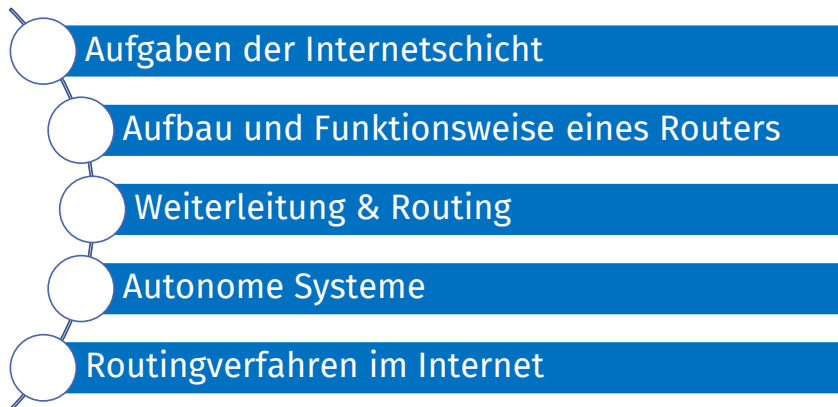


# Routing

## DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT

121

## Übersicht

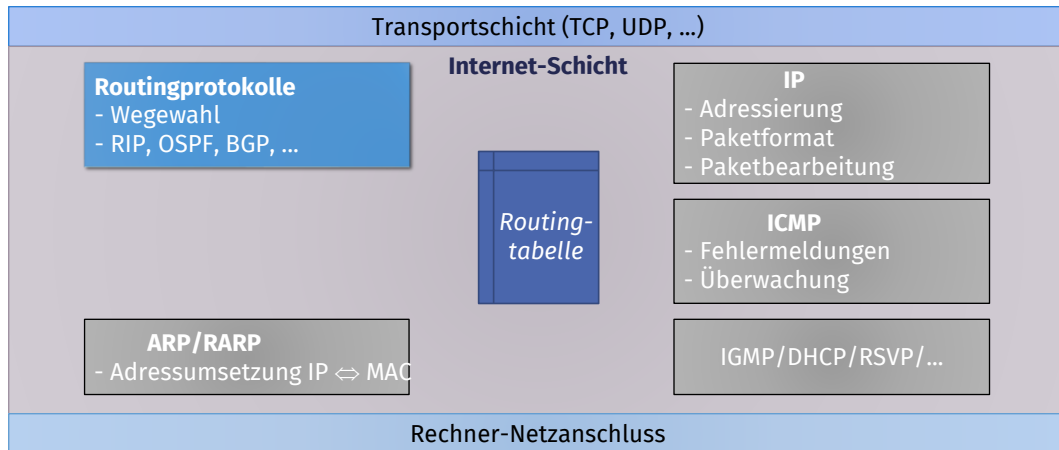


DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

122

122

# Die Internet-Schicht



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

123

123

## Ziel der Internetschicht

Ende-zu-Ende-Kommunikation über mehrere Teilnetze hinweg bereitstellen

### Aufgaben:

- **Wegewahl**
- **Weiterleitung**
- **weitere Funktionen**

➔ Funktionen eines Routers

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

124

124

# Wiederholung – Routingdienste in IP

## Source Routing (IPv4)/Routing Header Extension (IPv6)

- Vorgabe des gesamten Weges bis zum Ziel durch den Sender

### Probleme

- Eventuell suboptimaler Pfad
- Sicherheitslücke in IPv6
  - Direkte Pfadangabe erlaubt verschiedene *Denial-of-Service*-Angriffe auf zwei oder mehrere Router
  - Traffic wird durch einen erzwungenen Loop zwischen den Systemen vervielfacht
  - Führt zum Zurückziehen der Funktion in IPv6 im RFC 5095

→ Alternatives Routingverfahren notwendig

# Wiederholung – Weiterleitung bei IP

## Festlegungen

- Jeder Knoten trifft Weiterleitungsentscheidungen
- Traditionell nur Ziel-IP-Adresse für Entscheidung relevant
  - Heute teilweise zusätzliche Policies
- Jede Komponente bestimmt nur den nächsten Knoten, nicht den gesamten Weg

## Zwei Arten der Weiterleitung

- Zielknoten befindet sich im gleichen Subnetz
  - **direkte Zustellung**
- Zielknoten ist nur über Router/Gateway zu erreichen
  - **indirekte Zustellung** über mehrere Router
  - Paket an nächsten Router adressiert

# Was ist ein Router?

Gerät zur Kopplung von Netzwerken der Internetschicht

Ermöglicht

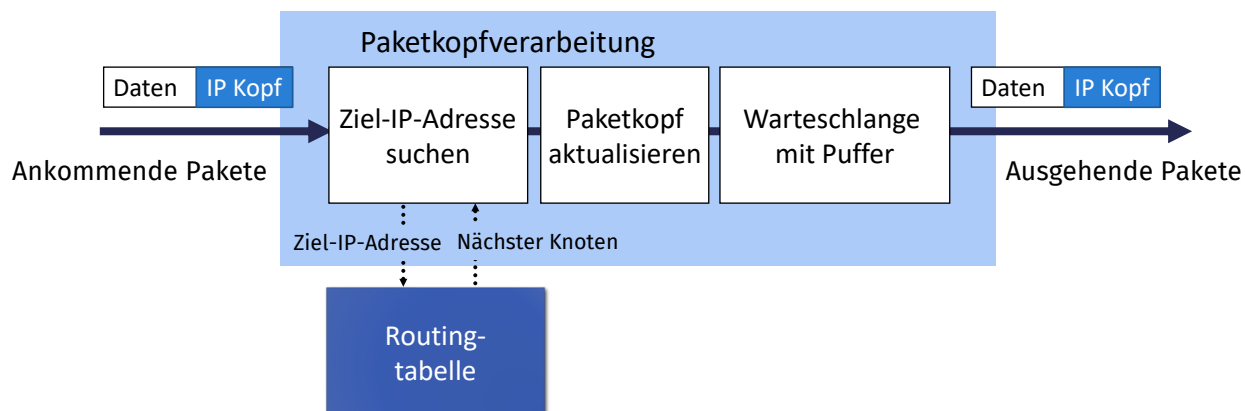
- Kommunikation entfernter Endsysteme über ein oder mehrere Netze
- Wegewahl
- Weiterleitung von Paketen anhand weltweit eindeutiger, bevorzugt hierarchischer Netzwerkadressen
- Segmentieren und Reassemblieren von Datenpaketen der Internetschicht zur Anpassung an unterschiedliche maximale Paketgrößen der Rechnernetzanschlusssicht (nur IPv4)
- Sicherheitsmechanismen zur Regelung von Netzzugriffen abhängig von der Netzwerkadresse (Stichwort **Firewall**)

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

127

127

## Paketverarbeitung im Router



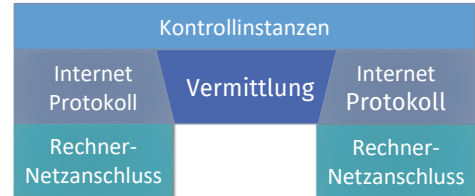
DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

128

128

# Einordnung im Schichtenmodell

- Für jedes angeschlossene Netzwerk eine eigene Instanz der Rechner-Netzanschlussschicht
- Protokoll der Internetschicht in der Regel für alle Netzwerke gleich (hier z. B. IP-Router), aber auch unterschiedliche Protokolle möglich
- *Internetschichtinstanz* verantwortlich für Paketweiterleitung anhand der global eindeutigen Netzwerkadressen
- *Kontrollinstanzen* für beispielsweise Routingprotokolle, Protokolle zur Fehleranzeige und Managementprotokolle



# Grundlegende Router-Arten

## WLAN-/DSL-Router

- Verwendung bei Endkunden zur Internetanbindung
- Vermitteln Zugang zum Internet für ein privates Heimnetz
- Unterstützen mehrere Geräte im Heimnetz

## Enterprise Router

- Verwendung in Campusnetzwerken (z. B. eines Unternehmens oder einer Universität)
- Teilweise zur besseren Strukturierung des Netzes in Unternetze

## Edge Router

- Verwendung meistens bei Internetdiensteanbietern (Internet Service Provider, ISP)
- Zur Verbindung vom ISP zu Kundennetzen
- Unterstützung verschiedener Zugangstechnologien

## Core Router

- Verwendung im Kernnetz
- Datendurchsatz: mehrere Terabit pro Sekunde
- Hohe Verfügbarkeit von 99,999 % oder höher
- Vollständig redundante Hard- und Softwarekomponenten

# Beispielgeräte

## ZU HAUSE



Bildquellen: <https://de.wikipedia.org/wiki/Router>  
Abruf: November 2016

## IM KERNNETZ



# Grundlegende Aufgaben eines Routers

## Routing (deutsch Wegwahl)

- bezeichnet das Finden von Pfaden, auf denen Pakete durch ein Netz transportiert werden
- Abbild der erreichbaren Teilnetze auf Basis der Netztopologie
- Ermittlung der *besten* Pfade anhand von IP-Präfix

## Forwarding (deutsch Weiterleitung)

- bezeichnet die Auswahl des nächsten Wegpunktes für jedes Paket in einem Knoten
- eigentlich die Auswahl der passenden Ausgangsschnittstelle
- lokale Entscheidung in jedem Knoten
- muss möglichst schnell erfolgen

# Kontroll- und Datenpfad

## Datenpfad in Vermittlungsschicht

- Weiterleitung der Datenpakete

## Kontrollpfad in darüber liegender Schicht

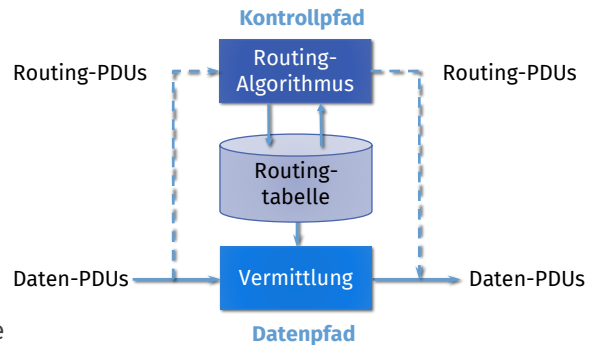
- für den Austausch von Routingkontrollinformation (Routing-PDUs in N-PDUs oder sogar in T-PDUs gekapselt)

## Routinginformation

- Austausch/Sammlung durch Routingprotokoll
- Speicherung in Routingtabelle

## Routing-Algorithmus verwaltet die Routingtabelle

- Einfügen/Löschen/Ändern von Einträgen
- auf der Basis der gewonnenen Routinginformation



# Grundlegende Teilfunktionen

## Weiterleitung

- *Basisfunktionen*
  - Header-Validierung
  - TTL-Überprüfung
  - Adresssuche
  - Fragmentierung (nur IPv4)
  - Behandeln von IP Optionen
  - Fehlerbenachrichtigung via ICMP
- *Komplexe Funktionen*
  - Klassifikation
  - Filterung
  - Priorisierung
  - Umwandlung

## Routing

- Pfadberechnung
- Aktualisieren der Routingtabelle
- Ausführung von Routingprotokollen

## Management

- Systemkonfiguration
- Monitoring

# Komponenten eines Routers

## Zwei grundlegende Sichtweisen

### Funktional

- Module, die die zur Weiterleitung benötigten Funktionen realisieren
- Typische Module:
  - Network Interfaces
  - Forwarding Engine
  - Queue Manager
  - Traffic Manager
  - Backplane/Switching Fabric
  - Route Control Processor

### Architektur

- Hardwarenahe Sicht
- Welche Hardwarekomponenten gibt es und wie werden diese verknüpft?
- Wie und wo werden Module implementiert?

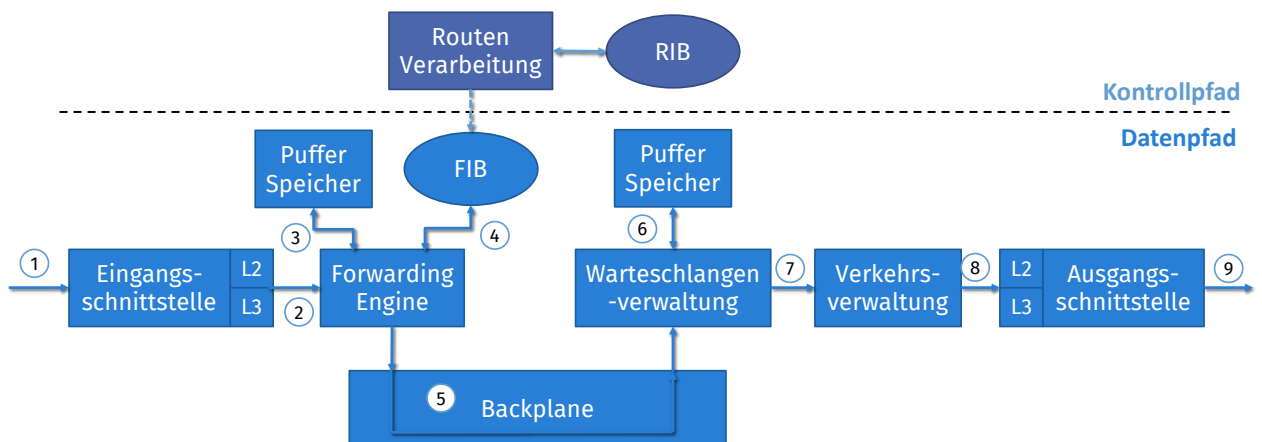
DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

135

135

RIB Routing Information Base  
FIB Forwarding Information Base

## Datenpaketfluss durch einen Router



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

136

136

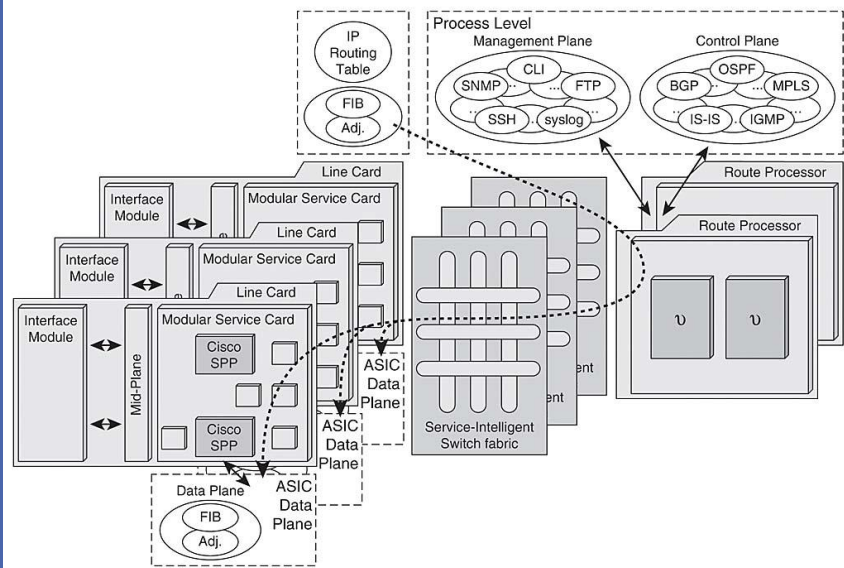


# Hardware Komponenten eines Routers

Quelle:

<http://www.networkworld.com/article/2283224/lan-wan/chapter-1--internet-protocol-operations-fundamentals.html?page=10>

Abruf: November 2016



Cisco CSR-1 Router Architektur

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

137

137

## Ablauf der Weiterleitung

1. Empfangen des Paketes von N2H-Instanz der Eingangsschnittstelle
2. Paket in Eingangspuffer zwischenspeichern
3. Paketkopf auf Gültigkeit prüfen
4. IP-Optionen verarbeiten
5. Ziel-IP-Adresse extrahieren
6. Weiterleitungsziel in der Routingtabelle nachschlagen: *Ziel, Ausgangsport(s)*
7. Fragmentierung (*falls notwendig bzw. möglich*)
8. Paketkopf aktualisieren: *TTL dekrementieren, Prüfsumme aktualisieren*
9. Paket an Ausgangsschnittstelle (ggf. mehrere) weitergeben
10. Paket in Ausgangspuffer zwischenspeichern
11. Senden des Pakets an N2H-Instanz der Ausgangsschnittstelle
12. Fehlermeldung senden (*falls notwendig*)

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

138

138

# Leistungsmaße für Router

## Durchsatz

- $D_R = N \cdot R_I$
- $N$  Anzahl der Schnittstellen
- $R_I$  Datenrate einer Schnittstelle
- Angegeben in bit pro Sekunde

## Verarbeitete Pakete pro Sekunde

- $PR_R = \frac{D_R}{S_p}$
- $S_p$  Paketgröße
- Beispiel: 2 Milliarden Pakete pro Sekunde bei 640 Gbps Durchsatz und 40 byte Paketgröße
- Zeit für komplette Verarbeitung: 8 ns pro Paket

## Typische Paketgrößen

- 40 byte TCP Acknowledgements
- 64 byte ICMP Echo Requests
- 576 byte IPv4 Internet Path MTU (obsolet)  
IPv6 minimum MTU (obsolet)
- 1280 byte IPv6 minimum MTU (RFC 2460)
- 1500 byte Max. Ethernet Payload

# Inhalt der Routingtabelle

## Pfad zu einem Netz

- Pfad steht für ein ganzes Teilnetz
- Häufigste Eintragsart

## Pfad zu einem Knoten

- Spezifischer Pfad zu einem Knoten

## Typisch

- 200.000 – 1.000.000 Einträge

## Standardpfad

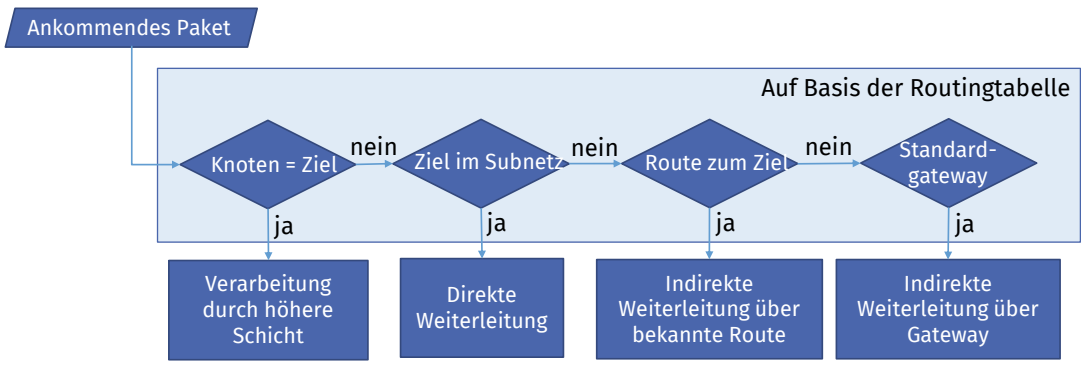
- Falls kein passender Eintrag zu einem Netz oder Knoten gefunden wird
- Default Gateway

## Lookback-Adresse

- Pakete an eigene Loopback-Schnittstelle weiterleiten
- 127.0.0.1 in IPv4

# IP Weiterleitungsentscheidung

Von jedem Knoten ausgeführt



141

# Beispiel: Routingtabelle

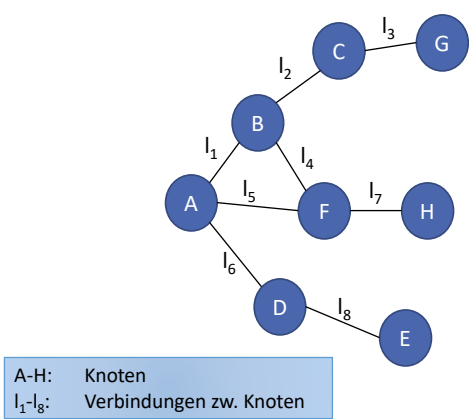


Tabelle in Knoten B		Tabelle in Knoten A	
nach	über (Link)	nach	über (Link)
A	- (l <sub>1</sub> )	B	
C	- (l <sub>2</sub> )	C	
D	A (l <sub>1</sub> )	D	
E	A (l <sub>1</sub> )	E	
F	- (l <sub>4</sub> )	F	
G	C (l <sub>2</sub> )	G	
H	F (l <sub>4</sub> )	H	

142

# Beispiel: Linkversagen

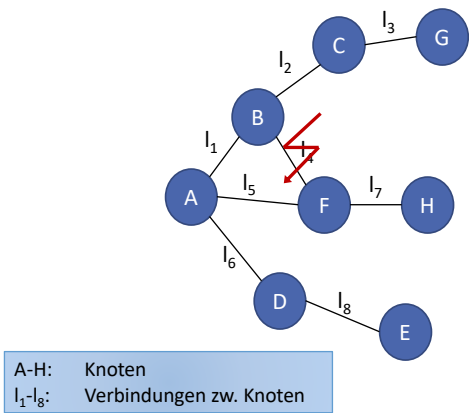


Tabelle in Knoten B nach über (Link)		Tabelle in Knoten A nach über (Link)	
A	- (l <sub>1</sub> )	B	
C	- (l <sub>2</sub> )	C	
D	A (l <sub>1</sub> )	D	
E	A (l <sub>1</sub> )	E	
F	A (l <sub>1</sub> )	F	
G	C (l <sub>2</sub> )	G	
H	A (l <sub>1</sub> )	H	

# Aktualisierung der Routingtabelle

- Statisch
- Manueller Eintrag
- Durch Routingverfahren
- Basis gesammelte Routinginformationen
  - Wegeauswahl durch speziellen Routingalgorithmus
- Durch ICMP-Nachrichten
- Bei Fehlern
  - TTL Ablauf

# Routingverfahren

## Aufgabe

- Fällen der Entscheidung, auf welcher Übertragungsleitung ein eingehendes Paket (Nachricht) weitergeleitet werden soll

## Ziele bei Weiterleitung

- Niedrige mittlere Paketverzögerung
- Hoher Netzdurchsatz

## Herausforderungen

- Zuverlässigkeit der Paketzustellung
- Geringe zusätzliche Belastung durch Austausch von Routinginformationen
- Schnelle Reaktion auf Topologieänderungen
- Aktuelle und vollständige Informationen über den Zustand des Netzes
- Ressourceneffizienz
- Schleifenfreiheit
- Berücksichtigung der Anforderungen der Anwendungen

# Aspekte von Routingverfahren

## Verwendete Informationen

- Welche Adressen werden verwendet?

## Routenbestimmung

- Wie wird ein Pfad ermittelt?
- Wer bestimmt die Route?

## Austausch/Sammlung von Routinginformationen

- Wie?
- Wann?

## Verwendete Metriken

- Abhängig von aktueller Netzsituation?
- Oder davon unabhängig?

# Routenbestimmung

---

## Wie wird ein Weg ermittelt?

- Statisch: alle Wege werden vorher fest vorgegeben
- Adaptiv: Wege können sich während dem Betrieb ändern

## Wer bestimmt die Route?

- Mögliche Knoten
  - Quelle oder spezieller Router
- Algorithmen
  - Verteilt
  - Zentralisiert
  - Hierarchisch

# Austausch von Routinginformationen

---

## Wie?

- Fluten
- Selektiv

## Wann?

- Periodisch und bei Änderungen - **proaktiv**
- Nach Bedarf und bei Änderungen - **reaktiv**

# Metriken

## ALLGEMEIN

Lastverteilung  
 Minimale Anzahl der Hops  
 Qualitätsparameter
 

- Bitrate, Verzögerung, Durchsatz, ...

 Sicherheit  
 Gebühren  
 Kombination mehrerer gewichteter Werte in einer Funktion  
 Policies  
 ...

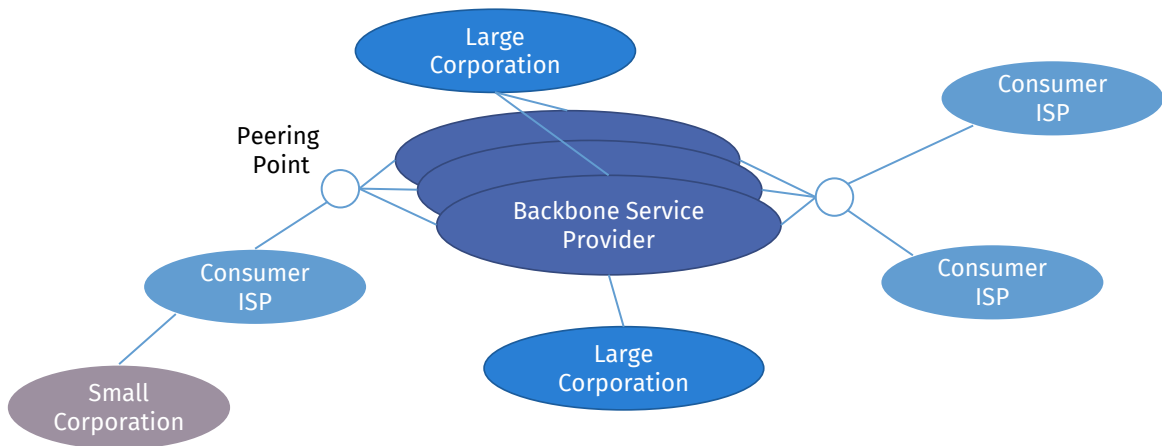
## ZUSTANDSABHÄNGIG

Feste Kosten für mögliche Verbindungen
 

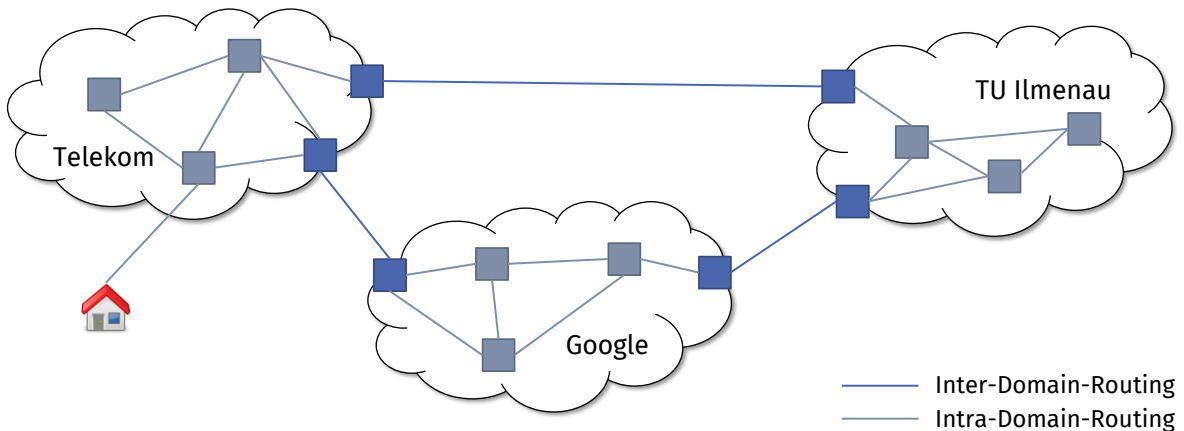
- (i. Allg. umgekehrt proportional zur Übertragungskapazität)

 Anzahl der auf Übertragung wartenden Pakete  
 Fehlerrate  
 Paketverzögerungszeit auf einer Verbindung  
 Art des Verkehrs (Dialog, Batch)  
 Prioritäten  
 Dienstunterstützung durch Router

# Die Struktur des Internets



# Autonome Systeme und Routing



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

151

151

## Autonome Systeme, AS

entsprechen einer  
Administrativen Domäne

- Das Internet besteht aus vielen Teilnetzen
- AS bilden die Organisationsstruktur des Internet
- Jedes AS besitzt global eindeutige AS-Nummer, ASN

### Ziele

- AS verwendet intern frei wählbares lokales Routingprotokoll
- AS definieren Policies für Durchgangsverkehr
- Interne Struktur nach außen unsichtbar

### Verkehrsarten

- Lokaler Traffic
  - Pakete von oder zu Knoten im AS
- Transit Traffic (Durchgangsverkehr)
  - Wird durch ein AS transportiert

### AS Typen

- *Stub AS*
  - Hat nur Verbindungen zu einem anderen AS
- *Multihomed AS*
  - Verbindet mehrere AS
  - Transportiert keinen Transit-Traffic
- *Transit AS*
  - Verbindet mehrere AS und transportiert Durchgangsverkehr

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

152

152

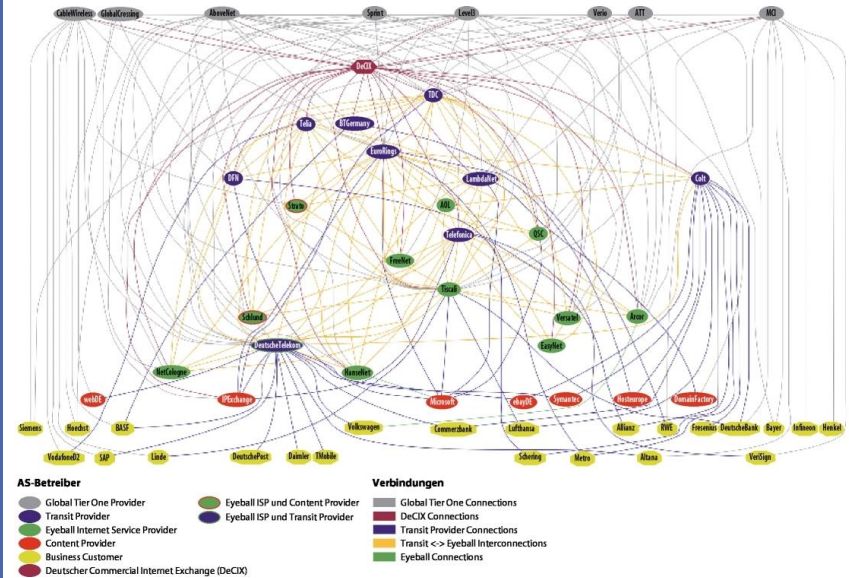


## Autonome Systeme in Deutschland

Quelle:

<http://www.heise.de/ct/artikel/So-funktioniert-Internet-Routing-221495.html?seite=5>

Abruf: November 2016



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

153

153

## Intra-Domain-Routing

### Zwei grundlegende Algorithmenarten

Innerhalb eines AS

Ziele

- Optimale Routen als Fokus
- Stabile Routen

*Distance-Vector-Algorithmen*

- Benötigen nur lokales Wissen
- Schleifen sind möglich

*Link-State-Algorithmen*

- Benötigen globales Wissen
- Topologie bekannt

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

154

154

# Routing Information Protocol, RIP

[RFC 2453]

## Intra-Domain-Routingverfahren nach Distanz-Vektor-Prinzip

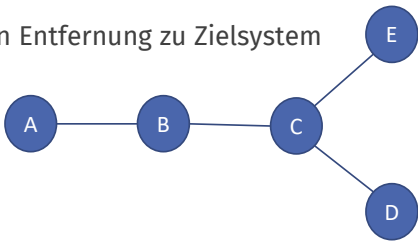
- Bellman-Ford-Algorithmus
- Unterstützt Split Horizon und Poison Reverse
- Nachrichtenaustausch via UDP

### Idee

- Jeder Knoten hat eine Tabelle mit einem Eintrag der besten Entfernung zu Zielsystem
- Einträge enthalten: Entfernung, Ziel und Ausgang

### Algorithmus

1. Anfrage an alle Nachbarn nach deren Tabelle
2. Berechnung der eigenen Tabelle
3. Periodische Advertisement-Pakete an alle Nachbarn



155

# RIP

## Eigenschaften

- adaptiv
- verteilt auf dedizierten Routern
- Periodischer Austausch der Informationen
- Kostenfunktion nur abhängig der Entfernung

## Nachteile

- Keine Berücksichtigung des aktuellen Netzzustands
- Maximal 15 Hop lange Pfade
- Langsame Konvergenz bei Änderungen  
→ Count-To-Infinity-Problem
- Veraltet, aber in Sensornetzen RIPng

Router A bis E verbunden, plötzlich fällt A aus

	A	B	C	D	E	Startabstand in hops von A
		1	2	3	4	
∞	→ 3	2	3	4	4	1. Austausch
	3	4	3	4	4	2. Austausch
	5	4	5	4	4	3. Austausch
	5	6	5	6	6	4. Austausch
	7	6	7	6	6	5. Austausch
	7	8	7	8	8	6. Austausch
	...	...	...	...	...	...
	∞	∞	∞	∞	∞	je nach der Obergrenze

Achtung: stets das Minimum wird gewählt!

156

# Ad hoc On-Demand Distance Vector, AODV

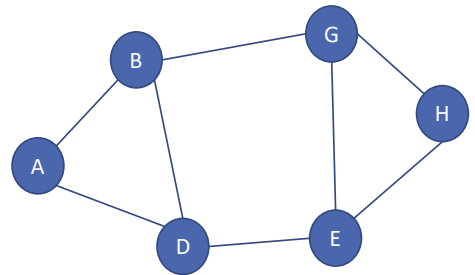
[RFC 3561]

## Intra-Domain-Routingverfahren nach Distance-Vector-Prinzip

- Dijkstra-Algorithmus
- Nachrichtenaustausch via UDP

## Algorithmus

- Broadcast-Anfrage nach Pfad zu angegebener Adresse (Route Request, RREQ)
- Unicast-Antwort zur Übermittlung einer Route an den Anfragenden (Route Reply, RREP)
- Gefundene Route wird in Routingtabelle gespeichert
- Auch Zwischenknoten können RREQ-Pakete beantworten, wenn der Routingeintrag noch aktuell ist
- Route Error, RERR, zur Information über nicht mehr existierende Nachbarn



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

157

157

# AODV

## Eigenschaften

- Adaptiv
- Verteilt, auf allen beteiligten Knoten
- Reaktive Routenbestimmung nach Bedarf

## Vorteile

- Geringe zusätzliche Last, da Routen nur bei Bedarf gesucht werden

## Nachteile

- Zusätzliche Verzögerung bis Routen gefunden werden

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

158

158

# Open Shortest Path First, OSPF

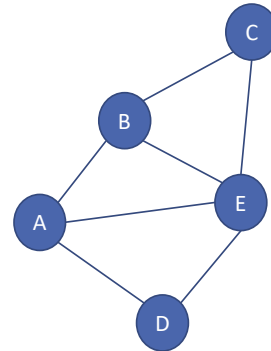
[RFC 2328]

Intra-Domain-Routingverfahren nach Link-State-Prinzip

- Dijkstra-Algorithmus
- Nachrichtenaustausch via IP

## Algorithmus

1. Erkennen von Nachbarn über *Hello*-Pakete
2. Messung der Kosten zu allen Nachbarn über *Echo*-Pakete
3. Erzeugung eines Link-State-Pakets mit ermittelten Daten zu jedem Nachbarn
4. Austausch des *Link-State*-Pakets mit allen Nachbarn
5. Berechnung des optimalen Weges zu allen Knoten



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

159

159

## OSPF

### Eigenschaften

- adaptiv
- verteilt auf dedizierten Routern
- Periodischer Austausch der Informationen
- Kostenfunktion abhängig vom aktuellen Zustand des Links
- Wegbestimmung zu allen anderen Routern

### Vorteile

- Berücksichtigt aktuellen Zustand des Netzes
- Authentifizierte Kontrollnachrichten
- Unterstützt *Areas* für bessere Skalierbarkeit

### Nachteile

- Aufwändige Berechnung nach jedem Update notwendig

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

160

160

# Border Gateway Protocol, BGP

Version 4

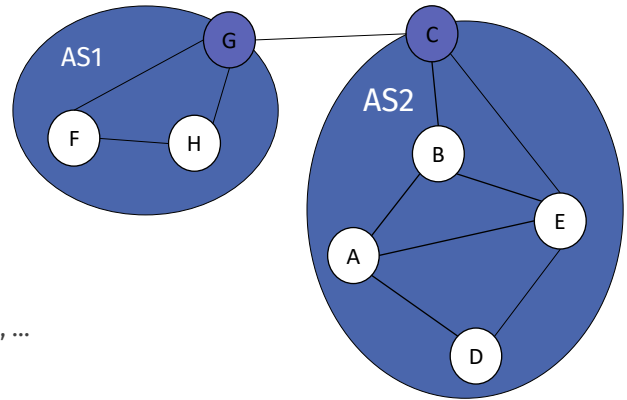
[RFC 4271]

Inter-Domain-Routingverfahren nach *Path-Vector-Prinzip*

- Liste mit Wegen zu allen andern AS
- Nachrichtenaustausch via TCP

## Idee

- Routen entsprechen Pfad zu anderen AS
- interne Details der autonomen Systeme sind nicht bekannt
- Routingtabelle mit aggregierten Pfaden zu allen anderen AS
- Routing Algorithmus nicht festgelegt
  - Kann durch Policies bestimmt werden
  - Beispiele: Hot-Potato, Cold-Potato, Shortest Path, ...



DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

161

161

## BGP

### Eigenschaften

- (adaptiv)
- Verteilt, auf beteiligten Routern
- Anzahl der AS als Metrik
- Kein periodischer Austausch, nur ereignisbasierte Updates durch Ausfälle

### Externes BGP

- Zwischen 2 Peer-Routern zweier AS
- Weitergaben von eBGP-Informationen im Regelfall nur an direkte Nachbarn

### Internes BGP

- Zwischen den Border-Routern eines AS

### Nachteile

- Keine Berücksichtigung des Zustands der Verbindungen
- Keine Lastverteilung – immer nur ein Pfad gewählt
- Sehr große Routingtabellen
- Sicherheitsbedenken

DIE INTERNET-PROTOKOLLWELT - 4. ROUTING

162

162

# Weitere Algorithmen in BGP

## Hot-Potato

### Ziele:

- Durchgangsverkehr schnell an anderes AS weitergeben
- Eigene Ressourcen schonen

### Prinzip:

- Weitergabe an Übertragungsleitung mit der kürzesten Warteschlange

## Cold-Potato

### Ziele:

- Möglichst lange Kontrolle über Traffic
- Dienstgütekriterien einhalten

# Literatur

BADACH, Anatol; HOFFMANN, Erwin (2007): *Technik der IP-Netze. Funktionsweise, Protokolle und Dienste*. München: Carl Hanser Verlag.

DEBES, Maik; HEUBACH, Michael; SEITZ, Jochen; TOSSE, Ralf (2007): *Digitale Sprach- und Datenkommunikation. Netze - Protokolle - Vermittlung*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

LEVIS, Philip; MAZIERES, David (2010) CS144 – Introduction to Computer Networking. Lecture Notes. Stanford University. Online. URL <http://www.scs.stanford.edu/10au-cs144/notes/> Abruf: November 2016.

POHLMANN, Norbert; DIERICH, Stefan (2008) *So funktioniert Internet-Routing. Wie Routing dem Netz seine Selbstheilungskräfte verleiht*. Heise. Online. URL: <http://heise.de/-221495> Abruf: November 2016.

SINHA, Rishi; PAPADOPOULOS, Christos; HEIDEMANN, John. (2007) *Internet Packet Size Distributions: Some Observations*. Technical Report. ISI-TR-2007-643. University of Southern California.

SCHUDEL, Gregg; SMITH, David J. (2008): *Chapter 1: Internet Protocol Operations Fundamentals*. Cisco Press. Network World. Online. URL: <http://www.networkworld.com/article/2283224/lan-wan/chapter-1--internet-protocol-operations-fundamentals.html> Abruf: November 2016.

UDACITY (2015): *Computer Networking - Georgia Tech - Network Implementation*. Online. URL: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLAwTw4SYaPn21MqCiFq2r0FSjk9l6cW2> Abruf: November 2016.

# Requests for Comments

---

HAWKINSON, John; BATES, Tony (1996): *Guidelines for Creation, Selection, and Registration of an Autonomous System (AS)*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 1930).

MOY, John (1998): *OSPF Version 2*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 2328).

MALKIN, Gary Scott (1998): *RIP Version 2*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 2453).

DEERING, Stephen E.; HINDEN, Robert M. (1998): *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 2460).

PERKINS, Carl E.; BELDING-ROYER, Elizabeth M.; DAS, Samir R. (2003): *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 3561).

REKHTER, Yakov; LI, Tony; HARES, Susan (2005): *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 4271).

ABLEY, Joe; SAVOLA, Pekka; NEVILLE-NEIL, George (2007): *Deprecation of Type 0 Routing Headers in IPv6*. Internet Engineering Task Force (IETF) (Request for Comments, 5095).