

Rechnernetze

Kapitel 4: Network Layer – Forwarding, IPv4

Prof. Dr. Wolfgang Mühlbauer

Fakultät für Informatik

`wolfgang.muehlbauer@th-rosenheim.de`

Wintersemester 2021/22

Slides are based on:

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

A. Tanenbaum, D. Wetherall: Computer Networks

- ❑ **Forwarding, Longest Prefix Matching**

- ❑ Internet Protocol IPv4

- ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP

- ❑ Routing

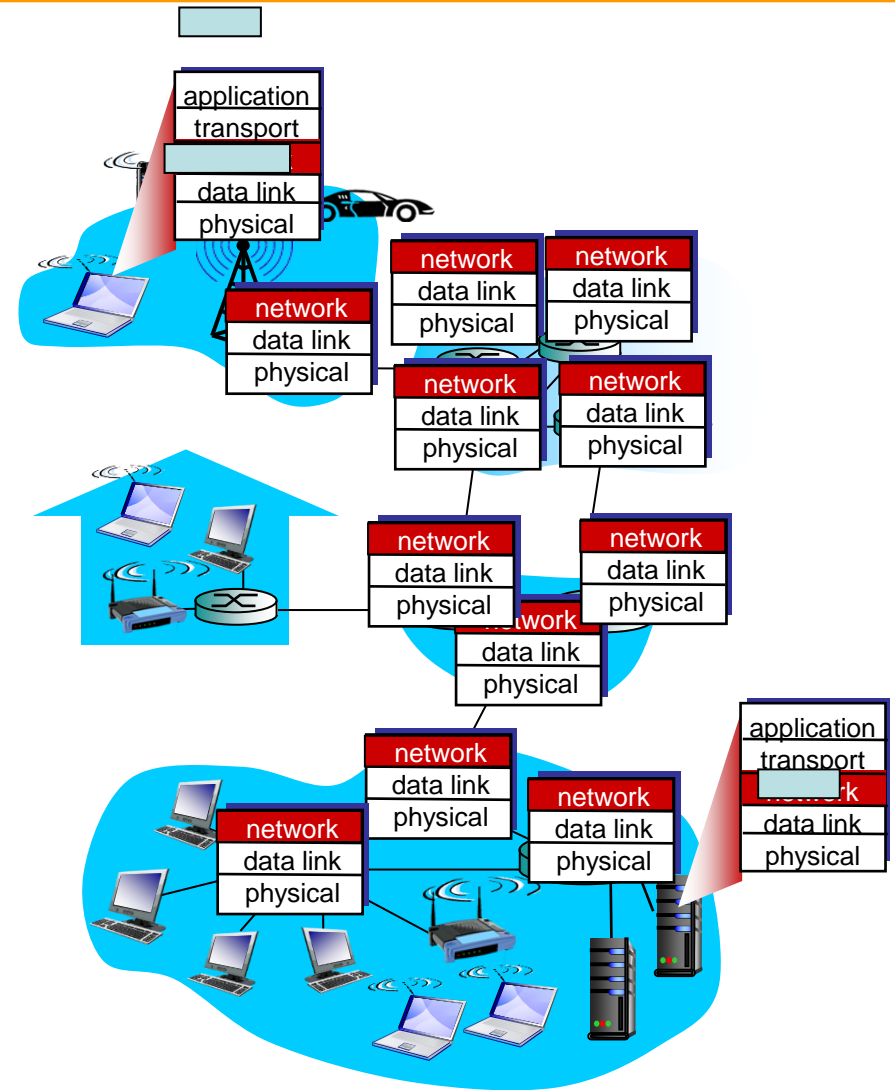
- ❑ IPv6



Siehe Kapitel 4

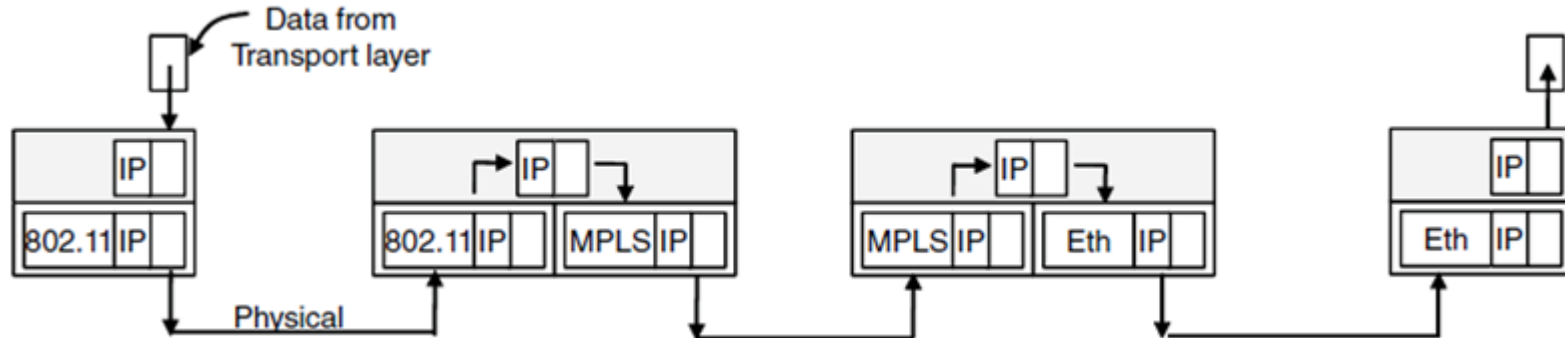
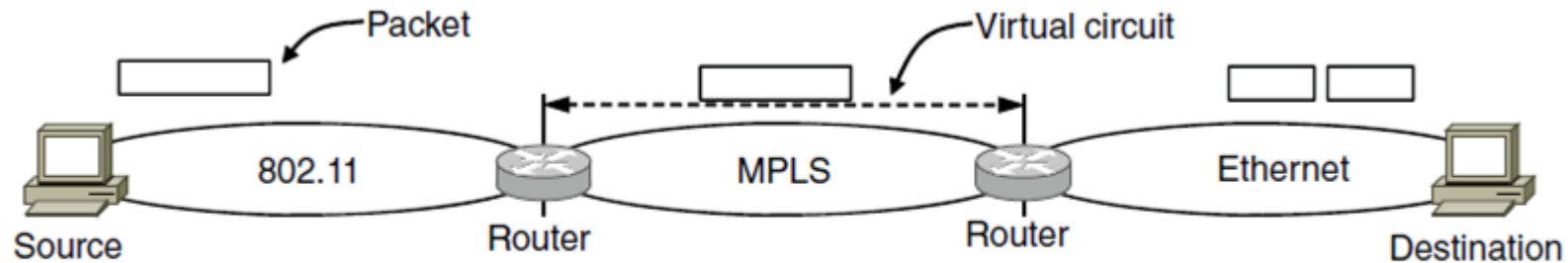
Network Layer

- ❑ **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
- Identifikation von Sender und Empfänger.

❑ 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.

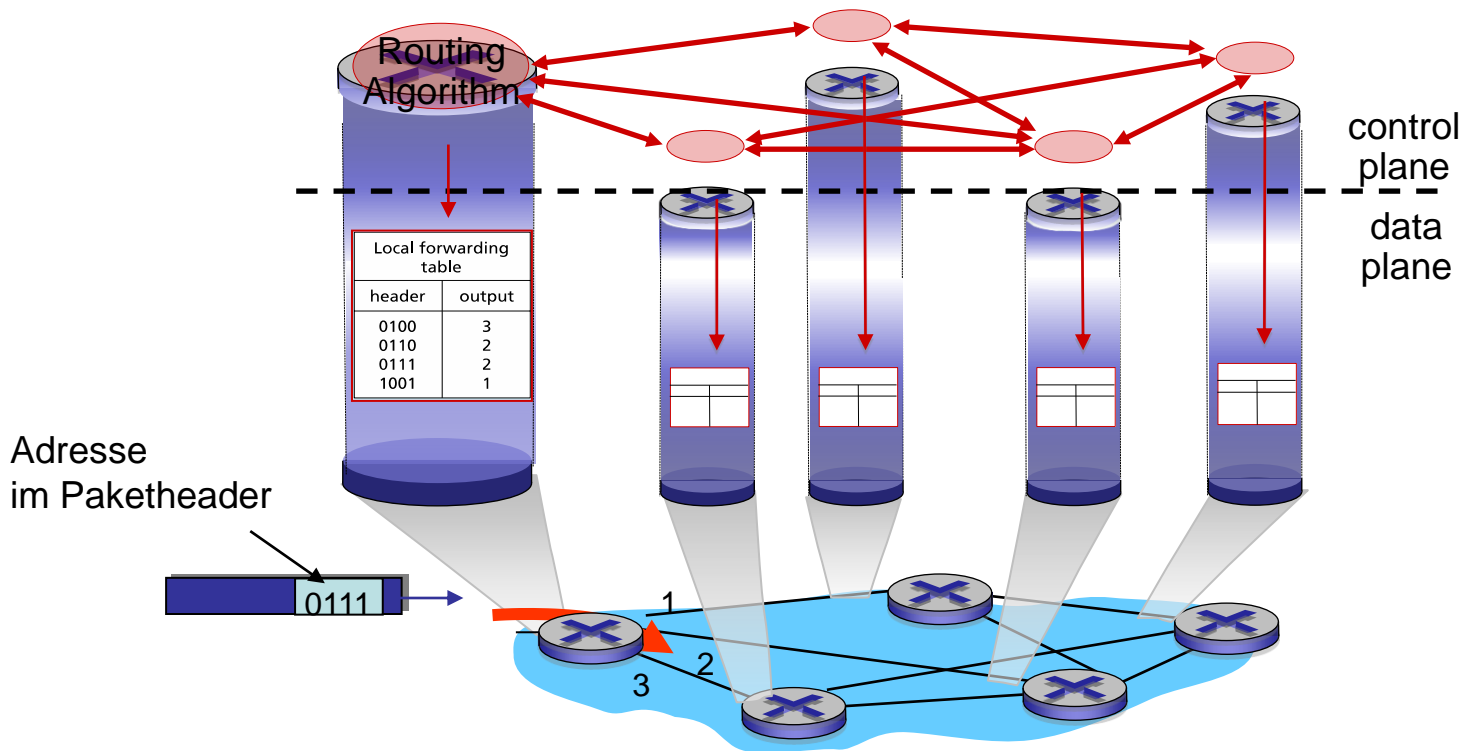
Network Layer: Forwarding und Routing

□ Forwarding / "Data Plane"

- Lokale Funktion jedes Routers

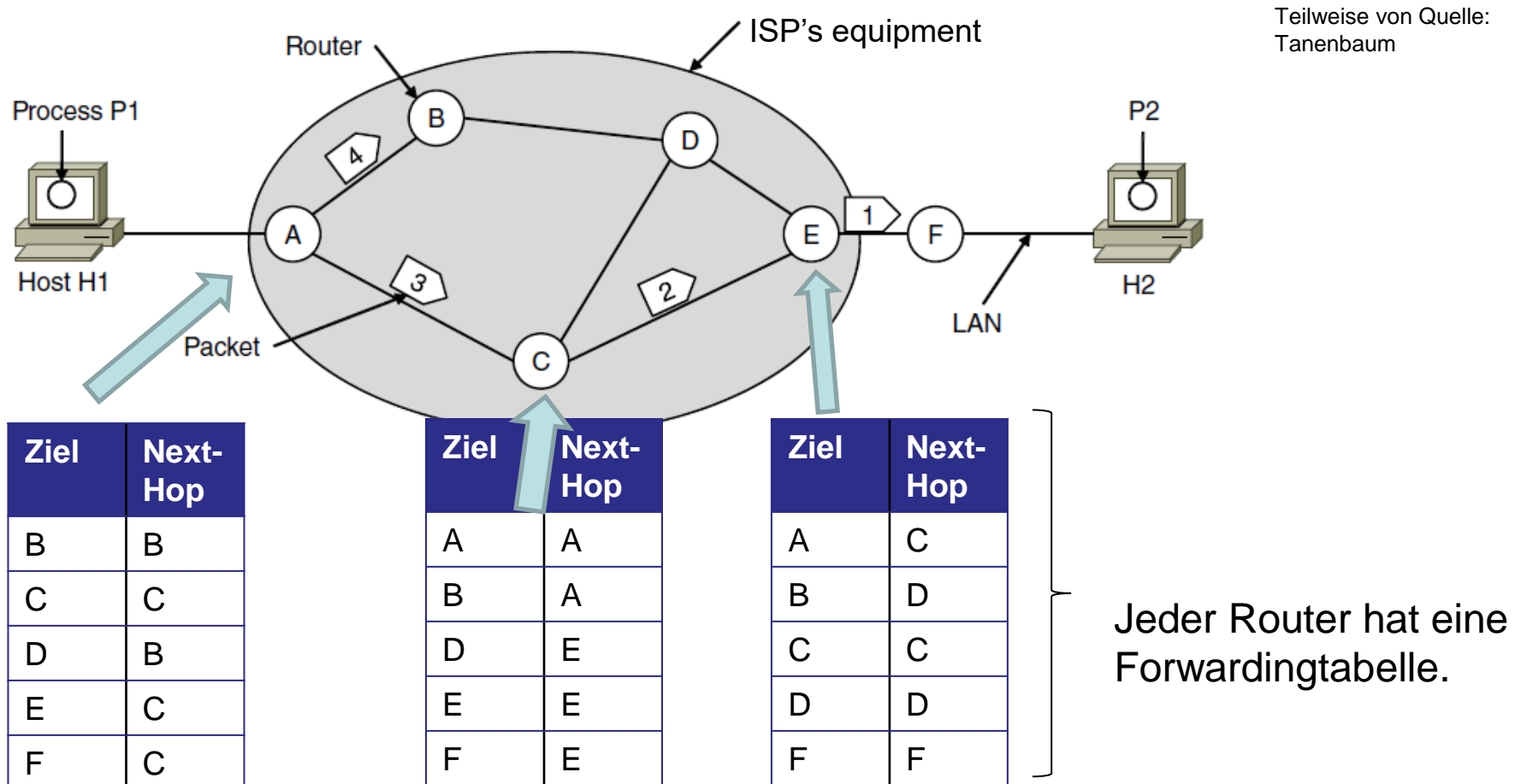
□ Routing / "Control Plane"

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

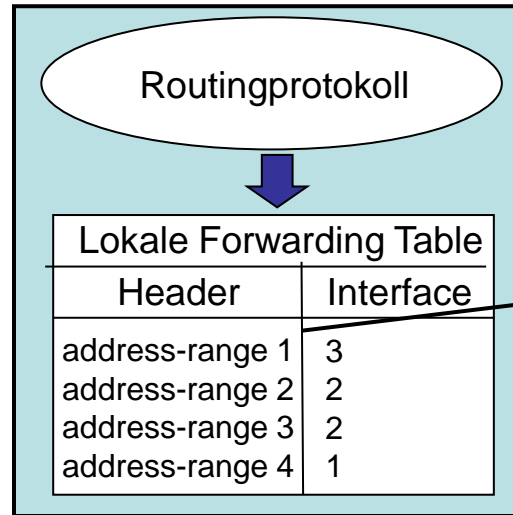


IP: Verbindungsloses Forwarding

- ❑ Weiterleitung des Pakets nur anhand der Ziel IP-Adresse.
- ❑ Jeder Router bestimmt anhand von Ziel-IP den Next-Hop.



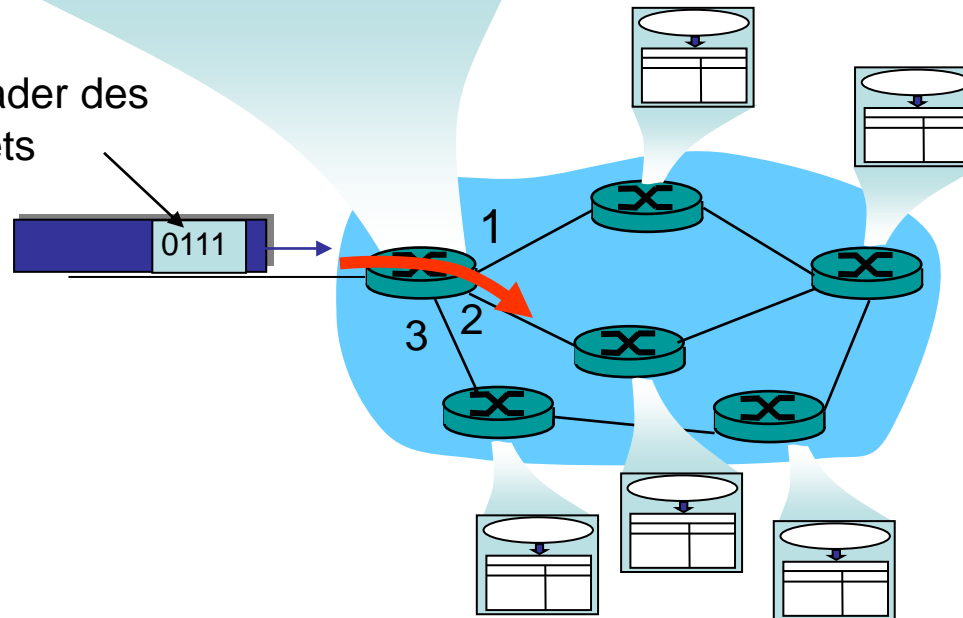
Forwarding Table



Problem:
Viele Einträge,
da IP Adresse 32 Bit hat

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

Wert/Adresse in Header des
ankommendes 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 **Prefix** (dt. „Präfix“)
- ❑ **Longest Prefix Matching:**
 - Nachschlagen einer Ziel-IP (32 bit) in Forwardingtabelle.
 - 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 (Single Choice)

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 |

- ❑ Forwarding, Longest Prefix Matching

- ❑ **Internet Protocol IPv4**

- ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP

- ❑ Routing

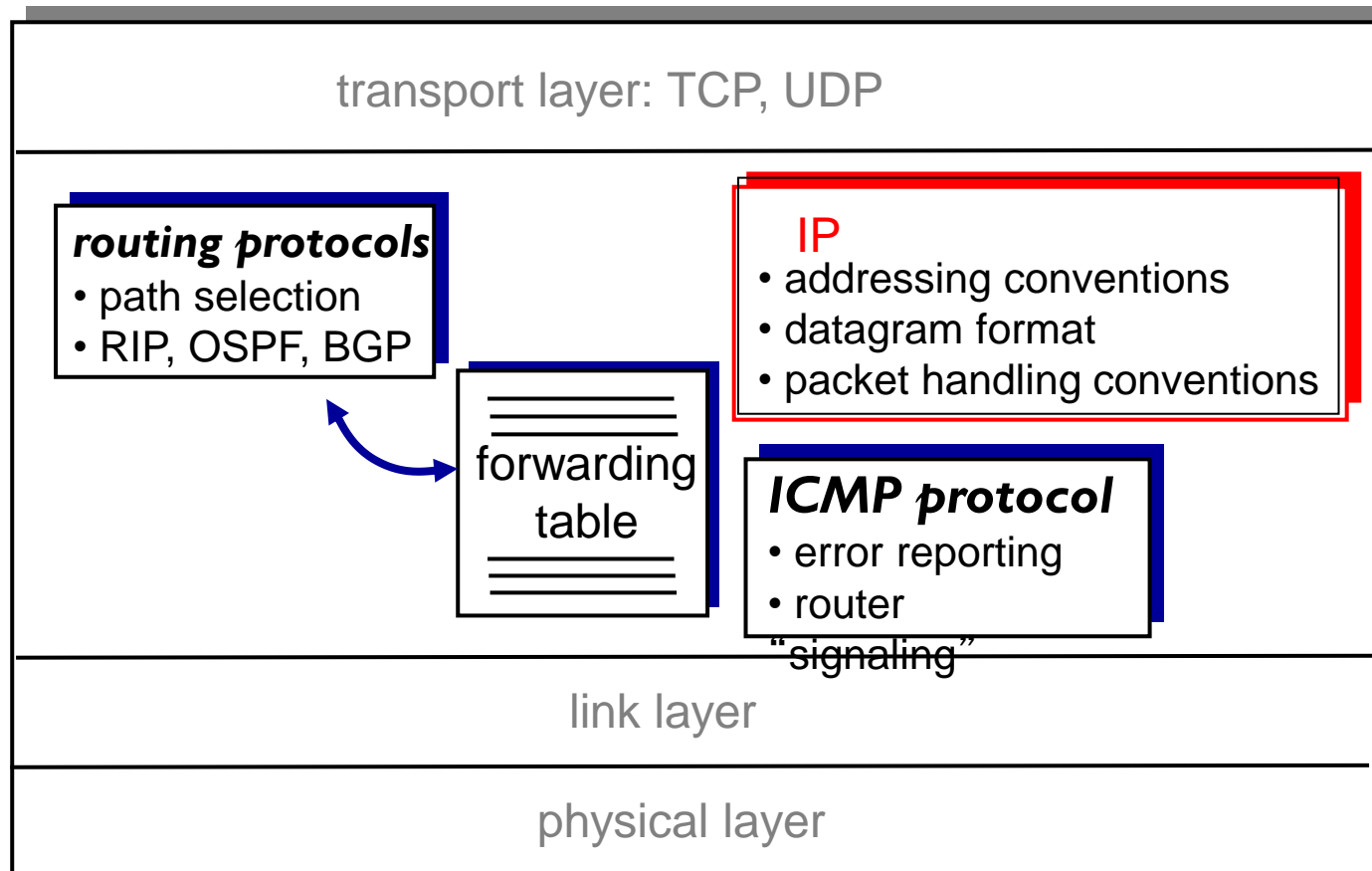
- ❑ IPv6



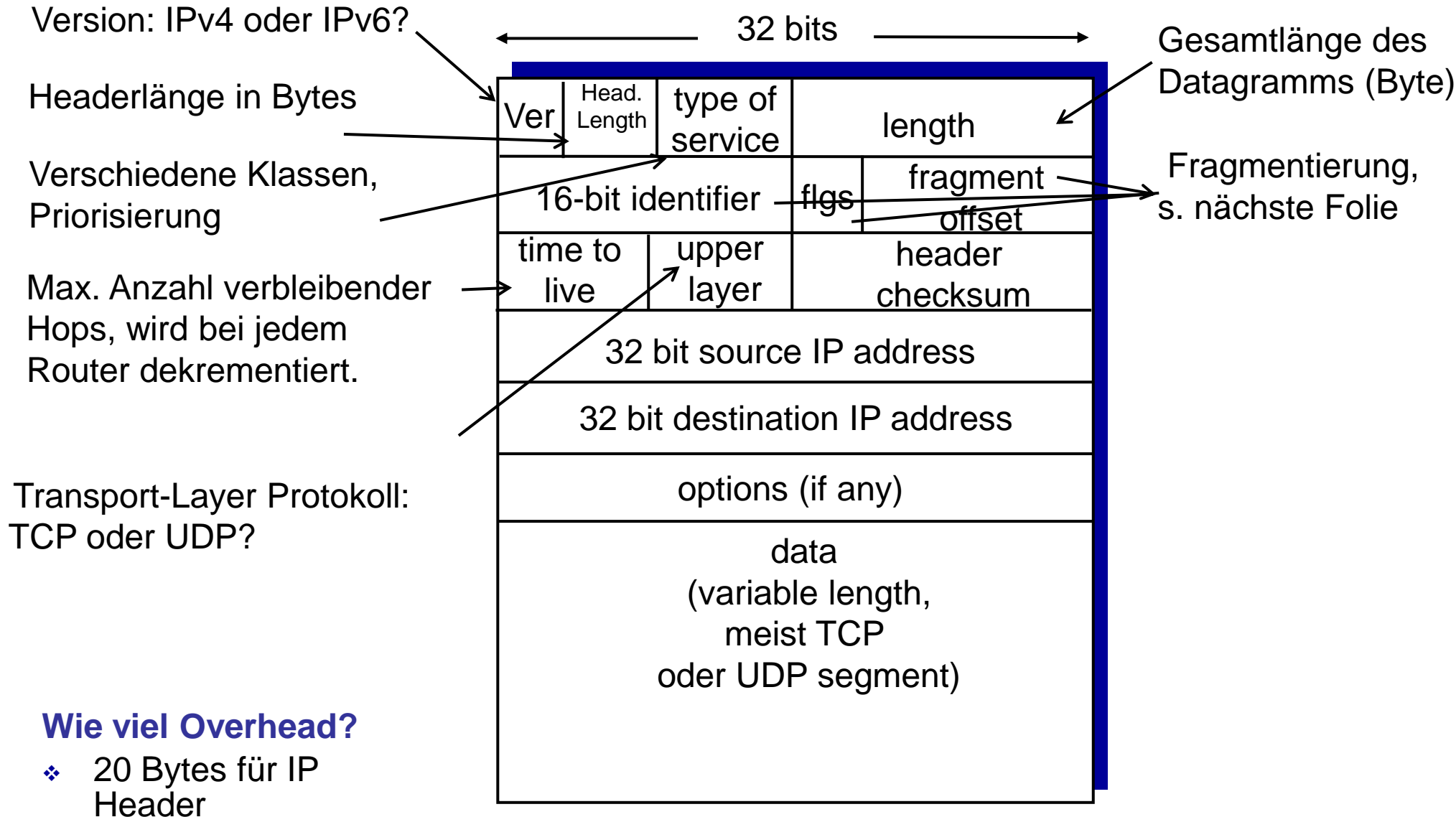
Siehe Kapitel 5

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



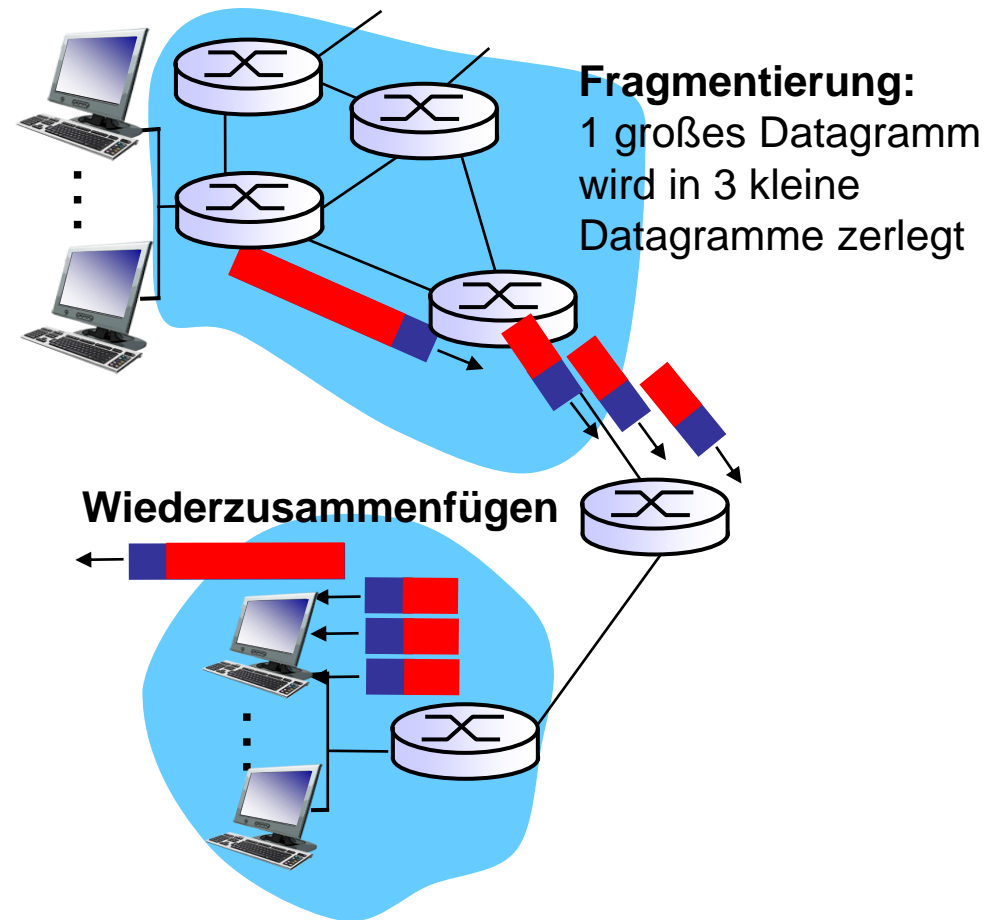
IP Fragmentierung

❑ **Maximum Transfer Unit (MTU)**

- Die meisten Link Layer Technologien erlauben nur eine maximale Framegröße.

❑ **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

| | | | | | |
|--|-----------------------|----------|----------------|--------------|--|
| | Total length =4000 | ID =X | fragflag =0 | offset =0 | |
|--|-----------------------|----------|----------------|--------------|--|

offset =
 $8 * 185 = 1480$
(Hinweis: Um Platz zu sparen,
wird Offset als Vielfaches von 8 Byte
angegeben)

| | | | | | |
|--|-----------------------|----------|----------------|----------------|--|
| | Total length =1480 | ID =X | fragflag =1 | offset =0 | |
| | Total length =1480 | ID =X | fragflag =1 | offset =185 | |
| | Total length =1480 | ID =X | fragflag =0 | offset =370 | |

Publikums-Joker: Fragmentation (Single Choice)

Welche der folgenden Aussagen ist **falsch**?

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



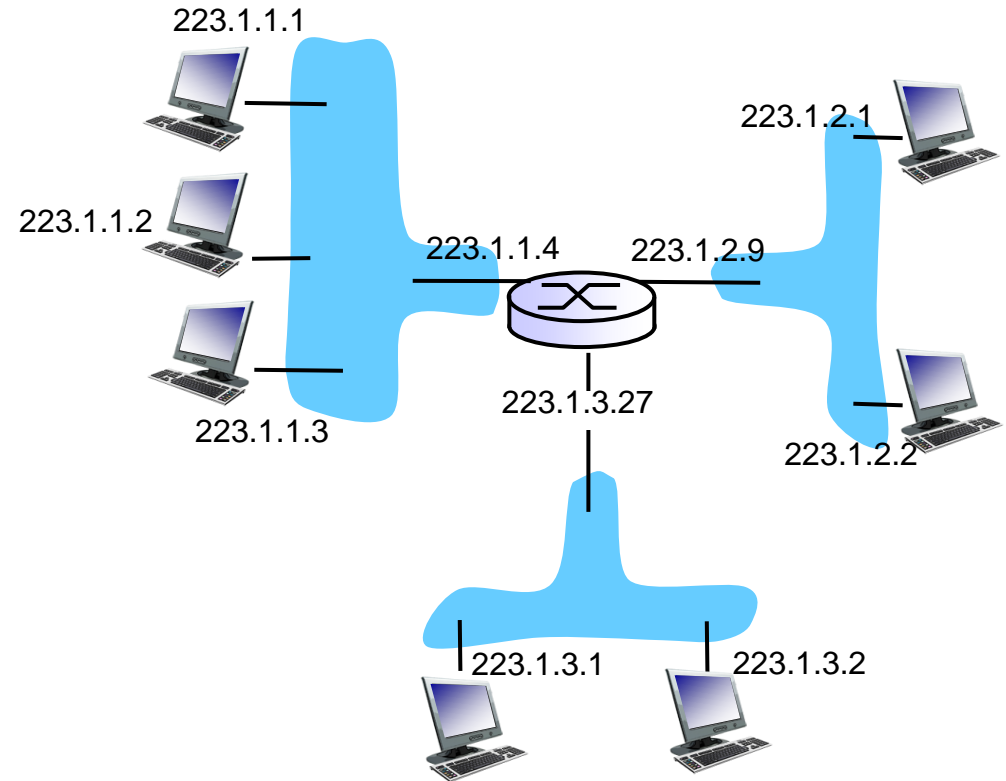
IP Adressierung

□ 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.

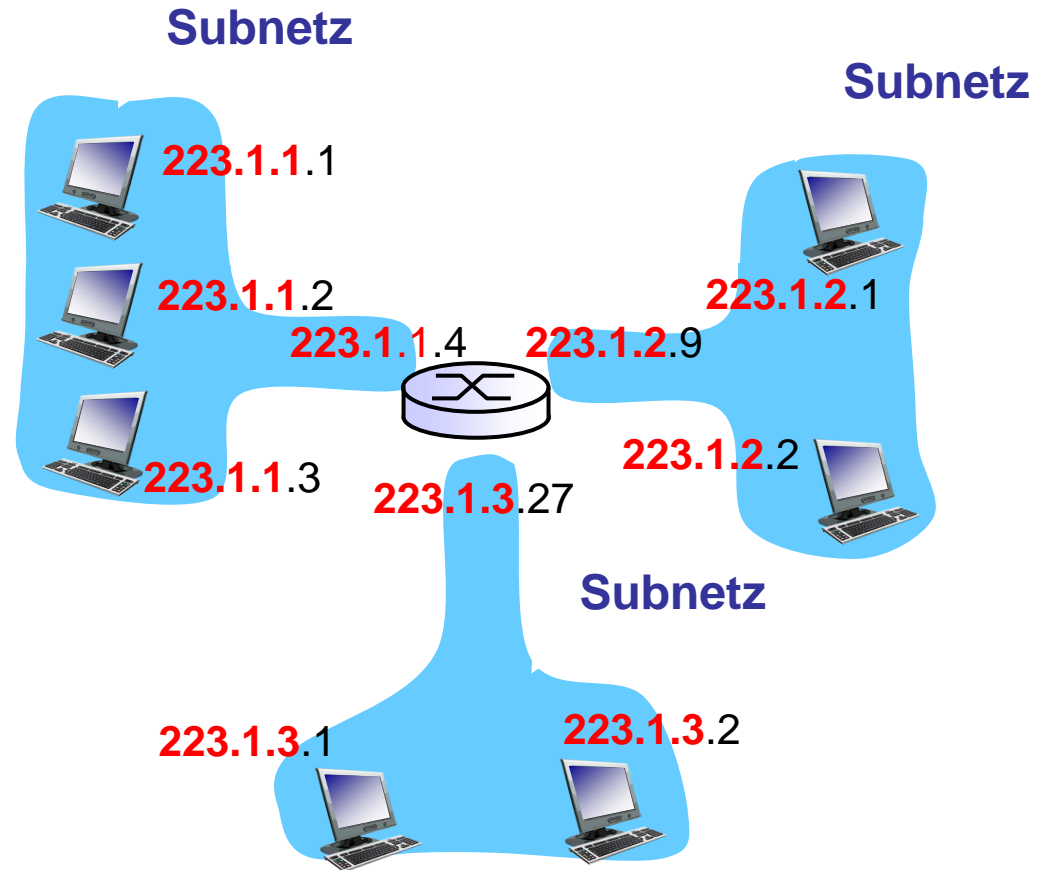


$$223.1.1.1 = \underbrace{11011111}_{223} \underbrace{00000001}_{.} \underbrace{00000001}_{1} \underbrace{00000001}_{.} \underbrace{00000001}_{1}$$

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, gleicher Link!
 - Bsp: Ethernet, WLAN, etc.
- ❑ 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.

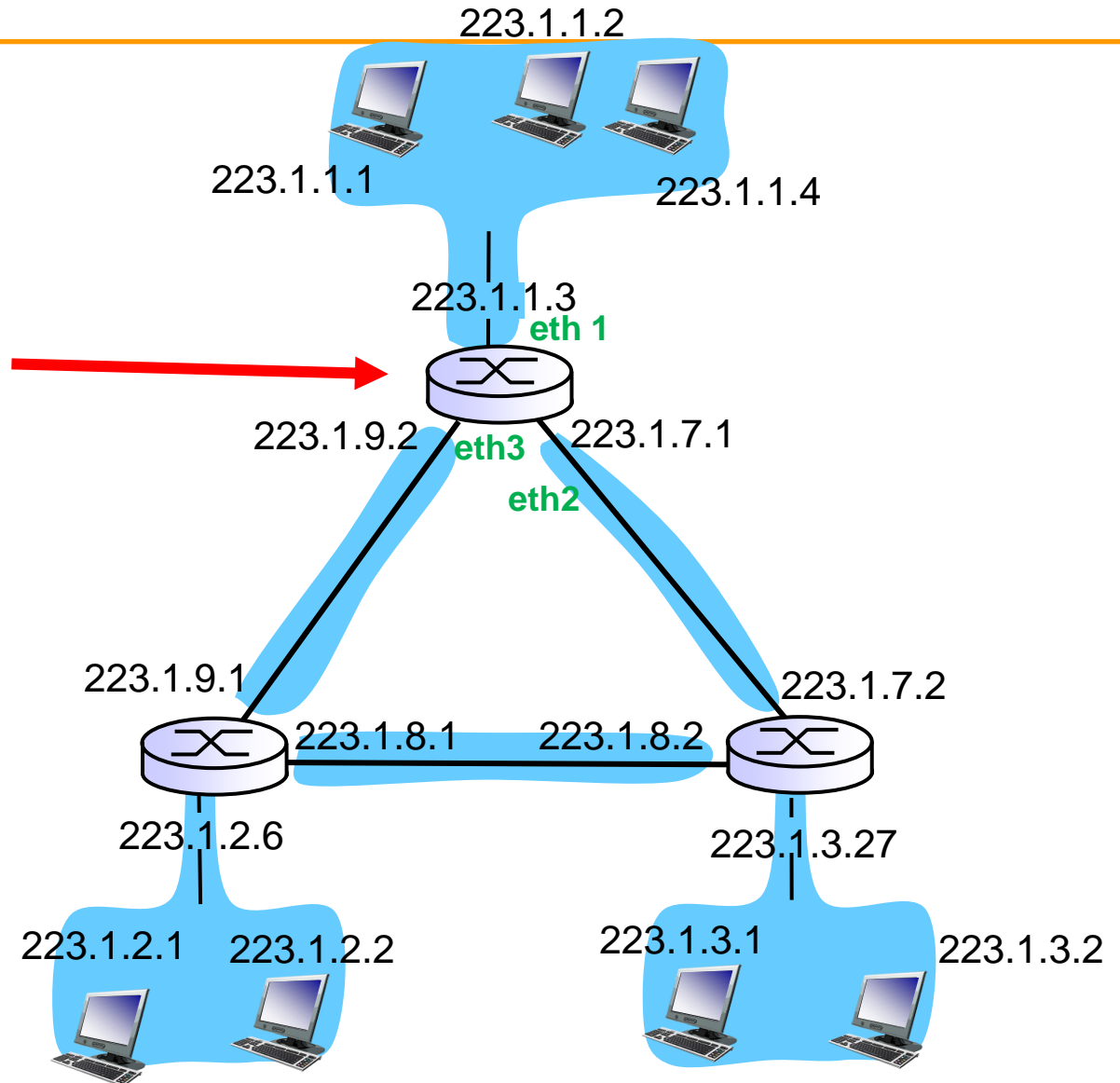


Vorteil: Man muss nur Subnetzadressen in den Routingtabellen halten.

Subnetze

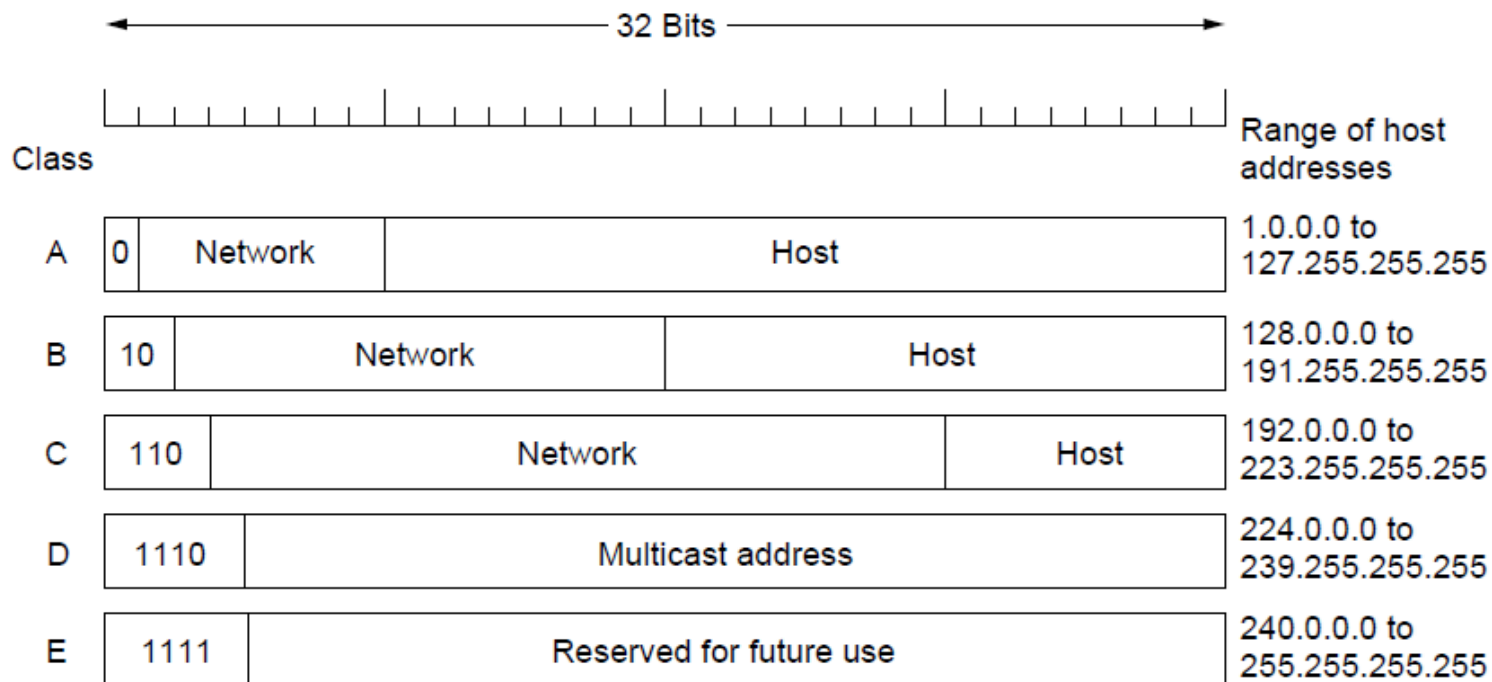
- ❑ Wie viele Subnetze sind vorhanden?
- ❑ Wie sieht Forwarding-Tabelle des obersten Routers aus?

| 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: Nur Präfixe der Länge /8, /16 oder /24!
- ❑ 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**, die es in **jedem** Subnetz gibt.

- 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
 - Sollte 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
 - **Publikumsjoker: Wie viele /23 Subnetze gibt es in /20?**

| | | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------------|
| 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 (Single Choice)

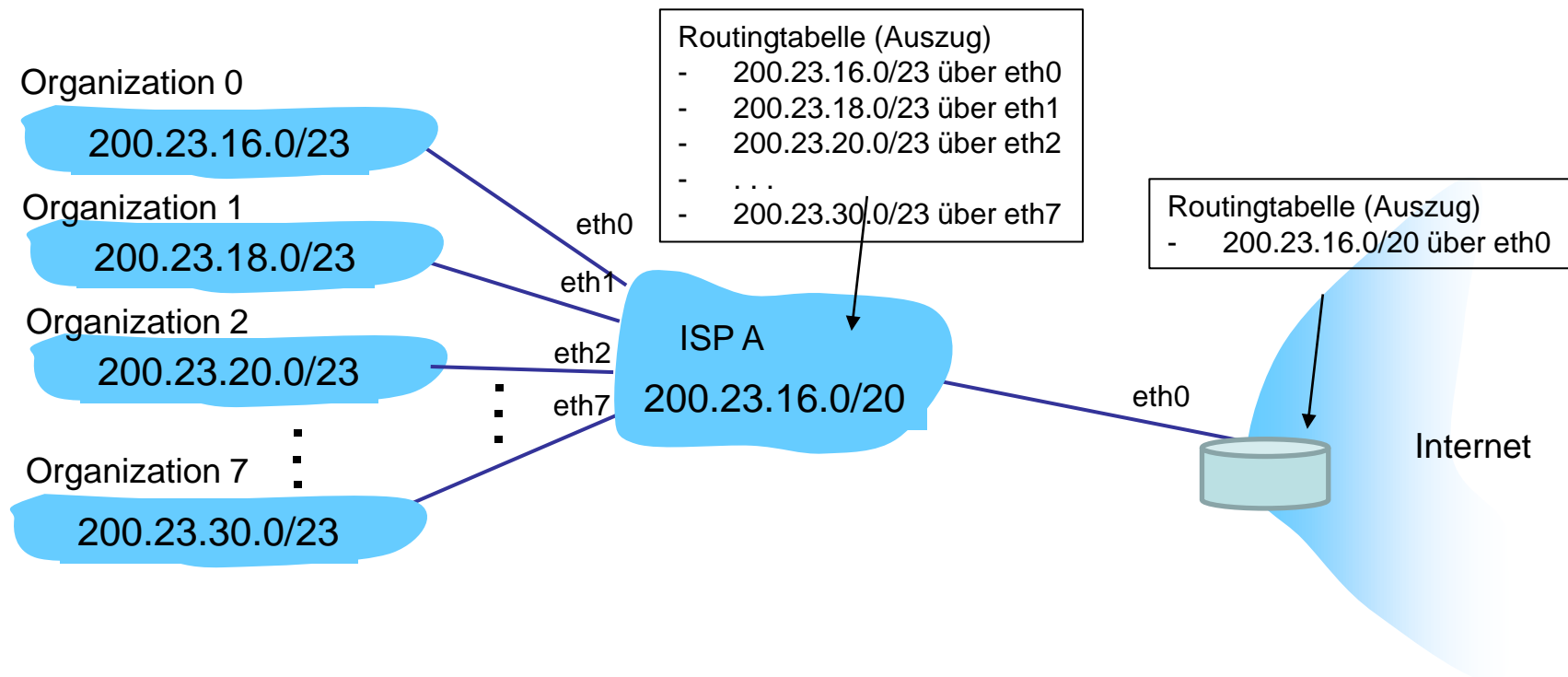
Wie viele /23 Subnetze hat ein /20 Subnetz?

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



Hierarchische Adressierung

- ❑ Hierarchische Adressierung erlaubt kurze Forwardingtabellen!
- ❑ Im Beispiel genügt es, wenn man „im Internet“ nur die Route 200.23.16.0/20 weiß.



Wie bekommt ein ISP seine IP-Adressen?

❑ 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, Longest Prefix Matching
 - ❑ Internet Protocol IPv4
 - ❑ **Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP**
 - ❑ Routing
 - ❑ IPv6
- } Siehe Kapitel 5

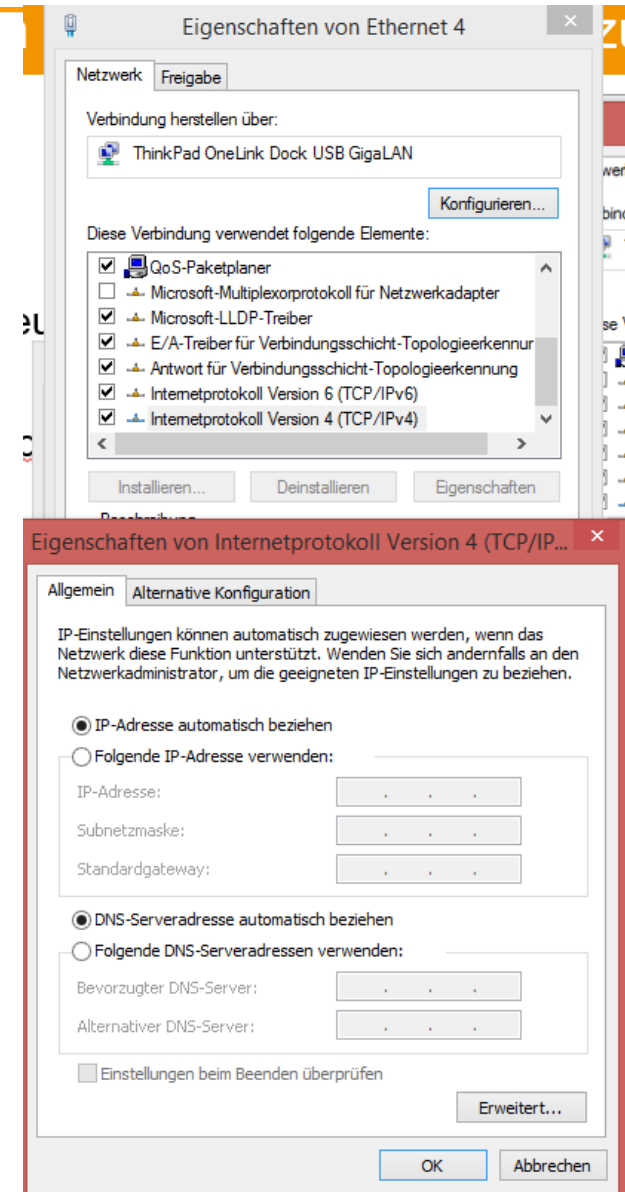
Wie weist man Hosts eine IP Adresse zu?

❑ **Manuell**

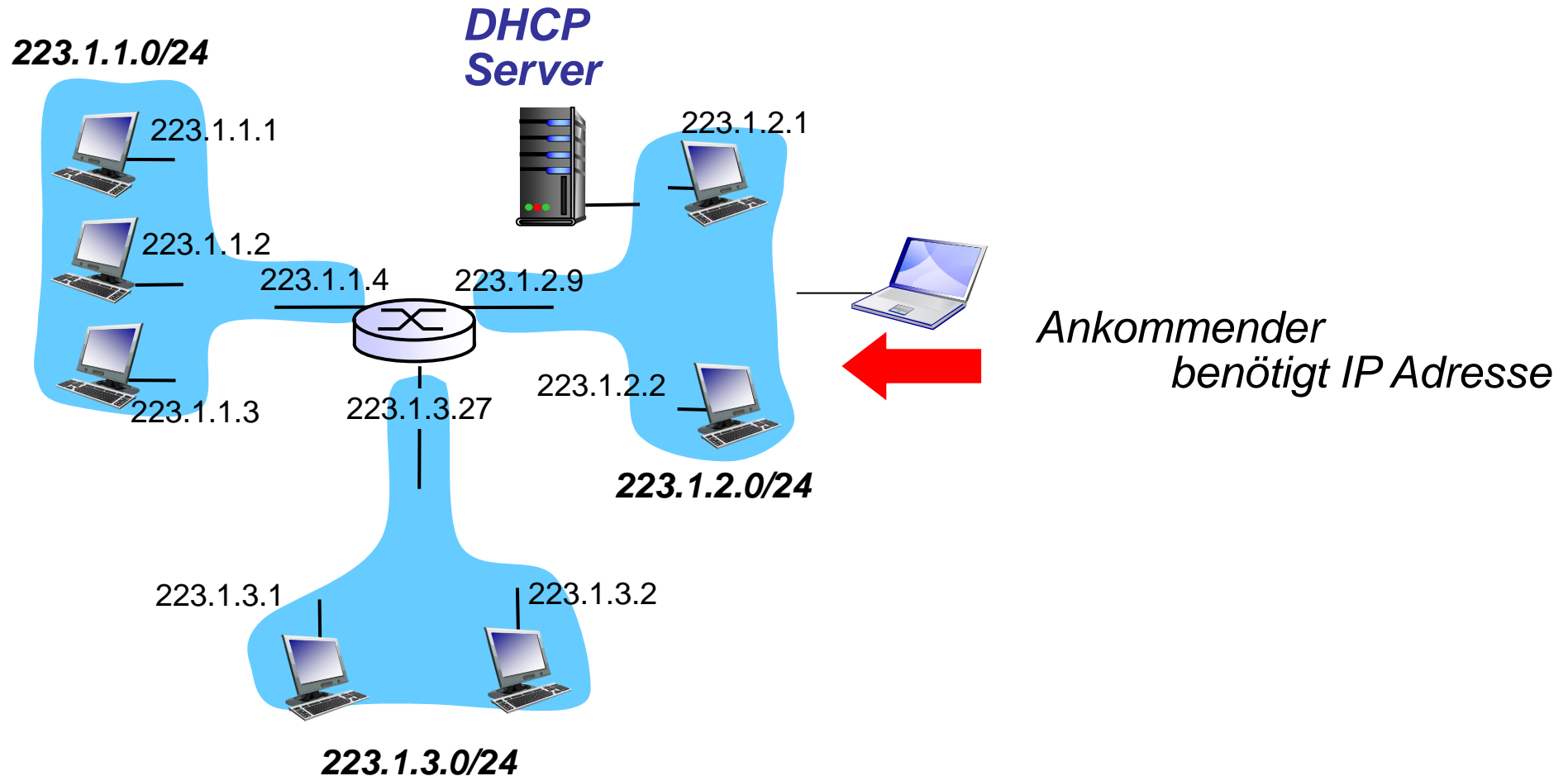
- Windows
 - Systemsteuerung / Netzwerk- und Freigabe Center / Adaptereinstellungen
- Linux
 - Manuell: `ifconfig` oder `ip addr add`
 - Persistent: `/etc/network/interfaces`

❑ **Automatisch per DHCP**

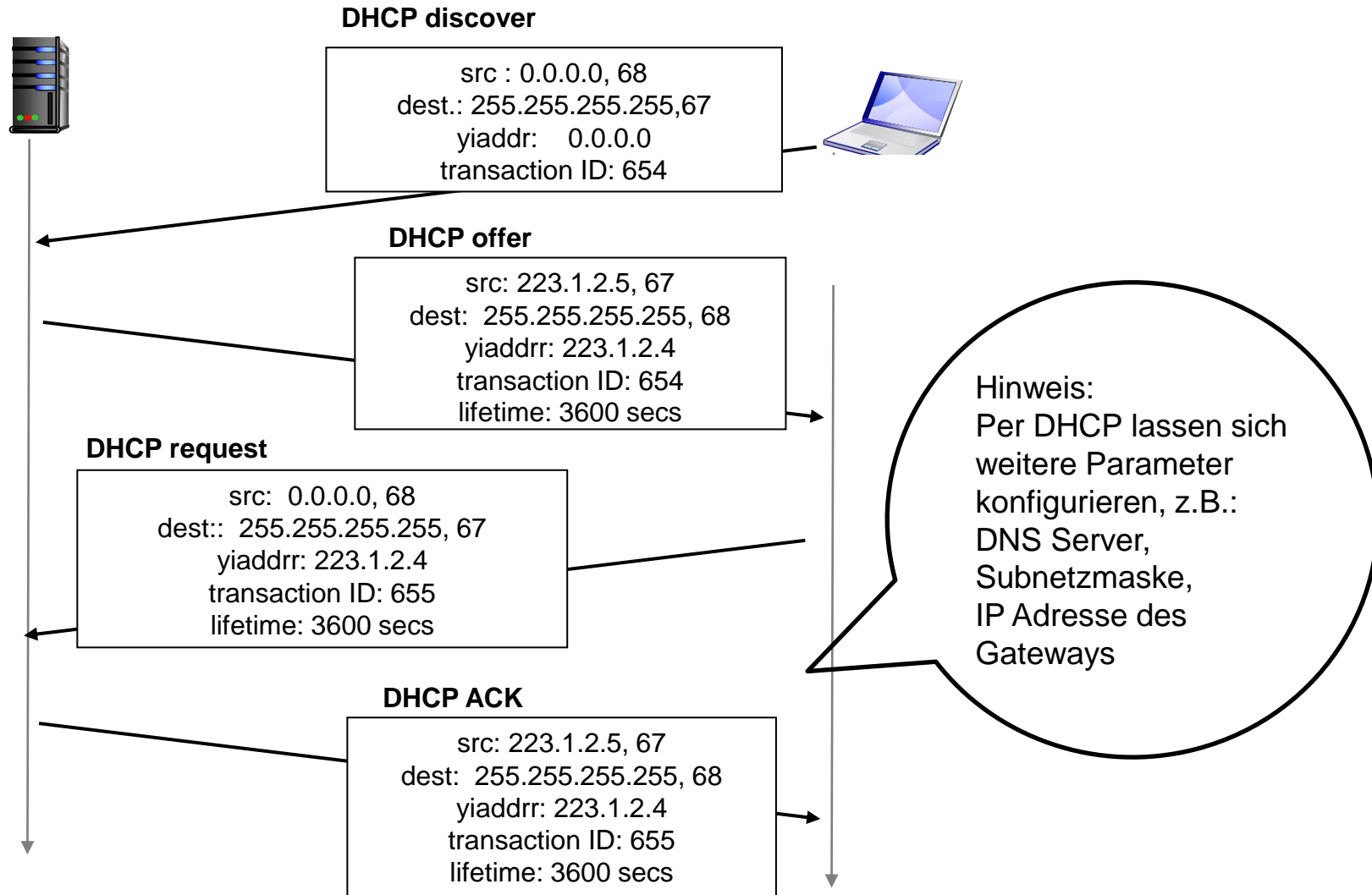
- Dynamic Host Configuration Protocol
- Plug-and-Play
- IP Adresse wird automatisch durch Server zugewiesen



DHCP: Client-Server Szenario



DHCP: Client-Server Szenario



Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)

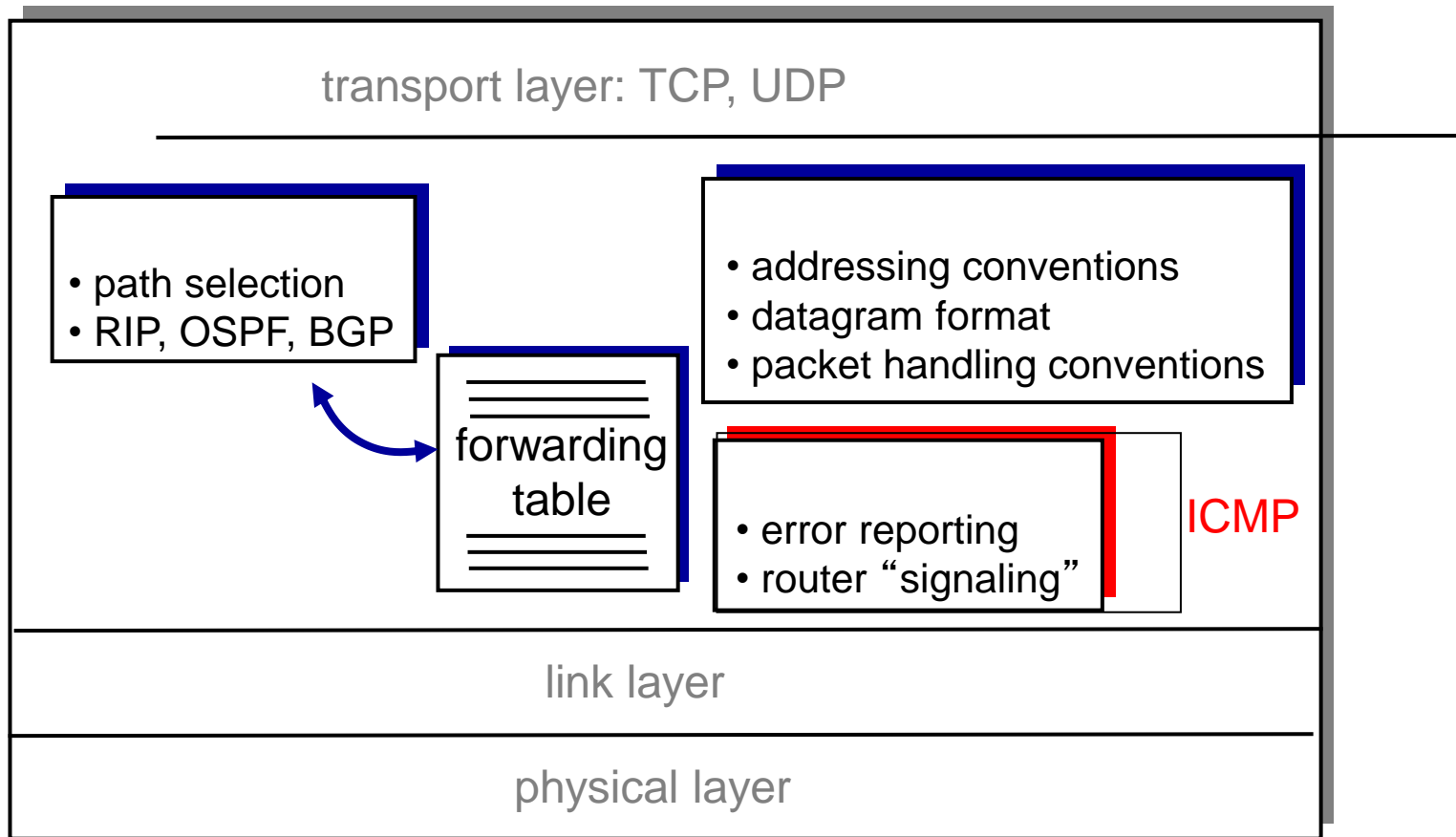
❑ Automatische Zuweisung über DHCP

- 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 wird IP Paket über mehrere Links weitergeleitet.
- 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**

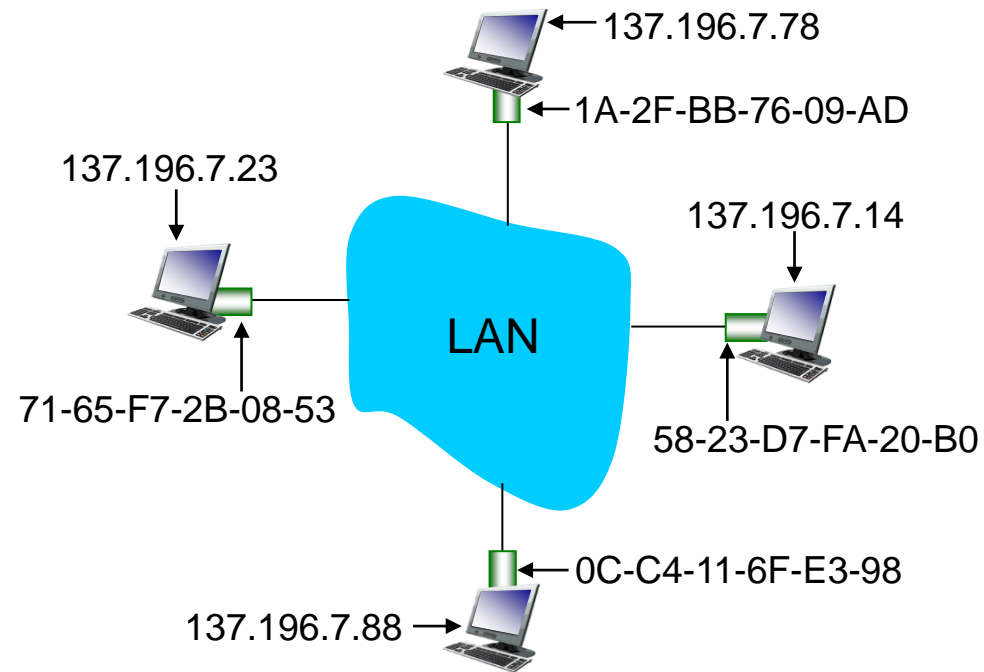
- Hosts und Router
- Nicht: Switches!

❑ 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 (Single Choice)

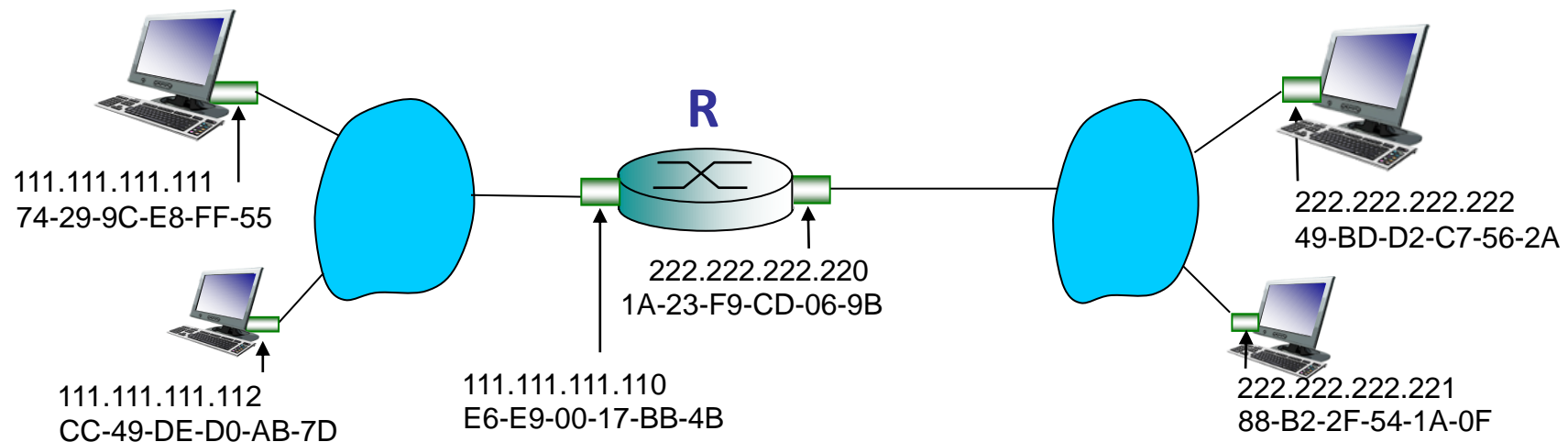
Welche Aussage ist **falsch**?

- A. Ein ARP Paket wird in einem Ethernet Frame verpackt.
- B. Hin und wieder 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.



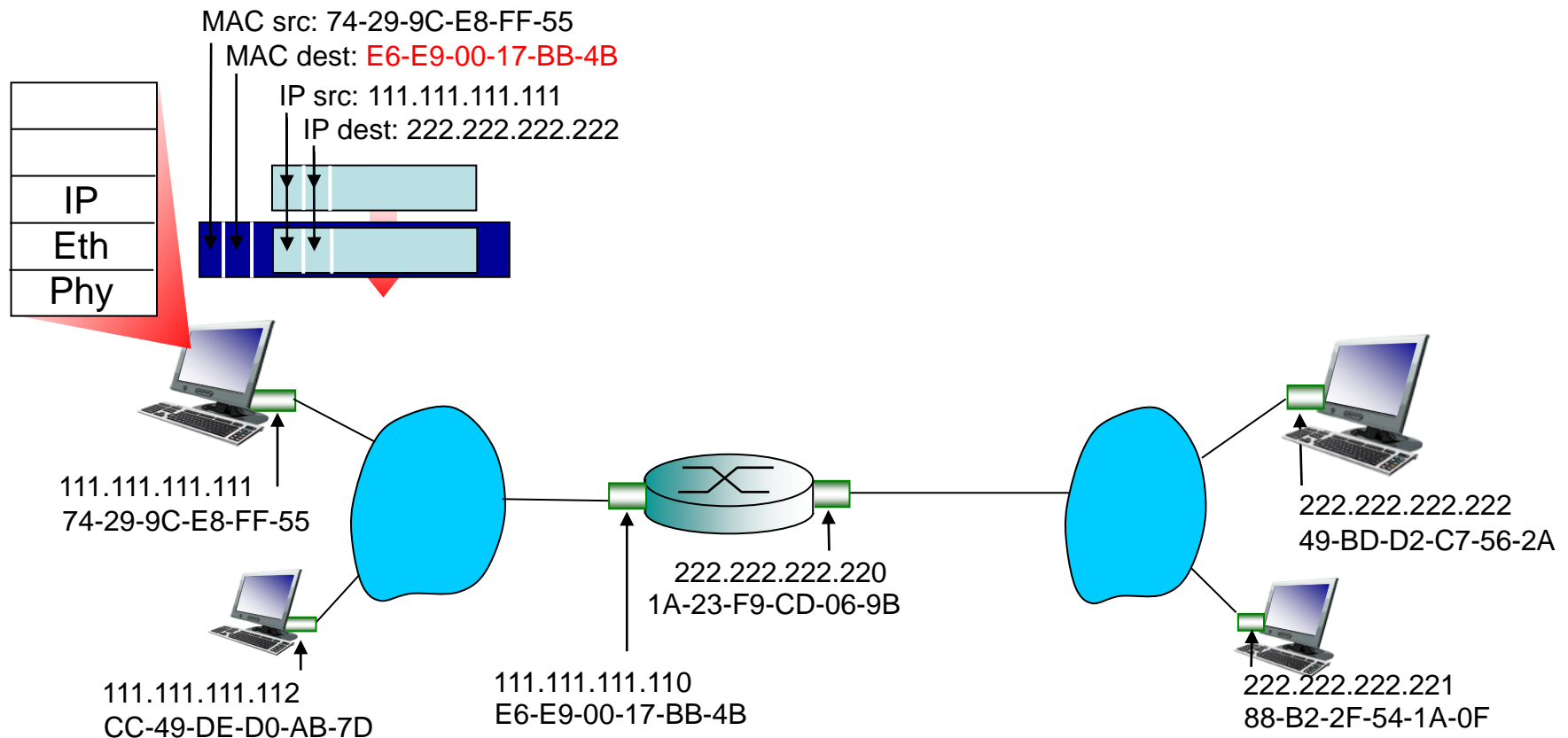
Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs (1)

- ❑ **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*



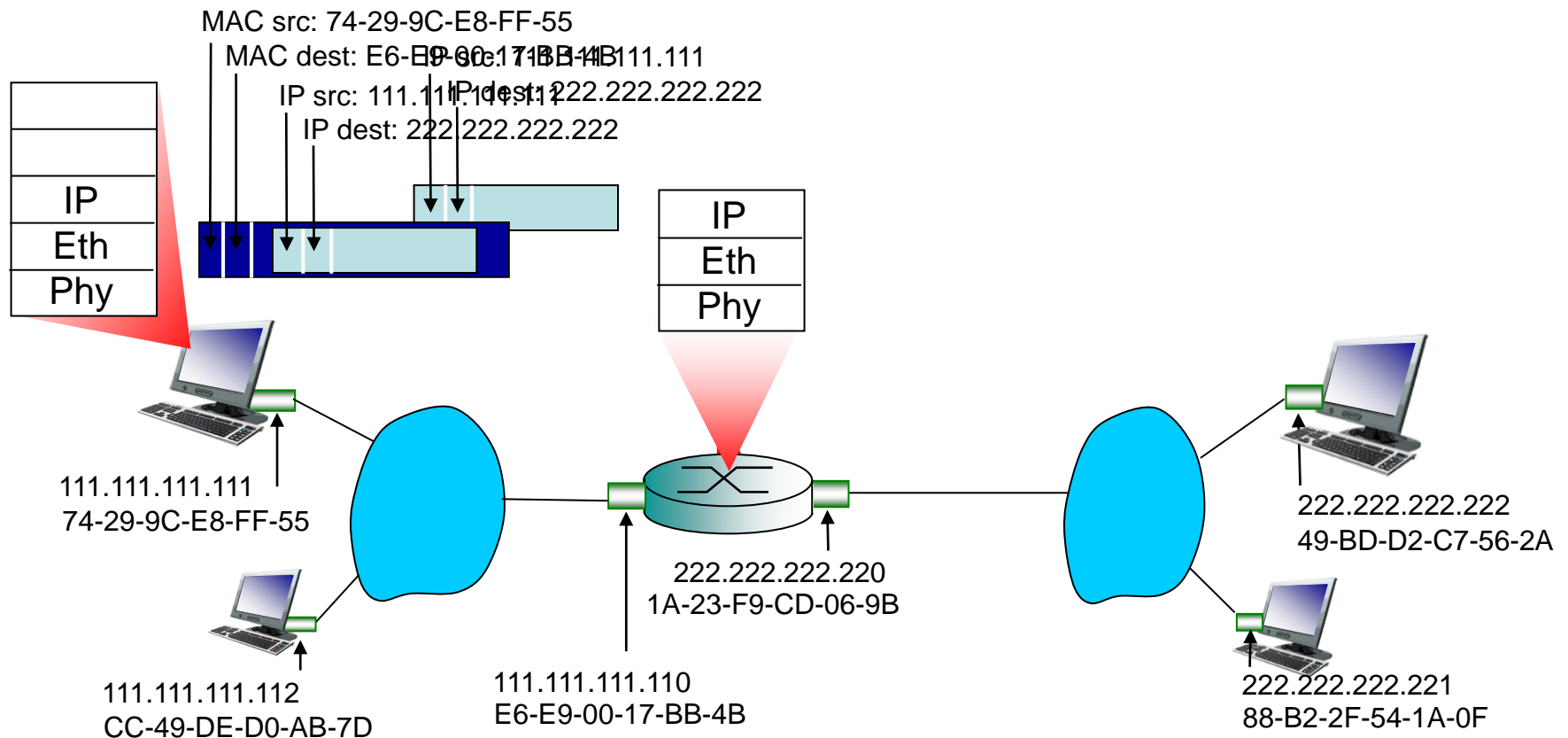
Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs (2)

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



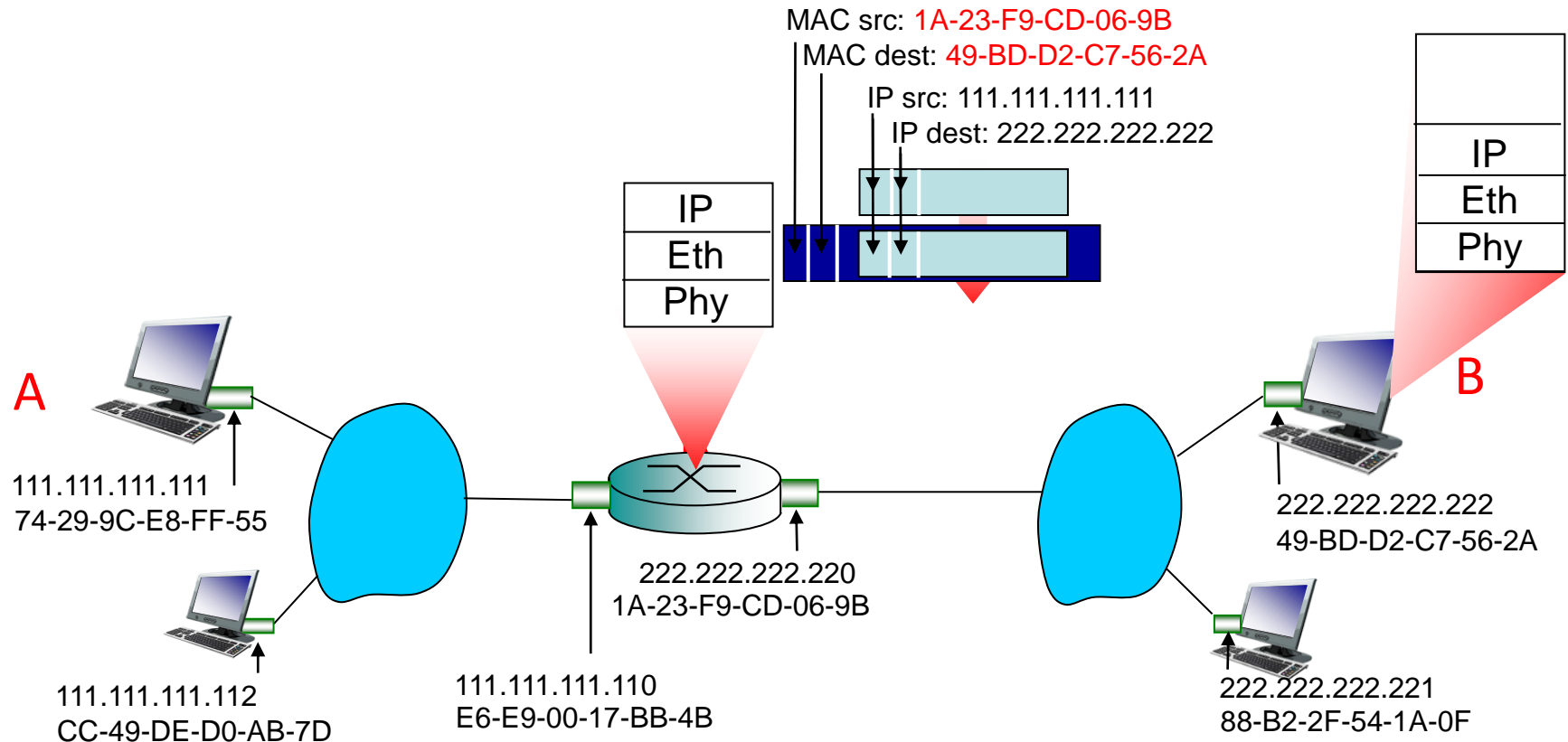
Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs (3)

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



Sender und Empfänger in unterschiedlichen LANs (4)

- 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
 - Unterschiede, Best-Effort Weiterleitung

- ❑ Internet Protocol IPv4
 - Adressen, Subnetze

- ❑ ARP, ICMP, DHCP
 - Wichtige Hilfsprotokolle