

Rechnernetze & Verteilte Systeme

Ludwig-Maximilians-Universität München

Sommersemester 2019

Prof. Dr. D. Kranzlmüller

<http://www.nm.ifi.lmu.de/rn>



Klausurtermin

- **Mittwoch 31.07.2019**
- 16-18 Uhr
- Anmeldung wie üblich auf Uniworx
- Nachholklausur am Ende der Semesterferien
 - Termin wird später bekannt gegeben

Heute

- Kurze Wiederholung zur Schichtung
- Zugangsnetze – „die letzte Meile“
- Verzögerung, Paketverlust, Durchsatz
- Fehlererkennung
- Fehlerkorrektur

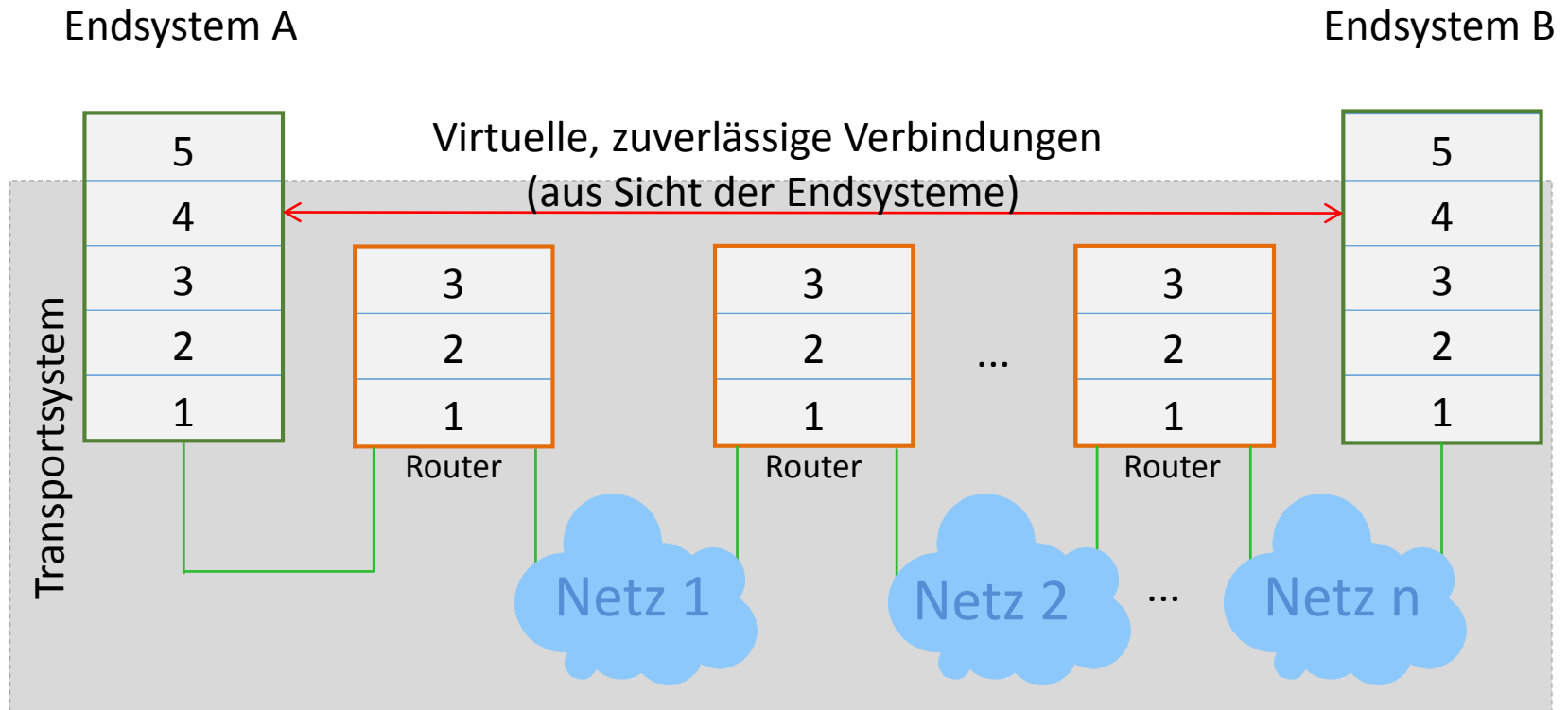
Wiederholung: Schichtung

Internetmodell nach Kurose/Ross

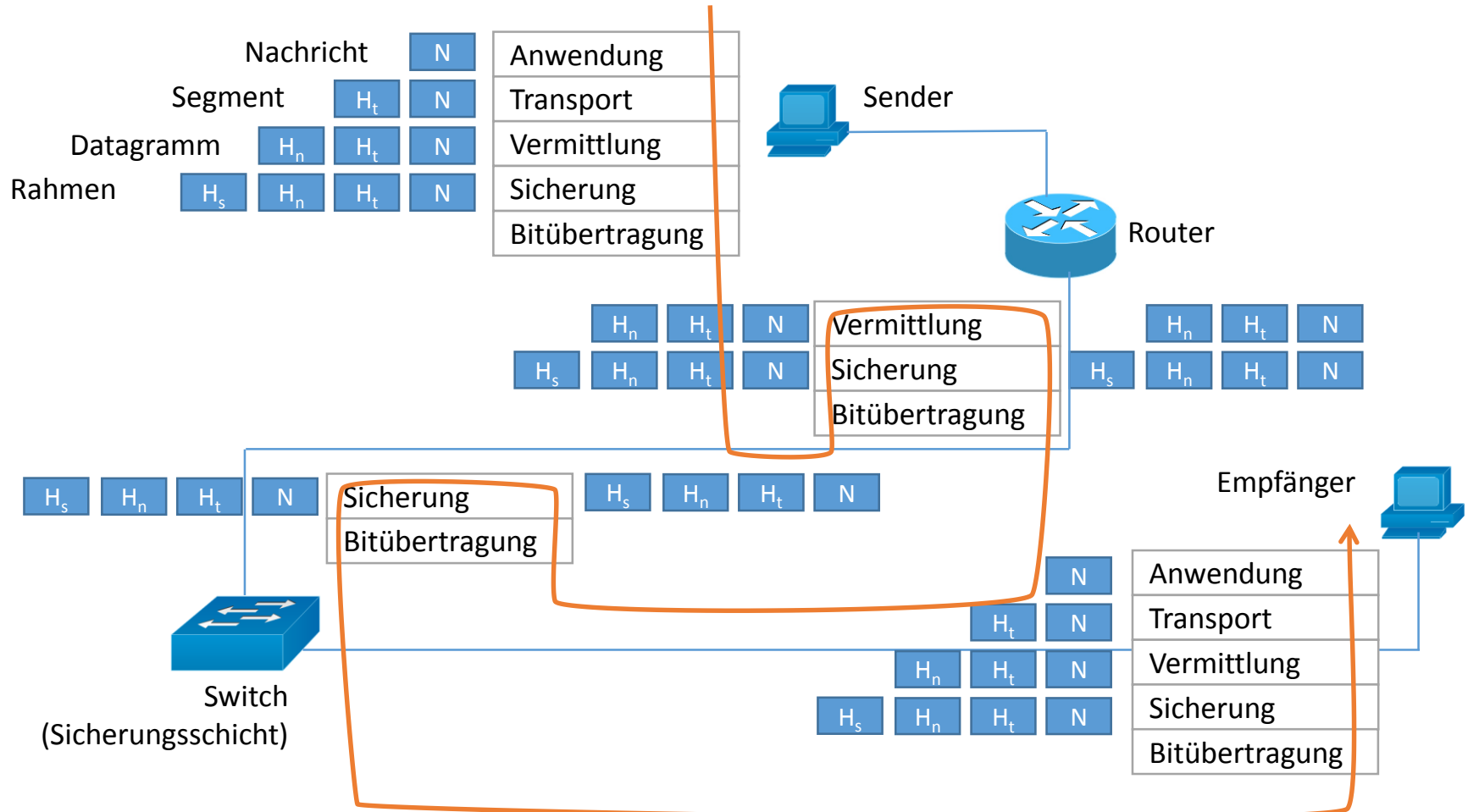
Aufteilung in **fünf Schichten**,
zusammen ein Protokollstapel (engl.
protocol stack).

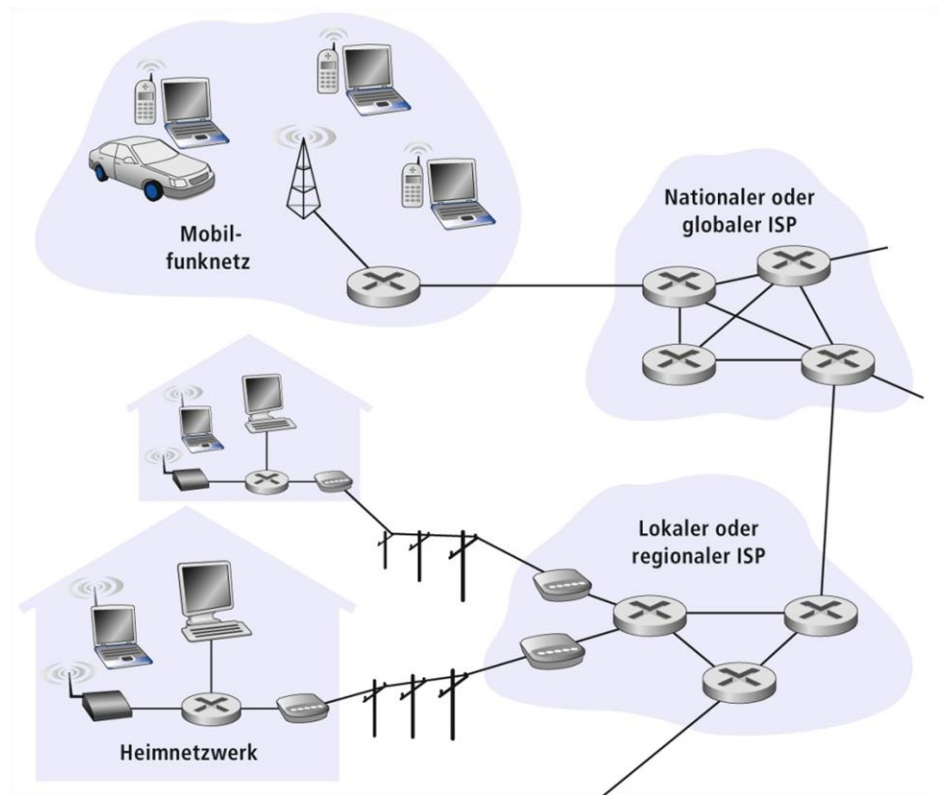
Anwendung
Transport
Vermittlung
Sicherung
Bitübertragung

Transportsystem



Protokollschichtung





Zugangsnetze

Der Weg ins Internet

Zugangsnetz

- Verbindung vom Endsystem zum ersten Router
- Teils unterschiedlicher physikalischer Aufbau
- Eigene Charakteristiken je Zugangsnetz
 - Geschwindigkeit
 - Zuverlässigkeit
 - Entfernungen

Beispiele: Wählleitung/Dial Up, DSL, „Kabel“, FTTH/FTTB, Ethernet, WLAN, LTE

Wählleitung

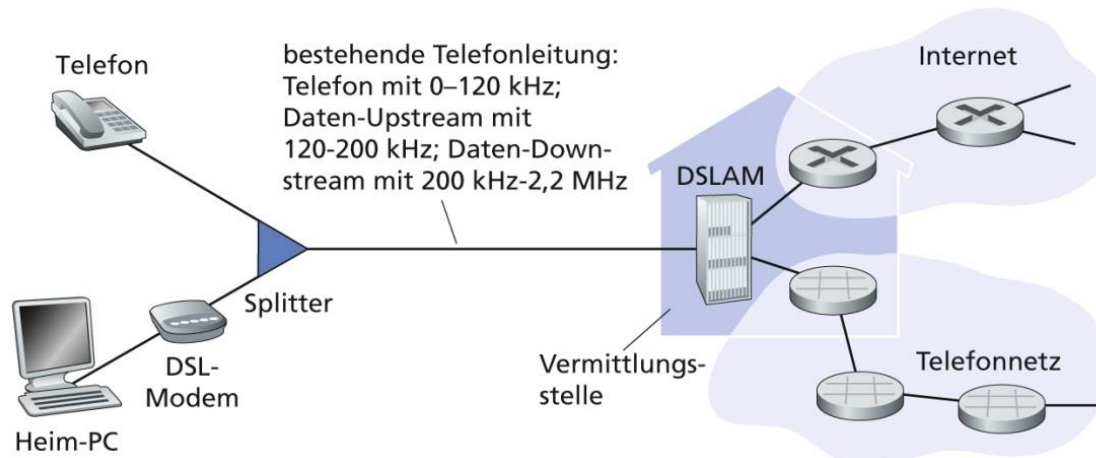
- Nutzung der Telefonleitung
- Modem wählt Gegenstelle an
- Austausch digitaler Daten über analogen Kanal (Telefonleitung)
- Exklusive Nutzung der Telefonleitung
- Geschwindigkeiten bis 56kbps



Digital Subscriber Line



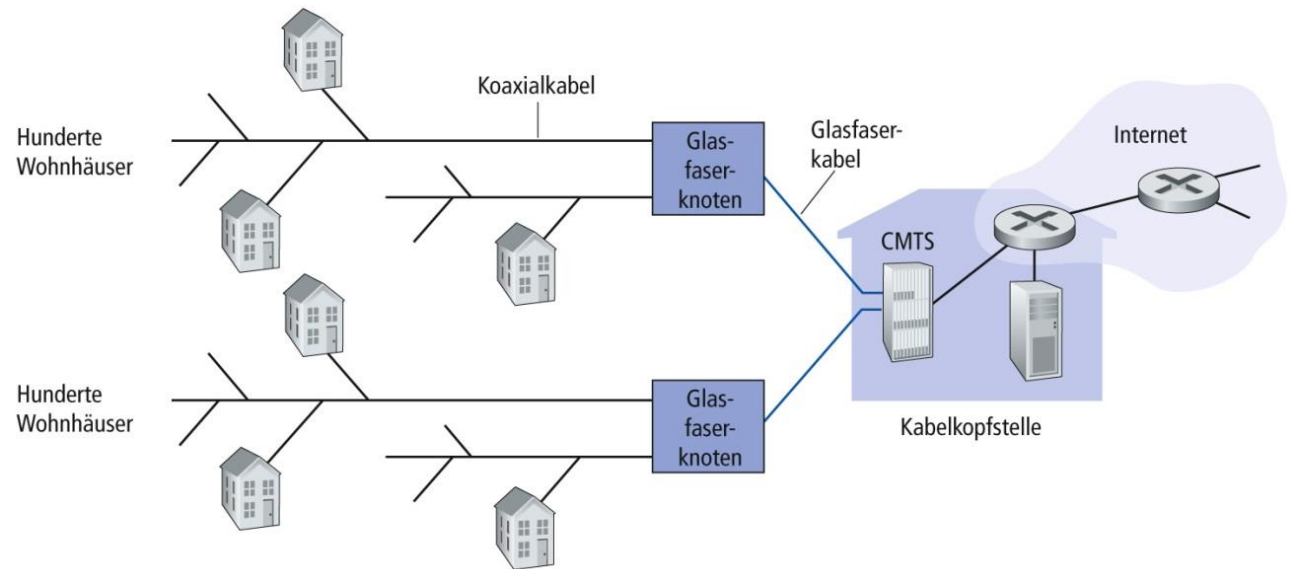
- Verbindung über „Twisted Pair“ zu einem Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM)
- Aufteilung der Bandbreite in Bereiche für Telefon (0-120kHz), Upstream (120 – 200kHz) und Downstream (200kHz – 2,2MHz)
- „Splitter“ teilt die Leitungen für Sprachtelefonie und Daten auf
- Geschwindigkeit abhängig von der Distanz zum DSLAM



Digital Subscriber Line (2)

- 1-16Mbps Downstream, 128kbps – 1Mbps Upstream
- Heute eher very high speed DSL 1/2 (VDSL) mit bis zu 100Mbps
- Vectoring: verhindern von *Übersprechen* zwischen Leitungen
 - Ein Betreiber (Deutsche Telekom) kann dazu Wettbewerber ausschließen
 - Kontrolle aller Leitungen → Übersprechen kann verhindert werden

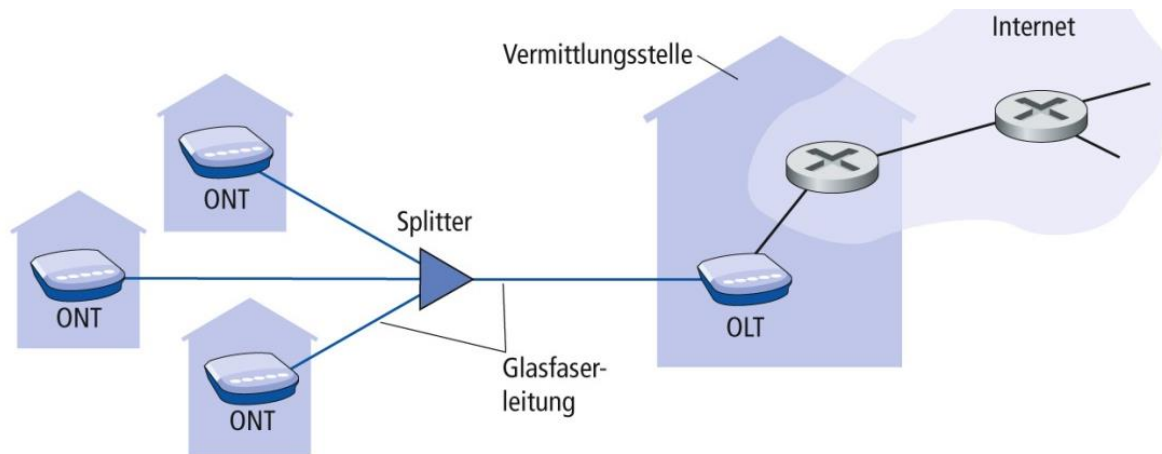
Kabel



- Nutzt Infrastruktur für Kabelfernsehen statt Telefonleitungen
- Kombination aus Koaxialkabel und Lichtwellenleiter
 - Hybrid Fiber Coax (HFC)
- Kabelmodem
- Oft asymmetrische Aufteilung von Up- und Downstream
- Gemeinsames Medium
- Durchsatz bis 450Mbps im Downstream

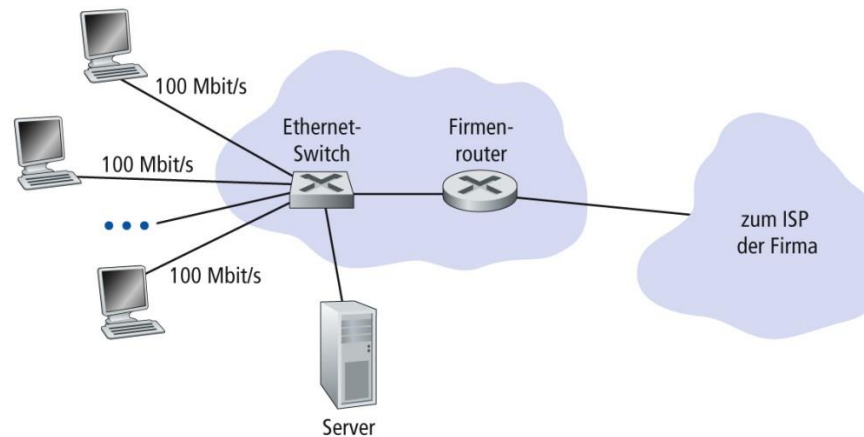
Fiber to the Home (FTTH)

- Fiber to the home
- Anbindung via Lichtwellenleiter (LWL)
- Durchsatz bis mehrere Gbps
- LWL müssen erst verlegt werden
- Fiber to the Building → LWL nur bis ins Haus, dann Verteilung über klassische Telefonleitung



LAN

- Internetzugang über Local Area Network
- Einsatz vor allem im kommerziellen und institutionellen Umfeld (z.B. für Mitarbeiter in Oettingenstr. 67)
- Überwiegend Ethernet (dazu später mehr)
- Heute typischerweise 100Mbps - 1Gbps auf bis zu 100m



Wireless LAN

- Endgerät verbunden mit einem Access Point
- Access Point nutzt meist kabelgebundenes Netz
- Standards 802.11a/b/g/n/ac/ax
 - Demnächst auch „Wi-Fi 4-6“
- Durchsatz von 54Mbps bis über 1Gbps

Wide-Area Wireless Access

- Funkverbindung zu Basisstation
- 3G, 4G und bald 5G
- Mobiler Zugang zum Internet
 - Mehrere Kilometer Entfernung zur Basisstation vom Endgerät möglich
- Nutzung auch im Heimbereich bei schlechtem Ausbau vom Kabel- oder Telefonnetz
- Datenraten von 384kbps bis 500Mbps

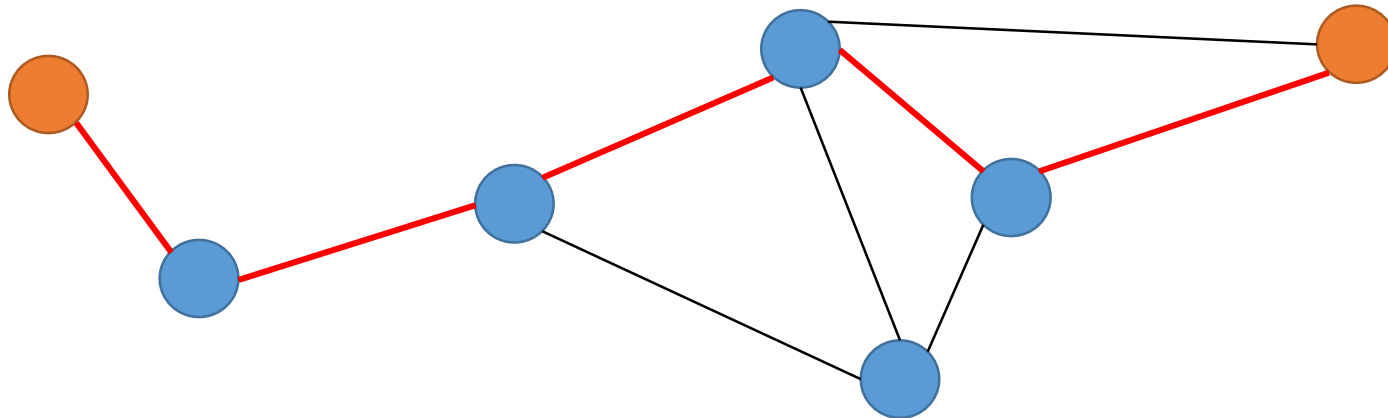
Verzögerung, Paketverlust, Durchsatz

Grundlegende Eigenschaften von Netzen

Paket- und Leitungsvermittlung

Wie können Daten durch ein Netz von Verbindungen, Switches und Routern gesendet werden?

Zwei Ansätze: **Leitungsvermittlung** und **Paketvermittlung**

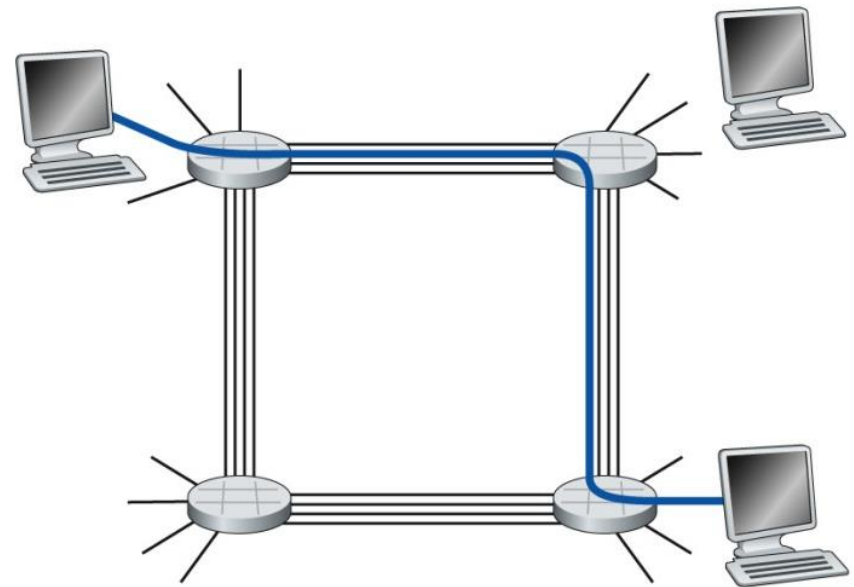


Leitungsvermittlung

Reservierung von Ressourcen entlang eines *festen* Pfades im Netz für die Dauer der *Übertragungssitzung*

- Auf- und Abbau der Verbindung
- Garantierte Ressourcen
- Nicht notwendigerweise exklusive Reservierung
→ Multiplexing

Beispiel: Herkömmliches Telefonnetz



Vor- und Nachteile der Leitungsvermittlung

Nachteile

- Ende-zu-Ende Pfad muss vollständig eingerichtet sein, bevor Daten übertragen werden können
- Bricht eine Vermittlungseinrichtung zusammen, gehen auch alle Verbindungen, die darüber laufen, verloren.
- Wenn Kanal vollständig vergeben ist, kann er von sonst niemandem mehr verwendet werden (Besetztzeichen).

Vorteile

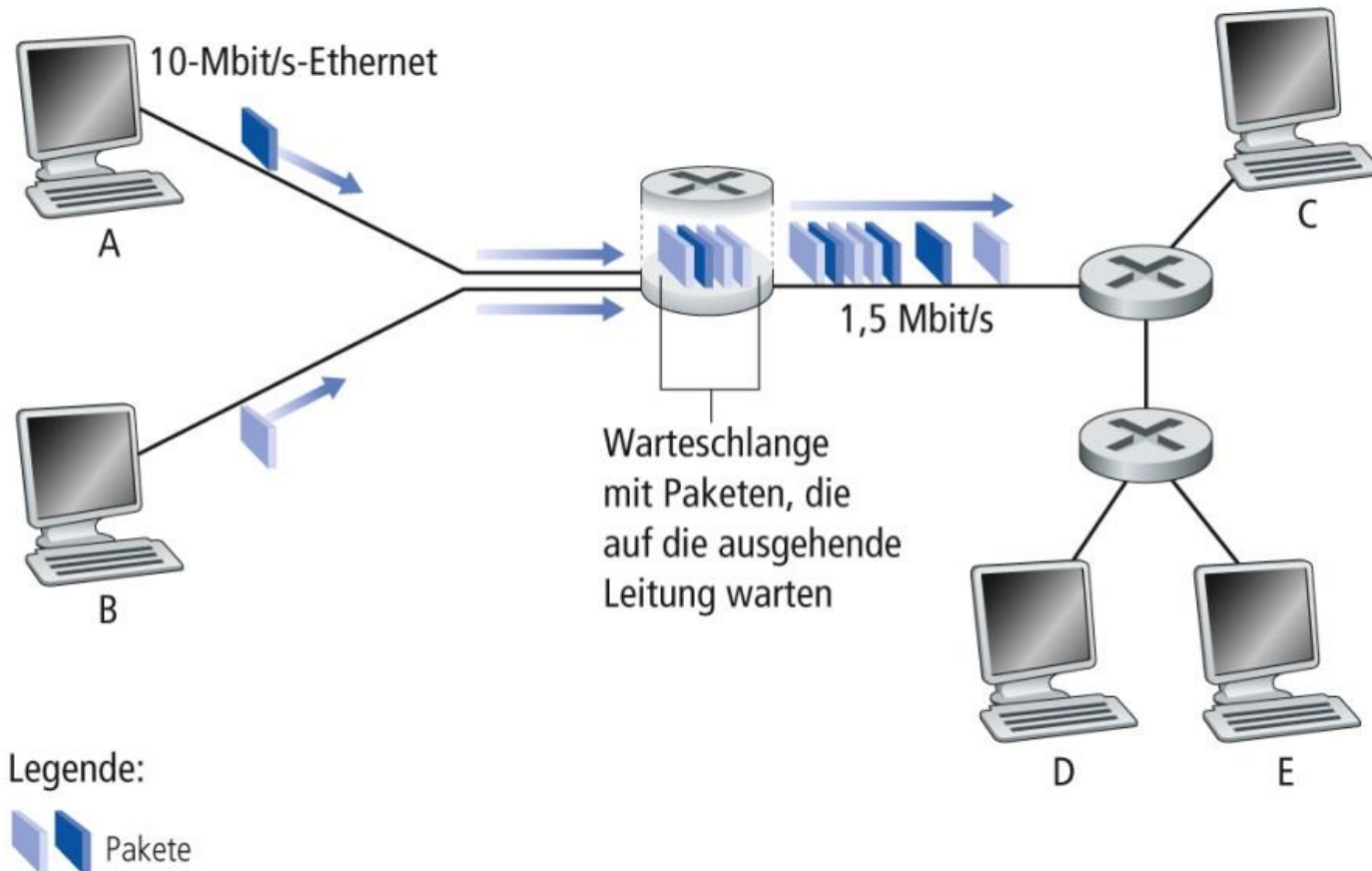
- Ist der Pfad gefunden, besteht ein dedizierter Ende-zu-Ende Kanal.
- ➔ Es gibt keinerlei Warteschlangen in den Knoten.
- ➔ Es ist einfach eine geforderte Dienstgüte zu garantieren.

Paketvermittlung

- Ressourcen werden *nicht* reserviert
- Aufteilung der Nachrichten in Pakete, die einzeln übertragen werden
- Transitsysteme haben Puffer zur Zwischenspeicherung der Pakete → „Store-and-Forward Paketvermittlung“
- Das Internet nutzt Paketvermittlung



Paketvermittlung (2)



Vor- und Nachteile der Paketvermittlung

Nachteile

- Aufteilung der Nachricht erfordert Duplizieren der Header-Informationen
- Reihenfolgeprobleme
- Geforderte Dienstgüte schwierig zu garantieren.

Vorteile

- Begrenzung der Paketgröße kann sicherstellen, dass kein einzelnes Paket eine Leitung zu lange belegt.
- Pfade müssen nicht vor der Datenübertragung eingerichtet werden

Paket- vs. Leitungsvermittlung

Merkmal	Leitungsvermittlung	Paketvermittlung
Verbindungsaufbau	✓	nicht notwendig
Dedizierter physischer Pfad	✓	x
Fixe Route der Daten	✓	x
Reihenfolge der Daten sichergestellt	✓	x
Fehlertoleranz	x	✓
Bandbreite-Reservierung	Fix	Dynamisch
Möglicher Datenstau	Bei Verbindungsaufbau	Jederzeit bei der Übertragung eines Pakets
Potenziell verschwendete Bandbreite	✓	x
„Store and Forward“ Mechanismus	x	✓

Store-and-Forward-Paketvermittlung

„Store-and-Forward“-Paketvermittlung verursacht **Verzögerungen**, da ein Paket in jedem Transitsystem erst vollständig empfangen werden muss, bevor es weiter verschickt werden kann.

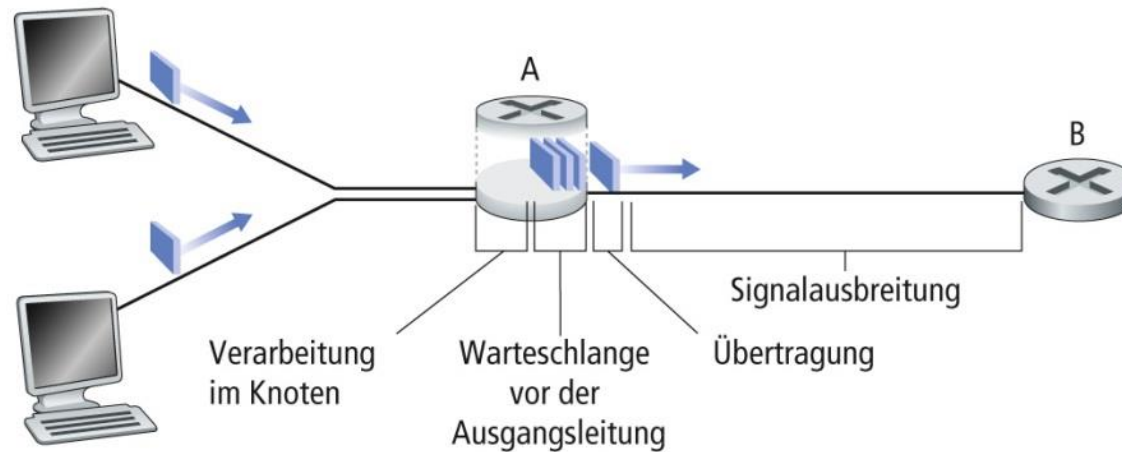
→ Store-and-Forward-Verzögerung (delay)

Beispiel: Q Transitsysteme mit je R bps Durchsatz und Paketgröße L bits → $Q \left(\frac{L}{R} \right)$ Sekunden

Außerdem können Pakete **verworfen** werden, wenn der Puffer eines Transitsystems voll ist.

→ Paketverlust (paket loss)

Verzögerungen



1. Verarbeitung
2. Warteschlange
3. Übertragung
4. Signalausbreitung

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

Verarbeitungsverzögerung

Zeit, die ein System zum Verarbeiten eines angekommenen Pakets benötigt: d_{proc}

- Lesen und Auswerten der Steuerinformationen
- Überprüfung von Bitübertragungsfehlern
- Mikrosekunden und weniger

Warteschlangenverzögerung

Zeit, die ein Paket in der Warteschlange verbringt, bevor die Übertragung beginnen kann: d_{queue}

- Abhängig von der Anzahl der sich in der Schlange befindlichen Pakete
 - Leere Schlange $\Rightarrow d_{queue} = 0$
- Wie viele Pakete sich bereits in der Schlange befinden, hängt von der *Art und Menge* des ankommenden und abgehenden Paketverkehrs ab
- Mikro- bis Millisekunden

Warteschlangenverzögerung

Durchschnittliche Ankunftsrate a Paketen/s bedeutet bei Paketen mit Größe L : aL Bits/s gehen im Durchschnitt ein.

Ist die *Intensität* $\frac{aL}{R}$:

> 1 , so wächst die Schlange bis Pakete verworfen werden

≤ 1 , so hängt es vom Zeitpunkt der ankommenden Pakete ab, ob Pakete verworfen werden müssen

Warteschlangenverzögerung

Extremfälle:

Ankunft eines Pakets alle $\frac{1}{a}$ Sekunden $\rightarrow$ bei Ankunft ist die Schlange immer leer und $d_{queue} = 0$.

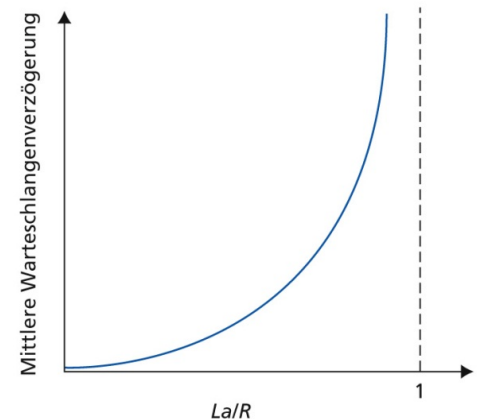
Ankunft aller a Pakete simultan $\rightarrow$

1. Paket hat $d_{queue} = 0$

2. Paket hat $d_{queue} = \frac{L}{R}$

n. Paket hat $d_{queue} = (n - 1) \frac{L}{R}$

In der Praxis sind Paketankünfte *zufällig*.



Übertragungsverzögerung

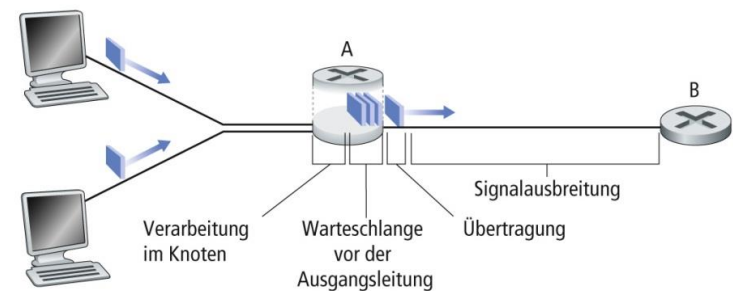
Zeit, die benötigt wird, alle Bits eines Pakets zu versenden: $d_{trans} = \frac{L}{R}$

- Ein Paket kann vollständig versendet worden sein, bevor der Empfänger das erste Bit empfängt
 - Siehe Ausbreitungsverzögerung
- Abhängig von Paketlänge L und Übertragungsrate R zum nächsten Transitsystem
- Mikro- und Millisekunden

Signalausbreitungsverzögerung

Zeit, die ein Bit im Übertragungsmedium vom Sender zum Ziel benötigt: $d_{prop} = \frac{d}{s}$

- d : Entfernung zwischen Sender und Empfänger
- s : Ausbreitungsgeschwindigkeit
 - Abhängig vom Medium (Kupfer, EM, LWL)
- Mikro- bis Millisekunden



Paketverlust

Ist die Schlange gefüllt, aber es treffen weitere Pakete ein, so werden diese verworfen → Paketverlust (drop, packet loss)

Aus Sicht der Endsysteme wurde ein Paket verschickt, das nicht beim Ziel angekommen ist. Wird das erkannt, kann ein Paket erneut verschickt werden.

Aufgabe der Transportschicht und ein wichtiges Merkmal von TCP.

Ende-zu-Ende-Verzögerung

Bisher: Verzögerungen auf einem Knoten.

Angenommen gleiche Übertragungsrate R auf allen Links zwischen Sender und Empfänger und

$d_{queue} = 0$:

$$d_{end-end} = N(d_{proc} + d_{trans} + d_{prop})$$

Achtung: das ist eine stark vereinfachte Definition

Demo: Traceroute

Das Programm Traceroute kann den Pfad ermitteln, den Pakete zu einem Ziel nehmen und dabei $d_{end-end}$ zu jedem Transitsystem auf dem Weg messen.

Implementierungen für Linux, BSD, Windows, OS X,
...

Traceroute nutzt die Time-To-Live (TTL) der Pakete (Übung!)

Durchsatz

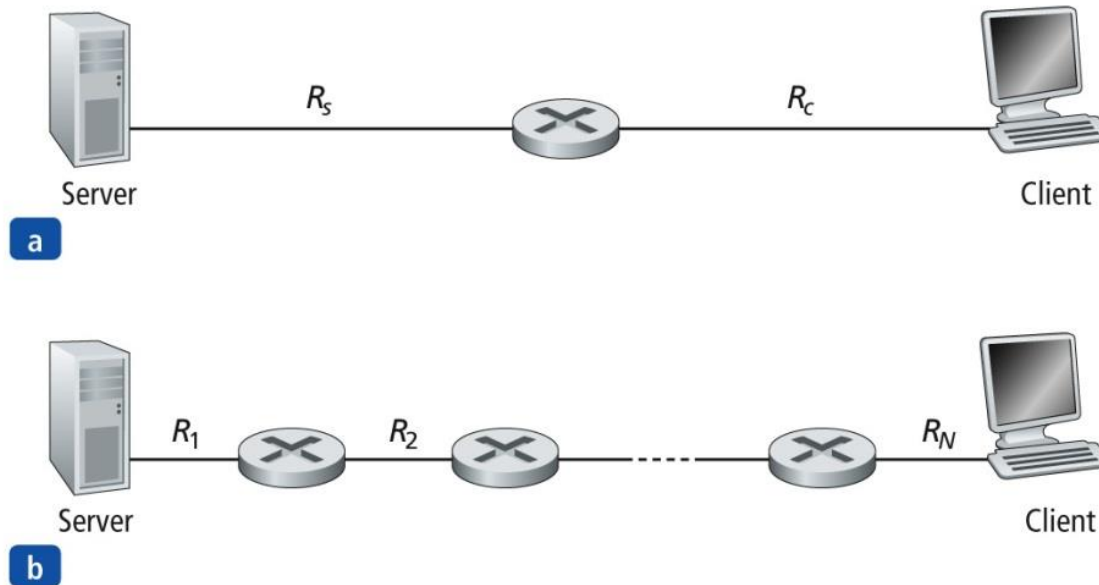
Momentaner Durchsatz: Rate, mit der Daten zu einem Zeitpunkt übertragen werden

Durchschnittlicher Durchsatz: $\frac{M}{T}$ Bit/s, wobei M die Übertragene Datenmenge in Bits ist und T die verstrichene Zeit in Sekunden.

Je nach Anwendung ist eine geringe Verzögerung oder ein schneller Durchsatz wünschenswert

- Internettelefonie?
- Dateidownload?
- Mailversand?

Flaschenhals/Bottleneck



Datenübertragung von Server zu Client:

- Ende-zu-Ende-Durchsatz im Fall a: $\min\{R_s, R_c\}$
- Ende-zu-Ende-Durchsatz im Fall b: $\min\{R_1, R_2, \dots, R_N\}$

Bottleneck (2)

Fall b:

falls $R \gg R_c$ und $R \gg R_s$

→ Durchsatz: $\min\{R_s, R_c\}$

aber, falls $R \approx R_c$

→ Durchsatz: $\frac{R}{10}$

