

Rechnernetze

Kapitel 4: Network Layer – Forwarding, IPv4

Prof. Dr. Wolfgang Mühlbauer

Fakultät für Informatik

`wolfgang.muehlbauer@th-rosenheim.de`

Wintersemester 2019/2020

Slides are based on:

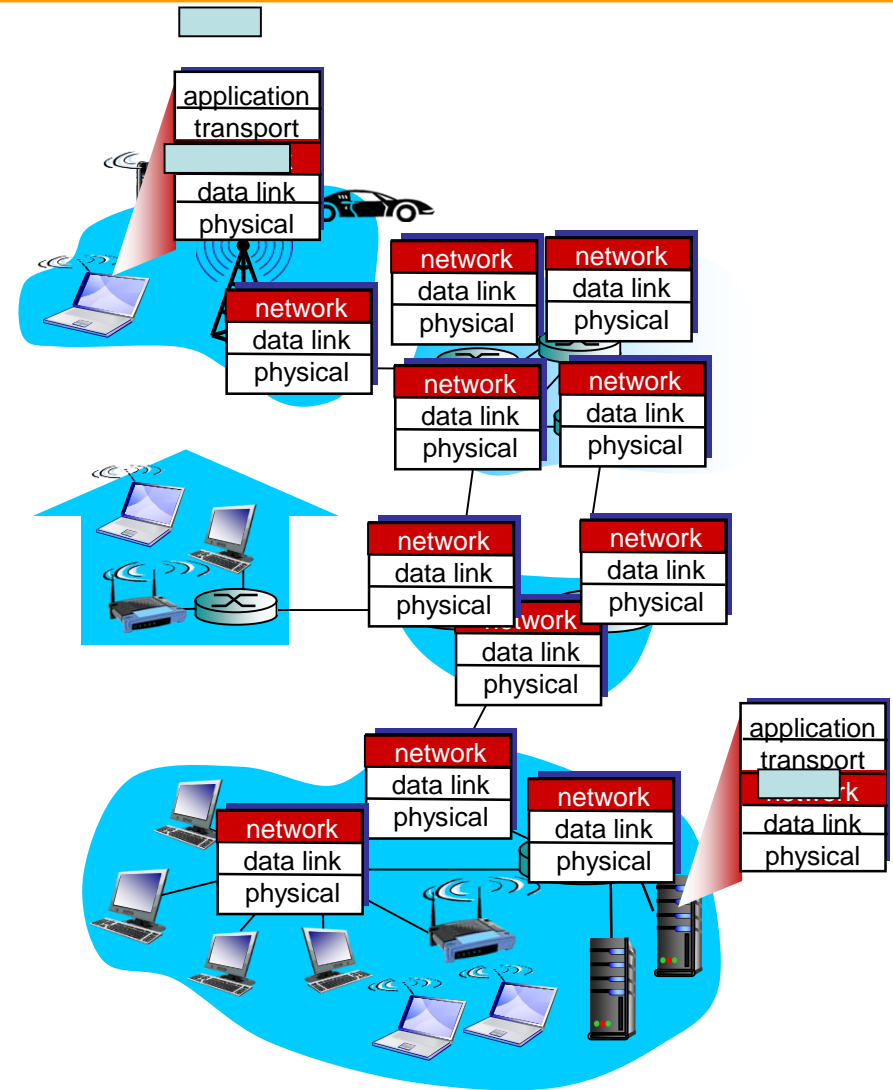
J. Kurose, K. Ross: Computer Networks – A Top-Down Approach

A. Tanenbaum, D. Wetherall: Computer Networks

- ❑ **Forwarding**
 - ❑ Funktionsweise eines Routers
 - ❑ Internet Protocol IPv4
 - ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP
 - ❑ Routing
 - ❑ IPv6
- } Siehe Kapitel 5

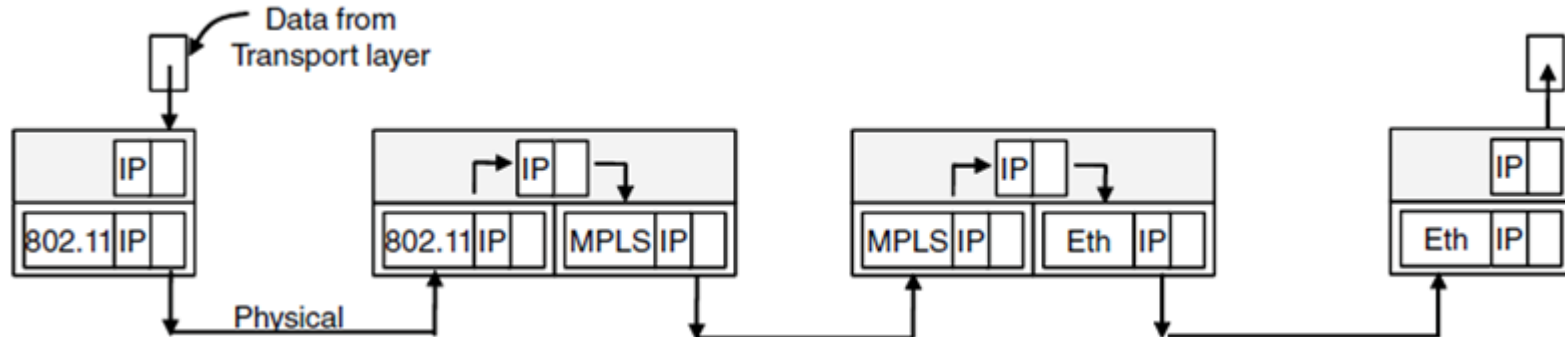
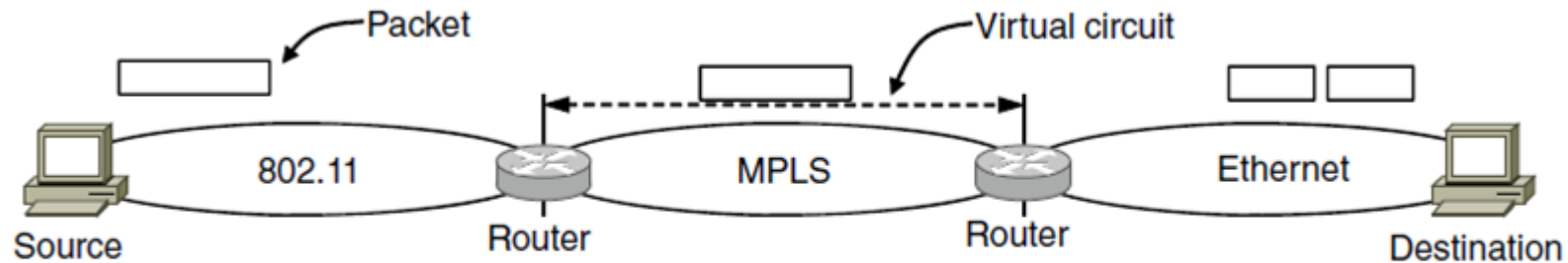
Network Layer

- ❑ **Ende-zu-Ende** Verbindung zwischen Sender und Empfänger
- ❑ **Sender**
 - Verpacken eines Transport Layer Segments in Datagramm
- ❑ **Empfänger**
 - Ausliefern des Datagramms an Transport Layer
- ❑ **Router**
 - interessieren sich **nicht** für Schicht 4/5
 - kümmern sich nur um Weiterleitung zu Zielhost.



Zusammenarbeit von heterogenen Netzen

- ❑ IP ist das Bindeglied
- ❑ Die Link-Layer kann unterschiedlich sein



Aufgaben der Network Layer

❑ Adressierung

- IP Adressen

❑ Forwarding

- Weiterleitung von Eingangs- zu Ausgangsinterface?
- Oft in HW implementiert.

❑ Routing (dt. Wegewahl)

- Berechnung der Wege mit Routingprotokollen
- Eintragung von Weiterleitungsregeln in Tabellen.
- Meist in SW implementiert.

❑ IP ist verbindungslos.

Analogie

❑ Routing

- Navigationssystem berechnet die Reiseroute.

❑ Forwarding

- Navigation teilt Fahrer an einer Kreuzung mit, ob er links oder rechts abbiegen muss.

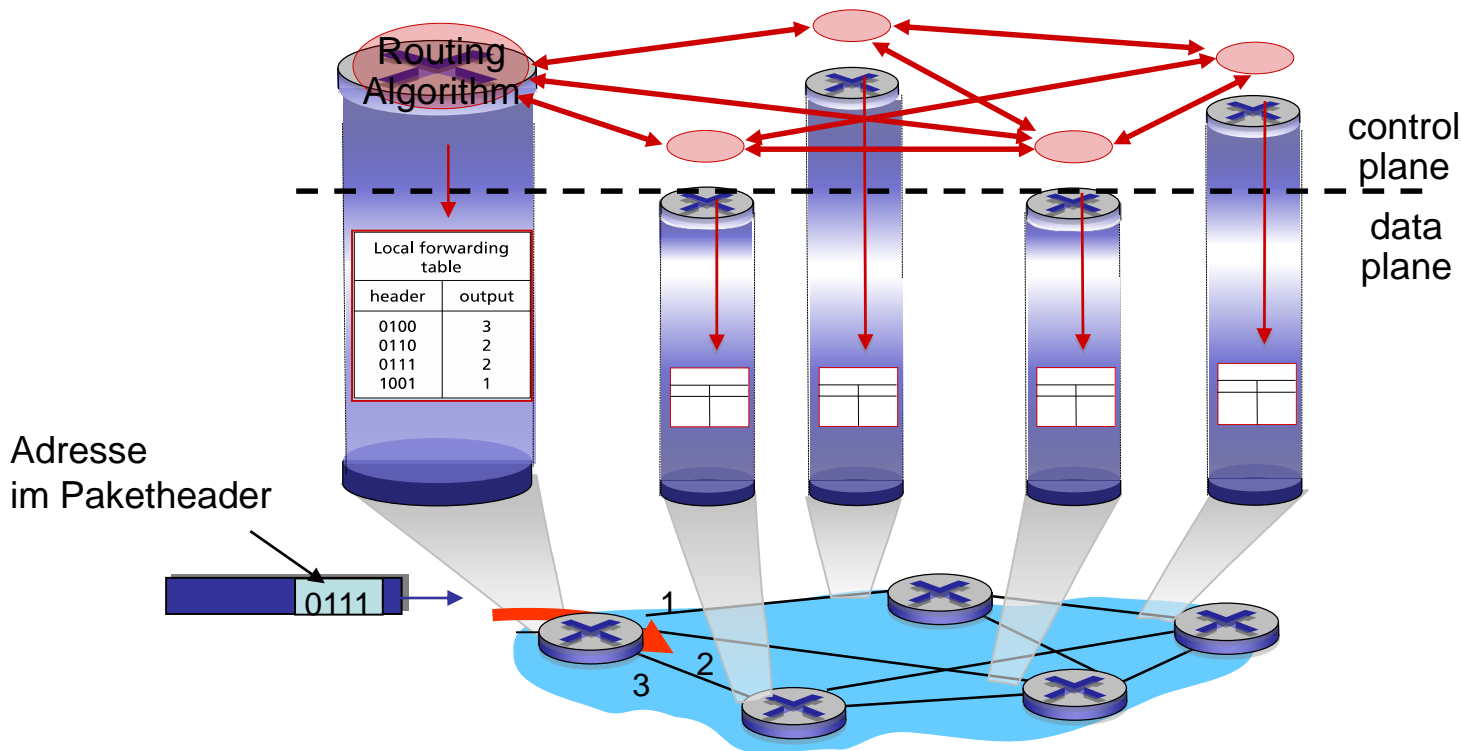
Network Layer: Forwarding und Routing

□ Forwarding / "Data Plane"

- Weiterleitung: *Lokale* Funktion jedes Routers

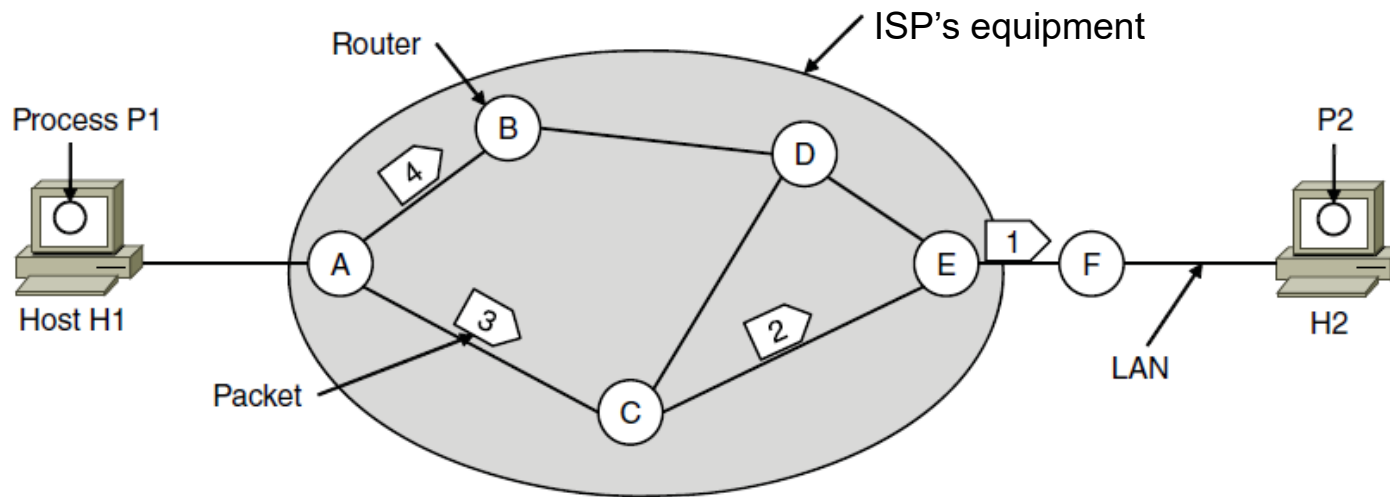
□ Routing / "Control Plane"

- *Automatische* Wegeberechnung: *Netzwerkweite* Funktion
- Routingprotokoll == Nachrichten zwischen Routern



IP: Verbindungsloses Forwarding

- ❑ Weiterleitung des Pakets nur anhand der Ziel IP Adresse.
- ❑ Bei Änderung der Tabellen können Pakete verschiedenen Pfaden folgen.



A's table (initially)

A	
B	B
C	C
D	B
E	C
F	C

A's table (later)

A	
B	B
C	C
D	B
E	B
F	B

C's Table

A	A
B	A
C	
D	E
E	E
F	E

E's Table

A	C
B	D
C	C
D	D
E	
F	F

Quelle: Tanenbaum

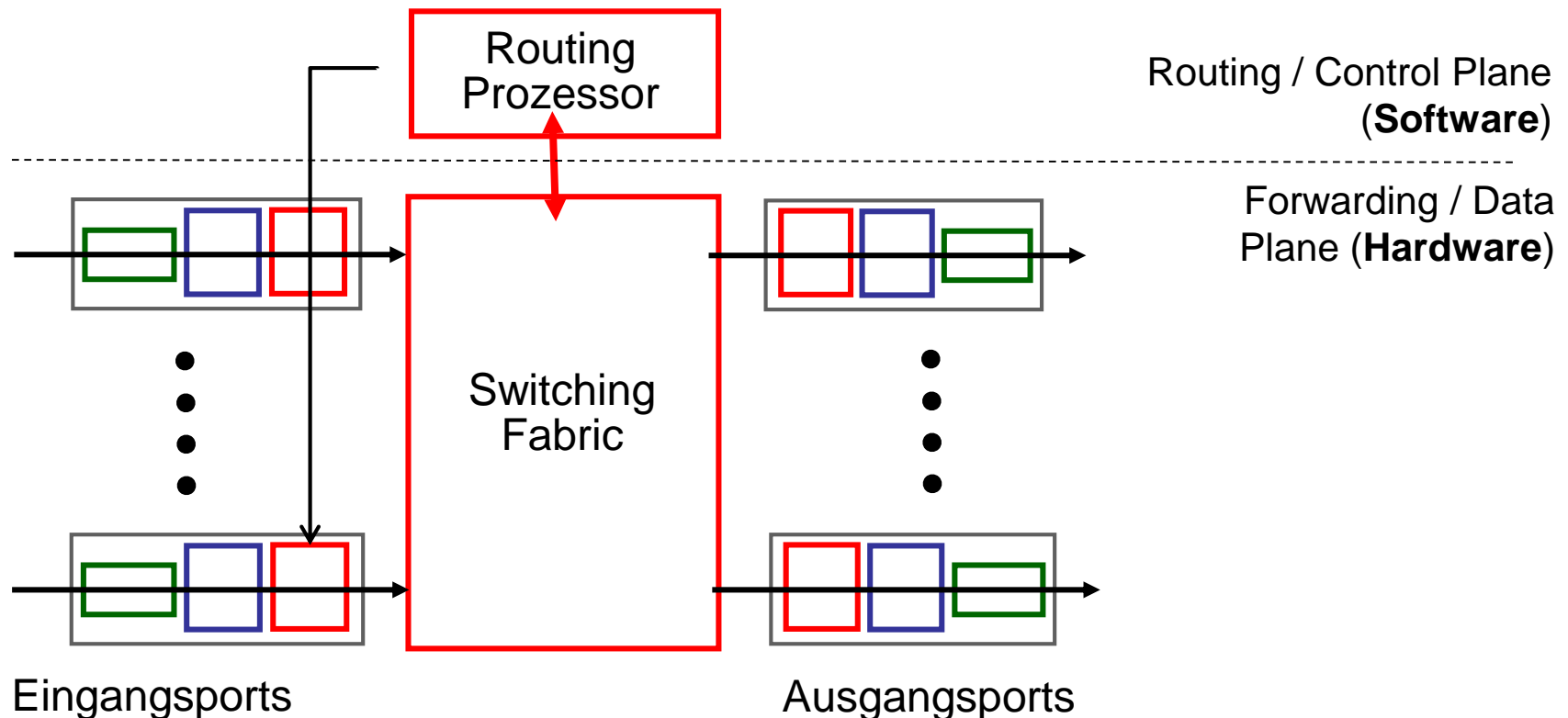
Adresse

Next Hop IP Adresse

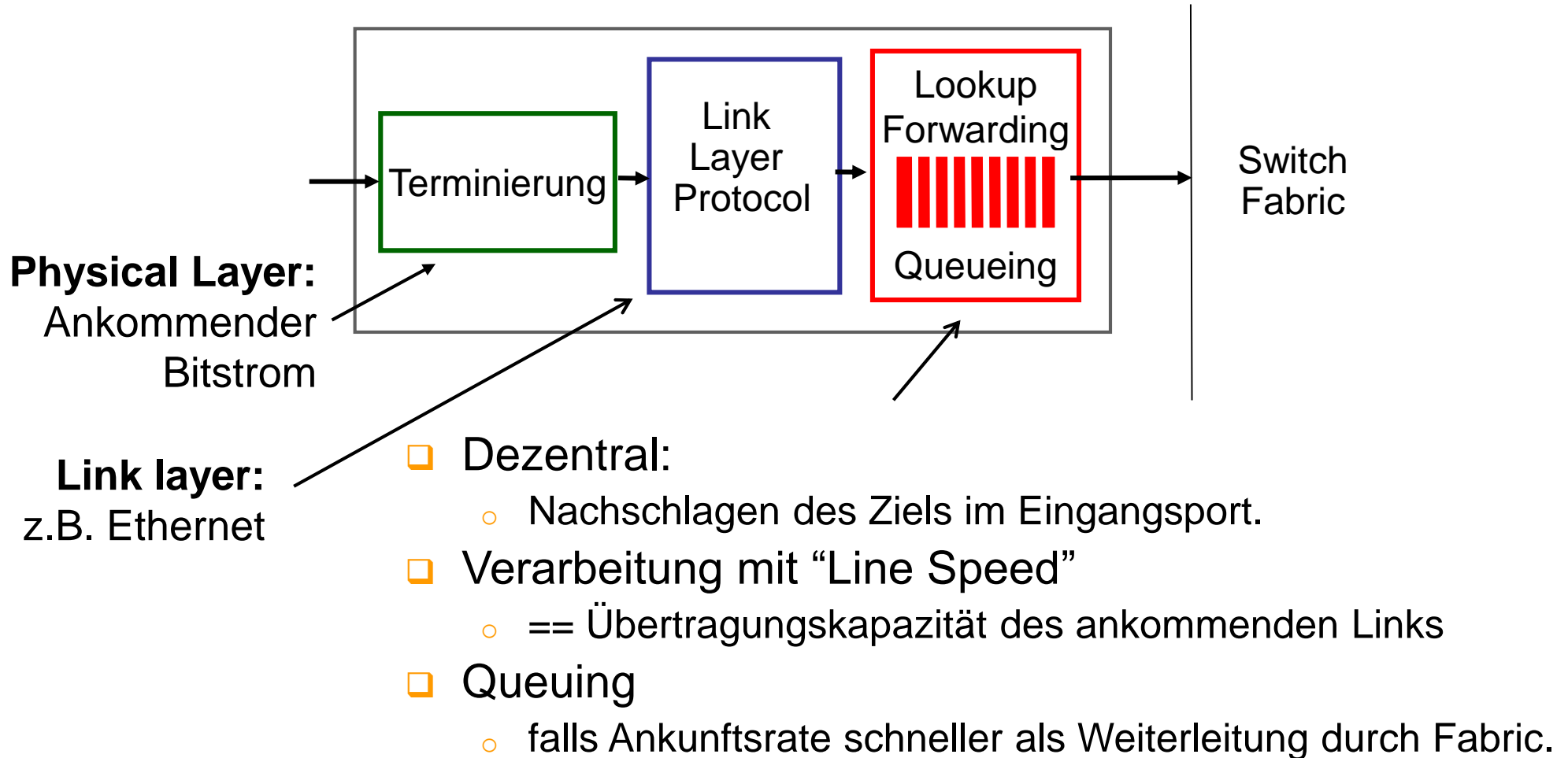
- ❑ Forwarding und Routing
- ❑ **Funktionsweise eines Routers**
- ❑ Internet Protocol IPv4
- ❑ ARP, ICMP, DHCP

Architektur eines Routers

- ❑ **Eingangsports:** Pufferung ankommender IP Pakete, terminiert Link Layer.
- ❑ **Fabric:** "Netzwerk innerhalb Router", Weiterleitung zu passendem Ausgangsport
- ❑ **Ausgangsports:** Puffern bis Übertragung möglich, Link/PHY Funktionalität
- ❑ **Routingprozessor:** Ausführen der Routingprotokolle

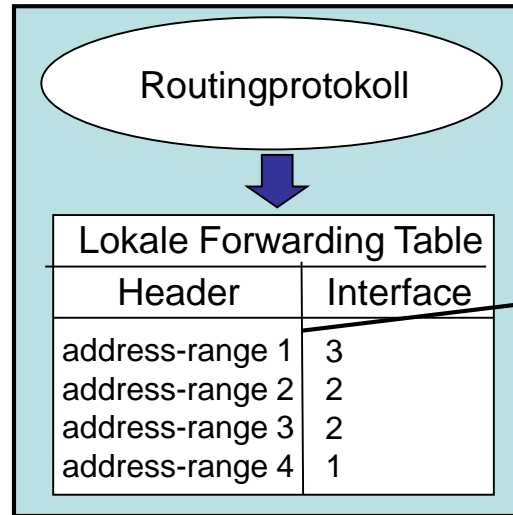


Eingangsport



Bei IP wird Ausgangsport nur anhand der IP Zieladresse bestimmt!

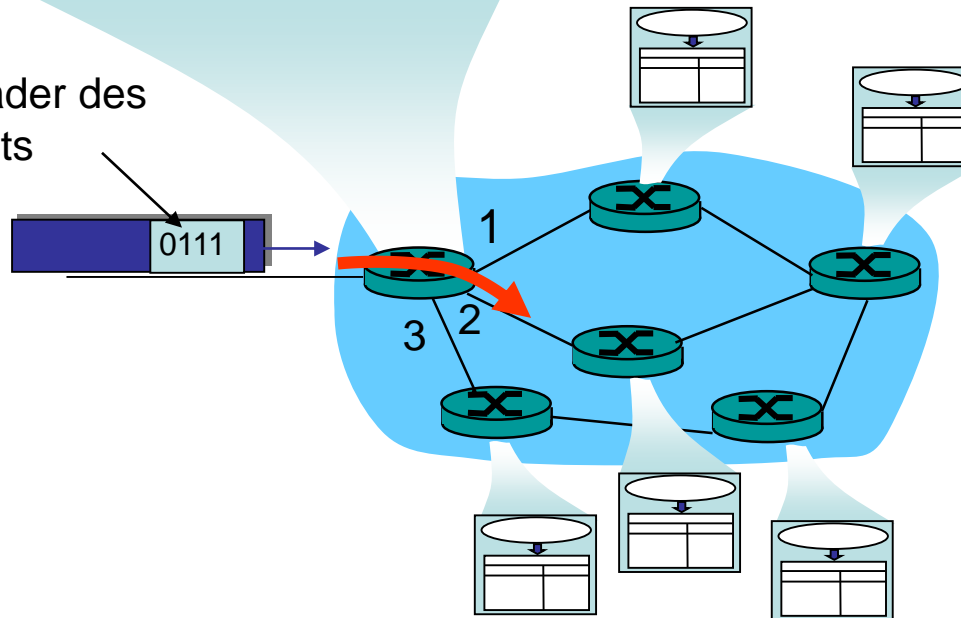
Forwarding Table



Problem:
Viele Einträge,
da IP Adresse 32 Bit hat

Lösung: Aggregation/Hierarchie
In die Forwarding Tabelle werden
Adressbereiche eingetragen

Wert/Adresse in Header des
ankommenden Pakets



Weiterleitung nach Zieladresse

- ❑ Router leitet nach **Bereichen** weiter, siehe Tabelle.
- ❑ Vorteil: Skalierbarkeit, da nicht jede einzelne Adresse Tabellenplatz belegt.

Zieladresse ("IP Adresse")	Ausgangs- port
11001000 00010111 00010000 00000000 bis 11001000 00010111 00010111 11111111	0
11001000 00010111 00011000 00000000 bis 11001000 00010111 00011000 11111111	1
11001000 00010111 00011001 00000000 bis 11001000 00010111 00011111 11111111	2
sonst	3

Longest Prefix Matching

- ❑ Adressbereiche definiert durch **Präfixe**.
- ❑ **Longest Prefix Matching** – Definition:
 - Nachschlagen einer Ziel IP (32 bit) in Forwardingtable des Routers.
 - Suche **längsten** Adresspräfix, der mit Zieladresse **übereinstimmt**.
- ❑ Beispiele: Welcher Ausgangsport?
 - Ziel-IP: 11001000 00010111 00010**110** **10100001**
 - Port 0
 - Ziel-IP: 11001000 00010111 00011**000** **10101010**
 - Port 1 (nicht Port 2, denn dieser Prefix ist kürzer)

Ziel-IP	Ausgangsport
11001000 00010111 00010*** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 00010111 00011*** *****	2
sonst	3

Publikums-Joker: Longest Prefix Matching

Gegeben ist die Forwarding-Tabelle eines IP Routers. An welchen Port leitet er das Paket mit der folgenden Ziel-IP weiter?

- 10010100 10010001 01000010 01100001

- A. Port 0
- B. Port 1
- C. Port 2
- D. Port 3



Ziel-IP	Ausgangsport
1001001* * * * * * * * * * * * * *	0
1001* * * * * * * * * * * * * *	1
10010* * * * * * * * * * * * * *	2
* * * * * * * * * * * * * *	3

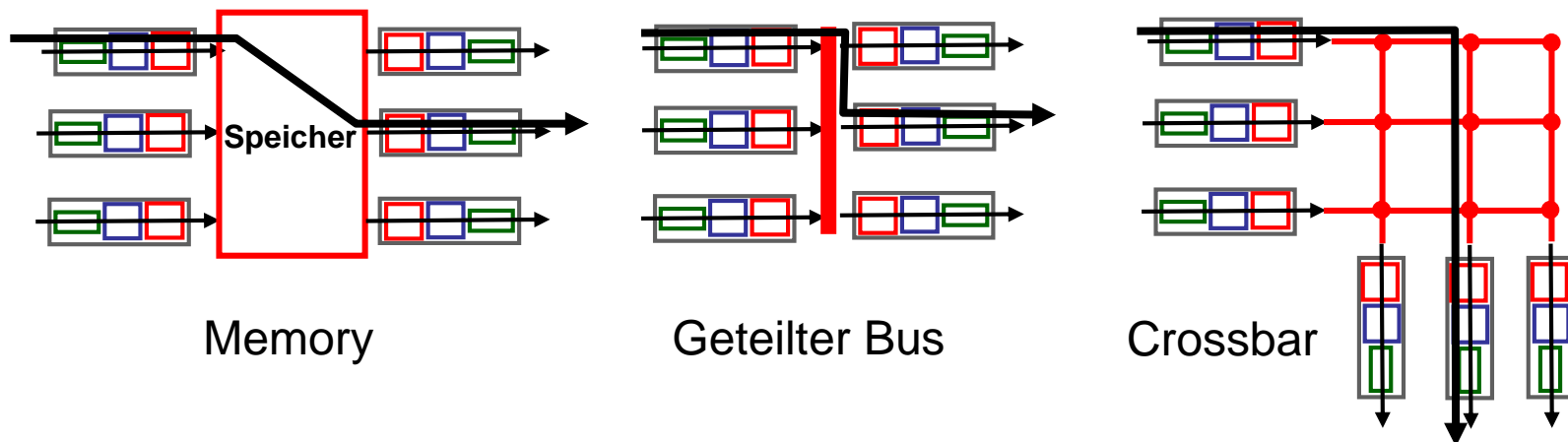
Switching Fabric

□ Aufgabe

- Weiterleiten von Paketen vom Eingangs- zum Ausgangsport.
- Ideal: Durchsatzrate = Summe der Ankunftsrate aller Eingangsport.,

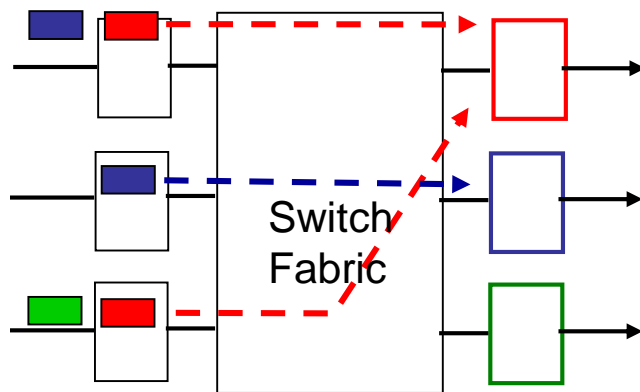
□ 3 Typen

- **Memory:** Eingangsinterface schreibt Paket in gemeinsamen Speicher
- **Bus:** Eingangsinterface leitet Paket direkt an Ausgangsport über gemeinsamen Bus weiter
- **Crossbar:** Paralleler Transfer möglich!



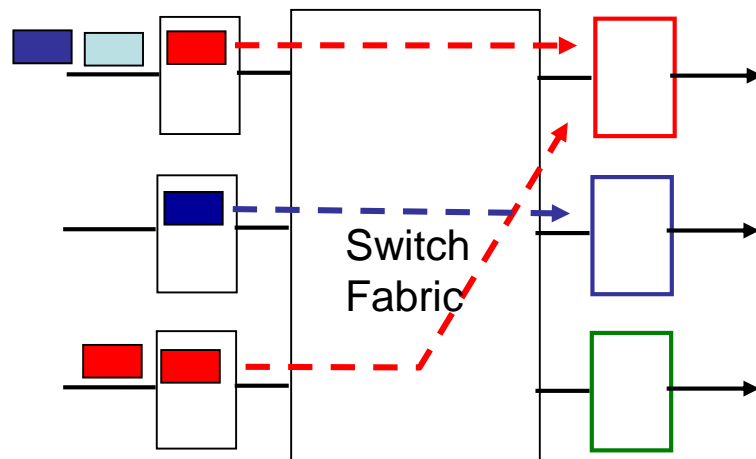
Queuing am Eingangsports

- ❑ Nötig falls Fabric langsamer als Ankunftsrate.
- ❑ Auftretende Problematik: **Head-of-the-Line Blocking**
 - Vorderes Paket in Queue blockiert andere Pakete.
- ❑ Beispiel:
 - 2 rote Pakete müssten gleichzeitig zum selben Ausgangsport.
 - Annahme: Unteres rotes Paket muss warten.
 - Nun muss aber auch grünes Paket warten, obwohl dessen Ausgangsport frei wäre.

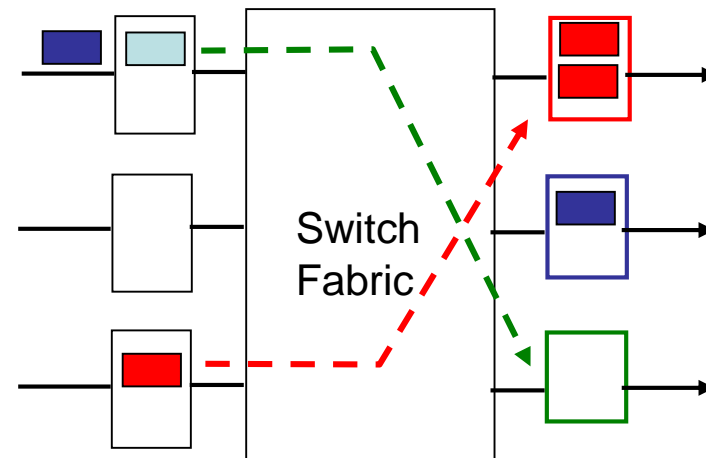


Queuing am Ausgangsport

- Nötig falls Ankunftsrate von Switch Fabric die Übertragungsrate des Ausgangslinks übersteigt.
- Ursache für
 - Delay / Verzögerung
 - Paketverluste



Mehrere Pakete müssen
zum gleichen Ausgang



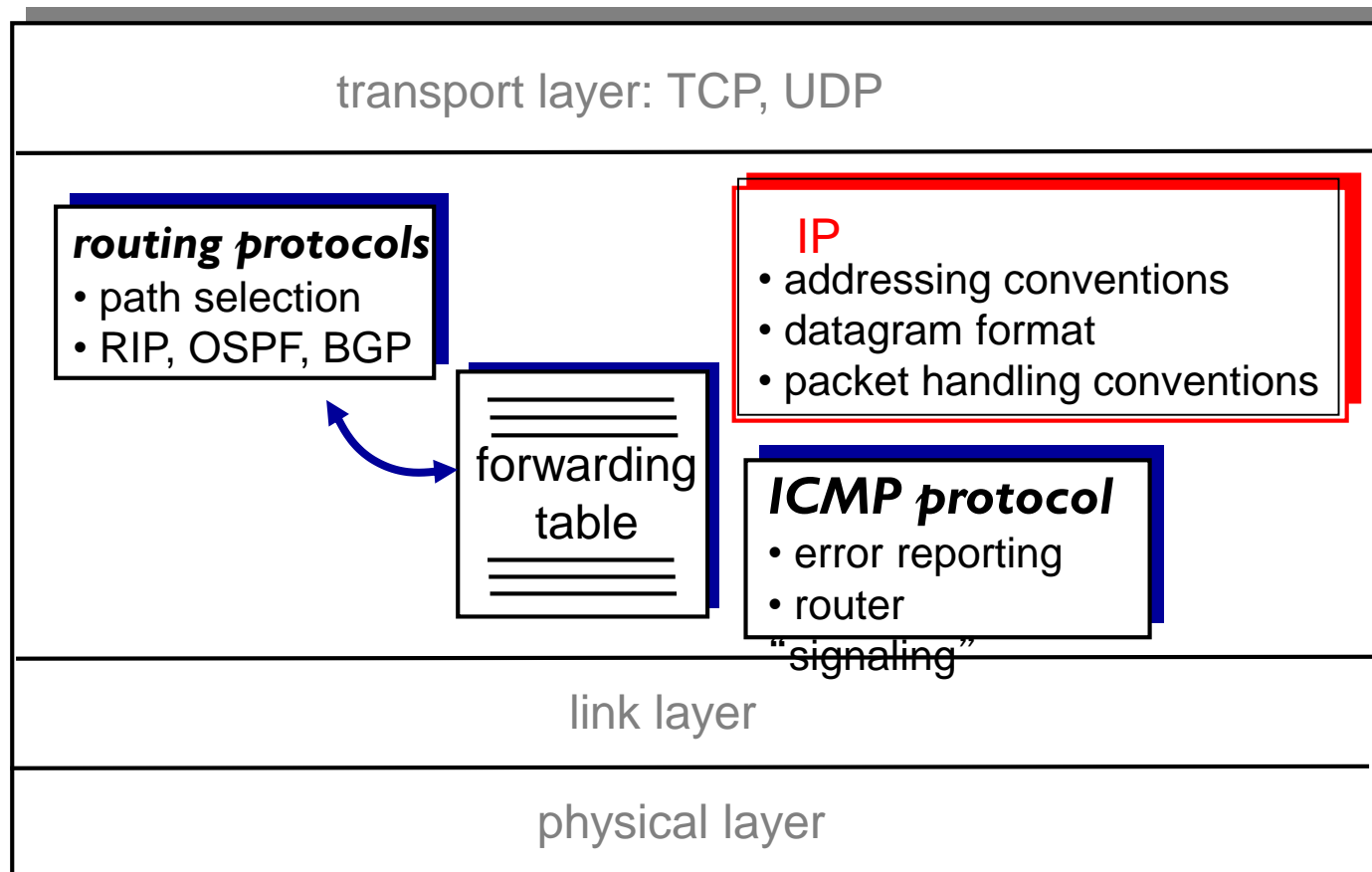
Paket hat keinen Platz mehr →
Paketverlust!

1 Paket später

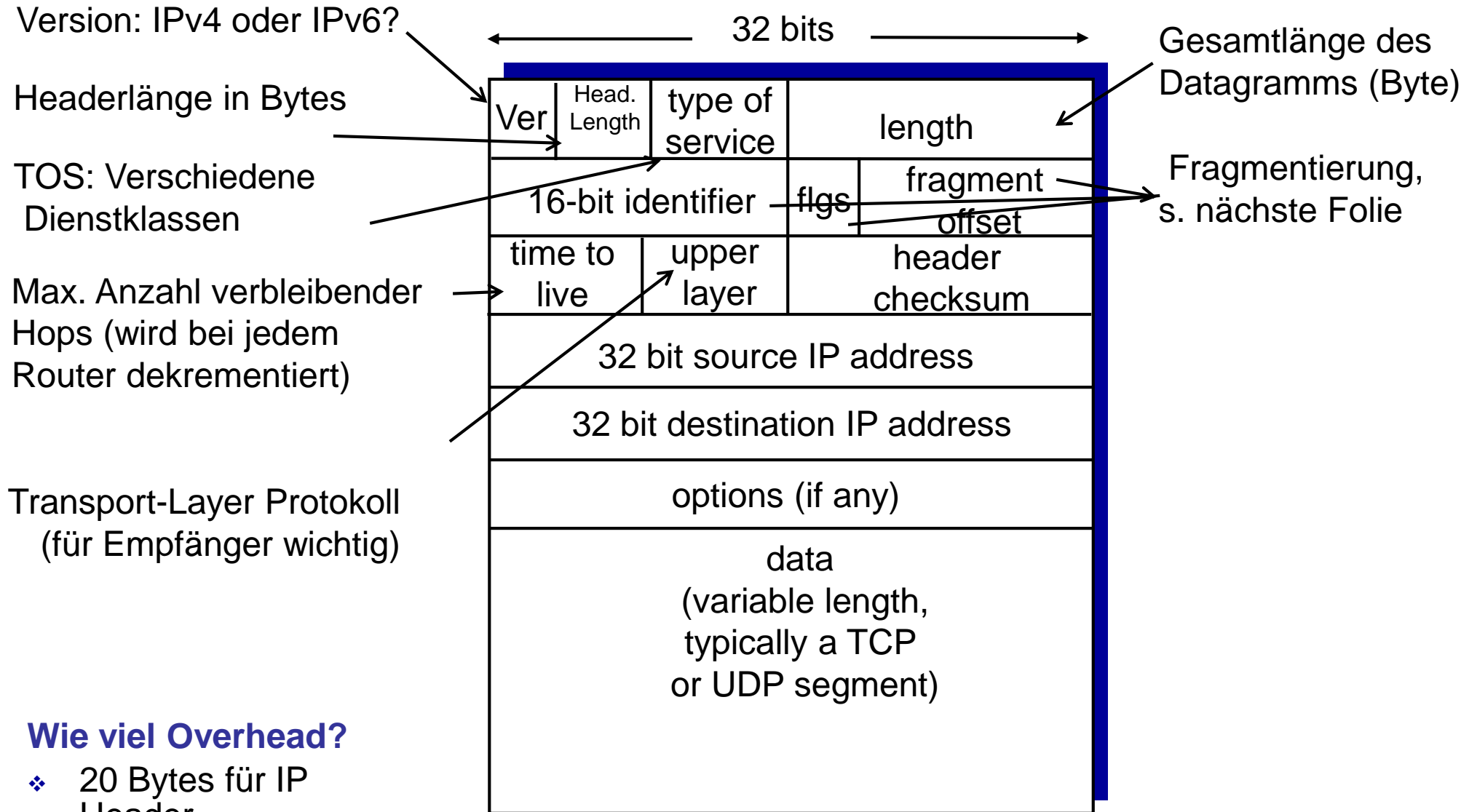
- ❑ Forwarding und Routing
- ❑ Funktionsweise eines Routers
- ❑ **Internet Protocol IPv4**
- ❑ ARP, ICMP, DHCP

Network Layer Protokolle

- ❑ Eigentlich besteht Network Layer aus mehreren Protokollen.
- ❑ Wichtig ist aber vor allem das Internet Protocol (IP)
 - Versionen IPv4 und IPv6



Format eines IPv4 Datagramms



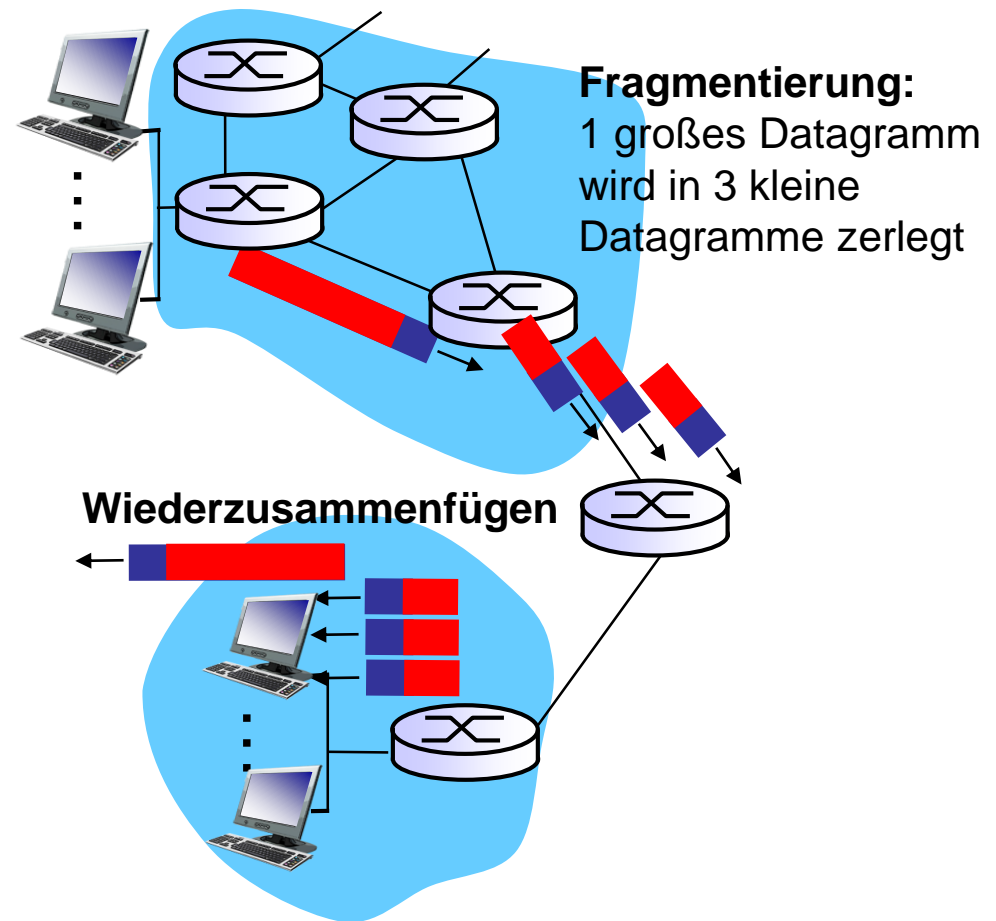
IP Fragmentierung

❑ **Maximum Transfer Unit (MTU)**

- Verschiedene Link Layer Technologien erlauben verschiedene maximale Paketgrößen

❑ **IP Datagramm > MTU**

- Router/Host zerlegt in kleinere „Fragmente“
- Zusammenbau am End-Host, nicht im Netz!
- IP Header Bits um Fragmente zu identifizieren und wieder zusammenzufügen

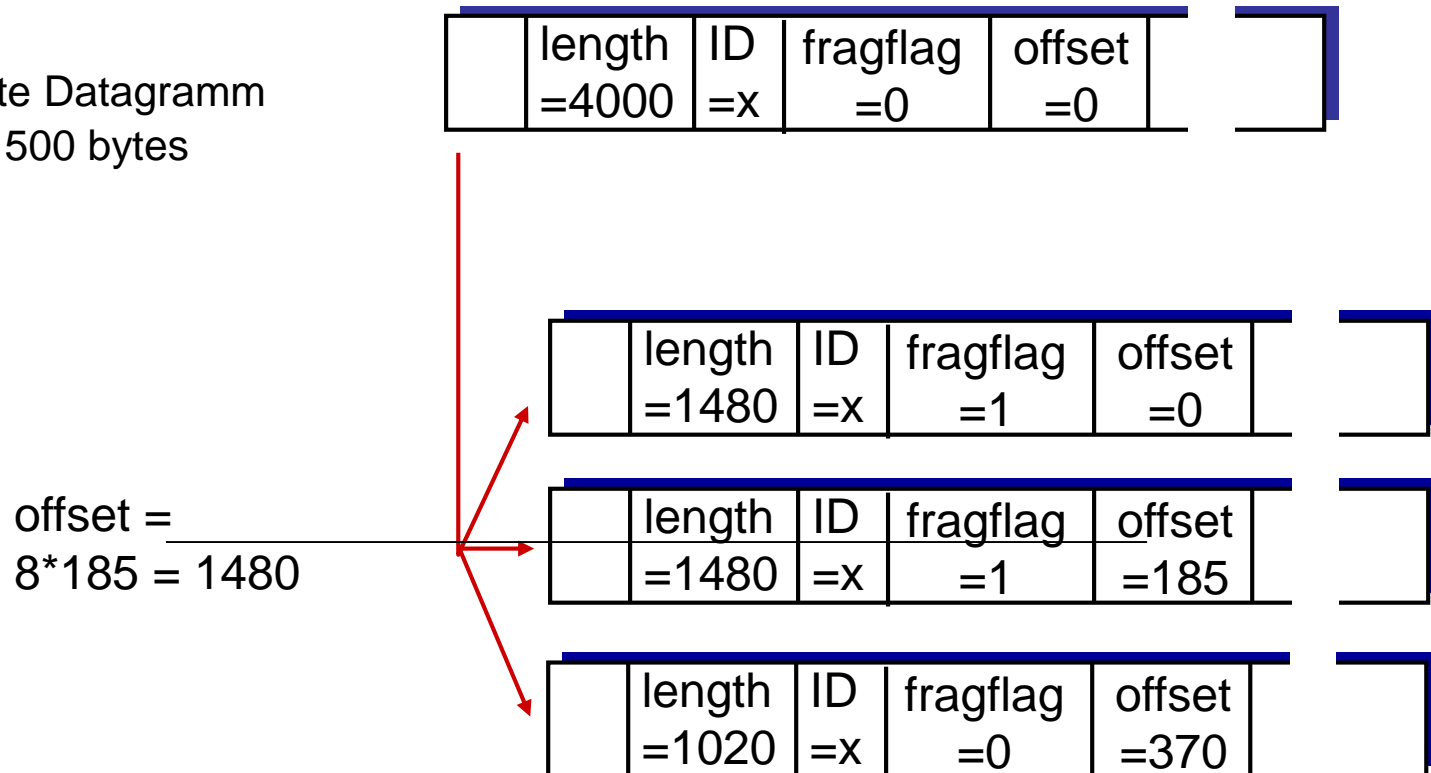


IP Fragmentierung: Wiedezusammenfügen

- ❑ **16 Bit Identifier:** Identisch für alle Fragmente eines Pakets
- ❑ **Fragmentation Flag:** 0 markiert das letzte Fragment eines Pakets
- ❑ **Offset:** Byteposition innerhalb des Pakets, an die das Fragment gehört

Beispiel:

- ❖ 4000 Byte Datagramm
- ❖ MTU = 1500 bytes



Publikums-Joker: Fragmentation

Welcher der folgenden Aussagen ist **falsch**?

- A. Achtet ein HTTP Client darauf, dass die GET-Requests sehr klein sind, dann wird für die GET Requests nie Fragmentierung auftreten.
- B. IPv6 kennt keine Fragmentierung.
- C. Kommt es zur Fragmentierung an einem Router, so wird das Paket am Next-Hop Router wieder zusammengesetzt.
- D. Fragmentierung verursacht immer ein wenig Overhead für den Betriebssystem-Kernel des Empfängers.



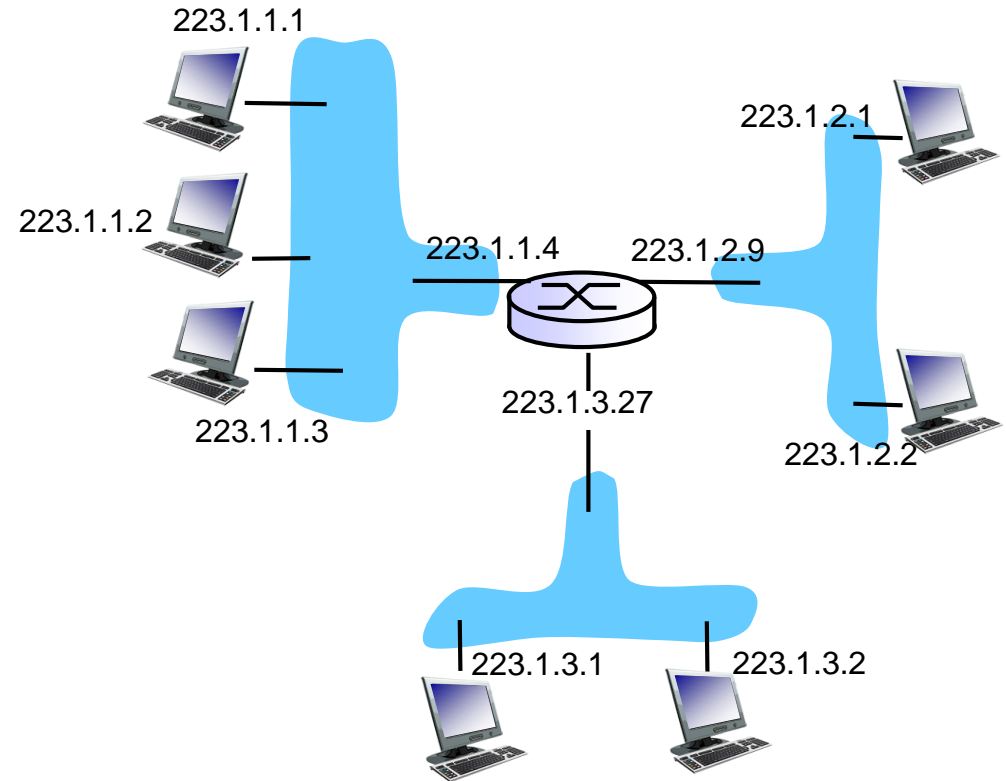
IP Adressierung

□ IP Adresse

- 32 Bit
- Identifiziert Host im Internet
- Gehört aber logisch gesehen zu Interface.

□ Interface

- Verbindung zwischen Host/Router und Link
- Router haben mehrere Interfaces.
- Jedes Interface benötigt 1 IP Adresse.

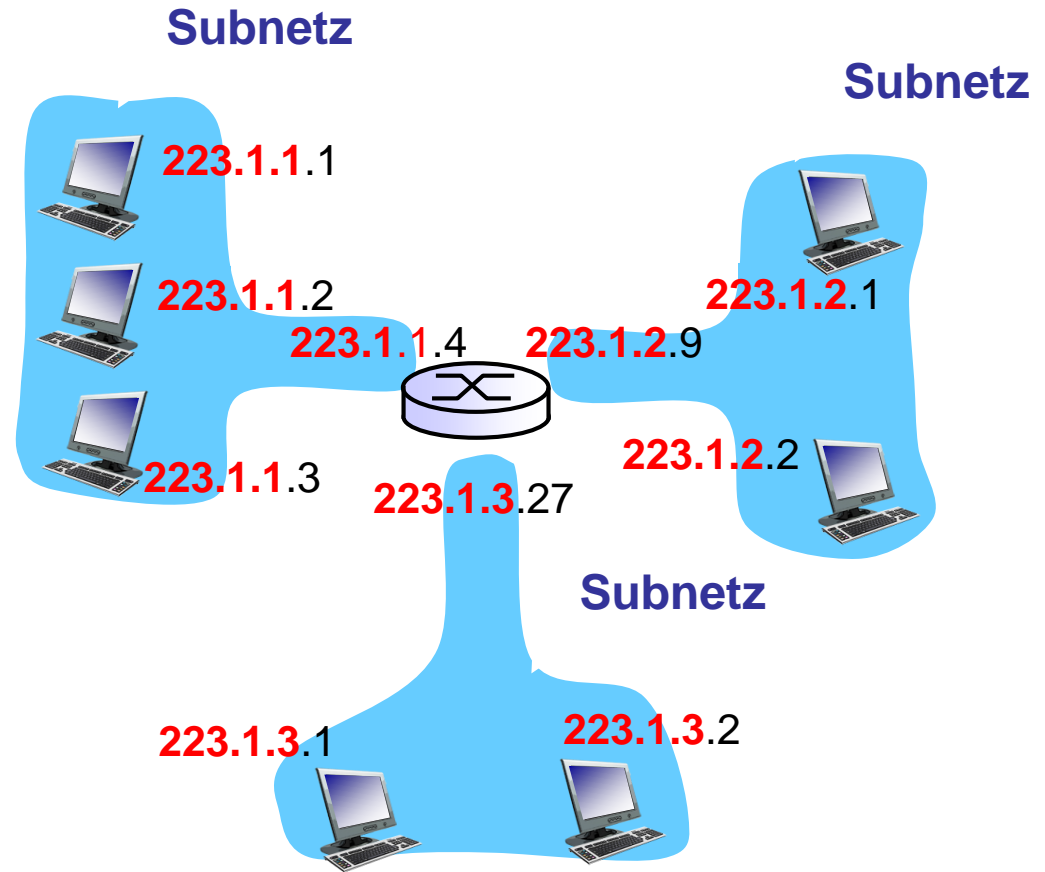


$$223.1.1.1 = \underbrace{11011111}_{223} \underbrace{00000001}_{.} \underbrace{00000001}_{1} \underbrace{00000001}_{.} \underbrace{00000001}_{1}$$

Schreibweise IP Adresse: Dezimalzahlen getrennt durch Punkte

Subnetze

- ❑ Was ist ein IP Subnetz?
 - Hosts teilen sich **gleichen IP Adresspräfix**
 - Hosts können sich **ohne Router** erreichen.
 - Bsp: Ethernet, WLAN, etc.
- ❑ Adresse eines Subnetzes
 - Subnetz ist über gemeinsamen Präfix adressierbar!
 - **Subnetzmaske (rot)**: Länge des gemeinsamen Präfixes (z.B. /24)
 - **Hostanteil**: Bits der IP Adresse, die sich für jeden Host unterscheiden.
- ❑ Notation, Beispiel
 - 223.1.3.0/24
 - Die ersten 24 Bits sind für alle Hosts des Subnetzes gleich.

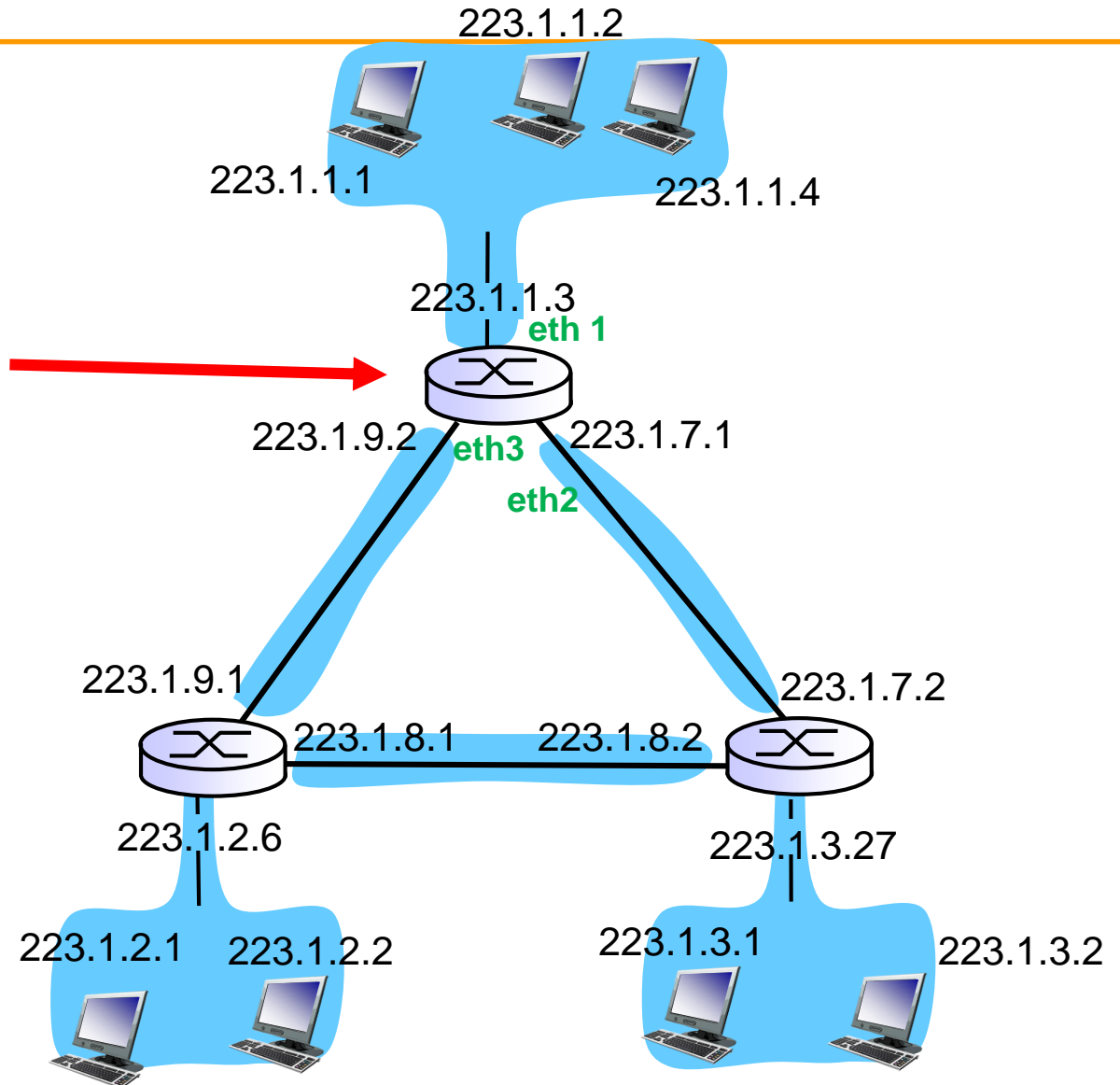


Vorteil: Man muss nur Subnetzadressen in den Routingtabellen halten.

Subnetze

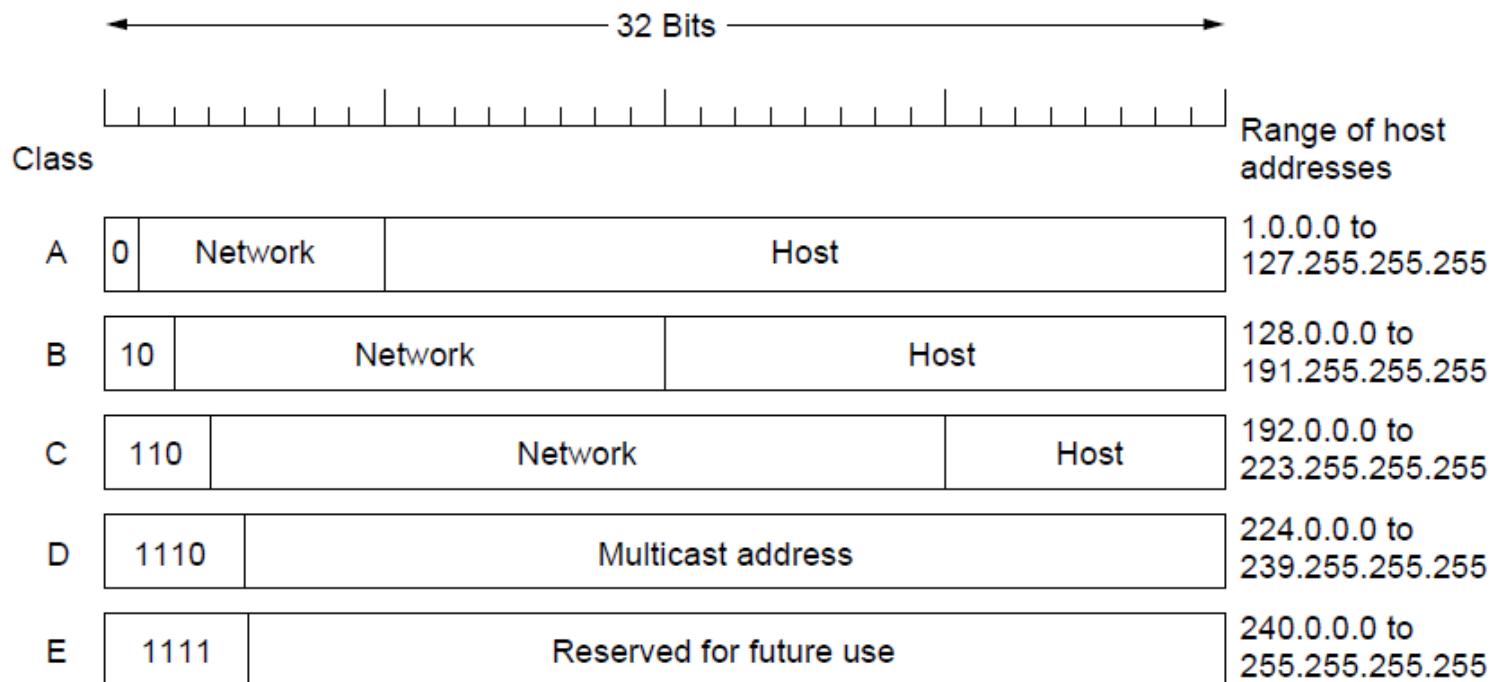
- ❑ Wie viele Subnetze sind vorhanden?
- ❑ Wie sieht Forwarding-Tabelle des obersten Routers aus?

Zielnetz	Next-Hop Interface
223.1.1.0/24	223.1.1.3 (eth1)
223.1.2.0/24	223.1.9.2 (eth3)
223.1.3.0/24	223.1.7.1 (eth2)
223.1.7.0/24	223.1.7.1 (eth2)
223.1.8.0/24	223.1.7.1 (eth2)
223.1.9.0/24	223.1.9.2 (eth3)



Classful Addressing

- ❑ Adressbereiche werden an Firmen, Universitäten, etc. übergeben.
- ❑ Früher: Subnetzpräfixe müssen zwingend Länge /8, /16 oder /24 haben.
- ❑ Wieviel Hosts kann eine Class /24 bzw. ein Class /16 Netz haben?



Classless Addressing

❑ Classless Interdomain Routing (CIDR)

- Subnetzteil einer IP Adresse kann beliebige Länge haben

❑ Notationen

- **Präfixnotation:** z.B. 200.23.16.0/24
- **Mit Netzmaske:** Adresse 200.23.16.0 + Netzmaske 255.255.255.0
 - Netzmaske gibt an, welche Bits zum Subnetz gehören!

❑ Adresszuweisung unter Linux – 2 Alternativen → siehe Übung!

- `ifconfig eth0 200.23.16.4 netmask 255.255.255.0`
- `ip addr add 200.23.16.4/24 dev eth0`



Spezielle IPv4 Adressen

❑ **Localhost**, eigener PC

- 127.0.0.1

❑ **Private IPv4 Adressen**

- global nicht sichtbar, nur lokal im eigenen administrativen Netz zu verwenden.
- 10.0.0.0/8
- 172.16.0.0/12
- 192.168.0.0/16

❑ **Spezielle Adressen in einem Subnetz**

- Beispiel: 192.168.0.0/16 (Netzmaske: 255.255.0.0)
- **Broadcast-Adresse**: 192.168.255.255
 - Für Nachrichten an alle Hosts des Subnetzes
 - Alle Bits des **Hostanteils** werden auf 1 gesetzt
- **Netzadresse** kennzeichnet das Subnetz: 192.168.0.0
 - Alle Bits des **Hostanteils** werden auf 0 gesetzt
 - Kann nicht auf Interface konfiguriert werden.

Wie bekommt man eine IP Adresse?

- ❑ Provider (ISP) weist Adressbereich aus seinem Adresspool zu
 - Hier: /20 wird in mehrere /23 Netze unterteilt
 -

ISP's block	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010000</u>	00000000	200.23.16.0/20
Organization 0	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010000</u>	00000000	200.23.16.0/23
Organization 1	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010010</u>	00000000	200.23.18.0/23
Organization 2	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010100</u>	00000000	200.23.20.0/23
...
Organization 7	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00011110</u>	00000000	200.23.30.0/23

Publikums-Joker: Subnetze

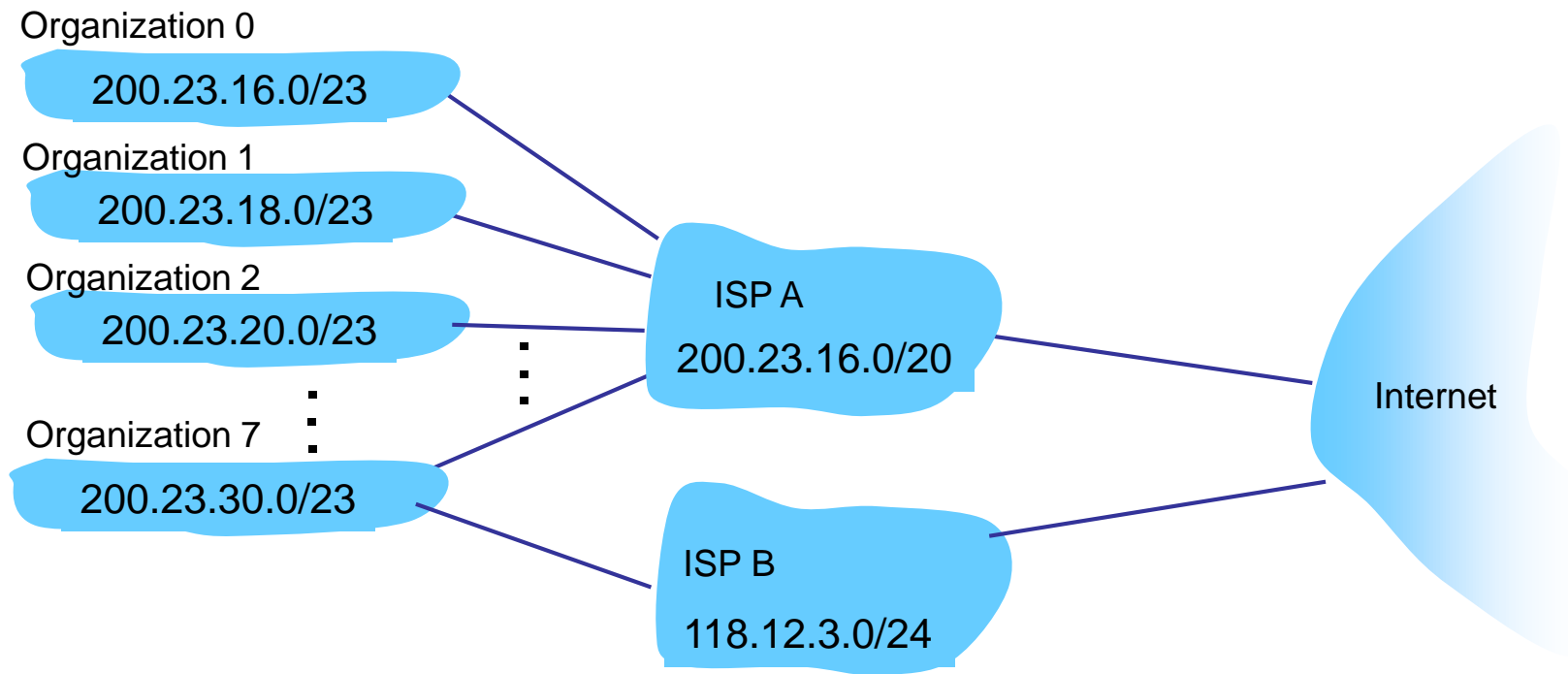
Wie viele /23 Subnetze hat ein /20 Subnetz?

- A. 2
- B. 4
- C. 8
- D. 16



Hierarchische Adressierung

- Hierarchische Adressierung erlaubt kurze Forwardingtabellen!
- Achtung: Organisation 7 ist aus dem Internet über ISP B erreichbar, da die Route „spezifischer“ ist (/23 statt /20).
 - Nur bei Ausfällen wird die alternative Route über ISP A verwendet.



Wie bekommt ein ISP einen IPv4 Adressbereich?

❑ Registry **ICANN**

- *Internet Corporation for Assigned Names and Numbers*
- <http://www.icann.org>
- Zuständig für
 - Vergabe der IP Adressen
 - Domain Name System (DNS), Root Domains

❑ Regionale Registries bekommen große Adressblöcke von der ICANN und verteilen diese regional

- Europa: Réseaux IP Européens Network Coordination Centre (**RIPE**)

- ❑ Forwarding und Routing
- ❑ Funktionsweise eines Routers
- ❑ Internet Protocol IPv4
- ❑ **ARP, ICMP, DHCP**

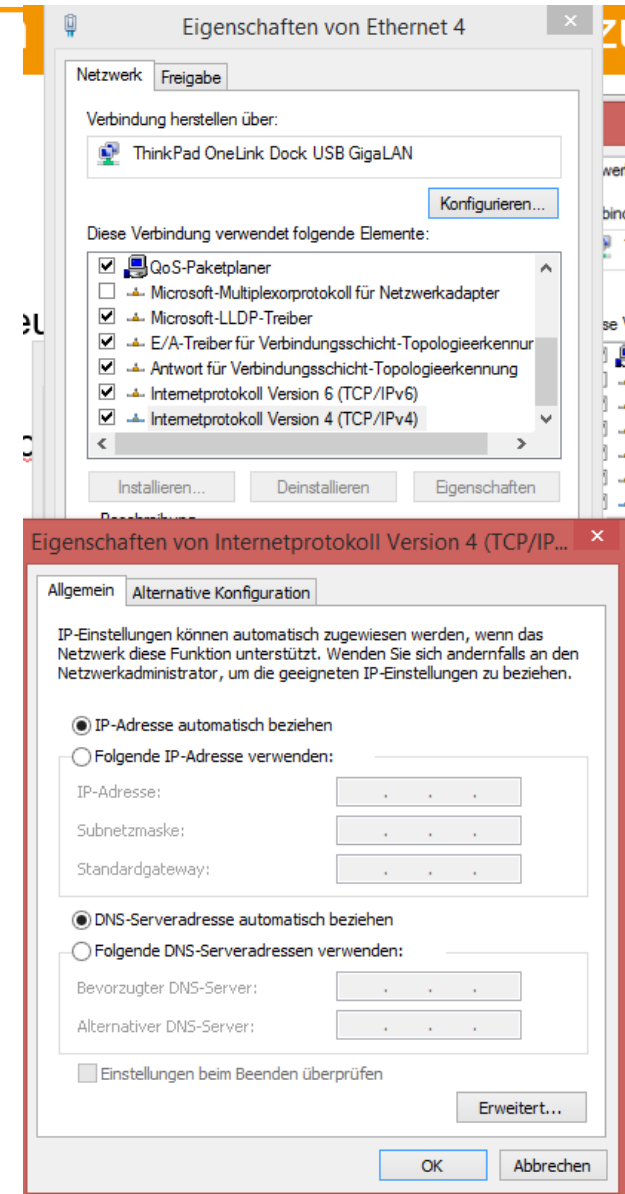
Wie weist man Hosts eine IP Adresse zu?

❑ **Manuell**

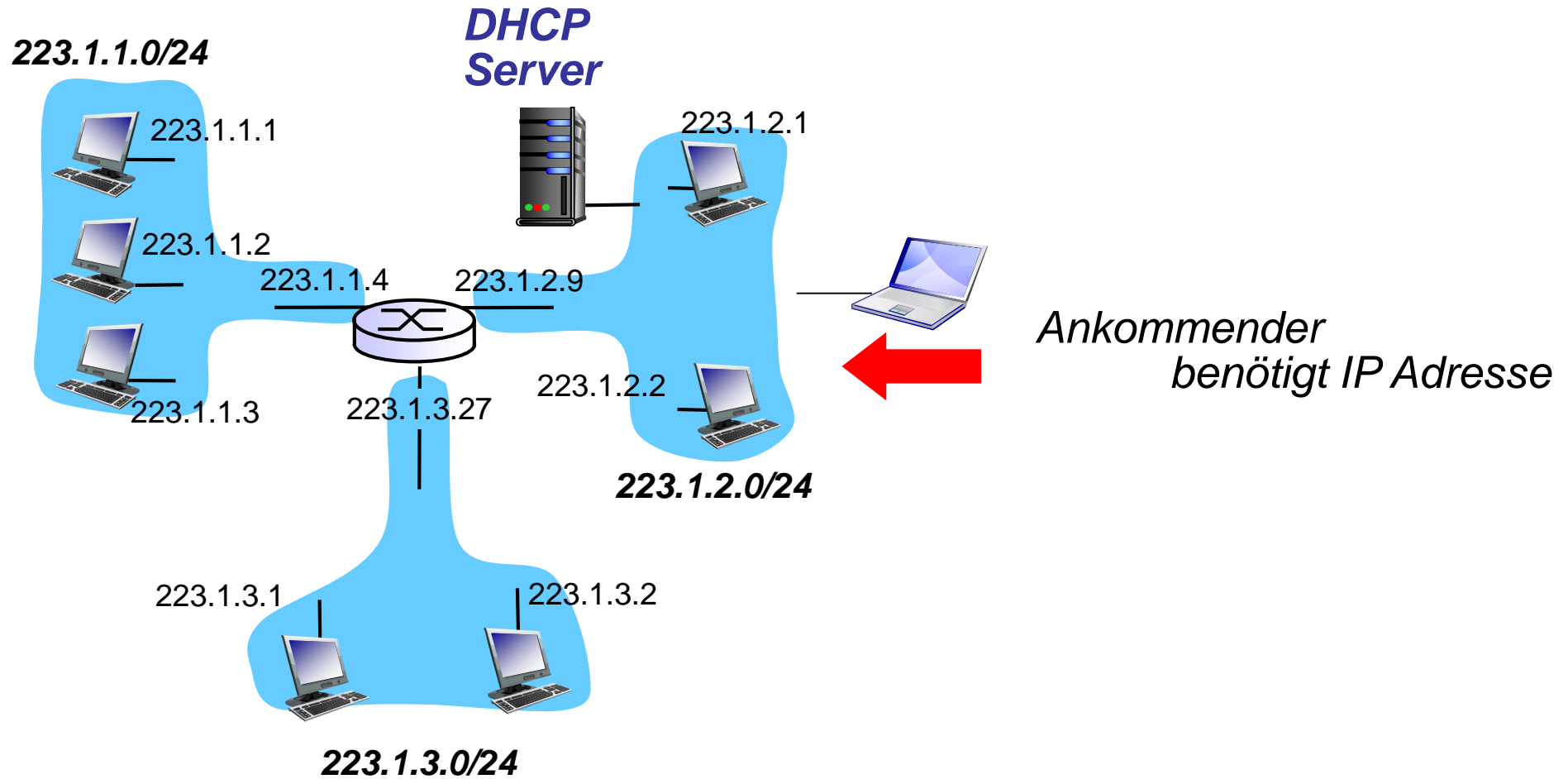
- Windows
 - Systemsteuerung / Netzwerk- und Freigabe Center / Adaptereinstellungen
- Linux
 - Manuell: `ifconfig` oder `ip addr add`
 - Persistent: `/etc/network/interfaces`

❑ **Automatisch per DHCP**

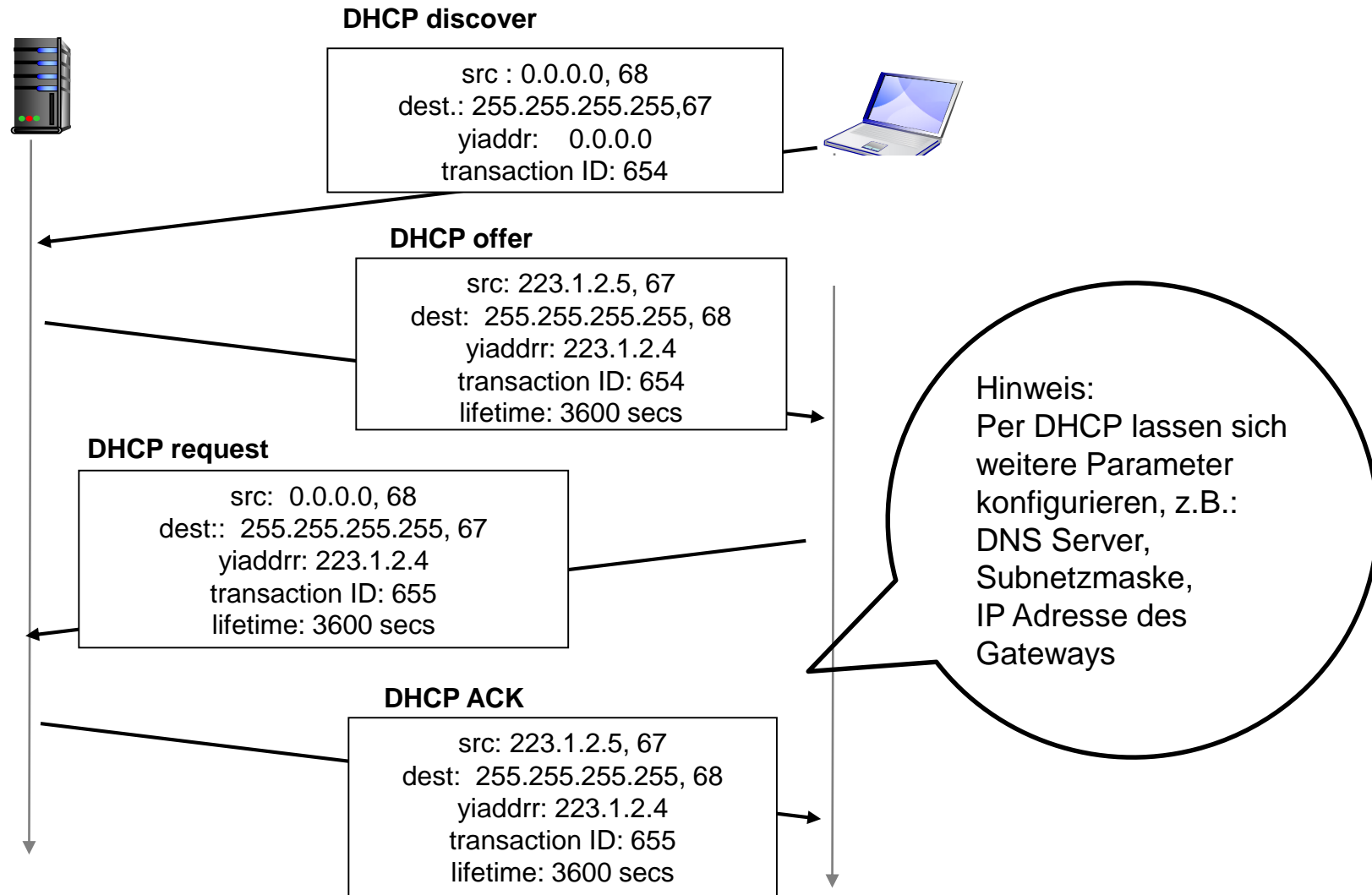
- Dynamic Host Configuration Protocol
- Plug-and-Play
- IP Adresse wird automatisch durch Server zugewiesen



DHCP: Client-Server Szenario



DHCP: Client-Server Szenario



Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)

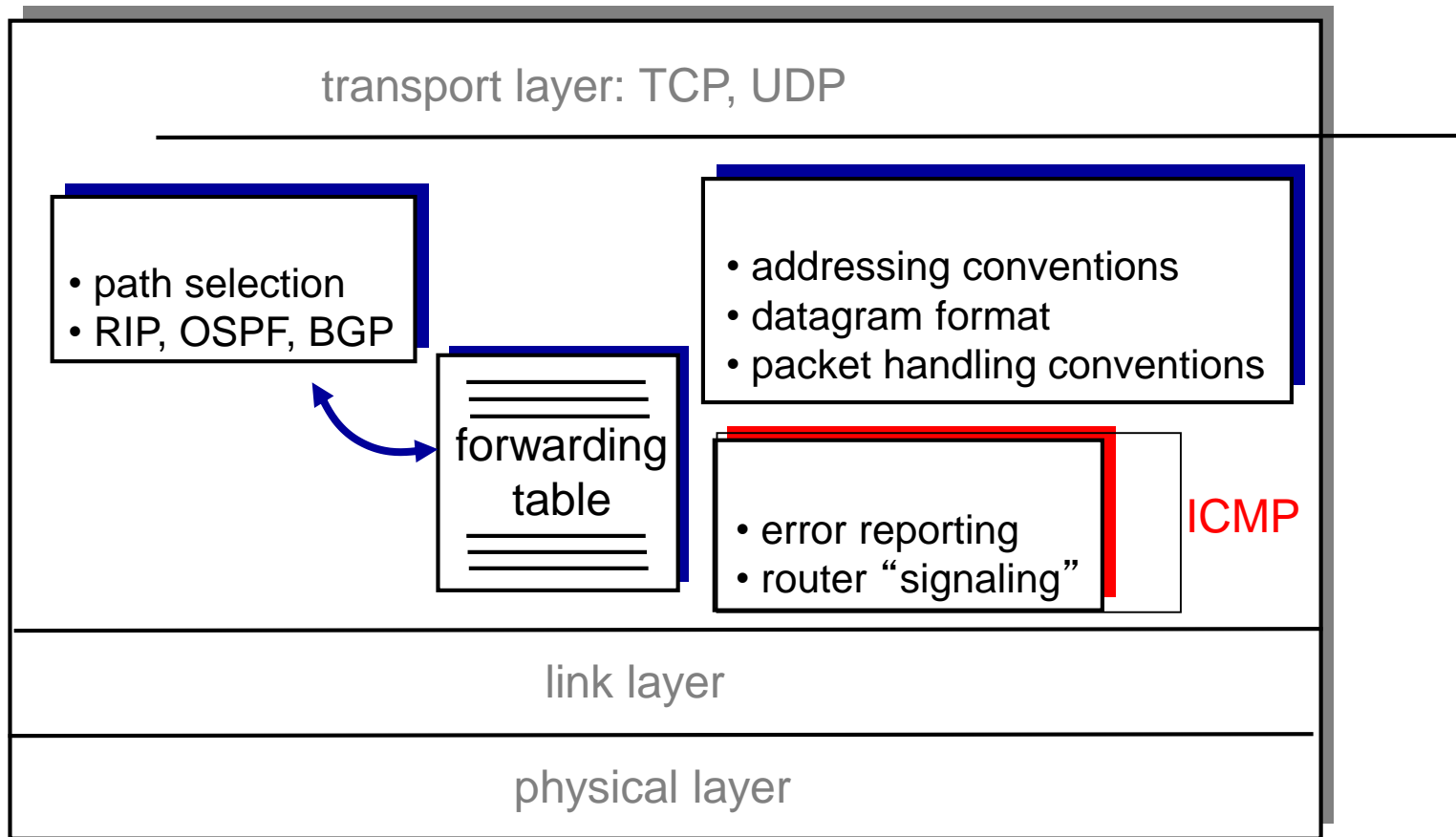
❑ Automatische Zuweisung über DHCP

- DHCP Server leiht IP Adresse an Host aus Pool von Adressen aus.
- Host kann zugewiesene IP Adresse ggfs. verlängern.
- Eigentlich Schicht 4!

❑ DHCP Funktionsweise

- Host sucht einen DHCP Server: **DHCP Discover** (optional)
 - Ziel IP Adresse: 255.255.255.255 (Broadcast)
- DHCP Server antwortet mit **DHCP Offer** (optional)
 - Ziel IP Adresse: 255.255.255.255 (Broadcast)
- Host fordert explizit IP Adresse an: **DHCP Request**
- DHCP Server weist Adresse zu: **DHCP ACK**

Network Layer Protokolle



Internet Control Message Protokoll (ICMP)

❑ **Austausch von Information zwischen Host und Routern**

- Bei Fehler sendet Router einen Fehlerbericht, z.B. „Unreachable Host, Port, Protocol“
- Echo Request/Reply: Ping

❑ ICMP Information wird als IP Paket versendet

❑ ICMP Nachricht enthält

- Type Code
- Die ersten 8 Bytes des IP Pakets, das den Fehler verursacht

<u>Type</u>	<u>Code</u>	<u>description</u>
0	0	echo reply (ping)
3	0	dest. network unreachable
3	1	dest host unreachable
3	2	dest protocol unreachable
3	3	dest port unreachable
3	6	dest network unknown
3	7	dest host unknown
4	0	source quench (congestion control - not used)
8	0	echo request (ping)
9	0	route advertisement
10	0	router discovery
11	0	TTL expired
12	0	bad IP header

Address Resolution Protocol (ARP)

❑ **32-Bit IP Adresse**

- Network Layer Adresse für ein Interface
- Forwarding auf Schicht 3

❑ **48-Bit MAC Adresse**

- Fest verbunden mit Netzwerkadapter
- Verwendung: Lokal, für Zustellung auf einem "Link".

❑ **Aufgabe von ARP**

- Auf dem Weg zum Ziel muss IP Paket über mehrere Links weitergeleitet werden.
- Jeder Router/Host schlägt Ausgangsport nach und leitet dann Paket weiter.
- Aber welche Ziel-MAC Adresse gehört zum Next-Hop Router/Host?
- Nötig: Übersetzen von IP in MAC Adressen

ARP Auflösung: IP zu MAC Adresse

❑ **IP Knoten**

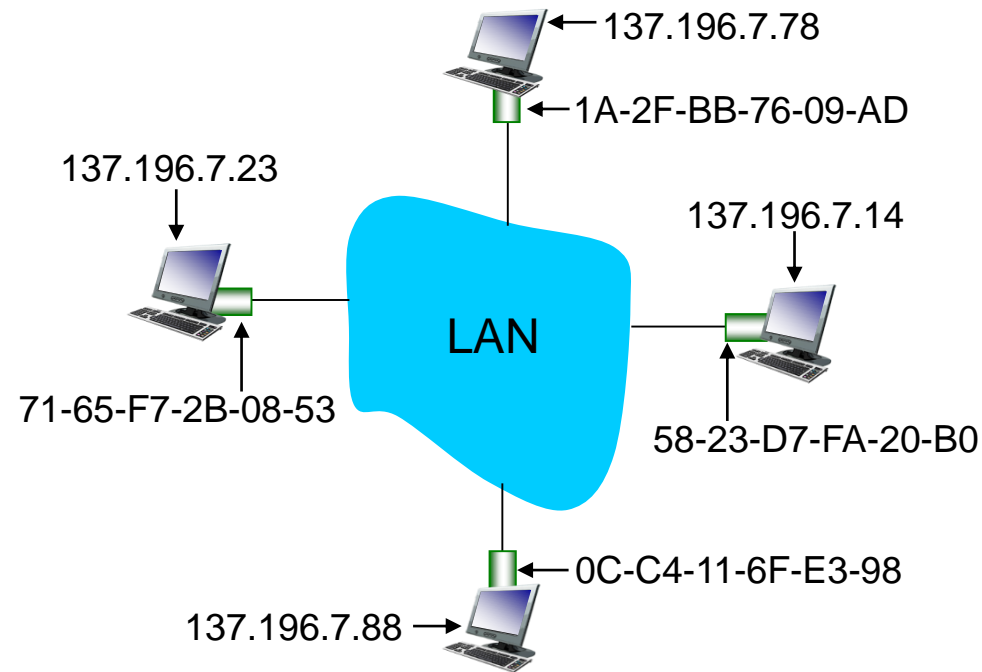
- Hosts und Router
- Nicht: Switches!

❑ Jeder IP-Knoten verwaltet eine **ARP Tabelle**

- Speichert welche IP Adresse zu welcher MAC Adresse gehört
 - <IP Adresse; MAC Adresse; TTL>

❑ **TTL (Time to Live)**

- Zeit nachdem Eintrag ungültig wird.
- Oft nach 20 Minuten



ARP: Sender und Empfänger im gleichen LAN

- ❑ A möchte Datagramm zu *B* senden
 - *B*'s MAC Adresse nicht in A's ARP-Tabelle
- ❑ A schickt ein **Broadcast** ARP Query Paket, das *B*'s IP Adresse enthält
 - Ziel MAC Adresse: FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Alle Hosts im LAN empfangen ARP Query
- ❑ *B* empfängt ARP Query und informiert A in Antwort über *B*'s MAC Adresse
 - Unicast Frame zu MAC A.
- ❑ A speichert nun IP/MAC-Adresspaar in seiner ARP-Tabelle bis die Information „veraltet“ ist
- ❑ ARP ist „Plug-and-Play“
 - Hosts verwalten ihre ARP Tabelle ohne Konfiguration durch den Netzadministrator

Publikums-Joker: ARP

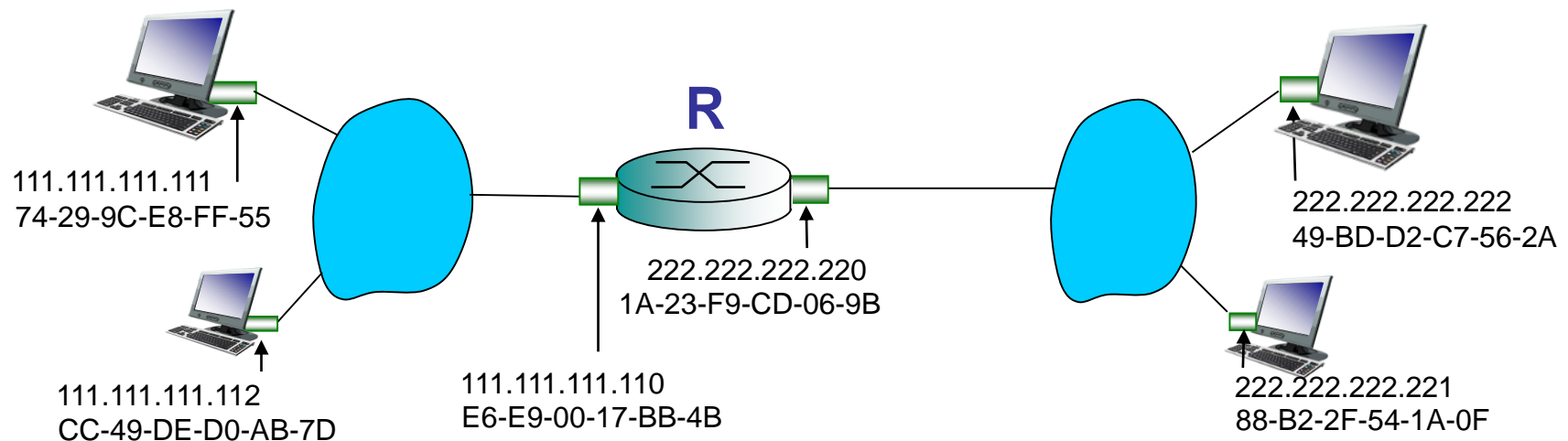
Welche Aussage ist **falsch**?

- A. Ein ARP Paket wird in einem Ethernet Frame verpackt.
- B. Nur manchmal ist es beim Weiterleiten von IP Paketen erforderlich, dass ein Router/Host zunächst eine ARP-Anfrage stellt.
- C. Mit ARP werden IP Adressen zu MAC Adressen aufgelöst.
- D. Ein ARP Paket hat einen IP Header.



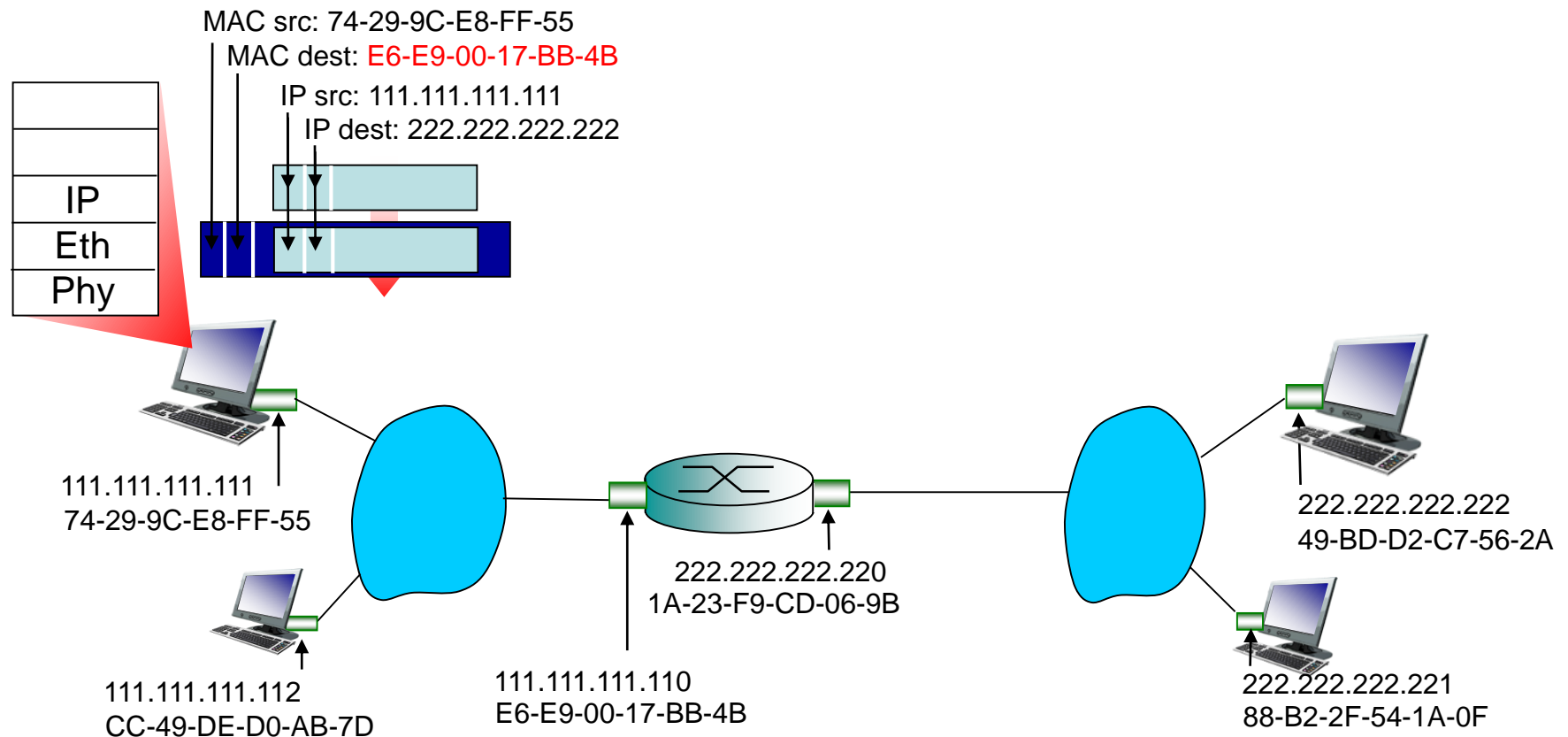
ARP: Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs

- ❑ **Ziel:** Datagramm von *A* nach *B* über Router *R* senden
 - Annahme 1: *A* kennt IP Adresse von *B*. Woher?
 - Annahme 2: *A* kennt IP und MAC Adresse des Interfaces von Router *R*



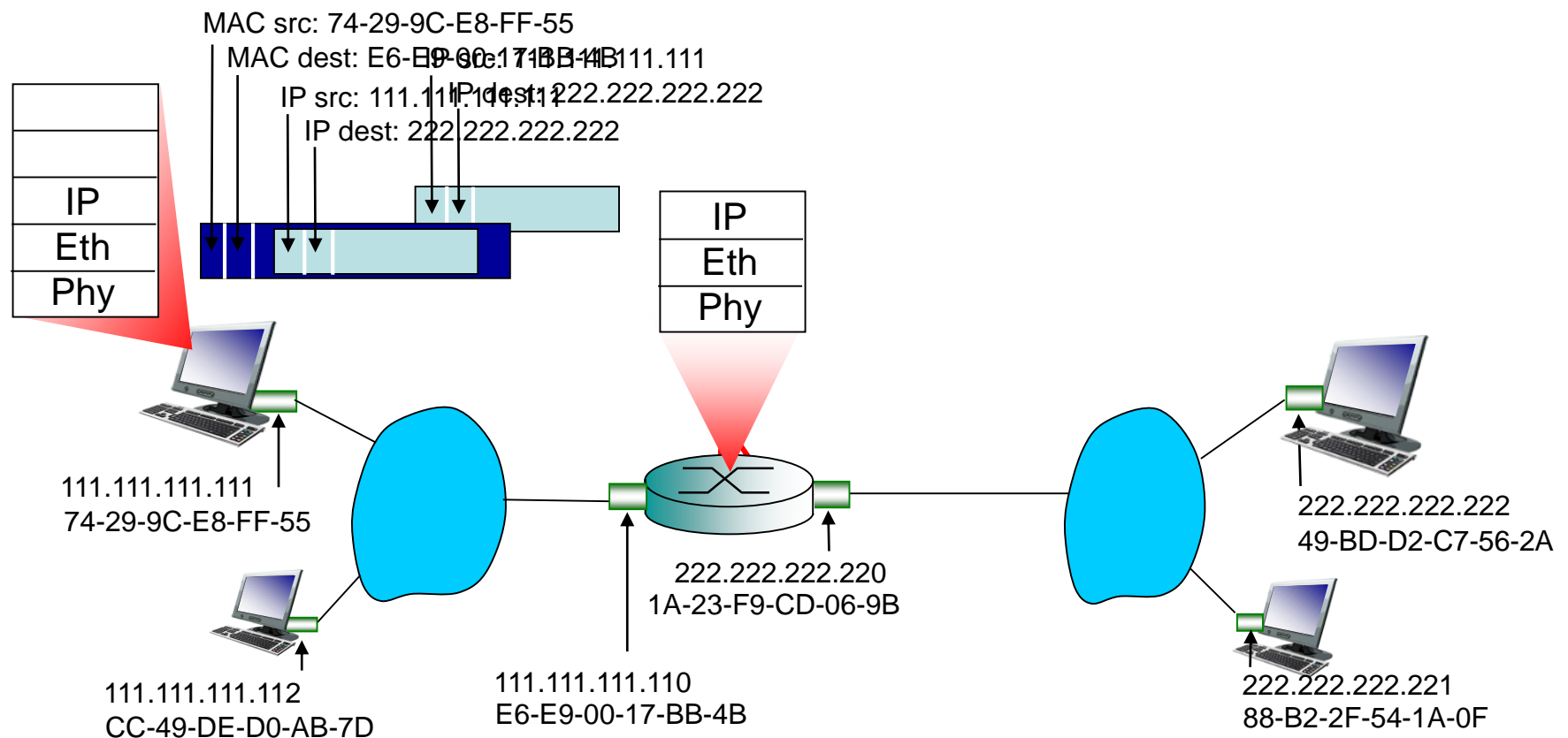
ARP: Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs

- ❑ A erzeugt IP Datagramm mit Source IP A und Dest IP B
- ❑ A erzeugt Link-Layer Frame mit R's MAC Adresse



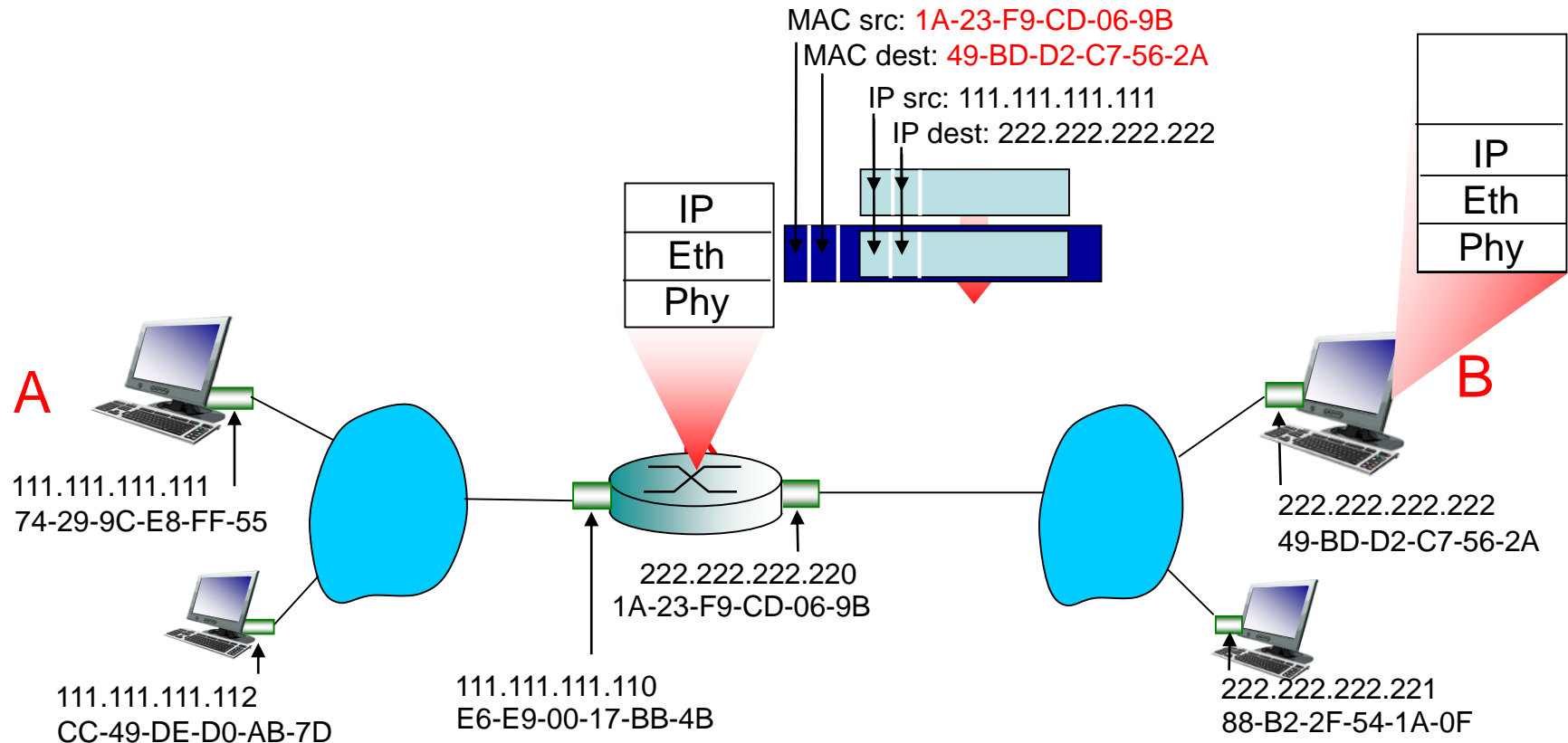
ARP: Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs

- Frame wird von *A* nach *B* geschickt
- *R* empfängt Frame, entfernt Ethernet Header, gibt Inhalt hoch zu Network Layer



ARP: Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs

- R leitet IP Datagramm mit IP Source A und IP Dest B weiter
- R erzeugt Ethernet Frame mit B's MAC Adresse als Ziel, Frame enthält IP Paket von A zu B



- ❑ Forwarding und Routing
 - Unterschied, Best Effort
- ❑ Funktionsweise eines Routers
 - Aufbau eines Routers, Queuing, Longest Prefix Matching,
- ❑ Internet Protocol IPv4
 - Adressen, Subnetze
- ❑ ARP, ICMP, DHCP
 - Wichtige Hilfsprotokolle