Rechnernetze I

SoSe 2025

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

Stand: 12. Mai 2025

Rechnernetze I

SoSe 2025

4 LAN Switching

Inhalt

- Weiterleitungstechniken
- Switching: Einführung
- Implementierung von Switches
- Lernende Switches
- *Spanning-Tree*-Algorithmus
- Virtuelle LANs

- Peterson, Kap. 3.1, 3.2, 3.4
- CCNA, Kap. 5.2

Rechnernetze I

SoSe 2025

12.05.2025

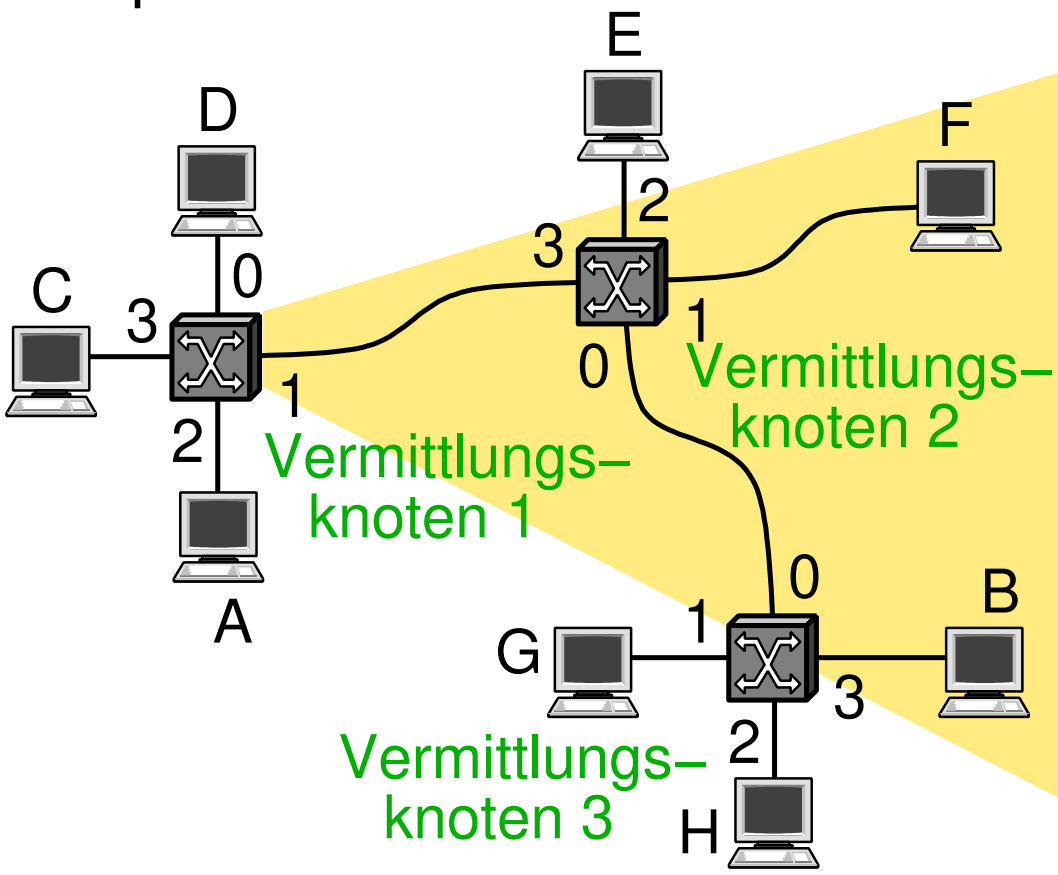
Roland Wismüller
Universität Siegen
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 12. Mai 2025

★★

Weiterleitung von Datagrammen (verbindungslos)

- Jeder Vermittlungsknoten besitzt eine Weiterleitungstabelle
  - bildet Zieladresse auf Ausgangsport ab
- Beispiel:



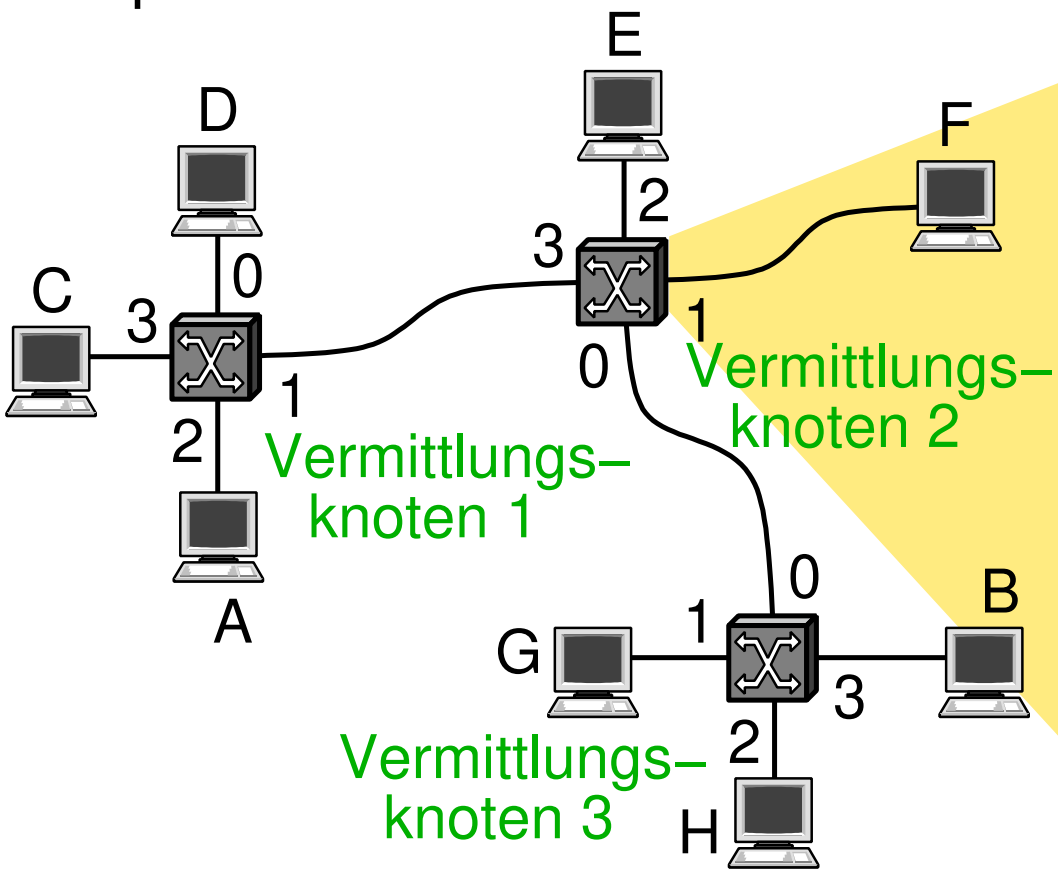
Weiterleitungstabelle

Ziel	Port
A	2
B	1
C	3
D	0
E	1
F	1
G	1
H	1

★★

Weiterleitung von Datagrammen (verbindungslos)

- Jeder Vermittlungsknoten besitzt eine Weiterleitungstabelle
  - bildet Zieladresse auf Ausgangsport ab
- Beispiel:

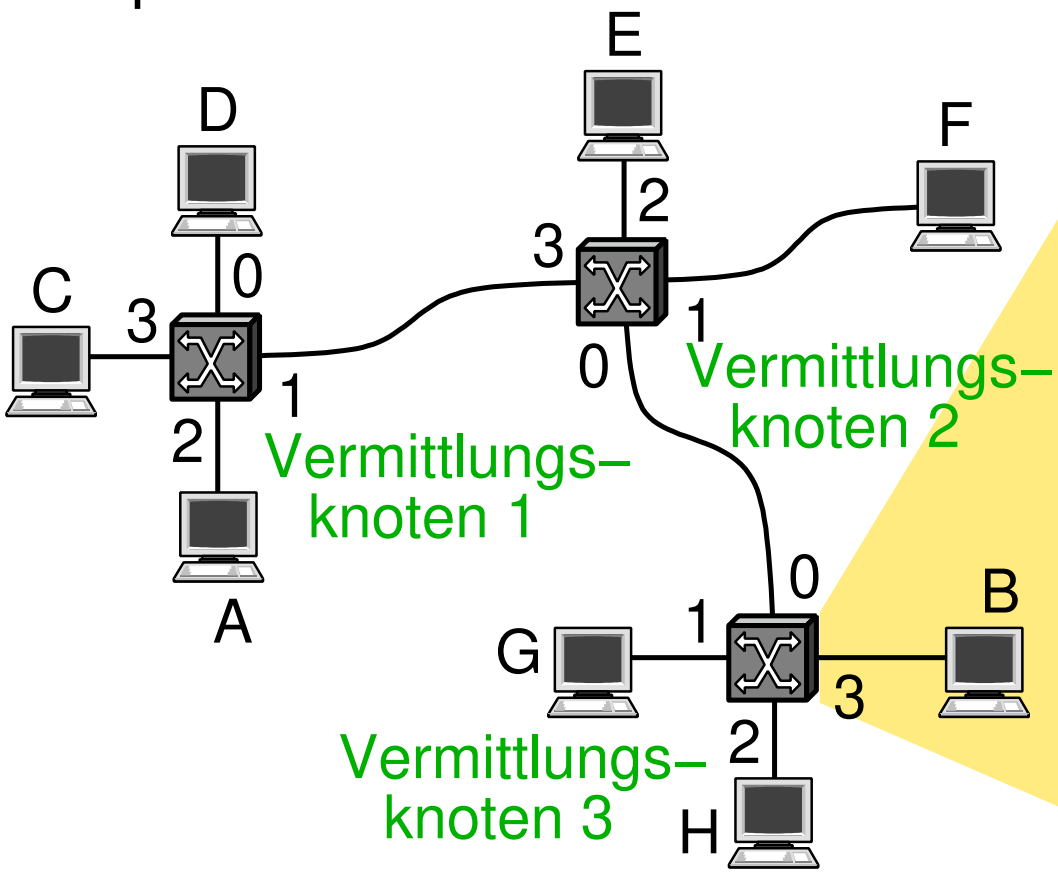


Weiterleitungstabelle

Ziel	Port
A	3
B	0
C	3
D	3
E	2
F	1
G	0
H	0

Weiterleitung von Datagrammen (verbindungslos)

- Jeder Vermittlungsknoten besitzt eine Weiterleitungstabelle
  - bildet Zieladresse auf Ausgangsport ab
- Beispiel:



Weiterleitungstabelle

Ziel	Port
A	0
B	3
C	0
D	0
E	0
F	0
G	1
H	2

★★

Weiterleitung von Datagrammen: Eigenschaften

- Knoten können jederzeit ein Paket an andere Knoten senden; Pakete können sofort weitergeleitet werden
  - kein Verbindungsaufbau
- Ein Knoten kann nicht feststellen, ob das Netz das Paket zustellen kann
- Pakete werden unabhängig voneinander weitergeleitet
- Ausfall einer Verbindung bzw. eines Vermittlungsknotens kann prinzipiell toleriert werden
  - Anpassung der Weiterleitungstabellen
- Eingesetzt z.B. im Internet (IP)
- (vgl. Kap. 1.4: Paketvermittlung)

★★

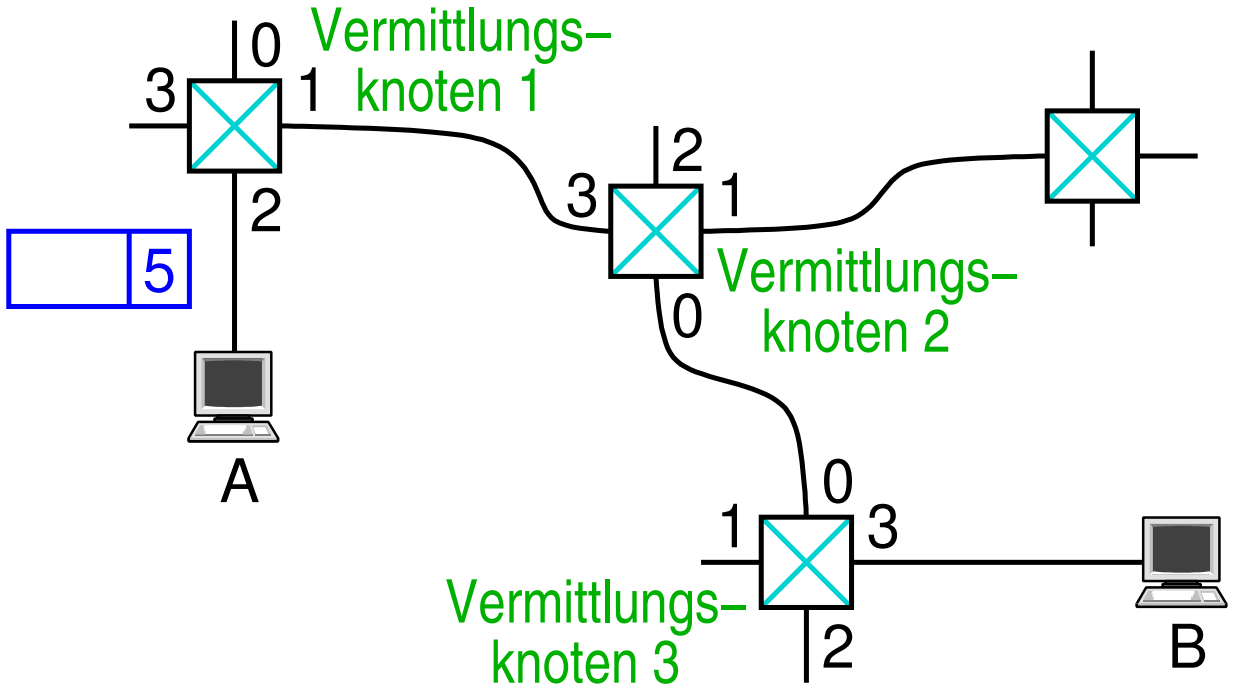
Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert)

- Kommunikation in zwei Phasen:
  - Aufbau einer virtuellen Verbindung (***Virtual Circuit***, **VC**) vom Quell- zum Zielrechner
    - statisch (*Permanent VC*)
    - dynamisch (*Switched VC*)
  - Versenden der Pakete über VC:
    - Pakete enthalten Bezeichner des VC
    - alle Pakete nehmen denselben Weg
- VC-Bezeichner (VCI, *Virtual Circuit Identifier*) nur auf den einzelnen Leitungen eindeutig
  - Weiterleitungstabelle im Vermittlungsknoten bildet Eingangs-Port und -VCI auf Ausgangs-Port und -VCI ab

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



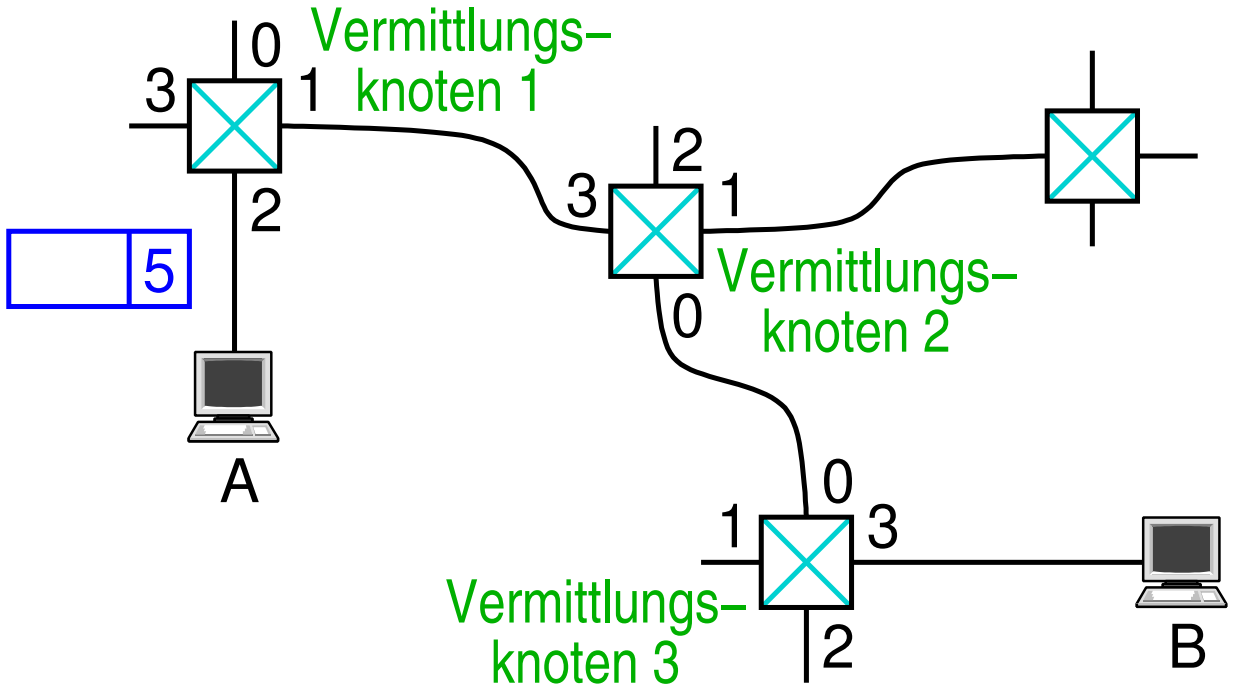
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



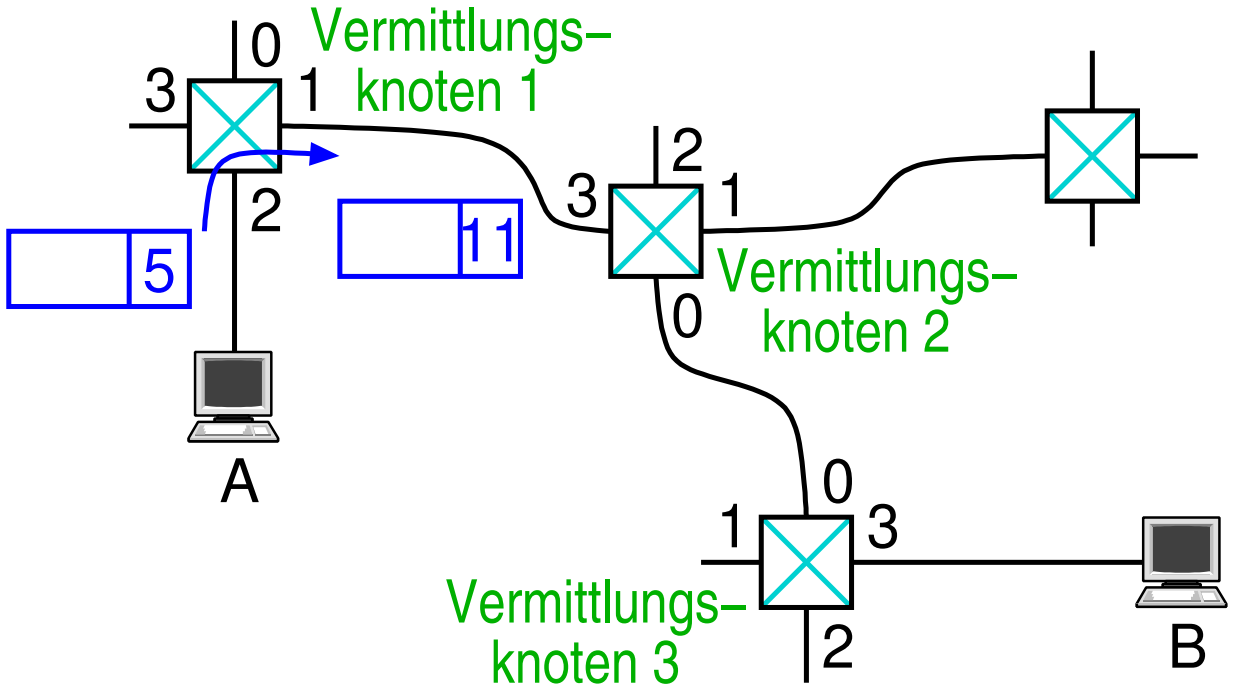
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



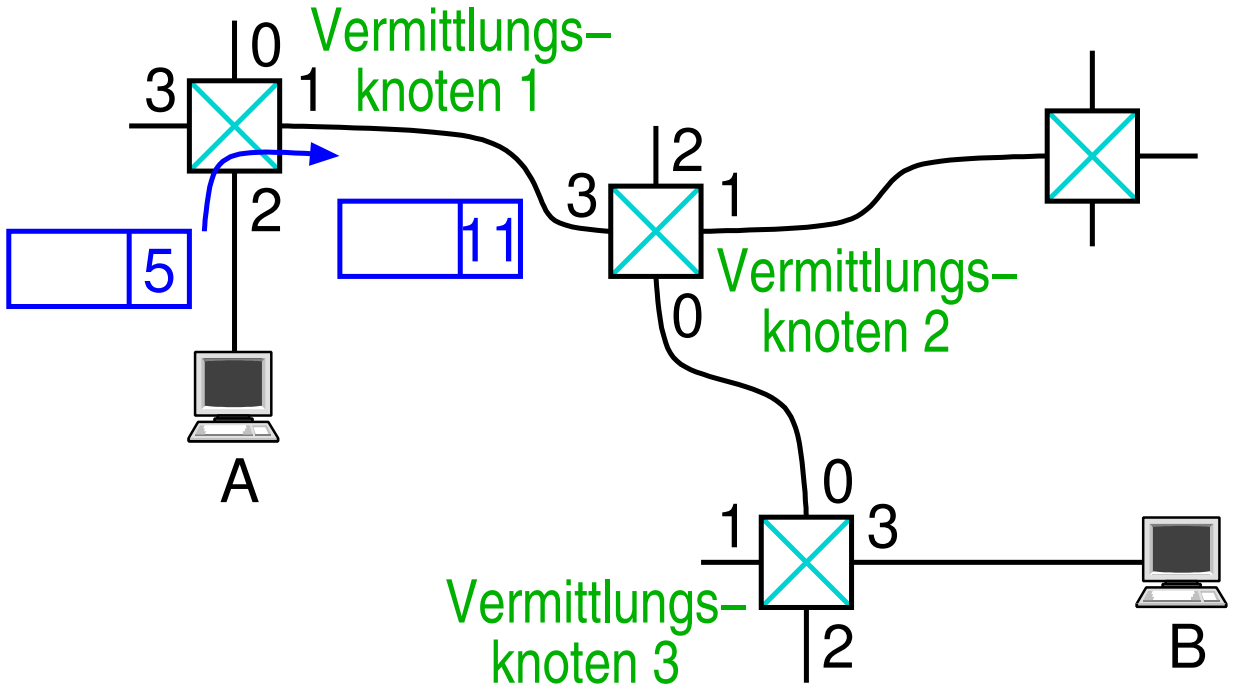
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



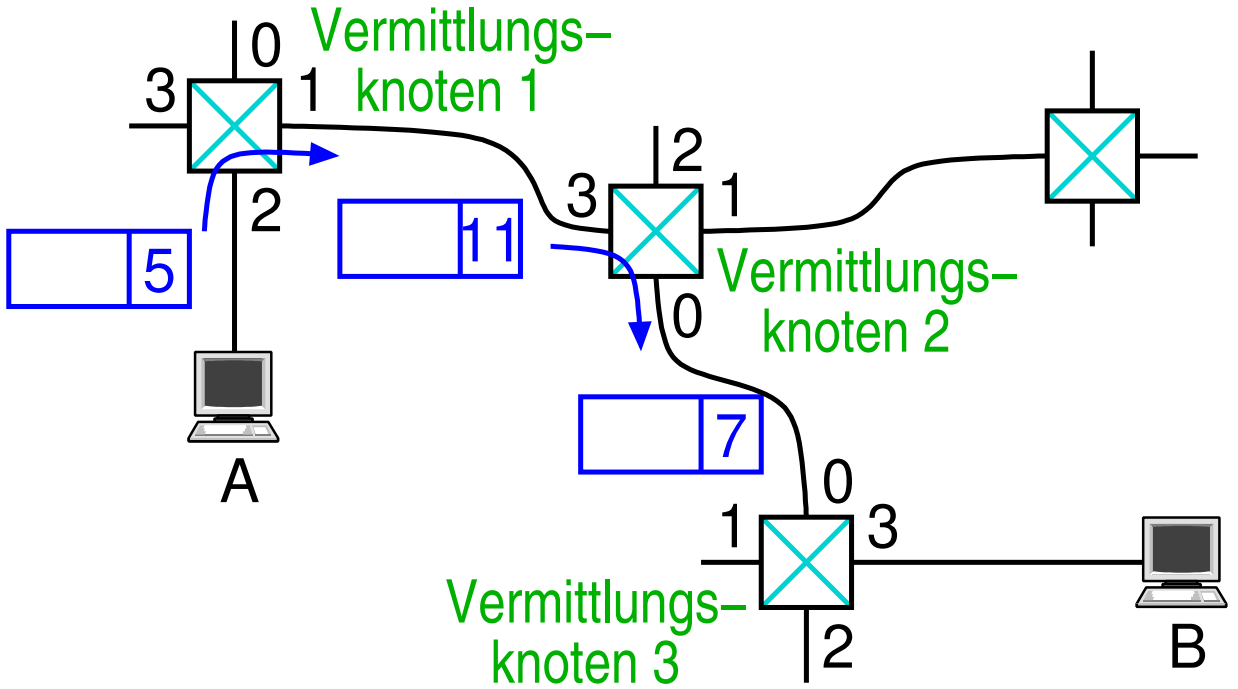
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



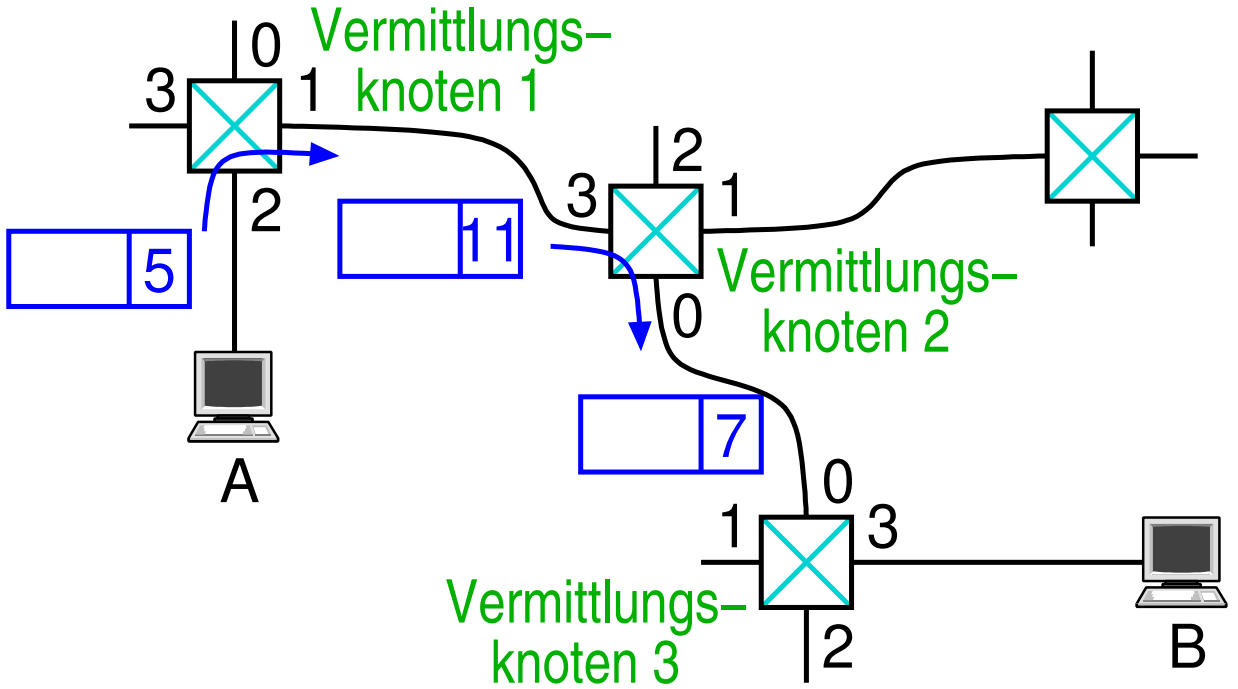
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



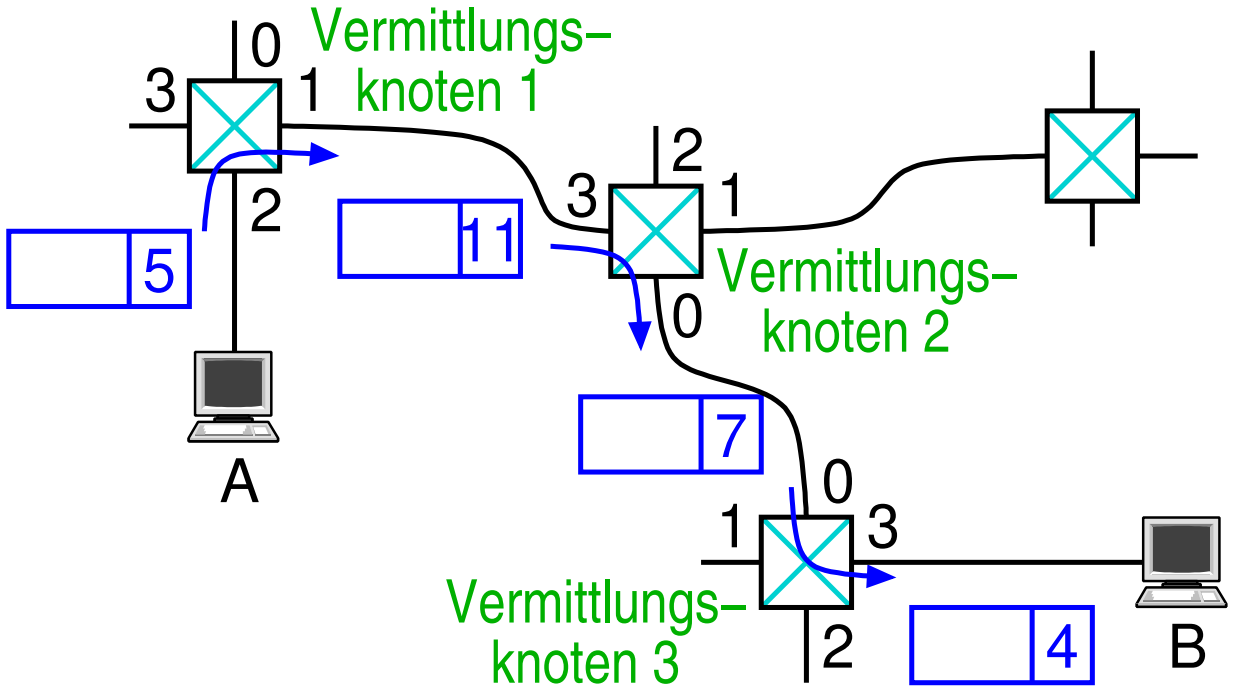
	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Virtuelle Leitungsvermittlung (verbindungsorientiert) ...

- Beispiel:
  A sendet an B



	Eingangsport	Eingangs–VCI	Ausgangsport	Ausgangs–VCI
Verm.kn. 1:	2	5	1	11
Verm.kn. 2:	3	11	0	7
Verm.kn. 3:	0	7	3	4

- Eingesetzt z.B. bei MPLS (☞ **RN-II**)

★★

Vergleich der Weiterleitungstechniken

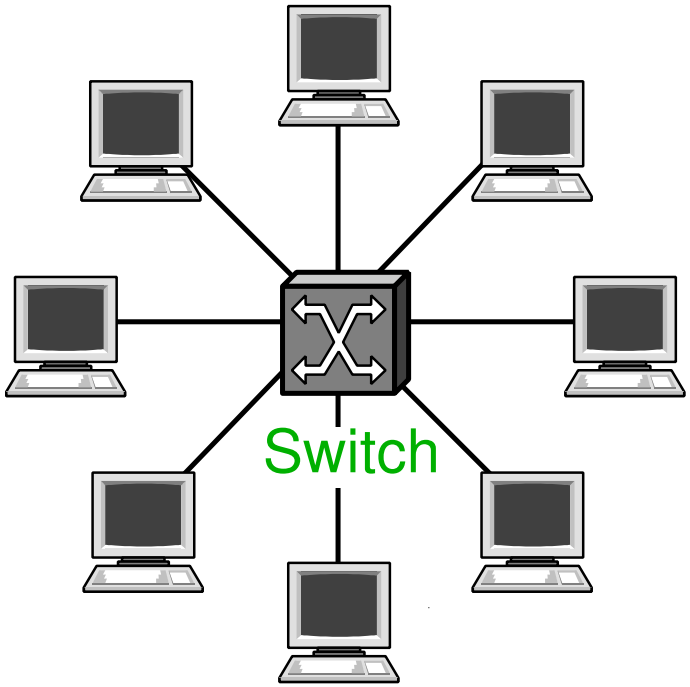
	Datagramm-Verm.	Virtuelle Leitungsv.
Verbindungsaufbau	nicht nötig	erforderlich
Adressierung	Pakete enthalten volle Sender- und Empfänger-Adresse	Pakete enthalten nur kurze VC-Bezeichner
Wegewahl	erfolgt unabhängig für jedes Paket	Weg wird bei Aufbau des VC festgelegt
Bei Ausfall eines Vermittlungsknotens	keine größeren Auswirkungen	alle VCs mit diesem Vermittlungsknoten sind unterbrochen
Dienstgütegarantien (QoS) und Überlastkontrolle	schwierig	Einfach, wenn vorab Resourcen für VC reserviert werden

Begriffe

- **Switching / Forwarding (Weiterleitung):**
  - Weiterleiten v. Frames (Paketen) zum richtigen Ausgangsport
- **(LAN-)Switch / Bridge (Brücke):**
  - Vermittler im LAN (auf Ebene der Sicherungsschicht)
  - Bridge: Switch mit nur zwei Ports
- **Routing:**
  - (dynamischer) Aufbau von Tabellen zum Forwarding
  - Ziel: Finden von (guten/optimalen) Wegen zu anderen Netzen
- **Router:**
  - Knoten, der mit den Protokollen der Vermittlungsschicht Pakete weiterleitet
  - vereinigt Funktionalität von Routing und Forwarding

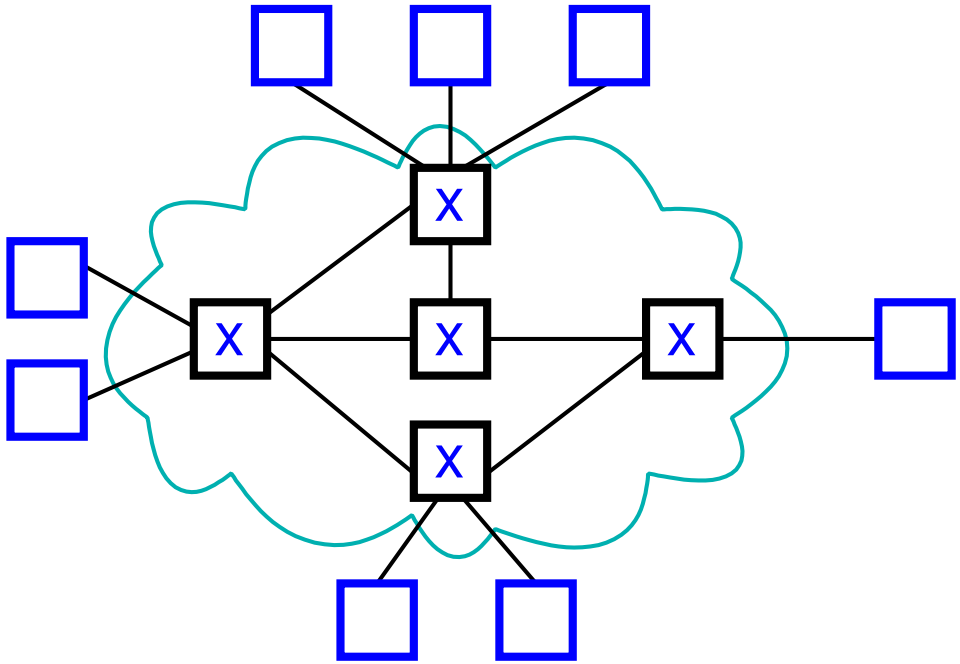
4.2 Switching: Einführung

- Motivation: Ersetzen von Mehrfachzugriffsverbindungen im LAN durch Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
- Vermittler (Switch):
  - mehrere Ein-/Ausgänge
  - leitet Frames aufgrund der Zieladresse im Header weiter
- Führt zu Sterntopologie:



4.2 Switching: Einführung ...

- Vorteil gegenüber Bustopologie:
  - Kommunikation zwischen zwei Knoten wirkt sich nicht (notwendigerweise) auf andere Knoten aus
- Beschränkungen können durch Zusammenschalten mehrerer Switches überwunden werden:
  - begrenzte Anzahl von Ein-/ Ausgängen pro Switch
  - Leitungslänge, geographische Ausdehnung



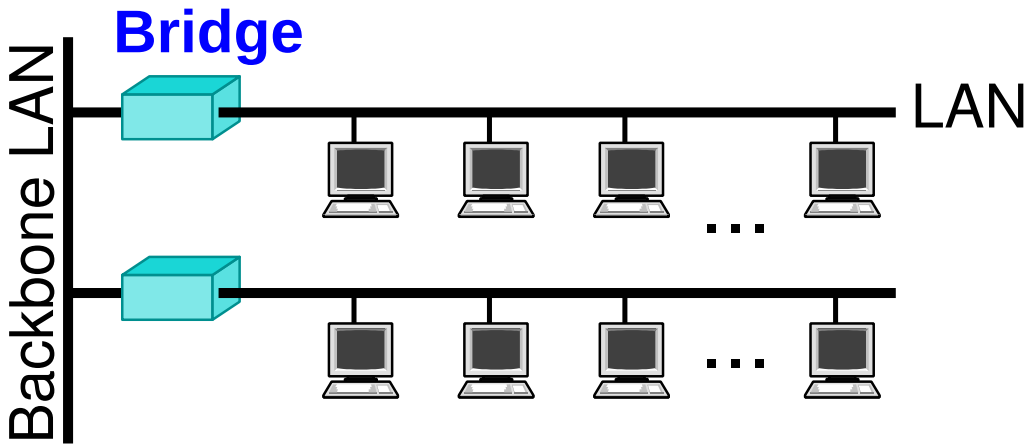
4.2 Switching: Einführung ...

- Weitere Beschränkungen von Switches
  - Heterogenität
    - die verbundenen Netze müssen u.a. dasselbe Adressierungsschema haben
    - z.B. Ethernet und Token-Ring wäre möglich, Ethernet und CAN-Bus nicht
  - Skalierbarkeit:
    - Broadcasts
    - *Spanning-Tree*-Algorithmus (☞ **4.5**)
  - Transparenz:
    - Latenz
    - Verlust von Frames bei Überlast

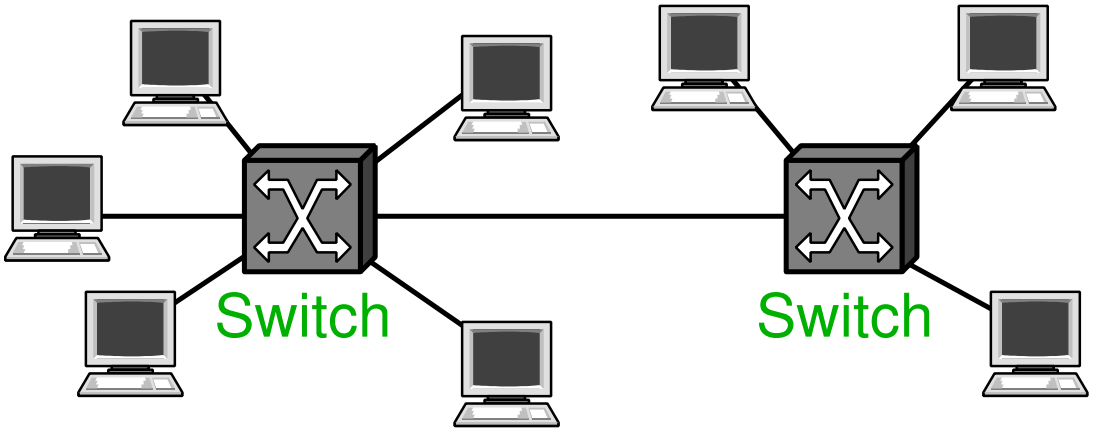
4.2 Switching: Einführung ...

- **LAN Switch**: Vermittlungsknoten auf der Sicherungsschicht
  - kann Zieladresse im Sicherungsschicht-Header analysieren
  - gibt Frames nur an die Ports weiter, wo es notwendig ist

- **Bridge**: Switch mit 2 Ports
  - Einsatz bei 10Base5 zur Überwindung von physikalischen Beschränkungen (Leitungslänge, Anzahl Repeater, ...)

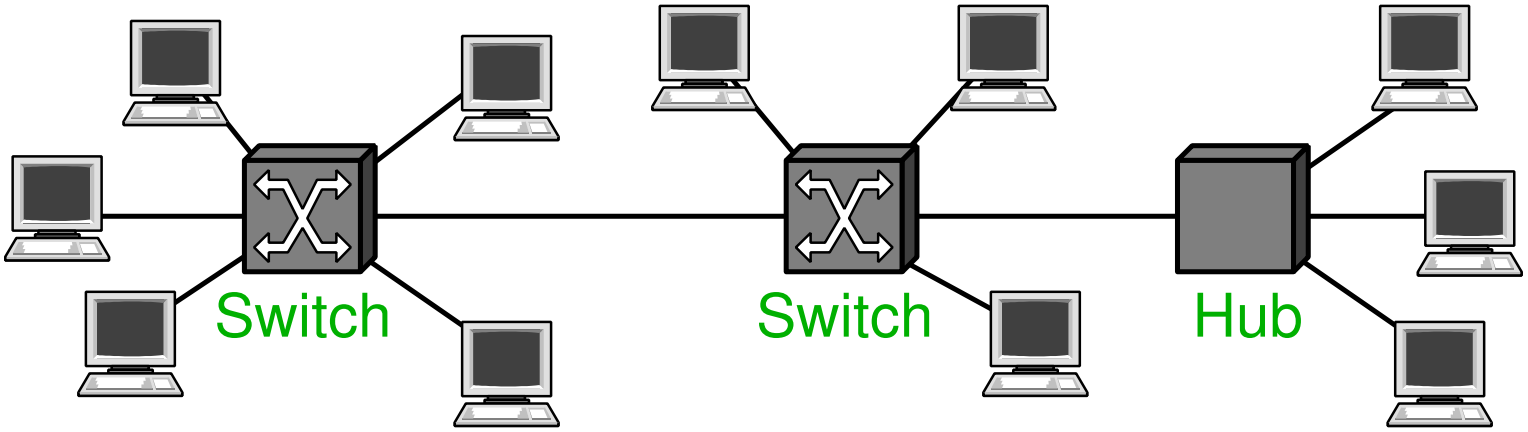


Ein (Ethernet-)LAN mit Switches



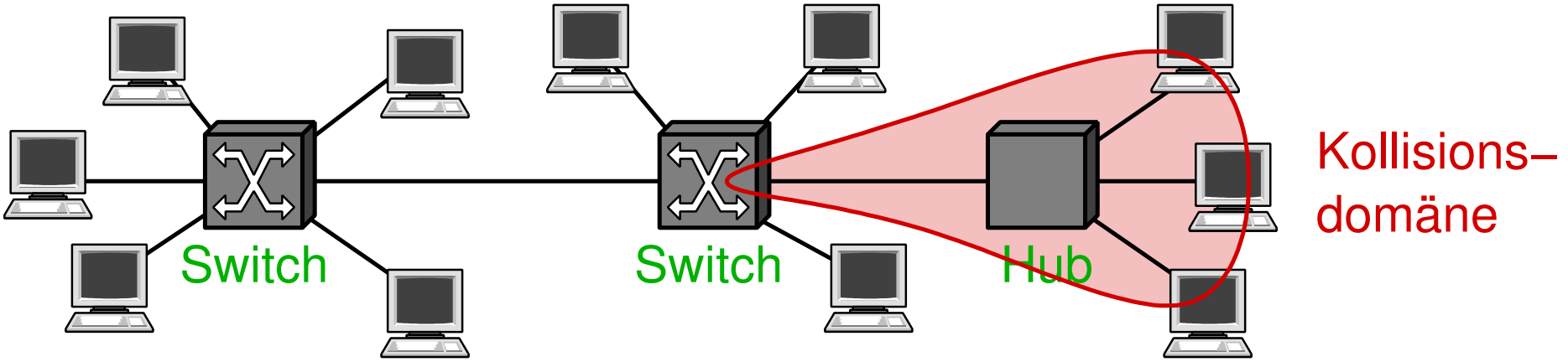
- Verwendung von Switches ist bei Ethernet ab 100 Mb/s üblich
  - ermöglicht Vollduplex-Betrieb
    - in diesem Fall treten keine Kollisionen mehr auf
    - aber: Switch muß ggf. Frames zwischenspeichern

Ein (Ethernet-)LAN mit Switches



- Verwendung von Switches ist bei Ethernet ab 100 Mb/s üblich
  - ermöglicht Vollduplex-Betrieb
    - in diesem Fall treten keine Kollisionen mehr auf
    - aber: Switch muß ggf. Frames zwischenspeichern
- Möglich auch: gemischter Betrieb mit Switches und Hubs
  - Auswirkung von Kollisionen sind auf den Bereich des Hubs eingeschränkt (**Kollisionsdomäne**)

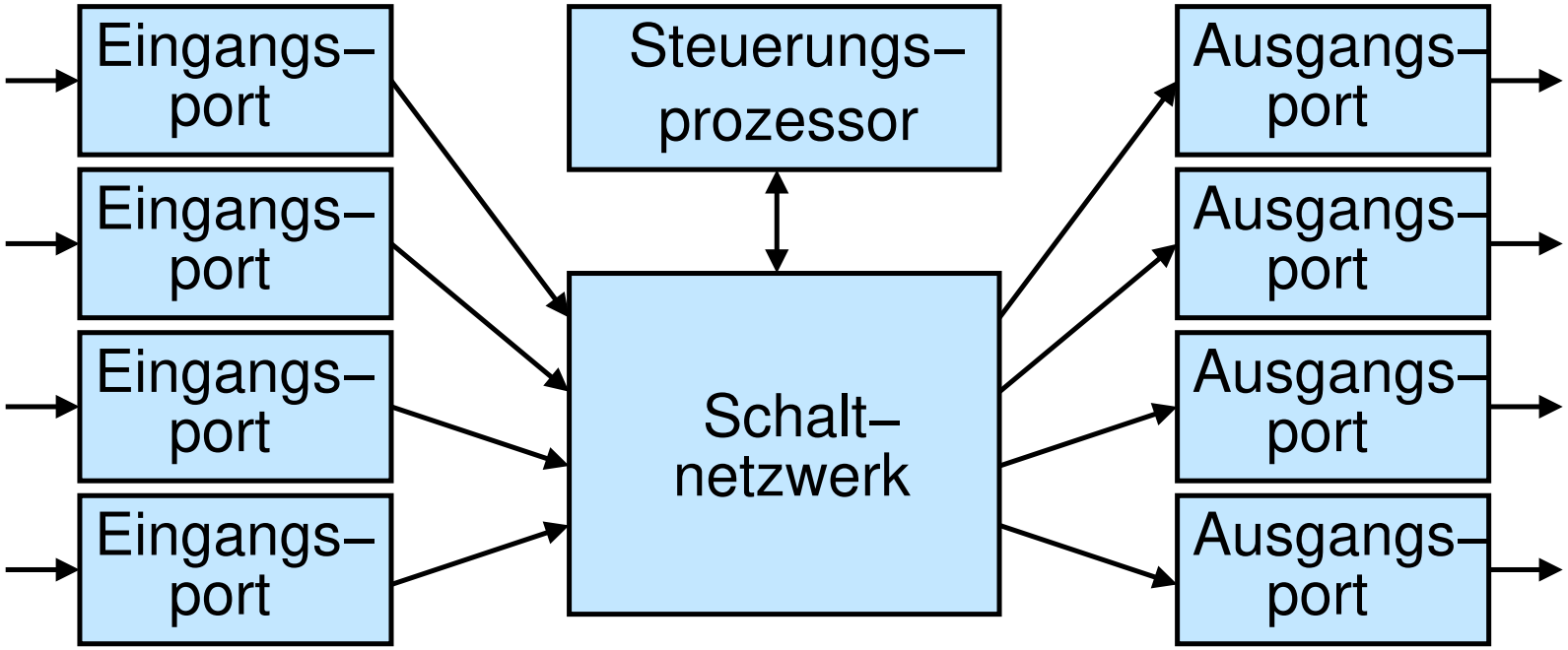
Ein (Ethernet-)LAN mit Switches



- Verwendung von Switches ist bei Ethernet ab 100 Mb/s üblich
  - ermöglicht Vollduplex-Betrieb
    - in diesem Fall treten keine Kollisionen mehr auf
    - aber: Switch muß ggf. Frames zwischenspeichern
- Möglich auch: gemischter Betrieb mit Switches und Hubs
  - Auswirkung von Kollisionen sind auf den Bereich des Hubs eingeschränkt (**Kollisionsdomäne**)

4.3 Implementierung von Switches

- Typischer Aufbau:

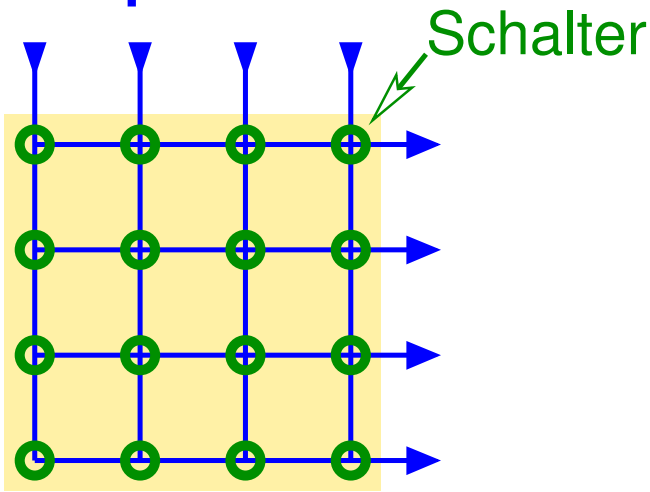


- Eingangsports analysieren Header, programmieren Schaltnetzwerk
- Pufferung in den (Ausgangs-)Ports und/oder im Schaltnetzwerk
- Steuerungsprozessor: u.a. Aufbau Weiterleitungstabelle, STP

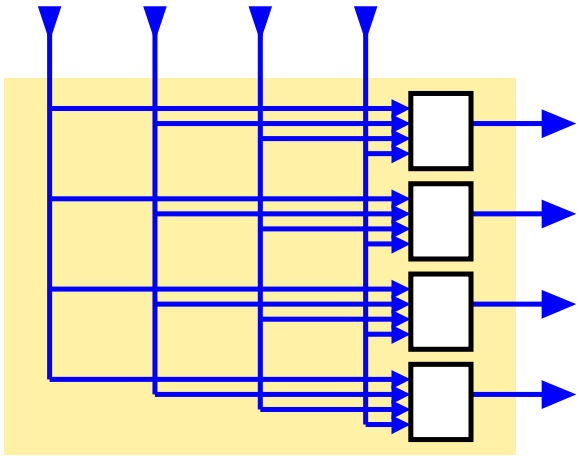
Realisierung des Schaltnetzwerks

- Gemeinsamer Bus / gemeinsamer Speicher
  - Bus- bzw. Speicherbandbreite begrenzt den Gesamtdurchsatz
- Crossbar
  - jeder Eingangsport kann an jeden Ausgangsport durchgeschaltet werden

Prinzip:



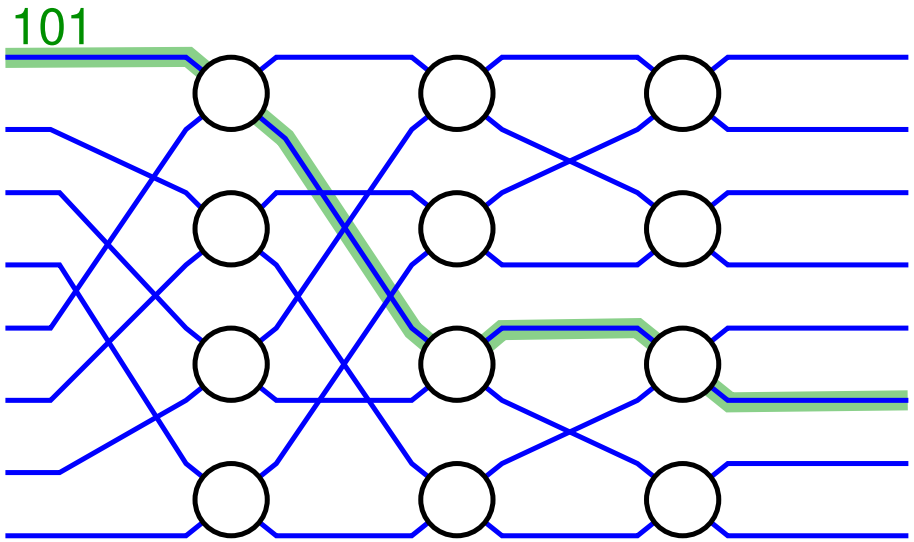
Mit Ausgangspufferung:



  - Problem: Speicherbandbreite der Ausgangspuffer

Realisierung des Schaltnetzwerks ...

- Eigenvermittelnde Schaltnetzwerke
  - Verwendung von 2x2-Schaltelementen, z.B. Banyan-Netzwerk:



  - Frames erhalten internen Header, der den Weg durch das Schaltnetz beschreibt
    - im Beipiel: 0 ≙ oberer Ausgang, 1 ≙ unterer Ausgang
  - Vorsortierung der Frames vermeidet interne Kollisionen

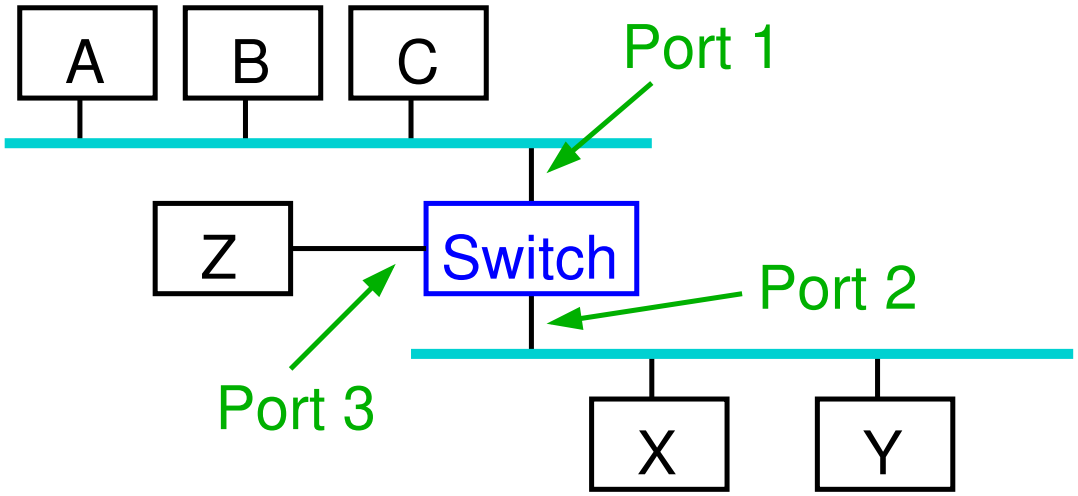
Queueing Strategien

- Eine Warteschlange mit FIFO-*Queueing* (und *Tail Drop*)
  - Frames werden in FIFO-Reihenfolge übertragen
  - bei vollem Puffer: neu ankommender Frame wird verworfen
- Mehrere Warteschlangen für unterschiedliche Frame-Typen
  - beim Ethernet i.a. im VLAN-Header angegeben (☞ **4.6**)
  - z.B.: mehrere FIFO-Warteschlangen mit Prioritäten
  - alternativ: mehrere Warteschlangen mit *Fair Queueing*
    - Grundidee: *Round-Robin*-Abarbeitung
    - wegen unterschiedlicher Framegrößen: simuliere bitweises *Round-Robin*
    - ggf. auch mit Gewichtung der Warteschlangen: jede Warteschlange erhält einen bestimmten Bandbreitenanteil

★★★

Automatisches Erstellen der Weiterleitungstabelle

- Beispiel:



Host	Port
A	1
B	1
C	1
X	2
Y	2
Z	3

- Switch untersucht die Quelladresse jedes eingehenden Frames
  - falls nötig, Erzeugung bzw. Aktualisierung eines Tabelleneintrags
- Eintrag für eine Adresse wird gelöscht, wenn längere Zeit kein Frame mit dieser Quelladresse ankommt

★★★

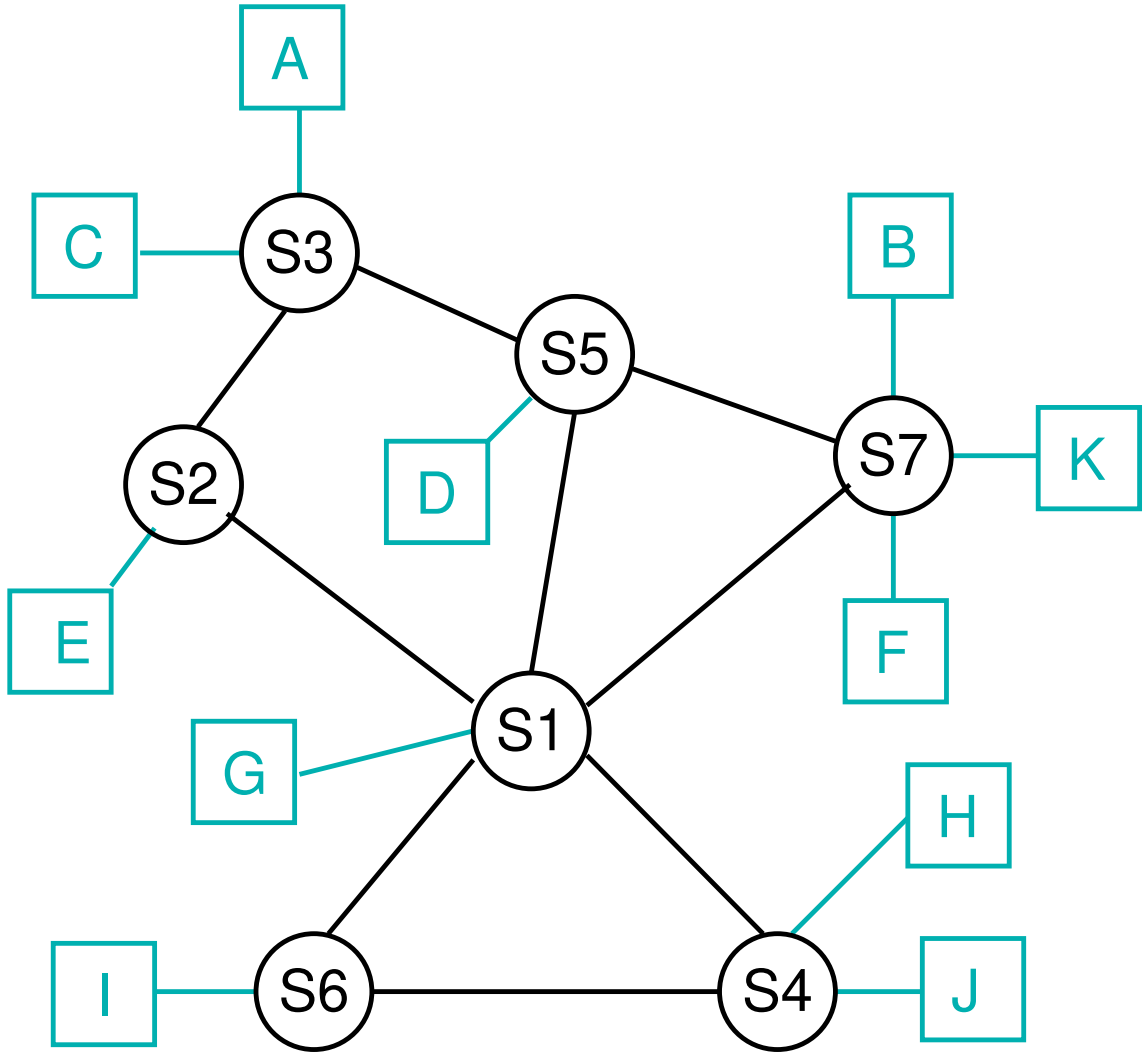
Verhalten beim Eintreffen eines Frames

- Quell- und Ziel-Port identisch:
  - Frame verwerfen
- Quell- und Ziel-Port verschieden:
  - Frame an Ziel-Port weiterleiten
- Ziel-Port unbekannt:
  - weiterleiten an alle Ports (außer den Empfangsport)
- Broadcast-Frames werden immer an alle Ports geleitet
- Weiterleitungstabelle kann begrenzte Größe haben
  - Vollständigkeit ist nicht notwendig
  - Tabelle dient nur als Cache für aktive Knoten

★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

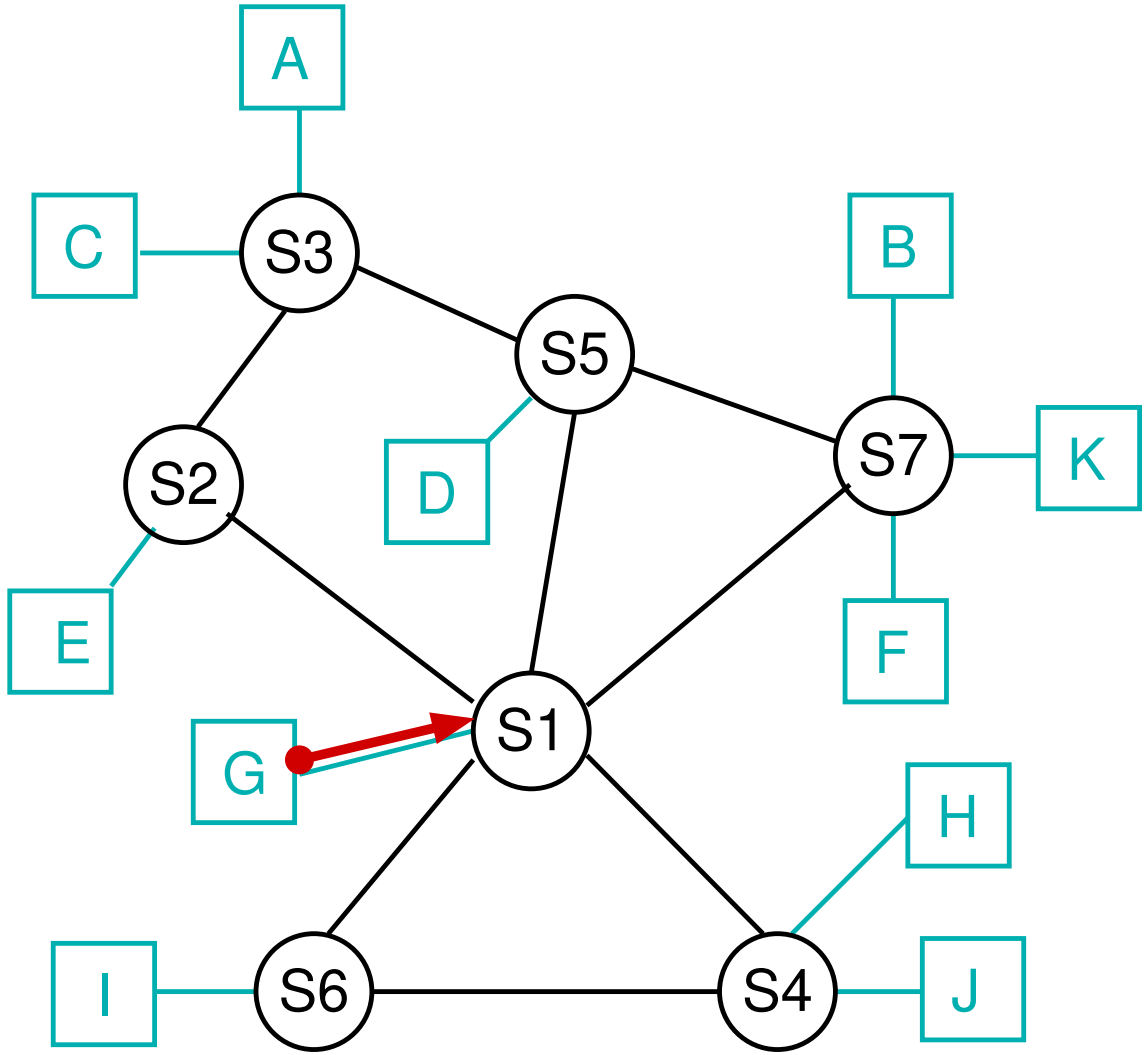
- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)



★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

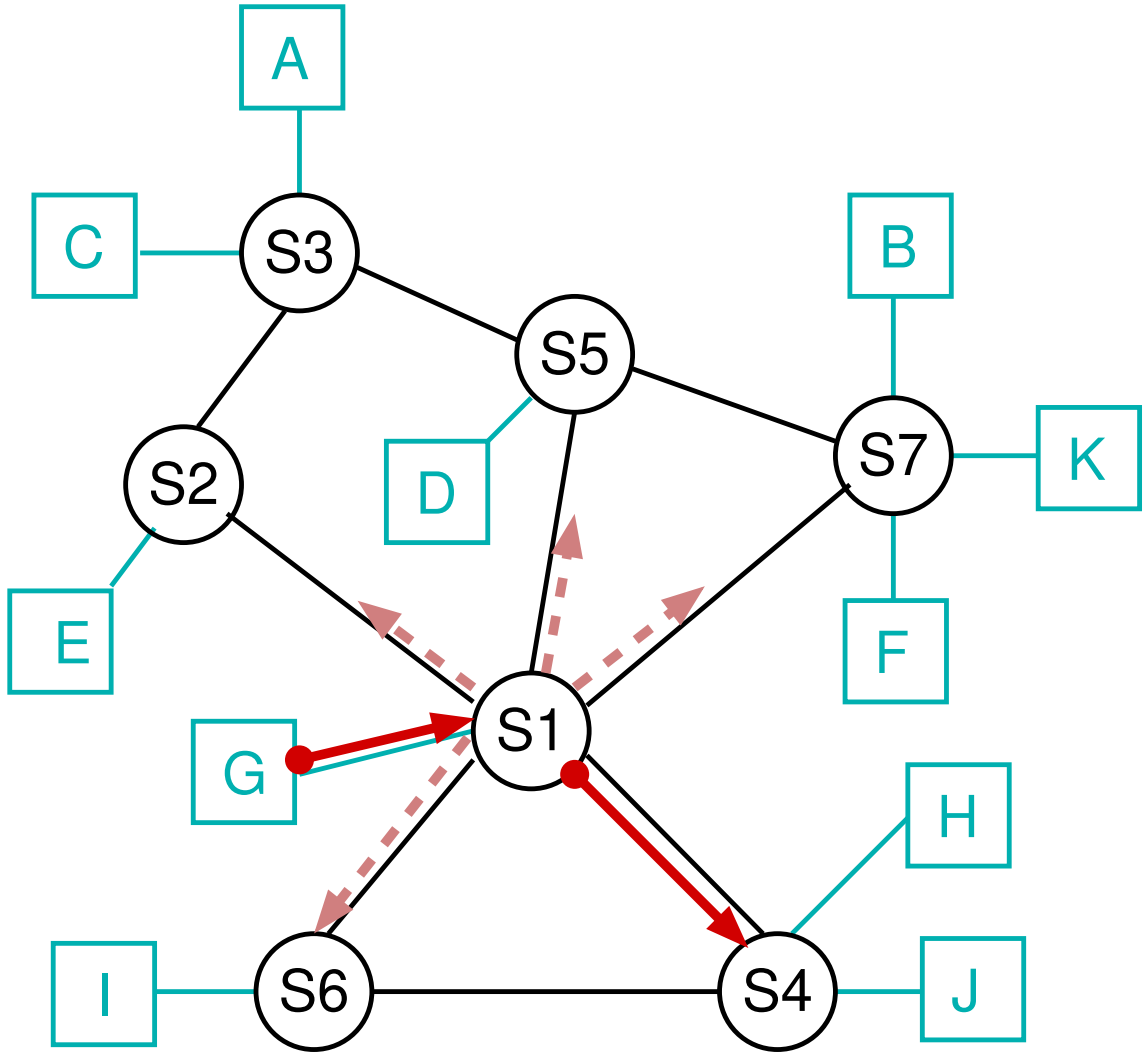
- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)



★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

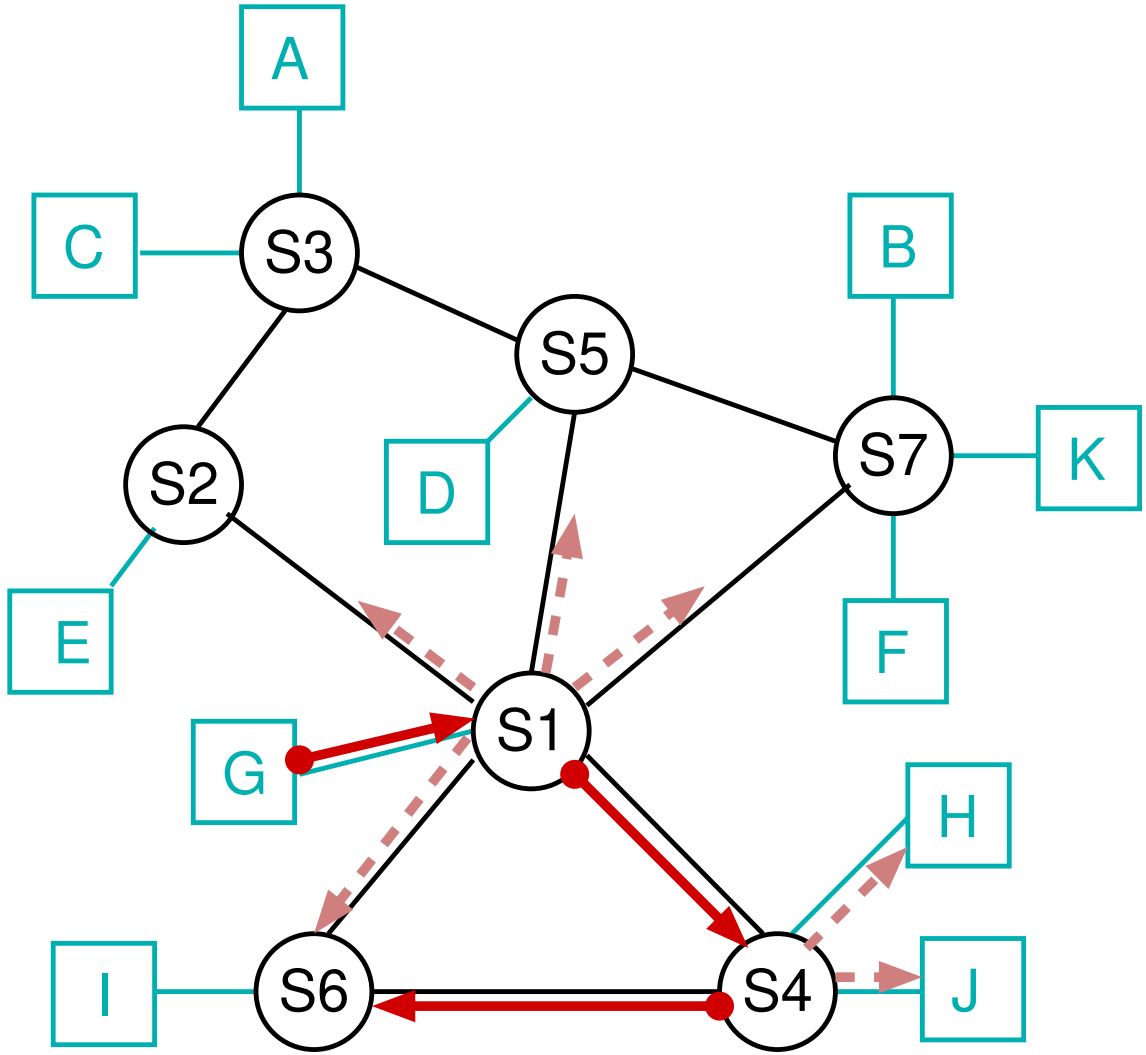
- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)



★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

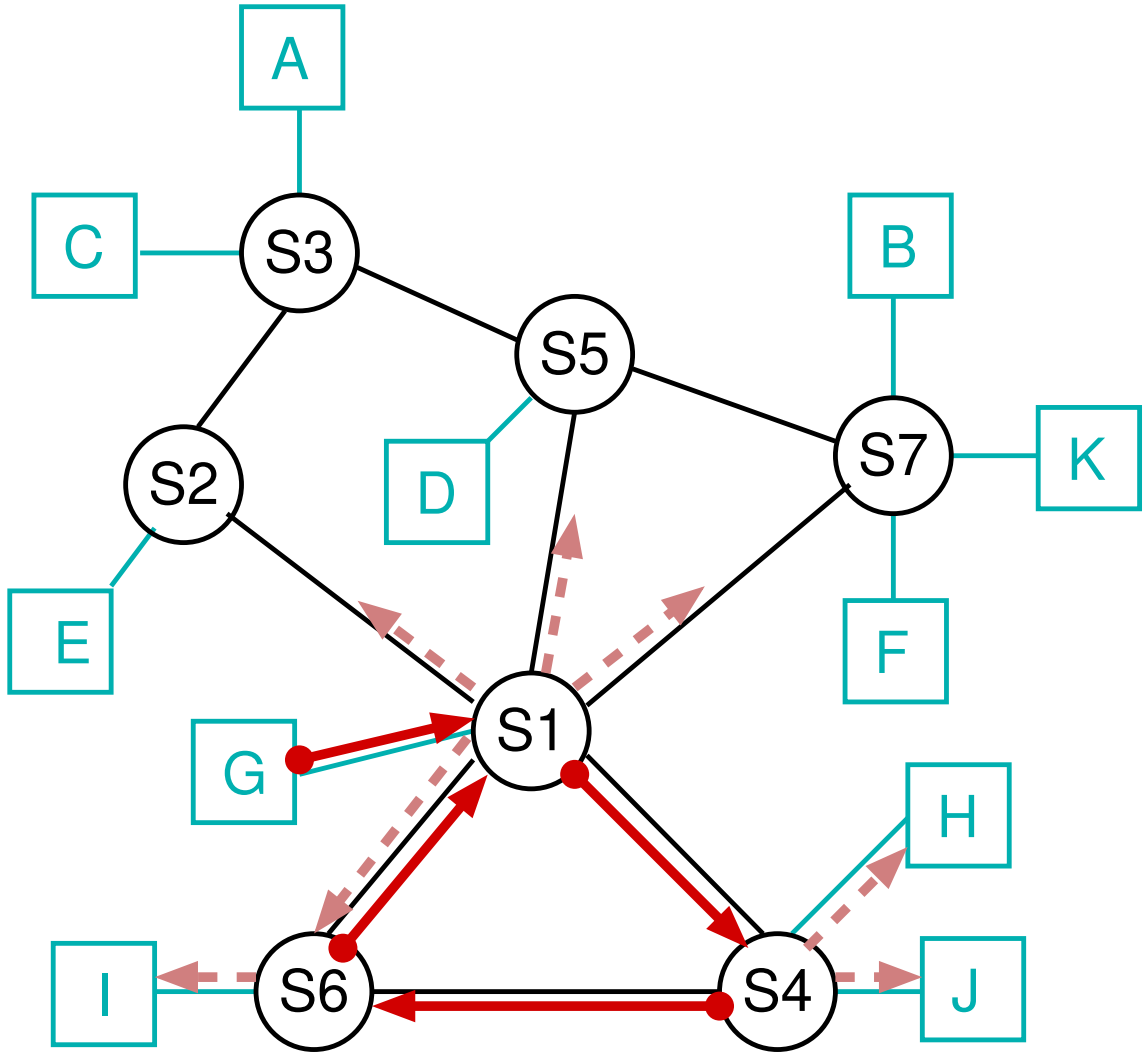
- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)



★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

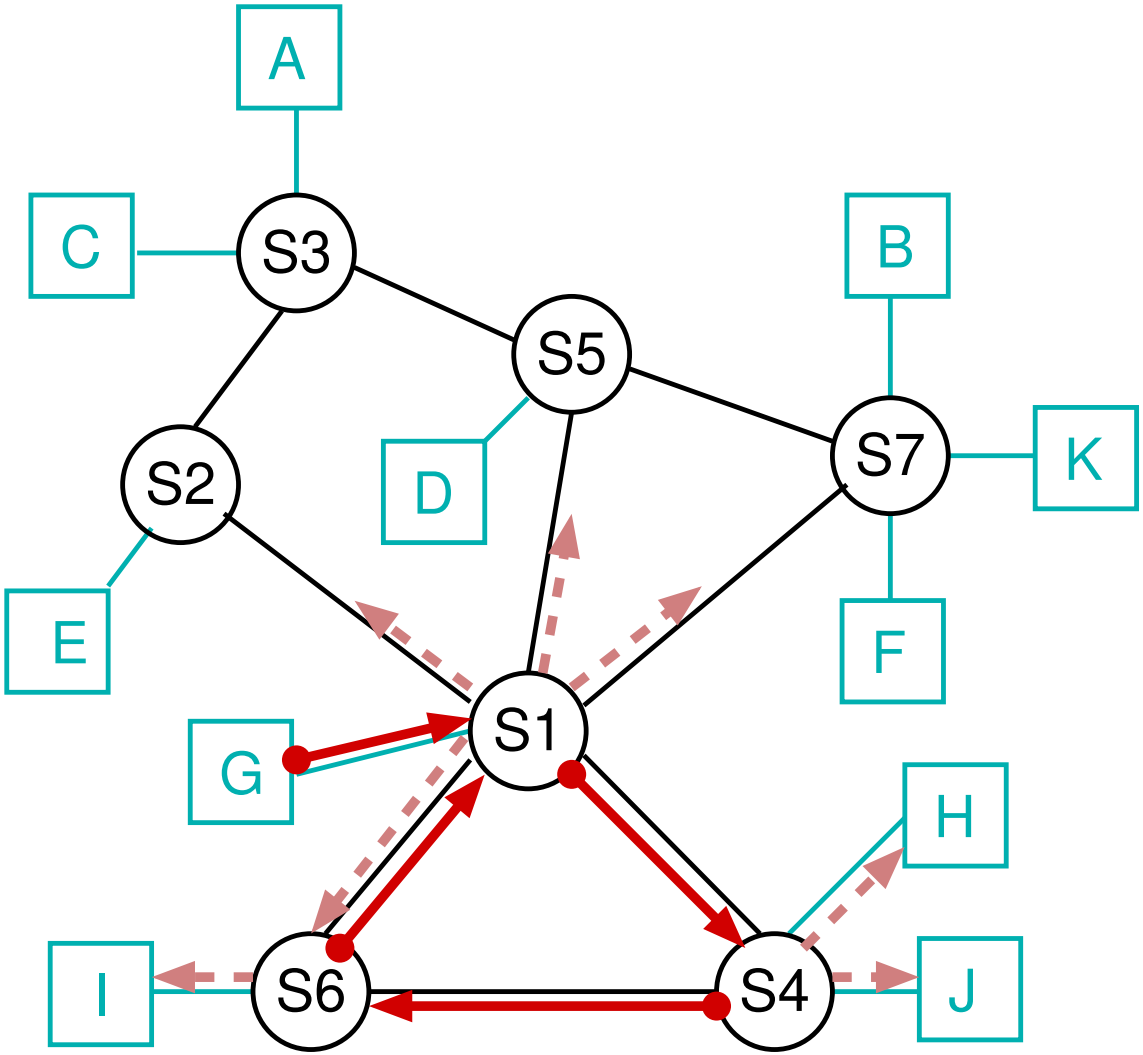
- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)



★★★

Problem bei lernenden Switches: Zyklen

- Z.B. S1 – S4 – S6
- Frame von G mit unbekanntem Ziel läuft ewig im Kreis (Broadcast-Sturm)

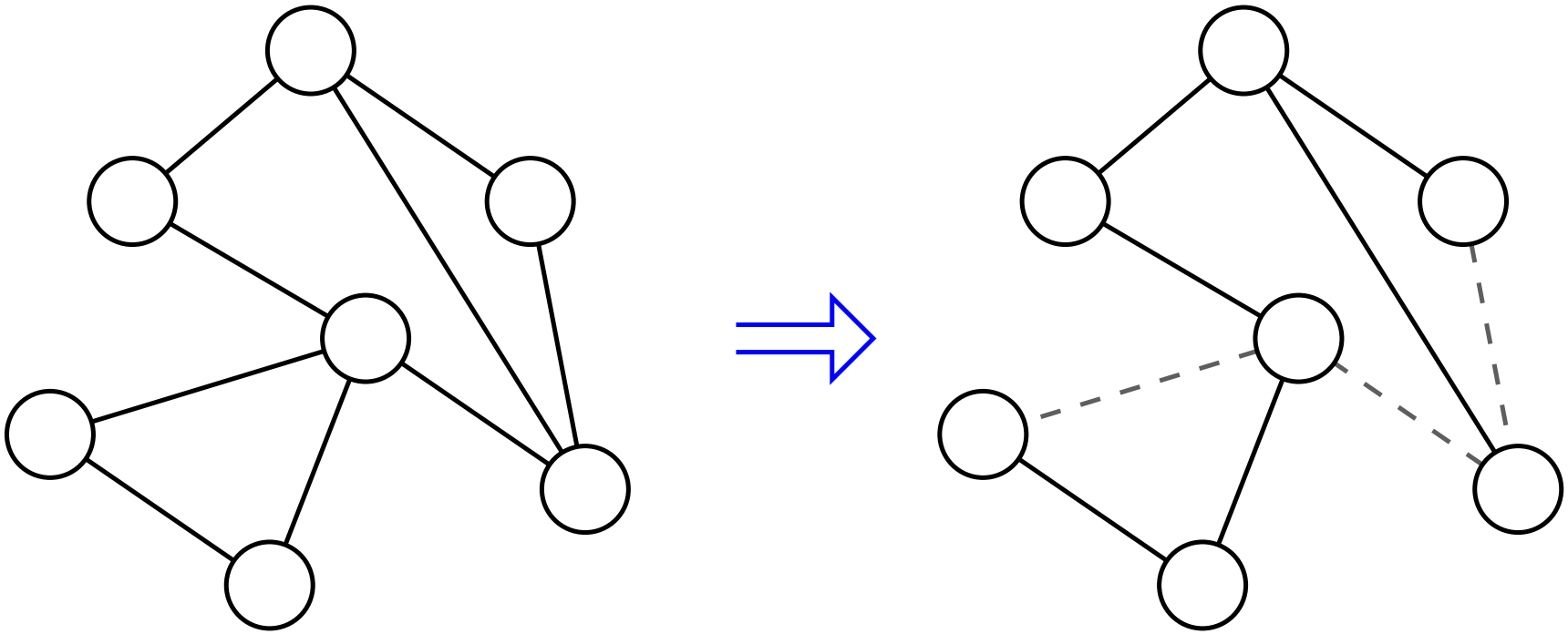


Abhilfe: *Spanning-Tree*-Algorithmus

- Reduziert das Netzwerk auf einen zyklenfreien Graphen (Baum)
- Einige Ports der Switches werden deaktiviert

Aufspannender Baum

- Zyklischer Graph und aufspannender Baum:



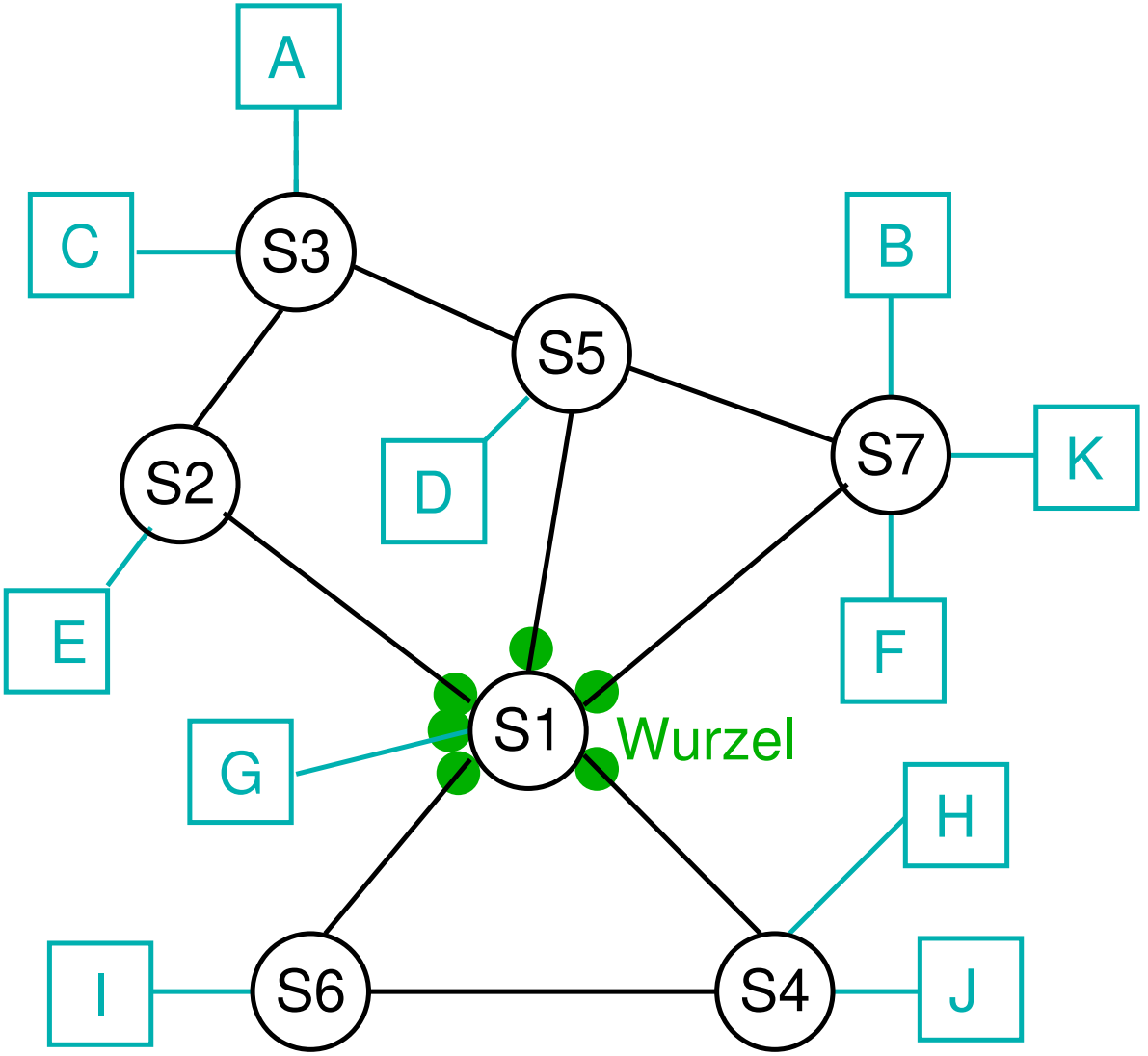
- der aufspannende Baum ist nicht eindeutig

★★

Idee des Algorithmus

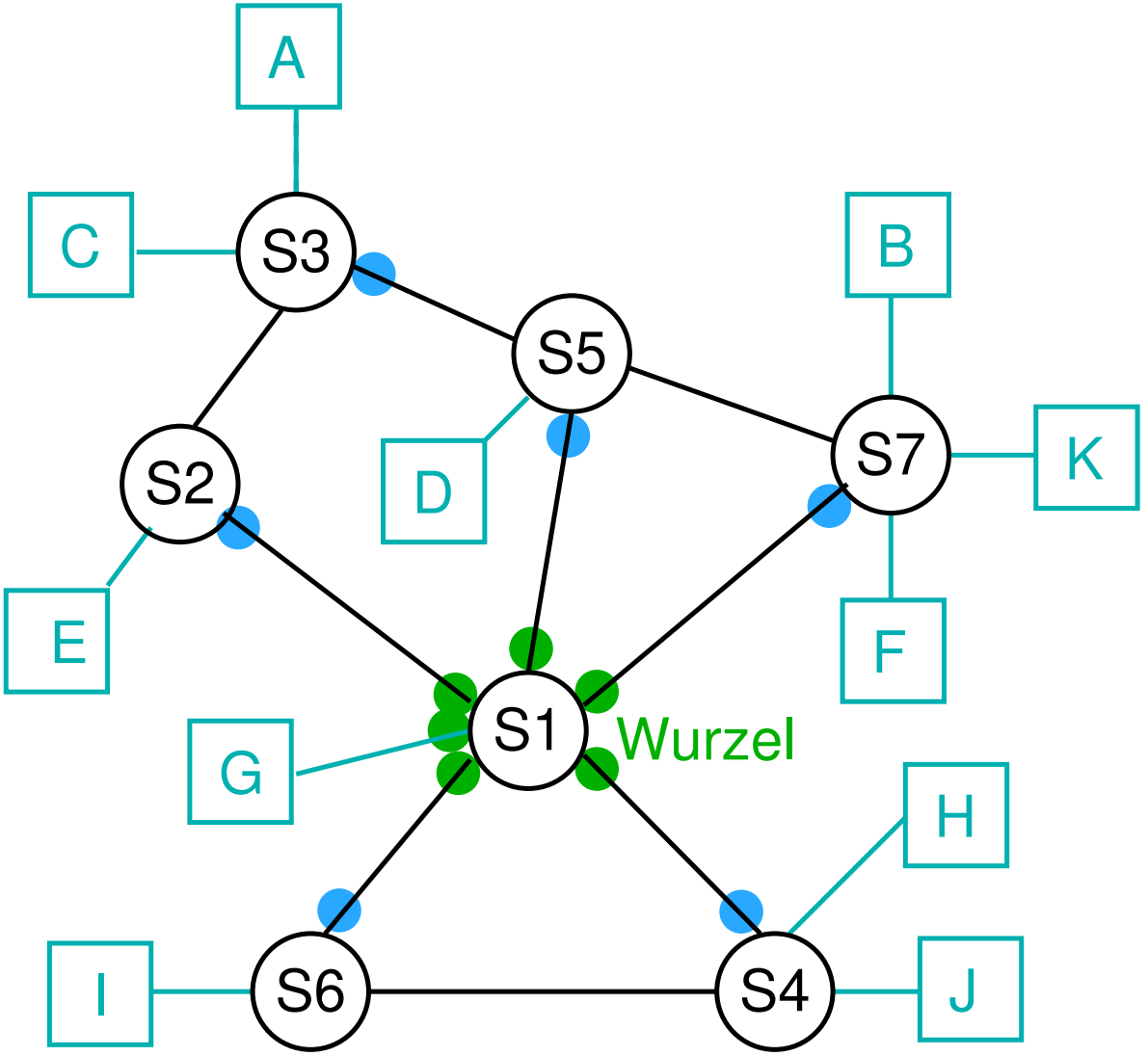
- Jeder Switch hat eine eindeutige Kennung (z.B. S1, S2)
- Wähle den Switch mit der kleinsten Kennung als Wurzel
- Jeder Switch bestimmt seinen ***Root Port***
  - der Port mit der geringsten Entfernung zur Wurzel
  - bei Gleichheit entscheidet Port-Priorität bzw. Port-Nummer
- Wähle für jedes LAN-Segment den Port des Switches mit der geringsten Entfernung zur Wurzel als ***Designated Port***
  - bei Gleichheit entscheidet die Switch-Kennung
- Alle anderen Ports sind ***Non-Designated Ports***
  - diese Ports sind blockiert (*blocking*) und leiten keine Frames weiter

Aufspannender Baum des Beispielnetzes



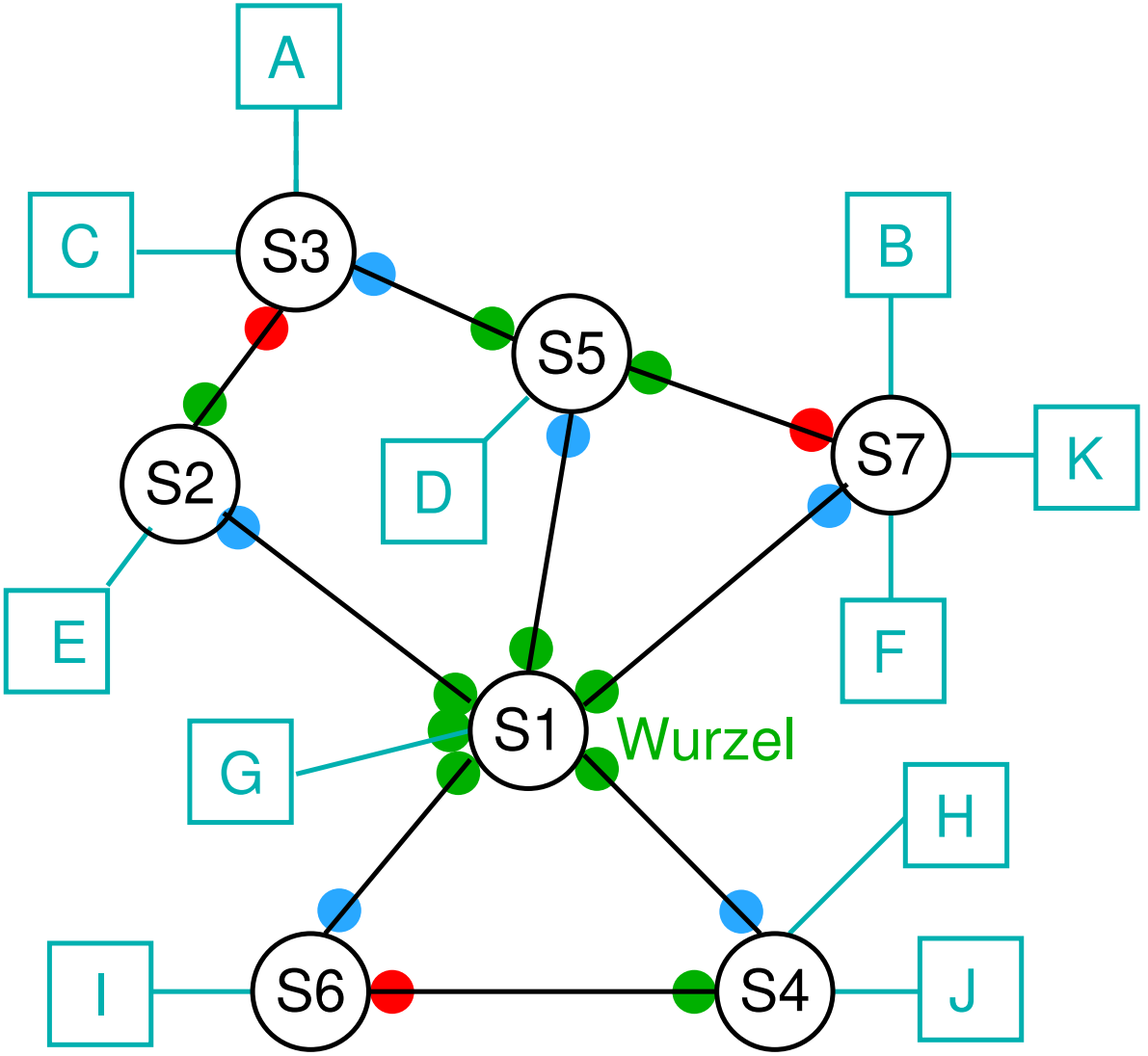
- Root Port
- Non-Designated Port
- Designated Port

Aufspannender Baum des Beispielnetzes



- Root Port
- Non-Designated Port
- Designated Port

Aufspannender Baum des Beispielnetzes

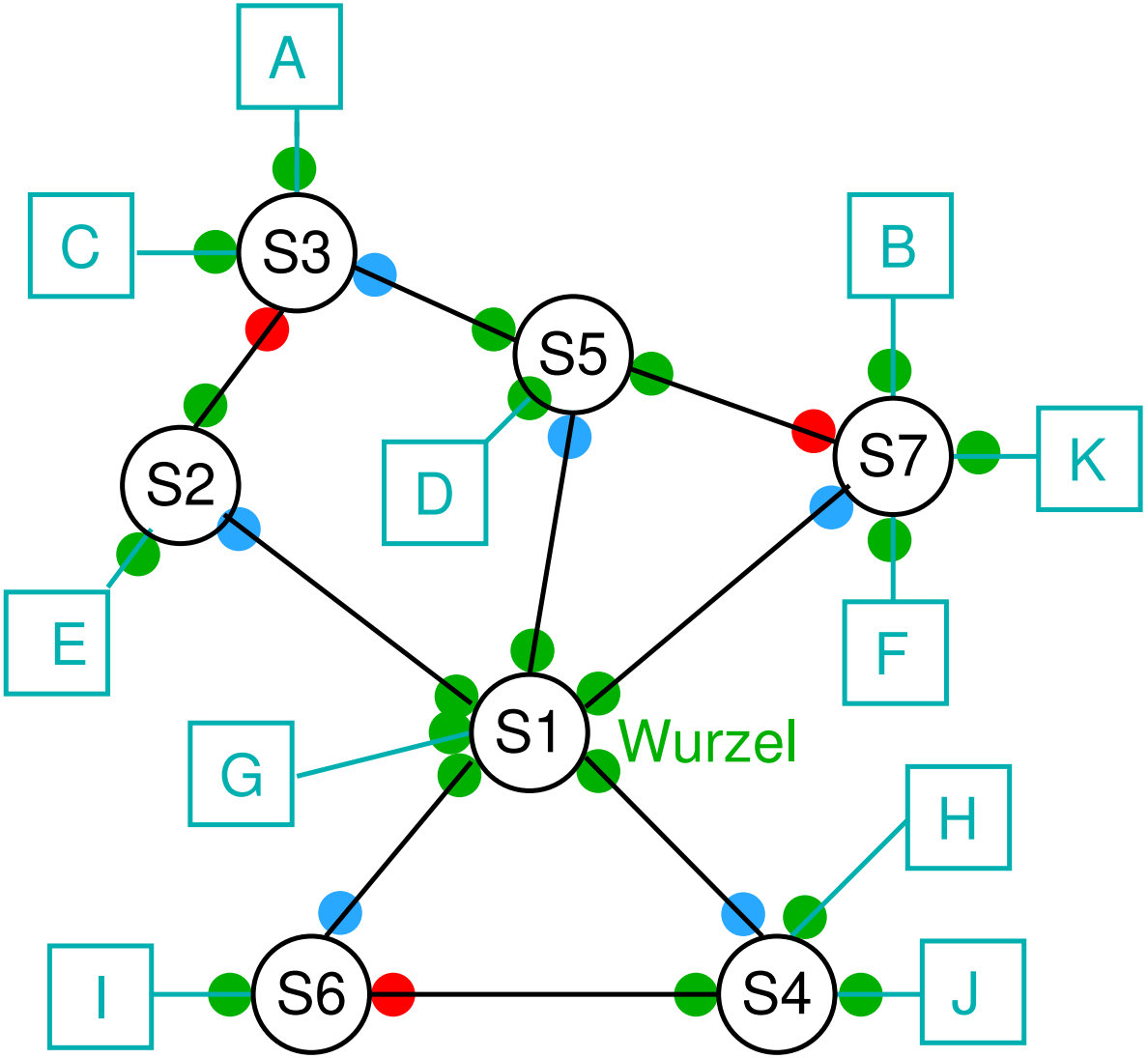


Root Port

Non-Designated Port

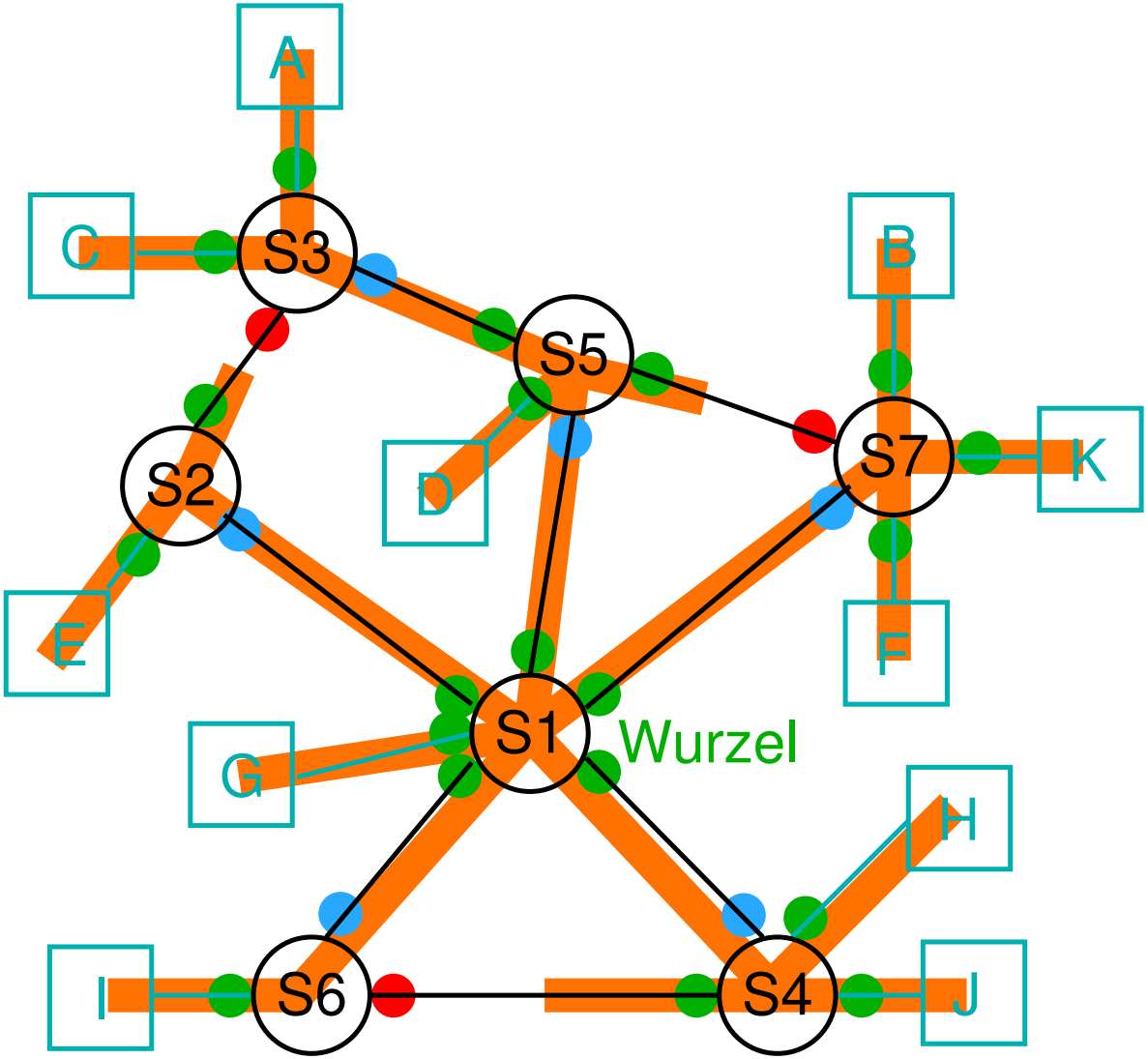
Designated Port

Aufspannender Baum des Beispielnetzes



- Root Port
- Non-Designated Port
- Designated Port

Aufspannender Baum des Beispielnetzes



Root Port

Non-Designated Port

Designated Port

Rechnernetze I

SoSe 2025

15.05.2025

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

Stand: 12. Mai 2025

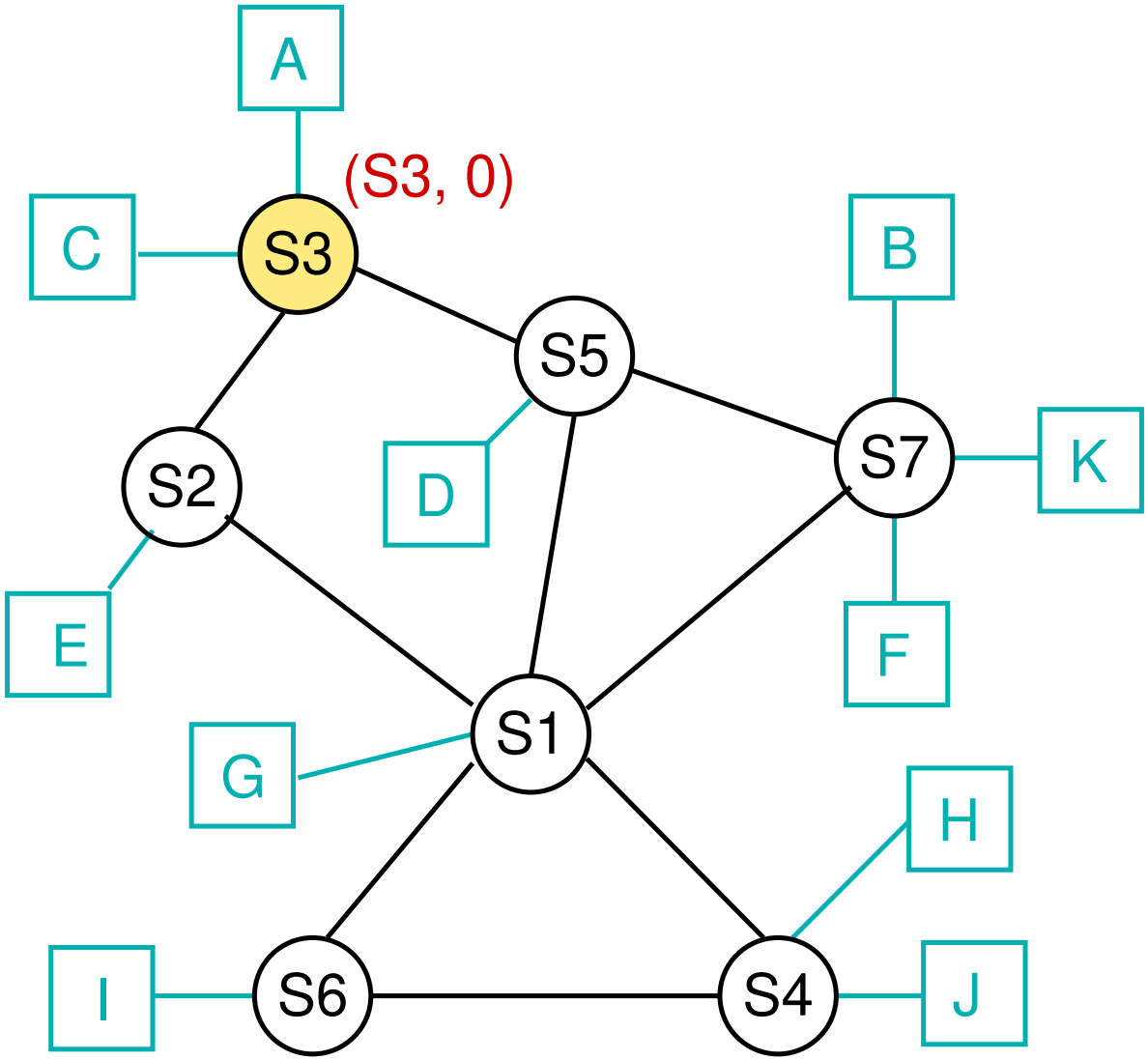
Spanning-Tree-Protokoll (STP)

- Die Knoten tauschen Konfigurations-Nachrichten aus:
  - Kennung des sendenden Switches
  - vermutete Wurzel-Kennung
  - eigene Entfernung zu dieser Wurzel
- Jeder Switch behält die beste Nachricht.
  Besser heißt dabei:
  - Wurzel-Kennung kleiner, oder
  - Wurzel-Kennung gleich, Entfernung kleiner, oder
  - Wurzel-Kennung und Entfernung gleich, Sender-Kennung kleiner
- Jeder Switch startet als Wurzel, bis dies widerlegt ist

Spanning-Tree-Protokoll (STP) ...

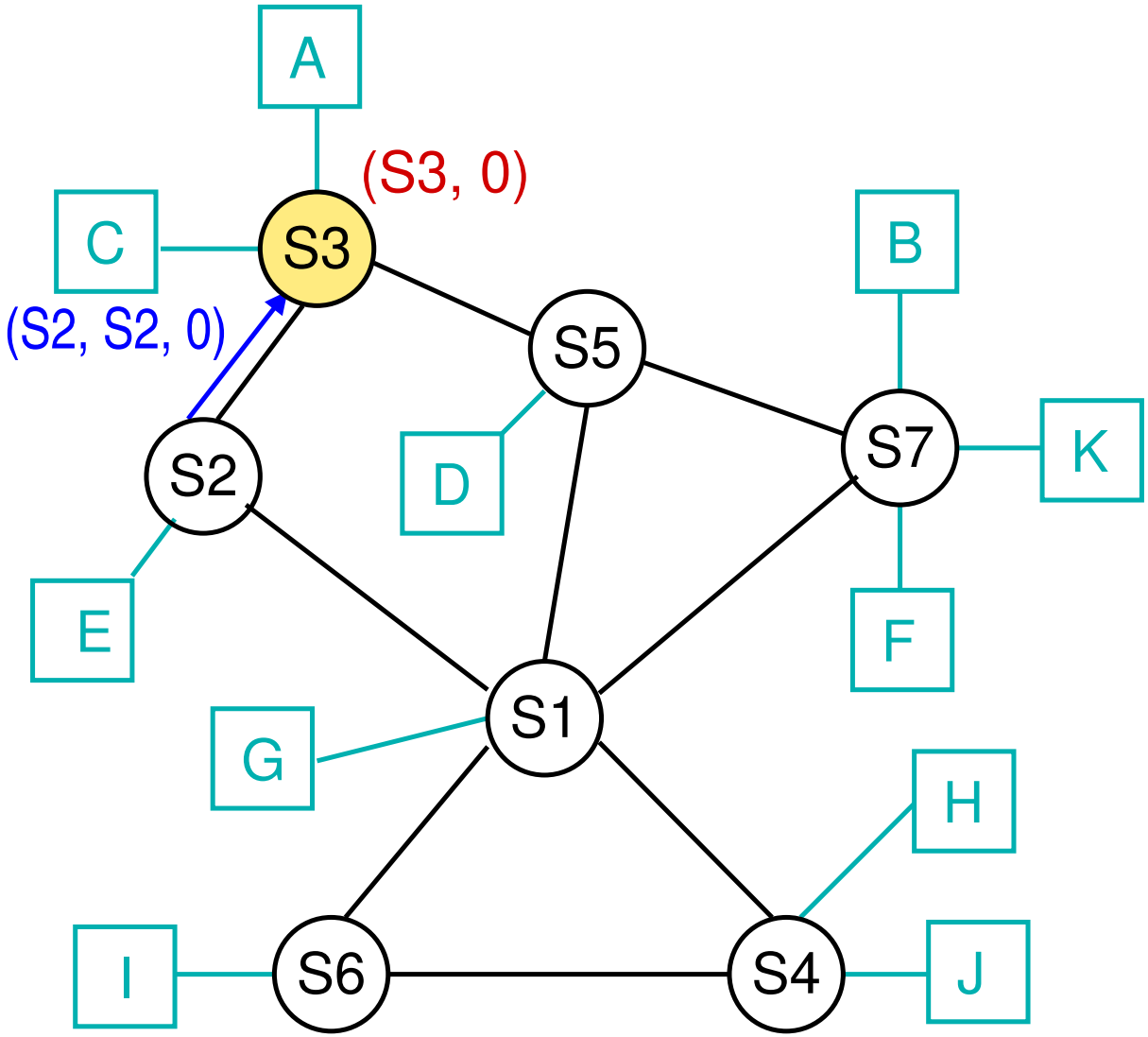
- Wenn ein Switch erfährt, daß er nicht die Wurzel ist, stellt er das Generieren von Nachrichten ein, leitet Nachrichten aber nach wie vor weiter
  - am Ende erzeugt nur noch die Wurzel Nachrichten
- Die Wurzel generiert weiter periodisch Konfigurations-Nachrichten
  - werden im Baum nur noch nach unten weitergegeben
  - automatische Rekonfiguration bei Ausfall der Wurzel
- Topologie-Änderungen werden von Switches zunächst an die Wurzel gesendet, diese gibt sie an alle weiter

Beispiel



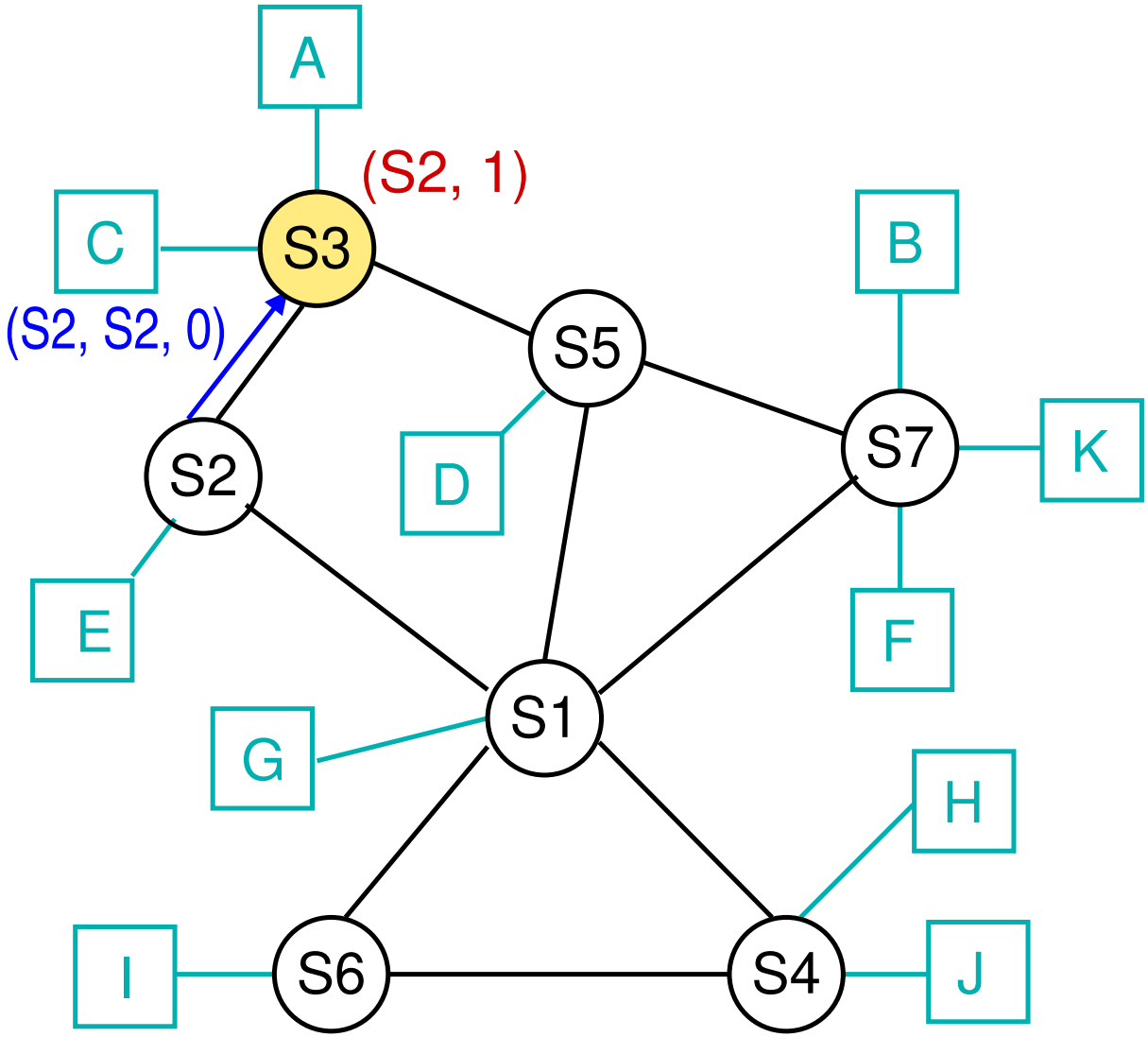
Beispiel

1. S2 → S3



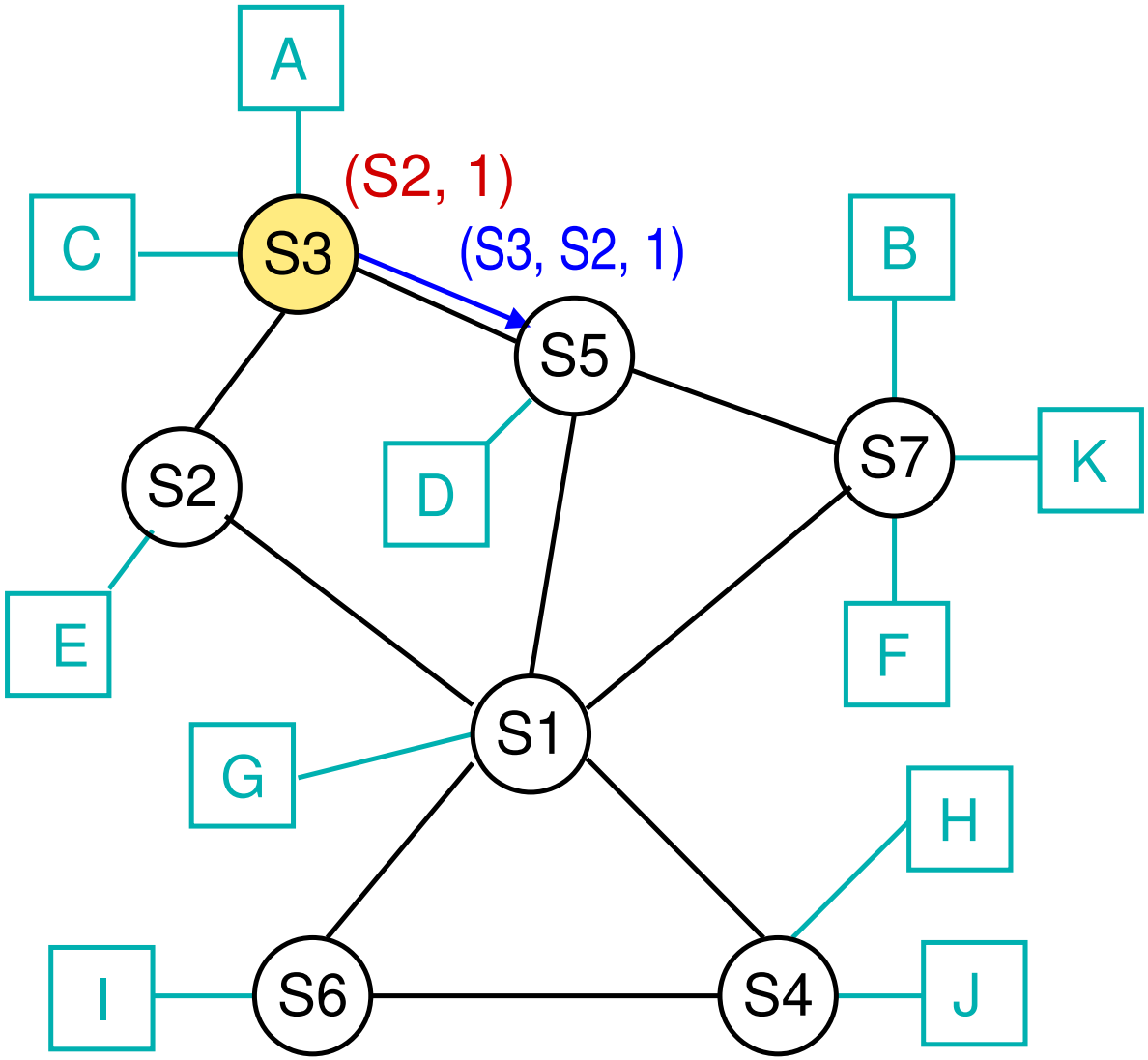
Beispiel

1. S2 → S3
2. S3: S2 ist Wurzel



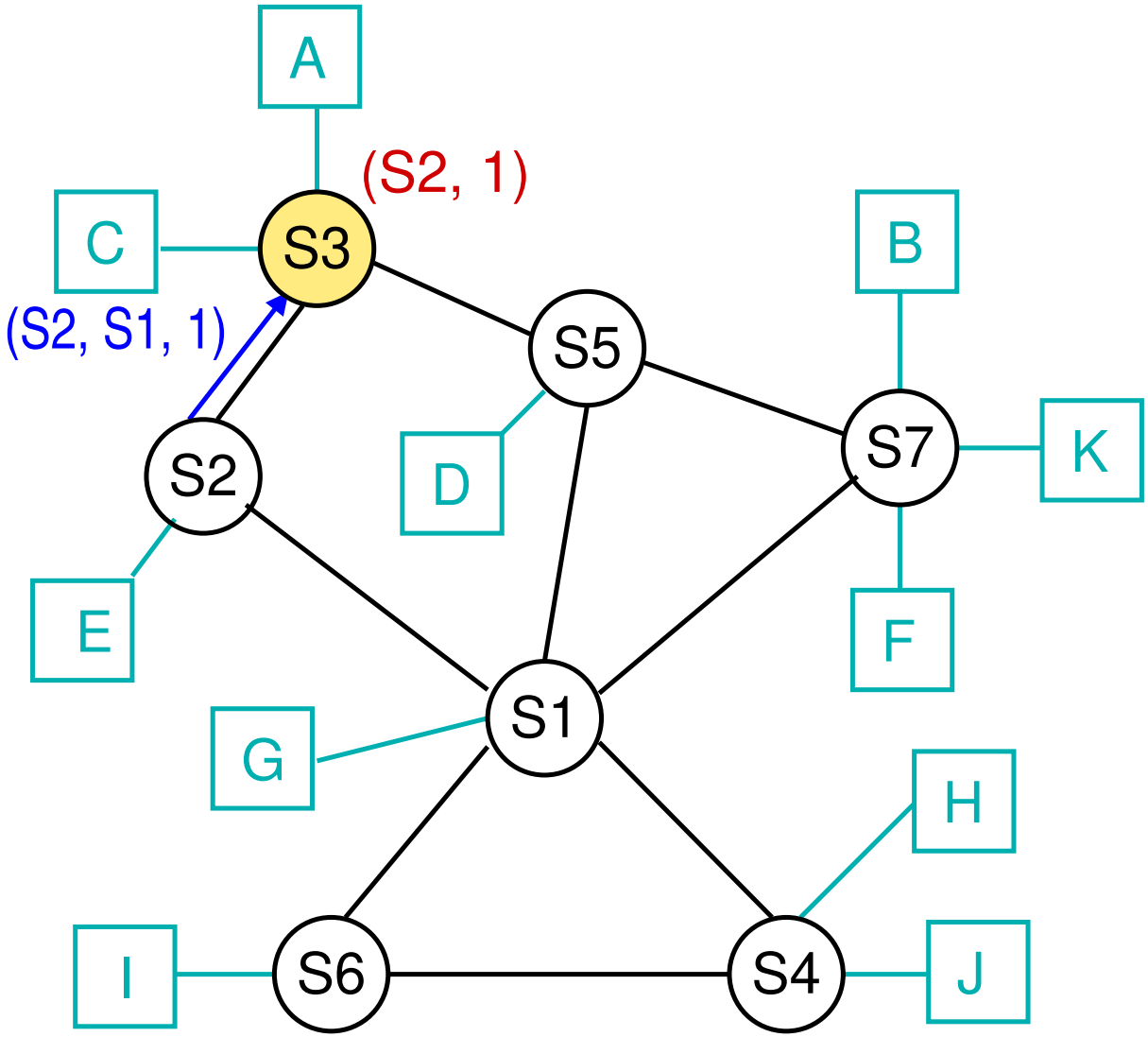
Beispiel

1. S2 → S3
2. S3: S2 ist Wurzel
3. S3 → S5



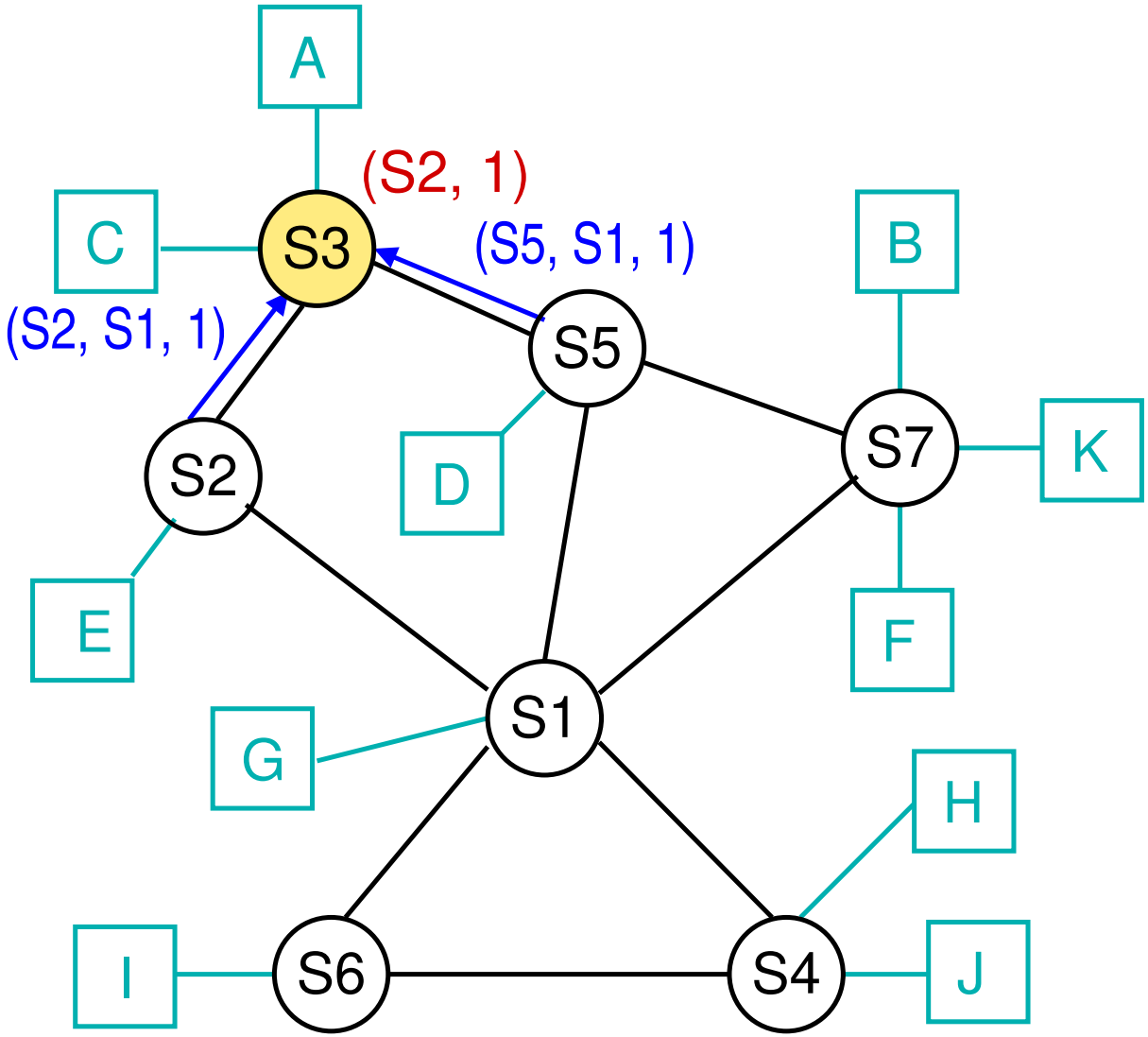
Beispiel

1. S2 → S3
2. S3: S2 ist Wurzel
3. S3 → S5
4. S2: S1 ist Wurzel
   S2 → S3



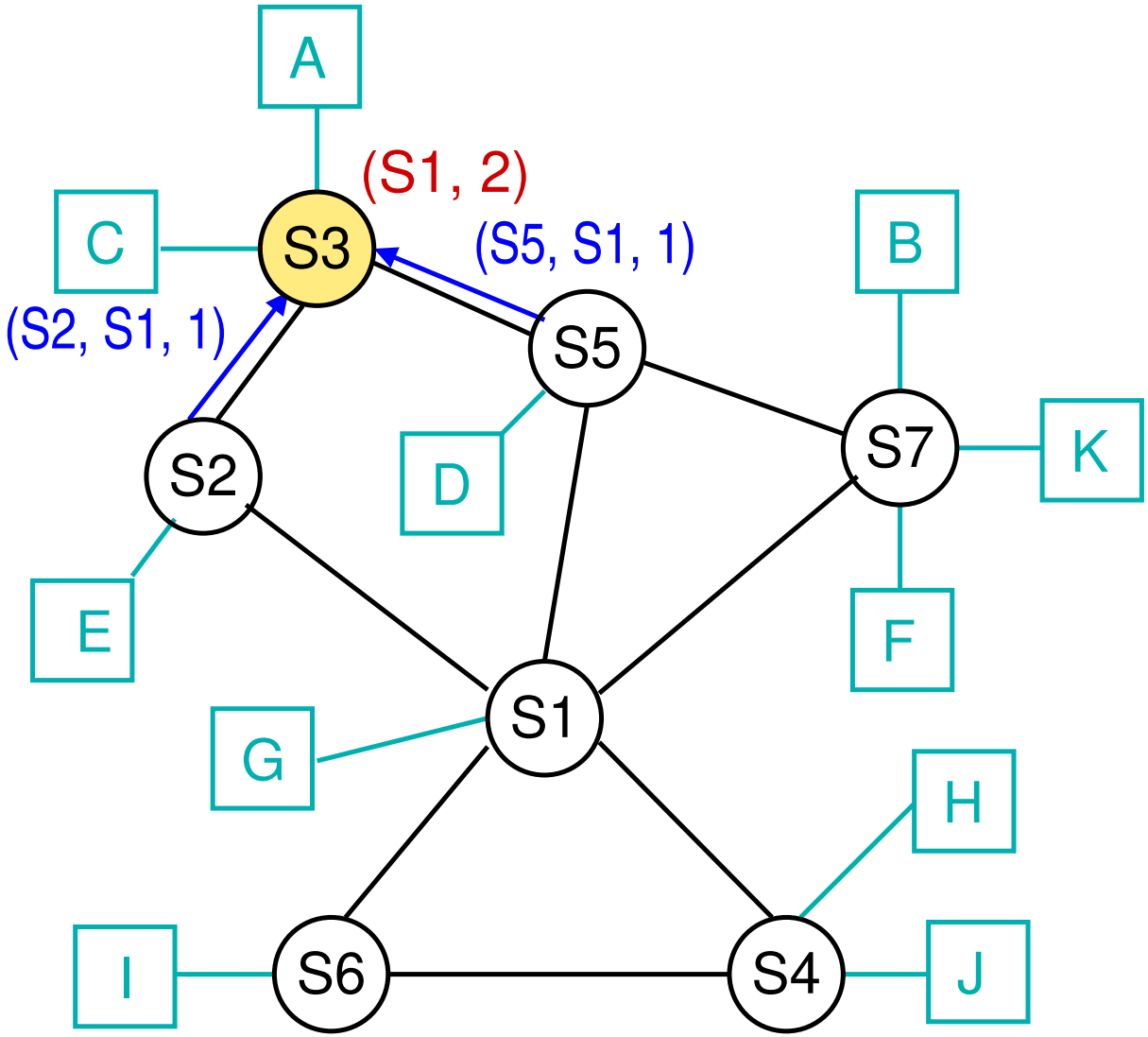
Beispiel

1. S2 → S3
2. S3: S2 ist Wurzel
3. S3 → S5
4. S2: S1 ist Wurzel
   S2 → S3
5. S5: S1 ist Wurzel
   S5 → S3



Beispiel

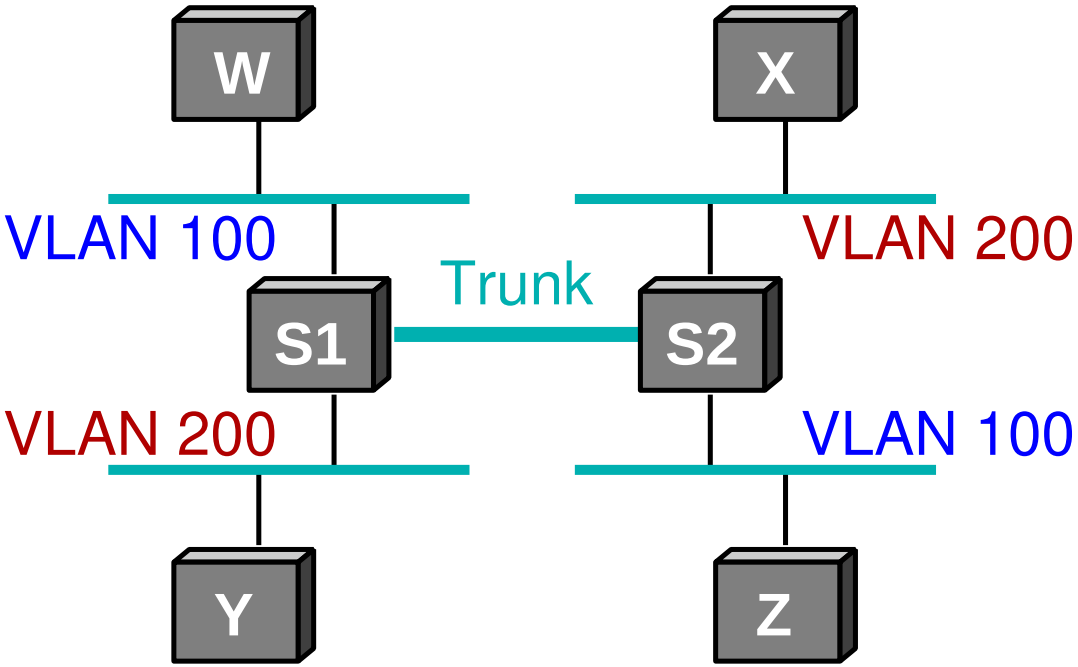
1. S2 → S3
2. S3: S2 ist Wurzel
3. S3 → S5
4. S2: S1 ist Wurzel
   S2 → S3
5. S5: S1 ist Wurzel
   S5 → S3
6. S3: S1 ist Wurzel
   S2, S5 näher an S1



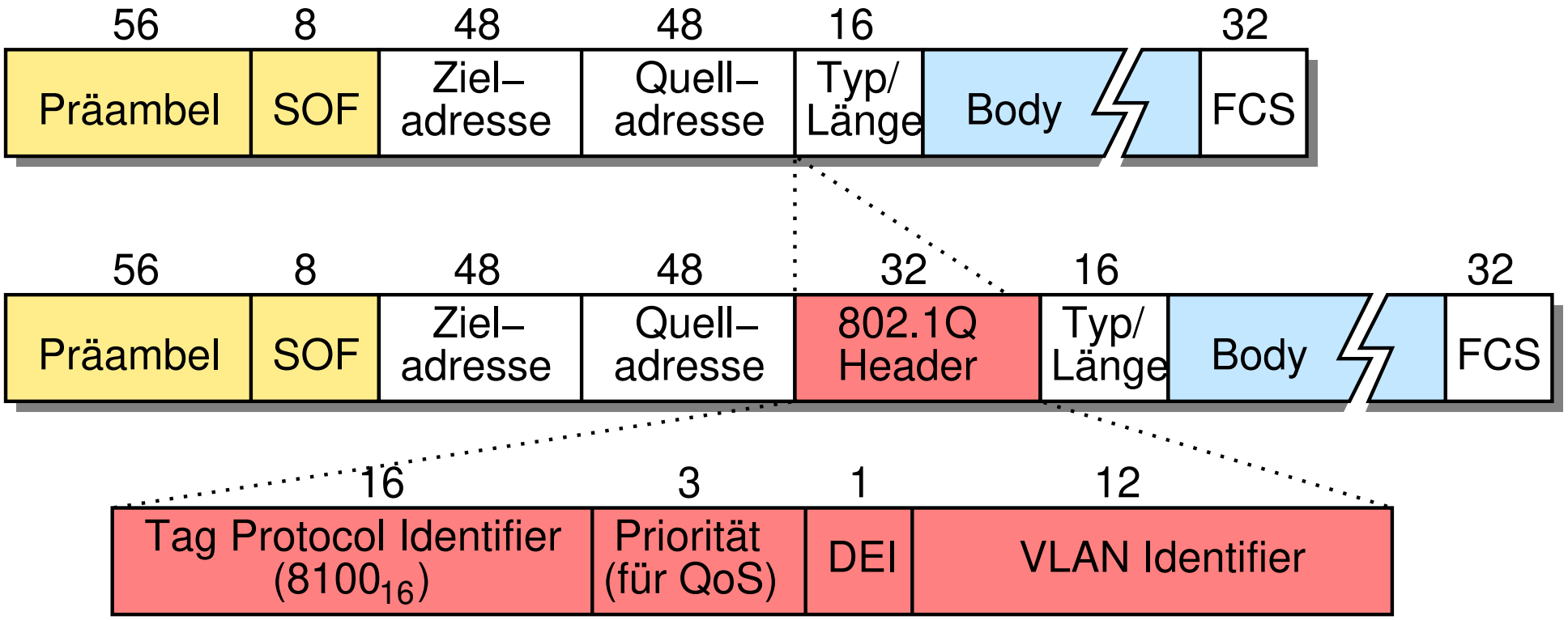
4.6 Virtuelle LANs (VLANs)

★★

- Ziele:
  - bessere Skalierung
  - höhere Sicherheit
- Jedes LAN erhält einen Bezeichner (VLAN-ID)
- Auf Trunk-Leitung: Switch fügt Header mit VLAN-ID ein bzw. entfernt ihn wieder
  - bei Ethernet: VLAN-ID wird **in** den Frame-Header eingefügt
- Frames werden nur an das LAN mit der korrekten VLAN-ID weitergeleitet
- LANs mit verschiedenen VLAN-IDs sind logisch getrennt
  - Kommunikation nur über Router möglich

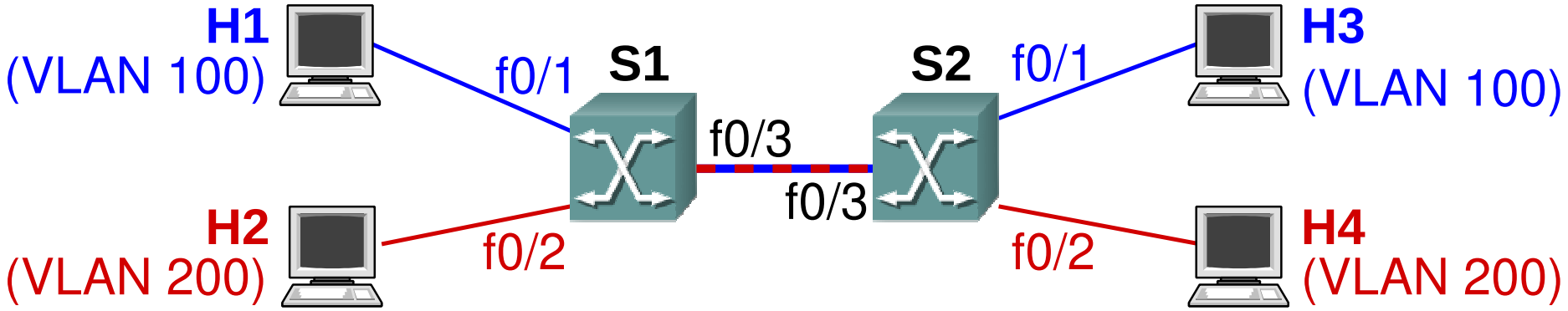


Ethernet-Frame mit VLAN-Tag (IEEE 802.1Q)



- *Tag Protocol Identifier* identifiziert „getagten“ Frame
- Prioritätsfeld erlaubt bevorzugte Weiterleitung im Switch
  - z.B. für Internet-Telefonie („*Voice over IP*“, VoIP)

Beispiel-Konfiguration




```
interface f0/1
   switchport mode access
   switchport access vlan 100
interface f0/2
   switchport mode access
   switchport access vlan 200
interface f0/3
   switchport mode trunk native vlan 100
```

Sende / akzeptiere nur Frames ohne Tag.

Füge bei eingehendem Frame Tag 100 an; sende ausgehenden Frame nur, falls er Tag 100 hat.

Frames ohne Tag gehen ins VLAN 100.

4.7 Zusammenfassung

- Weiterleitungstechniken
  - Datagrammvermittlung, virtuelle Leitungsvermittlung
- LAN-Switches
  - lernen Weiterleitungstabellen selbst
  - zur Vermeidung von Zyklen: *Spanning Tree Protokoll*
  - erlauben die Realisierung von virtuellen LANs

Nächste Lektion:

- *Internetworking*
- Das Internet-Protokoll (IP)