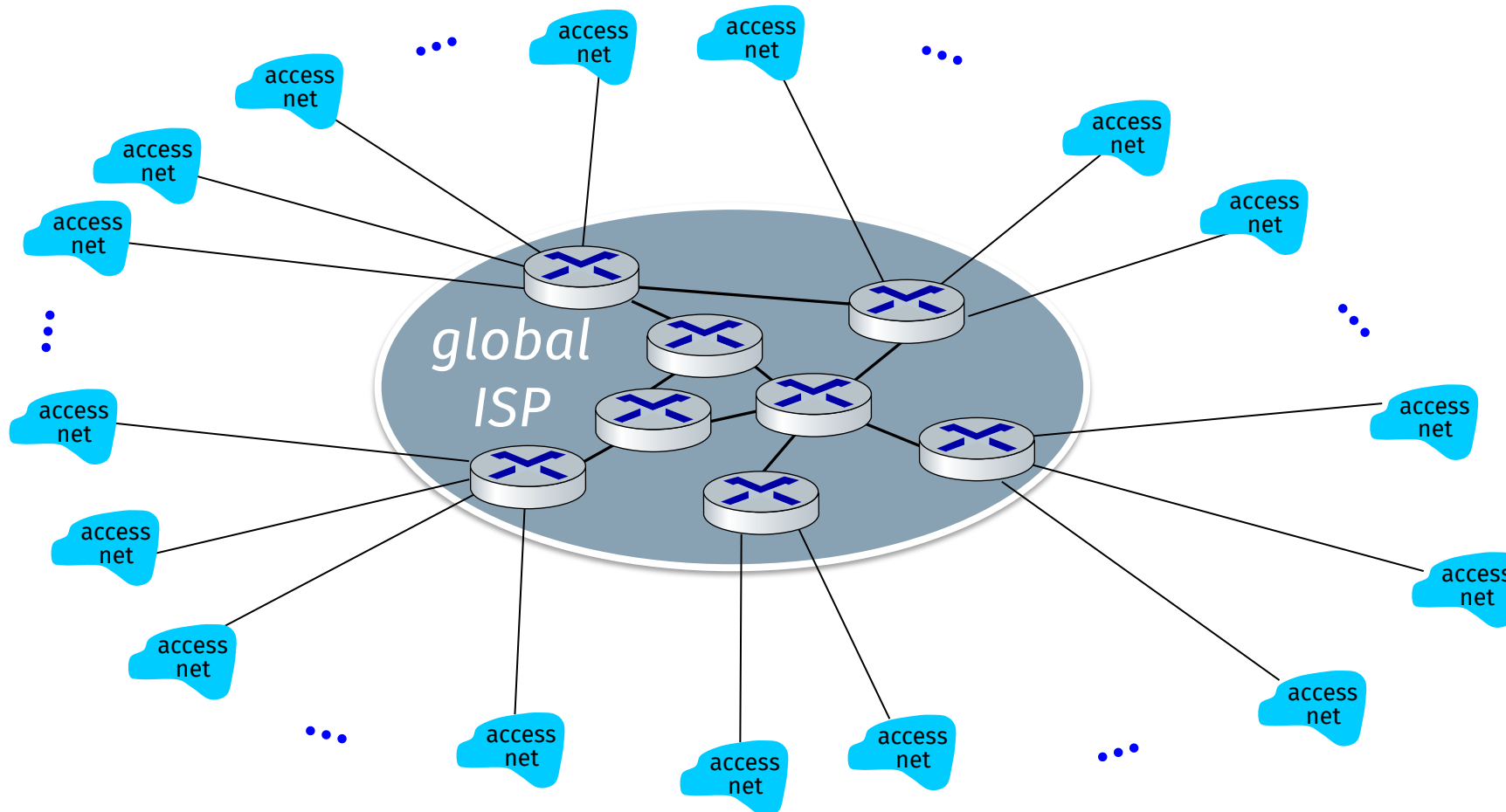
Ein Netz von Netzen: Wie verbindet man eine Million ISPs?



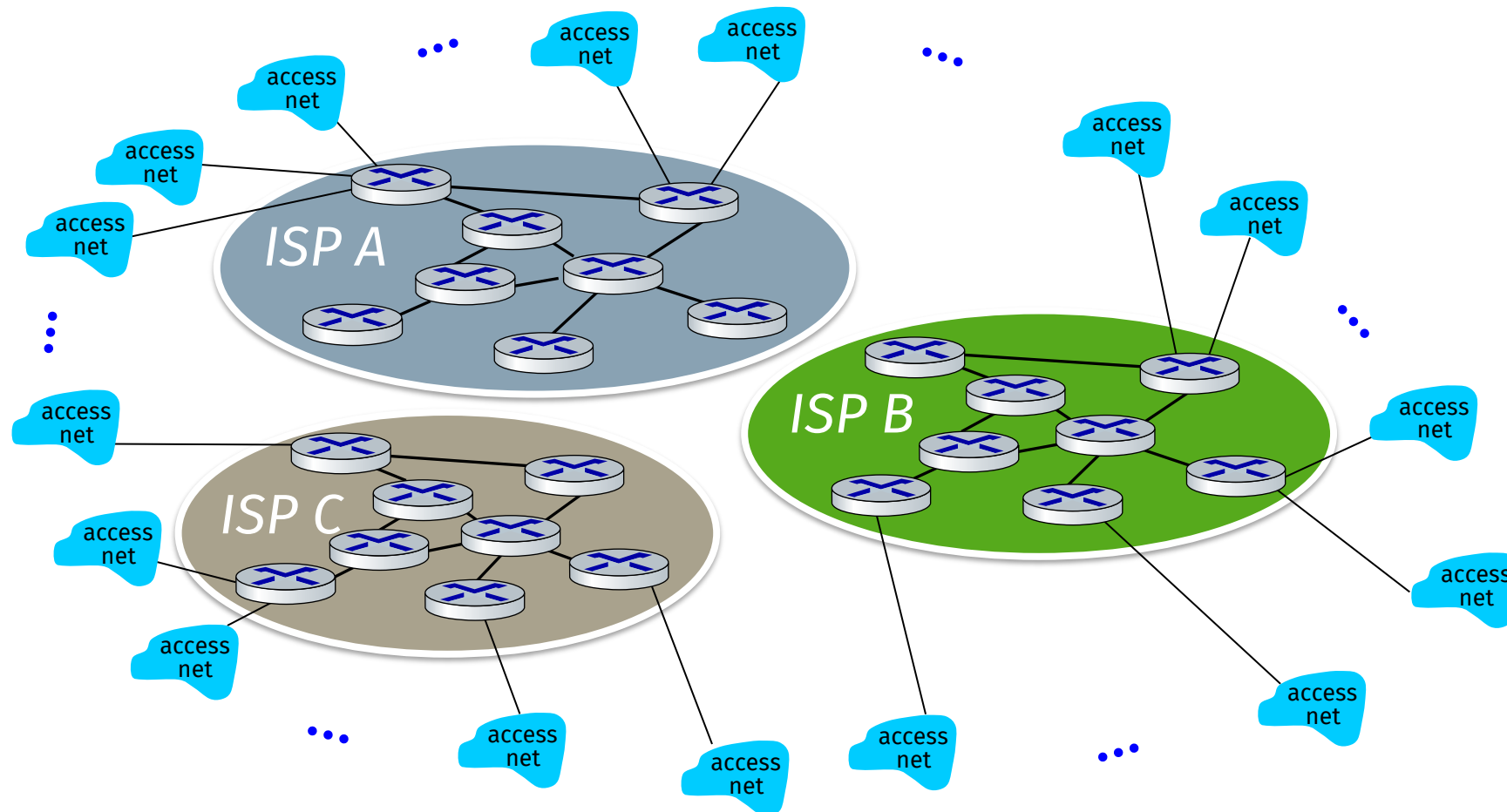
Ein Netz von Netzen: Jeder-mit-Jedem-Vernetzung?



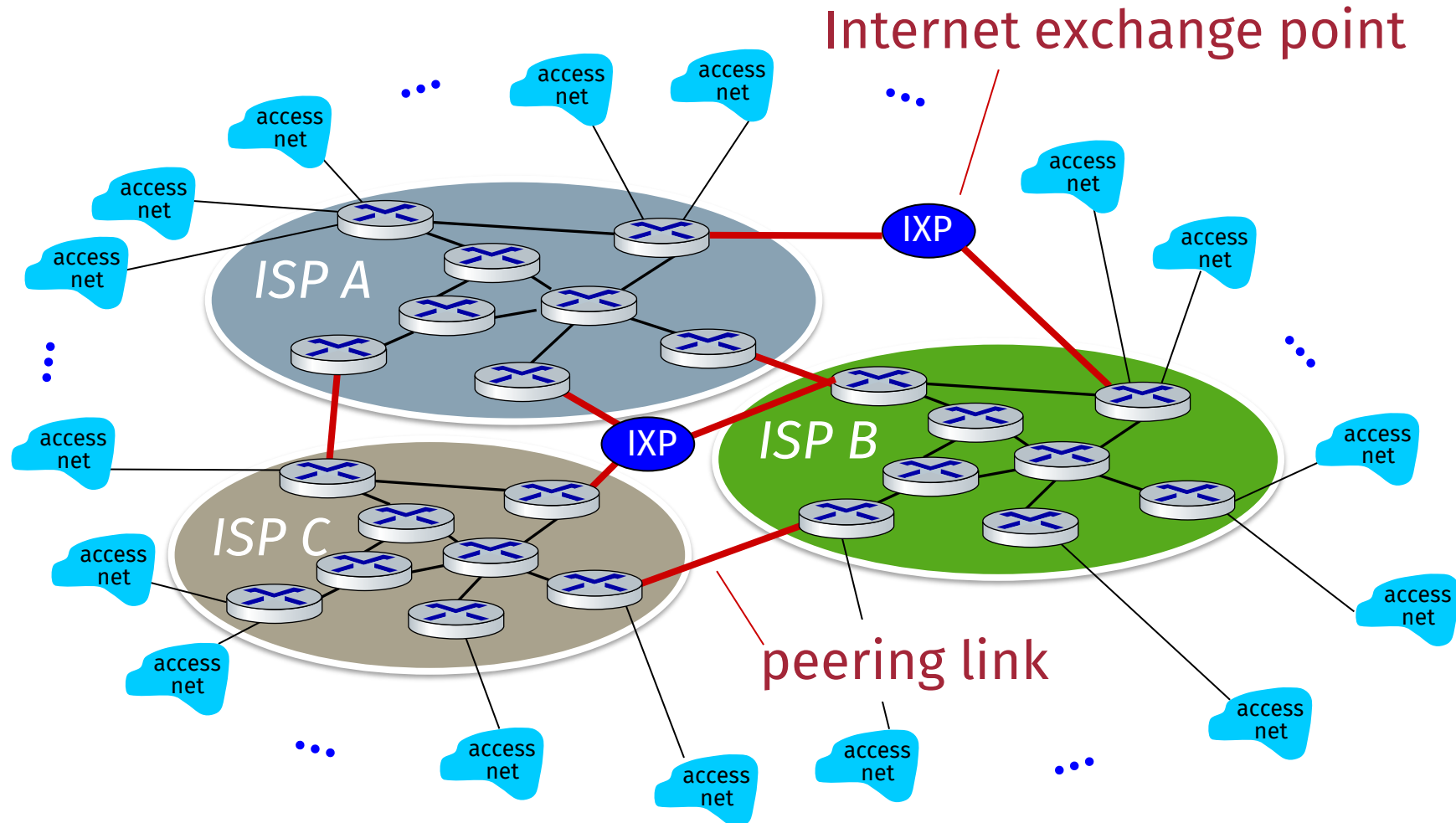
Ein Netz von Netzen: Ein globaler Transit-ISP im Zentrum?



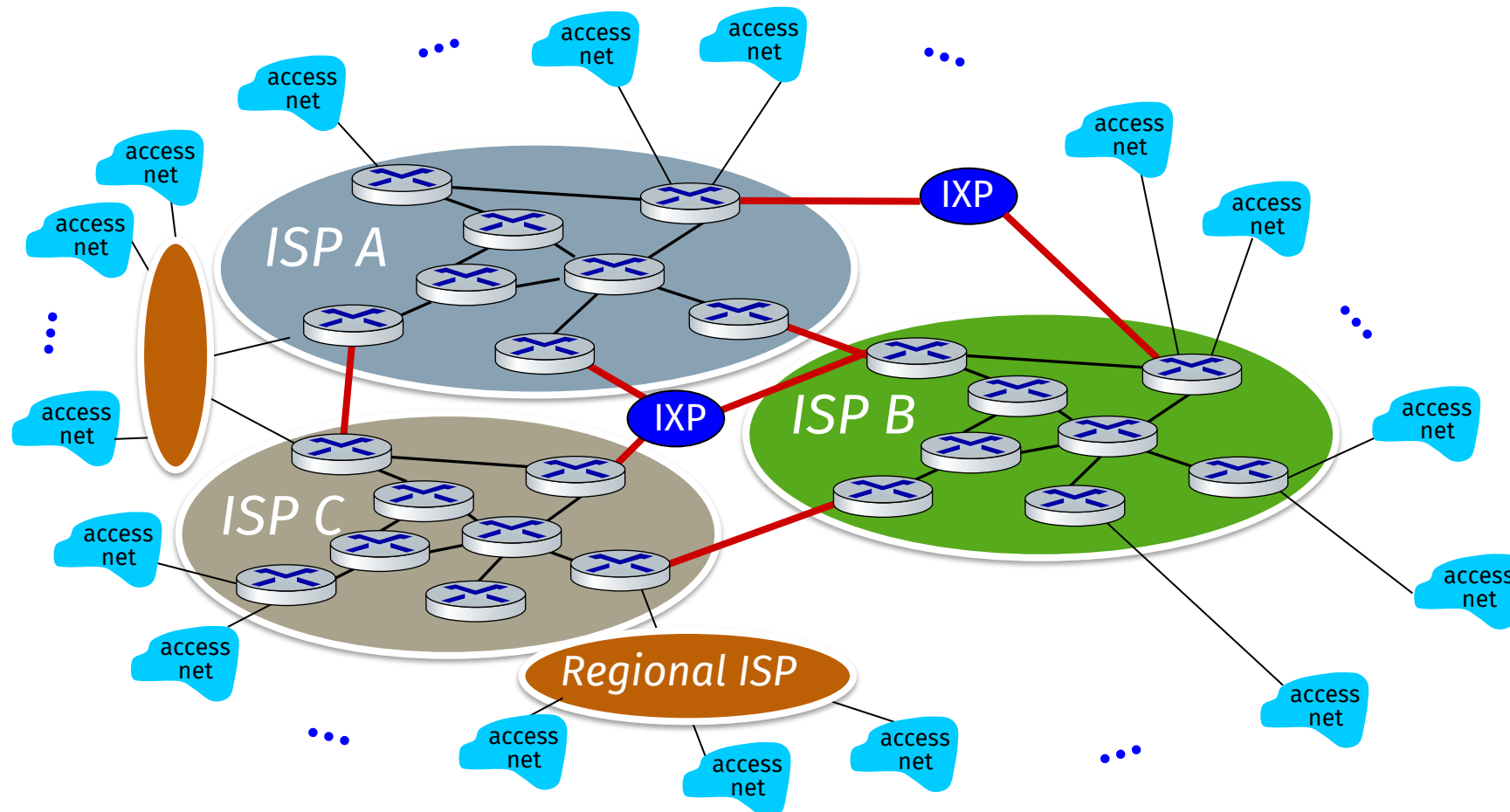
Ein Netz von Netzen: Wettbewerb um globale ISP-Rolle



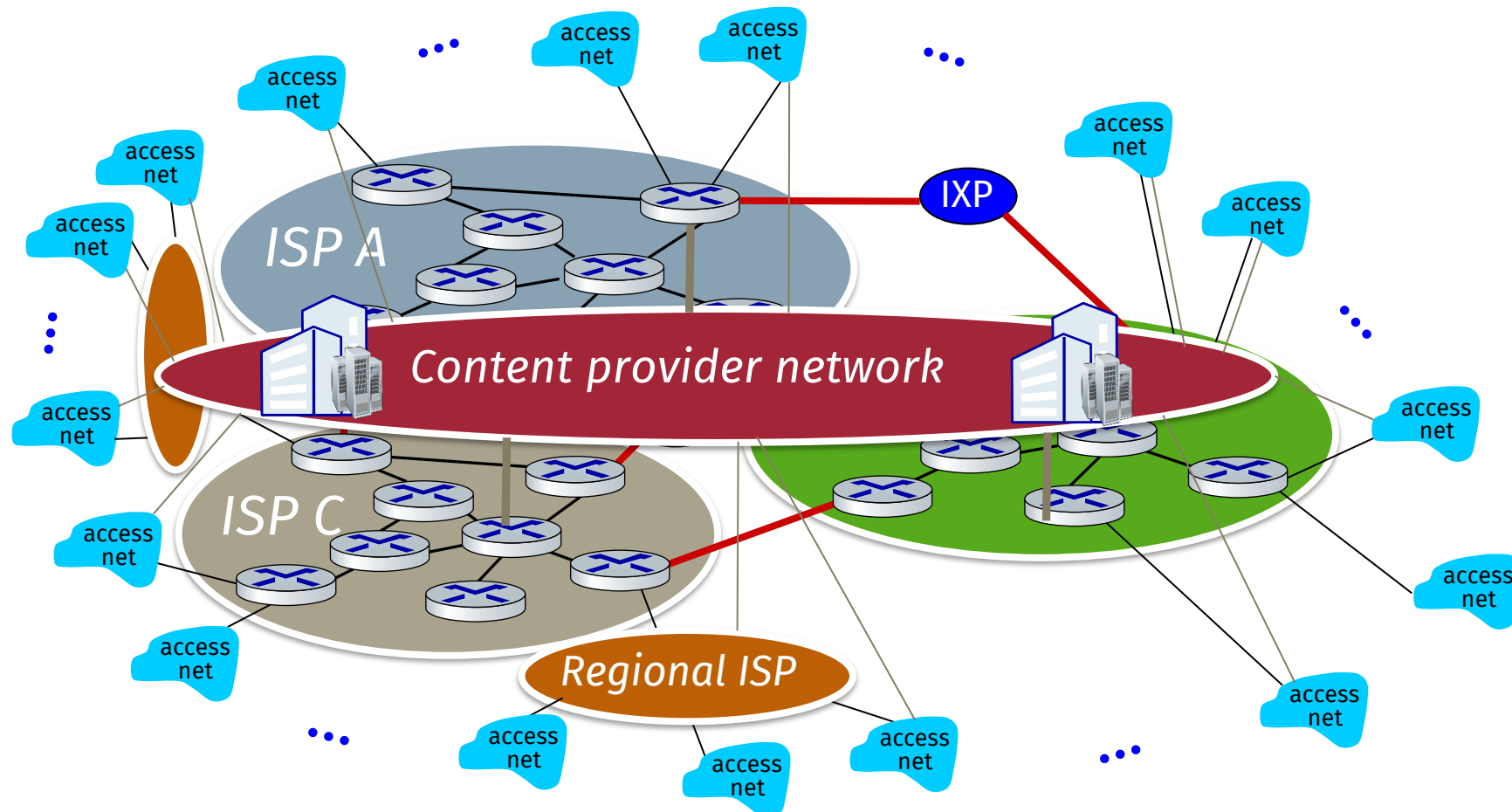
Ein Netz von Netzen: Vernetzung globaler ISPs



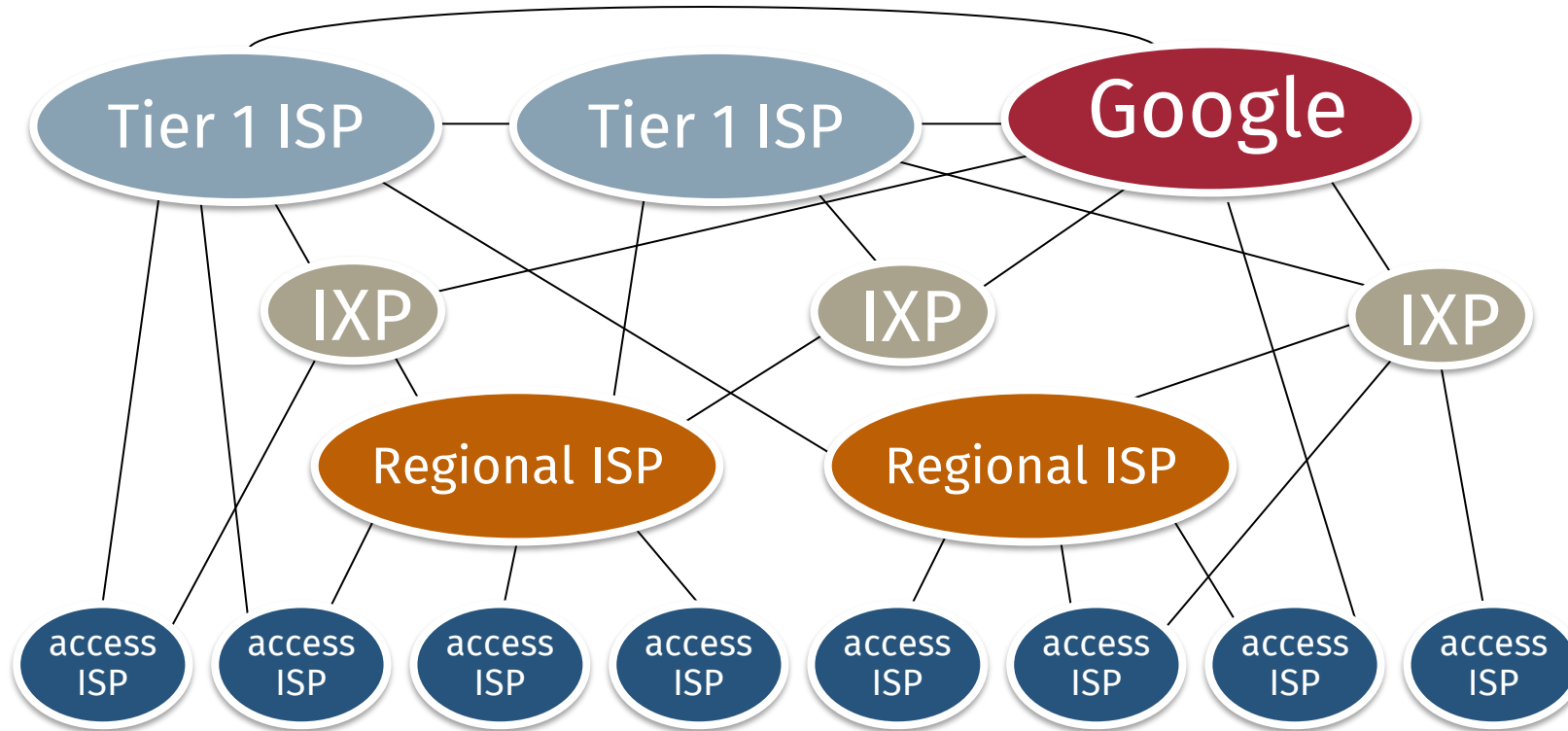
Ein Netz von Netzen: Regionale ISPs zwischen Zugangsnetzen und ISPs



Ein Netz von Netzen: Content Provider Netzwerke (z.B. Google, Akamai)



Struktur des Internets: Ein Netz von Netzen

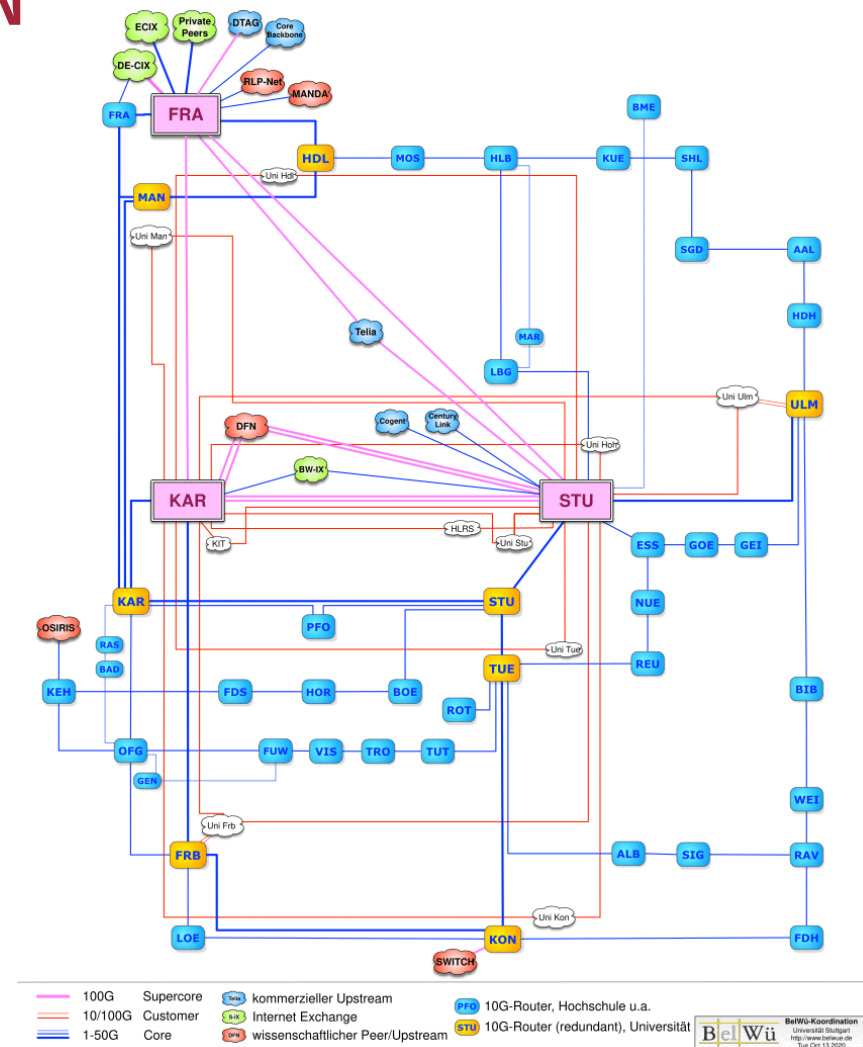


- im Zentrum: kleine Anzahl großer, eng vernetzter Netzwerke
 - große kommerzielle ISPs (“Tier 1”) von nationaler und internationaler, z.B. Telekom
 - **Content Provider Networks** (z.B. Google): direkt angebundene Datenzentren großer Unternehmen

BelWue: Baden-Württemberg Extended LAN



Bildquellen: <https://www.belwue.de/netz/topologie.html>

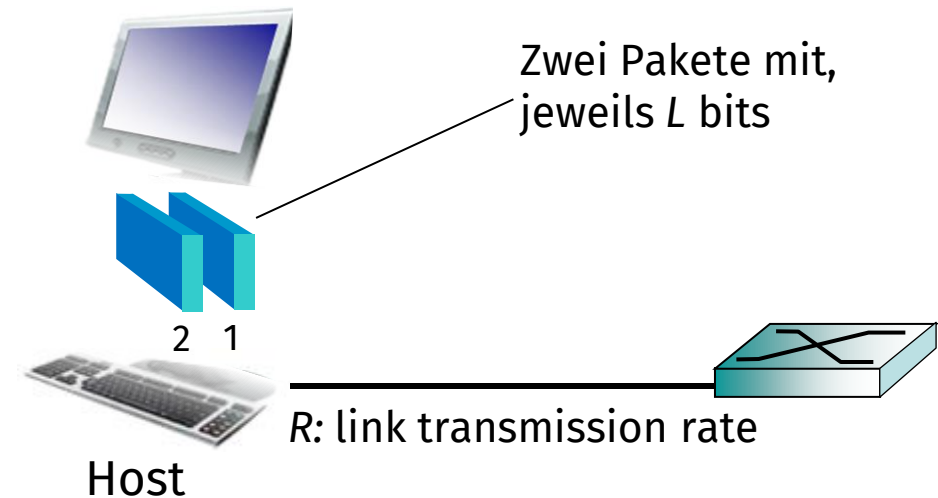


A.3 Verzögerungen, Verlust und Durchsatz

Versand von Datenpaketen durch Hosts

Versenden von Daten

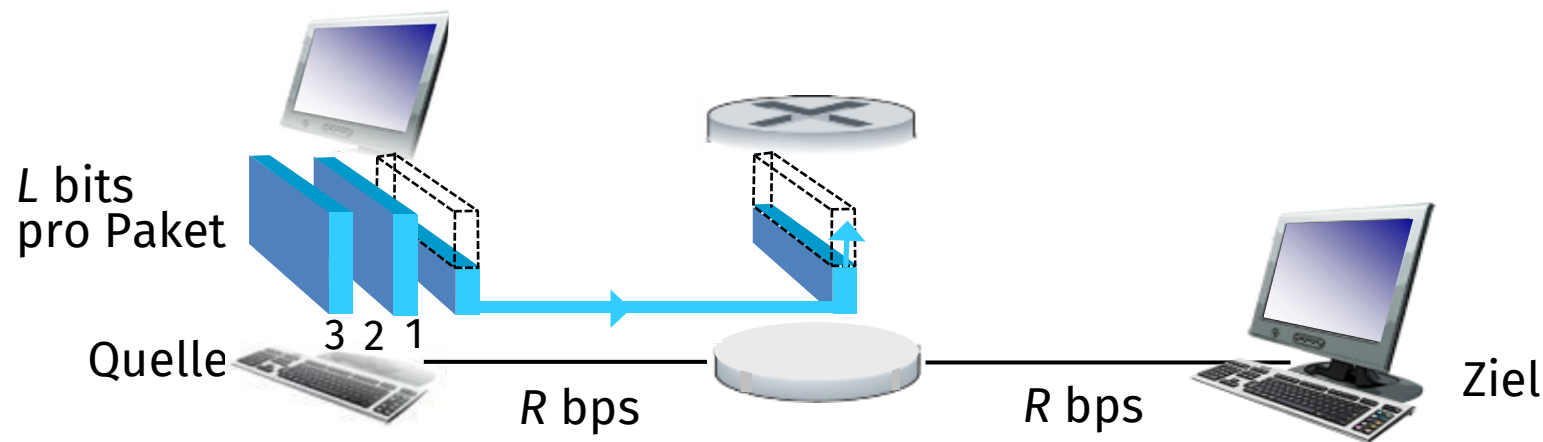
- Empfang der Anwendungsnachricht
- Aufteilen in kleinere Teile (Pakete) fester Länge L bits
- Übertragen des Pakets über das Zugangszusatzwerk mit Datenrate R (bit/s)
 - Link Kapazität, Link Bandbreite, Übertragungsrate



$$\text{Packet Transmission Delay (Übertragungslatenz)} = \text{Zeit um ein } L\text{-bit Paket auf den Link zu senden} = \frac{L \text{ (bits)}}{R \text{ (bits/sec)}}$$

Packet Switching: Store-and-Forward

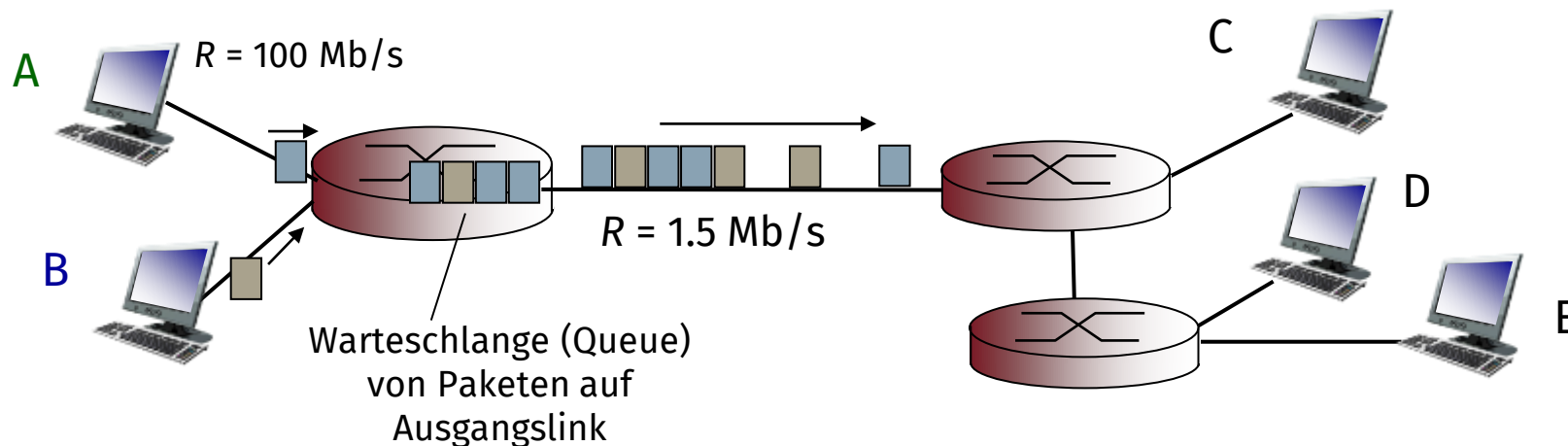
- L/R Sekunden um L -bit Paket auf Link mit Bandbreite R bps zu übertragen
- **Store-and-forward:** gesamtes Paket muss vor Weiterleitung beim Router angekommen sein
- Ende-zu-Ende Verzögerung (delay) = $2 * L/R$ (hier noch *ohne* Signallaufzeit / propagation delay und Verarbeitungszeit / processing delay)
- Beispiel:
 - $L = 7.5$ Mbits, $R = 1.5$ Mbps
 - One-hop Übertragungsverzögerung = 5 sec, Ende-zu-Ende Verzögerung bei 2 Hops = 10 sec



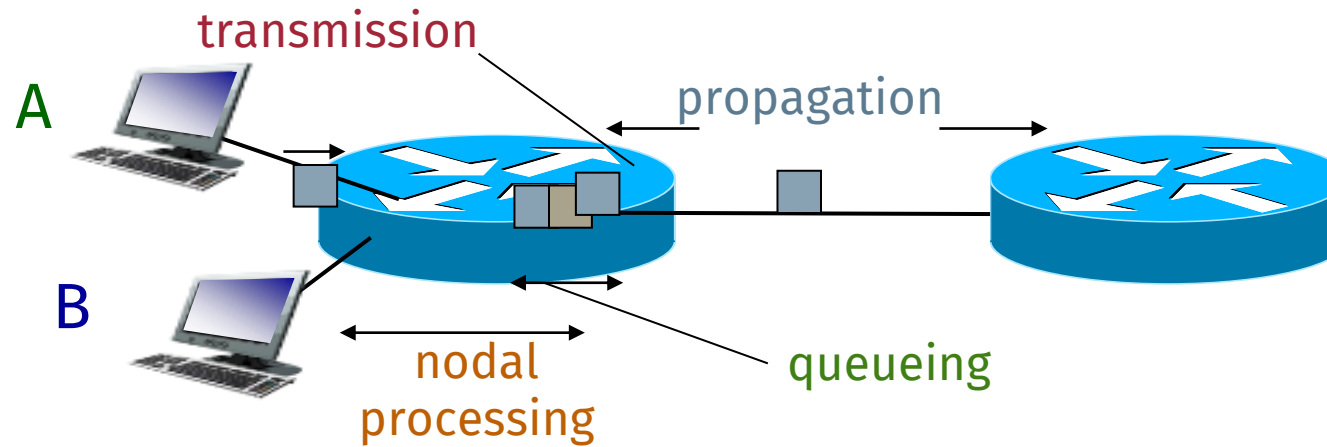
Packet Switching: Queueing Delay, Verlust

Queueing und Loss (Paketverlust)

- falls Datenrate ankommender Pakete > Datenrate auf Ausgangslink
 - ◆ Zwischenspeichern (Queueing) von Paketen notwendig
 - ◆ Queueing Delay
- begrenzter Speicher / Buffer:
 - ◆ Pakete müssen verworfen werden → Paketverlust



Vier Ursachen für Verzögerungen (Delay)



$$d_{\text{hop}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

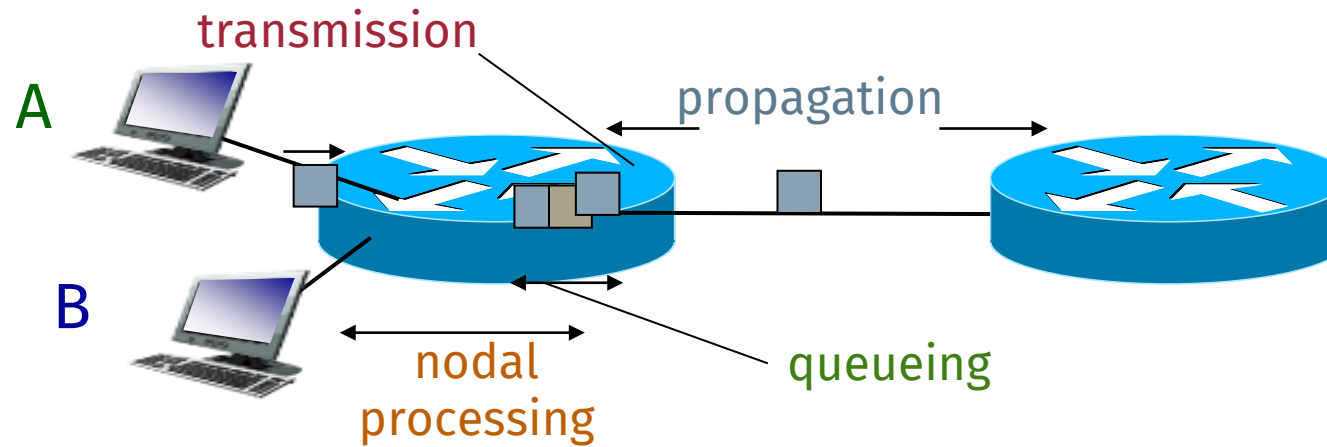
d_{proc} : Verarbeitungsverzögerung

- Fehlerprüfung
- Ausgangslink bestimmen
- typischerweise < msec

d_{queue} : Queueing Delay

- Wartezeit bis Output Link frei für Übertragung
- Verstopfung (congestion) erhöht d_{queue}

Vier Ursachen für Verzögerungen (Delay)



$$d_{\text{hop}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

d_{trans} : Übertragungsverzögerung

- L: Paketlänge (bits)
- R: Bandbreite Link(bps)
- $d_{\text{trans}} = L/R$

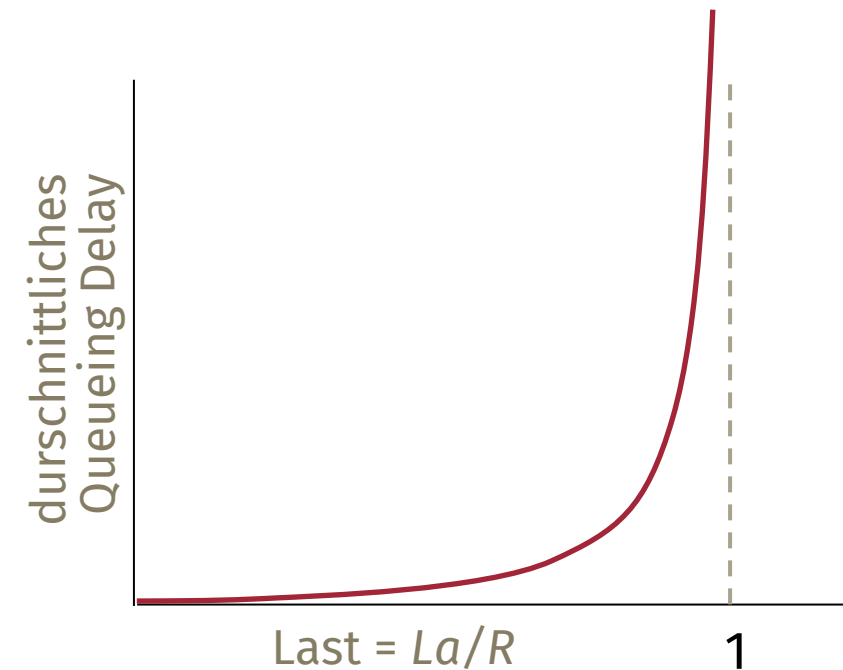
d_{trans} und d_{prop}
oft sehr
verschieden

d_{prop} : Propagation Delay (Ausbreitungsverzögerung)

- d: Länge des Links
- s: Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium
 - ($\sim 3 \times 10^8$ m/sec, 50% weniger in LWL)
- $d_{\text{prop}} = d/s$

Queueing Delay

- R: Link Bandbreite (bps)
- L: Paketlänge (bits)
- a: durchschnittliche Paketankunftsrate
- $La/R \sim 0$
 - Queueing Delay klein
- $La/R \rightarrow 1$
 - Queueing Delay groß
- $La/R > 1$
 - mehr Pakete als verarbeitet werden können
 - ◆ \rightarrow unendliche Verzögerung \rightarrow Paketverlust

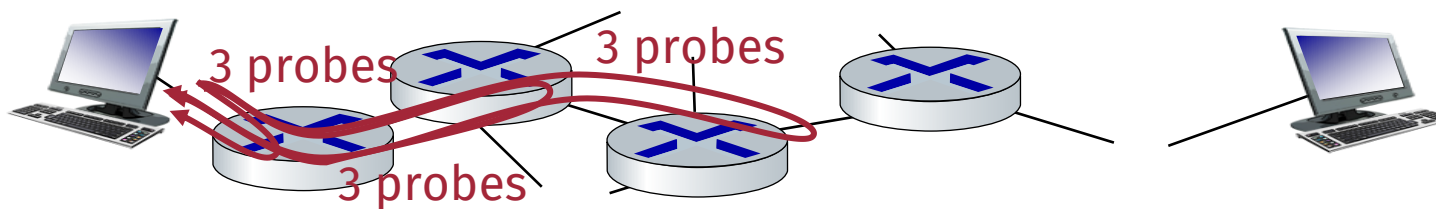


Verzögerungen und Routen im Internet

Wie sehen Routen, Verzögerungen und Verlust im Internet aus?

■ traceroute:

- misst Paketverzögerungen zwischen Sender und Routern auf der Route zum Empfänger
- für $i = 1$ bis n :
 - sende drei „Probe“ Pakete zum i -ten Router
 - Router i sendet ein Antwortpaket zurück
 - Sender misst „Round-Trip-Time“ (RTT)



Traceroute

drei RTT-Messungen

```
$ traceroute www.nicta.gov.au
traceroute to nicta.com.au (221.199.217.18), 64 hops max, 52 byte packets
 1  192.168.1.1 (192.168.1.1)  0.682 ms  0.196 ms  0.283 ms
 2  130.255.104.2 (130.255.104.2)  3.775 ms  3.566 ms  4.013 ms
 3  94.125.79.109 (94.125.79.109)  4.296 ms  3.367 ms  4.132 ms
 4  192.168.75.61 (192.168.75.61)  3.536 ms  3.476 ms  4.164 ms
 5  swu.nueg-ae0-347.de.lambdanet.net (217.71.101.81)  10.800 ms  11.426 ms  10.189 ms
 6  ae5.irt1.fra44.de.as13237.net (217.71.96.73)  13.319 ms  13.871 ms  13.845 ms
 7  xe-1-2-0.mpr1.fra4.de.above.net (80.81.194.26)  14.984 ms  15.995 ms  16.822 ms
 8  xe-0-0-0.mpr1.fra3.de.above.net (64.125.31.217)  16.881 ms  16.516 ms  17.612 ms
 9  ae0.cr1.ams5.nl.above.net (64.125.32.106)  21.923 ms  21.132 ms  21.764 ms
10  xe-0-2-0.cr2.lga5.us.above.net (64.125.27.185)  109.433 ms  108.314 ms  107.607 ms
11  xe-3-0-0.cr2.ord2.us.above.net (64.125.31.74)  123.338 ms  122.288 ms  125.281 ms
12  ae5.cr1.ord2.us.above.net (64.125.28.233)  138.718 ms  146.039 ms  167.477 ms
13  ae.mpr1.sea1.us.above.net (64.125.20.69)  183.379 ms  169.775 ms  168.130 ms
14  64.125.193.130.i223.above.net (64.125.193.130)  306.944 ms  308.844 ms  322.389 ms
15  ge-6-1-0.bb1.a.syd.aarnet.net.au (202.158.194.120)  307.130 ms  309.011 ms  308.298 ms
16  gigabitethernet0.er1.nicta.cpe.aarnet.net.au (202.158.202.178)  307.192 ms  319.166 ms  308.450 ms
17  gw1.er1.nicta.cpe.aarnet.net.au (202.158.202.186)  307.651 ms  317.598 ms  308.295 ms
18  * * *
19  * * *
20  * * *
21  * * *
```

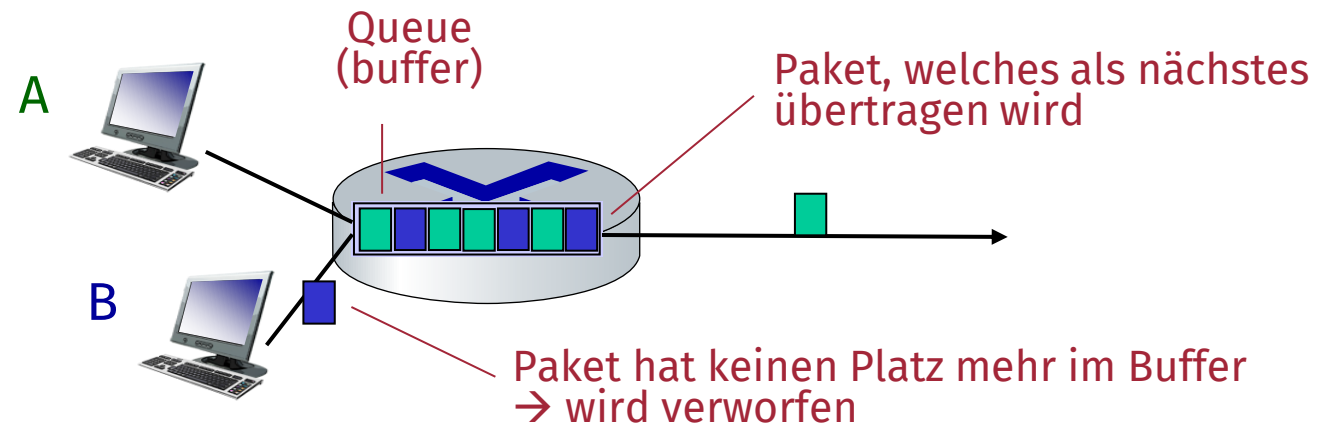
Transatlantik-Link

keine Antwort (Paketverlust, Firewall, ...)

Paketverlust

Packet Loss (Paketverlust)

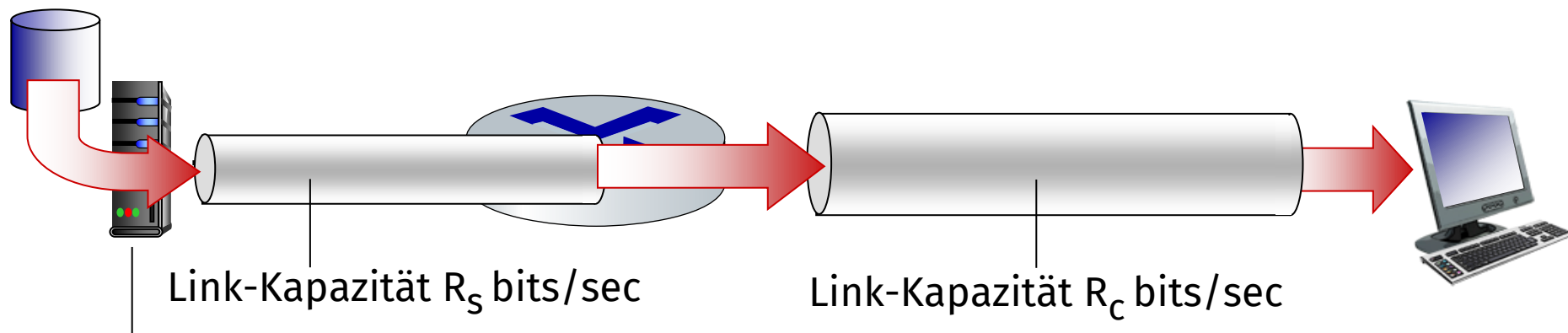
- Queue (oder buffer) vor einem Link hat endliche Kapazität
- wenn vollständig gefüllt → Verwerfung neuer eingehender Pakete
- verlorene Pakete werden evtl. von Sender oder vorherigem Sender erneut übertragen



Durchsatz (1)

Throughput (Durchsatz)

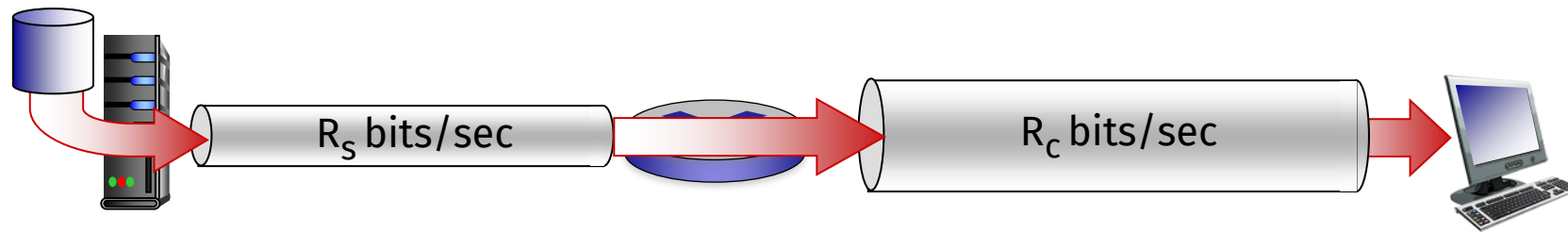
- Datenrate (bits/s), mit der Daten vom Sender zum Empfänger geschickt werden
- punktuell: Datenrate zu einem bestimmten Zeitpunkt (schwer zu bestimmen)
- Durchschnitt (z.B. in 5 Minuten Intervall)



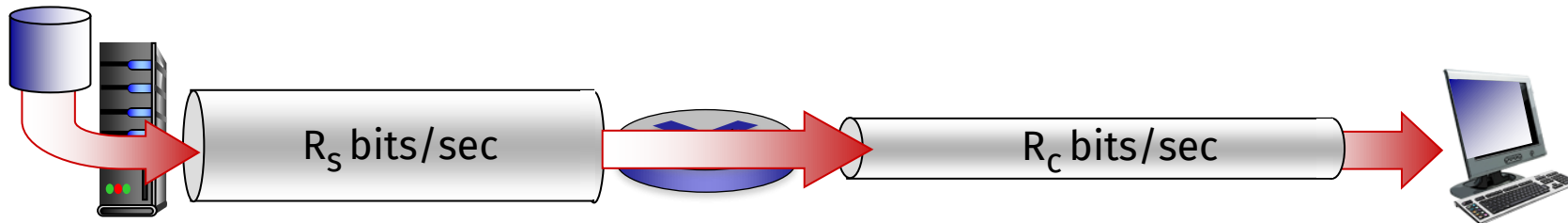
Server sendet File mit Größe F zum Client

Durchsatz (2)

$R_s < R_c$ Durchschnittlicher Ende-zu-Ende Durchsatz?



$R_s > R_c$ Durchschnittlicher Ende-zu-Ende Durchsatz?



Bottleneck Link: Derjenige Link auf Ende-zu-Ende Pfad, welcher den Durchsatz bestimmt.

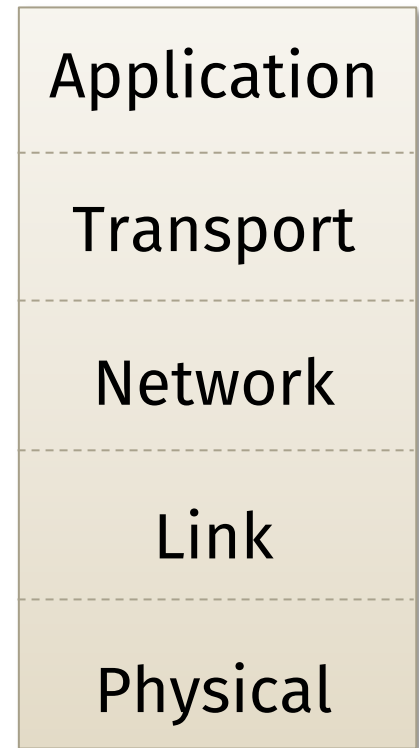
A.4 Das Schichtenmodell

Schichten (Layer)

- Internet: extrem hohe Komplexität
 - eventuell das komplexeste und größte je von Menschen gebaute System(?)
 - Hosts, Router, Links, Anwendungen, Protokolle, Hardware, Software
- Beherrschung von Komplexität im Internet
 - Struktur und Modularisierung
 - Abstraktion auf verschiedenen Ebenen
 - **Schichtenmodell**
- Aufbau des Systems von einfachen Basisfunktionen hin zu komplexeren Mechanismen
- höhere Schichten nutzen untere Schichten, untere Schichten verbergen Komplexität

Internet Protocol Stack

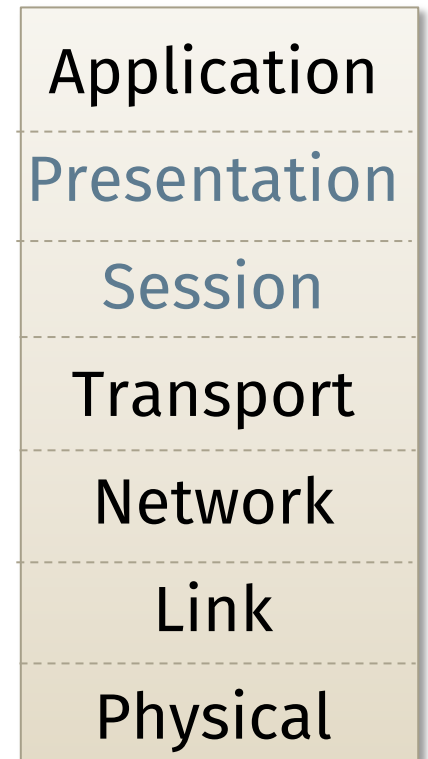
- Anwendungsschicht (application layer)
 - unterstützt bestimmte Netzwerkanwendungen
 - FTP, SMTP, HTTP
- Transportschicht (transport layer)
 - Ende-zu-Ende Datentransfer zwischen Prozessen
 - TCP, UDP
- Netzwerkschicht (network layer)
 - Routing von Paketen (Datagrammen) von Sender zu Empfänger
 - IP, Routingprotokolle
- Verbindungsschicht (link layer)
 - Datentransfer zwischen benachbarten Netzwerkelementen
 - Ethernet, IEEE 802.11 (WiFi), DSL
- Physikalische Schicht (physical layer)
 - Kodierung der Bits auf dem Medium



ISO/OSI-Referenzmodell

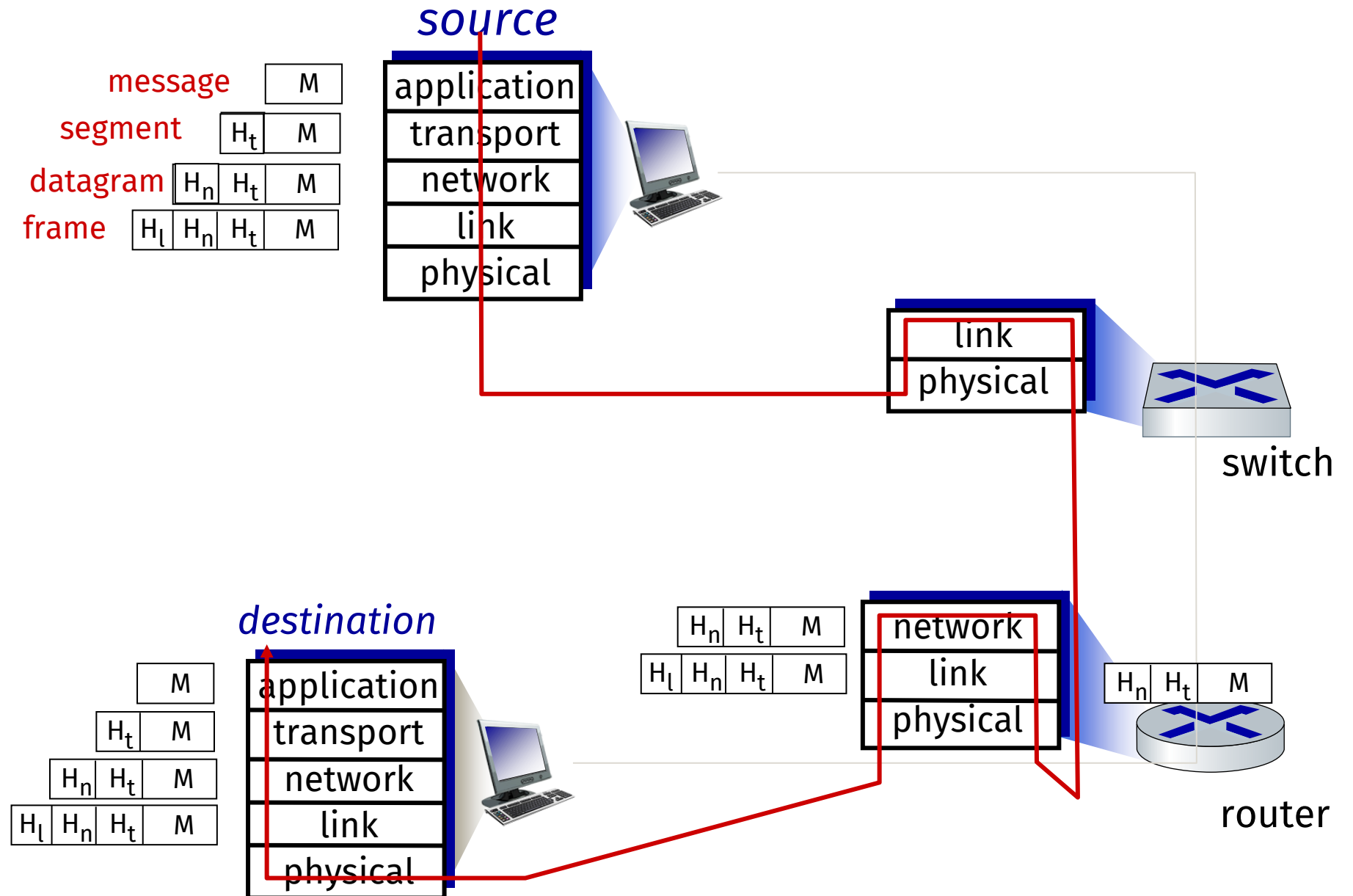
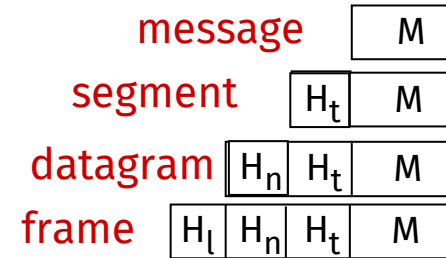
ISO Open Systems Interconnection Modell

- komplexeres Schichtenmodell
- zusätzliche Schichten:
 - Präsentationsschicht (presentation layer)
 - Datenrepräsentation (auch Verschlüsselung, Komprimierung, ...)
 - Sitzungsschicht (session layer)
 - Synchronisation, Checkpoints, Sitzungswiederaufnahme
- Internet Stack hat diese Schichten nicht
 - müssen gegebenenfalls auf Anwendungsschicht implementiert werden
 - SSL / TLS hat viele Eigenschaften dieser Schichten



Kapselung

Encapsulation



A.5 Netzwerksicherheit

Netzwerksicherheit

Fragen der Netzwerksicherheit

- Wie können Personen (Hacker?) Computernetzwerke angreifen?
- Wie können wir Netzwerke gegen Angriffe schützen?
- Wie bauen wir Netzwerke, die gegen Angriffe immun sind?

Sicherheit kein ursprüngliches Designziel des Internet

- ursprüngliche Vision eines befriedeten Orts
 - „Ein Netz voller freundlicher Wissenschaftlern, die alle zusammenarbeiten“ 😊
- Internet Protokoll Design: Versuch diese Fehlannahmen zu reparieren
- Security auf allen Schichten relevant

Beispiele für Angriffe auf das Netzwerk (1)

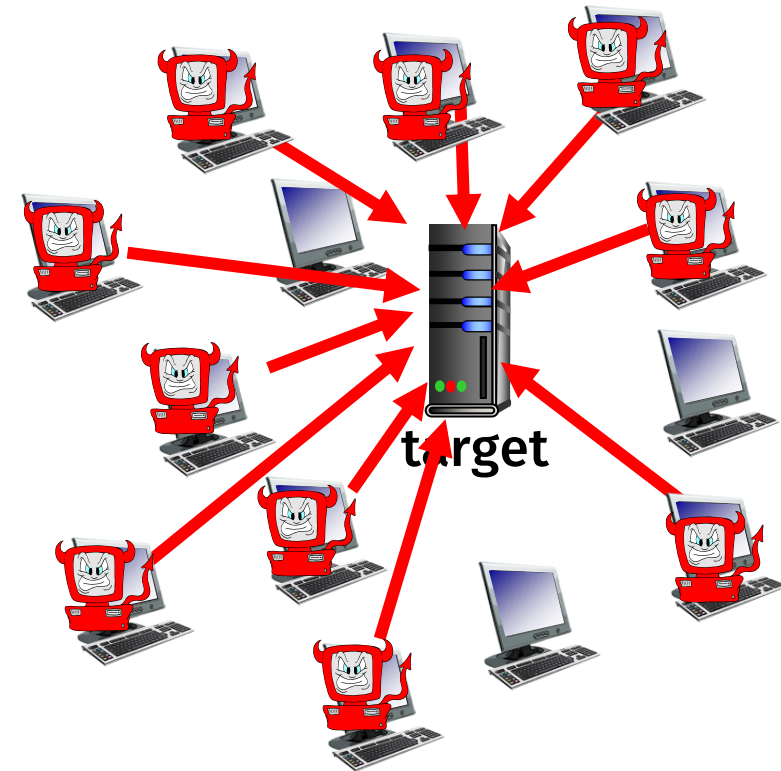
Malware

- Infektion von Hosts (oder Router?)
 - Virus: Infektion und (passive) Weiterverbreitung über infiziertes Trägermedium (z.B. Email, Floppy Disk, USB Stick, Word Dokument)
 - Wurm: Infektion und (aktive) Weiterverbreitung durch Netzwerk
- Spyware
 - spioniert PC aus, speichert Tastendrücke, Browsing History, ...
- Ransomware
 - verschlüsselt Daten des Rechners und gibt sie erst nach Zahlung eines Lösegelds wieder frei
- infizierte Rechner häufig als Teil von Botnetzen
 - nehmen selbst an Spam-Verteilung, DDoS-Attacken, etc. teil

Beispiele für Angriffe auf das Netzwerk (2)

Denial of Service (DoS)

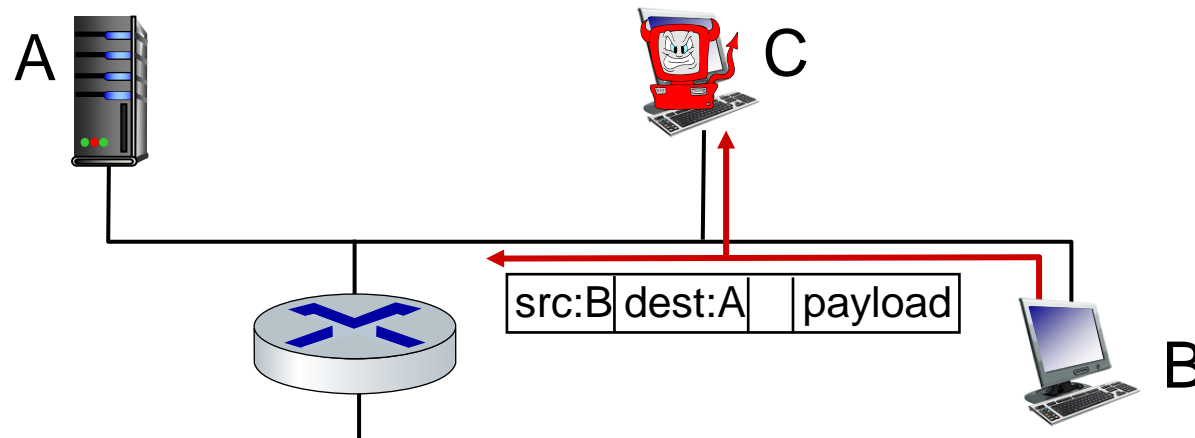
- Angreifer überlasten Ressourcen des Netzwerks oder des Servers (z.B. Bandbreite, CPU), so dass Dienst für reguläre Nutzer nicht mehr zur Verfügung steht
- Ablauf
 1. Angriffsziel auswählen (IP-Adresse)
 2. Infizieren von vielen Rechnern mit Malware (Botnet)
 3. Infizierte Rechner senden so viele Datenpakete wie möglich an Angriffsziel



Beispiele für Angriffe auf das Netzwerk (3)

Eavesdropping (Packet „Sniffing“)

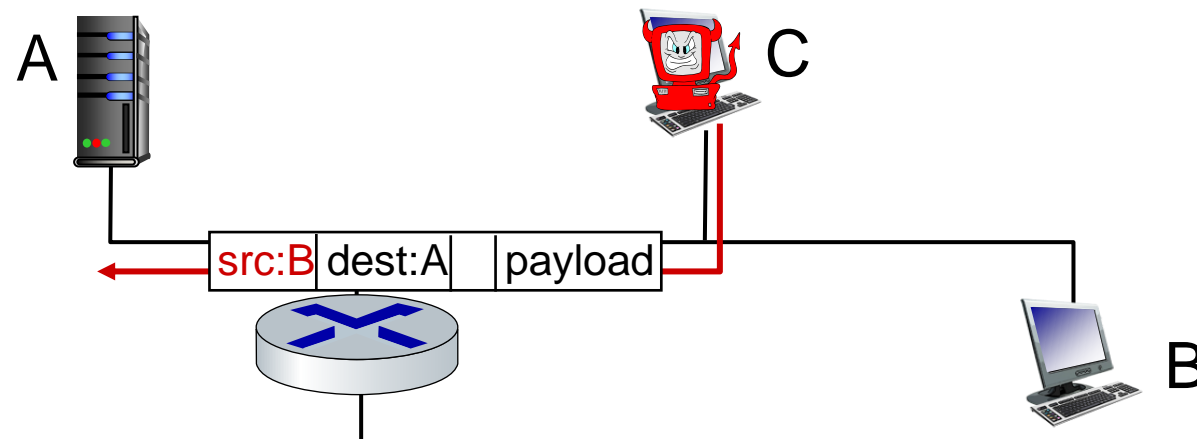
- Broadcast-Medium erlaubt Zugriff durch Dritte (Ethernet-Bus, WLAN)
- Interfaces empfangen im „promiscuous mode“ alle Pakete
- Mithören mittels Paket Sniffer (z.B. Wireshark)
- Lösung: Verschlüsselung des Datenverkehrs



Beispiele für Angriffe auf das Netzwerk (4)

IP Spoofing

- senden von Paketen mit gefälschten Absendeadressen



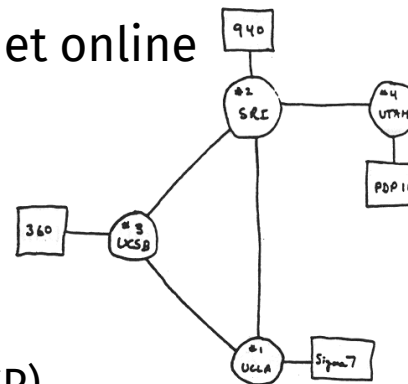
A.6 Historischer Überblick

Geschichte des Internets (1)

1961 – 1972: Packet-Switching

- **1961:** Queueing-Theorie zeigt Effizienz des Packet-Switching-Ansatzes
- **1967:** Advanced Research Projects Agency konzipiert das ARPAnet
- **1969:** erste Knoten des ARPAnet online

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



THE ARPA NETWORK

DEC 1969

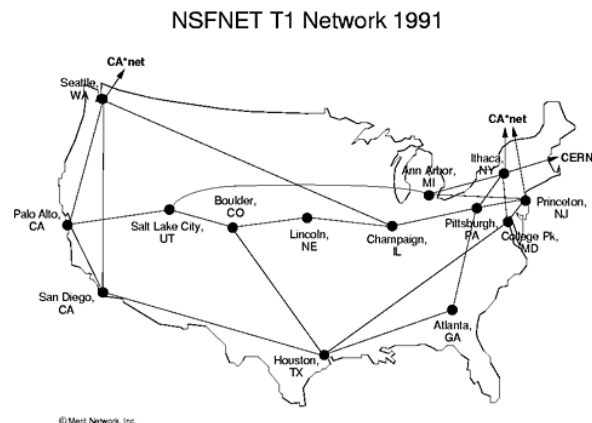
1972 – 1980: Internetworking & neue Netze

- **1970:** ALOHAnet in Hawaii als erstes Funk-Rechnernetz
- **1974:** Cerf und Kahn: Architektur für Internetworking
 - Minimalismus und Autonomie als Grundsätze
 - *best-effort* Service-Modell
 - zustandloses Routing
 - dezentralisierte Kontrolle
- **1976:** Ethernet (Xerox PARC)
- **1979:** 200 Knoten im ARPAnet

Geschichte des Internets (2)

1980-1990: Neue Protokolle & Wachstum

- **1982:** Spezifikation des SMTP-Protokolls
- **1983:** Einsatz von TCP/IP
- **1983:** DNS-Protokoll für Namensauflösung
- **1985:** Entwicklung des FTP-Protokolls
- **1988:** Überlastkontrolle für TCP
- mittlerweile heterogenes Netzwerk von Netzwerken mit über 100.000 Knoten (USA)



1990 – 2000: Kommerzieller Erfolg & WWW

- **frühe 1990er:** Stilllegung des ARPAnet
- **1991:** Aufhebung der Beschränkung kommerzieller Anwendungen (NSFnet)
- **frühe 1990er:** Geburt des Webs
 - Hypertext, HTTP, HTML
 - erste Browser (Mosaic, Netscape)
- **späte 1990er:** kommerzieller Durchbruch
 - World Wide Web, Instant Messaging, P2P File Sharing als „Killer-Anwendungen“
 - ca. 50 Mio. Hosts, >100 Mio. User
 - Backbone-Links mit Gbps-Durchsatz

Geschichte des Internets (3)

2005 – heute: Viele neue Anwendungen, Internet wird allgegenwärtig

- ca. 18 Milliarden Geräte im Internet (Stand 2017)
 - deutliche Zunahme mobiler Endgeräte und Smartphones (u.a. seit 2007: iPhone)
- hohe Verfügbarkeit von privaten Breitbandanschlüssen in den entwickelten Ländern
- zunehmende Verbreitung von schnellen, drahtlosen Netzen:
 - 4G/5G/WLAN
- Entstehung sozialer Netzwerk-Plattformen
 - z.B. Facebook mit 2.5 Milliarden Nutzern (Stand 2019)
- Unternehmen verlagern ihre IT-Dienstleistungen in externe Datenzentren im Internet
 - „Cloud Computing“ (z.B. Amazon Web Services)

Literatur

A. Einführung

- A.1 Was ist das Internet?
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.1
- A.2 Netzwerke
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.2 & 1.3
- A.3 Verzögerungen, Verlust und Durchsatz
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.4
- A.4 Das Schichtenmodell
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.5
- A.5 Netzwerksicherheit
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.6
- A.6 Historischer Überblick
 - ➔ Kurose & Ross (6. Aufl.): Kapitel 1.7