

Rechnernetze

Kapitel 5: Network Layer – Routing und IPv6

Prof. Dr. Wolfgang Mühlbauer

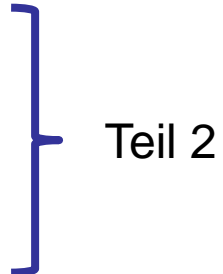
Fakultät für Informatik

`wolfgang.muehlbauer@th-rosenheim.de`

Wintersemester 2019/2020

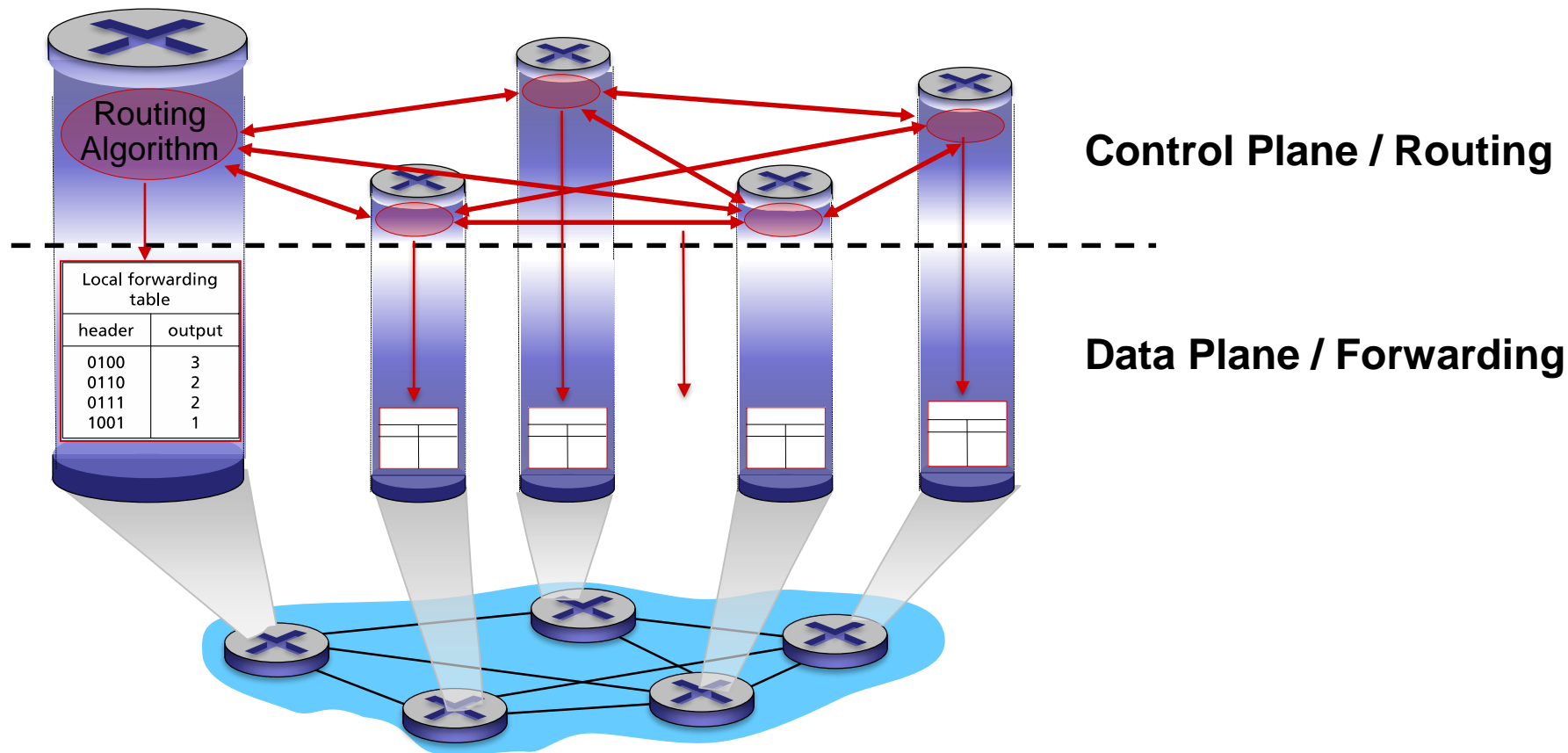
Slides are based on:

A. Tanenbaum, D. Wetherall: Computer Networks

- ❑ Forwarding
 - ❑ Funktionsweise eines Routers
 - ❑ Internet Protocol IPv4
 - ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP
 - ❑ **Routing**
 - ❑ IPv6
- 
- Teil 2

Forwarding vs. Routing

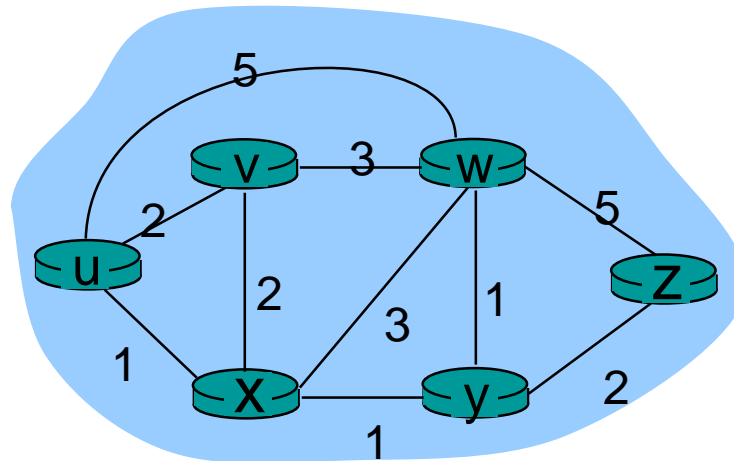
- ❑ **Routing** (dt. Wegewahl):
 - Berechnung der Routingtabelle für jeden Router
 - Dazu tauschen Router untereinander Kontrollnachrichten aus (= Routingprotokolle)
- ❑ **Forwarding**: Weiterleitung von Paketen zur Zieladresse mit **Longest Prefix Matching**



Abstraktion des Internets als Graph

□ Beispiel-Graph: $G = (V, E)$

- V = Menge der Router = $\{ u, v, w, x, y, z \}$
- E = Menge der Links = $\{ (u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z) \}$
- $c(x, x') = \text{Kosten}$ des Links (x, x') , z.B. $c(w, z) = 5$
- **Kosten des Pfads** $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$



Ziel: Berechne Pfad mit den minimalen Kosten zwischen 2 Routern

Klassifikation: Routing

□ Zentral oder dezentral?

○ *Link State*

- Topologie-Informationen werden geflutet. Jeder Router kennt **komplette** Topologie.
- Berechnung der kürzesten Wege: Algorithmus von *Dijkstra*
- Beispiel: Open Shortest Path First

○ *Distance Vector*

- Jeder Router kennt **nur direkte Nachbarn**.
- Die Nachbarn teilen mit, welche Knoten sie mit welchen Gesamtkosten erreichen können **aber nicht wie**.
- Berechnung der kürzesten Wege: Asynchroner *Bellman-Ford*
- Beispiel: Routing Information Protocol

□ Statisch oder dynamisch?

- **Statisch:** Manuelle Konfiguration der Forwardingtabelle (Übung07)
- **Dynamisch:** Periodischer Austausch von Routinginformation, Änderungen werden automatisch erkannt (Übung08)

Publikums-Joker: Routing

Sie verwenden in Ihrem LAN zuhause einen Laptop, der über einen Home-Router (FritzBox, Speedport) mit dem Internet verbunden ist. Welche der folgenden Aussagen ist **falsch**?

- A. Ihr Laptop hat eine (statische) Route zum Home Router. Die nötige Information erhält man durch DHCP.
- B. Der Home Router hat eine (statische) Route zum Provider. Die nötige Information wird über die Punkt-zu-Punkt Verbindung ausgetauscht (PPP bei DSL oder Kabel).
- C. In Ihrem LAN wird kein dynamisches Routing eingesetzt.
- D. Normalerweise lautet die Standardroute: 0.0.0.0/32



Link State (LS) vs. Distance Vector (DV)

□ Routingnachrichten

- **LS:** Jeder Router flutet Infos über seine Links im ganzen Netz.
- **DV:** Jeder Router informiert Nachbarn welche Ziele er mit welchen Kosten erreichen kann.

□ Konvergenz

- **LS:** Berechnung auf jedem Router hat Komplexität $O(|E|*|V|)$ falls binäre Heaps verwendet werden.
- **DV:** Konvergenzgeschwindigkeit abhängig von der Reihenfolge des Nachrichtenaustausches
 - Count-to-Infinity Problem

□ Robustheit: Was passiert, wenn ein einziger Router "böartig" ist.

- **LS:** Fehler begrenzt, da jeder Router seine eigene Tabelle berechnet. t
- **DV:** Fehler pflanzen sich fort, da Tabelle eines Routers Einfluss auf andere Router hat.

Hierarchisches Routing

- ❑ Warum kennt nicht jeder Router die alle Ziele?
- ❑ **Internet == Netz von Netzen**
 - *Administrative Unabhängigkeit* der einzelnen Netze
 - Jedes Netz möchte Routing für sein Netz selbst kontrollieren.
 - *Skalierbarkeit*
 - Nicht jeder Router muss alle Subnetze kennen.
 - Nicht jeder Router sieht alle Änderungen / Linkausfälle.
- ❑ **Lösung: Hierarchisches Routing**
 - Gruppiere Router in „**Autonome Systeme**“ (**AS**) (aka "domains")
 - Beispiel: Deutsche Telekom, Deutsches Forschungsnetz, ...
 - **Intradomain Routing**: Routing für Ziele im *gleichen* AS.
 - **Interdomain Routing**: Routing für Ziele in *anderen* ASen.

Interdomain und Intradomain Routing

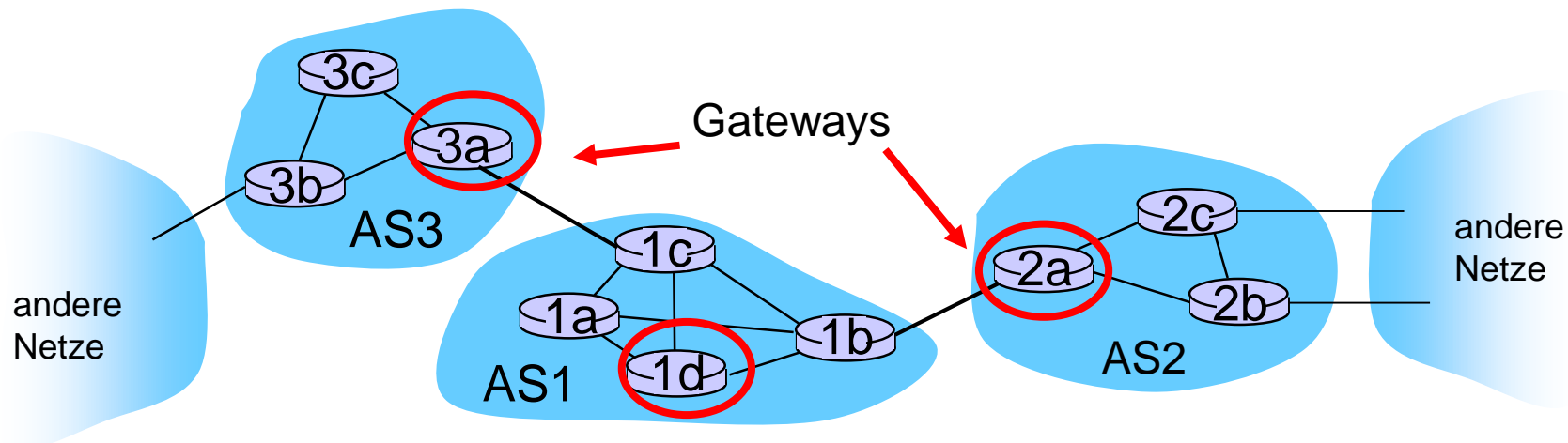
- ❑ Router 1d in AS1 empfängt Paket, das für anderes AS bestimmt ist.
- ❑ 1d muss Paket zu einem Gateway Router weiterleiten. Zu welchem?
 - 3a (in AS3)?
 - 2a (in AS2)?

❑ Interdomain Routing

- Bestimmt über welches „Transfer-AS“ das externe Ziel erreichbar ist.
- Hier AS3 (mit 3a) oder AS2 (mit 2a)

❑ Intradomain Routing

- Bestimmt, wie die Gateways zu den Nachbarnetzen aus dem lokalen Netz erreichbar sind.
- Beispiel: Router 1c informiert 1a, 1b und 1d, wie man Gateway 3a erreicht.



Routing in der Praxis

❑ **Intradomain** (aka *Interior Gateway Protocols*)

- **RIP**: Routing Information Protocol (RFC 2453)
- **OSPF** Open Shortest Path First (RFC 2328, etc.)
- **IGRP**: Interior Gateway Routing Protocol (Cisco-proprietär)

❑ **Interdomain** (aka *Exterior Gateway Protocols*)

- De-facto Standard: **BGP**: Border Gateway Protocol (RFC 4271, etc.)
- Wichtig sind *Routing Policies*
 - Jeder Router kann lokal bestimmen, was er bevorzugt und welche Routingnachrichten er weiterleitet.
 - Erlaubt es wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen.

Open Shortest Path First (OSPF)

□ Link State

- Infos über Nachbarrouter und –links werden durchs Netz geflutet.
- Jeder Router lernt so die komplette Topologie.
- Dann: Routenberechnung mit Dijkstra.

□ Router fluten *Link State Advertisement* Nachrichten an alle anderen Router im **gesamten** AS

- OSPF Advertisements werden direkt über IP (kein TCP oder UDP) gesendet.
- Enthalten „Link State“ für jeden benachbarten Link.

□ **Weitere Merkmale**

- Authentifizierung der OSPF Nachbarn.
- Linkgewichte sind konfigurierbar (nicht zwingend 1!)
- Lastverteilung möglich falls mehrere Pfade mit gleichen Kosten
- Hierarchisches OSPF für große Netze

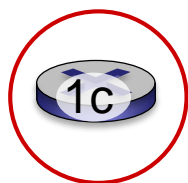
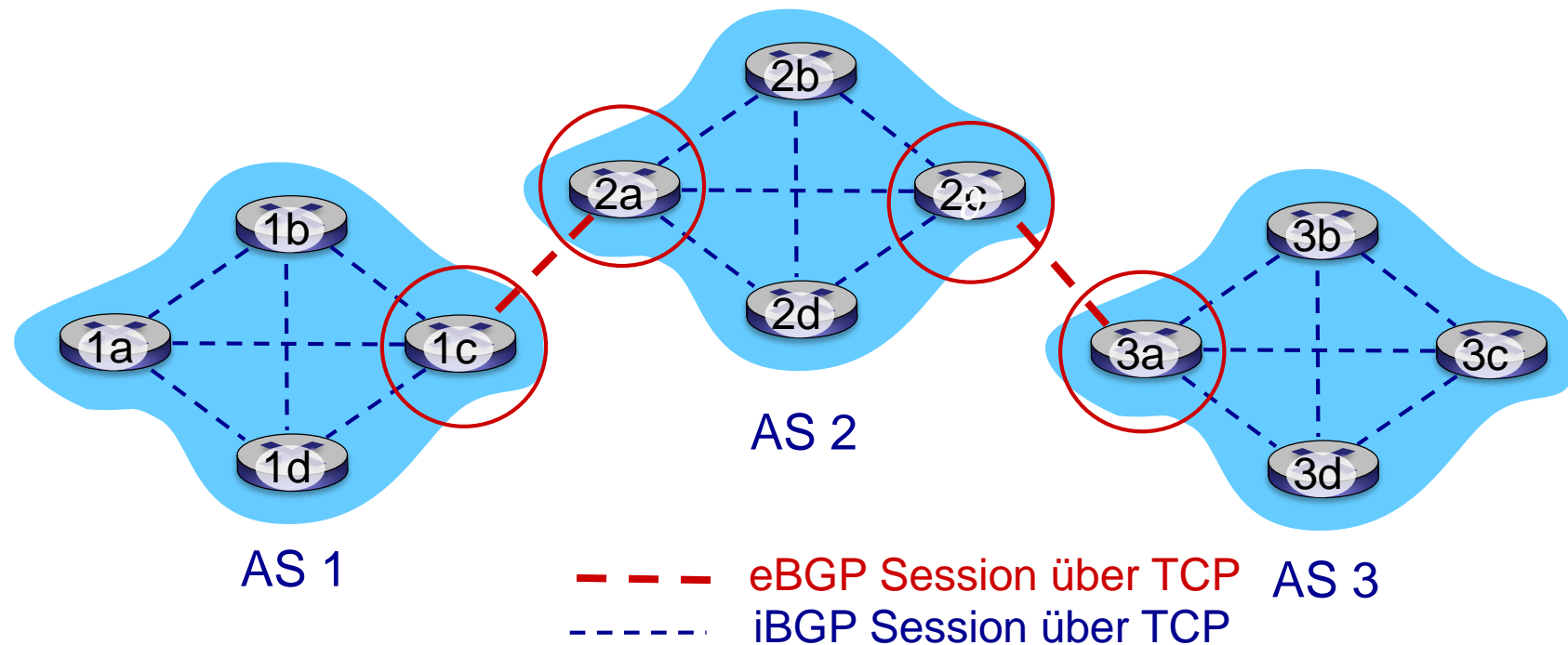
BGP: Border Gateway Protocol

- ❑ Teile dem Rest der Welt (=Internet) die Existenz eines IP Präfix mit.
- ❑ **BGP Session**
 - TCP Session zwischen 2 BGP Router (die miteinander sprechen wollen).
 - Router teilt Nachbarn mit, welche Ziele (= IP Präfixe) er kennt.
 - *Beispiel:* AS 3 kündigt gegenüber AS 1 an, dass es weiß wie man ein Ziel Präfix (100.200.300.0/24) erreicht. Es garantiert damit implizit, dass es Pakete zu diesem IP-Präfix auch weiterleitet.
- ❑ **2 Varianten:**
 - **eBGP:** Zwischen Routern benachbarter ASe.
 - **iBGP:** Zwischen Routern, die zum gleichen AS, gehören.
- ❑ Bestimme gute Wege basierend auf *Erreichbarkeit* und *Routing-Policies*, die jedes AS selbst festlegen kann.

eBGP und iBGP Verbindungen

AS 3 kündigt AS 2 einen IP Präfix an.

AS 3 verspricht damit, dass es Datagramme zu diesem Präfix weiterleitet



Gateway Router sprechen sowohl eBGP als auch iBGP

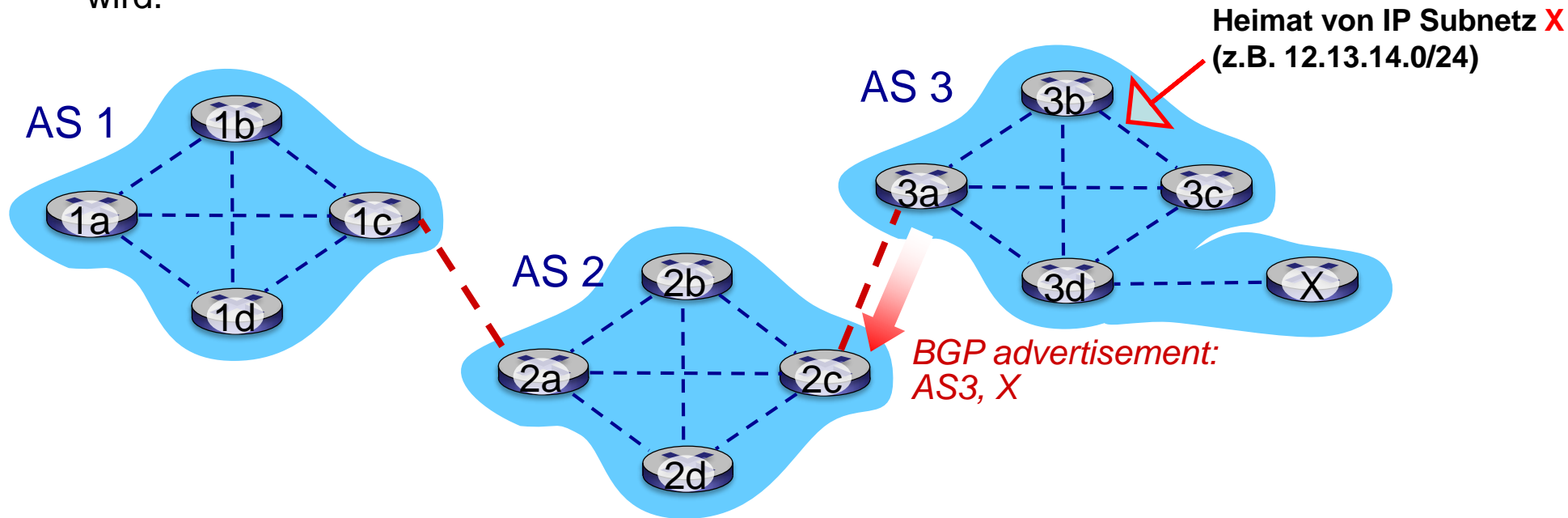
BGP Grundlagen

□ **BGP Session**

- Austausch von Erreichbarkeitsinformation (== IP Präfix)
- BGP ist ein "Pfad Vector Protocol"!

□ **Beispiel**

- Gateway 3a von AS 3 kündigt AS-Pfad "AS 3" zum IP-Präfix X dem Gateway 2c von AS 2 an.
- AS 3 verspricht damit implizit an AS 2, dass es IP Pakete zum IP-Präfix X weiterleiten wird.



Pfadattribute und BGP Routen

❑ **BGP Route**

- Besteht aus IP Präfix UND BGP Attribute

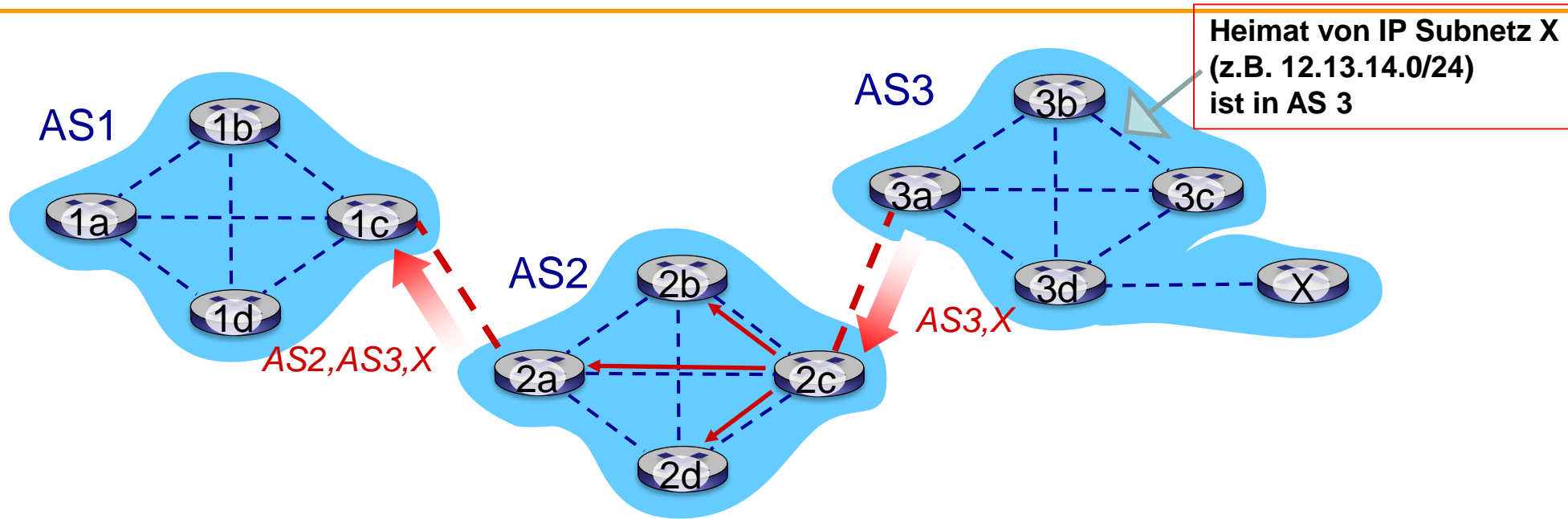
❑ 2 wichtige **BGP Attribute**

- **AS-PATH**: Liste von ASen, durch die das Prefix Advertisement gelaufen ist.
- **NEXT-HOP**: IP Adresse des Gateway Routers.

❑ **Policy-based Routing**

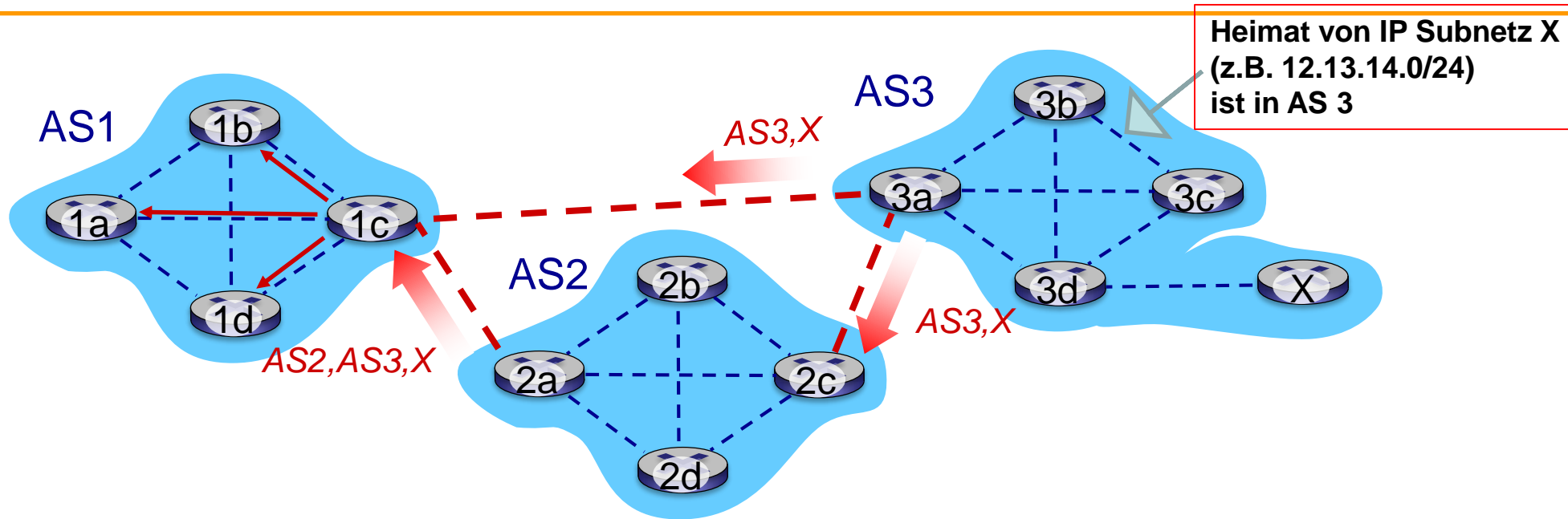
- BGP Router verwendet Import-Policies um einen Pfad zu akzeptieren oder abzulehnen.
- *Beispiel 1*: „Ignoriere Pfade durch AS Y“.
- *Beispiel 2*: „Gib Routinginfo nicht an Nachbarn AS X weiter“.

Ankündigung von BGP Pfaden



- ❑ Router 2c empfängt Advertisement **AS3,X** über eBGP
- ❑ **Import**
 - Policies von AS 2 erlauben, dass Router 2c diesen Pfad akzeptiert und ihn (über iBGP) an alle anderen Router im AS 2 weitergibt.
- ❑ **Export**
 - Policies von AS 2 erlauben, dass Router 2a (über eBGP) **Pfad AS2, AS3, X** an das Gateway 1c von AS1 weitergibt.

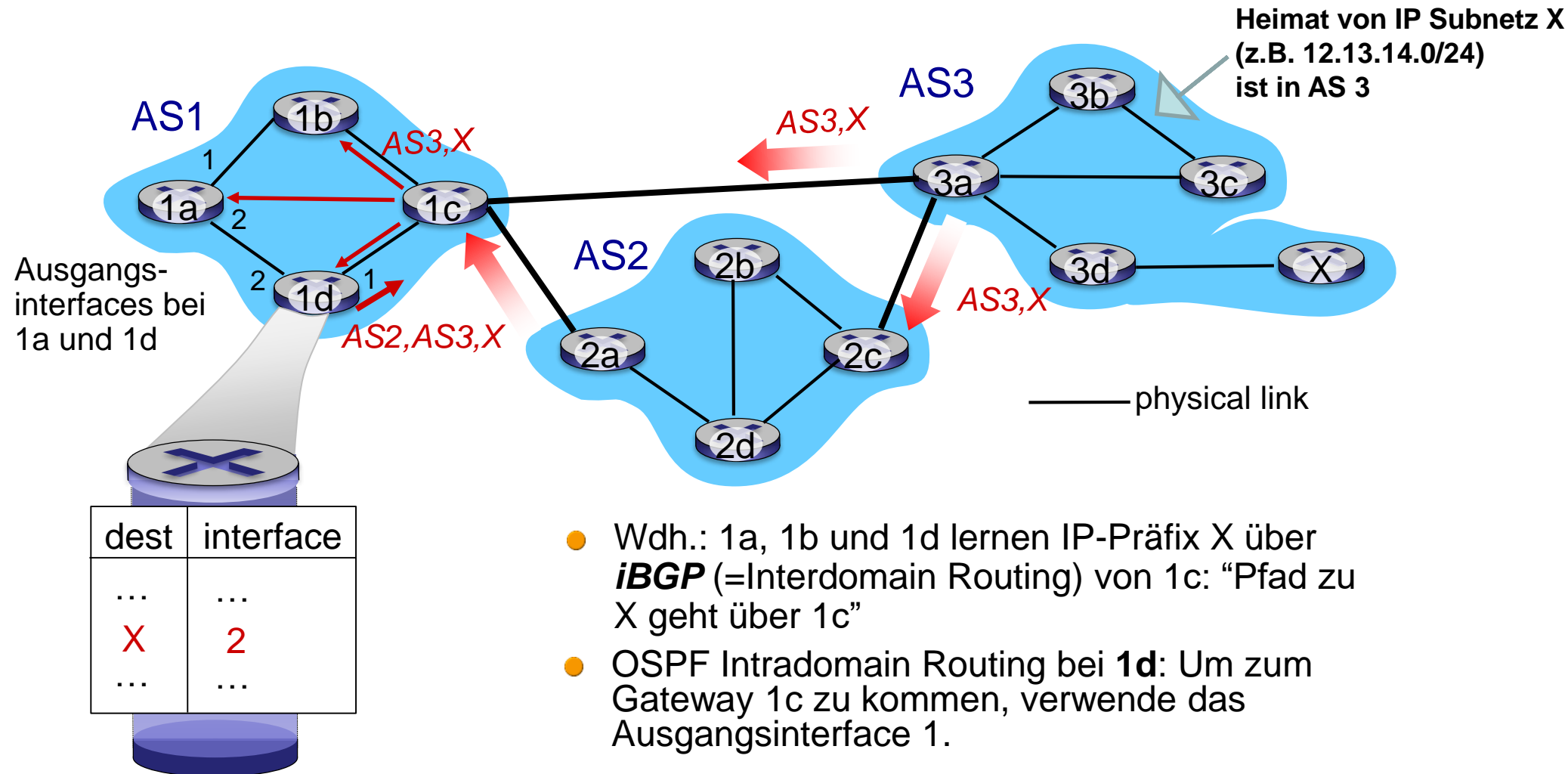
Ankündigung von BGP Pfaden: Mehrere Pfade



- Ein Gateway Router kann mehrere Pfade zum gleichen Ziel IP Präfix X lernen.
- Beispiel: Gateway Router 1c lernt
 - Pfad **AS2, AS3, X** von 2a
 - Pfad **AS3, X** von 3a
- Aufgrund der konfigurierten Policy (Annahme hier: "wähle immer kürzeren AS-Pfad") entscheidet sich Router 1c für Pfad **AS3, X** und kündigt nur diesen Pfad über iBGP intern im AS an.

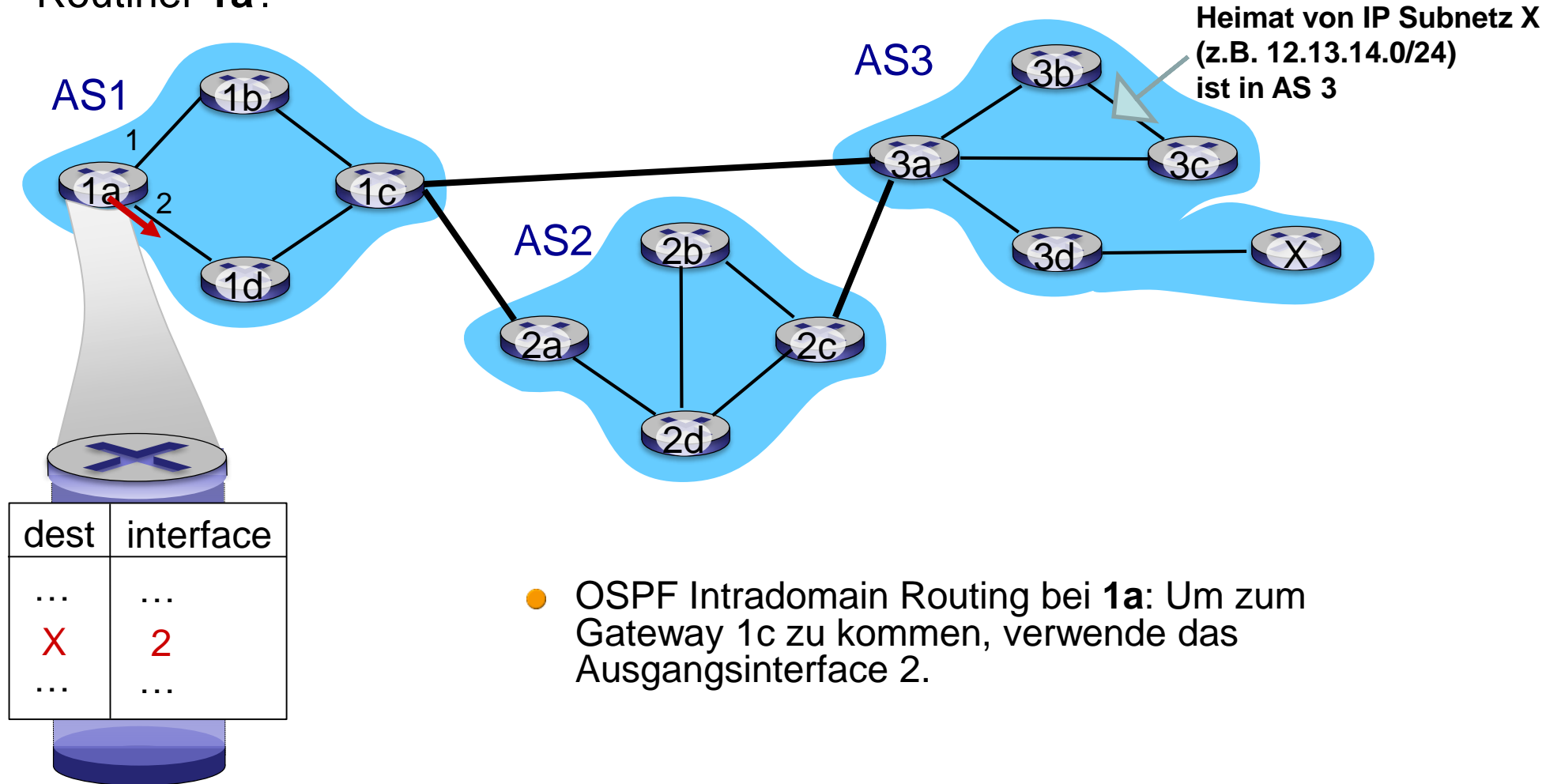
BGP, OSPF, Einträge in Routingtabellen

- Wie kommt ein Eintrag für den entfernten IP Präfix X in die Routingtabelle von Router **1d**?



BGP, OSPF, Einträge in Routingtabellen

- Wie kommt ein Eintrag für den entfernten IP Präfix X in die Routingtabelle von Router 1a?



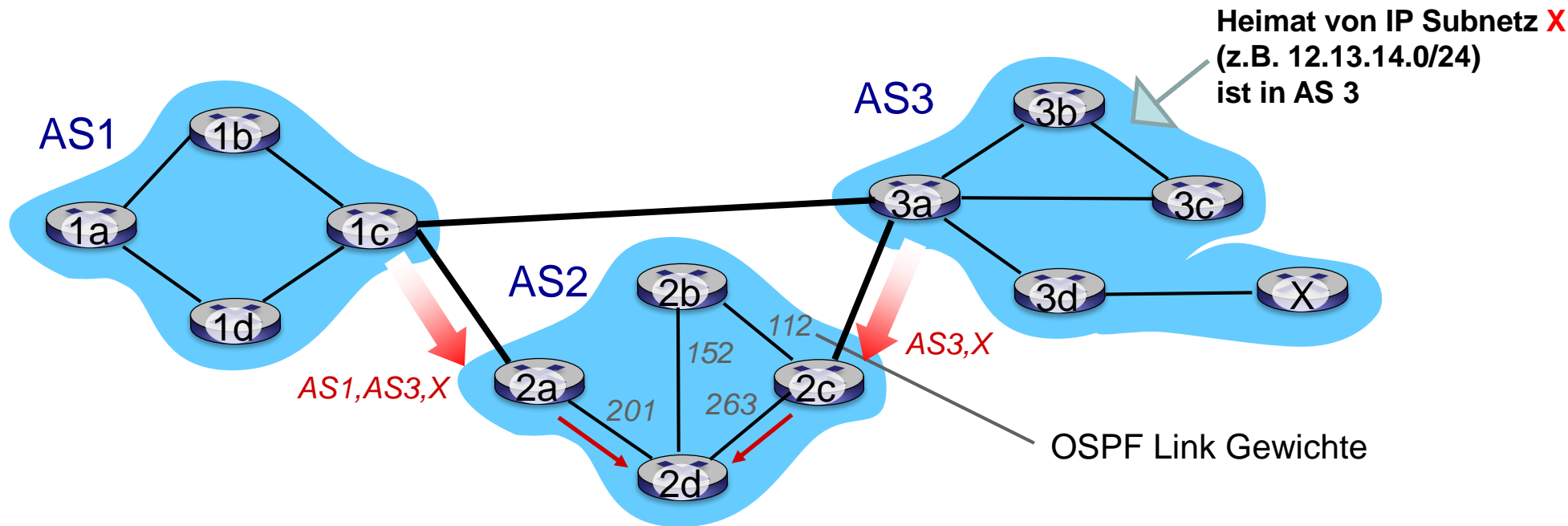
- OSPF Intradomain Routing bei 1a: Um zum Gateway 1c zu kommen, verwende das Ausgangsinterface 2.

Auswahl der besten BGP Route

- ❑ Ein Router kann **mehrere alternative Routen** für einen Ziel-Präfix lernen.

- ❑ Die beste BGP Route wird nach **folgenden Kriterien** gewählt (**Reihenfolge** spielt eine Rolle)
 - 1) **Local Preference**
 - Bsp: Jeder AS-Administrator kann Routen, die er von einem bestimmten Nachbar-AS lernt bevorzugen → Zuweisung von Prioritäten bei Import!
 - 2) **Kürzester AS Pfad**
 - Route, bei der man am wenigsten ASen durchqueren muss.
 - 3) **Route mit dem am schnellsten erreichbaren Next-Hop (=Gateway)**
 - Hot-Potato Routing
 - siehe nächste Folie
 - 4) Weitere Kriterien

Hot Potato Routing

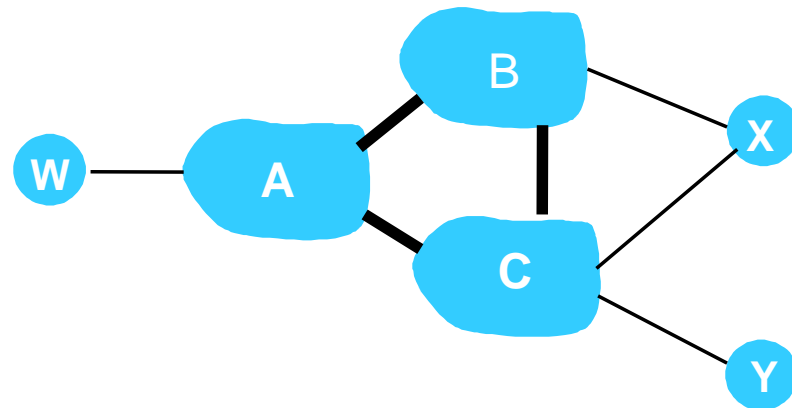


- ❑ 2d lernt über iBGP dass es X über 2a oder 2c erreichen kann.

- ❑ **Hot-Potato Routing**

- "Jedes Netz möchte Pakete so schnell wie möglich aus eigenem AS/Netz loswerden."
- Wähle lokales Gateway mit den geringsten Intradomain-Kosten
- Hier: 2d wählt 2a, obwohl dann der AS-Pfad länger ist.

Inter-AS Routing: Policies

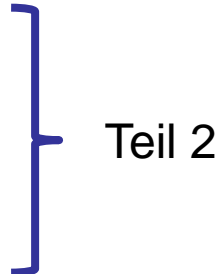


Legende

 Provider
(großes Netz)

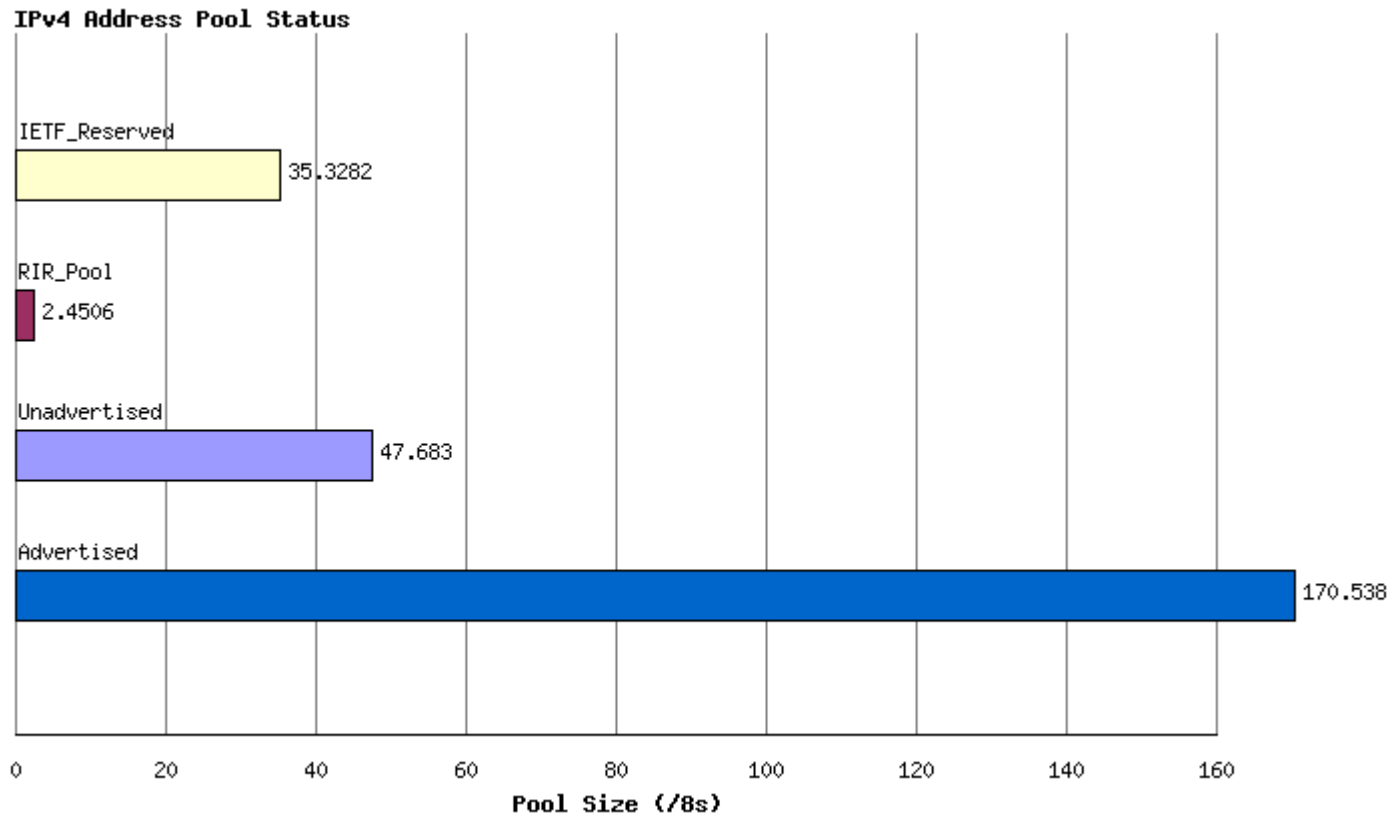
 Kunde
(kleines Netz)

- ❑ A, B, C sind Provider und X, W, Y sind Kunden der Provider
 - Provider verlangen Geld abhängig von der Datenmenge zu den Kunden.
- ❑ Dual-Homing:
 - Kunde kann mit 2 Providern verbunden sein (z.B. X)
- ❑ Soll X per Routingprotokoll B sagen, dass es C erreichen kann?
 - Nein $\rightarrow X$ möchte keinen Transitverkehr von B zu C weiterleiten

- ❑ Forwarding
 - ❑ Funktionsweise eines Routers
 - ❑ Internet Protocol IPv4
 - ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP
 - ❑ Routing
 - ❑ IPv6
- 
- Teil 2

IPv4 Adressen sind knapp!

- ❑ So gut wie keine freien IPv4 Adressen mehr!
- ❑ Es gibt jedoch Adressbereiche, die vergeben wurde, aber (noch) nicht in öffentlichen Routingtabellen angekündigt werden.



Quelle:
<http://www.potaroo.net/tools/ipv4/>
(abgerufen am
25.05.2018)

Ziele bei der Entwicklung von IPv6

- ❑ Unterstützung sehr, sehr vieler Hosts!
- ❑ Kleine, kompakte Routingtabellen
- ❑ Vereinfachung des Protokolls, z.B. schnelle Verarbeitung
- ❑ Flexibilität: Erlaube zukünftige Erweiterungen.
- ❑ Migration und Koexistenz von IPv4 und IPv6 während des Übergangs.
- ❑ Bessere Unterstützung von Multicasting, Mobilität, Quality of Service (QoS)

IPv6 Header Format

❑ Diff.Server

- "Priorität" des Pakets oder Flows

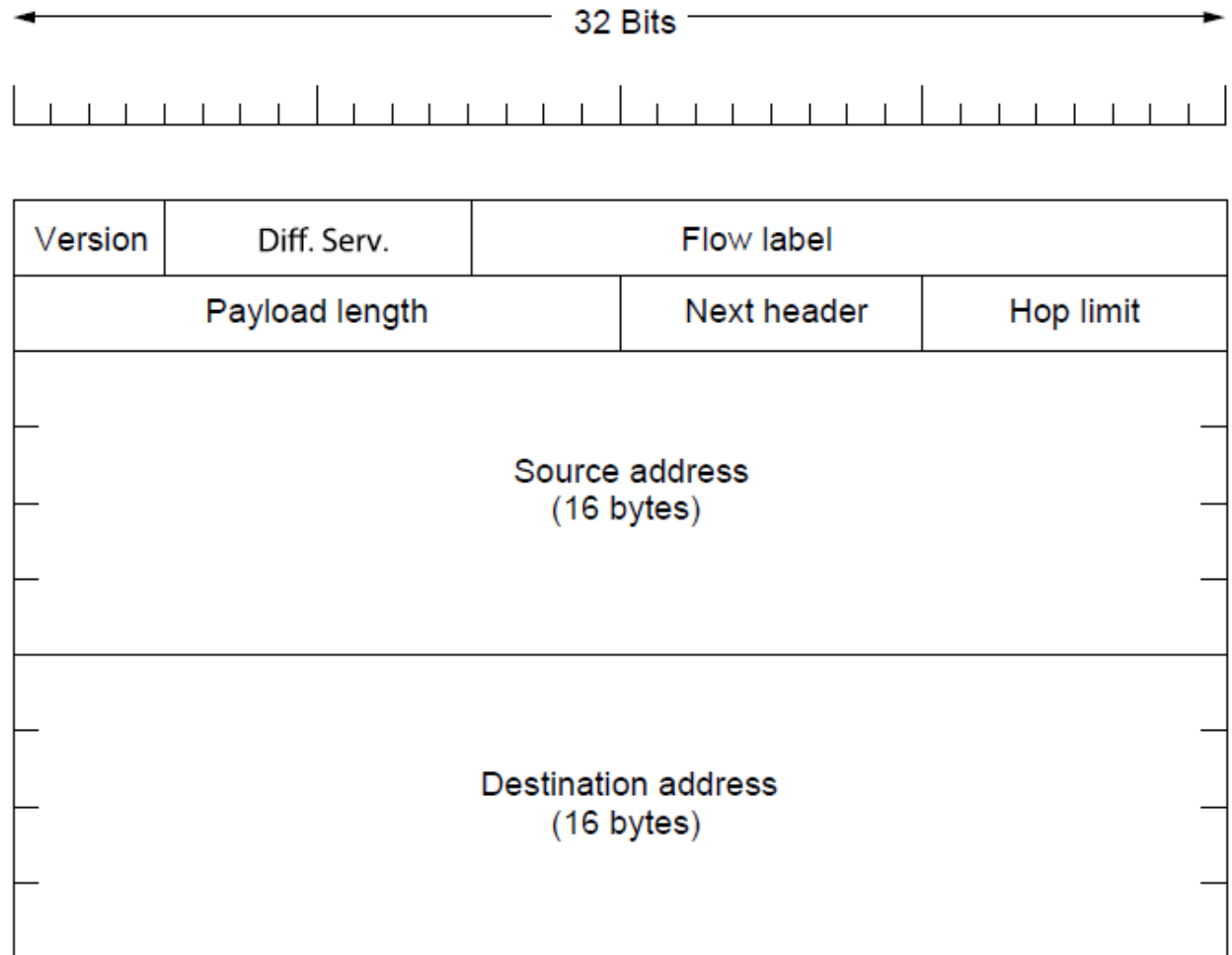
❑ Flow Label

- Pakete mit gleichem Label bilden eine Gruppe (= Flow)
- Sollten gleich behandelt werden.
- Selten verwendet.

❑ Next Header

- Gibt an ob Extension Header folgt oder welches Transport Layer Protocol (TCP/UDP)
- Mehrere Extension Header möglich; jeder Header verweist auf den nächsten ("Kette")

❑ Hop Limit = TTL



Publikums-Joker: IPv6

Welche der folgenden Aussagen ist **falsch**?

- A. Ein IPv6 Paket hat weniger Header Felder als ein IPv4 Paket.
- B. Ein IPv6 Paket mit gleicher Payload ist immer größer als ein IPv4 Paket.
- C. Der IPv6 Header sieht die Fragmentierung eines IPv6 Pakets vor.
- D. Der IPv6 Header enthält im Gegensatz zum IPv4 Header keine Checksumme.



IPv6 Adressen: Notation

❑ Volle Schreibweise

- 128 Bit werden in 8 Blöcke zu je 16 Bit (4 Hexadezimalstellen) unterteilt
- Blöcke werden durch „:“ getrennt
- Beispiel
 - 2001:0db8:85a3:08d3:1319:8a2e:0370:7344

❑ Abgekürzte Schreibweise

- Führende Nullen können weggelassen werden
 - 2001:db8:85a3:8d3:1319:8a2e:370:7344
- Nur einmal (!) dürfen ein oder mehr aufeinanderfolgende Blöcke mit dem Wert 0000 ausgelassen werden und durch :: ersetzt werden
 - 2001:0db8:0:0:0:0:1428:57ab wird zu 2001:db8::1428:57ab
- IPv4 Adressen können wie folgt geschrieben werden:
 - ::192.31.20.46

❑ URL Notation von IPv6 Adressen mit eckigen Klammern

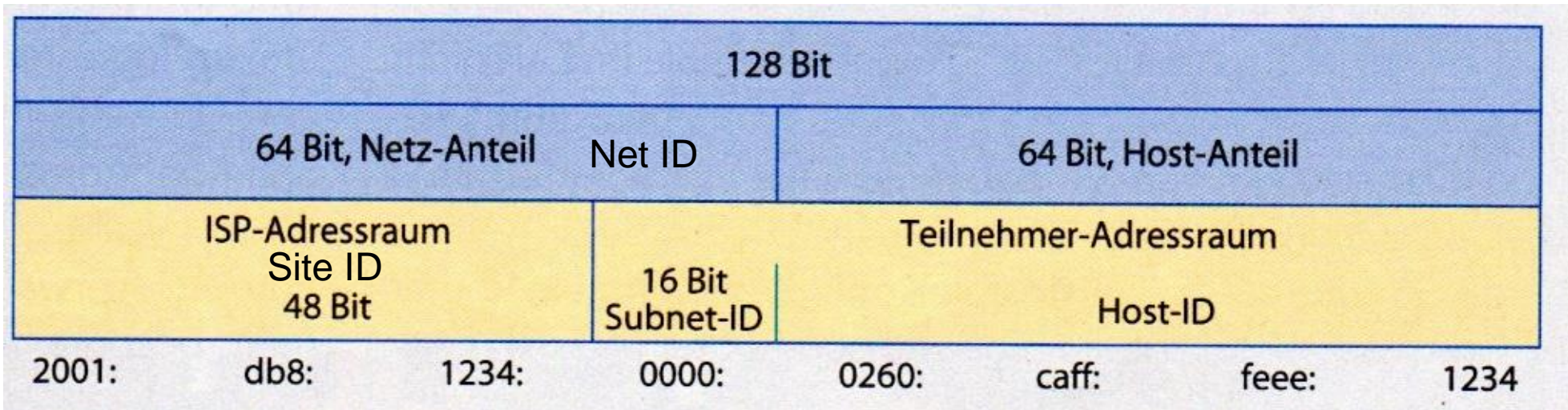
- `http://[2001:0db8:85a3:08d3:1319:8a2e:0370:7344]:8080/`

❑ Adressbereiche


- ::1/128 Loopback
- 2000::/3 Global Unicast: Global erreichbare Adressen
- FE80::/10 Link-Local: Nur im lokalen Subnetz gültig

IPv6 Adressen

- ❑ Longest Prefix Matching wie bei IPv4!
- ❑ Netz- und Host-Anteil
 - Host-ID: Praktisch immer genau 64 Bit (rechter Teil)
 - Es gibt also praktisch keine /80 Subnetze
- ❑ Praxis:
 - *Site-ID*: ISP weist Privatkunden z.B. /48 or /56 IP Präfix zu.
 - *Subnet-ID*: Jeder hat 8 or 16 Bits (subnet-ID) um sein eigenes Netz in weitere Subnetze zu unterteilen.
 - *Host-ID*: 64 Bit.



Wie viele Subnetze kann man hier bilden?



FRITZ!Box 6490 Cable

Internet > Online-Monitor

[Online-Monitor](#)[Online-Zähler](#)

Der Online-Monitor stellt Informationen zu Ihrer Internetverbindung und zu aktivierten Zusatzfunktionen zur Verfügung.

Kabel	• verbunden, ↓ 34 Mbit/s↑ 2,1 Mbit/s
Internet, IPv4	• FRITZ!Box verwendet einen DS-Lite-Tunnel, AFTR-Gateway: 2a02:8100:c0:40b::a:2:af72
Internet, IPv6	• verbunden seit 28.03.2019, 09:35 Uhr, IPv6-Adresse: 2a02:810d::26:e54c:7a14:c040:8475, Gültigkeit: 4373/1673s, IPv6-Präfix: 2a02:810d:1300:ae8::/62, Gültigkeit: 4373/1673s
Genutzte DNS-Server	2a02:8100:c0:2b1::4:1101 (aktuell genutzt für Standardanfragen) 2a02:8100:c0:2b9::4:1101

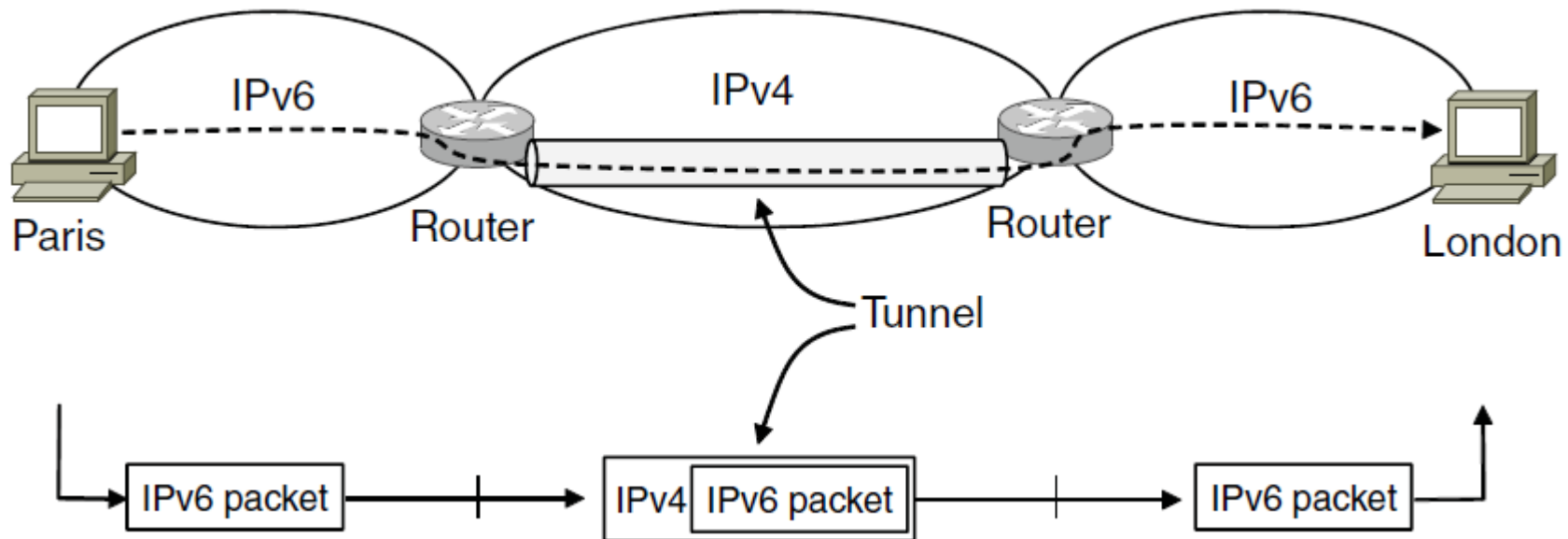
- Übersicht
- Internet
 - Online-Monitor
 - Zugangsart
 - Filter
 - Freigaben
 - MyFRITZ!-Konto

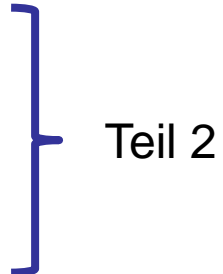
Weitere Unterschiede zu IPv4

- ❑ Keine Fragmentierung
 - Router informiert Sender per ICMPv6, dass Nachricht zu groß.
- ❑ Jeder IPv6 Host verfügt automatisch über eine Link-Local IPv6 Adresse
 - Z.B. abgeleitet von der MAC Adresse
 - Nur im lokalen LAN gültig.
- ❑ Kein ARP
 - Wird über anderes Protokoll ("Neighbor Discovery") implementiert
- ❑ Stateless Autoconfiguration
 - Stateless DHCP Server Teil des IPv6 Standards
 - Es gibt aber auch DHCPv6
- ❑ ...
- ❑ Details: siehe „Vertiefung Rechnernetze" (Master)

Migration: Tunneling

- ❑ Tunnel: IPv6 Datagramm wird in den Nutzdaten eines IPv4 Paketes transportiert, falls IPv4-Legacy Leitung passiert werden muss.
- ❑ **Dual-Homed:** Die Geräte an den Tunnelenden müssen sowohl IPv4 als auch IPv6 sprechen



- ❑ Forwarding
 - ❑ Funktionsweise eines Routers
 - ❑ Internet Protocol IPv4
 - ❑ Hilfsprotokolle: ARP, ICMP, DHCP
 - ❑ Routing
 - ❑ IPv6
- 
- Teil 2