

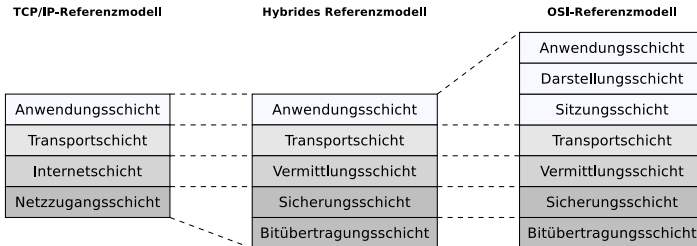
7. Foliensatz Computernetze

Prof. Dr. Christian Baun

Frankfurt University of Applied Sciences
(1971–2014: Fachhochschule Frankfurt am Main)
Fachbereich Informatik und Ingenieurwissenschaften
christianbaun@fb2.fra-uas.de

Vermittlungsschicht

- Aufgaben der Vermittlungsschicht (Network Layer):
 - Sender: Segmente der Transportschicht in Pakete unterteilen
 - Empfänger: Pakete in den Rahmen der Sicherungsschicht erkennen
 - Logische Adressen (IP-Adressen) bereitstellen
 - Routing: Ermittlung des besten Weges
 - Forwarding: Weiterleitung der Pakete zwischen logischen Netzen, also über physische Übertragungsabschnitte hinweg

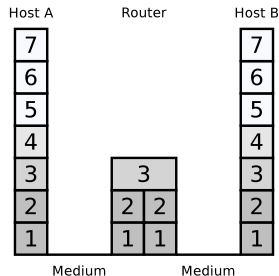


Übungsblatt 4
wiederholt die für
die Lernziele
relevanten Inhalte
dieses Foliensatzes

- Geräte: Router, Layer-3-Switch (Router ohne WAN-Schnittstelle)
- Protokolle: IPv4, IPv6, ICMP, IPX/SPX, DECnet

Router, Layer-3-Switch und Gateway

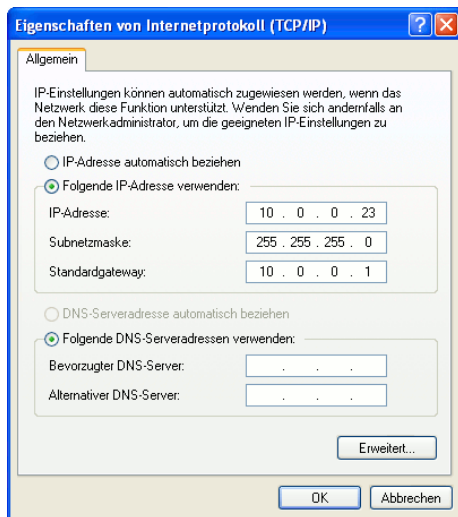
- **Router** leiten Datenpakete zwischen Netzen mit eigenen logischen Adressbereichen weiter
 - Besitzen genau wie Hubs und Switche mehrere Schnittstellen
 - Ermöglichen die Verbindung des lokalen Netzes (LAN) mit einem WAN (z.B. via DSL oder 3G/4G Mobilfunk)
- **Layer-3-Switch** sind Router ohne WAN-Schnittstelle
- **Gateways** sind Protokollumsetzer
 - Ermöglichen Kommunikation zwischen Netzen, die auf unterschiedlichen Protokollen basieren
 - Gateways, die auf der Vermittlungsschicht arbeiten, heißen auch **Mehrprotokoll-Router** oder **Multiprotokoll-Router**



Die beiden unteren Bilder zeigen einen Linksys WRT54GL Wireless-G Wireless Router mit einem WAN-Port und einem 4-Port Switch

Gateways (1/2)

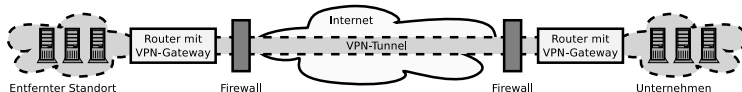
- Moderne Computernetze arbeiten fast ausschließlich mit dem Internet Protocol (IP)
 - Darum ist eine Protokollumsetzung auf der Vermittlungsschicht heute meist nicht nötig
- In früheren Zeiten wurde bei der Konfiguration eines Endgeräts der Gateway als **Default Gateway** eingetragen
 - Heute trägt man in diesem Feld den Router ein, weil man keinen Gateway mehr braucht
 - Der Begriff **Default Router** wäre heute also eigentlich passender



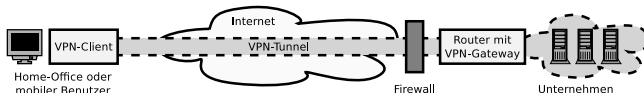
Gateways (2/2)

- Auch VPN-Gateways (Virtual Private Network) können auf der Vermittlungsschicht arbeiten
 - Sie ermöglichen über unsichere öffentliche Netze den sicheren Zugriff auf entfernte geschützte Netze (z.B. Hochschul-/Firmennetze)
 - Dienste (z.B. Email), die nur innerhalb des geschützten Netzes zur Verfügung stehen, werden über eine getunnelte Verbindung genutzt

Site-to-Site VPN

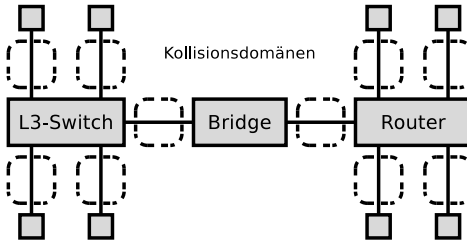


Remote Access VPN bzw. End-to-Site VPN



Kollisionsdomäne – Router und Layer-3-Switches

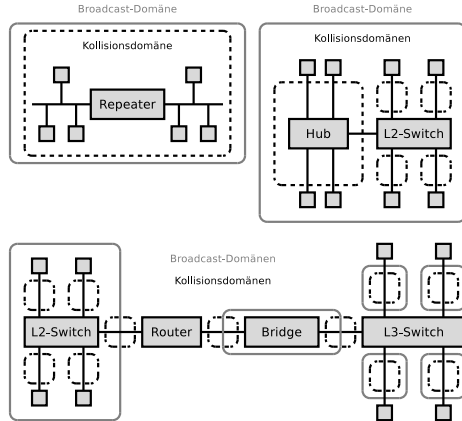
- Router und Layer-3-Switches teilen die Kollisionsdomäne
 - Genau wie Bridges und Layer-2-Switches



- Die Geräte aus Schicht 1 (**Repeater, Hubs**) unterbrechen die Kollisionsdomäne nicht
- Die Geräte aus Schicht 2 und 3 (**Bridges, Layer-2-Switches, Router, Layer-3-Switches**) unterbrechen die Kollisionsdomäne

Broadcast-Domäne – Rundsendedomäne (1/2)

- Logischer Teil eines Computernetzes, bei dem ein Broadcast alle Netzwerkgeräte, die zu diesem Teil gehören, erreicht
 - Geräte aus Schicht 3 (**Router**, **Layer-3-Switches**) teilen die Broadcast-Domäne
 - Geräte aus Schicht 1 und 2 (**Repeater**, **Hubs**, **Bridges**, **Layer-2-Switches**) unterbrechen sie nicht
 - Sie arbeiten aus Sicht logischer Netze transparent

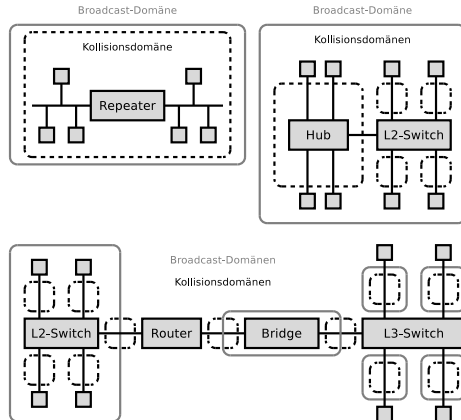


Der Begriff Broadcast-Domäne...

bezieht sich immer auf die Vermittlungsschicht und nie auf die Sicherungsschicht (obwohl es auch auf der Sicherungsschicht Broadcasts gibt)

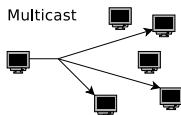
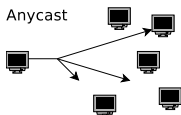
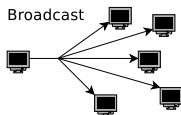
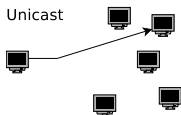
Broadcast-Domäne – Rundsendedomäne (2/2)

- Broadcast-Domänen bestehen aus einer oder mehreren Kollisionsdomänen
- Router arbeiten auf der Vermittlungsschicht (Schicht 3)
 - Das heißt, an jedem Port eines Routers hängt ein anderes IP-Netz
 - Das ist wichtig, wenn man die Anzahl der nötigen Subnetze berechnen will
 - Man kann mehrere Hubs, Switche, Repeater oder Bridges in einem IP-Subnetz betreiben
 - Man kann aber nicht ein IP-Subnetz an mehreren Ports eines Routers betreiben



Adressierung in der Vermittlungsschicht (2/2)

- Jedes IP-Paket enthält eine Empfängeradresse
 - Den Aufbau von IP-Adressen definiert das Internet Protocol (IP)



- Eine IP-Adresse kann einen einzelnen Empfänger (**Unicast**) oder eine Gruppe von Empfängern bezeichnen (**Multicast** oder **Broadcast**)
- Einem Netzwerkgerät können auch mehrere IP-Adressen zugeordnet sein
- Bei **Anycast** erreicht man über eine Adresse einen einzelnen Empfänger aus einer Gruppe
 - Es antwortet der Empfänger, der über die kürzeste Route erreichbar ist

Multicast verwenden zum Beispiel die Routing-Protokolle RIPv2 und OSPF (siehe Foliensatz 8) und das Network Time Protocol – NTP (siehe Foliensatz 10) zur Synchronisierung von Uhren

Anycast verwenden zum Beispiel einigen Root-Nameserver im Domain Name System (siehe Foliensatz 10)

Aufbau von IP-Adressen

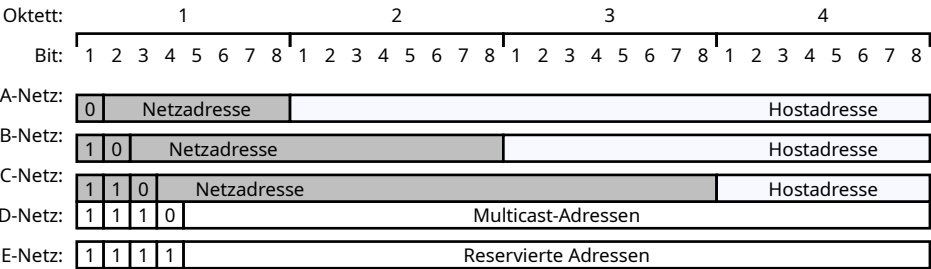
- IPv4-Adressen sind 32 Bits (4 Bytes) lang
 - Daher können $2^{32} = 4.294.967.296$ Adressen dargestellt werden

Adressraum = Menge aller gültigen Netzadressen

- Üblich ist die Darstellung in der sogenannten **Dotted decimal notation**
 - Die 4 Oktette werden als vier durch Punkte voneinander getrennte ganze Zahlen in Dezimaldarstellung im Bereich von 0 bis 255 geschrieben
Beispiel: 141.52.166.25

Netzklassen, Netzwerkteil und Geräteteil

- Ursprünglich wurden IPv4-Adressen in Klassen von A bis C eingeteilt
 - Es existierten auch die Klassen D und E für spezielle Aufgaben
- Die 32 Bits einer IPv4-Adresse bestehen aus den beiden Feldern:
 - **Netzadresse** (Network Identifier bzw. Netzwerk-ID)
 - **Hostadresse** (Host Identifier bzw. Host-ID)
 - Klasse A: 7 Bits für Netzadresse und 24 Bits für Hostadresse
 - Klasse B: 14 Bits für Netzadresse und 16 Bits für Hostadresse
 - Klasse C: 21 Bits für Netzadresse und 8 Bits für Hostadresse



Netzklassen (1/2)

- Die Präfixe legen die Netzklassen und ihre Adressbereiche fest

Klasse	Präfix	Adressbereich	Netzteil	Hostteil
A	0	0.0.0.0 - 127.255.255.255	7 Bits	24 Bits
B	10	128.0.0.0 - 191.255.255.255	14 Bits	16 Bits
C	110	192.0.0.0 - 223.255.255.255	21 Bits	8 Bits
D	1110	224.0.0.0 - 239.255.255.255	—	—
E	1111	240.0.0.0 - 255.255.255.255	—	—

- $2^7 = 128$ Klasse A-Netze mit jeweils maximal $2^{24} = 16.777.216$ Hostadressen
- $2^{14} = 16.384$ Klasse B-Netze mit jeweils maximal $2^{16} = 65.536$ Hostadressen
- $2^{21} = 2.097.152$ Klasse C-Netze mit jeweils maximal $2^8 = 256$ Hostadressen
- Klasse D enthält Multicast-Adressen (zum Beispiel für IPTV)
- Klasse E ist für zukünftige (!) Verwendungen und Experimente reserviert

Warum wird der Klasse E-Adressraum von IPv4 nicht verwendet?

„The class E space has 268 million addresses and would give us in the order of 18 months worth of IPv4 address use. However, many TCP/IP stacks, such as the one in Windows, do not accept addresses from class E space and will not even communicate with correspondents holding those addresses. It is probably too late now to change this behavior on the installed base before the address space would be needed.“

Quelle: http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_10-3/103_addr-cons.html

Netzklassen (2/2)

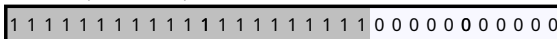
- Praktisch relevant sind nur die Klassen A, B und C
- Ursprünglich war beabsichtigt, durch die Netzadresse physische Netze eindeutig zu identifizieren
 - Dieses Vorgehen bringt aber Nachteile mit sich
- **Nachteile der Netzklassen:**
 - Sie können nicht dynamisch an Veränderungen angepasst werden
 - Sie verschwenden viele Adressen
 - Ein Klasse C-Netz mit 2 Geräten verschwendet 253 Adressen
 - Bei Klasse C-Netzen kann der Adressraum rasch knapp werden
 - Ein Klasse B-Netz mit 256 Geräten verschwendet > 64.000 Adressen
 - Es gibt es nur 128 Klasse A-Netze
 - Migration vieler Geräte in eine andere Netzklasse ist aufwändig
- Lösung: Unterteilung logischer Netze in **Teilnetze (Subnetze)**
 - 1993: Einführung des klassenlosen Routings – **Classless Interdomain Routing (CIDR)**

Netzmaske (1/2)

IP-Adresse der Klasse B



Netzmaske (255.255.248.0)



Ein Teil der Hostadresse in der IP-Adresse definiert die Subnetznummer



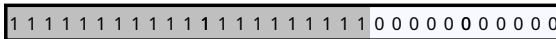
- Um Subnetze zu bilden, ist eine **(Sub-)Netzmaske** nötig
 - Alle Knoten in einem Netzwerk bekommen eine Netzmaske zugewiesen
 - Länge: 32 Bits (4 Bytes)
 - Mit ihr wird die Anzahl der Subnetze und Hosts festgelegt
- Die Netzmaske unterteilt die Hostadresse der IP-Adresse in **Subnetznummer** und **Hostadresse**
 - Die Netznummer bleibt unverändert
 - Die Netzmaske fügt eine weitere Hierarchieebene in die IP-Adresse ein

Netzmaske (2/2)

IP-Adresse der Klasse B



Netzmaske (255.255.248.0)



Ein Teil der Hostadresse in der IP-Adresse definiert die Subnetznummer



- Aufbau der Netzmaske:
 - Einsen kennzeichnen den (Sub-)Netz-Nummernteil eines Adressraumes
 - Nullen kennzeichnen den Teil des Adressraumes, der für die Hostadressen zur Verfügung steht
- Um z.B. ein Klasse B-Netz in 20 Subnetze aufzuteilen, sind 5 Bits nötig
 - Jedes Subnetz braucht nämlich seine eigene Subnetznummer und diese muss binär dargestellt werden
 - Werden 5 Bits für die Darstellung der Subnetznummern verwendet, bleiben noch 11 Bits für den Hostteil

Schreibweise des Classless Interdomain Routing (CIDR)

- Seit Einführung des **CIDR** 1993 werden IP-Adressbereiche in der Notation Anfangsadresse/Netzbits vergeben
 - Die Netzbits sind die Anzahl der Einsen in der Netzmaske
- Die Tabelle zeigt die möglichen Aufteilungen eines Klasse C-Netzes in Subnetze

Netzbits	/24	/25	/26	/27	/28	/29	/30	/31	/32
Netzmaske	0	128	192	224	240	248	252	254	255
Subnetzbits	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Subnetze	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Hostbits	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Hostadressen	256	128	64	32	16	8	4	2	—
Hosts	254	126	62	30	14	6	2	0	—

Nicht alle Adressen können/sollen verwendet werden

Netzbits	/24	/25	/26	/27	/28	/29	/30	/31	/32
Netzmaske	0	128	192	224	240	248	252	254	255
Subnetzbits	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Subnetze	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Hostbits	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Hostadressen	256	128	64	32	16	8	4	2	—
Hosts	254	126	62	30	14	6	2	0	—

2 Hostadressen können nicht an Knoten vergeben werden, weil jedes (Sub-)Netzwerk benötigt...

- eine Adresse (**Netzdeskriptor**) für das Netz selbst (alle Bits im Hostteil = 0)
- eine Broadcast-Adresse, um alle Knoten im Netz zu adressieren (alle Bits im Hostteil = 1)

2 Subnetznummern sollen nicht verwendet werden

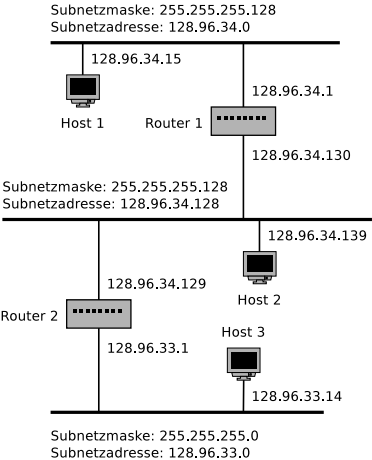
- Die Subnetznummern, die ausschließlich aus Nullen und ausschließlich aus Einsen bestehen, sollen nicht verwendet werden \Rightarrow diese Regel ist veraltet, wird aber häufig angewendet
- Moderne Router und Netzwerksoftware haben kein Problem damit, wenn alle möglichen Subnetznummern für existierende Subnetze vergeben werden

Bestimmung der nötigen Bits für Subnetze

Netzbits	/24	/25	/26	/27	/28	/29	/30	/31	/32
Netzmaske	0	128	192	224	240	248	252	254	255
Subnetzbits	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Subnetze	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Hostbits	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Hostadressen	256	128	64	32	16	8	4	2	—
Hosts	254	126	62	30	14	6	2	0	—

- Anhand der Tabelle ist es einfach, die nötigen Bits für Subnetze zu bestimmen
- Beispiel: Ein Klasse C-Netz soll in 5 Subnetze mit jeweils maximal 25 Hosts aufgeteilt werden
 - Jedes Subnetz benötigt eine Subnetznummer
 - Für 5 Subnetze sind 3 Subnetzbits nötig
 - Mit Hilfe der restlichen 5 Bits im Hostteil können in jedem Subnetz bis zu $32 - 2 = 30$ Hosts adressiert werden
 - Somit ist die Schrägstrichdarstellung /27 geeignet

Beispiel (2/4)



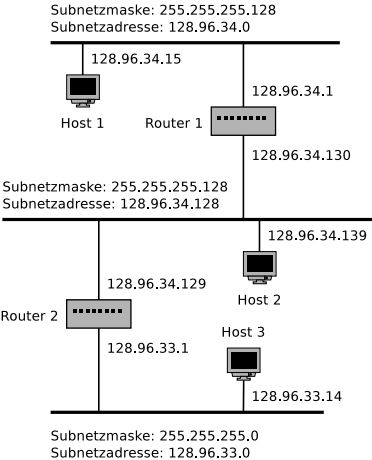
- Beispiel: Host 1 sendet ein Paket an Host 2 (128.96.34.139)
- Host 1 berechnet Subnetzmaske (255.255.255.128) AND Zieladresse (128.96.34.139) und erhält 128.96.34.128
- Das ist nicht die Subnetzadresse von Host 1 \Rightarrow Host 2 ist in einem anderem Subnetz
- Host 1 übermittelt das Paket an seinen Standard-Router (128.96.34.1)
- Einträge in der Routing-Tabelle von Router 1

Subnetzadresse	Subnetzmaske	Nächster Hop
128.96.34.0	255.255.255.128	Port 0
128.96.34.128	255.255.255.128	Port 1
128.96.33.0	255.255.255.0	Router 2

- Routing-Protokolle/Algorithmen (\Rightarrow siehe Foliensatz 8) erstellen und pflegen die Einträge in den Routing-Tabellen der Router

Quelle: Computernetzwerke. Peterson und Davie. dpunkt (2000)

Beispiel (3/4)



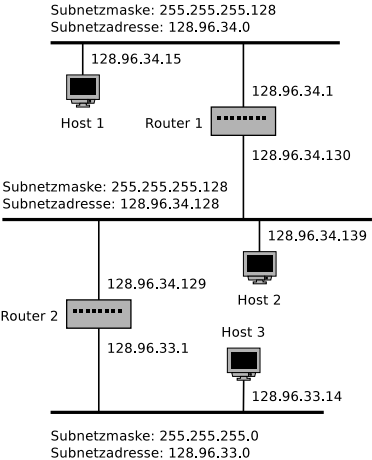
● Einträge in der Routing-Tabelle von Router 1

Subnetzadresse	Subnetzmaske	Nächster Hop
128.96.34.0	255.255.255.128	Port 0
128.96.34.128	255.255.255.128	Port 1
128.96.33.0	255.255.255.0	Router 2

- Der Router führt ein AND zwischen der Zieladresse und der Subnetzmaske jedes Eintrags durch
- Stimmt das Ergebnis mit der Subnetzadresse des Eintrags überein, leitet der Router das Paket an den Router oder Port weiter
- Router 1 berechnet für die 1. Zeile: Host 2 (128.96.34.139) AND Subnetzmaske (255.255.255.128) ist 128.96.34.128
- Das stimmt nicht mit der Subnetzadresse (128.96.34.0) überein

Quelle: Computernetzwerke. Peterson und Davie.
dpunkt (2000)

Beispiel (4/4)



Quelle: Computernetzwerke. Peterson und Davie.
dpunkt (2000)

Einträge in der Routing-Tabelle von Router 1

Subnetzadresse	Subnetzmaske	Nächster Hop
128.96.34.0	255.255.255.128	Port 0
128.96.34.128	255.255.255.128	Port 1
128.96.33.0	255.255.255.0	Router 2

- Router 1 berechnet für die 2. Zeile: Host 2 (128.96.34.139) AND Subnetzmaske (255.255.255.128) ist 128.96.34.128
- Das stimmt mit der Subnetzadresse in der Routing-Tabelle überein
⇒ Der 2. Tabelleneintrag ist ein Treffer
- Router 1 sendet das Paket über Port 1 an Host 2, weil der Port mit dem gleichen Netzwerk wie Host 2 verbunden ist

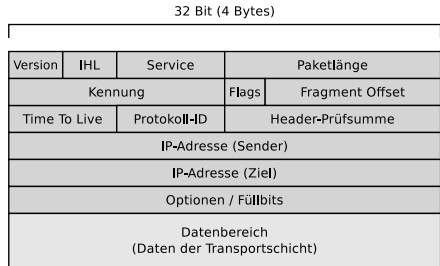
Wo kommen die Einträge in den Weiterleitungstabellen her?

Durch **Wegbestimmung (Routing)** werden die Weiterleitungstabellen mit **Routing-Protokollen** erstellt
⇒ siehe Foliensatz 8

Aufbau von IPv4-Paketen (1/6)

- **Version** (4 Bits)

- Version = 4 \Rightarrow IPv4
- Version = 6 \Rightarrow IPv6



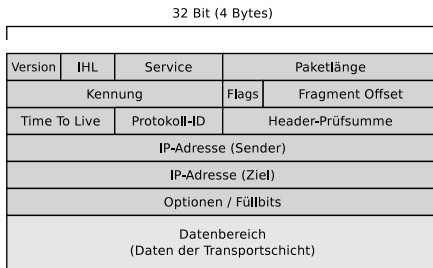
- **IP Header Length** (4 Bits)

- Länge des IP-Headers in Vielfachen von 4 Bytes
 - Beispiel: IHL = 5 \Rightarrow 5 * 4 Bytes = 20 Bytes
- Zeigt an, wo die Nutzdaten beginnen

- **Service** (8 Bits)

- Hiermit ist eine Priorisierung von IP-Paketen möglich (Quality of Service)
- Das Feld wurde mehrfach verändert (RFC 791, RFC 2474, RFC 3168)

Aufbau von IPv4-Paketen (2/6)



- **Paketlänge (16 Bits)**

- Länge des IP-Pakets (inkl. Header) in Bytes
- Das Feld ist 16 Bits groß \Rightarrow max. Paketlänge in IPv4: 65.535 Bytes

Aufbau von IPv4-Paketen (3/6)

- Die Datenfelder **Kennung**, **Flags** und **Fragment Offset** steuern das Zusammensetzen fragmentierter IP-Pakete

- Kennung** (16 Bits)

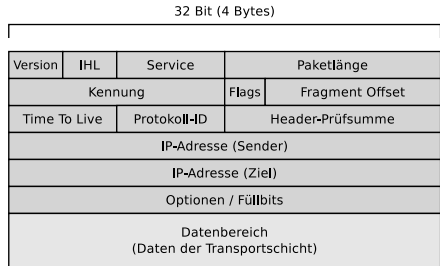
- Eindeutige Kennung des IP-Pakets

- Flags** (3 Bits)

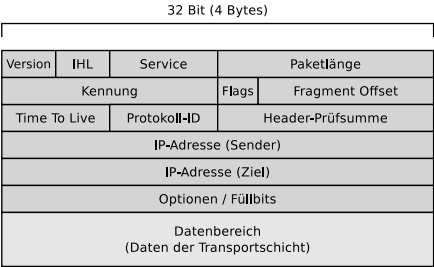
- Hier gibt der Sender an, ob das Paket fragmentiert werden darf und der Empfänger erfährt, ob noch weitere Fragmente folgen

- Fragment Offset** (13 Bits)

- Enthält eine Nummer, die bei fragmentierten Paketen besagt, ab welcher Position innerhalb des unfragmentierten Paketes das Fragment anfängt



Aufbau von IPv4-Paketen (4/6)

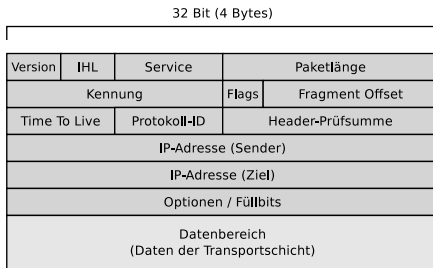


- **Time To Live (8 Bits)**
 - Enthält die maximalen Hops
 - Jeder Router auf dem Weg zum Ziel verringert den Wert um eins
 - Das verhindert, das unzustellbare IP-Pakete endlos im Netz umherirren (kreisen)

Aufbau von IPv4-Paketen (5/6)

● Protokoll-ID (8 Bits)

- Nummer des übergeordneten Protokolls in der Transportschicht
- TCP-Segment \Rightarrow 6
- UDP-Segment \Rightarrow 17
- ICMP-Nachricht \Rightarrow 1
- OSPF-Nachricht \Rightarrow 89

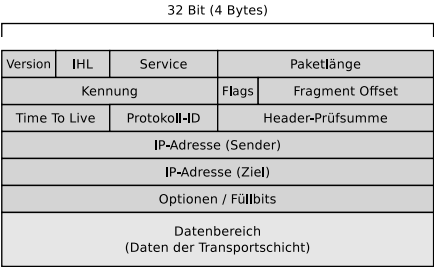


- Jedes IPv4-Paket enthält auch ein Feld für eine 16 Bits große Prüfsumme über die Daten des Headers
 - Weil sich bei jedem Router auf dem Weg zum Ziel der Inhalt des Datenfelds **Time To Live** ändert, müsste jeder Router die Prüfsumme überprüfen, neu berechnen und in den Header einsetzen

Router ignorieren die Prüfsumme üblicherweise, um die Pakete schneller weiterleiten zu können

Darum enthalten IPv6-Pakete auch kein Datenfeld für die Prüfsumme

Aufbau von IPv4-Paketen (6/6)



- **IP-Adresse (Sender)** (32 Bits) enthält die Adresse des Senders und das Datenfeld **IP-Adresse (Ziel)** die Adresse des Ziels
- **Optionen / Füllbits** kann Zusatzinformationen wie einen Zeitstempel enthalten
 - Dieses letzte Feld vor dem Datenbereich mit den Nutzdaten wird gegebenenfalls mit Füllbits (Nullen) aufgefüllt, weil es wie der vollständige Header auch ein Vielfaches von 32 Bits groß sein muss
- Der abschließende Datenbereich enthält die Daten der Transportschicht

Fragmentieren (1/2)

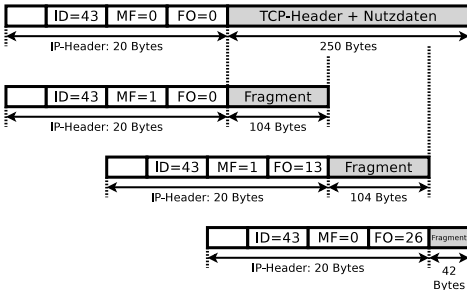
- Das Zerlegen (und Zusammensetzen) von IP-Paketen in kleinere Pakete (**Fragmente**) heißt **Fragmentieren**
 - Wird in der Regel von Routern durchgeführt
 - Fragmentieren kann aber auch der Sender durchführen
- Grund für Fragmentieren:
 - Die maximale Paketlänge hängt von der Vernetzungstechnologie ab
- Die **Maximum Transmission Unit (MTU)** gibt an, wie viele Nutzdaten ein Rahmen haben darf, also wie groß ein Paket sein darf
 - MTU von Ethernet: meist 1.500 Bytes
 - Bei Gigabit Ethernet gibt es auch *Jumboframes* mit bis zu 9.000 Bytes
 - MTU von WLAN (IEEE 802.11): 2.312 Bytes
 - MTU von Token Ring mit 4 Mbit/s (IEEE 802.5): 4.464 Bytes
 - MTU von Token Ring mit 16 Mbit/s: 17.914 Bytes
 - MTU von PPPoE (z.B. DSL): ≤ 1.492 Bytes
 - MTU von ISDN: 576 Bytes
 - MTU von FDDI: 4.352 Bytes

Fragmentieren (2/2)

- In IP-Paketen gibt es ein Flag, mit dem das Fragmentieren untersagt werden kann
 - Müsste ein Router ein Paket fragmentieren, weil es für die Weiterleitung zu groß ist, aber die Fragmentierung ist im Paket untersagt, verwirft der Router das Paket, da er es nicht weiterleiten kann
- Netzwerkgeräte, die nicht alle Fragmente eines IP-Pakets innerhalb einer bestimmten Zeitspanne (wenige Sekunden) erhalten, verwerfen alle empfangenen Fragmente
- Router können IP-Pakete in kleinere Fragmente unterteilen, wenn die MTU es nötig macht und es in den Paketen nicht untersagt ist
 - **Kein Router kann aber Fragmente eines Pakets zu einem größeren Fragment zusammenfügen**
 - Nur der Empfänger kann Fragmente zusammenfügen

Beispiel zur Fragmentierung (2/2)

Original-Datenpaket (unfragmentiert)



32 Bit (4 Bytes)

Version	IHL	Service	Paketlänge	
Kennung		Flags	Fragment Offset	
Time To Live		Protokoll-ID	Header-Prüfsumme	

- Im 1. Fragment ist FO=0
- MF-Bit=1 \Rightarrow mehr Fragmente folgen
- Im 2. Fragment ist FO=13
(104/8 = 13) \Rightarrow Position des Fragments im unfragmentierten Paket
- MF-Bit=1 \Rightarrow mehr Fragmente folgen

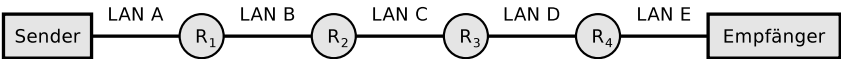
Quelle

<http://www.netzmafia.de/skripten/netze/netz8.html>

- Im 3. Fragment hat das MF-Bit den Wert 0, denn es ist das letzte Fragment von Paket 43
- FO=26, da schon $8 * 26 = 208$ Bytes Daten übertragen wurden

Weiteres Beispiel zur Fragmentierung (1/2)

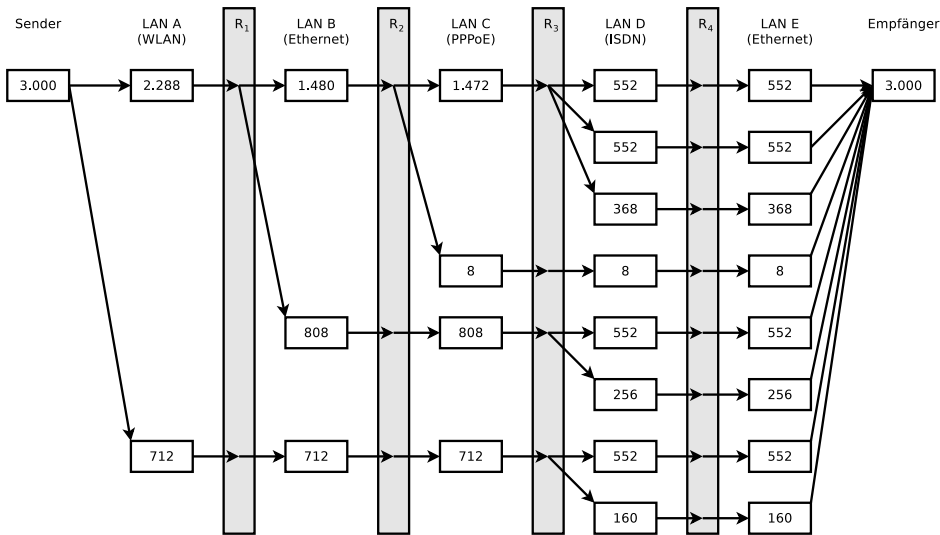
- 3.000 Bytes Nutzdaten soll via IP-Protokoll übertragen werden
- Die entstehenden Pakete müssen fragmentiert werden, weil sie über mehrere physische Netzwerke transportiert werden, deren MTU < 3.000 Bytes ist



	LAN A	LAN B	LAN C	LAN D	LAN E
Vernetzungstechnologie	WLAN	Ethernet	PPPoE	ISDN	Ethernet
MTU [Bytes]	2.312	1.500	1.492	576	1.500
IP-Header [Bytes]	20	20	20	20	20
Max. Nutzdaten [Bytes] theoretisch	2.292	1.480	1.472	556	1.480
Vielfaches von 8	nein	ja	ja	nein	ja
Max. Nutzdaten [Bytes] in der Praxis	2.288	1.480	1.472	552	1.480

- Zeigen Sie grafisch wie das Paket fragmentiert wird und wie viele Bytes Nutzdaten jedes Fragment enthält

Weiteres Beispiel zur Fragmentierung (2/2)



Fragmentierung in der Praxis

- **IP-Paketfragmentierung wird nur noch selten verwendet**
- Die meisten Betriebssysteme und Computernetzwerkgeräte vermeiden heutzutage Paketfragmentierung, weil...
 - Fragmentverlust erhöht den Netz-Overhead durch erneute Übertragungen
 - Fragmentierung und Zusammensetzen von Paketen verursacht CPU-Last
 - Router und Firewalls blockieren fragmentierte IP-Pakete häufig aus Sicherheitsgründen
 - Beispiele: **Ping of Death** und **Teardrop-Angriff**

Weitere Informationen zu Ping of Death und Teardrop-Attacke

Jon Erickson. **Hacking: The Art of Exploitation**. 2nd Edition. No StarchPress (2008). P.256
 Martin Kappes. **Netzwerk- und Datensicherheit**. 3. Auflage. Springer Vieweg (2022). P.296
 Malachi Kenney. **Ping of Death** (1996). <https://insecure.org/sploits/ping-o-death.html>

- Moderne Betriebssysteme und Netzwerkgeräte führen **Path MTU Discovery** (PMTUD) durch, um die maximale Paketgröße (MTU) zwischen Absender und Ziel herauszufinden und Paketfragmentierung zu vermeiden

IPv6 implementiert keine Paketfragmentierung, sondern nur Path MTU Discovery...

Status von IPv4

ZEIT ONLINE | INTERNET

INTERNET PROTOKOLL

Bye, bye IPv4

Die letzten Adressblöcke des alten Internet Protokolls Version vier sind vergeben. Die Umstellung auf IPv6, die seit Jahren nicht vorankommt, wird nun beginnen müssen.

VON: Monika Ermet | 2.2.2011 - 16:36 Uhr

Im Netz hat eine neue Zeitrechnung begonnen: In der Nacht zum Dienstag hat die Internet Assigned Numbers Authority (IANA) die letzten freien IPv4-Adressen verteilt. Wer künftig IP-Adressen an Nutzer vergeben möchte, sei es für Mobiltelefone, PCs oder internetfähige Autos, muss sich mit der nächsten Generation von "Rufnummern" befassen, mit der Internet-Protokoll Version 6 – IPv6.

Das Internet-Protokoll ist Teil der komplexen Struktur, die notwendig ist, damit Computer miteinander Daten austauschen können. Es sorgt darin für die korrekte Vermittlung der transportierten Informationen. IPv4 nutzt Adressen mit einer Länge von 32 Bit, was die Zahl der insgesamt verfügbaren IPs auf 4.294.967.296 oder 4,2 Milliarden Stück beschränkte.

Das klingt viel. Aber bei 6,5 Milliarden Menschen weltweit und angesichts des Trends, mehr und mehr Geräte internetfähig zu machen, ist seit Jahren klar, dass die IPv4-Adressen knapp werden. Netzanbieter nutzten daher dynamische Adressen, vergaben also keine festen für jedes einzelne Gerät. Doch auch diese Technik ist begrenzt, weswegen seit vielen Jahren an einem neuen Internet-Protokoll gearbeitet wurde.

IPv6 basiert auf längeren Nummern und bietet damit für die Zukunft die nicht mehr so richtig vorstellbare Zahl von 340 Sextillionen eindeutiger Internetadressen. Jedes Sandkorn könnte damit künftig eine IP-Adresse bekommen.

Bis heute allerdings kam die technische Umstellung nur langsam voran. Nun sind jedoch die letzten freien IPv4-Blöcke an den für Asien zuständigen regionalen IP-Adressverwalter vergeben worden. Bis diese an die einzelnen Netzbetreiber und deren Kunden verteilt sind, wird es noch eine Weile dauern. Außerdem bekommt jede der weltweit fünf Verwaltungen in den kommenden Tagen noch eine Reserve von 16 Millionen IPv4-Adressen, doch der Zeitraum ist absehbar.

Diagnose und Fehlermeldungen mit ICMP

- Das **Internet Control Message Protocol (ICMP)** ermöglicht den Austausch von...
 - Diagnosemeldungen
 - Steuernachrichten
 - Fehlermeldungen
- ICMP ist ein Bestandteil (*Partnerprotokoll*) von IPv4
 - Es wird aber wie ein eigenständiges Protokoll behandelt

Für IPv6 existiert mit ICMPv6 ein ähnliches Protokoll

- Alle Router und Endgeräte können mit ICMP umgehen
- Typische Situationen, wo ICMP zum Einsatz kommt:
 - Ein Router verwirft ein IP-Paket, weil er nicht weiß, wie er es weiterleiten kann
 - Nur ein Fragment eines IP-Pakets kommt am Ziel an
 - Das Ziel eines IP-Pakets ist unerreichbar, weil die Time To Live (TTL) abgelaufen ist

ICMP

- Eine Anwendung, die ICMP-Pakete versendet, ist das Programm ping
- ICMP definiert verschiedene Informationsnachrichten, die ein Router zurücksenden kann

32 Bit (4 Bytes)

Typ	Code	Prüfsumme
Daten (Optional)		

32 Bit (4 Bytes)

Version	IHL	Service	Paketlänge	
Kennung			Flags	Fragment Offset
Time To Live	Protokoll-ID	Header-Prüfsumme		
IP-Adresse (Sender)				
IP-Adresse (Ziel)				
Optionen / Füllbits				
Datenbereich (Daten der Transportschicht)				

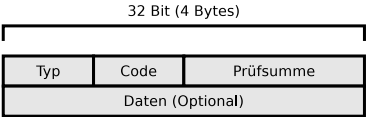
- ICMP-Nachrichten werden im Nutzdatenteil von IPv4-Paketen übertragen

- Im Header des IPv4-Pakets steht dann im Datenfeld **Protokoll-ID** der Wert 1
- Bei ICMPv6 ist die Protokoll-ID 58

- Kann ein ICMP-Paket nicht zugestellt werden, wird nichts unternommen

ICMP-Nachrichten

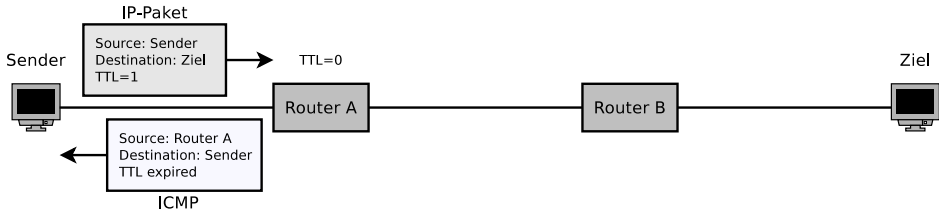
- Das Datenfeld **Typ** im ICMP-Header gibt den Nachrichtentyp an
- **Code** spezifiziert die Art der Nachricht innerhalb eines Nachrichtentyps
- Die Tabelle enthält einige Nachrichtentyp-Code-Kombinationen



Typ	Typname	Code	Bedeutung
0	Echo-Antwort	0	Echo-Antwort (Antwort auf ping)
3	Ziel nicht erreichbar	0	Netz unerreichbar
		1	Ziel unerreichbar
		2	Protokoll nicht verfügbar
		3	Port nicht verfügbar
		4	Fragmentierung nötig, aber im IP-Paket untersagt
5	Umleitung (Redirect)	13	Firewall des Ziels blockt IP-Paket
		0	Router informiert über eine bessere Route (IP des ersten Hops) zum Zielnetz
		1	Router informiert über eine bessere Route (IP des ersten Hops) zum Ziel-Host
8	Echo-Anfrage	0	Echo-Anfrage (ping)
11	Zeitlimit überschritten	0	TTL (Time To Live) abgelaufen
		1	Zeitlimit während der Defragmentierung überschritten

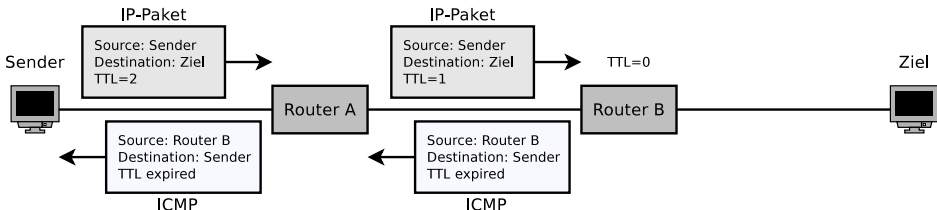
Das ICMP-Protokoll enthält noch viele weitere Nachrichtentyp-Code-Kombinationen (siehe RFC 792), aber die meisten wurden in der Praxis selten oder nie verwendet und gelten als veraltet (siehe RFC 6633 und RFC 6918)

Anwendungsbeispiel für ICMP: traceroute (1/3)



- Ein weiteres Anwendungsbeispiel für ICMP: Das Werkzeug traceroute
- traceroute ermittelt, über welche Router Datenpakete bis zum Ziel vermittelt werden
 - Es misst auch die Rundlaufzeit = Round Trip Time (RTT) vom Sender zu jedem Router
- Der Sender schickt ein IP-Paket an den Empfänger mit TTL=1
- Router A empfängt das IP-Paket, setzt TTL=0, verwirft das IP-Paket und sendet eine ICMP-Nachricht vom Nachrichtentyp 11 und Code 0 an den Sender

Anwendungsbeispiel für ICMP: traceroute (2/3)

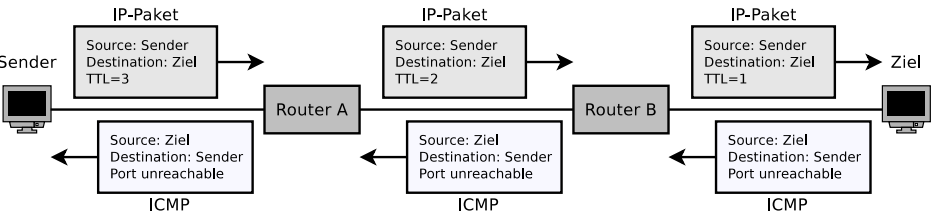


- Daraufhin schickt der Sender ein IP-Paket an den Empfänger mit TTL=2
- Das IP-Paket wird von Router A weitergeleitet
 - Dabei wird auch der Wert von TTL dekrementiert
- Router B empfängt das IP-Paket, setzt TTL=0, verwirft das IP-Paket und sendet eine ICMP-Nachricht vom Nachrichtentyp 11 und Code 0 an den Sender

Achtung! Es gibt verschiedene Implementierungen von traceroute

tracert unter Windows verwendet standardmäßig ICMP aber traceroute unter Linux und MacOSX verwendet standardmäßig UDP. Der Einsatz von ICMP kann aber via Kommandozeilenparameter -I erzwungen werden. Alternativ ist auch TCP möglich.

Anwendungsbeispiel für ICMP: traceroute (3/3)



- Sobald der Wert von TTL groß genug ist, dass der Empfänger erreicht wird, sendet dieser eine ICMP-Nachricht vom Nachrichtentyp 3 und Code 3 an den Sender
- So kann der Sender via ICMP den Weg zum Empfänger nachvollziehen

```
$ traceroute -q 1 wikipedia.de
traceroute to wikipedia.de (134.119.24.29), 30 hops max, 60 byte packets
 1 fritz.box (10.0.0.1) 1.834 ms
 2 p3e9bf6a1.dip0.t-ipconnect.de (62.155.246.161) 8.975 ms
 3 217.5.109.50 (217.5.109.50) 9.804 ms
 4 ae0.cr-polaris.fra1.bb.godaddy.com (80.157.204.146) 9.095 ms
 5 ae0.fra10-cr-antares.bb.gdinf.net (87.230.115.1) 11.711 ms
 6 ae2.cgn1-cr-nashira.bb.gdinf.net (87.230.114.4) 13.878 ms
 7 ae0.100.sr-jake.cgn1.dcnets-emea.godaddy.com (87.230.114.222) 13.551 ms
 8 wikipedia.de (134.119.24.29) 15.150 ms
```

Das Beispiel sendet pro Hop nur ein Paket (-q 1). Darum enthält die Ausgabe pro Hop nur einen Round-Trip-Time-Wert (RTT). Standardmäßig sendet traceroute drei Pakete pro Hop, was die Anzeige von drei RTT-Werten zur Folge hat. Starke Schwankungen der RTT sind ein Indikator für Netzwerkprobleme oder Ressourcenengpässe

Anwendungsbeispiel für ICMP: Path MTU Discovery (RFC 1191)

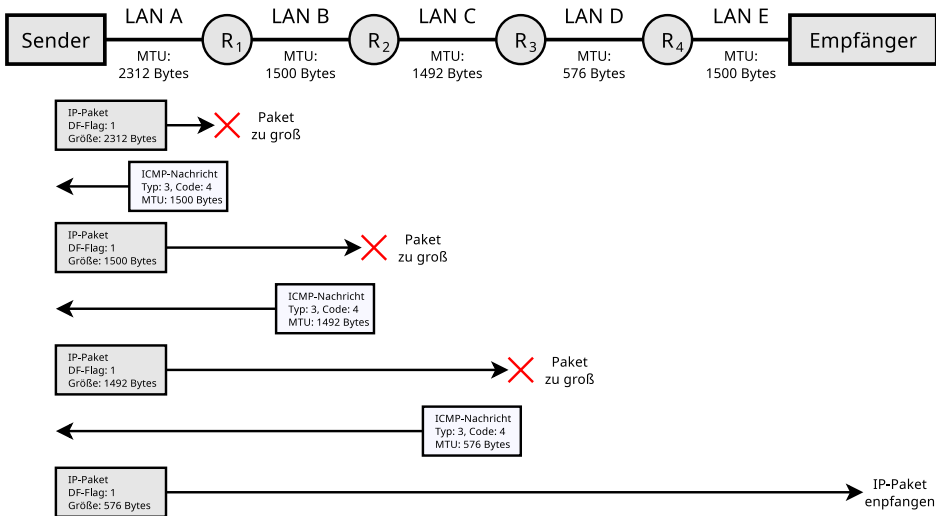
- Moderne Betriebssysteme und Netzwerkgeräte führen **Path MTU Discovery** (PMTUD) durch, um die maximale Paketgröße zwischen Absender und Ziel (*Path MTU*) zu ermitteln und eine Fragmentierung von IP-Paketen zu vermeiden
 - Das Flag **Don't Fragment** (DF) in den IP-Headern ausgehender IP-Pakete ist heute in der Regel standardmäßig gesetzt
 - Ein Netzwerk mit einer kleineren MTU als vom IP-Paket benötigt, führt dazu, dass seine(e) Router das Paket verwerfen und eine ICMP-Nachricht vom Typ 3 und Code 4 (**Fragmentierung erforderlich**) an den Absender senden, der die MTU des Netzwerks als Nutzdaten enthält
 - Der Absender reduziert seine Paketgröße und versucht wiederholt, ein Paket zu senden, bis die MTU klein genug ist, um das Ziel ohne Fragmentierung zu erreichen

Der Pfad zwischen Absender und Ziel kann sich jederzeit ändern...

- Wenn Router auf dem neuen Pfad eine niedrigere MTU haben, erfährt der Absender dies durch eine ICMP-Meldung **Fragmentierung erforderlich**
- Wenn die Router auf dem neuen Pfad eine höhere MTU unterstützen, erfährt der Absender dies nicht

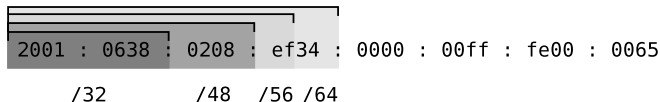
Quelle: Andrew Tanenbaum, David Wetherall. *Computer Networks*. Pearson (2011). 5th edition. P. 432-436

Anwendungsbeispiel für ICMP: Path MTU Discovery



Subnetze in IPv6

- (Sub-)Netzmasken gibt es bei IPv6 nicht
 - Die Unterteilung von Adressbereichen in Subnetze geschieht durch die Angabe der Präfixlänge
- IPv6-Netze werden in CIDR-Notation angegeben
 - Die Adresse eines einzelnen Geräts hat manchmal ein angehängtes /128
 - Ein Beispiel ist die Loopback-Adresse von IPv6: ::1/128
 - Alle Bits – außer das letzte Bit – haben den Wert 0
(Bei IPv4 ist die Loopback-Adresse: 127.0.0.1)
 - Internetprovider (ISP) oder Betreiber großer Netze bekommen die ersten 32 oder 48 Bits von einer Regional Internet Registry (RIR) zugewiesen
 - Diesen Adressraum teilt der Provider oder Netzbetreiber in Subnetze auf
 - **Endkunden bekommen meist ein /64- oder sogar /56-Netz zugeteilt**



- Bekommt ein Endkunde ein /56-Netz zugeteilt, sind die 8 Bits zwischen dem Präfix und der Interface Identifier das **Subnet Präfix**

IPv6-Adressen vereinfachen

- Regeln zur Vereinfachung (RFC 5952):
 - Führende Nullen innerhalb eines Blocks dürfen ausgelassen werden
 - Aufeinanderfolgende Blöcke, deren Wert 0 (bzw. 0000) ist, dürfen **innerhalb einer IPv6-Adresse genau 1x** ausgelassen werden
 - Das Auslassen wird durch 2 aufeinander folgende Doppelpunkte angezeigt
 - Gibt es mehrere Gruppen aus Null-Blöcken, ist es empfehlenswert die Gruppe mit den meisten Null-Blöcken zu kürzen
- Beispiele:
 - Die IPv6-Adresse von `j.root-servers.net` ist:
`2001:0503:0c27:0000:0000:0000:0002:0030`
 \Rightarrow `2001:503:c27::2:30`

Schreibweise von IPv6-Adressen (URLs)

- IPv6-Adressen werden in eckigen Klammern eingeschlossen
- Portnummern werden außerhalb der Klammern angehängt
`http://[2001:500:1::803f:235]:8080/`
- Das verhindert, das die Portnummer als Teil der IPv6-Adresse interpretiert wird

Struktur von IPv6-Adressen und Netzen

- IPv6-Adressen bestehen aus 2 Teilen

64 Bits	64 Bits
Network Prefix	Interface Identifier
2001:638:208:ef34	:0:ff:fe00:65

① Präfix (Network Prefix)

- Kennzeichnet das Netz

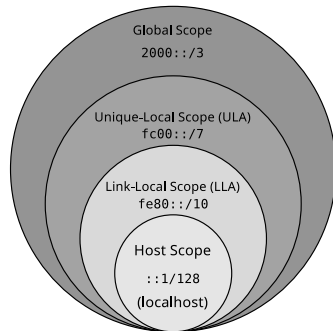
② Interface Identifier (Interface-ID)

- Kennzeichnet eine Netzwerkgerät in einem Netz
 - Die Konfiguration bzw. Zuweisung der Interface-ID ist auf verschiedene Arten möglich (siehe Foliensatz 60)

Gültigkeitsbereiche – Scopes (3/4)

- **Unique-Local Scope: Unique Local Addresses (ULA)**

- Router sollen die Adressen `fc00::/7` (\Rightarrow `fc00...` bis `fdff...`) nicht außerhalb des lokalen Verwaltungsbereichs weiterleiten
- *Private Adressen* zur lokalen Kommunikation innerhalb eines Verwaltungsbereichs (Organisation oder Standort)



- `fc...` \Rightarrow **zugewiesene eindeutige ULA**

- Auf das Präfix `fc` folgt eine 40 Bits lange zugewiesene (eindeutige) Global-ID und eine 16 Bits lange Subnetz-ID
- Weltweit gültige, eindeutige, von einem Provider vergebene Adressen

- `fd...` \Rightarrow **lokal generierte ULA** (siehe Folie 57)

- Auf das Präfix `fd` folgt eine 40 Bits lange selbständig generierte (wahrscheinlich eindeutige) Global-ID und eine 16 Bits lange Subnetz-ID

Unique Local Addresses – ULA (RFC 4193)

- Die Tabelle zeigt das Adressierungsschema für statisches IPv6 RFC 4193

Präfix/Länge (8 Bits)	Global-ID (40 Bits)	Subnetz-ID (16 Bits)	Interface-ID (64 Bits)
fd00::/8	12:3456:789a	0001	0000:0000:0000:0001

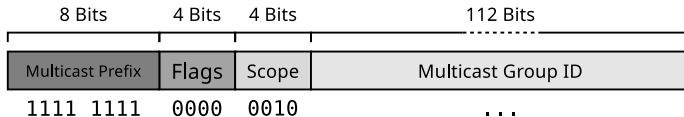
Resultierende IPv6-Adresse: fd12:3456:789a:0001:0000:0000:0000:0001

Vereinfachte IPv6-Adresse: fd12:3456:789a:1::1

- ULAs werden nur für lokalen Umgebungen (lokaler Verwaltungsbereich) genutzt
 - Diese Adressen werden nicht in das globale Internet geroutet
 - Bei lokal generierten ULAs sind Adresskonflikte möglich (aber sehr unwahrscheinlich)
 - ULAs sind analog zu privaten Adressen in IPv4
 - Sie werden innerhalb der Verwaltungsdomäne (Standort oder Organisation) verwendet

IPv6-Multicast-Adressen (1/2)

- **IPv6 definiert keine Broadcast-Adressen**
 - Multicast-Adressen emulieren die Broadcast-Funktionalität



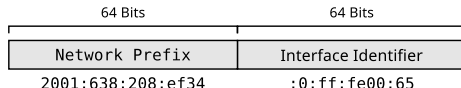
- Bei Multicast-Adressen haben die ersten 8 Bits den Wert 11111111
 - Somit haben sie das **Multicast-Präfix** ff::/8
- Auf das Präfix folgen 4 Bits **Flags** (1-Bit-Felder) und 4 Bits für den **Multicast-Scope** (Gültigkeitsbereich)

Die Flags sind im Rahmen dieser Vorlesung irrelevant und haben in der Praxis meist den Wert 0

- In der Praxis relevante Gültigkeitsbereiche (Multicast-Scopes) sind die Werte 1 und 2 (\Rightarrow siehe nächste Folie)

Konfiguration der Schnittstellenkennung (Interface-ID)

- Die **Interface-ID** kann auf verschiedene Arten konfiguriert werden



1 Statische manuelle Adressierung

- Interface ID manuell festlegen – möglich, aber unpraktisch

2 Zustandslose automatische Adresskonfiguration (RFC 4862)

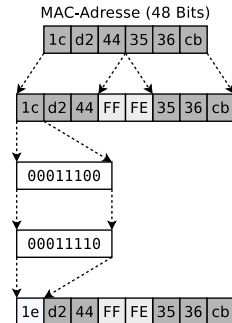
- Interface-ID (64 Bits) aus der MAC-Adresse (48 Bits) berechnen
⇒ Die Interface-ID heißt dann **Extended Unique Identifier (EUI)**
- Optionale Erweiterung: **Stable Privacy Addresses (RFC 7217)**
 - Dauerhafte Interface-ID mit Hilfe eines zufälligen geheimen Schlüssels berechnen (ohne Verwendung der MAC-Adresse), um Anonymität zu gewährleisten
- Optionale Erweiterung: **Privacy Extension (RFC 4941)**
 - Regelmäßige Berechnung einer neuen Interface-ID unter Verwendung einer Zufallszahl (ohne Verwendung der MAC-Adresse), für noch mehr Anonymität

3 Netzwerkkonfiguration über DHCPv6 einstellen (RFC 8415)

- Einzige Möglichkeit zur Adresskonfiguration, die **zustandsbehaftet (stateful)** funktioniert

Stateless Address Autoconfiguration – SLAAC (RFC 4862)

- Automatische zustandslose IPv6-Adressgenerierung aus der MAC-Adresse
- MAC in eine Host-ID umwandeln
 - 1 Die MAC-Adresse wird halbiert
 - 1. Teil bildet die ersten 24 Bits
 - 2. Teil bildet die letzten 24 Bits der modifizierten EUI-64-Adresse
 - 2 Bitmuster der 16 Bits in der Mitte der EUI-64-Adresse: 1111 1111 1111 1110 (hex: FFFE)
 - 3 Abschließend das siebte Bit auf 1 setzen
- Nachteil: Einfache Rückgewinnung der MAC-Adresse (⇒ Datenschutzbedenken)



Extended Unique Identifier (64 Bits)

Das 7. Bit bei EUI-64 ist das Universal/Local-Bit (U/L) bei MAC-Adressen. Hat das Bit den Wert 0, ist die MAC-Adresse global eindeutig. Hat es den Wert 1, wird sie lokal administriert. Bei IPv6 ist die Bedeutung des U/L-Bits quasi umgekehrt (RFC 4291). Der Wert 1 steht hier für den Gültigkeitsbereich **Global Scope** und der Wert 0 steht für **Local Scope**

Router ⇒ Advertisement Daemon (radvd)

Für die automatische Vergabe von Netzwerk-Präfixen benötigt der Router einen radvd zur Verwaltung von Netzwerk-Präfixen im Netzwerk. Ohne radvd wird das Link-Local-Präfix fe80::/64 zugewiesen

Stateless Address Autoconfiguration – Schritte

- In der Praxis arbeitet SLAAC in 5 Schritten
 - ① Client erzeugt eine modifizierte EUI-64 Host-ID aus seiner eigenen MAC-Adresse
 - ② Client erzeugt eine Link-Local-Adresse (LLA) mit Präfix fe80::/64

Durch die Verkettung beider Teile entsteht eine 128-Bit-IPv6-Adresse, die im lokalen Netz gültig ist

- ③ Client sendet zur Erkennung doppelter Adressen **Duplicate Address Detection** (DAD) eine **Neighbor Solicitation** (NS)-Nachricht mit seiner eigenen Link-Local-Adresse über Multicast im Link-Local-Netz und wartet, ob eine **Neighbor Advertisement** (NA)-Nachricht als Antwort eintrifft
(siehe Folie 66)
- ④ Client sendet eine **Router Solicitation** (RS) Nachricht an den Router
(siehe Folie 69)
- ⑤ Router sendet eine **Router Advertisement** (RA)-Nachricht an den Client und übergibt das global gültige Netzwerk-Präfix (siehe Folie 68)

IPv6 Neighbor Discovery Protocol

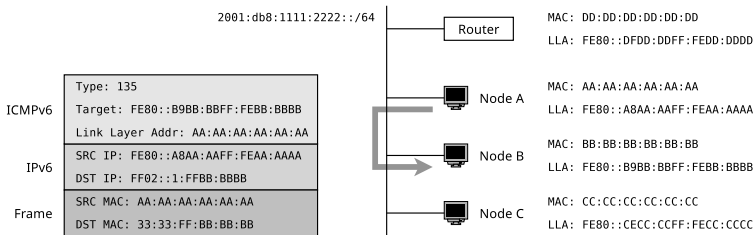
- IPv6 implementiert keine Broadcast-Adressen und es gibt keine zum Address Resolution Protocol (ARP) vergleichbare Lösung
 - Allerdings ist die Auflösung von IPs in MAC-Adressen auch hier nötig
- **Das Neighbor Discovery Protocol (NDP) löst MACs aus IPv6-Adressen auf und nutzt dafür Multicast-Adressen**

In IPv6 beschreibt der Begriff **Neighbor** Knoten, die sich im gleichen Netzwerk der Sicherungsschicht (Data Link Layer) befinden

- NDP-Nachrichten werden als Nutzdaten in ICMPv6-Nachrichten ausgetauscht
- NDP implementiert 5 Arten von Nachrichten
 - **Router Solicitation** (ICMPv6 Typ 133)
 - **Router Advertisement** (ICMPv6 Typ 134)
 - **Neighbor Solicitation** (ICMPv6 Typ 135)
 - **Neighbor Advertisement** (ICMPv6 Typ 136)
 - **Redirect Message** (ICMPv6 Typ 137)

Mit der **Redirect Message** informiert ein Router über eine bessere Route (anderer First Hop \implies anderer lokaler Router) für ein Ziel. Dieser Nachrichtentyp wird in dieser Vorlesung nicht weiter behandelt

Neighbor Solicitation – NS (1/2)

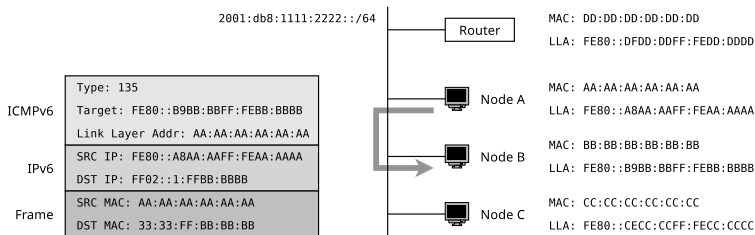


Die Nachricht Neighbor Solicitation (NS) ist die IPv6-Alternative zu einer ARP-Anfrage bei der Nutzung von IPv4

- Anforderung der MAC-Adresse eines Nachbarn
 - In der Abbildung fordert Knoten A die MAC-Adresse von Knoten B an
- Ziel-IP-Adresse im IPv6-Paket = **Solicited-node multicast address**
 - Jeder Knoten tritt einer Multicast-Gruppe für jede konfigurierte IPv6-Adresse bei
 - Die Multicast-Gruppe hat die Adresse FF02::1:FFXX:XXXX

XX:XXXX steht für die letzten 6 hexadezimalen Zeichen der Link-Local (Unicast) Adresse (LLA)

Neighbor Solicitation – NS (2/2)



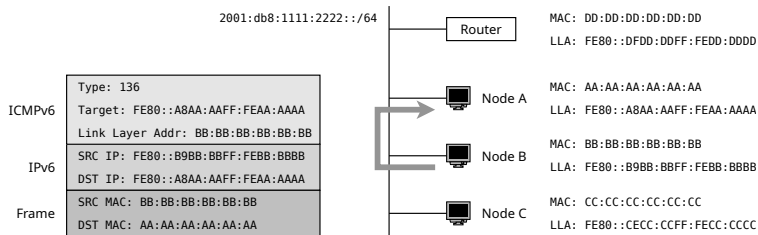
- Ziel-MAC-Adresse im Rahmen = **Multicast-MAC-Adresse**
 - Die Multicast-MAC-Adresse ist 33:33.XX:XX:XX:XX

XX:XX:XX:XX steht für die letzten 8 hexadezimalen Zeichen der Multicast-Adresse des angefragten Knotens

Erkennung doppelter Adressen mit Neighbor Solicitation

- Die Nachricht Neighbor Solicitation (NS) wird auch zur Erkennung von Adressduplikaten – **Duplicate Address Detection (DAD)** verwendet
 - Wenn ein Knoten eine vorläufige (*tentative*) IPv6-Adresse für sich selbst generiert, muss er prüfen, dass kein anderer Knoten im Netz diese Adresse bereits verwendet
- Der Knoten sendet eine Nachricht Neighbor Solicitation (NS) an die Adresse, die er selbst verwenden möchte
 - Absenderadresse ist die unspezifische Adresse ($:: \Rightarrow$ 128 Nullbits)
 - Wenn ein Knoten im lokalen Netz diese IP-Adresse bereits verwendet, handelt es sich um ein Duplikat
 - Der Knoten antwortet mit einer Nachricht Neighbor Advertisement (NA) an die link-lokale Multicast-Adresse FF02::1 (jeder Knoten im lokalen Netzwerk erhält diese Nachricht)
 - Der Knoten, der die Nachricht Neighbor Solicitation (NS) gesendet hat, muss eine neue Adresse erzeugen und die Duplicate Address Detection erneut durchführen
 - Wenn für einige Zeit keine Nachricht Neighbor Advertisement (NA) empfangen wird, kann die Adresse verwendet werden (\Rightarrow kein Duplikat)

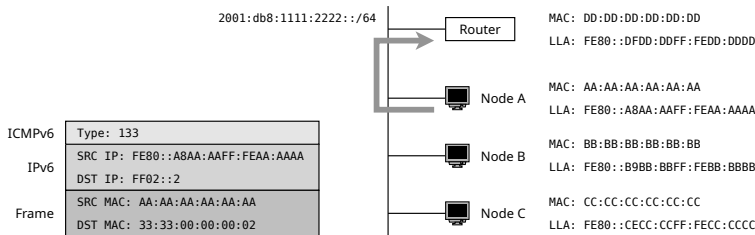
Neighbor Advertisement – NA



Die Nachricht Neighbor Advertisement (NA) ist die IPv6-Alternative zu einer ARP-Antwort bei der Nutzung von IPv4

- Antwort auf eine Neighbor Solicitation (NS) Nachricht
- Neighbor Advertisement ist eine Unicast-Nachricht
 - Hier werden keine Multicast-Adressen verwendet

Router Solicitation – RS



- Wenn ein Knoten nicht auf eingehende RA-Nachrichten (Router Advertisement) warten möchte, kann er diese anfordern, indem er RS-Nachrichten sendet
 - Zieladresse im IPv6-Paket ist die link-lokale Multicast-Adresse FF02::2 um alle Router im lokalen Netz zu erreichen
 - In der Abbildung fordert Knoten A von jedem lokalen Router die RS-Nachricht an

SLAAC-Erweiterung: Stable Privacy (RFC 7217) – (1/3)

- **Optionale Erweiterung von SLAAC** (Stateless Address Autoconfiguration)
- Ermöglicht die Adresserzeugung ohne Verwendung einer MAC-Adresse
 - Ein zufälliger geheimer Schlüssel wird erstellt und für die Generierung der Interface-ID verwendet
 - Der geheime Schlüssel ist eine 128-Bit lange hexadezimale Zeichenfolge, die aussieht wie eine IPv6-Adresse

Speicherort des geheimen Schlüssels in Linux und erforderlicher Kernel-Parameter

Der stabile geheime Schlüssel ist in der Datei `/proc/sys/net/ipv6/conf/eth0/stable_secret` gespeichert und wird durch Setzen des Kernel-Parameters `addr_gen_mode=3` erzeugt

Beispiel für einen geheimen Schlüssel

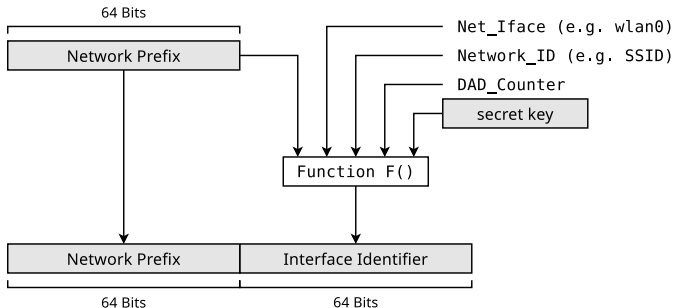
```
$ cat /proc/sys/net/ipv6/conf/eth0/stable_secret
c8c8:036d:9312:71e2:eadc:7c9f:0535:649a
```

- Vorteile:
 - Verbesserte Sicherheit, da keine MAC-Adresse für die Erzeugung verwendet wird
 - Die MAC-Adresse des Knoten wird nicht preisgegeben \Rightarrow Anonymität
 - Stabile Adresse für den Knoten
 - Einmal generiert, ändert sich die Interface-ID nicht (bis zum Neustart)

SLAAC-Erweiterung: Stable Privacy (RFC 7217) – (3/3)

**Learned from
ICMPv6 RA or
Link-Local
Unicast Prefix**

IPv6 Address



- SHA-1 und SHA-256 sind zwei mögliche Optionen für F()
- Aber nicht MD5 (siehe RFC 6151)

Beispiel für eine erzeugte Adresse mit Stable Privacy

MAC: 86:3a:ea:8a:a7:d9
 link local EUI-64 -> inet6 fe80::843a:eaff:fe8a:a7d9/64
 stable-privacy -> inet6 fe80::6f6d:80e:ab6c:65a0/64

IPv4-Adressen in IPv6-Netze einbetten (*IPv4 mapped*)

- Eine global geroutete (Unicast) IPv4-Adresse kann als IPv6-Adresse dargestellt und somit in den IPv6-Adressraum integriert werden
 - Diese Vorgehensweise heißt in der Literatur *IPv4 mapped*
- Dafür erhält die IPv4-Adresse einen 96 Bits langen Präfix:
0:0:0:0:0:FFFF::/96

80 Bits					16 Bits	32 Bits
0000	0000	0000	0000	0000	FFFF	IPv4-Adresse

- Die IPv4-Adresse darf in hexadezimaler oder in dezimaler Schreibweise dargestellt sein

- Beispiel

IPv4-Adresse:	131.246.107.35
IPv6-Adresse:	0:0:0:0:0:FFFF:83F6:6B23
Kurzschreibweisen:	::FFFF:83F6:6B23
	::FFFF:131.246.107.35

IPv4 ist u.a. für Proxy-Szenarien wie NAT64 (RFC 6146) nützlich, das es IPv6-Clients ermöglicht, mit IPv4-Servern zu kommunizieren

