Motivierende Fragen

- Welche Protokolle gehören zur TCP/IP-Familie ?
- Welche IP-Dienste gibt es ?
- Wie ist die Routing-Hierarchie aufgebaut ?
- Was steckt hinter IPv6 ?
- Wie lassen sich Internet und Mobilität vereinen ?

Lehrstuhl für Netzarchitekturen und Netzdienste
Institut für Informatik – Technische Universität München
Prof. Dr.-Ing. Georg Carle

Grundlagen: Rechnernetze und Verteilte Systeme

Kapitel 5: Internet-Protokolle

Internet-Protokolle der Netzwerkschicht

Prof. Dr.-Ing. Georg Carle
Lehrstuhl für Netzarchitekturen und Netzdienste
Technische Universität München
carle@net.in.tum.de
http://www.net.in.tum.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Übersicht

Ziele

- In diesem Kapitel wollen wir vermitteln
  - TCP/IP-Protokollfamilie
  - Funktionalität von IP-Adressen
  - Zusammenspiel von Protokollen
  - Hierarchie von Routing
  - Funktionalität von IPv6
  - Mobilität im Internet

Kapitelgliederung

5.1. Internet-Architektur: Merkmale

- Grundlegende Entwurfsprinzipien:
  - Keine Zustandsinformation in den Zwischensystemen halten
    ⇨ bei Ausfall keine Resynchronisation notwendig
  - Datenstrom-spezifische Information wird in den Endsystemen gespeichert
    ⇨ Bestandteil des Ende-zu-Ende-Prinzips
  - Trennung der Weiterleitung der Pakete („Forwarding“)
    vom „Routing“ = Erstellung der Weiterleitungstabellen

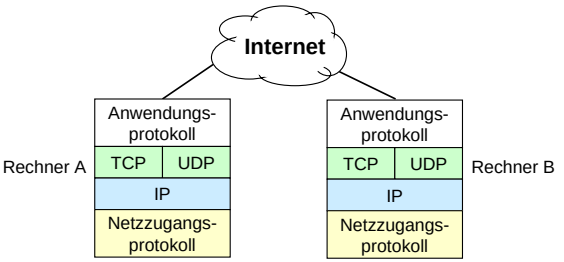
- IP-Basiskommunikationsdienst:
  - verbindungslos, unzuverlässig
  - abschnittsweise Weiterleitung, speichervermittelt
  - „Best Effort“-Diensterbringung: so gut wie möglich mit den momentan vorhandenen Ressourcen

Wiederholung: Die Internet-Protokollhierarchie

Application Layer	Anwendungsspezifische Funktionen zusammengefasst in Anwendungsprotokollen
Transport Layer	Ende-zu-Ende-Datenübertragung zwischen zwei Rechnern
Network Layer	Wegewahl im Netz auch “Internet Layer” genannt
Data Link Layer	Schnittstelle zum physikalischen Medium “Netzwerkkartentreiber”
Physical Layer	

- Gegenüber ISO/OSI wurden die drei anwendungsorientierten Schichten zu einer einzigen Schicht zusammengefasst.

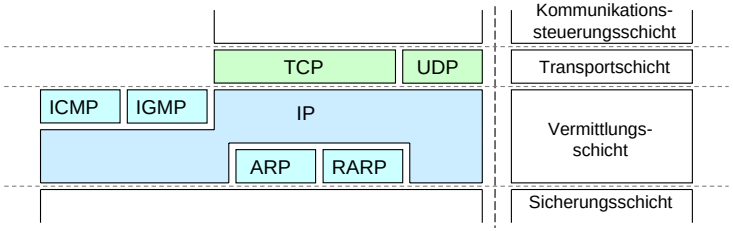
5.1.1. Die Internet-Protokollfamilie



- **TCP** (Transmission Control Protocol):
  - Zuverlässiges, verbindungsorientiertes Transportprotokoll über unzuverlässigem IP (Internet Protocol).
- **UDP** (User Datagram Protocol):
  - Verbindungsloses Transportprotokoll, bietet Anwendungsschnittstelle zu IP und Multiplexdienst.
- Beipiele für **Anwendungsprotokolle**:
  - HTTP: HyperText Transfer Protocol (im WWW benutzt)
  - FTP: File Transfer Protocol
  - Telnet: Protokoll für virtuelle Terminals

5.1.2. Die TCP/IP-Protokollfamilie – Überblick

- Die Bezeichnung TCP/IP wird häufig als Synonym für die gesamte Protokollfamilie verwendet
- Einordnung der Internetprotokolle in das ISO/OSI-Referenzmodell:



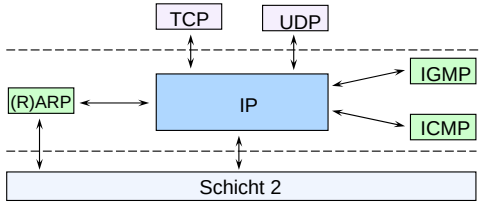
- Obwohl die IP-Steuerungsprotokolle ICMP und IGMP den IP-Dienst nutzen, werden sie dennoch der Vermittlungsschicht zugeordnet
- In den anwendungsbezogenen Schichten 5-7 werden im Internet Protokolle wie z.B. FTP, TELNET oder SMTP eingesetzt (Schichten 5-7 im Internet zusammengefasst zur Anwendungsschicht)

Die TCP/IP-Protokollfamilie: Protokollaufgaben

TCP	(Transmission Control Protocol): Stellt verbindungsorientierten, gesicherten Transportdienst bereit
UDP	(User Datagram Protocol): Stellt verbindungslosen, ungesicherten Transportdienst bereit
IP	(Internet Protocol): Sorgt für Wegewahl und ungesicherte Übertragung von Datagrammen
ICMP	(Internet Control Message Protocol): Unterstützt den Austausch von Steuerungsinformationen innerhalb der Vermittlungsschicht
IGMP	(Internet Group Management Protocol): Unterstützt die Verwaltung von Kommunikationsgruppen
ARP	(Address Resolution Protocol): Unterstützt die Zuordnung von IP-Adressen zu den entsprechenden Adressen der Sicherungsschicht
RARP	(Reverse Address Resolution Protocol): Stellt die Umkehrfunktion von ARP zur Verfügung

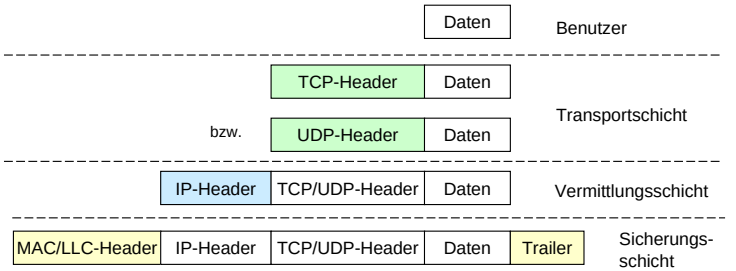
5.1.3. Zusammenspiel: IP-Instanz und angrenzende Instanzen

- Schicht-4-Instanz (TCP- bzw. UDP) übergibt die Daten zusammen mit der IP-Adresse des Empfängers zur Übertragung an die IP-Instanz
- IP-Instanz beauftragt ARP-Instanz mit Ermittlung der entsprechenden Schicht-2-Adresse
- IP-Instanz übergibt PDUs zusammen mit der ermittelten Schicht-2-Adresse an die Instanz der Sicherungsschicht
- IP-Instanz reicht empfangene Daten an TCP- bzw. UDP-Instanzen weiter
- Probleme während der Übermittlung können den Partnerinstanzen über ICMP mitgeteilt werden
- Informationen über Gruppenzugehörigkeiten werden mittels IGMP (Internet Group Management Protocol) im Netz verbreitet



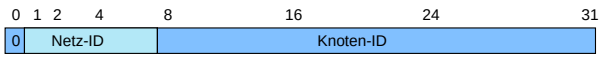
Zusammenspiel der Protokollinstanzen: die PDUs

- IP leitet Datenpakete durch das Netzwerk zum Empfänger
- TCP/UDP fügen Prozessadressierung (Ports) zu IP hinzu
- TCP sichert darüberhinaus die Datenübertragung
- Protokolldateneinheiten (PDUs) werden gekapselt



5.1.4. IP-Adressen / Adressklassen (historisch)

- **Class A** für Netze mit bis zu 16 Mio. Knoten (0.0.0.0 - 127.255.255.255):



- **Class B** für Netze mit bis zu 65.536 Knoten (128.0.0.0 - 191.255.255.255):

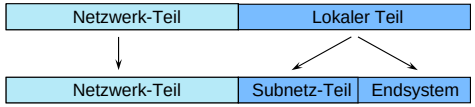
- **Class C** für Netze mit bis zu 256 Knoten (192.0.0.0 - 223.255.255.255):

- **Class D** für Gruppenkommunikation (Multicast) (224.0.0.0 - 239.255.255.255):

- **Class E**, noch reserviert für zukünftige Anwendungen (240.0.0.0 - 247.255.255.255):

IP-Subnetz-Adressen

- **IP-Adresse** (hier Class B):



- **Subnetzmasken** kennzeichnen den Bereich der IP-Adresse, der das Netzwerk und das Subnetzwerk beschreibt. Dieser Bereich wird dabei durch Einsen („1“) in der binären Form der Subnetzmaske festgestellt. Subnetzmasken haben keine Internet-weite Gültigkeit.
- **Beispiel:**

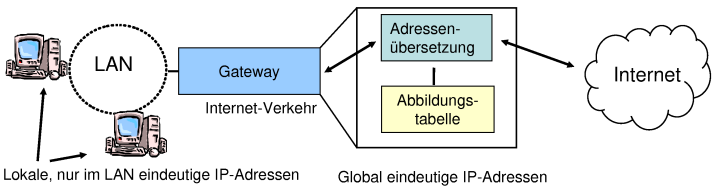
IP-Adresse:	129.	13.	3.	64
	1000 0001	0000 1101	0000 0011	0100 0000
Subnetzmaske:	255.	255.	255.	0
	1111 1111	1111 1111	1111 1111	0000 0000
Netzwerk:	129.	13.		
Subnetz:			3.	
Endsystem:				64

CIDR: Classless Inter-Domain Routing

- Bisher: 3 Adressklassen für Unicast (A, B und C)
  - schlechte Ausnutzung durch ungenutze Adressen („Verschnitt“)
  - ⇨ Granularität der Netze häufig nicht passend; Anzahl der Netze zu klein
- Beispiel:
  - Kleinbetrieb, der 100 IP-Adressen braucht, beantragt Class-C-Netz
  - 254 Adressen könnten vergeben werden, damit **154 ungenutzte Adressen**
- **CIDR:** Ersetzen der festen Klassen durch **Netzwerk-Präfixe** variabler Länge
  - Bsp.: 129.24.12.0/14 → Die ersten 14 Bits der IP-Adresse werden für die Netzwerk-Identifikation verwendet
- Einsatz in Verbindung mit hierarchischem Routing:
  - Backbone-Router, z.B. an Transatlantik-Link, betrachtet nur z.B. die ersten 13 Bit; dadurch kleine Routing-Tabellen, wenig Rechenaufwand
  - Router eines angeschlossenen Providers z.B. die ersten 15 Bit
  - Router in einem Firmennetz mit 128 Hosts betrachtet die ersten 25 Bit

5.1.5. Network Adress Translation/Translator (NAT)

- Nur Rechner, die gerade mit der Außenwelt kommunizieren, benötigen eine global eindeutige Adresse
  - Diese global eindeutige Adresse kann temporär vergeben werden
- Gateway/Router nimmt transparente Umsetzung zwischen Adressen/Adressbereichen vor
  - Speicherung in Abbildungstabelle
  - keine Änderungen an Endgeräten erforderlich
  - ⇨ Identitäten der Hosts werden verborgen



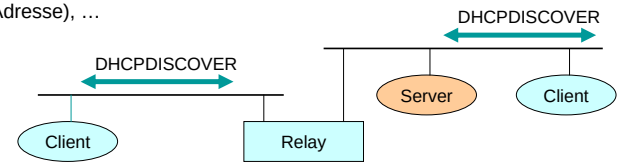
NAT - weitere Eigenschaften

- **Abbildungsarten:**
  - Statisch: lokale Adresse ⇔ globale Adresse
    - z.B. 192.168.39.100 ⇔ 129.13.41.100
  - Dynamisch: lokale Adresse ⇔ globale Adresse aus Adresspool
    - Erzeugen eines „Simple Entry“ in Abbildungstabelle (IP_{lokal} ⇔ IP_{global})
  - Overloading:
    - Abbildung aller lokalen Adressen auf eine einzige globale Adresse
    - zusätzliches Unterscheidungskriterium: Portnummern
    - Erzeugen eines „Extended Entry“ in Abbildungstabelle
      - Protokoll, ($Port_{lokal}$, IP_Ad_{lokal}) ⇔ (IP_Ad_{global}, $Port_{global}$)

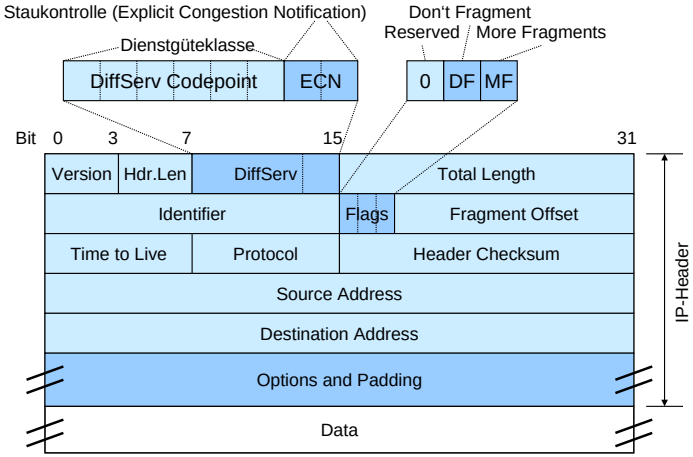
Protokoll	lokaler Port	lokale IP-Addr.	globaler Port	globale IP-Addr.	Ziel-IP-Addr.	Ziel-Port
TCP	1024	192.168.1.1	1024	129.133.3.1	207.171.4.4	1234
TCP	1500	192.168.1.2	1500	129.133.3.1	134.100.4.4	80

5.1.6. DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

- **Anwendung**
  - Vereinfachung der Installation und Verwaltung von vernetzten Rechnern
  - liefert Rechnern notwendige Informationen über IP-Adresse, DNS-Server-Adresse, Domain-Namen, Subnetz-Masken, Router etc.
  - damit weitgehend automatische Integration eines Rechners in das Internet bzw. Intranet
- **Client/Server-Modell**
  - ein Client sendet via IP-Broadcast eine Anfrage an einen DHCP-Server an UDP Port 67 (unter Umständen über ein DHCP-Relay)
    Clientanfragen: DHCPDISCOVER, DHCPREQUEST, DHCPRELEASE, …
  - der Server antwortet (initial via IP-Broadcast) und liefert die angeforderte Konfiguration. Serverantworten: DHCPOFFER, *DHCPACK* (mit IP-Adresse), …

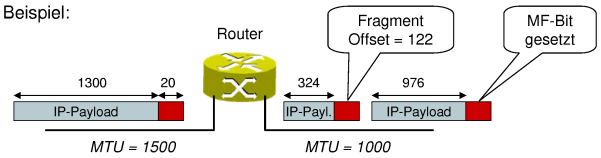


IP Datagramm: Aufbau



IP-Fragmentierung

- Größe eines IP-Pakets durch maximale Rahmengröße auf Schicht 2 begrenzt
  - MTU (Maximum Transport Unit): maximale Nutzdatenlänge in Schicht-2-Rahmen
  - Beispiel IEEE 802.3: MTU = 1500 Byte
- IP-Endsysteme kennen MTU der angeschlossenen Netzwerkadapter
  - Sender passt i.d.R. Paketgröße an lokale MTU an
- IP-Fragmentierung wird notwendig, wenn Paket über einen Link mit kleinerer MTU geroutet wird
  - Fragmentierung der IP-Payload an 8-Byte Grenzen
  - Beispiel:

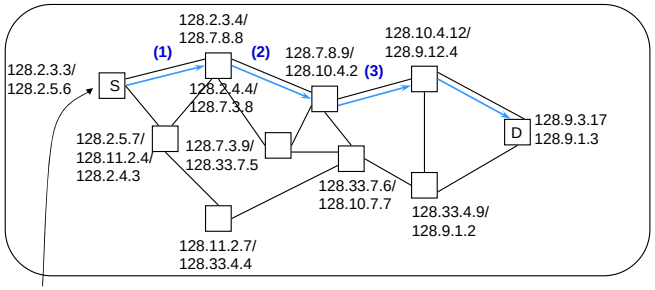


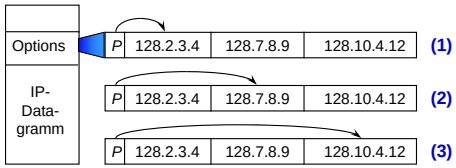
- Fragmentierung heutzutage durch Path-MTU-Discovery vermieden (➔ ICMP)

5.1.7. IP-Dienste: Überprüfung des Paketkopfes

- Überprüfungen, die nach dem Empfang eines IP-Datagrammes am Header durchgeführt werden
  - Überprüfung der korrekten Länge des Headers
  - Test der IP-Versionsnummer
  - Überprüfung der korrekten Datagrammlänge
  - Prüfsummenbildung über den IP-Header
  - Überprüfung der Paketlebenszeit
  - Überprüfung der Protokoll-ID
- Bei negativem Resultat eines der oben aufgeführten Tests wird das Paket einfach verworfen und eine Fehlermeldung über ICMP an den Sender des Pakets gesendet

Optionale IP-Dienste: Source Routing – Beispiel





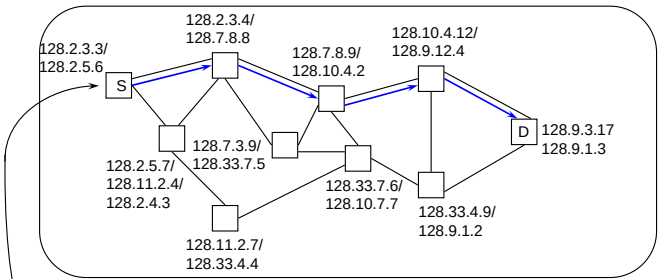
Hinweis:
Jeder Schnittstelle (Interface) ist eine eigene IP-Adresse zugeordnet. Im Diagramm sind aber nicht alle IP-Addressen aufgeführt.

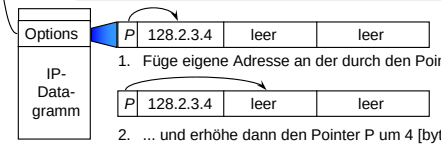
Optionale IP-Dienste: Zeitstempel

- Jeder Router fügt im Optionsfeld einen Zeitstempel ein, der den Zeitpunkt charakterisiert, zu dem das Paket vom Router bearbeitet wurde.
  - Aussagen über die Belastung der Netzwerke sind möglich
  - Die Effizienz der benutzten Routing-Algorithmen kann abgeschätzt werden
- Dabei existieren folgende Möglichkeiten, die durch ein 4 Bit langes Flag-Feld definiert werden:
  - Flag-Wert = 0: Nur Zeitstempel aufzeichnen, keine Adressen.
  - Flag-Wert = 1: Sowohl Zeitstempel als auch Adressen (Route Recording) aufzeichnen
  - Flag-Wert = 3: Die Adressen sind vom Sender vorgegeben (Source Routing), die adressierten Router tragen nur ihren Zeitstempel ein

Optionale IP-Dienste: Route Recording

- Im Record-Route-Options-Feld wird der durchlaufene Weg festgehalten





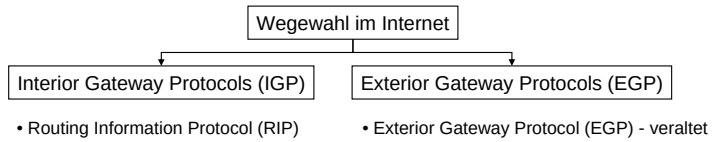
1. Füge eigene Adresse an der durch den Pointer P festgelegten Stelle ein ...

2. ... und erhöhe dann den Pointer P um 4 [byte], so dass er auf das nächste leere Feld in der Liste zeigt

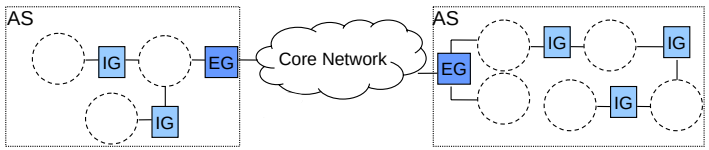
Übersicht: IP-Routing Protokolle

- **IGP** (Interior Gateway Protocol): zur Wegewahl *innerhalb* einer Verwaltungseinheit (Administrative Domain oder Autonomous System)
  - **RIP** (Routing Information Protocol) basierend auf Distance-Vector-Algorithmus (überall verfügbar, aber veraltet)
  - **OSPF** (Open Shortest Path First) basierend auf Link-State-Algorithmus (neuer Standard)
  - IS-IS (Intermediate System-Intermediate System), ebenfalls Link-State-Algorithmus, aus der OSI-Welt, teilweise auch im Internet eingesetzt
- **EGP** (Exterior Gateway Protocol): Wegewahl *zwischen* Verwaltungseinheiten, sog. „politische Firewall“
  - EGP (Protokoll gleichen Namens!, veraltet)
  - **BGP** (Border Gateway Protocol, derzeit Version BGP4, RFC 1654)
  - Anwendungen:
    - Verhindern des Durchleitens „fremder“ Pakete durch eigenes Netz, obwohl der Weg kürzer ist
    - politische Restriktionen
    - Firmenpolitik (Firma X will nicht für den Transport der Pakete von Firma Y bezahlen)

Dynamische Wegewahl im Internet



Autonomes System (AS): Netz(e) unter einheitlicher Verwaltung
Interior Gateway (IG): Interner Router eines AS
Exterior Gateway (EG): Router am Rande eines AS

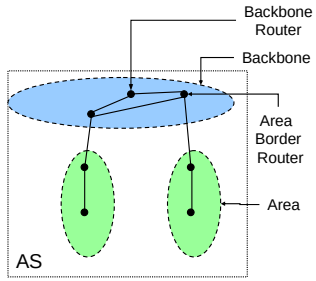


5.1.8. Routing Hierarchie – Protokolle

- **Intra-Domain-Routing:**
  - OSPF (Open Shortest Path First)
    - vom IAB empfohlenes Protokoll
    - „Link State“-Verfahren
  - RIP (Routing Information Protocol) - früher bzw. heute bei kleinen Netzen
    - wenig robust in komplexeren Netzwerken (Schleifenbildung)
    - langsamer bei Änderungen
    - Distanzvektorverfahren
- **Inter-Domain-Routing:**
  - BGP (Border Gateway Protocol)
    - Pfad-Vektor-Verfahren
    - BGP Version 4 (BGP4) unterstützt Classless Inter-Domain Routing (CIDR)

OSPF (Überblick)

- **Grundlage:**
  - Verbessertes Link State Routing
  - Basiert auf der Berechnung eines kürzesten Pfades von der Quelle zum Ziel
  - Hierarchische Aufteilung des AS
  - Intra-Area-, Inter-Area-, Inter-AS-Verkehr
  - Je Area Auswahl eines "Designated Router" (DR) und eines Backup-DR
- **Eigenschaften:**
  - Unterstützung unterschiedlichster Metriken, z.B. Anzahl Hops, Verzögerung
  - Adaptiv (d.h. reagiert auf Topologieänderungen)
  - Lastausgleich (Berücksichtigung verschiedener Wege) zum Zielknoten
  - Unterstützung hierarchischer (Sub-)Netze
  - Unterstützung verschiedener Wege



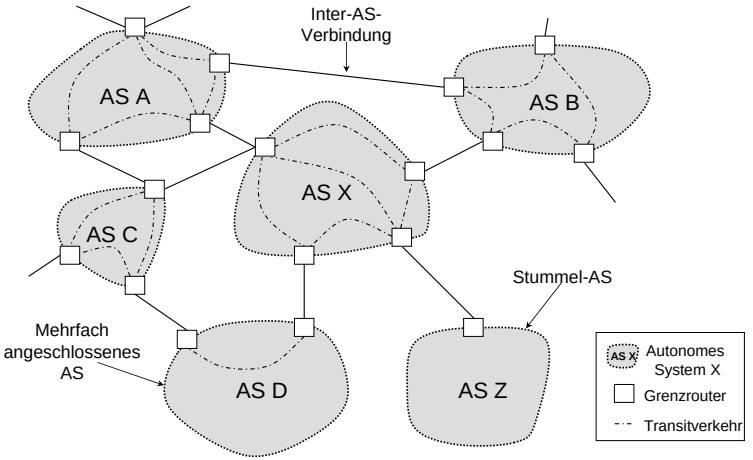
Intra-Domain-Routing mit OSPF

- Namensgebung:
  - Open: offener Entwicklungsprozess der IETF
  - SPF: durch Dijkstras Algorithmus kürzeste Pfade in Graph zu finden Komplexität: O(n log n), n= #Links
- Je OSPF-Area nicht mehr als 200 Router empfohlen
- Jeder Knoten
  - besitzt komplettes Abbild des Netzwerks (Routing-Datenbank) und
  - berechnet selbständig alle Pfade mit SPF-Algorithmus
- Austausch von geänderten Einträgen durch Fluten (bestätigt)
- Periodischer Austausch von Einträgen (Link-ID, Version)
  → interessante Einträge werden explizit angefordert
- Unterstützung mehrerer Metriken und mehrfacher Pfade
- Externe Routen werden gesondert eingetragen und vermerkt

Autonome Systeme im Internet

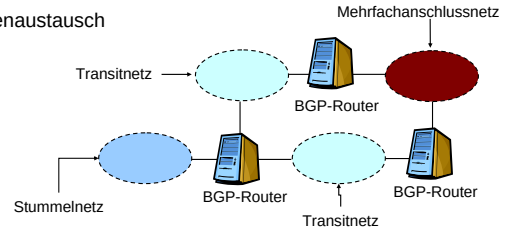
- **Autonomes System (AS):** Zusammenhängende Menge von Routern und Netzwerken unter derselben Administration
- Änderungen innerhalb des Systems sollen verborgen bleiben
- Betreiber möchte i.A. interne Struktur nicht bekannt geben
- Innerhalb eines AS sind auch unterschiedliche Intra-Domain-Routing-Protokolle möglich (RIP, OSPF)
- Jedes AS erhält eine eindeutige AS-Nummer (16 Bit)
- Derzeit > 14000 Autonome Systeme, davon
  - ~ 80% Stub/Origin only-AS
  - ~ 19% Mixed-AS
  - ~ 1% Transit-AS
  - Details siehe u.a.: http://bgp.potaroo.net/ (bgp table growth)

Internet-Architektur: Autonome Systeme



BGP (Überblick)

- **Aufgabe:**
  - Wegewahl zwischen autonomen Systemen (AS) unter Berücksichtigung besonderer politischer, wirtschaftlicher oder sicherheitsbezogener Regeln (Policies).
- **Grundlage:**
  - Distance Vector Routing
  - Exakter Pfad zum Zielknoten wird gespeichert
  - BGP-Router tauschen komplette Pfade aus (→ Path Vector Routing)
  - Routing innerhalb der AS wird nicht betrachtet
  - TCP zum Datenaustausch



Inter-Domain-Routing mit BGP

- Welche Netzwerke sind über die Nachbardomänen erreichbar?
- Protokoll zum Austausch dieser Informationen: BGP-4 [RFC 1771]
- Unterstützung von Classless Interdomain Routing (CIDR)
- Berücksichtigung politischer Entscheidungen (Routing policies) möglich, daher Angabe kompletter Pfade (Schleifenfreiheit):

```
Dest. Net.      Next-Hop            Pfad
141.3.0.0/16 195.221.222.254       5409 1275 553
```

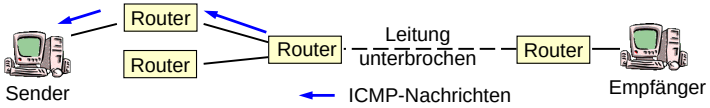
- Austausch der Routing-Tabellen bzw. der Änderungen erfolgt über TCP-Verbindungen
- Größe der Routingtabelle: derzeit bis zu 140000 Einträge
- Import von Routen des Intra-Domain-Routing-Protokolls

Zusammenspiel: OSPF ⇔ BGP

- Innerhalb eines AS muss jeder Router zu jedem Netzwerk-Präfix eine Route kennen
- Die Border-Router im Backbone-Bereich importieren und exportieren Routen zwischen BGP und OSPF
- Jeder Border-Router stellt mit jedem anderen Border-Router des AS eine interne BGP-Verbindung her
- Einfacher Fall: nur ein Router stellt die Verbindung zu externen Systemen her (Stub-Area) → Default-Route eintragen
- Weiterer Fall: Default-Route mit zusätzlichen expliziten Angaben
- Mehrere Router mit externer Verbindung:
  komplette Routing-Tabelle mit sämtlichen Zielnetzwerk-Präfixen notwendig (in OSPF importierte externe Routen)

Steuerung von IP: ICMP

- IP ist nur für den (unzuverlässigen) Datenaustausch zuständig.
- Für Fehlerfälle oder Testzwecke wird ICMP (Internet Control Message Protocol) verwendet.



Nachrichtentypen, Beispiele:

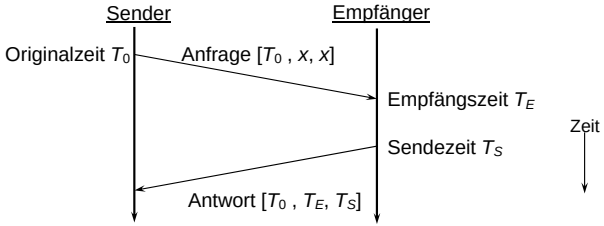
- *Destination Unreachable:* Ziel nicht erreichbar.
- *Time Exceeded*: Time-to-Live-Feld eines Pakets ist abgelaufen.
- *Echo Request / Reply*: Echo Reply wird angefordert ("`ping`").
- *Timestamp Request / Reply*: Ähnlich Echo Request. Zusätzlich Zeitstempel mit Ankunftszeit der Anfrage/Sendezeit der Antwort.

ICMP: Fehlermeldungen

- **Zieladresse nicht erreichbar** (destination unreachable):
  Ein Datenpaket konnte (z.B. wegen einer unterbrochenen Leitung oder eines ausgefallenen Routers) nicht zugestellt werden.
- **Zeit abgelaufen** (time exceeded):
  Datenpaket wurde wegen Ablauf seiner Lebenszeit von einem Router verworfen.
- **Falscher Parameter** (parameter problem):
  Datenpaket wurde wegen eines unzulässigen Wertes im IP-Paketkopf verworfen.
- **Quellendämpfung** (source quench):
  Ein überlastetes Kommunikationssystem fordert den Sender auf, die Übertragungsrate zu senken.
- **Umleiten** (redirect):
  Ein Datenpaket sollte besser über einen anderen Router gesendet werden.
  → Die Fehlermeldungen enthalten jeweils ein Feld zur genauen Angabe der Fehlerursache (z.B. „Netzwerk nicht erreichbar“ oder „Endsystem nicht erreichbar“ für die Meldung „Zieladresse nicht erreichbar“)

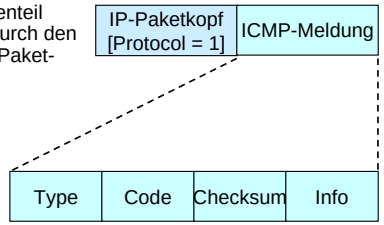
ICMP: Statusanfragen

- **Echo und Echoantwort** (echo and echo reply):
  Dient der Überprüfung der Aktivität von Kommunikationssystemen. Der Empfänger einer Echo-Anfrage sendet in der Echo-Antwort die erhaltenen Daten an den Kommunikationspartner zurück.
- **Zeitstempel und Zeitstempelantwort** (timestamp and timestamp reply): Dient der Bestimmung von Paketumlaufzeiten. Die Meldungen umfassen mehrere Felder zur Aufnahme von Zeitstempeln, anhand derer die Paketbearbeitungszeiten beim Empfänger und die Verzögerung im Netzwerk bestimmt werden können.



ICMP: Paketformat

- Übertragung der ICMP-Meldungen
  - ICMP-Meldungen werden im Datenteil von IP-Paketen übertragen und durch den Wert „1“ im Protocol-Feld des IP-Paketkopfes kenntlich gemacht.

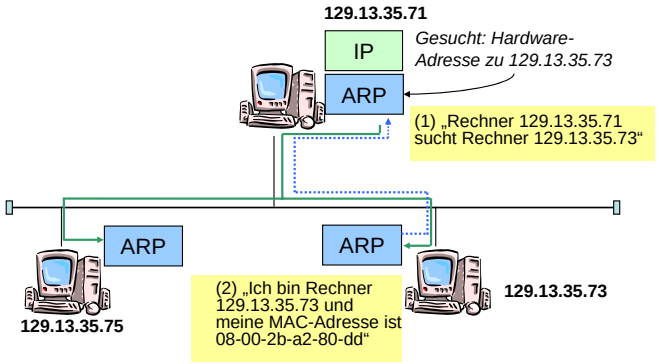


- Format der ICMP-Meldungen
  - Type: Typ der Meldung (z.B. Type = 3 entspricht „Zieladresse nicht erreichbar“)
  - Code: Genaue Beschreibung der Meldung (z.B. „Netzwerk nicht erreichbar“)
  - Checksum: Prüfsumme über die gesamte ICMP-Meldung
  - Der Inhalt des Info-Teils ist abhängig vom Typ der ICMP-Meldung (z.B. Felder für Zeitstempel bei Meldung „Zeitstempel und Zeitstempelantwort“)
  - ICMP „Packet too big“ Nachricht: enthält Typ = 2, Code = 0, Checksum, MTU-size, gefolgt von Original-Paket (max. 576 byte)

5.1.9. ARP: Address Resolution Protocol

- **Problem:**
  - Abbildung der Internet-Adresse eines Rechners auf die physikalische Adresse der Station (MAC-Adresse = Adresse der Adapterkarte)
- **Lösungsalternativen:**
  - Unterhalten einer Abbildungstabelle in jedem Rechner.
  - Unterhalten einer Abbildungstabelle in einem Server, der die Anfragen der Kommunikationssysteme beantwortet.
  - Dynamische Abbildung der Adressen durch Senden einer entsprechenden Anfrage an alle Rechner im LAN (Broadcast-Anfrage)
- Bei den beiden erstgenannten Methoden müssen die Abbildungstabellen bei jeder Änderung manuell abgeglichen werden.
- Ein Verfahren zur dynamischen Abbildung der Adressen ist durch das Address Resolution Protocol (ARP) festgelegt.

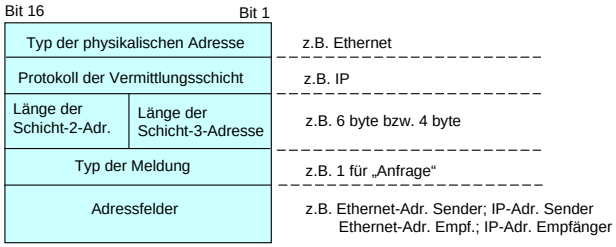
ARP – Beispiel



Sicherheitslücke?

ARP: Paketformat

- Übertragung der ARP-Meldungen
- Eine ARP-Meldung wird im Datenteil eines Paketes der Sicherungsschicht übertragen.
- Format der ARP-Meldungen:



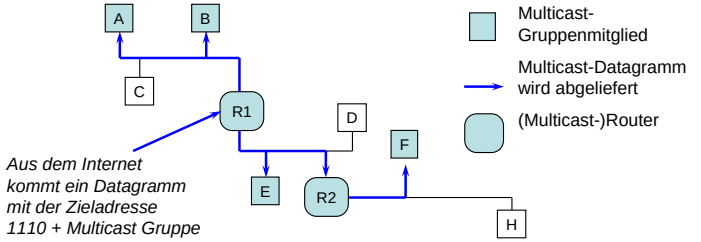
Länge und Aufbau der Adressfelder sind vom Typ der Adressen abhängig

Reverse Address Resolution Protocol (RARP)

- **Aufgabe:**
  - Umsetzen MAC-Adresse ⇨ IP-Adresse.
  - Wichtig z.B. für plattenlose Workstations, die von einem Dateiserver booten. Dazu müssen sie ihre IP-Adresse wissen, welche die Station allerdings beim Einschalten noch nicht kennt.
- **Vorgehensweise:**
  - Station schickt einen Rundruf ins lokale Netz unter Angabe der eigenen MAC-Adresse, die durch die Hardware vorgegeben ist.
  - RARP-Server sieht die Anfrage und bestimmt anhand einer Konfigurationsdatei die zugehörige IP-Adresse.
  - RARP-Server schickt die IP-Adresse in einer RARP-Antwort an die anfragende Station zurück.

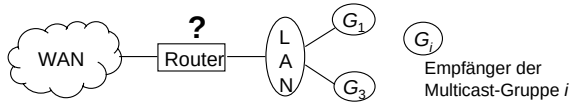
IP-Multicast

- Ein einzelnes IP-Datagramm wird an mehr als eine Station adressiert.
- Multicast-Verwaltung erfolgt über das IGMP (Internet Group Management Protocol).
- Es muss eine Class D-Adresse verwendet werden.
  - Die ersten vier Bits des Adressfelds im Kopfes entsprechen 1110.
  - Danach folgt die 28 bit lange ID der Gruppe.
- Beispiel:



IGMP: Internet Group Management Protocol

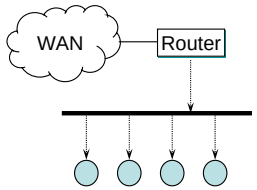
- **Problem:**
  - Wie erkennt ein Router, dass Multicast-Nachrichten bestimmter Gruppen von ihm weitergeleitet werden müssen?
- **Beispiel:**



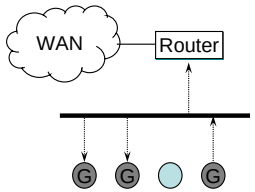
  - Nachrichten der Gruppen 1 und 3 müssen vom Router in das angeschlossene LAN weitergeleitet werden, wohingegen Nachrichten anderer Gruppen das LAN nicht erreichen sollten.
- **Lösungen:**
  - Manuelle Eingabe von Gruppenzugehörigkeiten in der Router-konfiguration ⇒ hoher Verwaltungsaufwand bei dynamischen Gruppen.
  - Selbstständiges Erlernen der Gruppenzugehörigkeiten durch den Austausch entsprechender Information ⇒ ein solches Verfahren wird durch das **Internet Group Management Protocol** (**IGMP**) beschrieben.

IGMP: Protokollablauf I

1. Der Router sendet periodisch Gruppenzugehörigkeitsanfragen an alle Rechner des LAN (via Broadcast). Durch Setzen der „Time To Live“ (TTL) auf 1 wird die Anfrage nur im LAN verbreitet.



2. Nach Erhalt einer Anfrage startet jeder Rechner für jede Gruppe, welcher er angehört, einen Zeitgeber. Dieser wird mit einem Zufallswert initialisiert. Nach Ablauf des Zeitgebers sendet der Host eine Antwort bzgl. der Gruppenzugehörigkeit an alle Gruppenmitglieder im LAN (Gruppenadresse, TTL=1). Multicast-Router erhalten alle IP-Multicast-Nachrichten.



IGMP: Protokollablauf II

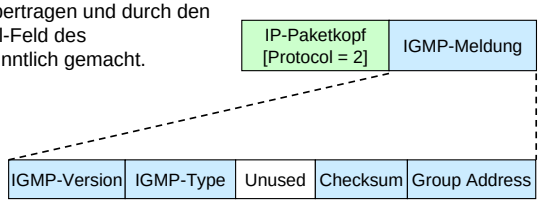
3. Weitere Gruppenmitglieder erhalten die Antwort und stoppen den entsprechenden Zeitgeber. Dadurch werden redundante Antworten vermieden.

4. Der Router erhält alle Antworten und aktualisiert seine Routingtabelle entsprechend. Erhält ein Router nach mehrmaliger Anfrage keine Antwort bzgl. einer bestimmten Gruppe, so wird ihr Eintrag aus der Routingtabelle gelöscht.

è Tritt ein Rechner einer Gruppe bei, so sendet er sofort eine entsprechende Mitteilung an alle Router im LAN. Aus Gründen der Fehlertoleranz wird die Mitteilung wiederholt gesendet.

IGMP: Paketformat

- Übertragung der IGMP-Meldungen
- IGMP-Meldungen werden im Datenteil von IP-Paketen übertragen und durch den Wert 2 im Protocol-Feld des IP-Paketkopfes kenntlich gemacht.



- Format der IGMP-Meldungen
  - IGMP-Version: Versionsnummer des eingesetzten IGMP-Protokolls.
  - IGMP-Type: Typ der Meldung (z.B. 1 = Anfrage, 0 = Antwort).
  - Unused: Wird nicht genutzt (immer zu 0 gesetzt).
  - Checksum: Prüfsumme über die gesamte IGMP-Meldung.
  - Group Address: Wird bei einer Anfrage auf 0 gesetzt, bei einer Antwort enthält das Feld die Adresse derjenigen Gruppe, auf welche sich die Meldung bezieht.

5.1.10. IPv6 – Motivation (ursprünglich)

Das Internet funktioniert seit Jahrzehnten! Warum ein neues IP-Protokoll?

Anwachsen des Internets: Der überwältigende Erfolg des Internets führte zu stark anwachsenden Benutzerzahlen
→ Bedarf an Adressen, sowie Änderungen von Adressen mit IPv4 nicht zufriedenstellend lösbar

Neue Anwendungen: Neuartige Anwendungen erfordern neuartige Dienste und zusätzliche Funktionalität (z.B. garantierte Netzdienste, Synchronisation von Audio- und Videodaten, automatisierte Konfiguration)
→ Konzepte zur funktionalen Erweiterung erforderlich

Hohe Datenraten: Hochleistungsfähige Zwischensysteme benötigen geeignete Paketformate zur effizienten Bearbeitung

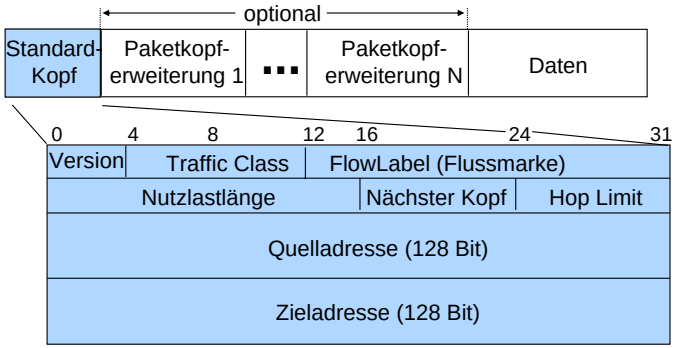
Überblick: Neuerungen in IPv6 (1)

- **Flexibles Paketformat**
  - Vereinfachung des (Standard-) Paketkopfes: 8 statt 13 Felder (IPv4)
  - Paketkopf fester Länge
  - Verschieben zahlreicher Optionen in optionale Paketkopferweiterungen
- **Erweiterte Adressierung**
  - Erhöhung der Adresslänge von 32 Bit auf 128 Bit
    - 2^32 bit: ~ 4 Mrd. IPv4-Adressen
    - 2^128 bit: ~ 3,4·10^38 IPv6-Adr., ~ 6 x 10^23 Adressen pro m^2 Erdoberfläche
  - Definition mehrerer Hierarchieebenen (effizienteres Routing)
  - Einführung von *Anycast-Adressen* (Kommunikation zu einem Mitglied einer Gruppe)
- **Unterstützung von Ressourcenreservierung**
  - *FlowLabel* (Flussmarke) und Traffic Class pro IPv6-Paket
  - Ermöglichen die Nutzung von Protokollen zur Ressourcenreservierung

Überblick: Neuerungen in IPv6 (2)

- **Neighbor Discovery**
  - Adressauflösung: IPv6-Adr.->MAC-Adr. (in ICMP integriert, ersetzt ARP)
  - Erkennen des nächsten Routers
- **Automatische Systemkonfiguration**
  - „Plug'n Play“: Inbetriebnahme eines Internet-Rechners ohne manuelle Konfiguration.
  - Realisiert durch DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)
- **Unterstützung mobiler Systeme**
  - Adresszuweisung durch automatische Systemkonfiguration
  - Die Option „Binding Update“ im Destination-Options-Header ermöglicht die direkte Umleitung der IP-Pakete an den aktuellen Standort
- **Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten**
  - Unterstützung von Authentifizierung und Datenintegrität
  - Sicherheitsmechanismen werden bei IPv6-Implementierungen gefordert (sind bei IPv4 in Form von IPSec lediglich optional vorhanden)

IPv6-Paketformat



Vereinfachung des Paketformats gegenüber IPv4:

- Eliminierung verschiedener Felder (z.B. Kopflänge, Kopf-Prüfsumme)
- Verschieben der Optionen in Paketkopferweiterungen
- Spezifikation: RFC2460 (Neufassung von RFC1883), RFC2373, ...

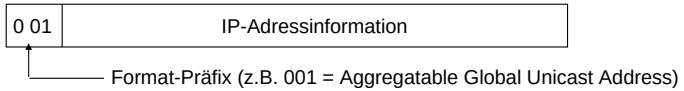
Kopferweiterungen

- Kopferweiterungen (Header Extensions) erlauben eine effizientere Implementierung und bewahren die Flexibilität für spätere Erweiterungen
- Definition unterschiedlicher Kopferweiterungen: Knoten-zu-Knoten-Optionen, Ziel-Optionen, Routing, Fragmentierung, Authentifizierung, Verschlüsselung
- Jeder Typ einer (optionalen) Kopferweiterung darf höchstens einmal in einer Dateneinheit enthalten sein
- Der Typ der jeweils nachfolgende Kopferweiterung wird im Feld „Nächster Kopf“ eingetragen
- Beispiel:

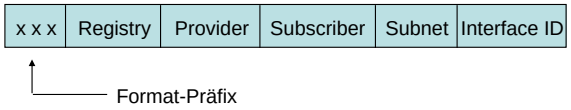
Standard-Kopf (Nächster Kopf = Routing)	Routing-Kopf (Nächster Kopf = TCP)	TCP-Kopf + Benutzerdaten

IPv6: Adressierung

- IPv6-Adressen (Länge 128 Bit)
  - Notation `x:x:x:x:x:x:x:x`, wobei jede Stelle 16 Bit hexadezimal kodiert
  - Beispiele: `3FFE:400:20::A00:2BFF:FEA3:ADCB`
    `FF01:0:0:0:0:0:0:101 oder FF01::101`
    `FEDC:BA98:7600::/40` 40 Bit langes Präfix für das Routing
  - Unterscheidung von **Adressklassen**:
    - Unicast-Adressen
    - Anycast-Adressen
    - Multicast-Adressen – Präfix ff00::/8 (ff…)
  - Unterscheidung von **Adresstypen**:
    - Link-Local Address
    - Site-Local Address
    - Aggregatable Global Unicast Address
  - Typ einer Adresse wird durch *Format-Präfix* (führende Bits) festgelegt:



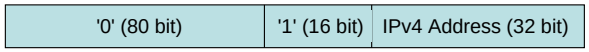
Unicast-Adressen in IPv6 (1)



- Aggregatable Global Unicast Address (Provider-Based Unicast Address)
  - Hierarchischer Aufbau zur Vereinfachung der Vermittlung von IPv6-Daten.
  - Globale Gültigkeit im Internet.
  - Format-Präfix 001
- Link-Local Address
  - Besteht aus Präfix und Kennung der Netzkarte (Interface-Identification).
  - Format-Präfix fe80::/10 (also 1111 1110 10)
  - Registry = Provider = Subscriber = Subnet = '0'
  - Ausschließlich innerhalb eines Subnetzes gültig.
- Site-Local Address
  - Besteht aus Präfix, Kennung des Subnetzes (Subnet) und Kennung der Netzkarte.
  - Format-Präfix fec0::/10 (fec0… bis feff…)
  - Registry = Provider = Subscriber = '0'
  - Ausschließlich innerhalb eines Netzwerkes gültig.
  - veraltet (deprecated), stattdessen Unique Local Unicast RFC 4193

Unicast-Adressen in IPv6 (2)

- Adressformate für den Übergang von IPv4 nach IPv6
  - IPv4 Mapped Address (repräsentiert der IPv6-Anwendung IPv4-Adresse als IPv6 Adresse)

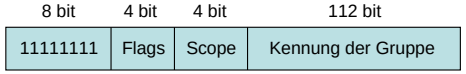


  - IPv4 Compatible Address (zum Tunneln von IPv6-Paketen über IPv4-Router)

- Einfache Abbildung zwischen IPv4- und IPv6-Adressen.
  - Ergeben die gleiche Prüfsumme wie die entsprechenden IPv4-Adressen.
  - keine Neuberechnung des TCP-Pseudo-Headers nötig.

Multicast-Adressen in IPv6

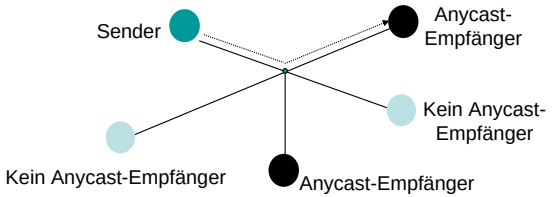
- Multicast-Adressen identifizieren eine Menge von Netzinterfaces
- Multicast-Adressen sind durch ein spezielles Präfix gekennzeichnet:



- Zwei Typen von Multicast-Gruppen (Unterscheidung durch das Feld "Flag")
  - Permanente Gruppen existieren dauerhaft
  - Transiente Gruppen existieren nur zeitweise
- Gültigkeitsbereich der Adresse wird durch das Feld "Scope" festgelegt
- Einige Multicast-Adressen sind bereits für bestimmte Zwecke reserviert
  - (z.B. "All Systems on this Subnet", "DVMRP Routers")

Anycast-Adressen in IPv6

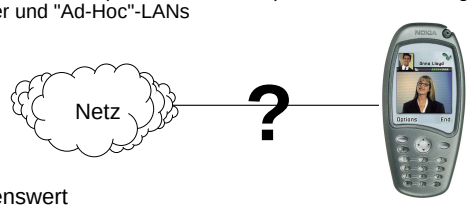
- Die an eine Anycast-Adresse gesendete Dateneinheit wird an ein Mitglied der Anycast-Gruppe ausgeliefert.



- Anycast-Adressen entsprechen syntaktisch den Unicast-Adressen
- Es ist nicht gewährleistet, dass aufeinanderfolgende Anycast-Dateneinheiten an den gleichen Empfänger übermittelt werden
- Anycast kann z.B. zur Lokalisierung von Netz-Ressourcen genutzt werden

Automatische Systemkonfiguration

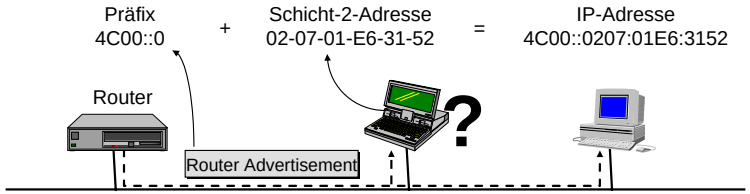
- Problem
  - Aufwand durch manuelle Konfiguration von Internet-Rechnern (z.B. eigene IP-Adresse, Adresspräfix, Nameserver), keine Unterstützung für mobile Rechner und "Ad-Hoc"-LANs



- Wünschenswert
  - "Plug'n Play" Lösung, d.h. Inbetriebnahme eines Internet-Rechners ohne manuelle Konfiguration allein durch physikalische Anbindung an das Netz
- Zwei Arten der automatischen Systemkonfiguration
  - Adresskonfiguration durch Neighbor Discovery
  - Adresskonfiguration und Serverbekanntgabe durch Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)

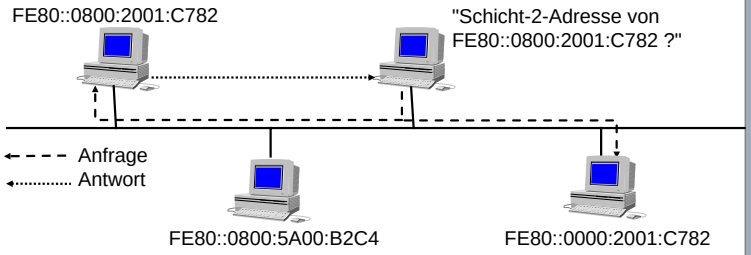
Automatische Systemkonfiguration durch Neighbor Discovery (RFC 2461)

- Präfix des Subnetzes ist global eindeutig
- Schicht-2-Adresse ist zumindest innerhalb des Subnetzes eindeutig
- IP-Adresse (im ganzen Internet routbar) kann aus dem Präfix des Subnetzes und der Schicht-2-Adresse zusammengesetzt werden
- Neighbor Discovery verwendet ICMPv6-Nachrichten
  Router Advertisement, Router-Solicitation, Neighbor-Solicitation, Neighbor-Advertisement, …



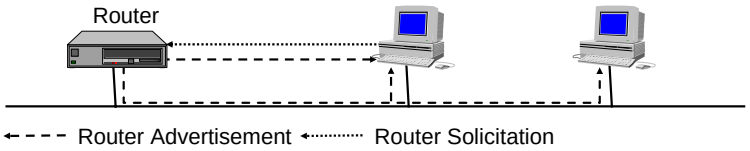
- Werden keine Router Advertisements gesendet, so können Link-Local Adressen mit FE80-Präfix gebildet werden, z.B.
  FE80::0 + 02-07-01-E6-31-52 = FE80::0207:01E6:3152

Neighbor Discovery



- **Problem:**
  - Abbildung einer IPv6-Adresse auf die entsprechende Schicht-2-Adresse
- **Lösung:** Anfrage mittels *Neighbor Solicitation*
  - Rechner hören auf *Solicited Nodes Address* (Präfix `FF02::1:` gefolgt von den letzten 32 Bit (z.B. `2001:C782`)der Unicast-Adresse, z.B. `FF02::1:2001:C782`)
  - Anfrage an die *Solicited Nodes Address* des Zielrechners (per L2-Multicast)
  - Zielrechner übermittelt seine Schicht-2-Adresse an den anfragenden Rechner

Router-Erkennung durch Neighbor-Discovery



- **Problem:**
  - Ermittlung eines Routers zum Senden von Dateneinheiten an Rechner außerhalb des eigenen Netzsegmentes.
- **Lösung:**
  - Router senden periodisch *Router Advertisement* Nachrichten an die "All Hosts" Adresse `FF02::1`. Diese enthalten unter anderem:
    - *Router Lifetime*: Zeitspanne bis zur Ungültigkeit der enthaltenen Information
  - Rechner können mittels *Router Solicitation* ein *Router Advertisement* anfordern, welches dann jedoch per Unicast gesendet wird.

Präfix-Erkennung durch Neighbor Discovery

- **Problem:**
  - Absender einer IP-Dateneinheit muss feststellen, ob sich der Zielrechner im eigenen Subnetz befindet (direktes Senden oder Senden über Router)
- **Lösung:**
  - Entscheidung basierend auf dem Präfix des eigenen Subnetzes.
    - Router Advertisement Nachrichten enthalten Präfix-Listen des Subnetzes.
    - Vergleich der Zieladresse mit den Präfixen durch logische UND-Verknüpfung.
    - Entspricht das Präfix der Zieladresse einem Präfix des Subnetzes, so wird das Paket direkt gesendet; ansonsten wird es an einen Router übermittelt.
- **Beispiel:**
  - Ein Rechner im Subnetz mit dem Präfix 4C00::0001:0:0:0 möchte an den Rechner mit Adresse 4C00::0002:0800:5A01:3982 senden:

```
        4C00::0001:   0:   0:   0
AND     4C00::0002:0800:5A01:3982
        ============================
        4C00::0000::              0
```

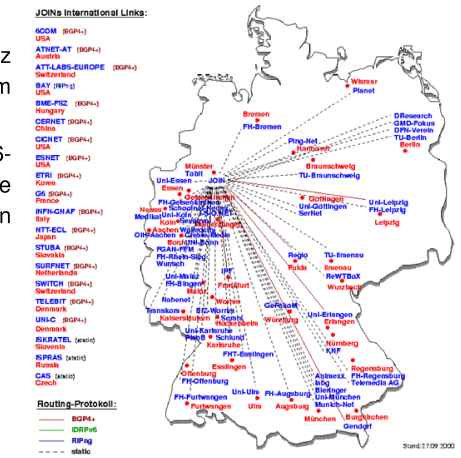
(ungleich dem Präfix des Subnetzes ➔ an einen Router übermitteln)

Übergang von IPv4 zu IPv6

- Langsamer Übergang geplant, keine abrupte Umstellung
  - wird sich über mehrere Jahre hinweg ziehen
- Zwei Strategien können verfolgt werden
  - Doppelter Stack
    - Während der Übergangsphase implementiert jeder IPv6-Knoten zusätzlich noch den IPv4-Protokollstack
  - IPv6 Tunneling
    - Tunnels werden benutzt, um IPv4-Pfade zu überbrücken. Diese Technik wurde im 6Bone angewendet
- Erforderliche Veränderungen in anderen Protokollen:
  - Modifiziertes Socket-API ist erforderlich
  - Modifizierte Routingprotokolle müssen eingeführt werden
  - DNS muss IPv6-Adressen unterstützen

Migration von IPv4 nach IPv6: Das 6Bone

- Weltweites „Overlay“-Netz zur Entwicklung und zum Testen von IPv6
- Das 6Bone verband IPv6-Subnetze über IPv4-Netze durch Konfiguration von Tunneln



Zukunft von IPv6

- Zunächst weltweite Erprobung in einem Overlay-Netzwerk („6-Bone“)
- Mittlerweile ein Regeldienst – neben IPv4
- Sollte IPv4 ersetzen, ob und wann aber derzeit nicht absehbar
- Ursprüngliche Motivation für IPv6:
  - Anwachsende Benutzerzahlen, Adressknappheit
    - Gegenmaßnahmen: CIDR, NAT; dadurch kein dringender Handlungsbedarf mehr im Festnetz – dafür aber im 3G-Mobilnetz!
  - Neuartige Dienste erfordern Unterstützung
    - Einsatz von QoS/RSVP umstritten, daher kein dringender Bedarf für flow-label-Feld in IPv6
    - Nutzung von Type-of-Service-Feld in IPv4 möglich, um Dienstgüteunterstützung zu realisieren („Differentiated Services“-Architektur)
  - Hohe Datenraten erfordern effizientes Paketformat
    - könnte bei breitem Einsatz von Verschlüsselungsverfahren auf Netzwerkschicht an Bedeutung gewinnen

5.2. Internet und Mobilität

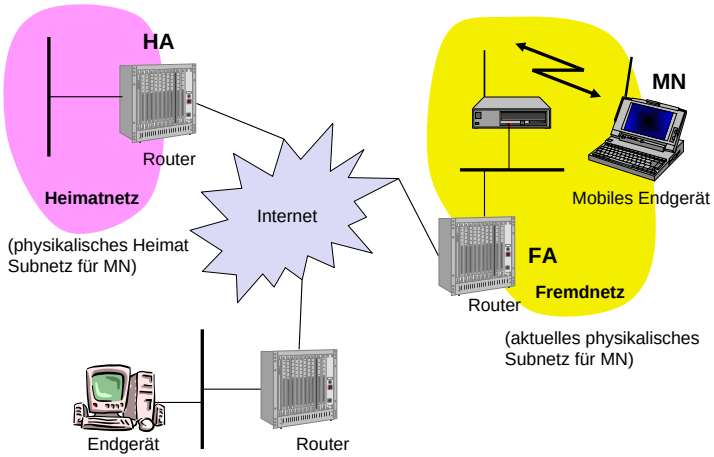
- Wegwahl
  - basiert auf IP-Zieladresse, Netzwerk-Präfix (z.B. 129.13.42) legt physikalisches Subnetz fest
  - wird das Subnetz gewechselt, **muss** auch die IP-Adresse passend gewechselt werden (bei IP ohne Mobilitätsunterstützung) oder ein spezieller Routing-Eintrag vorgenommen werden
- Spezifische Routen zum Endgerät?
  - anpassen aller Routing-Einträge, damit Pakete umgeleitet werden
  - skaliert nicht mit Anzahl der mobilen Geräte und u.U. häufig wechselnden Aufenthaltsorten, Sicherheitsprobleme
- Wechseln der IP-Adresse?
  - je nach Lokation wird entsprechende IP-Adresse gewählt
  - wie sollen Rechner nun gefunden werden – DNS-Aktualisierung dauert lange
  - TCP-Verbindungen brechen ab, Sicherheitsprobleme!

  ⇨ **Mobile IP**

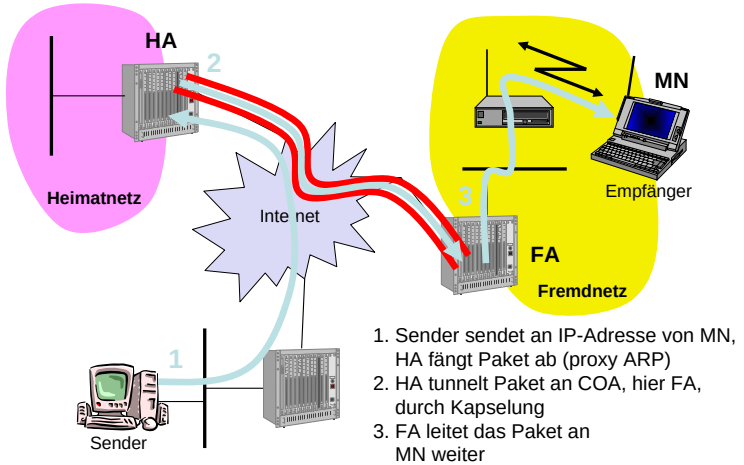
5.2.1. Terminologie

- Mobile Node (MN)
  - Knoten, der den Ort des Netzanschlusses wechseln kann, ohne seine IP-Adresse ändern zu müssen
  - typischerweise mobiles Endgerät
- Home Agent (HA)
  - Einheit im „Heimatnetz“ des MN, typischerweise Router
  - verwaltet Aufenthaltsort des MN, tunnelt IP-Datagramme zur COA
- Foreign Agent (FA)
  - Einheit im momentanen „Fremdnetz“ des MN, typ. Router
  - weiterleiten der getunnelten Datagramme zum MN, stellt meist auch default-Router für den MN dar, stellt COA zur Verfügung
- Care-of Address (COA)
  - Adresse des für den MN aktuell gültigen Tunnelendpunkt
  - stellt aus Sicht von IP aktuelle Lokation des MN dar
  - kann z.B. via DHCP gewählt werden

5.2.2. Beispielnetz

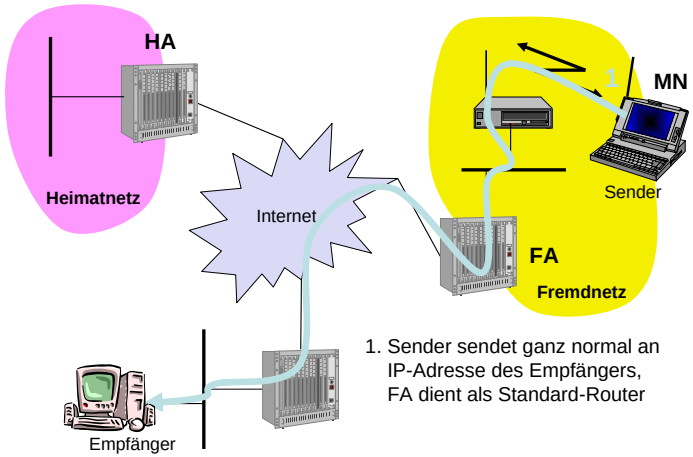


Datentransfer zum Mobilrechner



1. Sender sendet an IP-Adresse von MN, HA fängt Paket ab (proxy ARP)
2. HA tunnelt Paket an COA, hier FA, durch Kapselung
3. FA leitet das Paket an MN weiter

Datentransfer vom Mobilrechner



1. Sender sendet ganz normal an IP-Adresse des Empfängers, FA dient als Standard-Router

Einige Probleme mit Mobile IP

- **Sicherheit**
  - Authentifizierung mit FA problematisch, da u.U. nicht unter eigener Kontrolle (fremde Organisation)
  - Sicherheitsprotokolle, Schlüsselverwaltung und -verteilung
- **Firewalls**
  - verhindern typischerweise den Einsatz von Mobile IP, spezielle Konfigurationen sind nötig (z.B. reverse tunneling)
- **QoS**
  - häufige erneute Reservierungen im Fall von RSVP
  - Tunneln verhindert das Erkennen eines gesondert zu behandelten Datenstroms
- Sicherheit, Firewalls, QoS etc. sind aktueller Gegenstand vieler Arbeiten und Diskussionen!