Rechnernetze I

SoSe 2025

Roland Wismüller
Universität Siegen
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 5. Juni 2025

Rechnernetze I

SoSe 2025

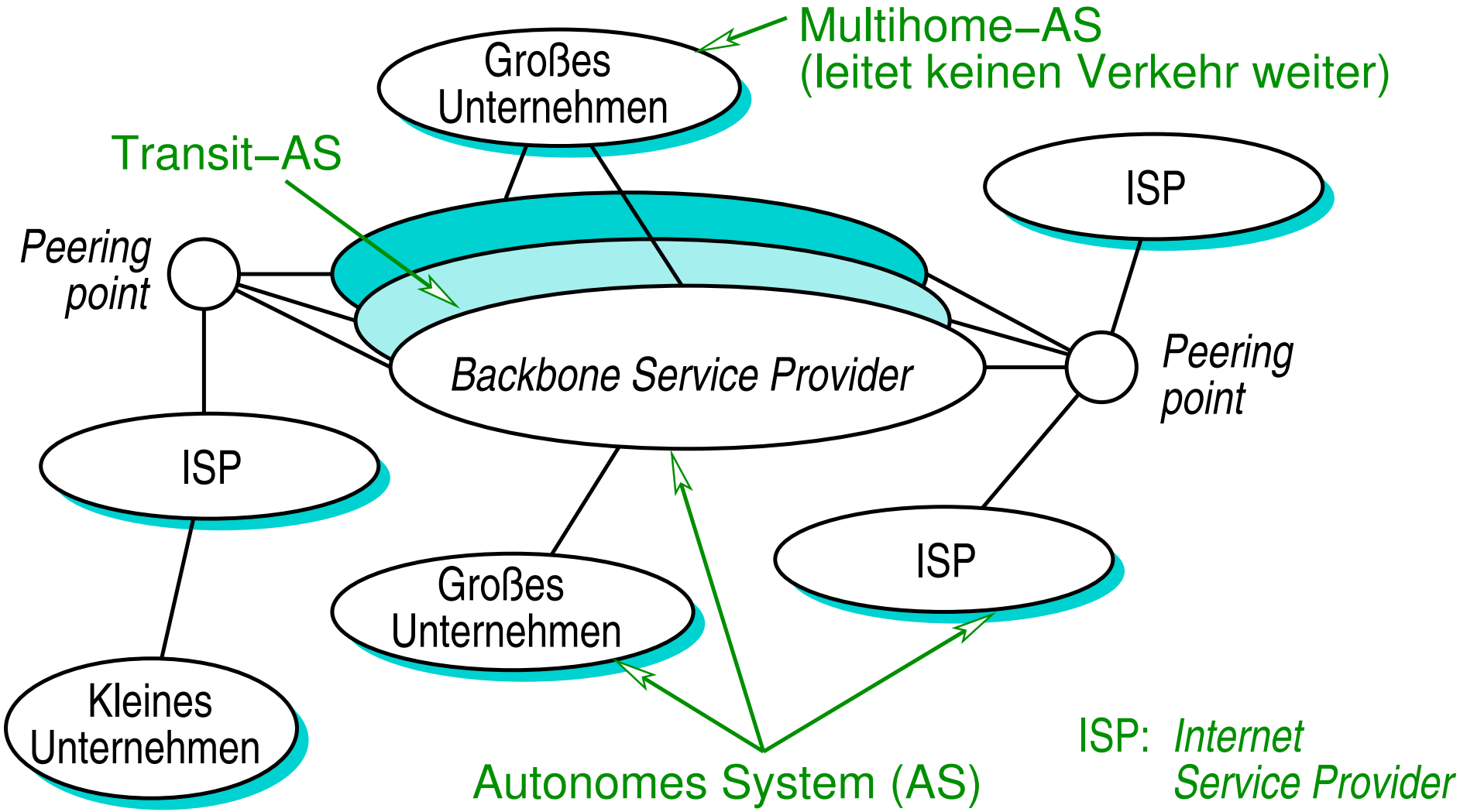
6 Routing

Inhalt

- Einführung
- Routing innerhalb einer Domain
  - *Distance Vector Routing* (RIP, EIGRP)
  - *Link State Routing* (OSPF)
- Interdomain-Routing
  - *Border Gateway Protocol* (BGP)

- Peterson, Kap. 4.2.1 – 4.2.4

Heutige Struktur des Internet



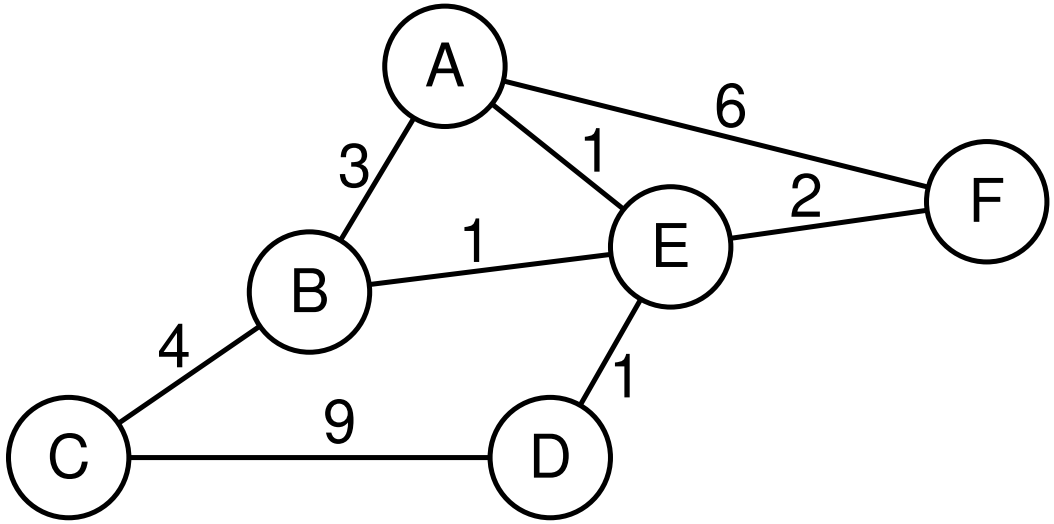
Routing im Internet

- Heute über 77.000 autonome Systeme (AS)
  - Backbones, Provider, Endbenutzer
  - Netzwerk-Adressen werden an AS zugewiesen
- Probleme: Skalierbarkeit, heterogene Administration
- Hierarchischer Ansatz: ***Routing Domains***
  - Routing innerhalb eines administrativen Bereichs (z.B. Campus, Unternehmen, Provider)
    - *Interior Gateway Protocols* (IGP)
      - z.B. RIP, OSPF, EIGRP
  - Interdomain Routing (zwischen Teilnetzen des Internet)
    - *Exterior Gateway Protocols* (EGP)
      - z.B. BGP (*Border Gateway Protocol*)

★★

Routing als Graph-Problem

- Knoten:
  - Router
  - (Hosts)
  - (Netzwerke)
- Kanten: Verbindungen
  - mit Kosten (Metrik)
    (symmetrisch oder asymmetrisch)



- Aufgabe des Routings:
  - finde Pfade mit geringsten Kosten zwischen allen Paaren von Knoten

6.2 Routing innerhalb eines Bereichs ...

Statisches Routing

- Pfade werden manuell bestimmt und in Tabellen eingetragen
- Probleme:
  - Ausfall von Knoten / Verbindungen
  - neue Knoten / Verbindungen
  - dynamische Änderung der Verbindungskosten (Last)

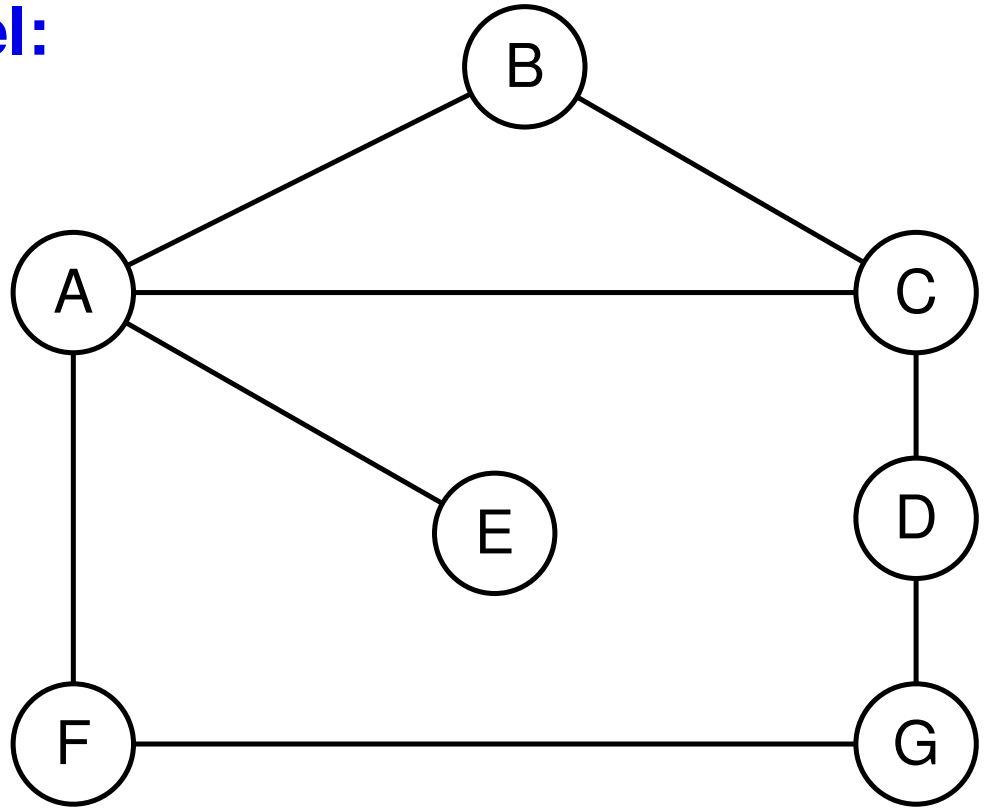
Dynamisches Routing

- Verteilte Algorithmen zum Aufbau der Tabellen
- Anforderungen:
  - schnelle Konvergenz / Skalierbarkeit
  - einfache Administration

6.2.1 *Distance Vector Routing*

- Router kennen nur Distanz und „Richtung“ (*Next Hop*) zum Ziel
  - nur diese Informationen werden (mit Nachbarn) ausgetauscht
- Verteilter Algorithmus zur Erstellung der Routing-Tabellen
  - typisch: Bellman-Ford-Algorithmus

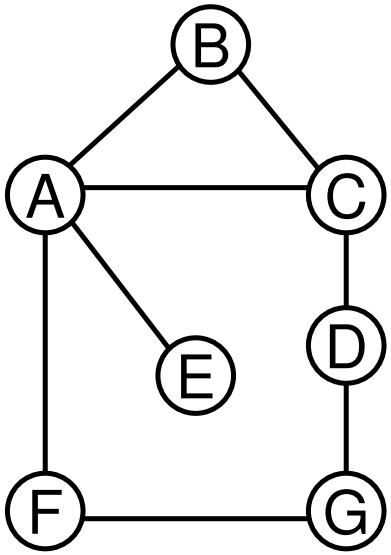
Beispiel:



Vereinfachung:
alle Link–Kosten
seien 1

Beispiel: ...

- Initial besitzen die Router Information über die folgenden Distanzvektoren (verteilt!)



	Distanz zu Knoten						
Information bei	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	∞	1	1	∞
B	1	0	1	∞	∞	∞	∞
C	1	1	0	1	∞	∞	∞
D	∞	∞	1	0	∞	∞	1
E	1	∞	∞	∞	0	∞	∞
F	1	∞	∞	∞	∞	0	1
G	∞	∞	∞	1	∞	1	0

Beispiel: ...

- Initiale Routing-Tabelle von A:
  - A kennt nur seine direkten Nachbarn

Ziel	Kosten	NextHop
B	1	B
C	1	C
E	1	E
F	1	F

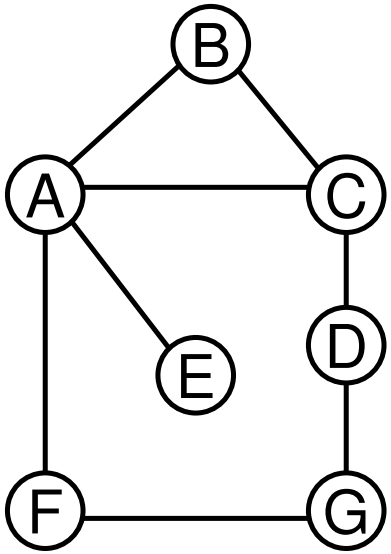
★★★

Vorgehensweise

- Nachrichtenaustausch zur Erstellung der Routing-Tabellen:
  - Router senden ihren Distanzvektor an alle direkten Nachbarn
  - bessere Routen werden in den eigenen Distanzvektor (und die Routing-Tabelle) übernommen
    - aber auch schlechtere vom Next Hop
- Nach mehreren Runden des Nachrichtenaustauschs konvergieren die Distanzvektoren ... jedenfalls meistens !!
- Der Nachrichtenaustausch erfolgt
  - periodisch (typ. alle 30 s)
  - bei Änderung des Distanzvektors eines Knotens
    - z.B. Ausfall einer Verbindung, neue Verbindung
  - auf Anfrage (z.B. bei Neustart eines Routers)

Beispiel ...

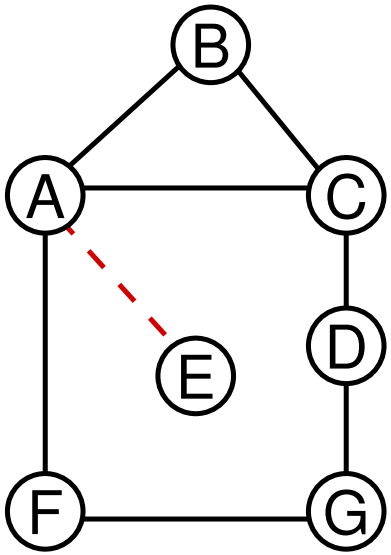
➥ Distanzvektoren nach dem Konvergieren des Verfahrens:



	Distanz zu Knoten						
Information bei	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	2	1	1	2
B	1	0	1	2	2	2	3
C	1	1	0	1	2	2	2
D	2	2	1	0	3	2	1
E	1	2	2	3	0	2	3
F	1	2	2	2	2	0	1
G	2	3	2	1	3	1	0

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:

A: $(\infty,-)$

B: (2,A)

C: (2,A)

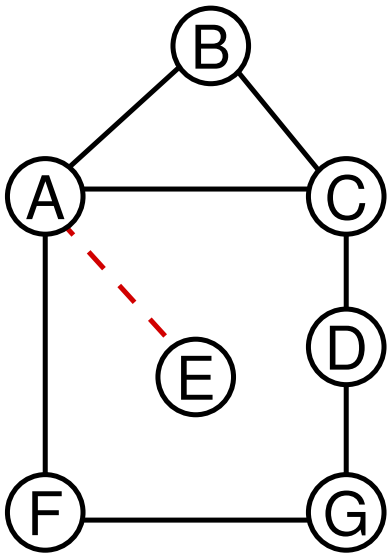
Distanz zu E Next Hop

Zeit →

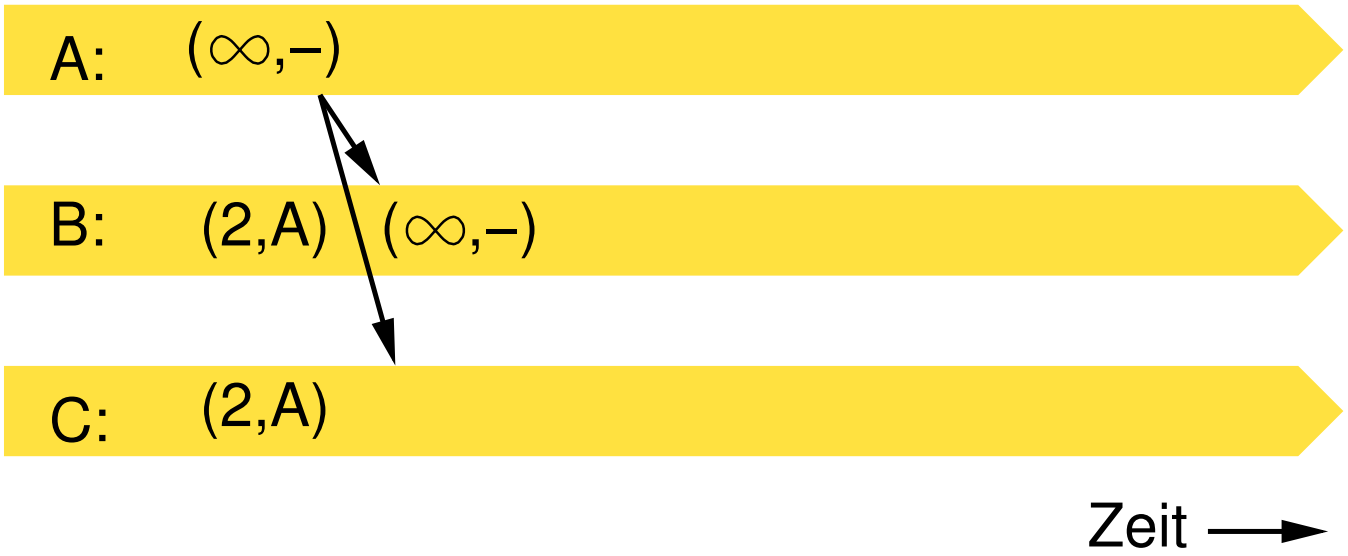
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



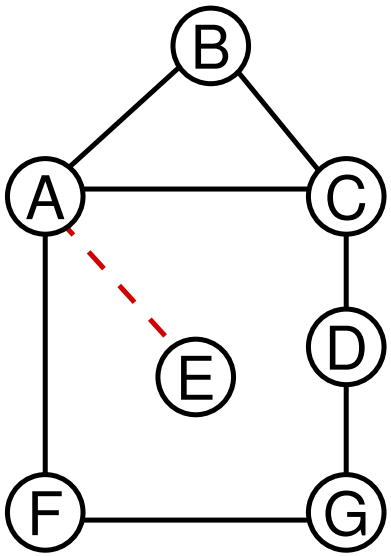
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



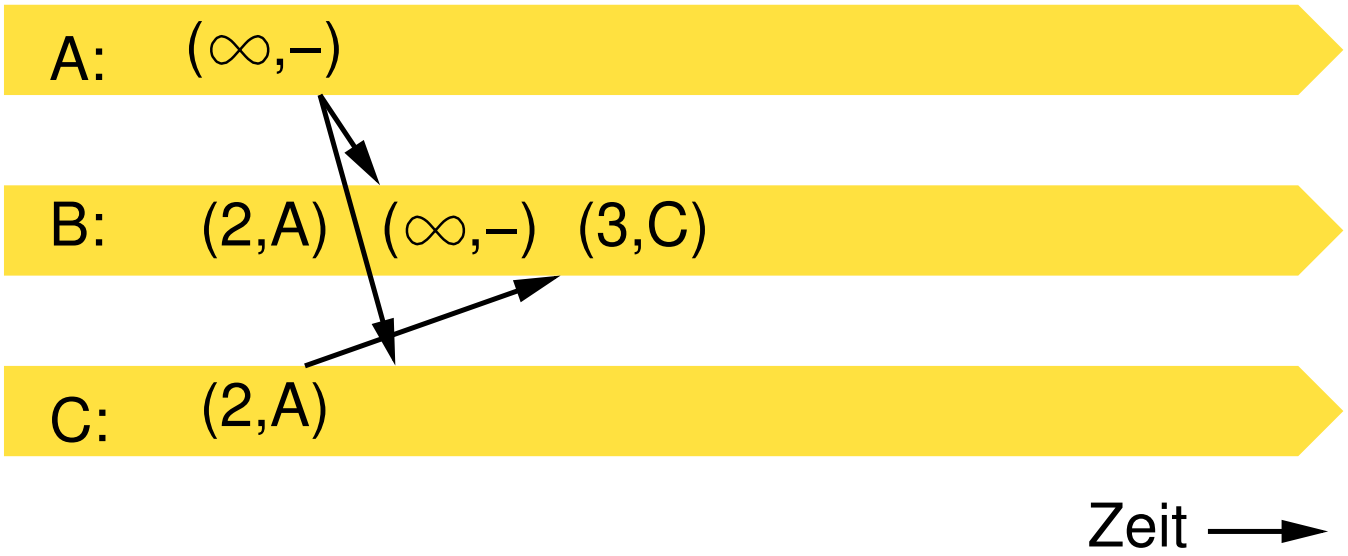
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



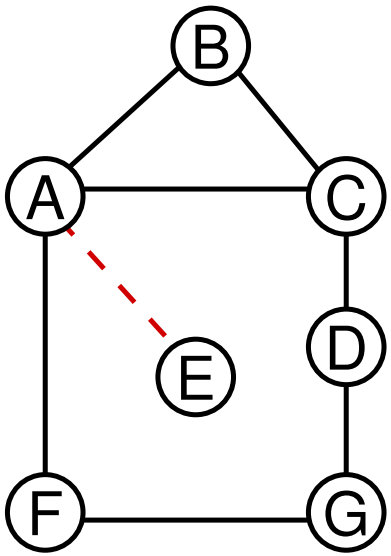
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



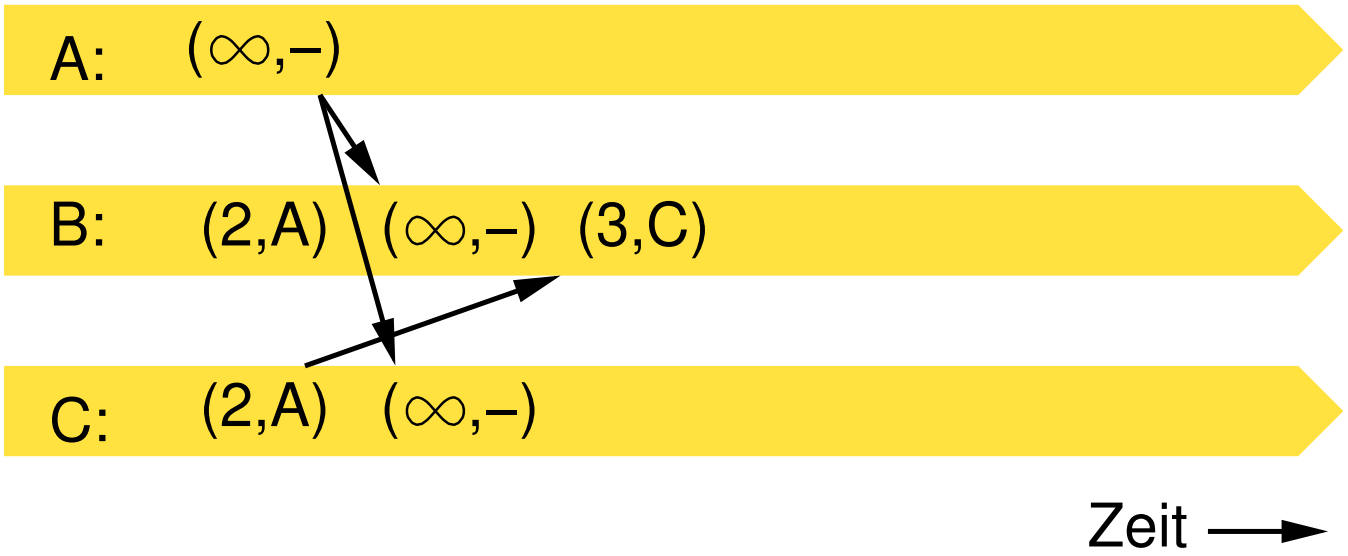
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



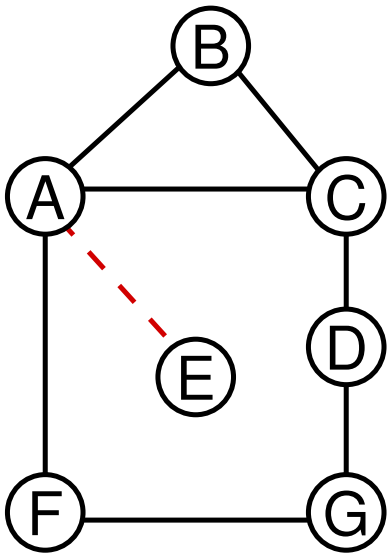
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



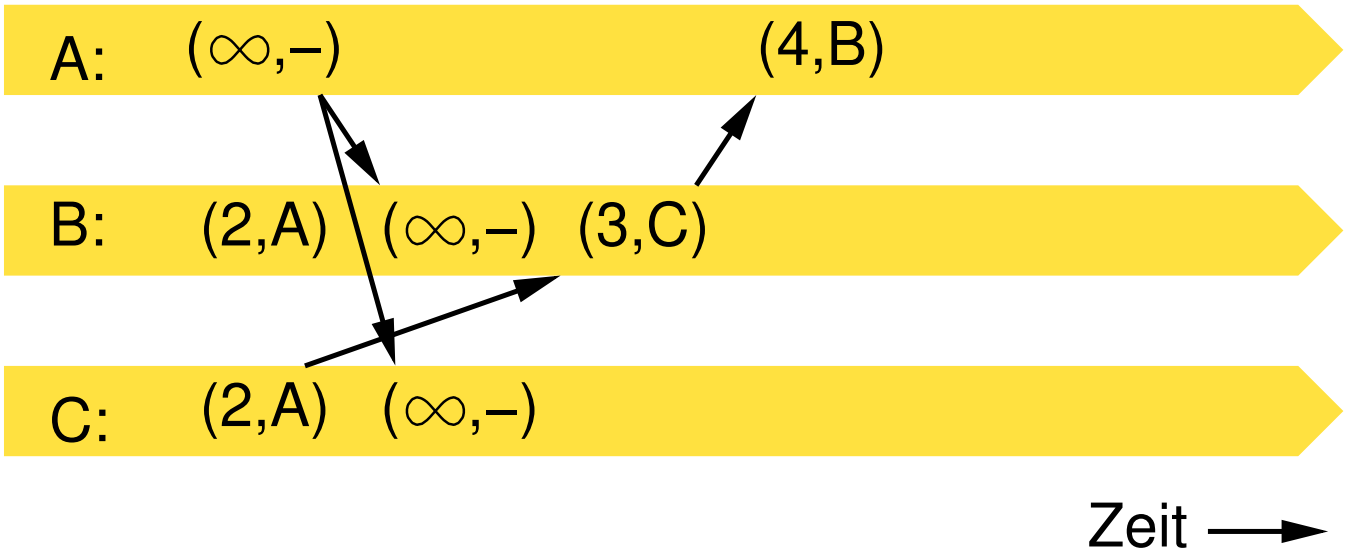
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



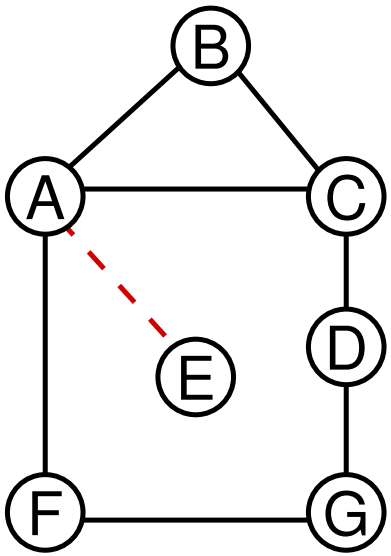
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



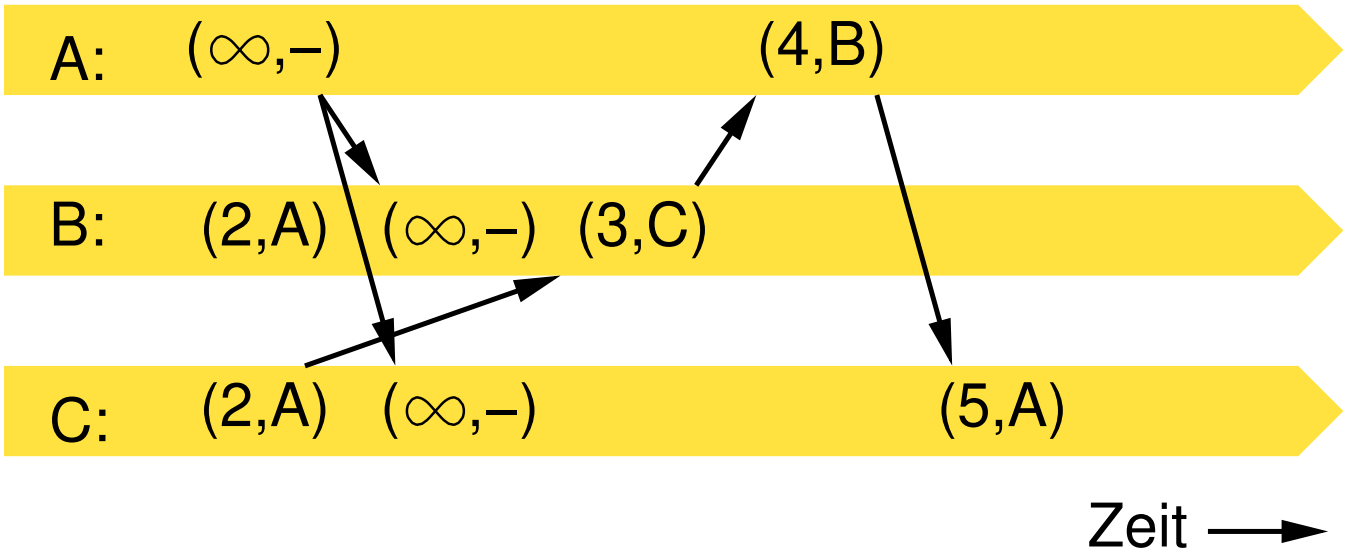
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



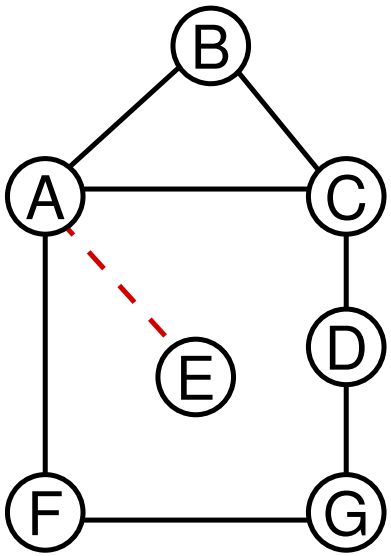
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



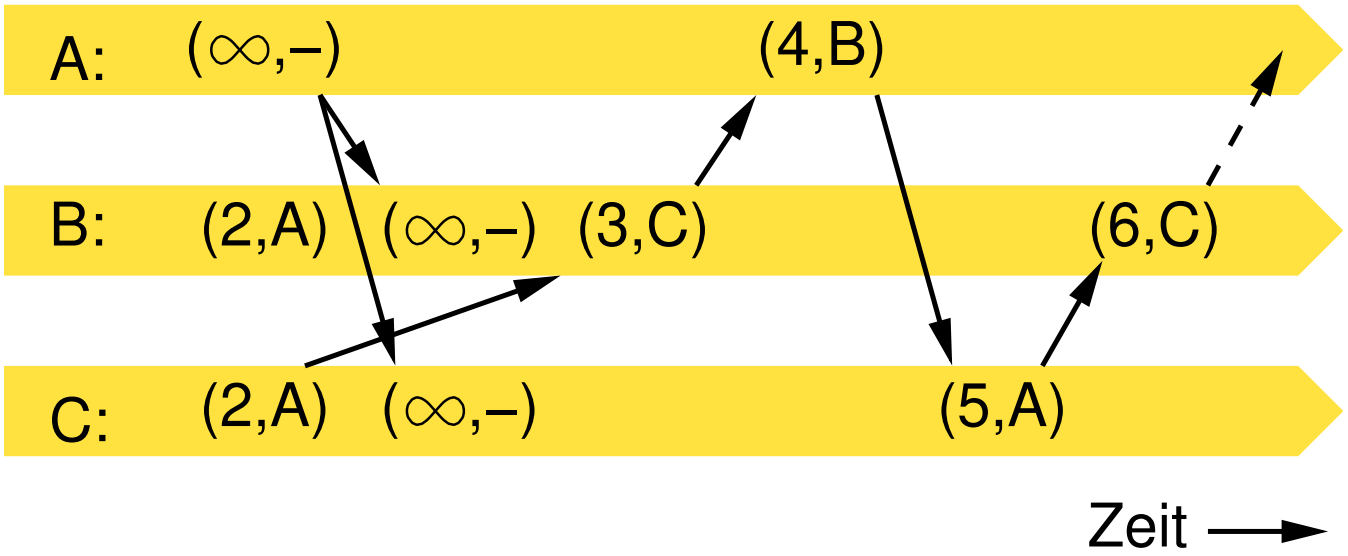
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



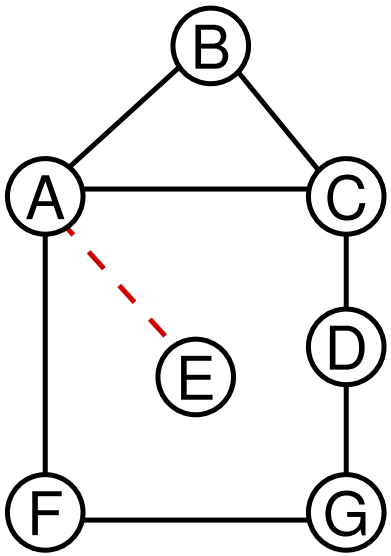
Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



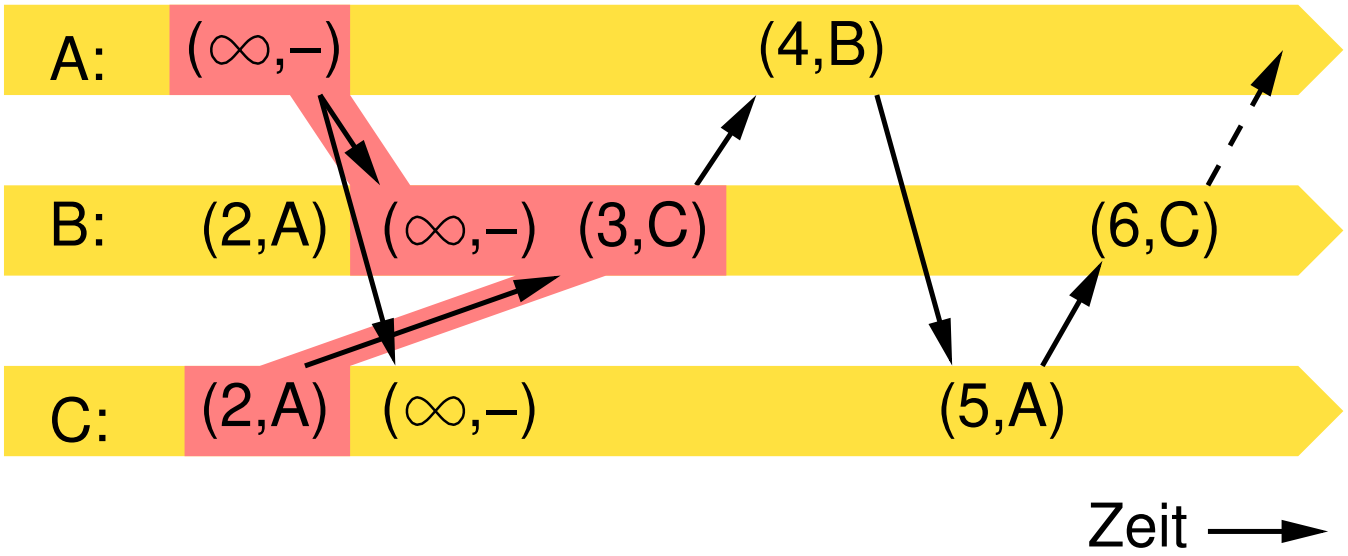
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

Problem des Algorithmus: *Count-to-Infinity*

- Beispiel: A erkennt Ausfall der Verbindung zu E



Zeitliche Entwicklung der Distanz–Vektoren zu E:



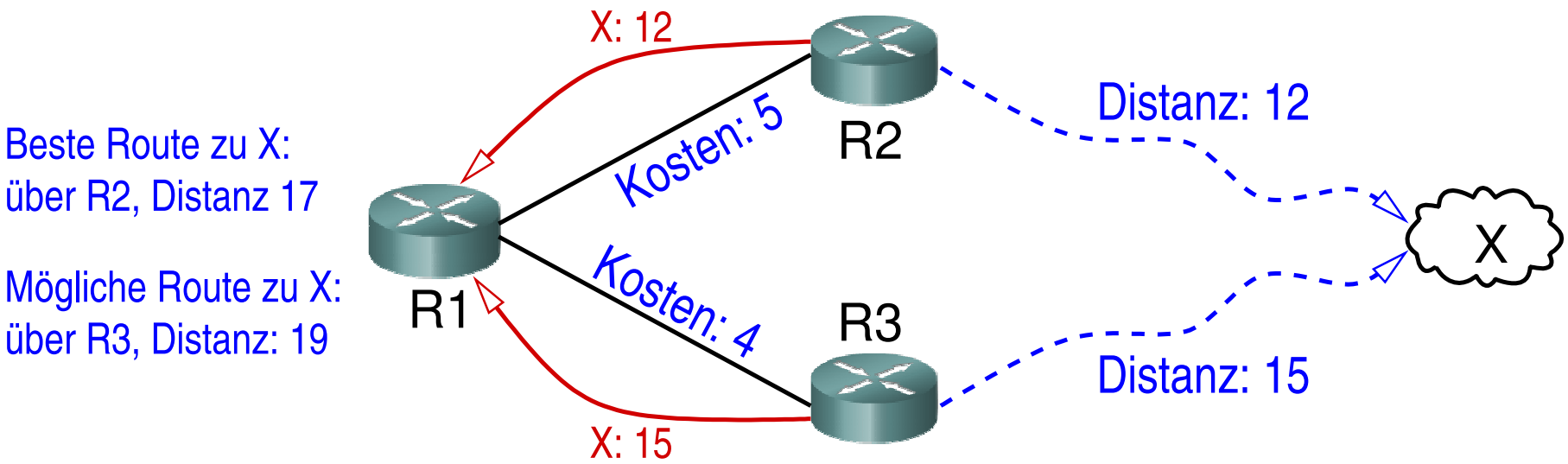
- Keine wirklich gute, allgemeine Lösung des Problems
  - pragmatisch: beschränke ∞ auf den Wert 16

RIP (*Routing Information Protocol*)

- Einfaches *Distance Vector Routing* Protokoll
- Internet-Standard
- Alle Link-Kosten sind 1, d.h. Distanz = *Hop Count*
- Drei Versionen:
  - RIPv1: leitet keine Präfixlänge weiter
    - Subnetting nur möglich, wenn alle Subnetze des klassenbehafteten Netzes dieselbe Größe haben
    - d.h. Subnetzmaske ist global
  - RIPv2: ermöglicht klassenloses Routing
  - RIPng: unterstützt IPv6

EIGRP (*Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*)

- Erweitertes *Distance Vector Routing* Protokoll
- Cisco-proprietär, seit 2013 offener Internet-Standard
- Link-Kosten berücksichtigen Bandbreite und Latenz
- Unterstützt IPv4, IPv6 und andere Schicht-3-Protokolle
- Updates nur bei Änderungen, kein *Count-to-Infinity*
- Behält alle Routen, nicht nur die beste



6.2.2 *Link State Routing*

★★★

- Grund„problem“ beim *Distance Vector Routing*:
  - Router haben ausschließlich lokale Information
- ***Link State Routing:***
  - Router erhalten Information über die Struktur des gesamten Netzwerks
- Vorgehensweise:
  - Kennenlernen der direkten Nachbarn
    - einschließlich der Link-Kosten
  - Versenden von Link State Paketen an **alle** anderen Router (***Reliable Flooding***)
  - Berechnung der kürzesten Wege mit Dijkstra-Algorithmus

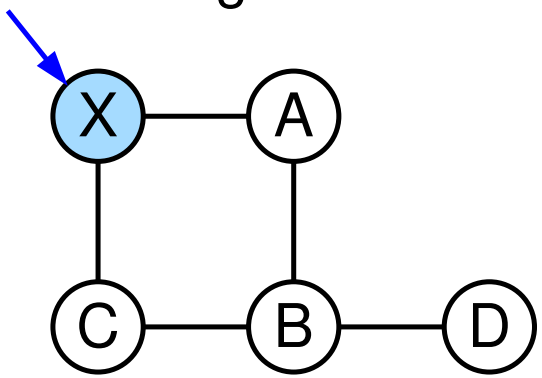
Link State Pakete

- Inhalt eines Link State Pakets:
  - ID des erzeugenden Routers
  - Liste der direkten Nachbarn mit Link-Kosten
  - Sequenznummer
    - Paket nur weitergeleitet, wenn die Sequenznummer größer als die des letzten weitergeleiteten Pakets ist
  - *Time-to-Live* (TTL)
    - jeder Router dekrementiert TTL
    - bei TTL = 0 wird das Paket gelöscht
- Versenden der Link State Pakete
  - Periodisch ($\sim$ Stunden) oder bei Topologie-Änderungen

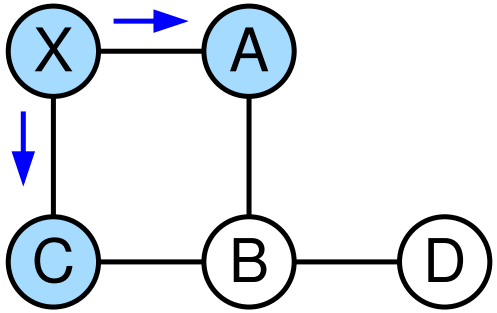
Reliable Flooding

- Flooding mit ACK und ggf. wiederholter Übertragung

(1) X erzeugt Paket

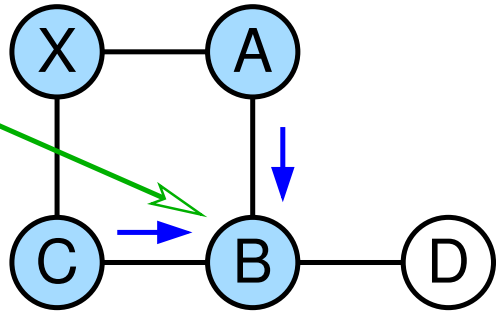


(2) X sendet an A und C

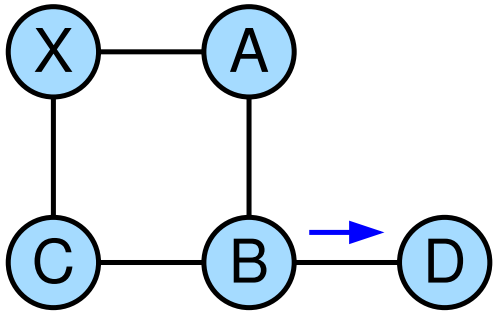


Sequenznum–mer verhindert, daß B Paket zweimal an D sendet

(3) A und C senden an B



(4) B sendet an D



Rechnernetze I

SoSe 2025

12.06.2025

Roland Wismüller
Universität Siegen
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 5. Juni 2025

Dijkstra-Algorithmus zur Bestimmung kürzester Wege

- Eingabe: N: Knotenmenge, $l(i,j)$: Link-Kosten, s: Startknoten
- Ausgabe: $C(n)$: Pfad-Kosten von s zu n
- Algorithmus:

$M = \{s\}$

Für alle $n \in N - \{s\}$: $C(n) = l(s,n)$

Solange $M \neq N$:

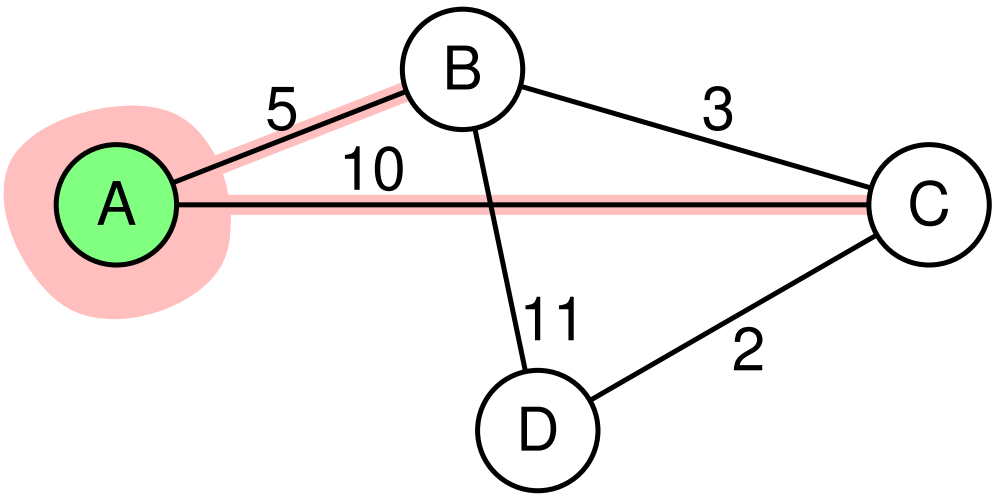
Wähle $w \in N - M$ so, daß $C(w)$ minimal ist

$M = M \cup \{w\}$

Für alle $n \in N - M$:

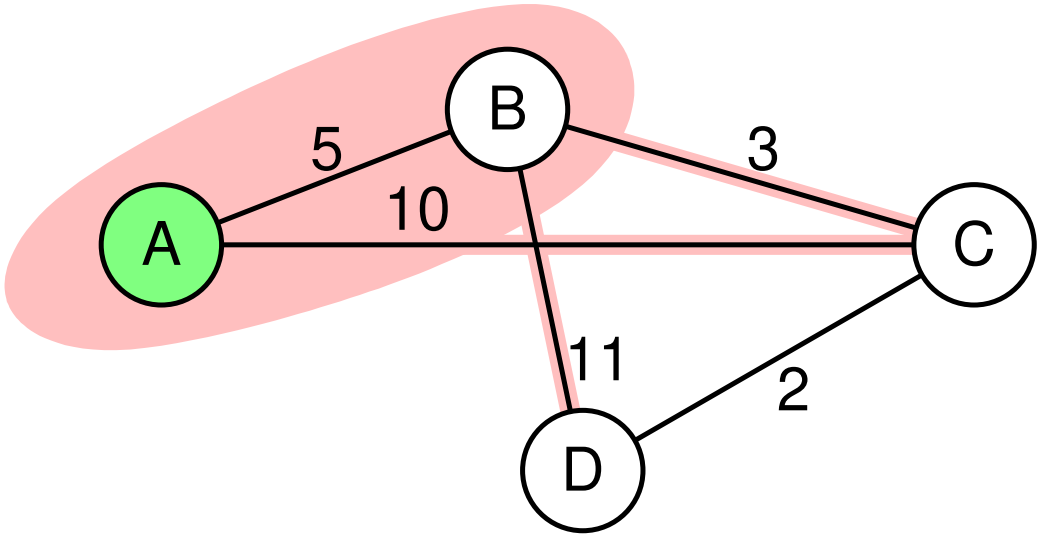
$C(n) = \min(\, C(n),\, C(w) + l(w,n)\,)$

Beispiel



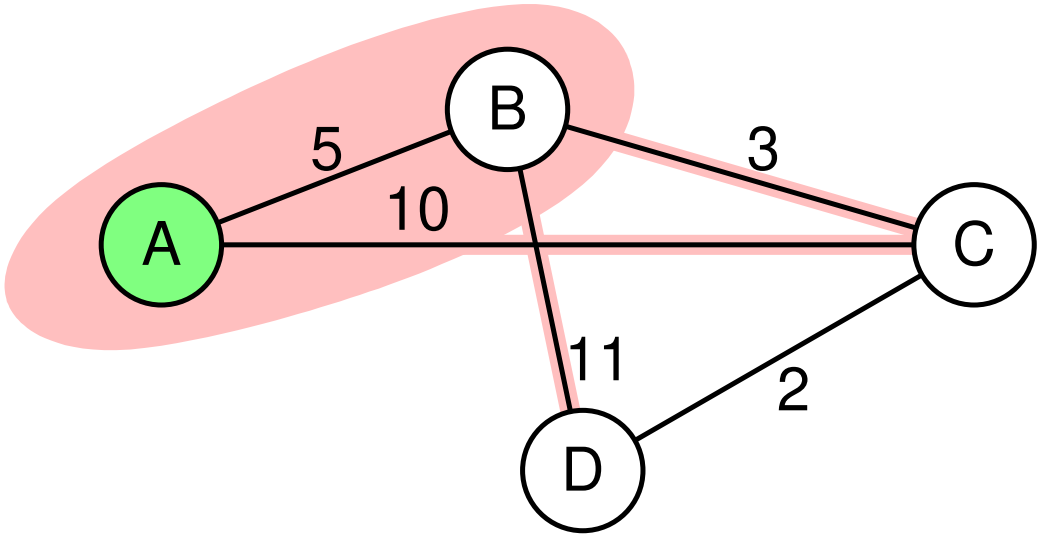
Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞

Beispiel



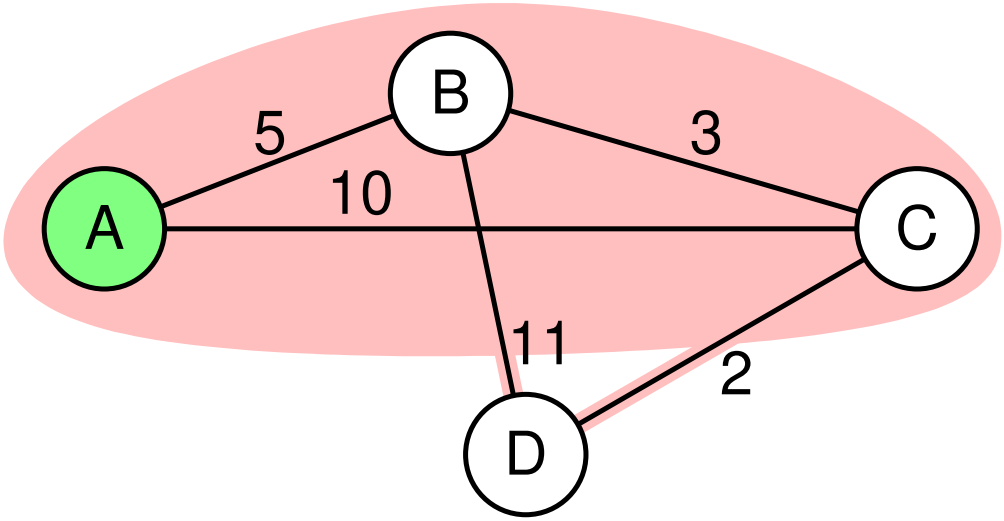
Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞
1	B	{A,B}	5		

Beispiel



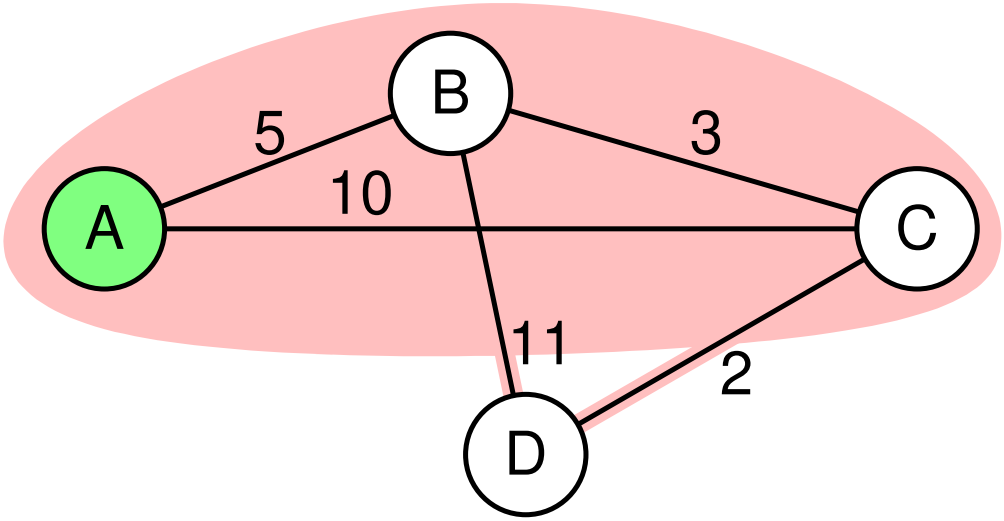
Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞
1	B	{A,B}	5	8	16

Beispiel



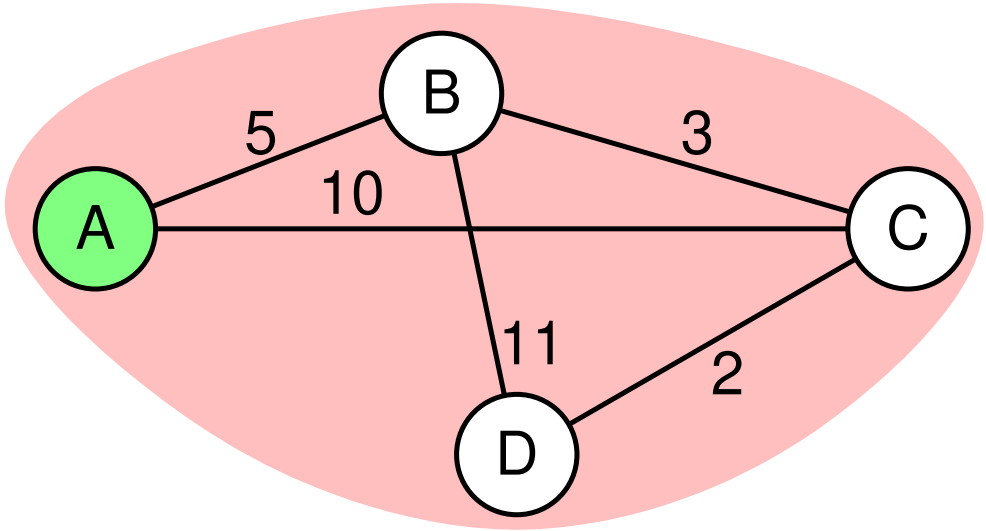
Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞
1	B	{A,B}	5	8	16
2	C	{A,B,C}	5	8	

Beispiel



Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞
1	B	{A,B}	5	8	16
2	C	{A,B,C}	5	8	10

Beispiel



Schritt	w	M	C(B)	C(C)	C(D)
Initial		{A}	5	10	∞
1	B	{A,B}	5	8	16
2	C	{A,B,C}	5	8	10
3	D	{A,B,C,D}	5	8	10

OSPF (*Open Shortest Path First*)

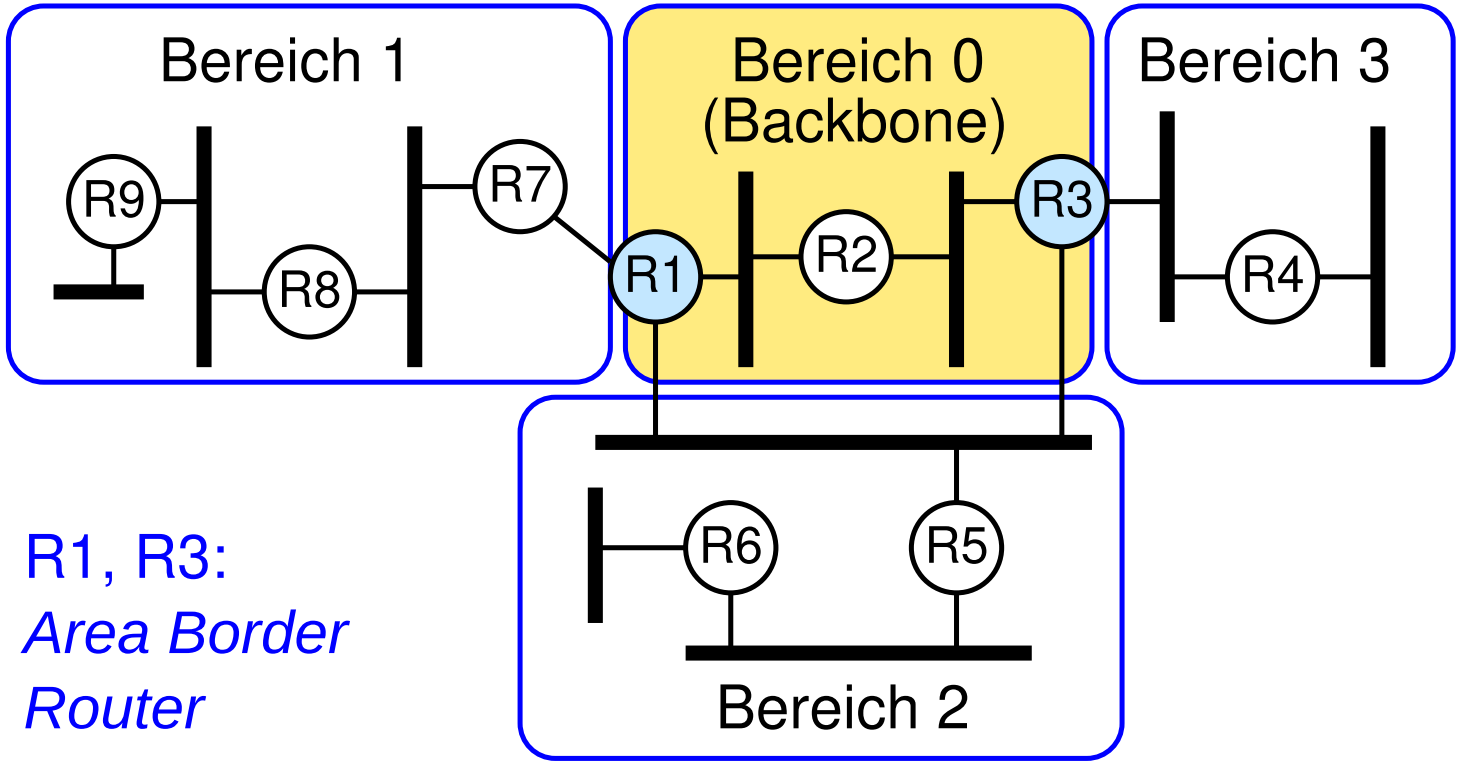
- Weit verbreitetes *Link State Routing* Protokoll
- Internet-Standard
- Link-Kosten vom Protokoll nicht festgelegt
  - in der Praxis meist Link-Bandbreite verwendet
- Versionen:
  - OSPFv2: für IPv4
  - OSPFv3: unterstützt IPv6

OSPF (*Open Shortest Path First*) ...

- Wichtige Pakettypen:
  - *Hello*-Pakete: bauen Nachbarschaftsbeziehungen (Adjazenzen) auf und testen diese
  - *Link State Update*-Pakete enthalten *Link State Advertisements* (LSAs)
    - LSA beschreibt Verbindung zwischen zwei Routern
- In Mehrfachzugriffsnetzen:
  - Router wählen einen „designierten“ Router (DR) und einen Backup DR (BDR)
    - bei Ausfall DR: BDR wird neuer DR, Neuwahl BDR
  - jeder Router hat (nur) DR als Nachbarn
    - LSAs werden nur an DR gesendet und von diesem verteilt
    - verhindert exzessives Flooding im Netz

Multi-Area OSPF

- Für große *Routing-Domains*:
  - OSPF erlaubt Einführung einer weiteren Hierarchieebene: **Routing-Bereiche** (***Areas***)
- Beispiel:

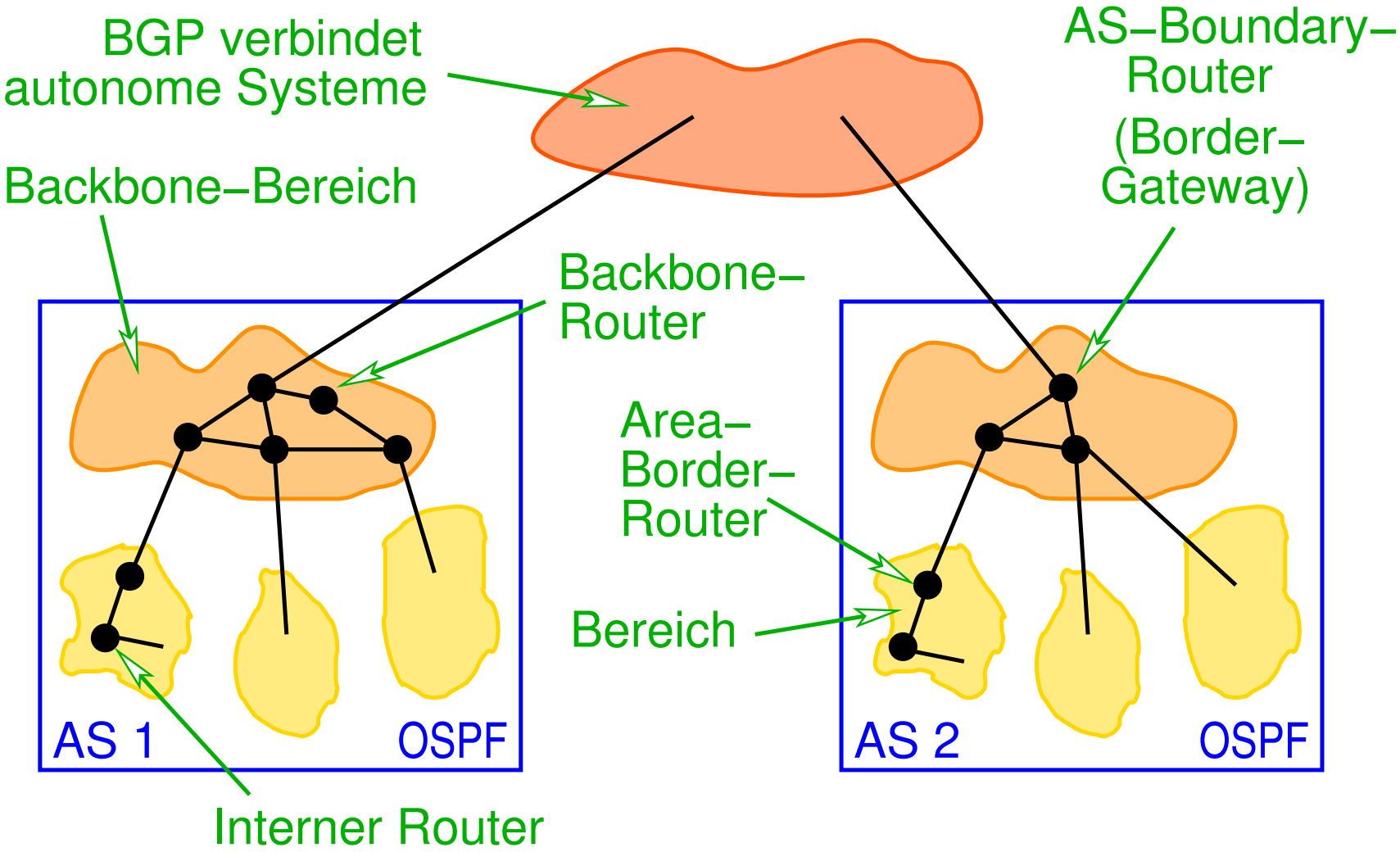


R1, R3:
Area Border Router

Multi-Area OSPF ...

- Innerhalb jedes Bereichs: *Flooding* von Link-State-Paketen
- *Area Border Router* (ABR) geben diese nicht weiter
- Stattdessen: ABR sendet zusammengefaßte Information
  - nur ein Link-State-Paket für den gesamten Bereich
  - ABR spiegelt vor, daß alle Hosts in seinem Bereich **direkt** mit ihm verbunden sind
- Pakete zwischen Bereichen immer über ABR geleitet
  - bei mehreren ABR: automatische Auswahl über die Link-Kosten
- Damit: bessere Skalierbarkeit
  - kleinere Graphen in den einzelnen Routing-Bereichen
  - weniger Neuberechnungen der kürzesten Wege
  - evtl. aber suboptimale Routen

Routing-Hierarchie mit Multi-Area OSPF



★★

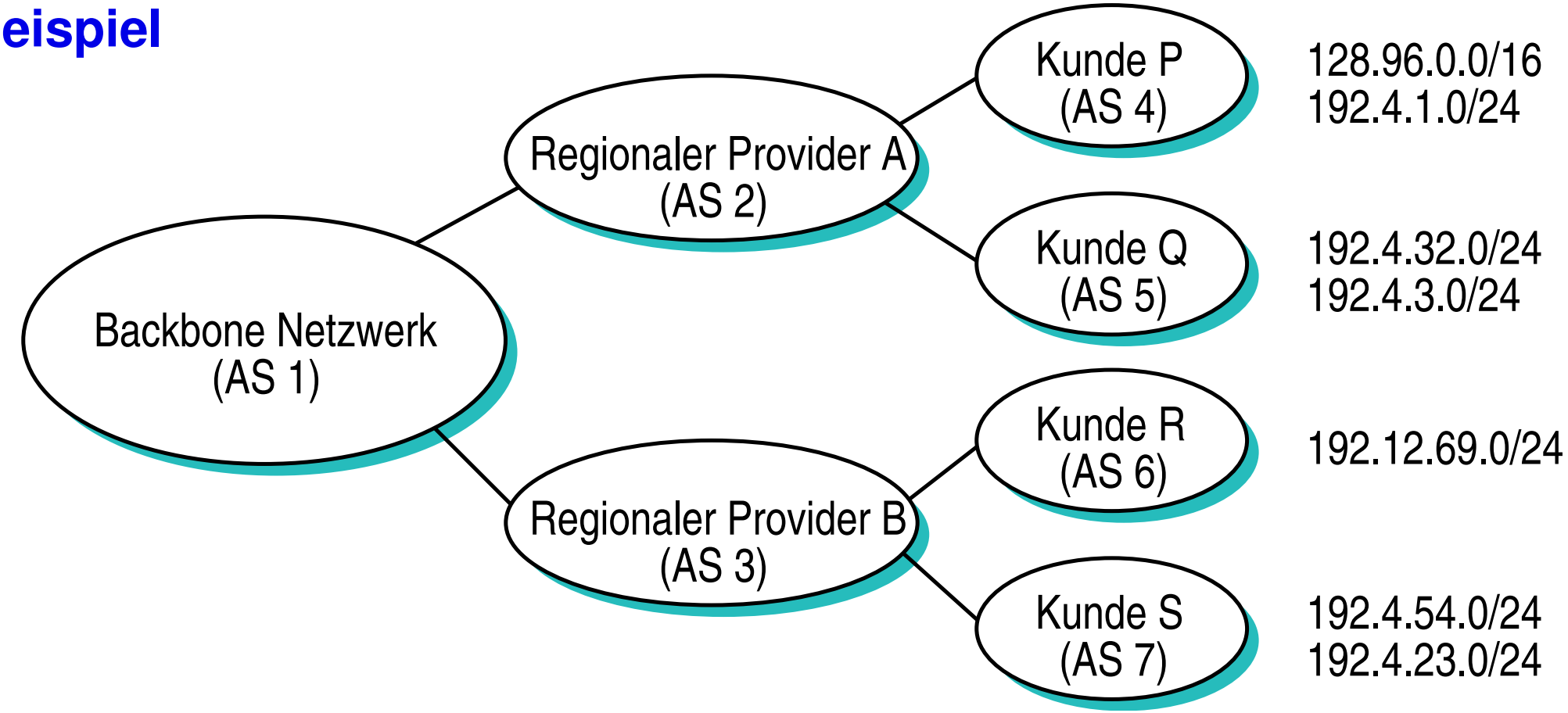
Routing innerhalb und außerhalb von Domains

- Innerhalb einer Domain: RIP, OSPF
  - Bestimmung optimaler Routen
- Zwischen Domains: ***Border Gateway Protocol* (BGP)**
  - Autonome Systeme ⇒ keine gemeinsame Metrik
  - Routen werden „politisch“ bestimmt
    - „benutze Provider B für Adressen xyz“
    - „benutze Pfad über möglichst wenige AS“
  - Wichtigstes Ziel: Erreichbarkeit
    - „gute“ Routen sind sekundär

Routing mit BGP

- Jedes Autonome System (AS) hat
  - ein oder mehrere *Border Router*
    - Verbindung zu anderen AS
  - einen BGP Sprecher, der bekanntgibt:
    - lokales Netzwerk
    - über dieses AS erreichbare Netzwerke
      (nur, wenn das AS Pakete an andere AS weiterleitet)
- Bekanntgegeben werden vollständige Pfade
  - zur Vermeidung von zyklischen Routen

Beispiel



- AS 2 gibt (u.a.) bekannt: „ich kann AS 4, AS 5 direkt erreichen“
  - Netze 128.96.0.0/16, 192.4.1.0/24, 192.4.32.0/24, 192.4.3.0/24
- AS 1 gibt (u.a.) bekannt: „ich kann AS 4, AS 5 über AS 2 erreichen“

6.4 Zusammenfassung

- Routing „im kleinen“ (innerhalb einer Domain):
  - Suche optimale Pfade
  - *Distance Vector Routing* (nur mit lokaler Information)
  - *Link State Routing* (globale Information, *reliable Flooding*)
- Routing „im großen“ (zwischen Domains)
  - *Border Gateway Protocol*
    - Bekanntgabe der Erreichbarkeit
    - Routenwahl ist „politische“ Entscheidung

Nächste Lektion:

- Ende-zu-Ende Prokotolle: UDP, TCP