Computernetzwerke

Vermittlungsschicht

Sebastian Bauer

Wintersemester 2022/2023

Computer Engineering Curriculum

Hybrides Referenzmodell: Vermittlungsschicht

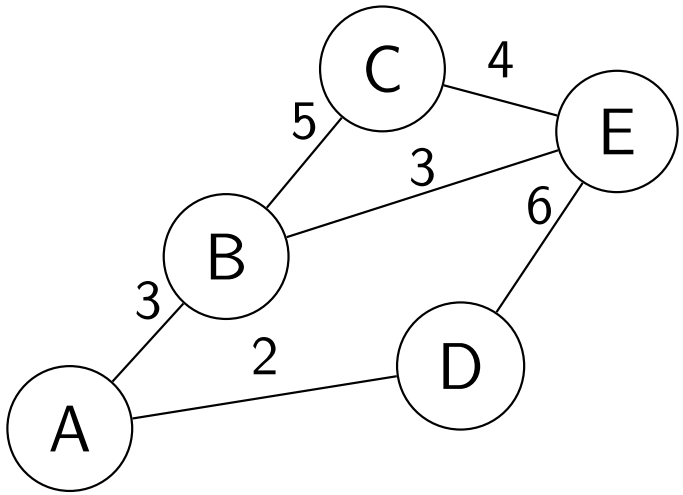
Pakete

- Protokollelemente, die hier ausgetauscht werden, heißen Pakete (engl. *packets*)
- Enthalten schichtspezifische Quell- und Zieladressen
  - Beim IPv4-Protokoll die IPv4-Adressen
  - Beim IPv6-Protokoll die IPv6-Adressen
- Pakete werden im Adressraum über das gesamte Kommunikationsnetz durch *Router* vermittelt

Outline

Adressierung im Kontext der Vermittlungsschicht

- Jeder Knoten im Netz hat mind. eine Adresse
- Innerhalb der direkten Erreichbarkeit sind diese eindeutig
- Adressen gehören zu den Netzwerkadaptern
- Netz kann mathematisch als Graph betrachtet werden:
  - Knoten sind Hosts oder Router (dahinter können auch andere Netzwerke sein)
  - Kanten sind Netzverbindungen mit Kostengewichtung

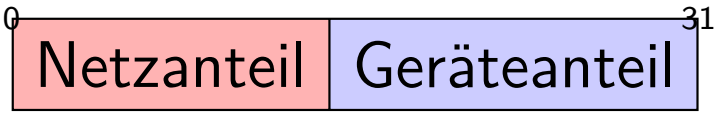


Internet-Protokoll

- Sind konkrete Implementierungen der Vermittlungsschicht
- Wird für das Internet genutzt
- Schicht heißt im TCP/IP-Referenzmodell Internet-Schicht
- Verbindungsloses und unzuverlässiges Protokoll (Pakete können verloren gehen)

Aufbau von IPv4-Adressen

- 32-stellige Binärzahl
- Aufgeschrieben in *dotted decimal notation*
  - Vier Zahlen zw. 0 und 255 durch Punkt getrennt
  - Beispielsweise: 123.22.23.43
- Besteht aus einem Netzanteil und einem Geräteanteil
  - Netzanteil (ein Präfix) kennzeichnet ein Teilnetz
  - Geräteanteil ein Gerät oder Host im Teilnetz



Pakete werden geroutet, genau dann wenn Quell- und Ziel-IP nicht im selben Netz sind.

IPv4-Subnetzmaske

- Netzanteil einer Adresse spezifiziert durch *Subnetzmaske*
- Bitweise Und-Verknüpfung ergibt Netzanteil

```
    IPv4-Adresse 11000000 10101000 00000001 10000001 192.168.1.129
UND Netzmaske    11111111 11111111 11111111 00000000 255.255.255.0
=   Netzwerkteil 11000000 10101000 00000001 00000000 192.168.1.0
```

- Adresse des Netzwerks endet immer mit 0-Bits
- Diese steht keinem Gerät zur Verfügung

Welche boolsche Funktion nutzt man, um die Geräteadresse aus Subnetmaske und IP-Adresse zu ermitteln? Führe diese auf das Beispiel aus.

IPv4-Subnetzmaske

- Netzanteil einer Adresse spezifiziert durch *Subnetzmaske*
- Bitweise Und-Verknüpfung ergibt Netzanteil

```
    IPv4-Adresse 11000000 10101000 00000001 10000001 192.168.1.129
UND Netzmaske    11111111 11111111 11111111 00000000 255.255.255.0
=   Netzwerkteil 11000000 10101000 00000001 00000000 192.168.1.0
```

- Adresse des Netzwerks endet immer mit 0-Bits
- Diese steht keinem Gerät zur Verfügung

Welche boolsche Funktion nutzt man, um die Geräteadresse aus Subnetmaske und IP-Adresse zu ermitteln? Führe diese auf das Beispiel aus.

```
IPv4-Adresse     11000000 10101000 00000001 10000001 192.168.1.129
UND ~Netzmaske   00000000 00000000 00000000 11111111 0.0.0.255
=  Geräteadresse 00000000 00000000 00000000 10000001 0.0.0.129
```

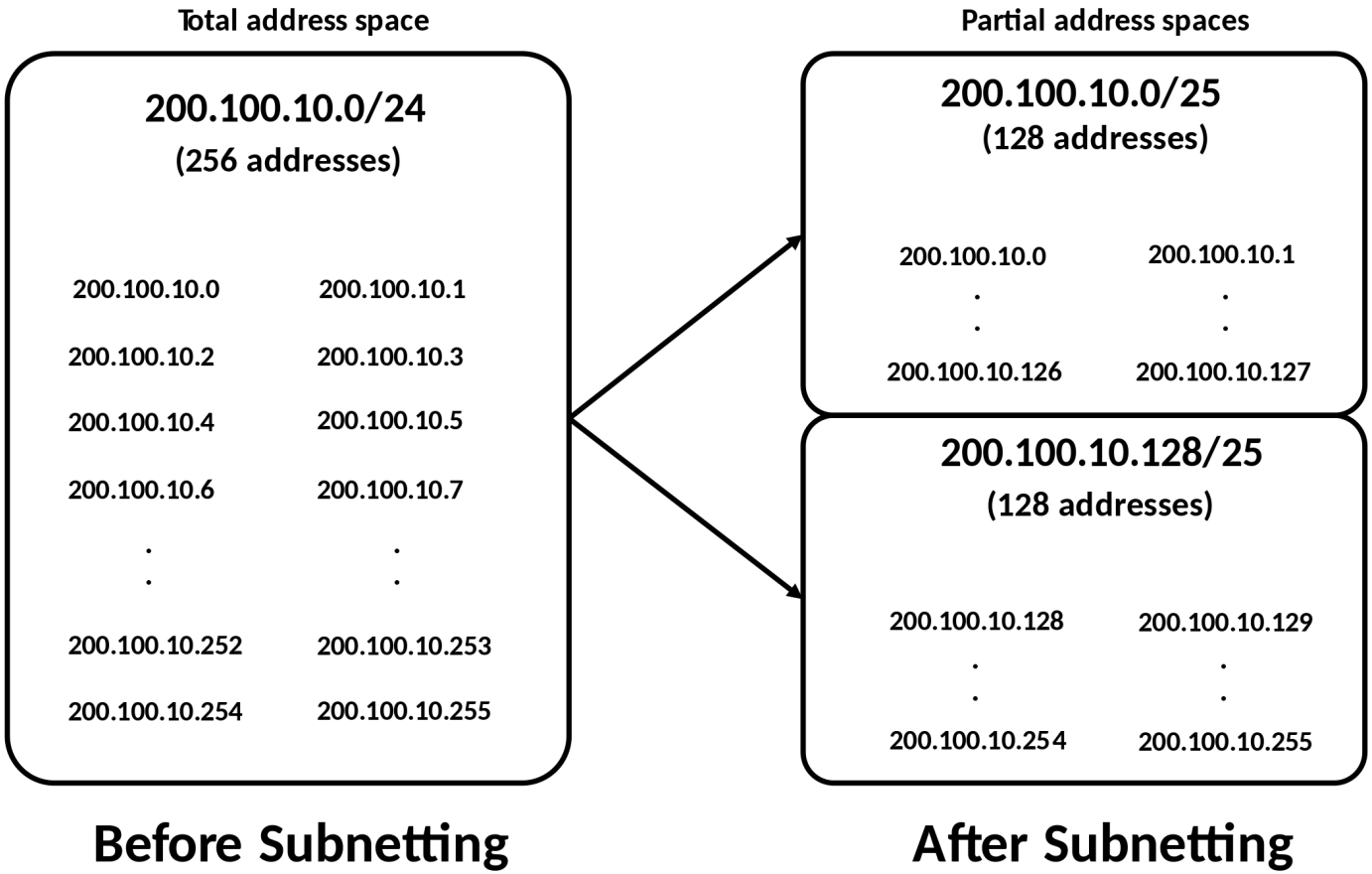
Classless Inter-Domain Routing (CIDR)

- CIDR-Notation enthält nur die Anzahl der gesetzten Bits der Subnetzmaske, z. B. /24 steht für 255.255.255.0
- Um IP- und Netzteil anzugeben, kann man schreiben: 192.168.0.1/24

Netzwerkklassen (Vorläufer zu CIDR, obsolet seit 1993)

Klasse	Präfix	CIDR	Bereich
A	0b0	/8	0.0.0.0 – 127.255.255.255
B	0b10	/16	128.0.0.0 – 191.255.255.255
C	0b110	/24	192.0.0.0 – 223.255.255.255
D	0b1110		224.0.0.0 – 239.255.255.255
E	0b1111		240.0.0.0 – 255.255.255.255

Unterteilung der Netze in weitere Subnetze



Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Subnetwork

Broadcast IPv4-Adressen

- Alle Bits der Geräteadresse sind gesetzt
- Verlassen nicht das eigene Netzwerk

Welche bitweise Verknüpfung führt man aus, um aus Netzwerkadresse und Subnetzmaske auf die Broadcast-Adresse zu kommen?

Private IPv4-Adressen

- Sind vom Kontext des Internets nicht sichtbar
- Erlauben volle IP-Konnektivität im abgeschirmten
- Verbundene Rechner bilden ein *Intranet*
- Anschluss ans Internet via Router/Gateway und Netzwerkadressübersetzung

CIDR	**Bereich**
10.0.0.0/8	10.0.0.0 – 10.255.255.255
172.16.0.0/12	172.16.0.0 – 172.31.255.255
192.168.0.0/16	192.168.0.0 – 192.168.255.255

Link-Local-Adressen

- Weiterer privater Adressraum: 169.254.0.0/16
- Geräte können sich selbst Adressen aus diesem Bereich zuweisen (wenn z. B. DHCP versagt)
- Definiert in RFC 3927
  1. Wähle eine zufällige IP-Adresse im Bereich
  2. Schaue, ob anderer Host die Adresse hat (ARP-Probe)
     - Sender-IP: 0.0.0.0
     - Sender-Mac: wie beim Netzwerkadapter
     - Target-IP: die zufällige IP-Adresse
     - Target-Mac: alles Nullen
  3. Gehe zu 1 zurück, falls sich ein Host meldet
  4. Ansonsten ist die IP-Adresse jetzt Hostadresse
- Teil von Zeroconf

Loopback

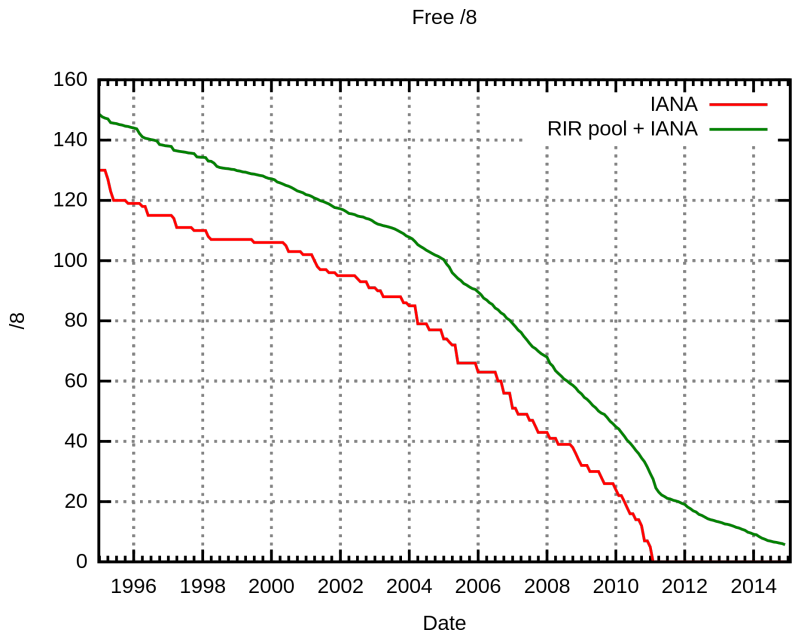
- Klasse A Netzwerk 127.0.0.0/8 ist reserviert für Loopback (Schleifeninterface)
- Pakete mit einer solchen Adresse als Quelle dürfen den Rechner niemals verlassen!
- Wird genutzt, um den Senderechner selbst zu adressieren

$\Rightarrow$ Transparente Nutzung der Software auch auf nur lokalen Rechner möglich

- IPv4-Adresse ist häufig 127.0.0.1
- Symbolischer Name dazu häufig `localhost`

Adressknappheit

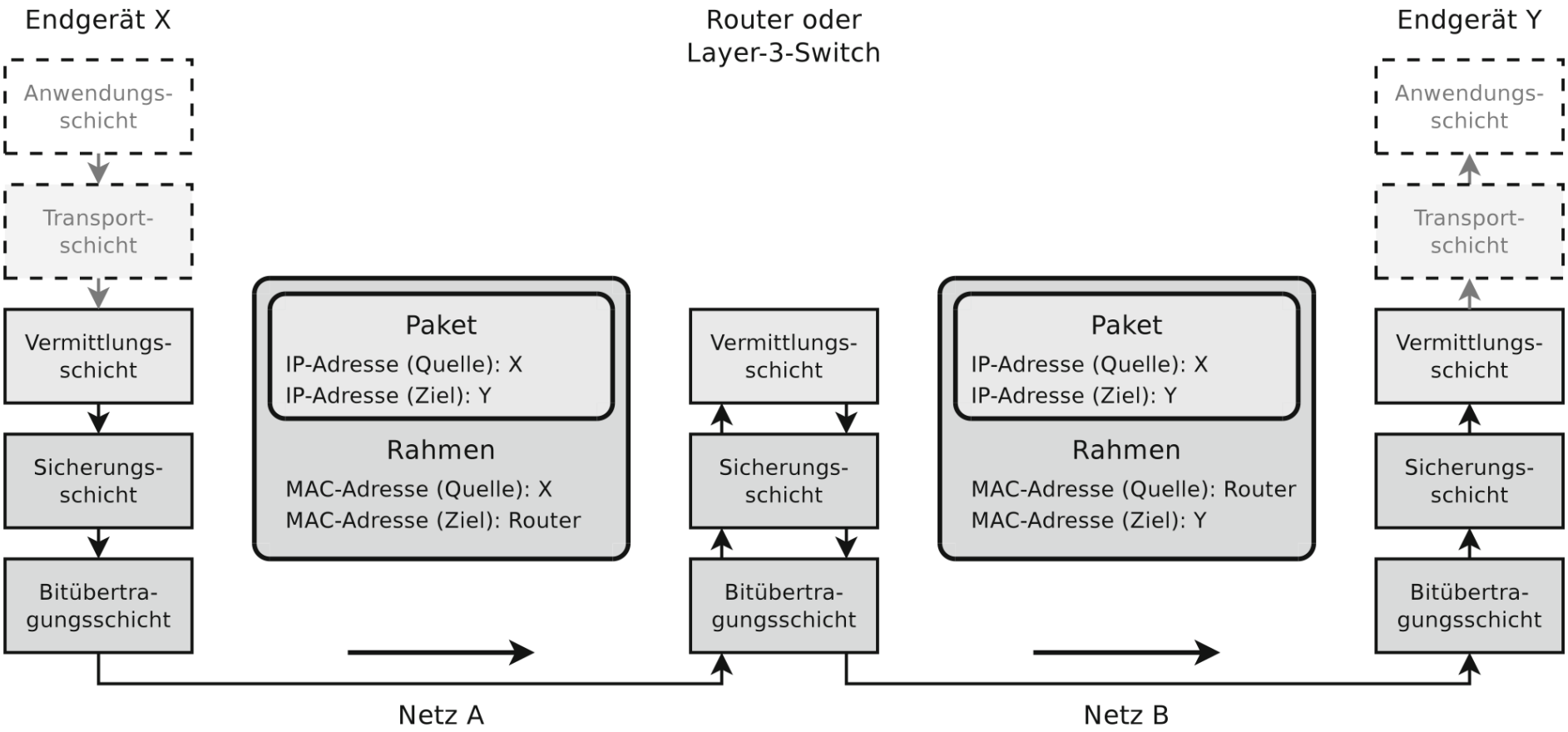
- Internet Assigned Numbers Authority (IANA) verteilte IP-Netze an 5 Regional Internet Registries (RIRs)
- Letzte größere Block wurde 2011 vergeben
- Durch Vergabepraxis entstand auch hohe Fragmentierung



- Entwicklung von IPv6 seit 1998 mit RFC 2460 im Gang

Outline

Endgeräte in zwei verschiedenen Netzen



aus *Computernetze kompakt* (2018)

Paketweiterleitung

- Aufgabe von Routern ist es, Pakete von einem Host zum anderen Host *weiterzuleiten*
- Oft hat ein Router Verbindung nur zu weiteren Routern und nicht zum Zielgerät
  - Pakete erreichen also nur über Zwischengeräte ihr Ziel

  $=$ Hop-by-hop-Routing
- Router wählt anhand der Zieladresse des Pakets und der *Weiterleitungstabelle* die Netzwerkschnittele aus, an der das Paket weitergeleitet wird

Weiterleitungstabelle

Einträge enthalten mindestens:

- Netzwerkanteile (Präfixe), müssen nicht präfixfrei sein
  - → Präfixe können andere Präfixe enthalten
- Lokale Weiterleitungschnittstelle bzw. Interface

Beispiel

Eintrag	CIDR	Interface
1	198.51.100.0/24	1
2	198.51.100.64/26	2
3	198.51.100.128/26	3

Präfix von Eintrag 1 ist in den Präfixen von 2 und 3 enthalten.

Weiterleitungstabelle enthält Teilmenge der *Routing-Tabelle*.
Sie ist optimiert für möglichst schnelle Entscheidungen.

Auswahl der Schnittstelle

Zur Zieladresse eines Pakets wird der Eintrag mit dem *längsten Präfixübereinstimmung* ermittelt. Das Paket wird zu dieser Schnittstelle weitergeleitet.

Es soll ein Paket mit Zieladresse 198.51.100.78 weitergeleitet werden. Welches Interface wird gewählt?

CIDR	**Binärsuffix**	**Interface**
198.51.100.78/32	…01100100.01001110	
198.51.100.0/24	…01100100.00000000	1
198.51.100.64/26	…01100100.01000000	2
198.51.100.128/26	…01100100.10000000	3

Routing-Tabelle

- Ist Resultat von Routingalgorithmen und -protokollen
- Übermenge der Weiterleitungstabellen
  - Mehr Informationen über die Topologie
  - Metriken für die Kosten der Verbindung
- Können statisch oder dynamisch erstellt werden

Mit `netstat -r` kann man sich Routing-Tabellen anschauen

```
$ netstat -r
Kernel IP routing table
Destination     Gateway      Genmask         Flags  MSS Window irtt Iface
default         fritz.box    0.0.0.0         UG       0 0          0 wlan0
172.17.0.0      0.0.0.0      255.255.0.0     U        0 0          0 docker0
192.168.178.0   0.0.0.0      255.255.255.0   U        0 0          0 wlan0
fritz.box       0.0.0.0      255.255.255.255 UH       0 0          0 wlan0
```

Routing

- Prozess, der die Routing-Tabelle befüllt
- Routing-Protokolle setzen *verteilten Algorithmus* um
  - Distanzvektor-Protokolle
  - Link-State-Routing-Protokolle
- Ziel: immer einen möglichst preiswerten Weg nehmen

Distanzvektor-Protokolle

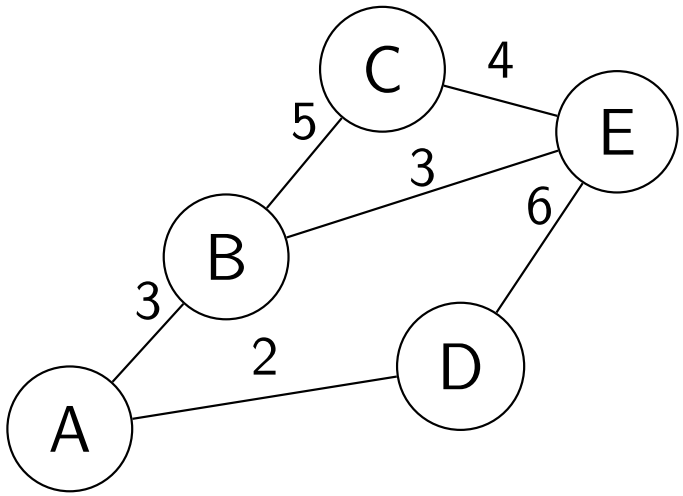
- Dynamischer Routing-Algorithmus
- Idee: Teile Deinen Nachbarn mit, wie Du die Welt siehst
  1. Erzeuge Graph, der zu Beginn nur die Knoten und direkten Nachbarn erhält
  2. Schicke die Info an *alle* direkten Nachbarn
  3. Warte bis Nachbarn ihre Info schicken
  4. Aktualisiere Graph
  5. Ändert sich dabei etwas, gehe zu Schritt 2, andernfalls Schritte 3
- Vorgehen entspricht dem Bellman-Ford-Algorithmus
- Vertreter: Routing Information Protocol (RIP)

Link-State-Routing-Protokolle

- Dynamischer Routing-Algorithmus, der Wissen von Nachbarknoten mit allen Knoten im Netzwerk teilt
- Jeder Knoten
  - ermittelt Zustand und Kosten der Nachbarverbindungen
  - erstellt Datenbank mit Topologie-Informationen
  - übermittelt die Information dann an *alle* anderen
  - Aktualisiert entsprechend der anderen Informationen, den eigenen Graphen (eigene Sicht des Netzes)
  - berechnet die preiswertesten Pfade auf dem Graphen
- Höhere Bandbreite, dafür bessere Dynamik als Distanzvektorverfahren
- Vertreter: Open Shortest Path First (OSPF)

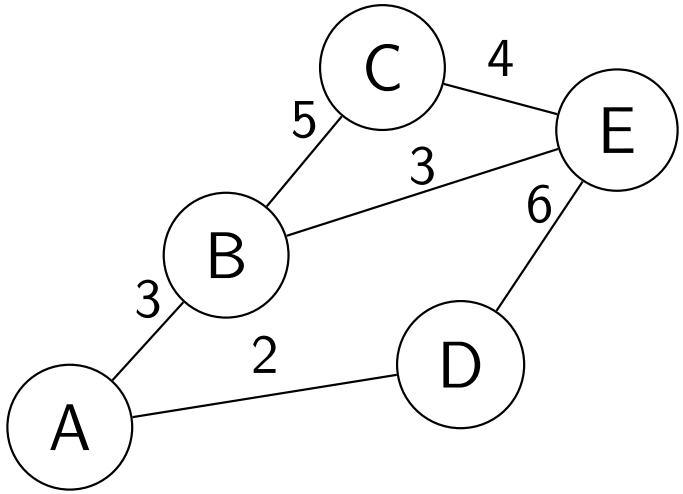
Pfadfindung: Problembeschreibung

Sei $G = (V, E)$ ein Graph mit Knotenmenge V, Kantemenge E und mit Kostenfunktion $d : E \to \mathbb{R}$. Finde den preiswertesten Pfad von einem Knoten v zu beliebigen Zielknoten u.



Welcher Pfad ist der preiswerteste, um von A nach E zu gelangen?

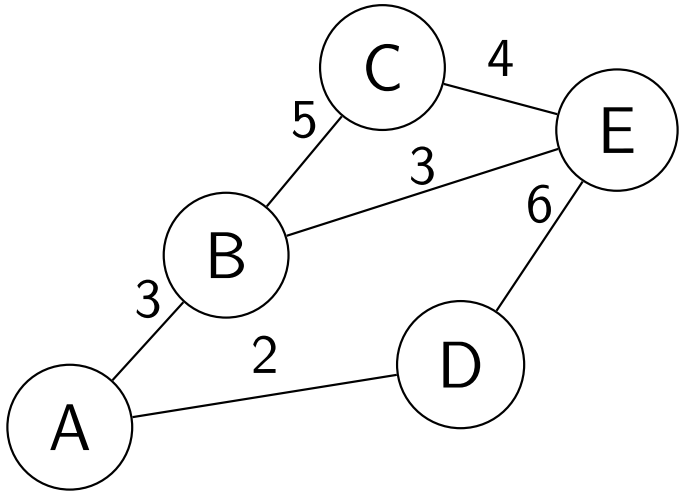
Pfadfindung: Naiver Algorithmus



1. Liste alle Pfade von A nach E auf
2. Bestimme die Kosten der Pfade und wähle preiswertesten

1) A – B – C – E:

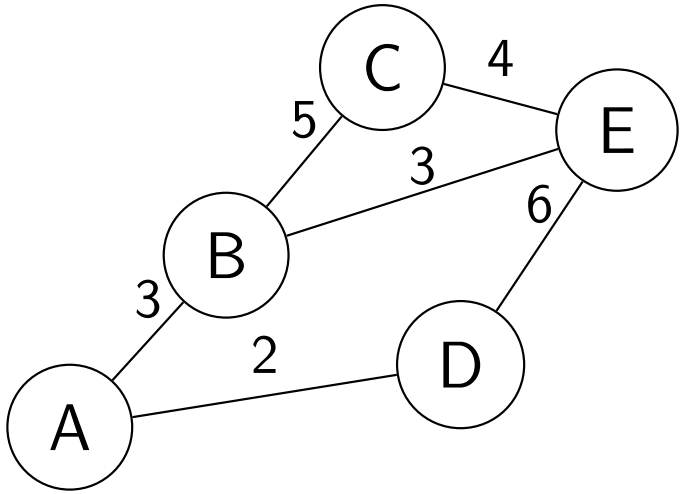
Pfadfindung: Naiver Algorithmus



1. Liste alle Pfade von A nach E auf
2. Bestimme die Kosten der Pfade und wähle preiswertesten

1) A – B – C – E: $3 + 5 + 4 = 12$; 2) A – B – E:

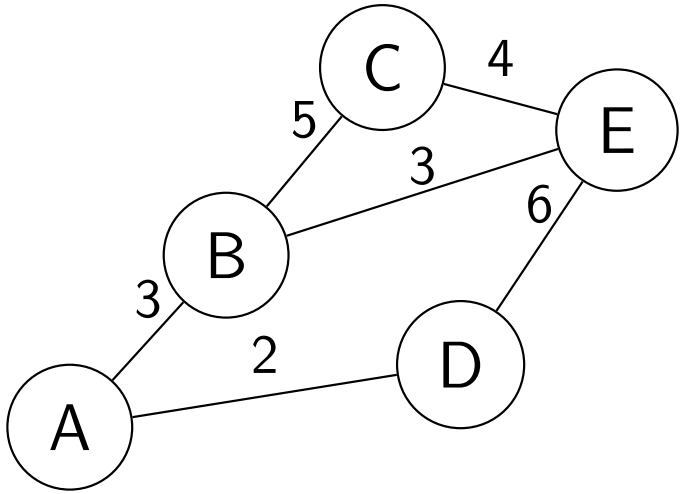
Pfadfindung: Naiver Algorithmus



1. Liste alle Pfade von A nach E auf
2. Bestimme die Kosten der Pfade und wähle preiswertesten

1) A – B – C – E: $3 + 5 + 4 = 12$; 2) A – B – E: $3 + 3 = 6$
3) A – D – E:

Pfadfindung: Naiver Algorithmus

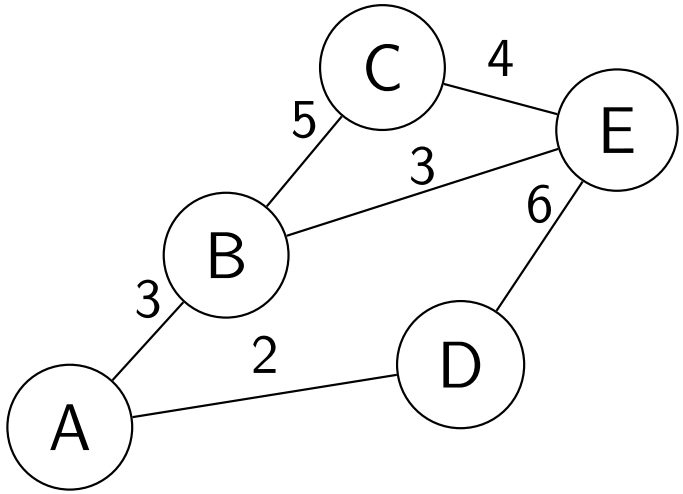


1. Liste alle Pfade von A nach E auf
2. Bestimme die Kosten der Pfade und wähle preiswertesten

1) A – B – C – E: $3 + 5 + 4 = 12$; 2) A – B – E: $3 + 3 = 6$
3) A – D – E: $2 + 6 = 8$

Sehr ineffizient bei großen Graphen! Wie viele Pfade zw. zwei Knoten beim vollständigen Graphen?

Pfadfindung: Naiver Algorithmus



1. Liste alle Pfade von A nach E auf
2. Bestimme die Kosten der Pfade und wähle preiswertesten

1) A – B – C – E: $3 + 5 + 4 = 12$; 2) A – B – E: $3 + 3 = 6$
3) A – D – E: $2 + 6 = 8$

Sehr ineffizient bei großen Graphen! Wie viele Pfade zw. zwei Knoten beim vollständigen Graphen? $(n-1)!$

Pfadfindung: Dijkstra

Dijkstra: Finde kürzesten Pfad vom Start- zum Endknoten

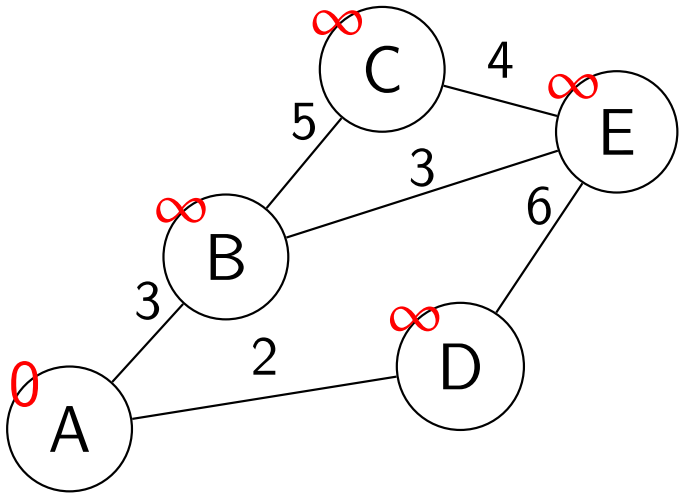
Knoten haben Eigenschaften: *Distanz* und *Vorgänger*

1. Setze *Distanz* des Startknotens auf 0 und die aller anderen auf ∞
2. Solange es unbesuchte Knoten gibt:
   1. Wähle v als denjenigen mit minimaler Distanz
   2. Berechne neue Distanzen zu allen Nachbarn von v
   3. Ist dabei neue Distanz kleiner als bisheriger Wert
      1. Merke neue *Distanz* zu Nachbarn
      2. Merke v als *Vorgänger* zu Nachbarn
   4. v ist jetzt besucht

Komplexität: $O(|V| \log |V| + |E|)$

Pfadfindung: Initialisierung beim Beispielgraph

Nach Initialisierung

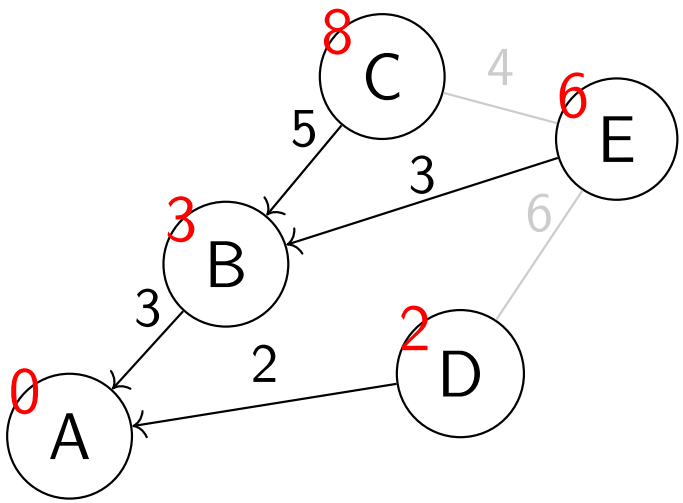


Pfadfindung: Ergebnis beim Beispielgraph

Nach letzter Iteration

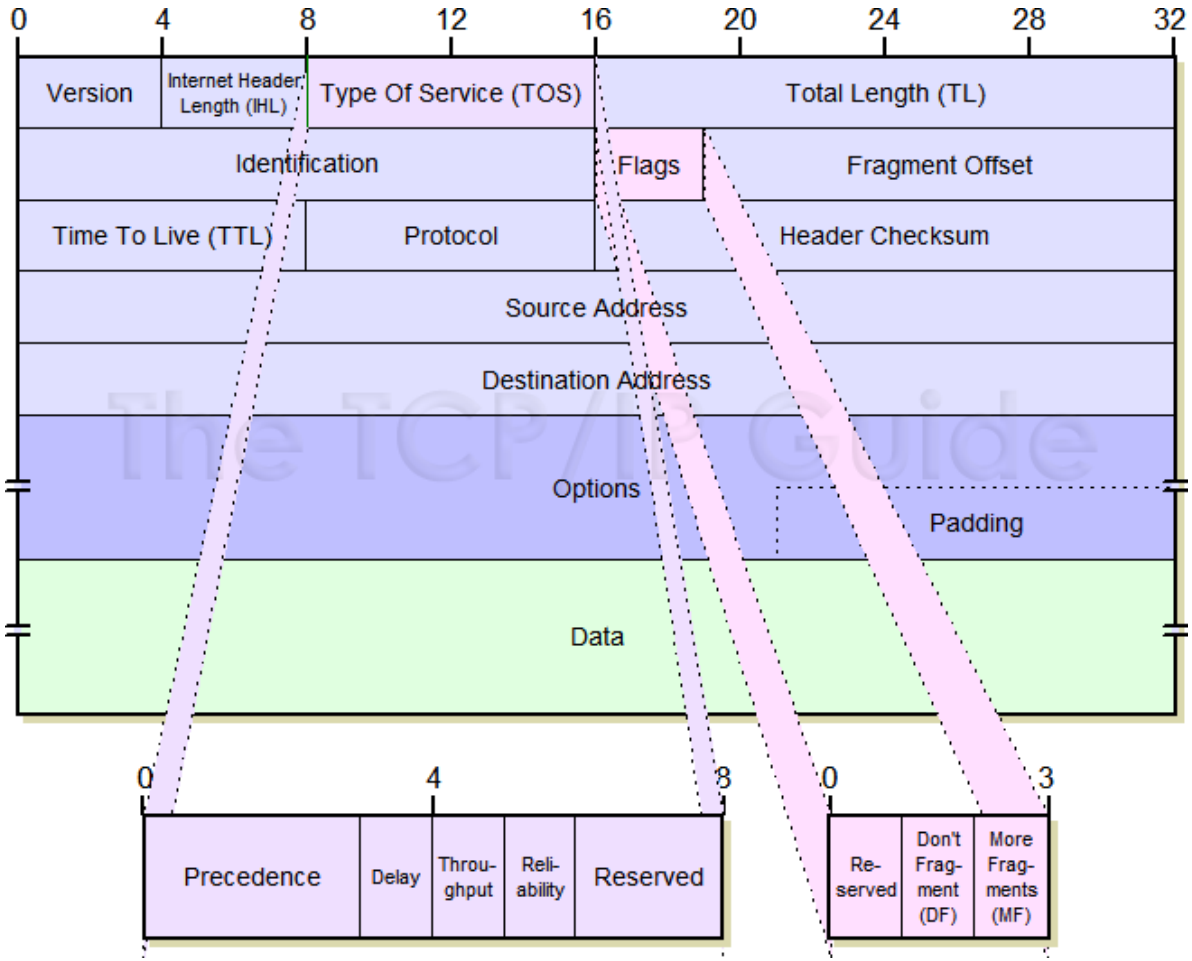
Pfadfindung: Ergebnis beim Beispielgraph

Nach letzter Iteration



Outline

IPv4: Headerformat



- Ursprünglich definiert in RFC 791
- TOS jetzt Differentiated Services Codepoint (DSCP)

IPv4: Beschreibung der Felder

Beschreibung der Felder z. B. hier:

- RFC 791 (lokal)
- https://tools.ietf.org/html/rfc791
- http://www.tcpipguide.com/free/t_IPDatagramGeneralFormat.htm
- https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/2011241.htm

IPv4: Checksumme

RFC 791 definiert:

> *The checksum field is the 16-bit one's complement of the one's complement sum of all 16-bit words in the header. For purposes of computing the checksum, the value of the checksum field is zero.*

Addition im 1er-Komplement: Bei Übertrag muss 1 dazu addiert werden.

Bestimme die Checksumme vom IP-Header mit Inhalt: `4500 0073 0000 4000 4011 XXXX c0a8 0001 c0a8 00c7`

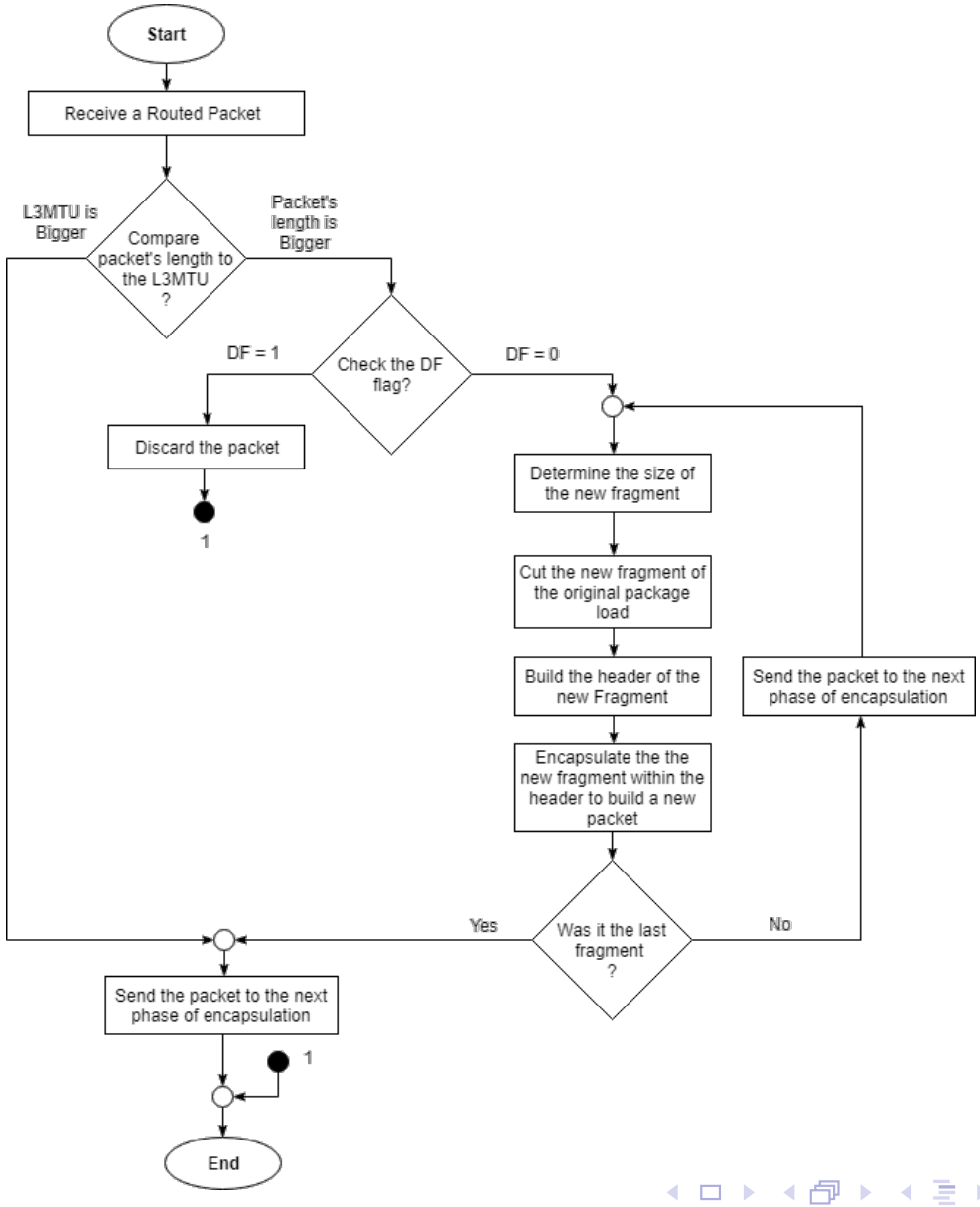
XXXX ist die Stelle, an der die Checksumme eintragen wird.

Wie verifizieren?

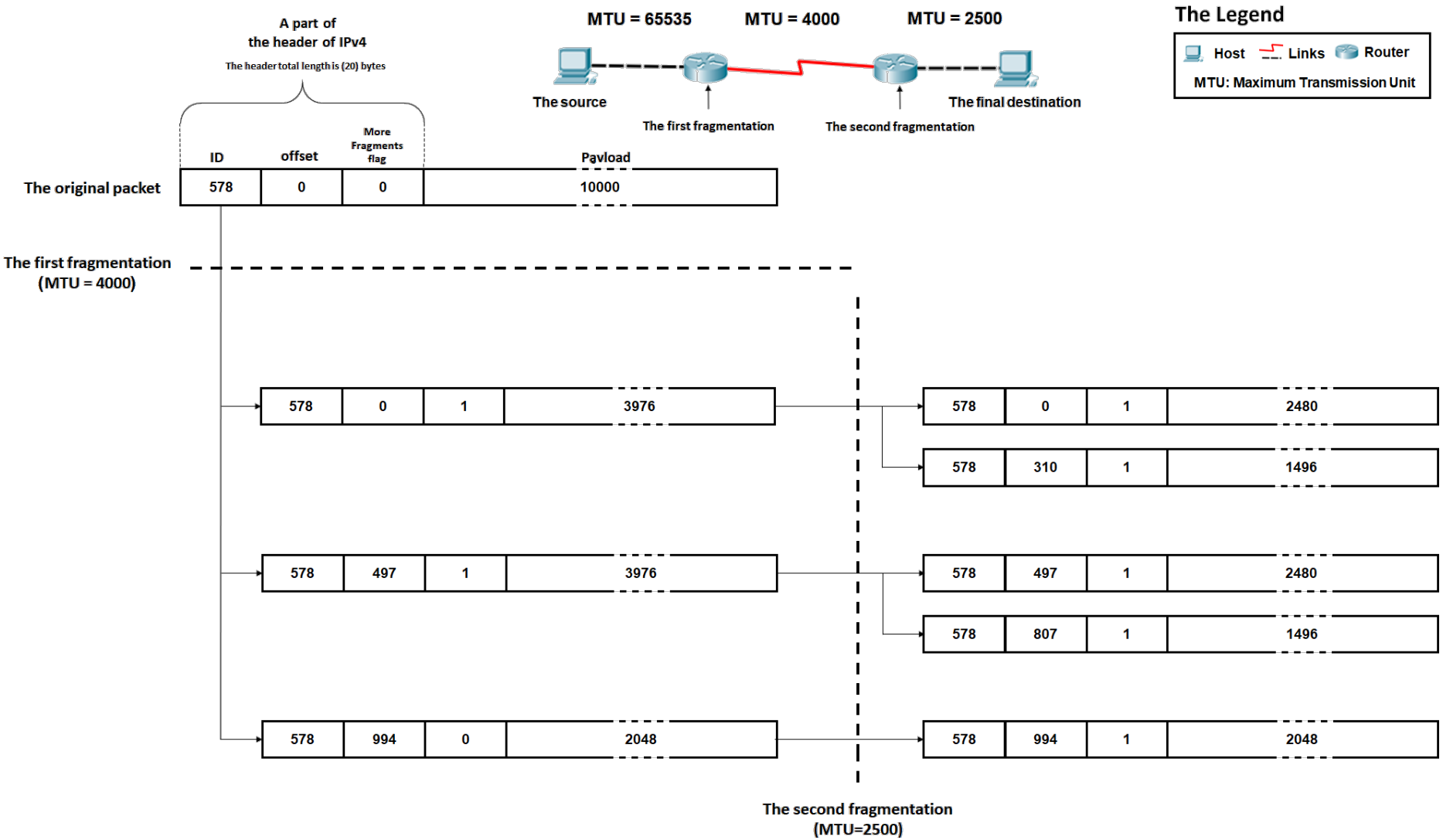
Fragmentieren von IPv4 Paketen

- IPv4 Pakete können bis zu 64 KiB groß werden
- Untere Schichten verarbeiten meistens weniger
- *Maximum Transmission Unit* (MTU) gibt Grenze an
  - Ethernet: 1500 B
  - PPPoE (bei DSL): 1492 B
  - WLAN: 2312 B
- Pakete mit größeren Nutzdaten werden deshalb je nach DF-Bit von der Vermittlungsschicht in MTU-Große Fragmente unterteilt oder verworfen
- Beim Empfänger werden sie wieder zusammengefügt

Fragmentieren: Algorithmus



Fragmentieren: Beispiel



Probleme durch das Fragmentieren

- Obere Schichten können nicht in Erfahrung bringen, ob Paket fragmentiert wird oder war
- Wenn Übertragung größerer Nutzdaten fehlschlägt, müssen ggf. nach Timeout gesamte Nutzdaten neu übertragen werden
- Implementation waren oft Buggy (Teardrop Attacken)
- Don't Fragment Flag

ICMP

- Verkapselt Informations- und Fehlermeldungen über IPv4
- Ist selbst Payload in IPv4 Paketen
- Gehört trotzdem zur selben Schicht
- Wird z. B. von Ping oder Traceroute genutzt
- Beschreibung der Felder: http://www.tcpipguide.com/free/t_ICMPCommonMessageFormatandDataEncapsulation.htm

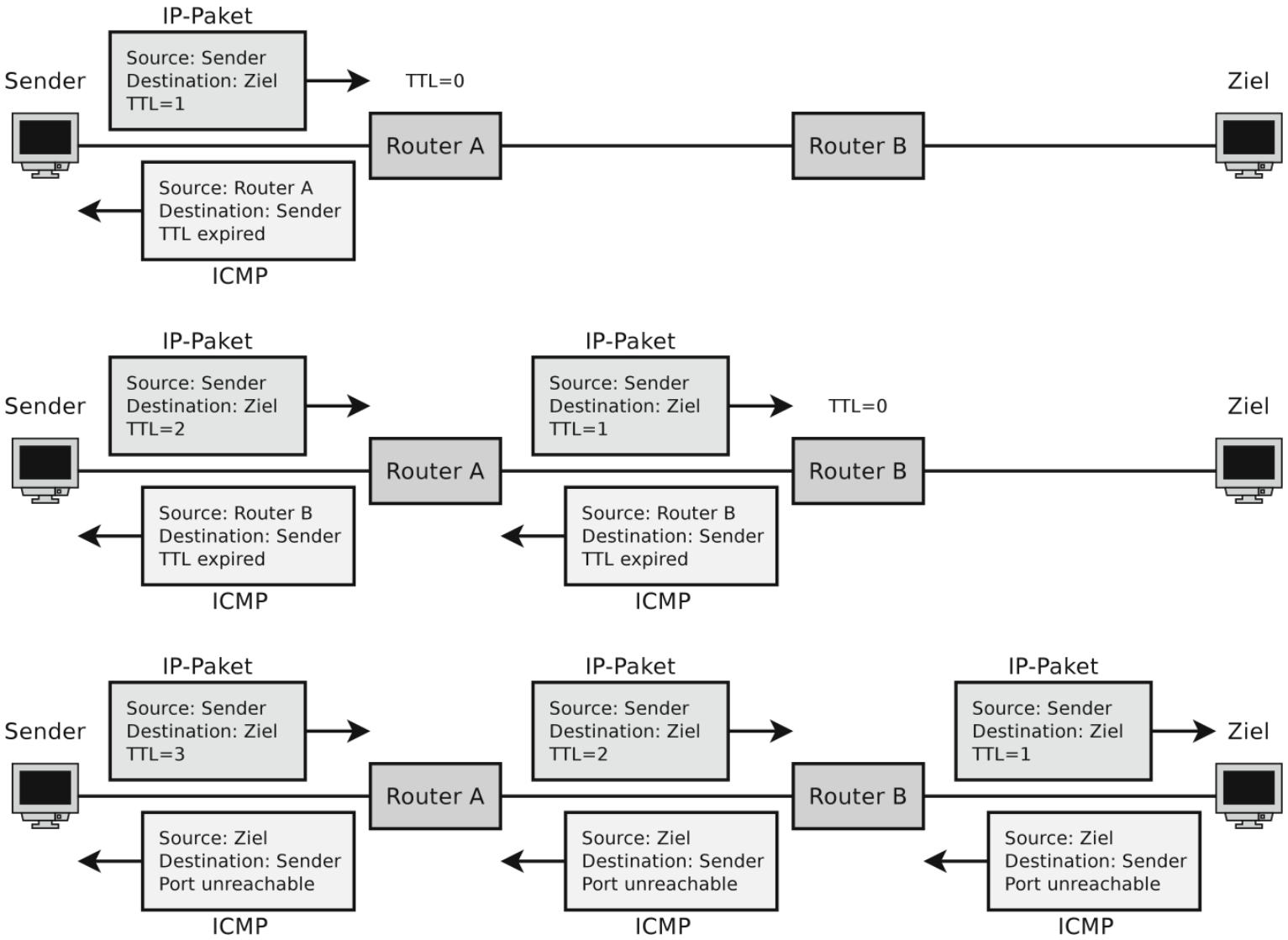
Ping Trace: Request

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
74	8.317372499	141.45.46.191	141.45.66.214	ICMP	98	Echo (ping) request id=0x263d, seq=1/256, ttl=64 (reply in 78)
78	8.319636105	141.45.66.214	141.45.46.191	ICMP	98	Echo (ping) reply id=0x263d, seq=1/256, ttl=63 (request in 74)
84	9.318836004	141.45.46.191	141.45.66.214	ICMP	98	Echo (ping) request id=0x263d, seq=2/512, ttl=64 (reply in 85)
85	9.319996726	141.45.66.214	141.45.46.191	ICMP	98	Echo (ping) reply id=0x263d, seq=2/512, ttl=63 (request in 84)
116	10.319890437	141.45.46.191	141.45.66.214	ICMP	98	Echo (ping) request id=0x263d, seq=3/768, ttl=64 (reply in 117)
117	10.321487542	141.45.66.214	141.45.46.191	ICMP	98	Echo (ping) reply id=0x263d, seq=3/768, ttl=63 (request in 116)

```
▸ Frame 74: 98 bytes on wire (784 bits), 98 bytes captured (784 bits) on interface 0
▸ Ethernet II, Src: IntelCor_0e:b0:dc (0c:54:15:0e:b0:dc), Dst: IETF-VRRP-VRID_ac (00:00:5e:00:01:ac)
▾ Internet Protocol Version 4, Src: 141.45.46.191, Dst: 141.45.66.214
    0100 .... = Version: 4
    .... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  ▸ Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
    Total Length: 84
    Identification: 0xa7f6 (42998)
  ▸ Flags: 0x4000, Don't fragment
    Time to live: 64
    Protocol: ICMP (1)
    Header checksum: 0x06c3 [validation disabled]
    [Header checksum status: Unverified]
    Source: 141.45.46.191
    Destination: 141.45.66.214
▾ Internet Control Message Protocol
    Type: 8 (Echo (ping) request)
    Code: 0
    Checksum: 0x3965 [correct]
    [Checksum Status: Good]
    Identifier (BE): 9789 (0x263d)
    Identifier (LE): 15654 (0x3d26)
    Sequence number (BE): 1 (0x0001)
    Sequence number (LE): 256 (0x0100)
    [Response frame: 78]
```

```
0000  00 00 5e 00 01 ac 0c 54  15 0e b0 dc 08 00 45 00   ··^····T ······E·
0010  00 54 a7 f6 40 00 40 01  06 c3 8d 2d 2e bf 8d 2d   ·T··@·@· ···-.···
0020  42 d6 08 00 39 65 26 3d  00 01 82 48 d6 5d 00 00   B···9e&= ···H·]··
0030  00 00 74 e3 0c 00 00 00  00 00 10 11 12 13 14 15   ··t····· ········
```

Traceroute via ICMP



Path MTU Discovery

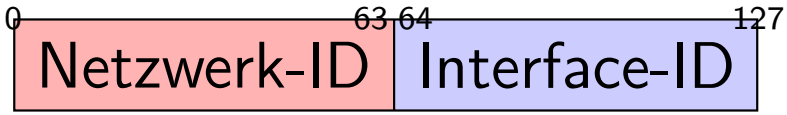
Funktioniert nicht bei Firewall!

IPv6: Adressen

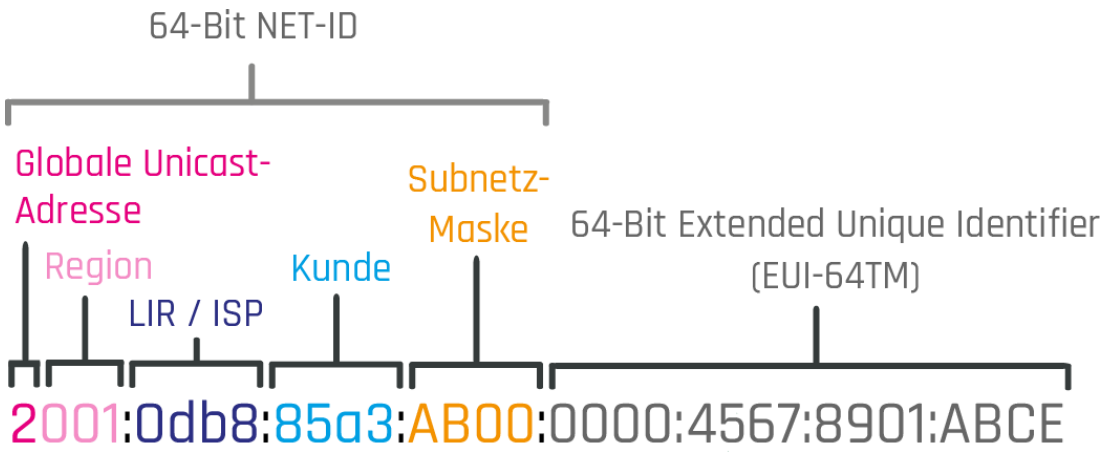
- 128-stellige Binärzahl notiert als
  - 8 hexadezimale Zahlen zw. 0 und FFFF durch Doppelpunkt getrennt
  - Nacheinanderfolgende 0en dürfe einmalig durch zweifachen Doppelpunkt getrennt werden

Beispiele

- `2001:db8:85a3:8d3:1319:8a2e:370:7344`
- `2001:db8::1428:57ab`
- `::1` (=localhost)

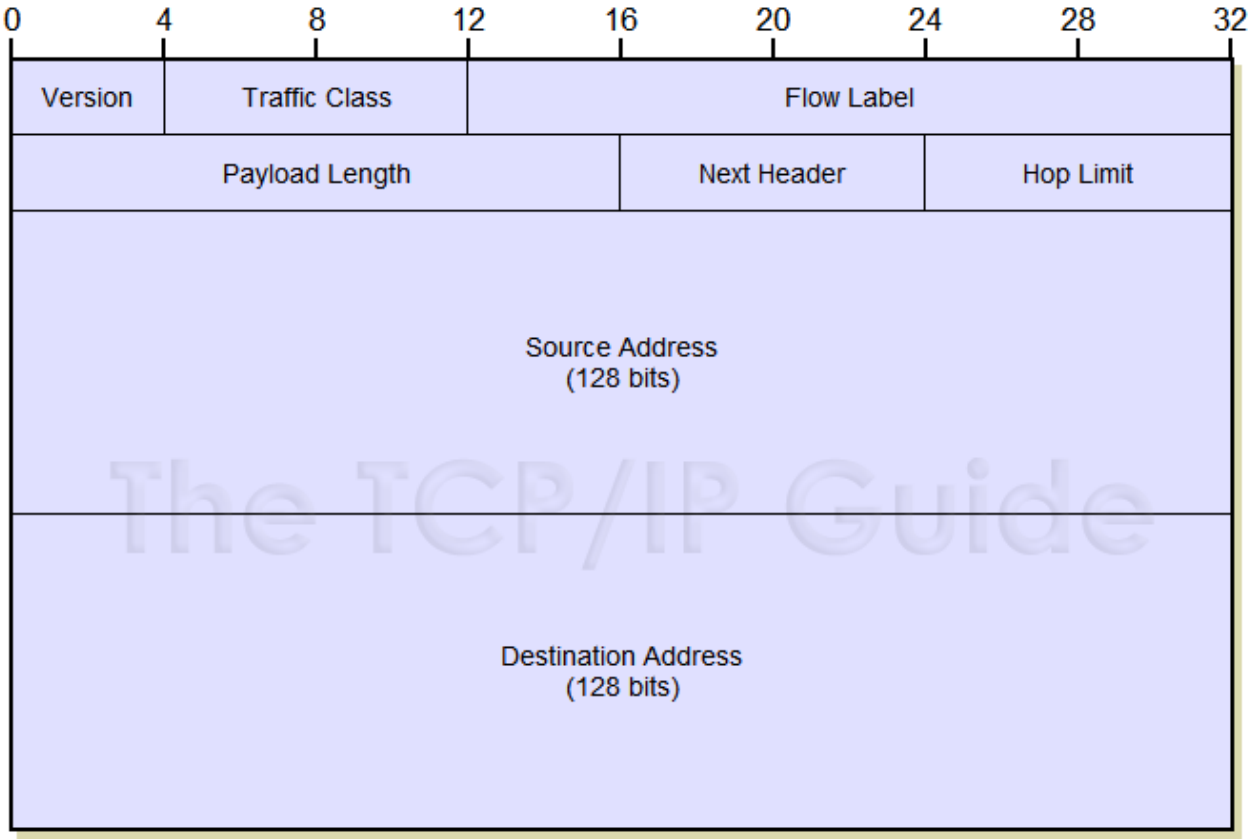


IPv6: Aufbau der Adressen



Quelle: https://www.scaleuptech.com/de/blog/ipv4-vs-ipv6/

IPv6: Headerformat



- Ursprünglich definiert in RFC 2460
- Keine Checksumme! Wieso?

IPv6: Beschreibung der Felder

- RFC 2460 (lokal)
- https://tools.ietf.org/html/rfc2460
- http://www.tcpipguide.com/free/t_IPv6DatagramMainHeaderFormat.htm
- https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1902121.htm

IPv6: Fragmentierung

- Router müssen zu große Pakete mit ICMPv6-Nachricht zurückweisen

Entweder MTU-Path-Discovery

Oder Fragmentierung passiert nur noch beim Sender (Fragment-Header-Extension)