Rechnernetze I

SoSe 2020

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

Stand: 28. Mai 2020

Rechnernetze I

SoSe 2020

5 Internetworking

Inhalt

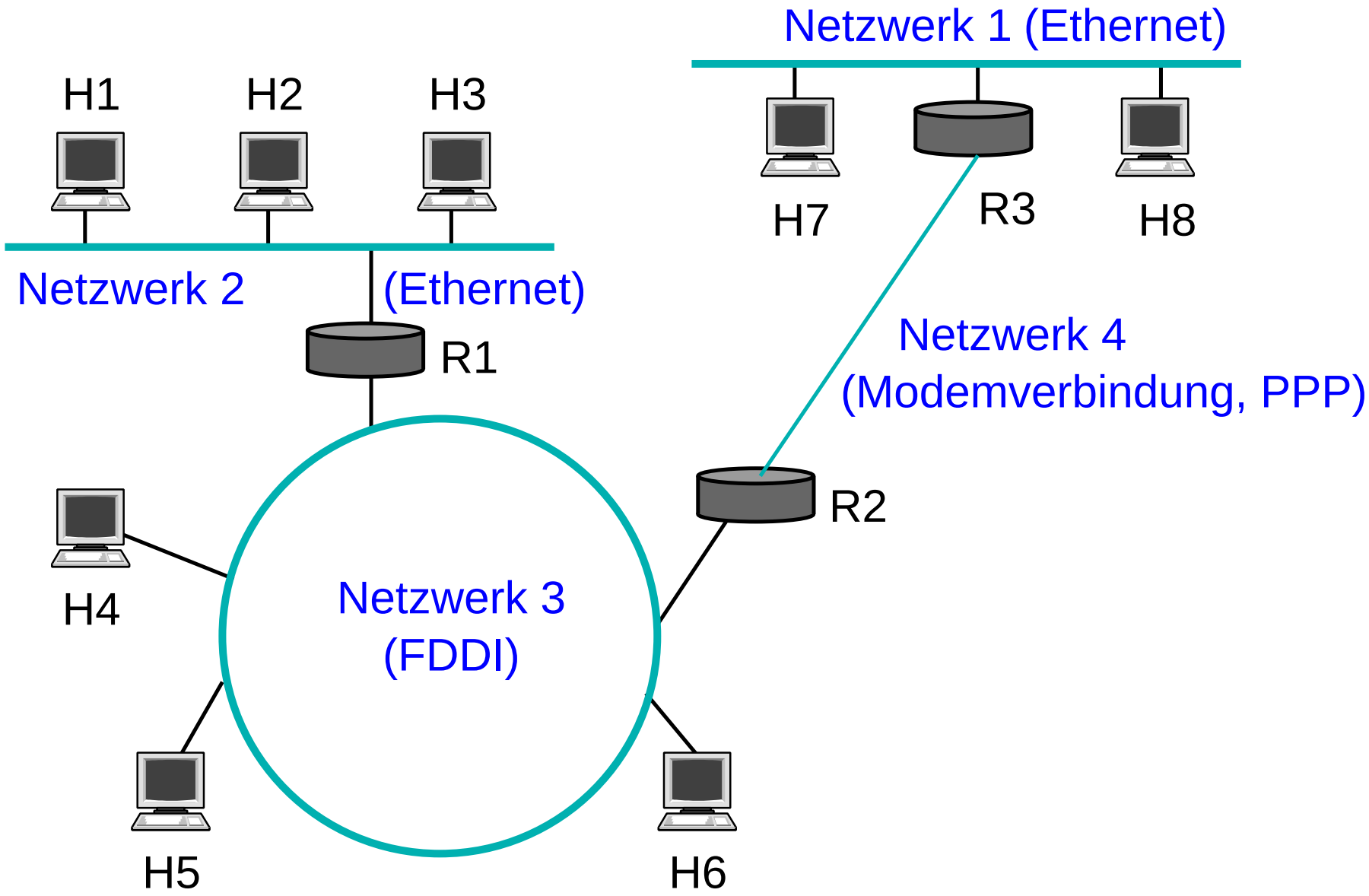
- IP Grundlagen
- IP Adressierung und Weiterleitung
- Aufbau eines IP-Pakets
- IP Fragmentierung / Reassembly
- ICMP
- Adreßübersetzung: APR, NDP
- Automatische IP-Konfiguration: DHCP
- NAT
- Übergang von IPv4 auf IPv6

- Peterson, Kap. 4.1
- CCNA, Kap. 6, 7, 8, 5.3

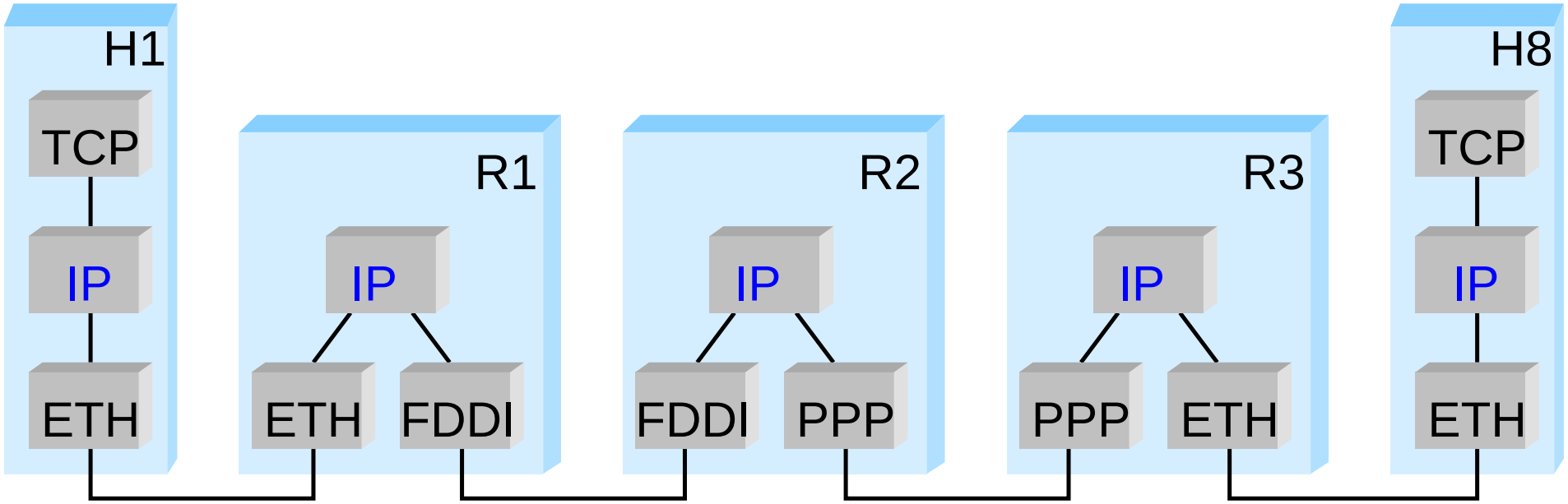
5 Internetworking ...

- Was ist ein Internetwork?
  - Zusammenschluß von einzelnen (physischen) Netzen über Router zu einem logischen Netz
    - Netz von Netzen
- Was macht ein Internetwork aus?
  - **Heterogenität**
    - Verbindung unterschiedlichster Netzwerktypen (auch zukünftiger!)
  - **Skalierung**
    - Integration von sehr vielen Rechnern und Netzen
    - Internet: ca. 1 Milliarde Rechner
- Internetwork $\neq$ Internet

Beispiel für ein Internetwork



IP (*Internet Protocol*) als Internetwork-Protokoll



- Auf jedem Rechner und jedem Router läuft IP
  - IP kann auf unterschiedlichsten Netztechnologien aufsetzen

IP Dienstmodell (was bietet IP?)

- Adressierungsschema
- Datagramm-Zustellung

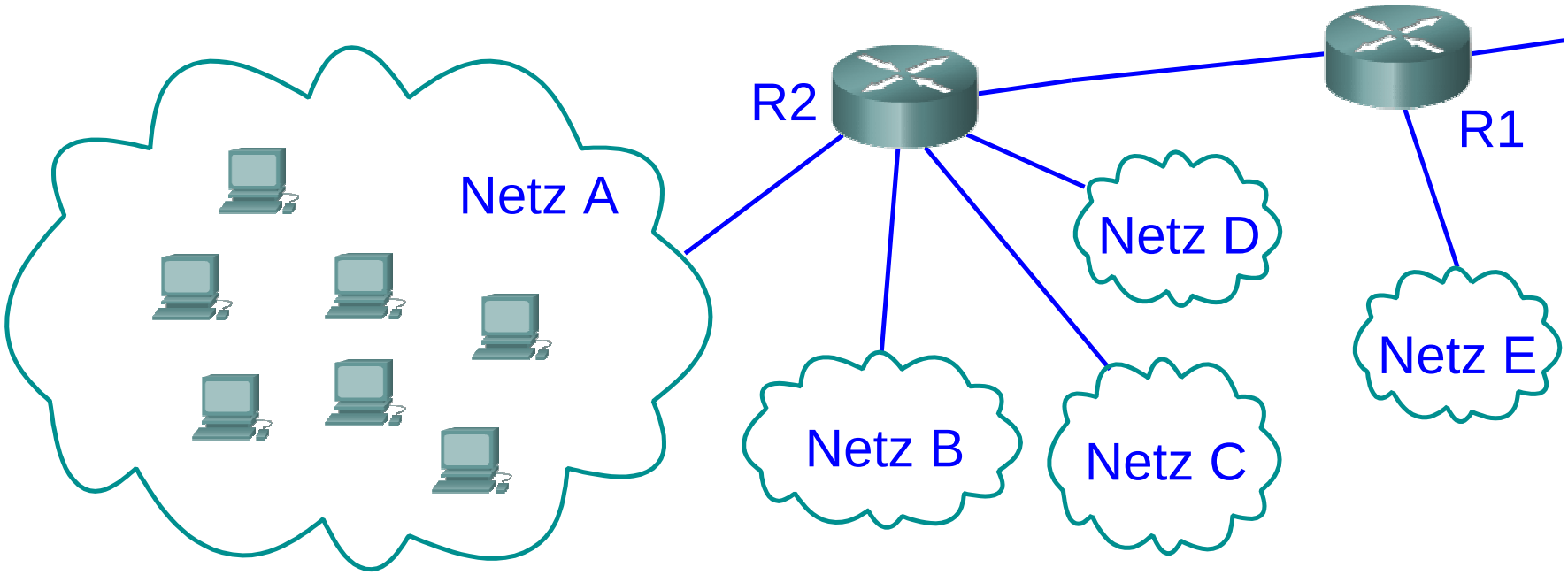
- Um Heterogenität und Skalierbarkeit zu unterstützen: kleinster gemeinsamer Nenner
  - IP bietet nur das, was mit jeder Netzwerktechnologie realisiert werden kann
    - „*run over everything*“
  - „*Best Effort*“-Modell:
    - IP „bemüht sich“, gibt aber keinerlei Garantien
    - Verlust, Duplikate, Vertauschung von Paketen möglich
    - höhere Schichten bieten bessere Dienste

IP-Versionen: IPv4 und IPv6

- IPv4 ist seit 1980 standardisiert
- Motivation für IPv6: Wachstum des Internets
  - größerer Adreßraum für IP-Adressen notwendig
- Arbeit an IPv6 seit ca. 1991
  - längere IP-Adressen $\Rightarrow$ neuer IP-Header $\Rightarrow$ Anpassung aller IP-Software
  - daher: auch andere Probleme von IPv4 adressiert, u.a.
    - Unterstützung von Dienstgüte-Garantien
    - Sicherheit
    - automatische Konfiguration
    - erweitertes Routing (z.B. mobile Hosts)

Ziel: Effiziente Weiterleitung von IP-Paketen

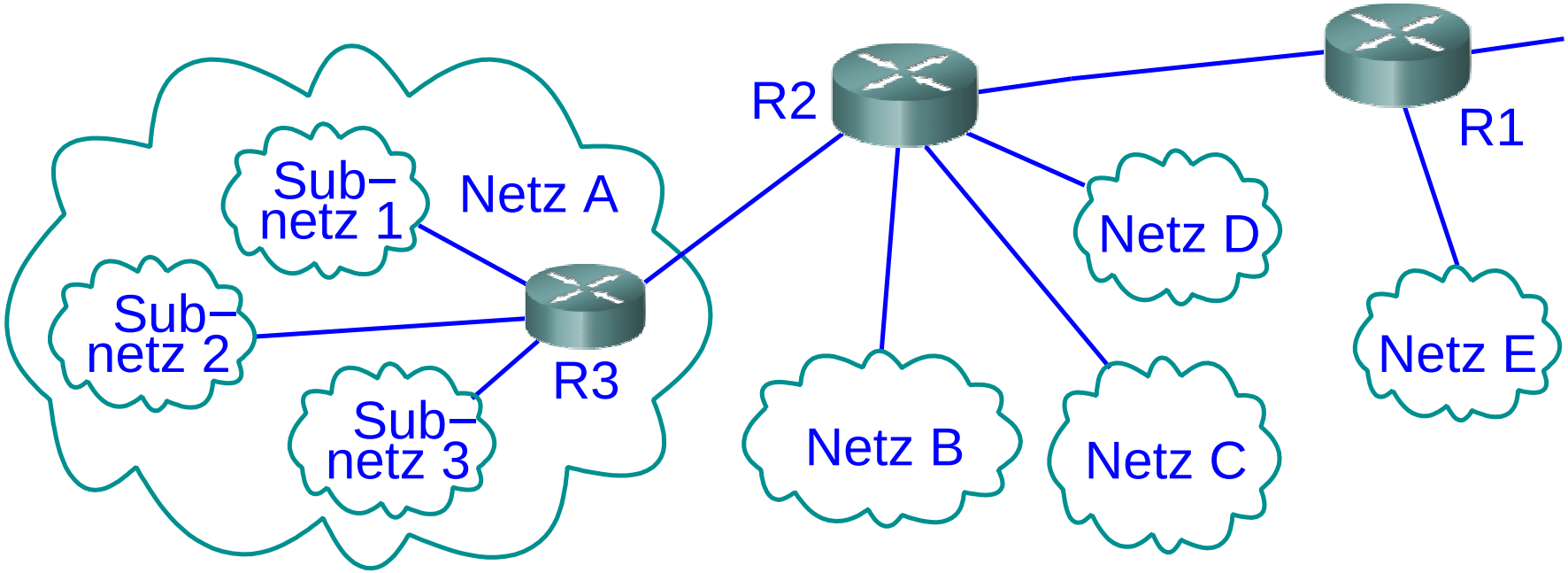
- Typische Situation:



- Router müssen Pakete nur in das richtige Netz weiterleiten
  - Weiterleitungstabellen sollten nur Information über Netze enthalten, nicht über einzelne Hosts
  - Router muss aus IP-Adresse zugehöriges Netz bestimmen

Ziel: Effiziente Weiterleitung von IP-Paketen

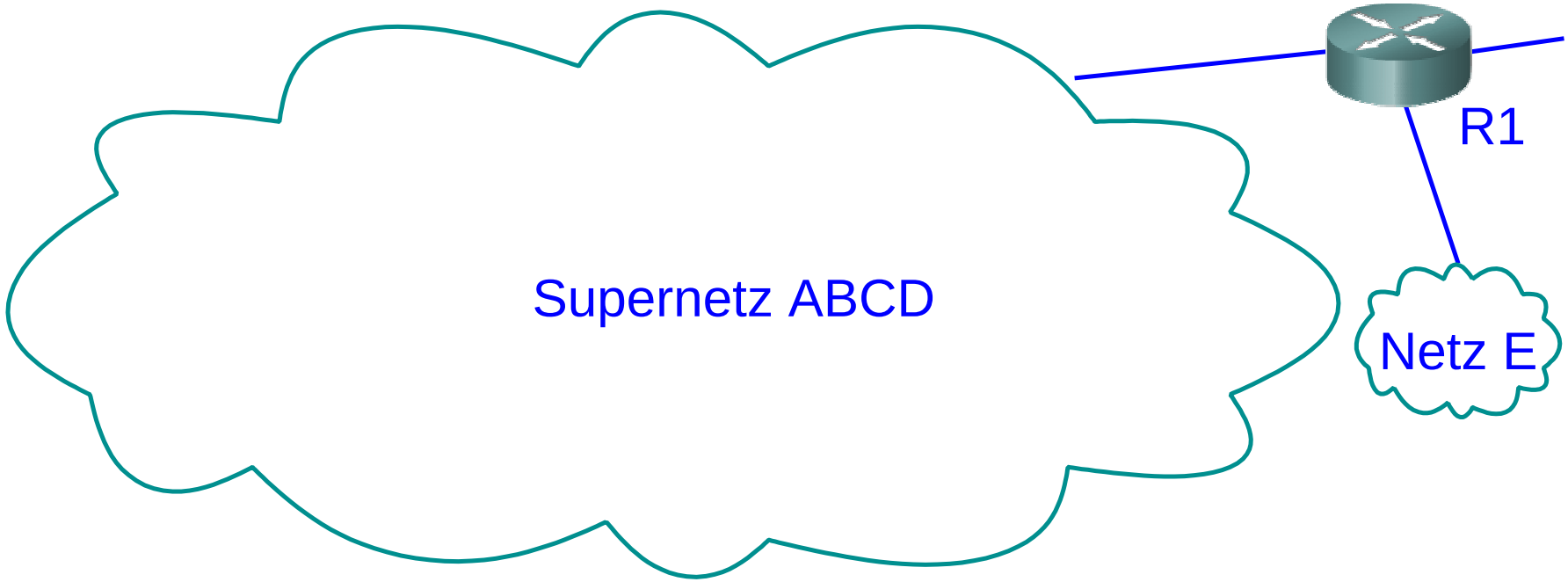
- Typische Situation:



- Router müssen Pakete nur in das richtige Netz weiterleiten
  - Weiterleitungstabellen sollten nur Information über Netze enthalten, nicht über einzelne Hosts
  - Router muss aus IP-Adresse zugehöriges Netz bestimmen

Ziel: Effiziente Weiterleitung von IP-Paketen

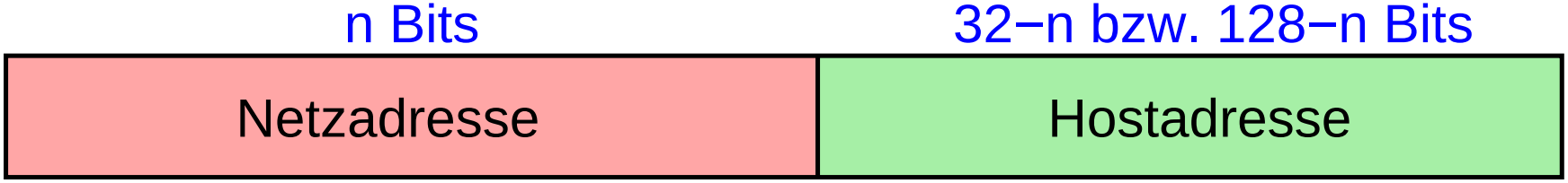
- Typische Situation:



- Router müssen Pakete nur in das richtige Netz weiterleiten
  - Weiterleitungstabellen sollten nur Information über Netze enthalten, nicht über einzelne Hosts
  - Router muss aus IP-Adresse zugehöriges Netz bestimmen

Aufgaben bei der Adressierung

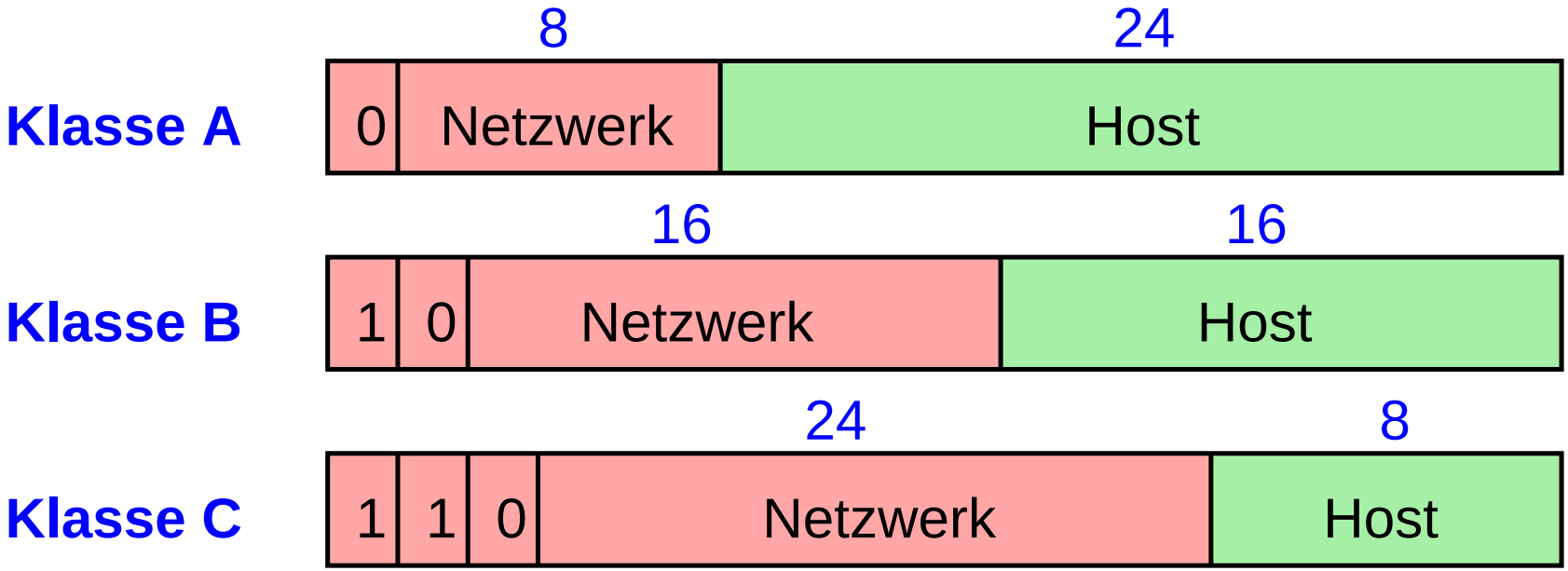
- Identifikation von Hosts
  - durch numerische Adresse (IPv4: 32 Bit, IPv6: 128 Bit)
  - hierarchischer Aufbau:



- Identifikation von Netzen
  - durch Netzadresse (Host-Bits = 0) und Präfixlänge n
  - in IPv4 ursprünglich:
    - n geht aus IP-Adresse eindeutig hervor (Adressklassen)
  - heute in IPv4 und IPv6: explizite Angabe von n (klassenlose Adressierung, CIDR)

IPv4 Adressen

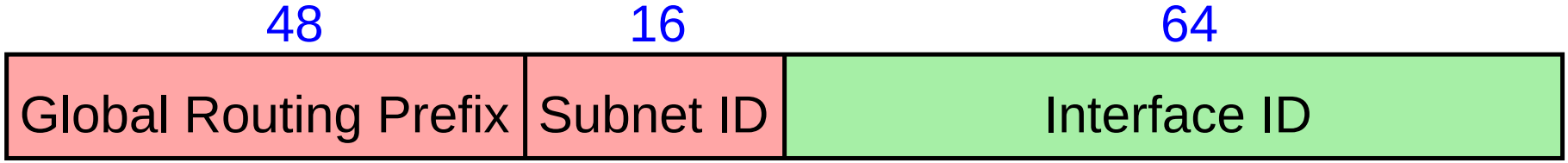
- Adressklassen:



- Schreibweise: byteweise dezimal, durch Punkt getrennt
  - z.B. 131.159.31.17
- Bei klassenloser Adressierung ggf. mit Angabe der Präfixlänge
  - z.B. 131.159.31.17/16 oder 131.159.30.0/24

IPv6 Adressen

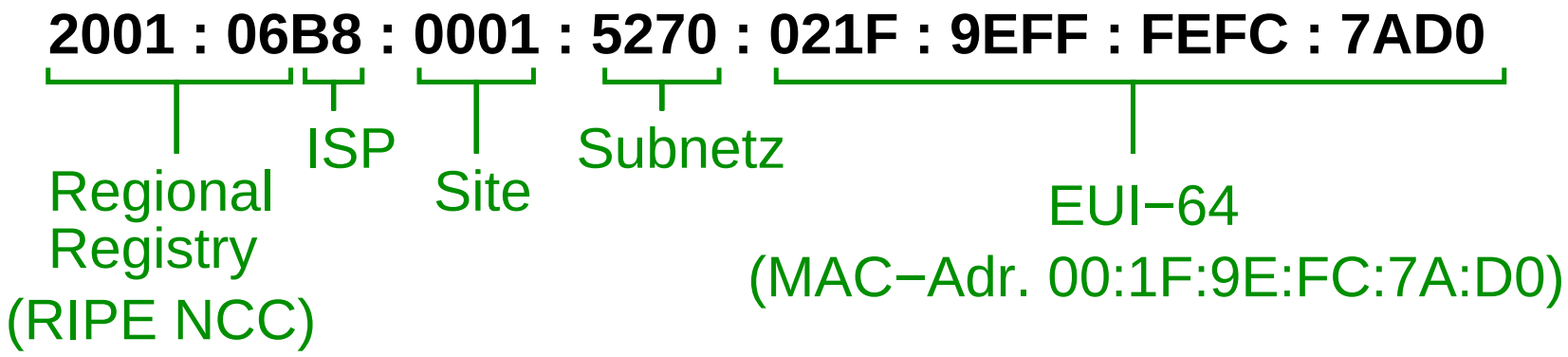
- Typische Struktur:



- Schreibweise:
  - 16-Bit-Teile hexadezimal, getrennt durch ':'
    - z.B. 47CD:0000:0000:0000:0000:1234:A456:0124
  - Kurzform
    - ohne führende Nullen, eine Nullfolge durch '::' ersetzt
    - z.B. 47CD::1234:A456:124
- Ggf. mit Angabe der Präfixlänge, z.B. 2000::/3

Adreßvergabe in IPv6

- Routing-Präfix: hierarchisch, i.W. nach Regionen
  - IANA vergibt Präfixe an *Regional Registries*, diese vergeben längere Präfixe an Provider, diese noch längere an Kunden
  - Ermöglicht Aggregation von Routing-Information
- Interface-ID: manuell vergeben oder EUI-64 (∼ MAC-Adresse)
- Beispielstruktur einer IPv6-Adresse:



Gültigkeitsbereiche von IP-Adressen

- **Global**
  - weltweit eindeutig
  - Pakete mit diesen Adressen werden im globalen Internet weitergeleitet
- **Link Local**
  - nur innerhalb eines physischen LANs eindeutig
  - Router leiten Pakete mit diesen Adressen nicht weiter
- **Private** (IPv4) bzw. **Unique Local** (IPv6)
  - nur innerhalb eines privaten Netzes eindeutig
    - z.B. eine Organisation
  - Pakete mit diesen Adressen werden nicht im globalen Internet weitergeleitet

Arten von IP-Adressen

- **Unicast**: Adresse für genau eine Netzwerk-Schnittstelle
  - aber: in IPv6 hat eine Schnittstelle i.d.R. mehrere Adressen
- **Multicast**: Adresse für eine Gruppe von Empfängern
- **Broadcast** (nur IPv4): alle Schnittstellen innerhalb eines Netzes
  - Adresse 255.255.255.255: Broadcast im lokalen Netz
- **Anycast**: nächstgelegene Schnittstelle aus einer Menge
  - mehrere Hosts mit identischer Adresse und gleicher Funktion
  - Router leiten Pakete zum nächstgelegenen Host weiter
  - Anwendung z.B. für DNS-Server

Spezielle Adreß-Bereiche in IP

Bedeutung	IPv4	IPv6
Global Unicast	0.0.0.0 - 223.255.255.255	2000::/3
Link Local Unicast	169.254.0.0/16	FE80::/10
Unique Local Unicast		FC00::/7
Private Adressen	10.0.0.0/8 172.16.0.0/12 192.168.0.0/16	
Multicast	224.0.0.0/4	FF00::/8
Loopback	127.0.0.0/8	::1

Grundlagen

- Jedes IP-Datagramm enthält IP-Adresse des Ziels
  - Netzadresse kennzeichnet das physisches Netz des Ziels
- Hosts mit gleicher Netzadresse kommunizieren direkt über ihr lokales Netz
- Jedes physische Netz, das Teil des Internets ist, ist mit mindestens einem **Router** verbunden
  - Router hat mehrere Netzwerk-Schnittstellen
    - jede Schnittstelle hat ihre eigene IP-Adresse
    - ***Gateway***: Schnittstelle eines Routers im lokalen Netz
- Aufgabe bei der Weiterleitung:
  - an welche Schnittstelle muß ein IP-Paket mit gegebener Zieladresse weitergeleitet werden?

Routing-Tabelle (Weiterleitungstabelle)

- Weiterleitung wird durch Routing-Tabelle gesteuert
  - in Routern und auch in normalen Hosts
- Prinzipieller Aufbau der Tabelle:

$Netzadresse_1$	$Präfixlänge_1$	$Next\ Hop_1$
$Netzadresse_2$	$Präfixlänge_2$	$Next\ Hop_2$
...	...	...

- Netzadresse und Präfixlänge zusammen identifizieren ein Netz
  - bei IPv4 statt Präfixlänge ggf. auch Subnetzmaske (☞ **S. 146**)
- *Next Hop* = Router bzw. Schnittstelle, an den/die das Paket weitergegeben werden soll, falls Ziel im angegebenen Netz liegt

Vorgehensweise bei der Weiterleitung

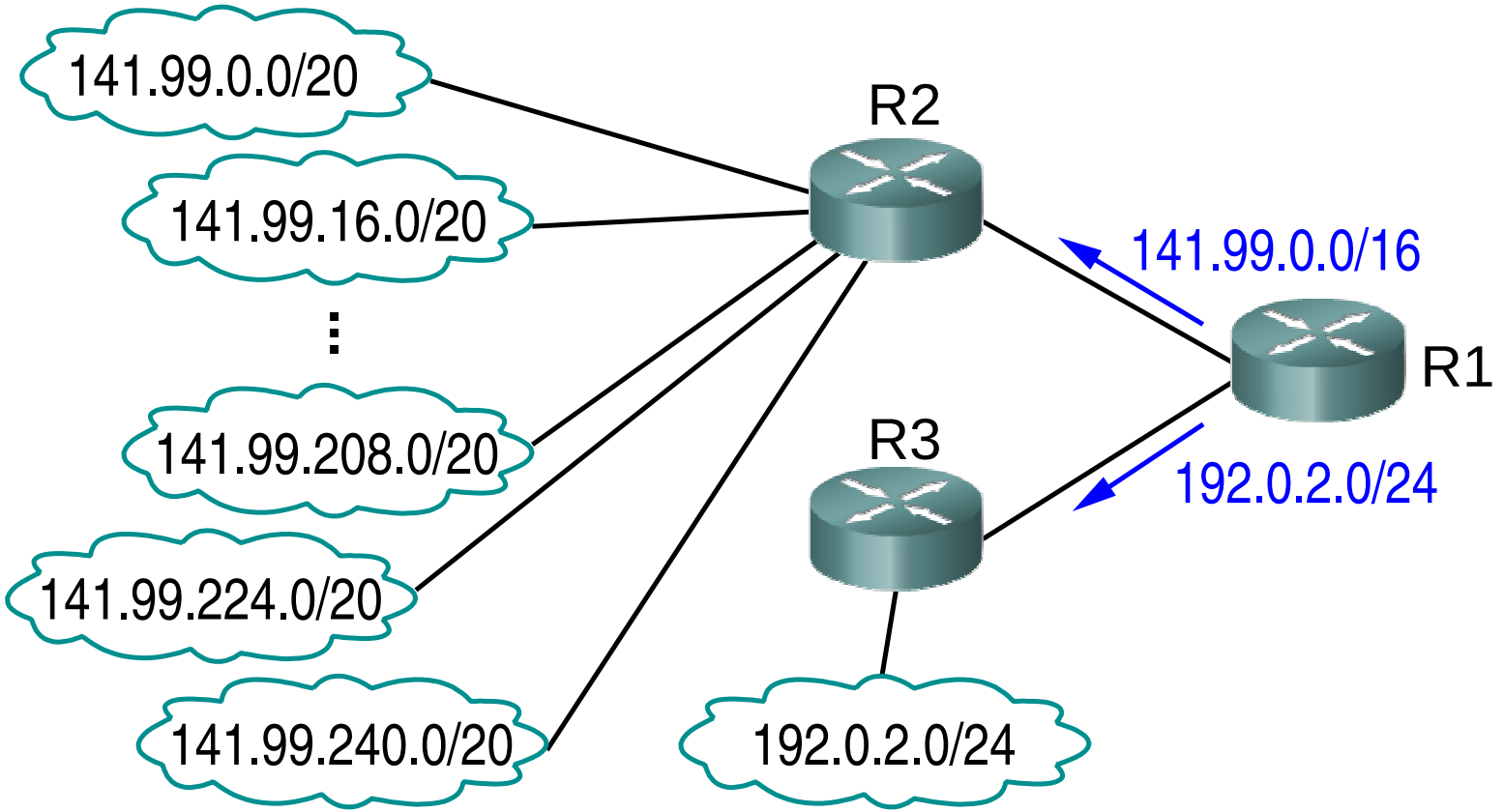
- Algorithmus:
  - Suche Eintrag i mit größter *Präfixlänge*$_i$, für den gilt:
    - Zieladresse und *Netzadresse*$_i$ stimmen in den ersten *Präfixlänge*$_i$ Bits überein
    - d.h. Zieladresse liegt in dem durch *Netzadresse*$_i$ und *Präfixlänge*$_i$ gegebenen Netz
  - Falls Eintrag gefunden: Weiterleiten an *NextHop*$_i$
  - Sonst: Verwerfen des Pakets
- Typisch: zusätzlicher Tabellen-Eintrag für Default-Route

0.0.0.0	*0*	*Next Hop*$_{\text{def}}$

  - dieser Eintrag „paßt“ auf jede Zieladresse

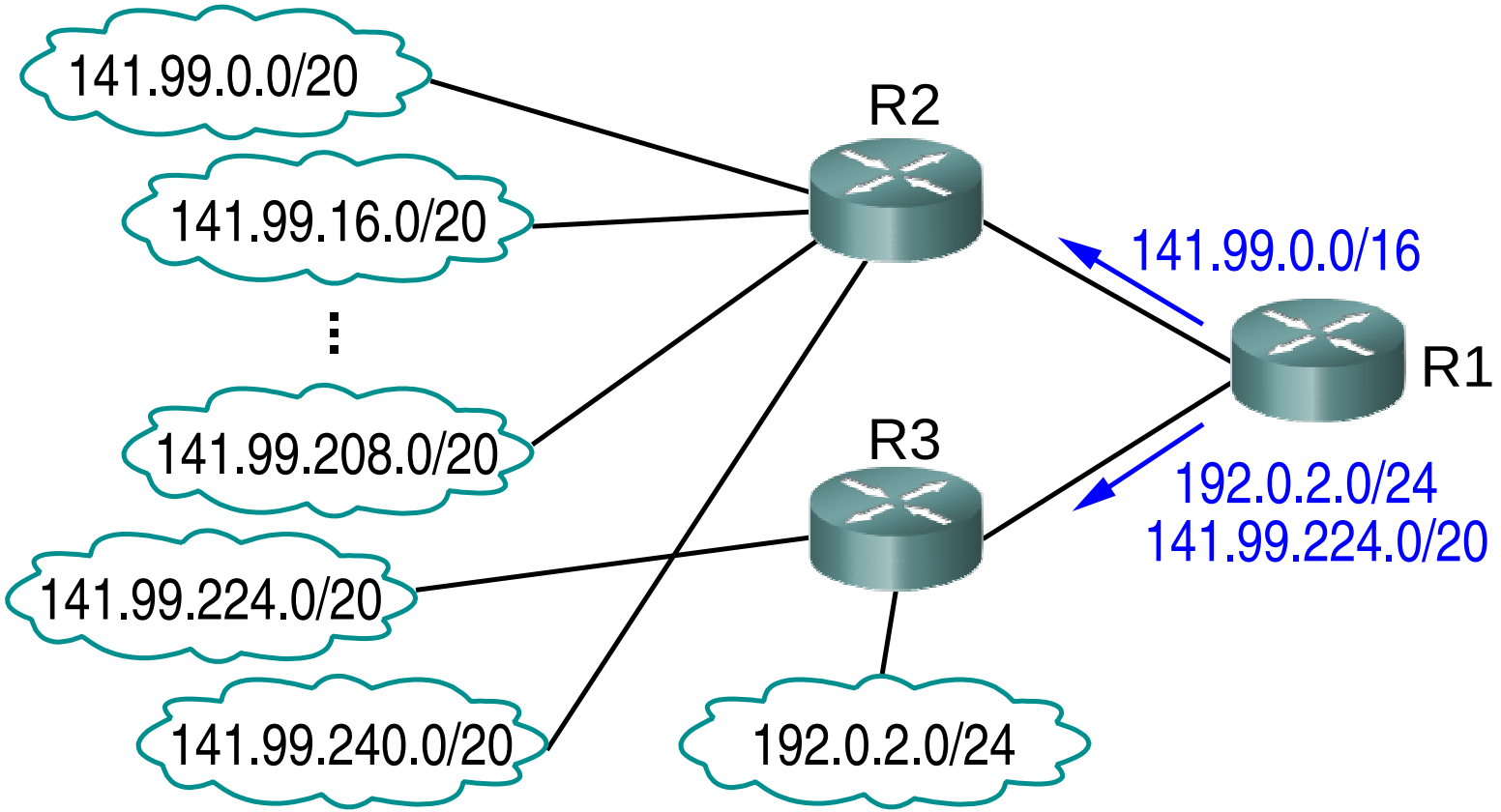
Motivation für die Suche nach dem längsten Präfix

- Erlaubt überlappende Einträge in der Routing-Tabelle
- Damit auch Zusammenfassung „nicht zusammenhängender“ Adreßbereiche möglich:



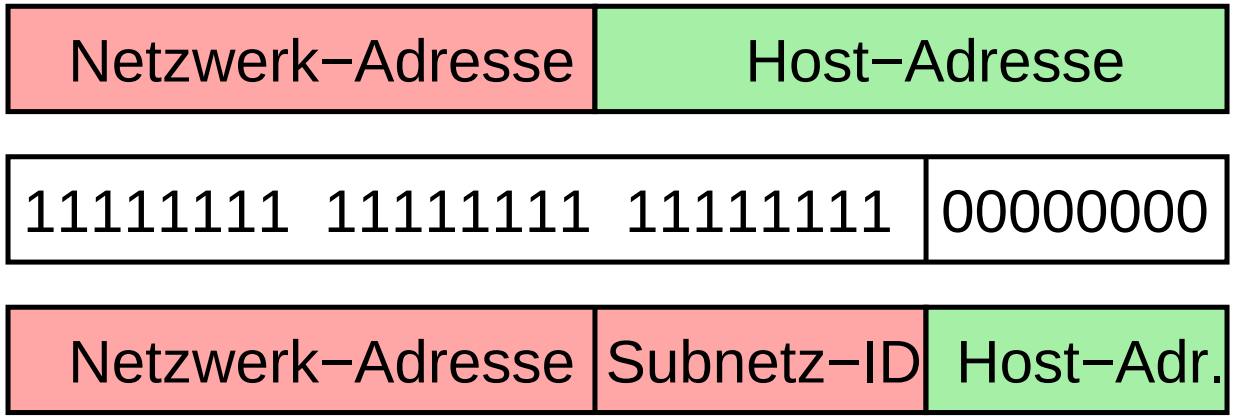
Motivation für die Suche nach dem längsten Präfix

- Erlaubt überlappende Einträge in der Routing-Tabelle
- Damit auch Zusammenfassung „nicht zusammenhängender“ Adreßbereiche möglich:



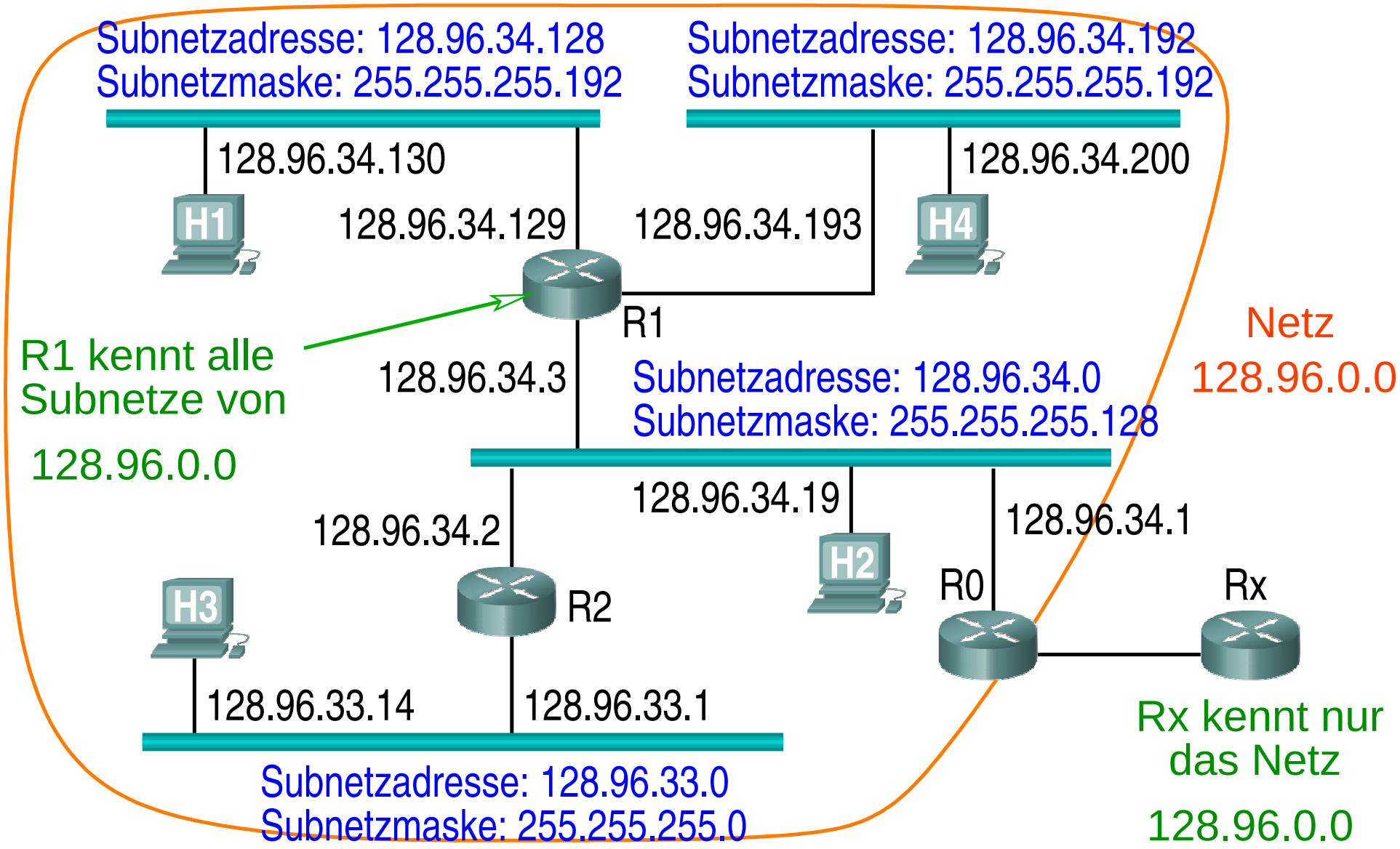
Bildung von Subnetzen

- Motivation: Unterteilung eines großen Netzes (z.B. Firmennetz) in meherere kleinere Netze (z.B. Abteilungsnetze)
  - nach „aussen“ hin ist nur das Gesamtnetz sichtbar
- IPv4: ein Teil der Host-Bits wird für die Subnetz-ID „geborgt“

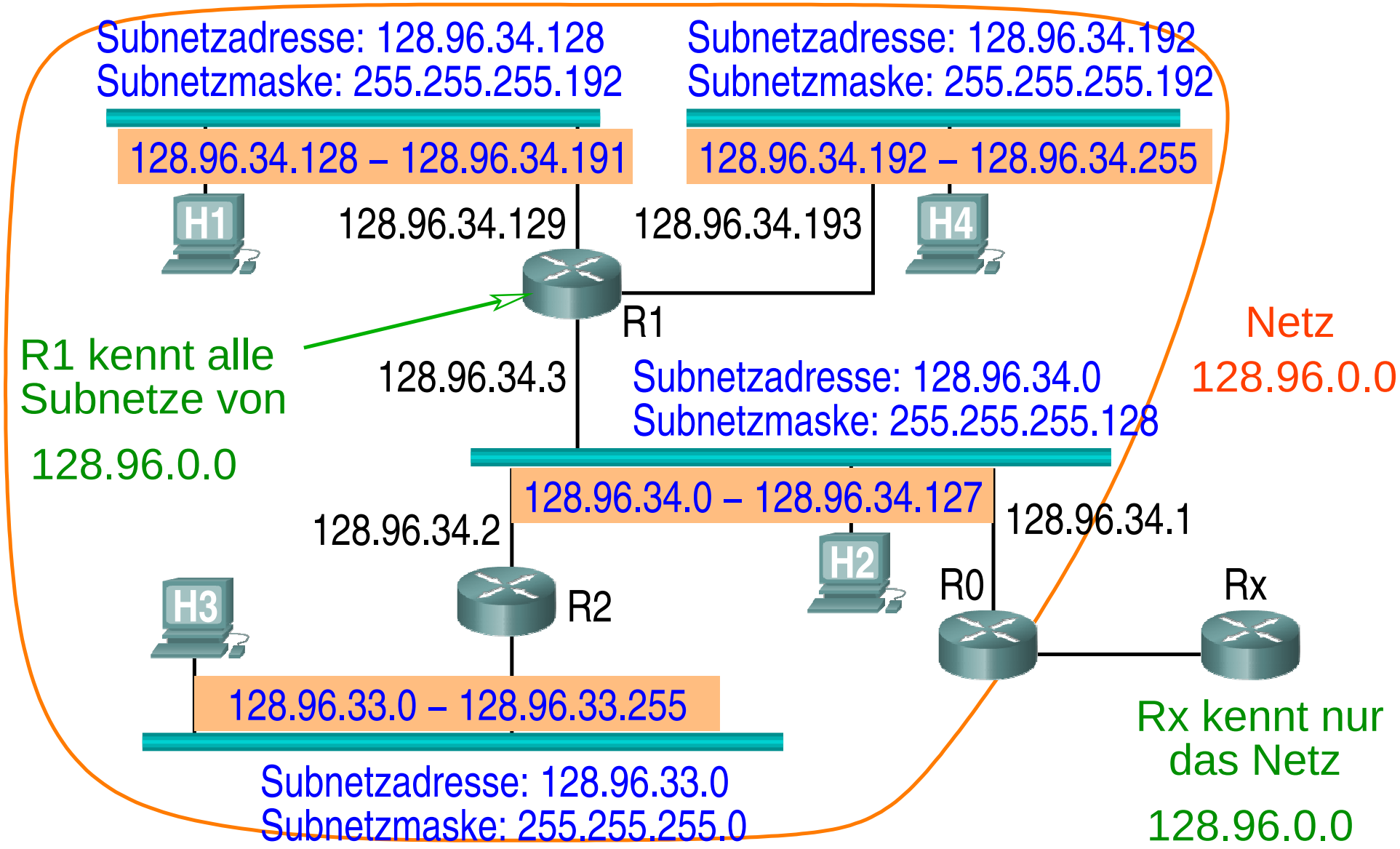


  - i.a. werden Subnetze unterschiedlicher Größe erzeugt
  - Subnetzmaske legt Präfixlänge für das Subnetz fest
- IPv6: Subnetz-ID in eigenem 16-Bit-Feld (☞ **S. 137**)

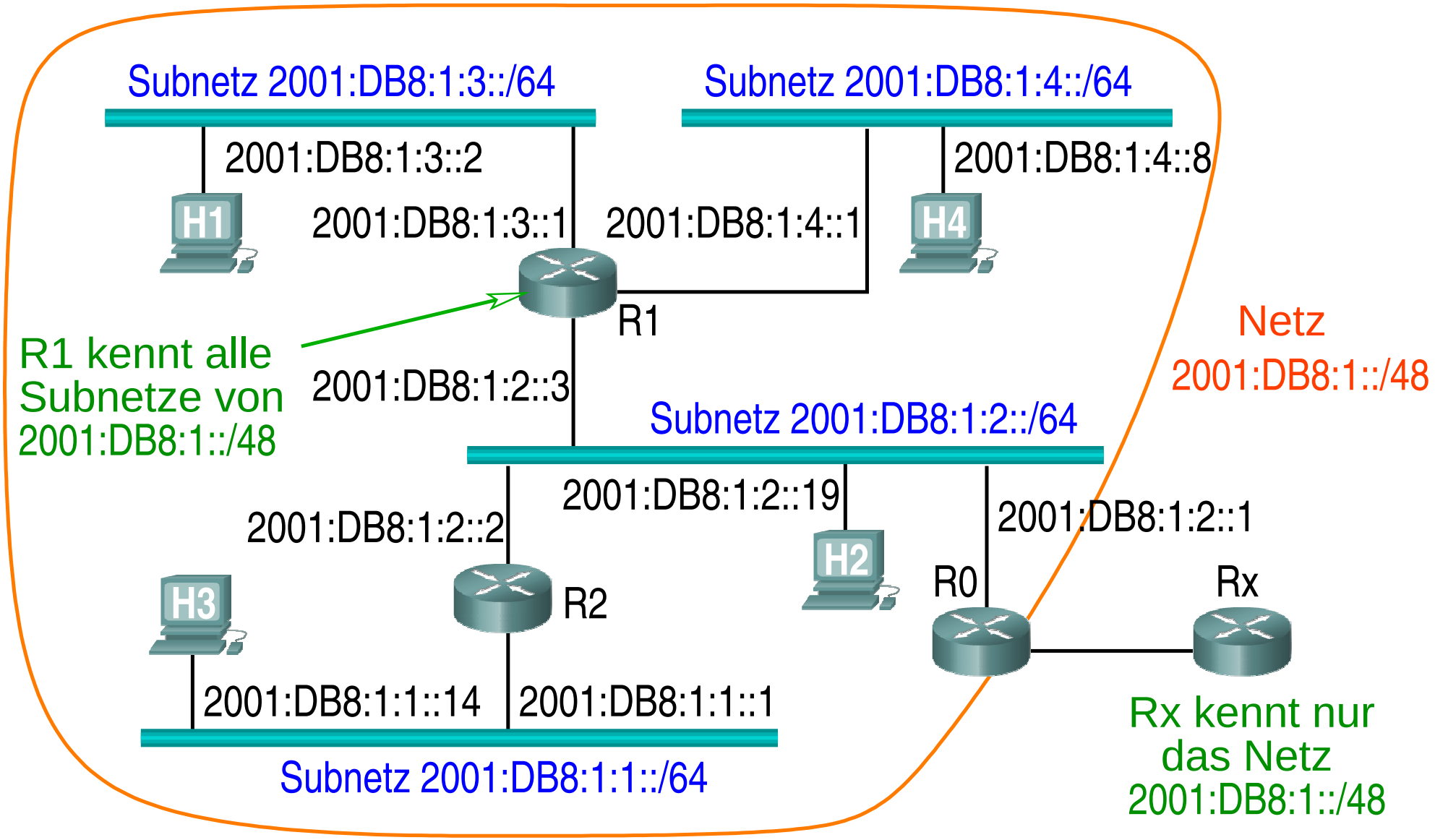
Ein Netz mit Subnetzen (IPv4):



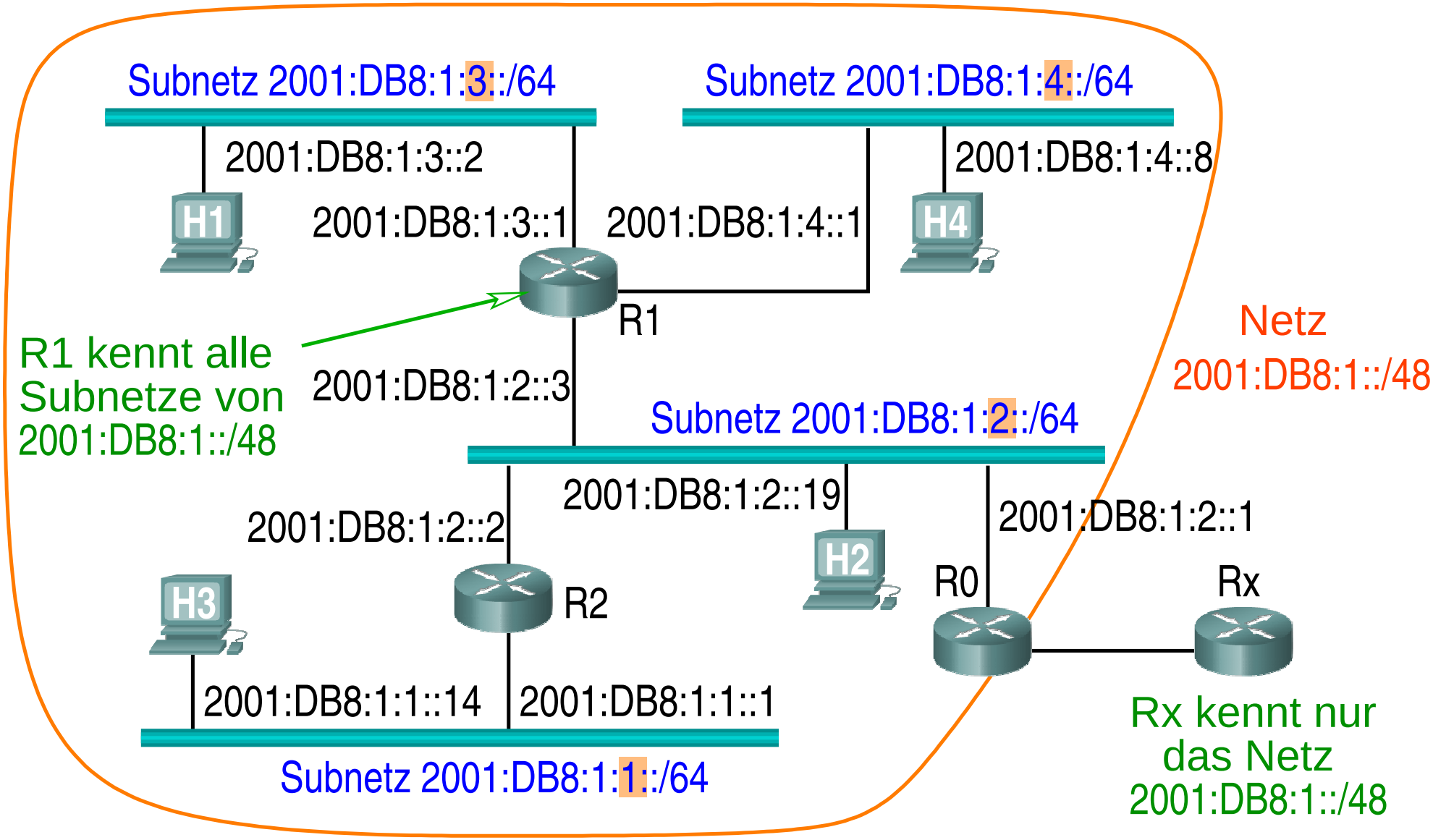
Ein Netz mit Subnetzen (IPv4):



Ein Netz mit Subnetzen (IPv6):



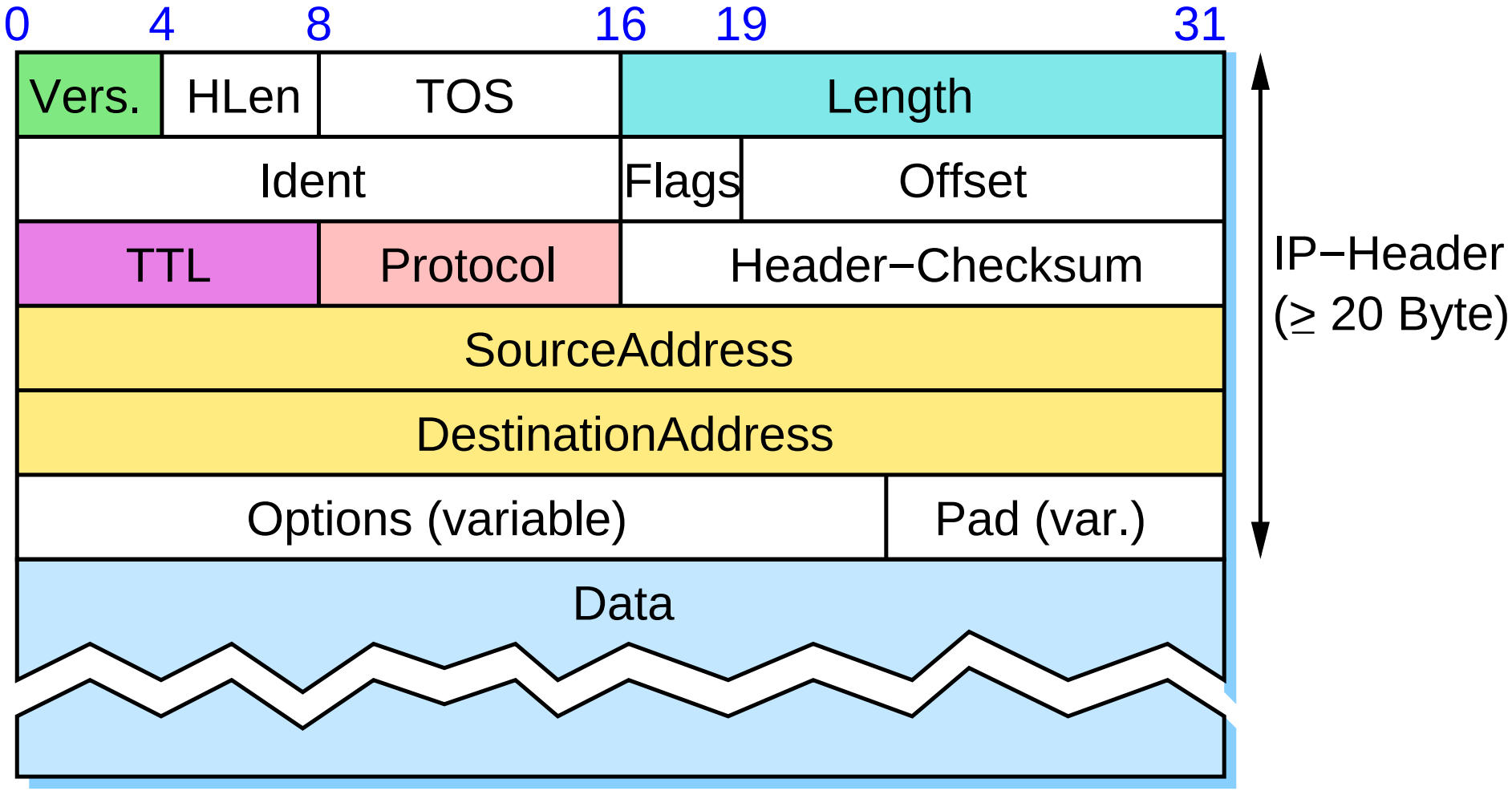
Ein Netz mit Subnetzen (IPv6):



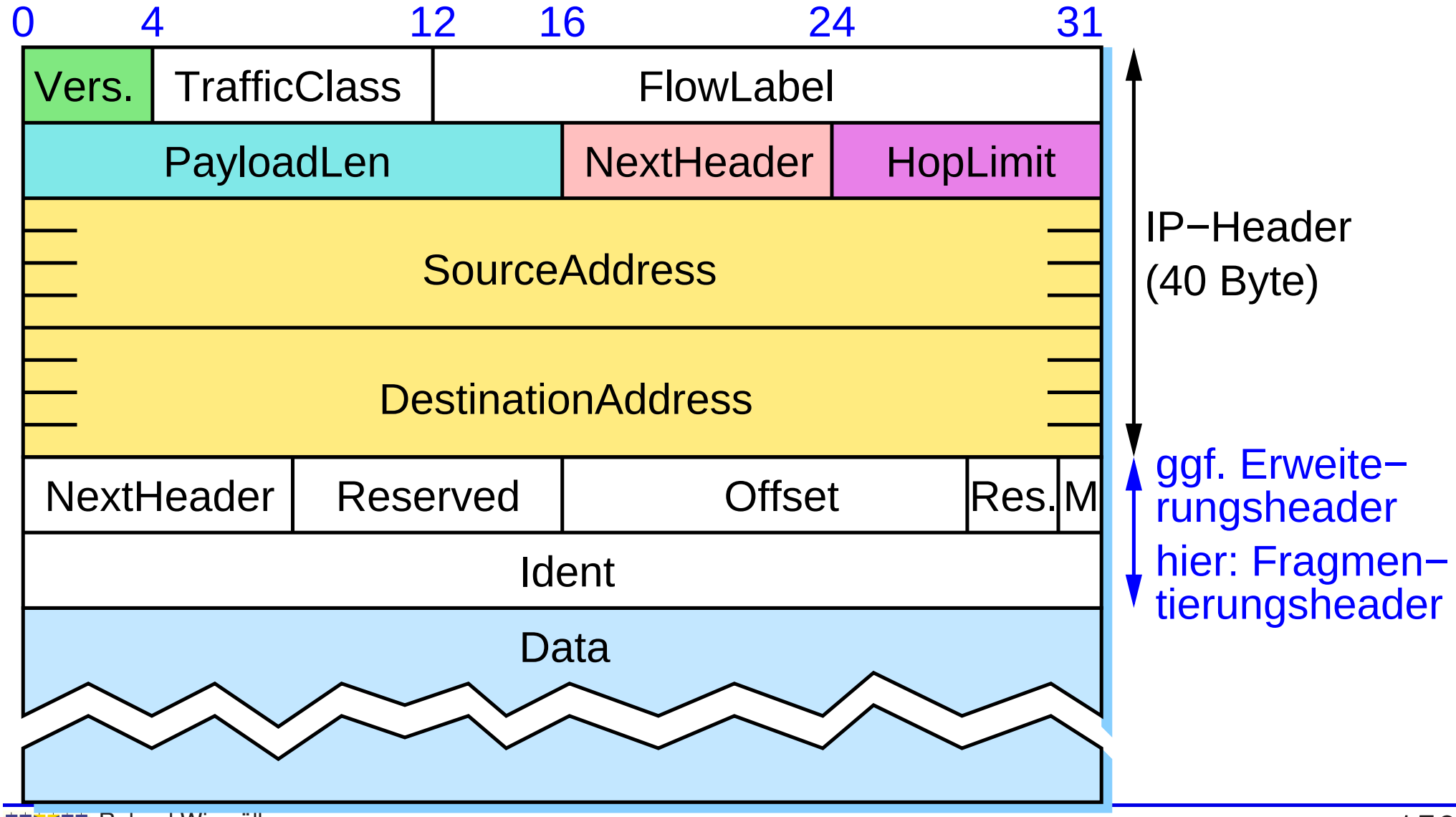
Bestimmung der (Sub-)Netzzugehörigkeit

- Wie bestimmt ein Host bzw. Router, ob eine IP-Adresse xyz in einem gegebenen (Sub-)Netz liegt?
- Gegeben: (Sub-)Netzadresse und Präfixlänge n
  - stimmen xyz und Netzadresse in den ersten n Bits überein?
  - (vgl. Weiterleitungsalgorithmus auf S. 144)
- Gegeben: (Sub-)Netzadresse und (Sub-)Netzmaske
  - gilt xyz AND Netzmaske $=$ Netzadresse ?
- Beispiel: 128.96.34.19 AND 255.255.255.128 $=$ 128.96.34.0

IPv4


0
4
8
16
19
31
Vers.
HLen
TOS
Length
Ident
Flags
Offset
TTL
Protocol
Header−Checksum
SourceAddress
DestinationAddress
Options (variable)
Pad (var.)
Data
IP−Header
(≥ 20 Byte)

IPv6


0
4
12
16
24
31
Vers.
TrafficClass
FlowLabel
PayloadLen
NextHeader
HopLimit
SourceAddress
DestinationAddress
NextHeader
Reserved
Offset
Res.
M
Ident
Data
IP−Header
(40 Byte)
ggf. Erweite−
rungsheader
hier: Fragmen−
tierungsheader

Bedeutung der wichtigsten Felder

- **HLen**: Länge des Headers in 32-Bit Worten
- **TOS** / **TrafficClass** / **FlowLabel**: für *Quality of Service*
- **Length**: Gesamtlänge des Pakets inkl. IP-Header in Bytes
  PayloadLen: Länge des Pakets ohne Basis-IP-Header
  - maximal 65535 Bytes
- **Ident** / **Flags (M)** / **Offset**: für Fragmentierung / Reassembly
- **TTL** / **HopLimit**: zur Erkennung endlos kreisender Pakete
  - wird von jedem Router heruntergezählt, bei 0 wird das Paket verworfen
- **Protocol** / **NextHeader**: kennzeichnet das im Datenteil versendete Protokoll (z.B. TCP, UDP; für Demultiplexing)
  oder (bei IPv6) ggf. den Typ des folgenden Erweiterungsheaders

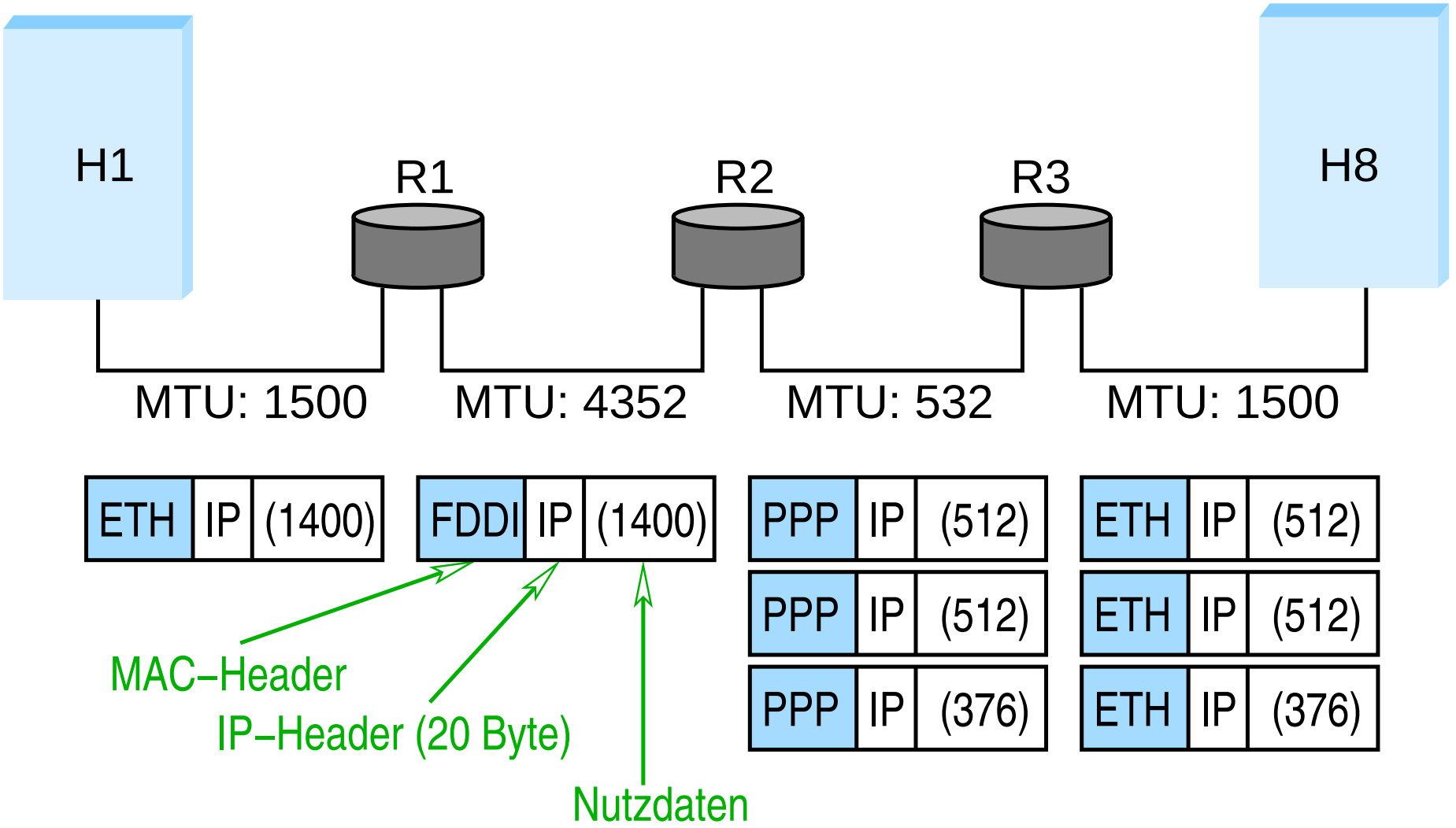
Problem für IP

- Jedes lokale Netzwerk definiert eine (unterschiedliche) maximale Framegröße (**MTU**: ***Maximum Transmission Unit***)

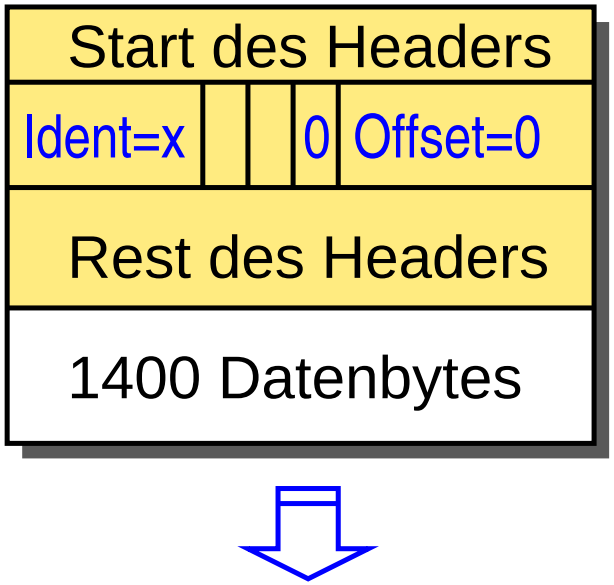
Netzwerk	MTU [Byte]
Ethernet	1500
FDDI	4352
4 Mbits/sec Token-Ring (IEEE 802.5)	4464
16 Mbits/sec Token-Ring (IBM)	17914

- Alternativen für IP:
  - max. Paketgröße = minimale MTU (welcher Netze??)
  - Möglichkeit der Fragmentierung von IP-Paketen

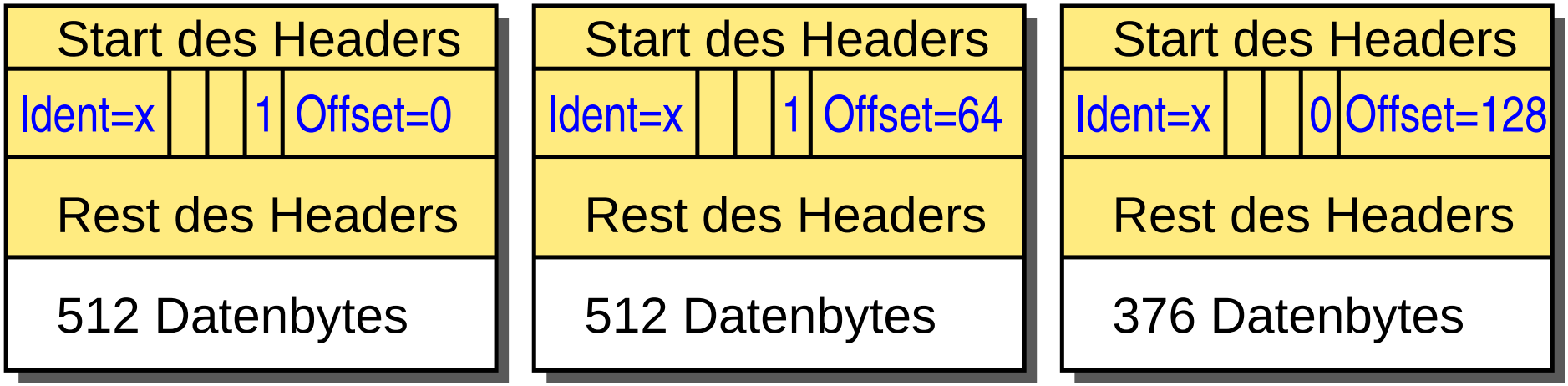
Beispiel zur Fragmentierung (IPv4)



Fragmentierung im Detail (IPv4)



- **Ident**-Feld kennzeichnet zusammengehörige Fragemente
- **M**-Bit (bei IPv4 im **Flags**-Feld): „*more fragments*“
- **Offset** zählt in 8-Byte-Schritten!
- Analog auch in IPv6



Fragmentierung im Detail ...

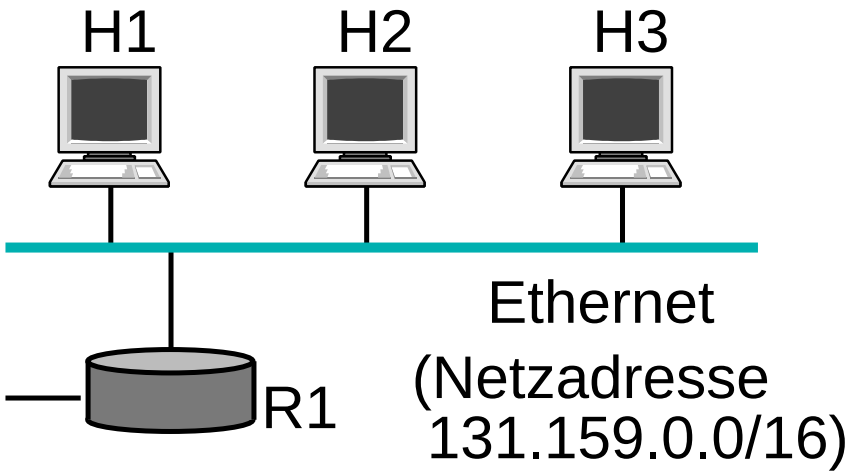
- Fragmentierung geschieht bei Bedarf im Sender bzw. bei IPv4 auch in den Routern
- Jedes Fragment ist ein eigenständiges IP-Datagramm
  - IPv4: ein Fragment kann ggf. nochmals fragmentiert werden
- Empfänger baut aller Fragmente wieder zusammen
  - falls ein Fragment nicht ankommt, werden alle anderen zugehörigen Fragmente verworfen
- Bei IPv6 und meist auch bei IPv4: „*Path MTU Discovery*“
  - Fragmentierung im Router verboten (IPv4: **DF**-Flag im Header) $\Rightarrow$ ggf. Fehlermeldung an Sender (über ICMP, siehe später)
  - Sender kann minimale MTU ermitteln

ICMP: *Internet Control Message Protocol*

- Datagramme für Fehler- und Verwaltungsmeldungen:
  - Ziel nicht erreichbar
  - Reassembly fehlgeschlagen
  - Fragmentierung nicht erlaubt, aber erforderlich
  - TTL wurde 0
  - *Redirect*: besserer Router für das Ziel
  - *Echo Request / Reply*: z.B. für `ping` und `traceroute`
  - *Router Solicitation / Advertisement* (nur IPv6): Suche nach / Bekanntgabe von lokalen Routern
  - *Neighbor Solicitation / Advertisement* (nur IPv6): Adreßübersetzung (siehe später)
  - ...

Motivation

- IP-Weiterleitung bringt ein Paket in das richtige LAN
- Wie funktioniert IP-Kommunikation **innerhalb** eines LANs?
- Beispiel:
  - R1 empfängt Paket für Rechner 131.159.32.12
  - R1 muß Paket über Ethernet an diesen Rechner weiterleiten
  - Woher weiß R1 die MAC-Adresse des Rechners mit IP-Adresse 131.159.32.12?



- Anmerkung: dasselbe Problem tritt auch auf, wenn z.B. H1 ein Paket an IP-Adresse 131.159.32.12 senden will

Motivation ...

- Problem: Umsetzung von IP-Adressen auf MAC-Adressen im lokalen Netz
  - allgemein: auf Sicherungsschicht-Adresse
- Lösungs-Alternativen:
  - MAC-Adresse in IP-Adresse kodieren?
    - bei IPv4 nicht realisierbar (Ethernet: 48 Bit MAC-Adresse!)
  - Manuell verwaltete Tabellen?
    - Verwaltungsaufwand!
  - Automatisches (dynamisches) Erstellen der Tabellen!

ARP: *Address Resolution Protocol* (IPv4)

- Annahme: ein Rechner H will ein Paket an IP-Adresse *xyz* senden, *xyz* ist im lokalen Netz
- H sucht in seinem ARP-Cache nach der zu *xyz* gehörigen MAC-Adresse
- Falls gefunden: Paket an diese MAC-Adresse senden
- Sonst:
  - H sendet Anfrage (*ARP-Request*) per Broadcast in das LAN: „wer hat IP-Adresse *xyz*?“
  - Der betroffene Rechner sendet Antwort (*ARP Reply*) mit seiner IP- und MAC-Adresse zurück
  - H trägt Zuordnung in sein ARP-Cache ein
    - automatische Löschung nach bestimmter Zeit ohne Nutzung

NDP: *Neighbor Discovery Protocol* (IPv6)

- NDP ist Teilprotokoll von ICMPv6
  - *Neighbor Solicitation/Advertisement*
- Funktionsweise der Adreßumsetzung analog zu ARP
- Unterschiede:
  - Nutzung von ICMP-Paketen statt ARP-Protokoll
    - Anfrage: *Neighbor Solicitation*
    - Antwort: *Neighbor Advertisement*
  - Anfrage nicht per Broadcast sondern per Multicast
    - an die zugehörige *Solicited Nodes* Multicast-Gruppe
    - Gruppe wird aus letzten 24 Bits der Ziel-IP-Adresse bestimmt

DHCP: *Dynamic Host Configuration Protocol*

- Automatisiert u.a. die Vergabe von IP-Adressen (IPv4 und IPv6)
- Vorgehensweise:
  1. Rechner sendet Broadcast-Anfrage (DHCPDISCOVER)
     - Verbreitung nur im lokalen Netz
  2. DHCP-Server sendet DHCPOFFER: Angebot für IP-Adresse
     - Zuordnung statisch oder dynamisch, als Schlüssel dient MAC-Adresse des Rechners
     - ggf. auch weitere Optionen (Hostname, DNS-Server, ...)
  3. Rechner fordert angebotene Adresse vom DHCP-Server an (DHCPREQUEST)
  4. DHCP-Server bestätigt (DHCPACK)
- IP-Adresse wird nur für eine bestimmte Zeit „gemietet“
  - periodische Wiederholung der Schritte 3 und 4

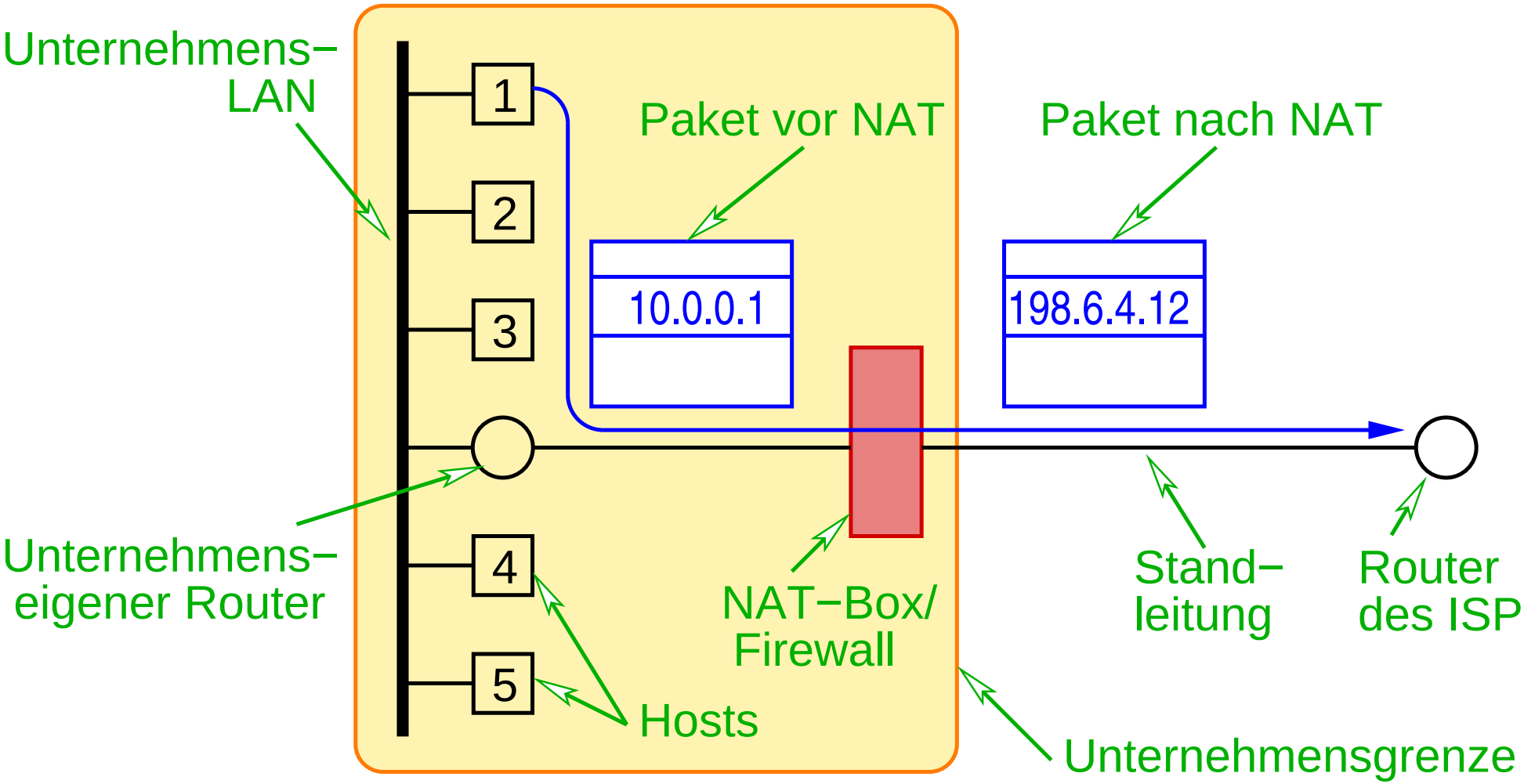
Zustandslose IPv6 Autokonfiguration

- Vorgehensweise eines Hosts:
  1. bilde *link-local* Adresse
     - Präfix FE80::/10 und z.B. EUI-64 oder Zufallszahl
  2. prüfe Adresse mit NDP: *Neighbor Solicitation*
     - falls keine Antwort: Adresse im LAN eindeutig
  3. warte auf *Router Advertisement*
     - sende ggf. explizit *Router Solicitation* wg. Wartezeit
  4. *Router Advertisement* teilt mit:
     - Adresse und/oder andere Optionen über DHCP holen?
     - ggf. globales Routing-Präfix und Präfixlänge
  5. bilde Adresse aus Präfix und z.B. EUI-64 oder Zufallszahl
  6. prüfe Adresse mit NDP: *Neighbor Solicitation*
- Adresse ist i.d.R. nur begrenzte Zeit gültig

NAT, speziell NAPT (*Network Address Port Translation*)

- Ziel: Einsparung von IP-Adressen
  - mehrere Rechner eines Netzes werden auf dieselbe, nach außen sichtbare IP-Adresse gemultiplext
- Prinzip:
  - jeder Rechner des Netzes bekommt **private** IP-Adresse
  - drei reservierte Adreßbereiche:
    - 10.0.0.0/8 (10.0.0.0 - 10.255.255.255)
    - 172.16.0.0/12 (172.16.0.0 - 172.31.255.255)
    - 192.168.0.0/16 (192.168.0.0 - 192.168.255.255)
  - das gesamte Netz erhält **eine** „echte“ IP-Adresse
  - ausgehende Pakete durchqueren NAT-Box
    - NAT-Box ersetzt private IP-Adresse durch echte

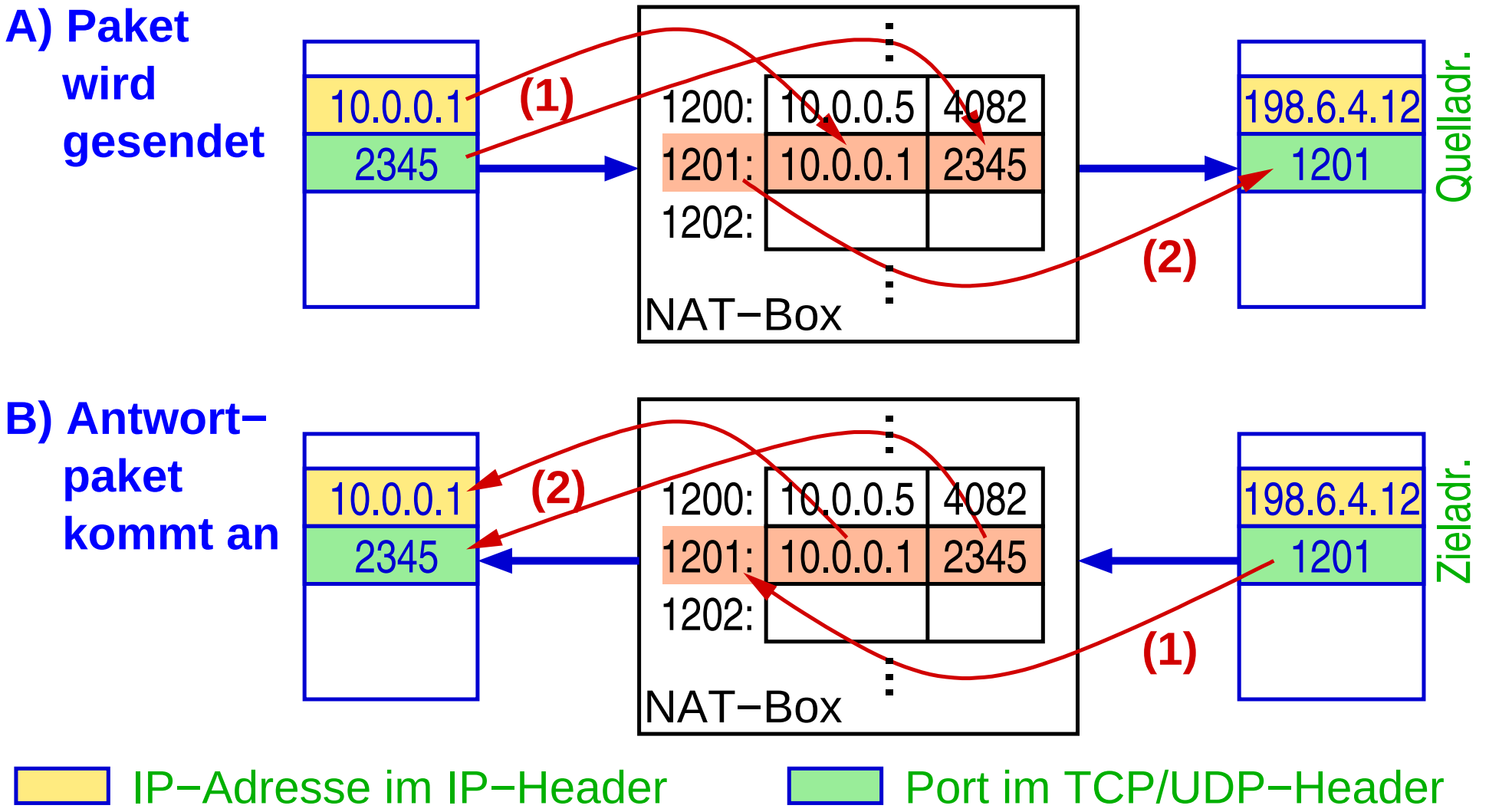
Prinzipielle Funktionsweise von NAT



Problem: Zustellung von Antwort-Paketen!?

- Alle eingehende Pakete sind an dieselbe Adresse gerichtet
  - woher weiß die NAT-Box, an wen das Paket gehen soll?
- Lösung (schmutzig!):
  - praktisch der gesamte IP-Verkehr ist UDP oder TCP
  - UDP- und TCP-Header enthalten Felder zur Adressierung von Quell- und Zielprozess (Quell-/Ziel-Port)
  - NAT-Box verwendet Quell-Port-Feld des UDP/TCP-Headers zum Speichern eines Demultiplex-Schlüssels
    - bei ausgehendem Paket: speichere Quell-IP-Adresse und Quell-Port ($\Rightarrow$ Schlüssel)
    - ersetze IP-Adresse, ersetze Quell-Port durch Schlüssel
    - Antwortpaket enthält Schlüssel als Ziel-Port
    - ersetze Ziel-Adresse/Port durch gespeicherte Adresse/Port

Genaue Funktionsweise von NAT



Kritik:

- IP-Adressen nicht mehr weltweit eindeutig
- Macht aus Internet quasi verbindungsorientiertes Netz
  - Ausfall der NAT-Box: Zerstörung aller Kommunikationsbeziehungen (TCP und UDP)!
- NAT (Schicht 3) macht Annahmen über Schicht 4!
  - neue TCP/UDP-Version, andere Protokolle über IP !?
- Nutzdaten können IP-Adressen enthalten (z.B. FTP, H.323)

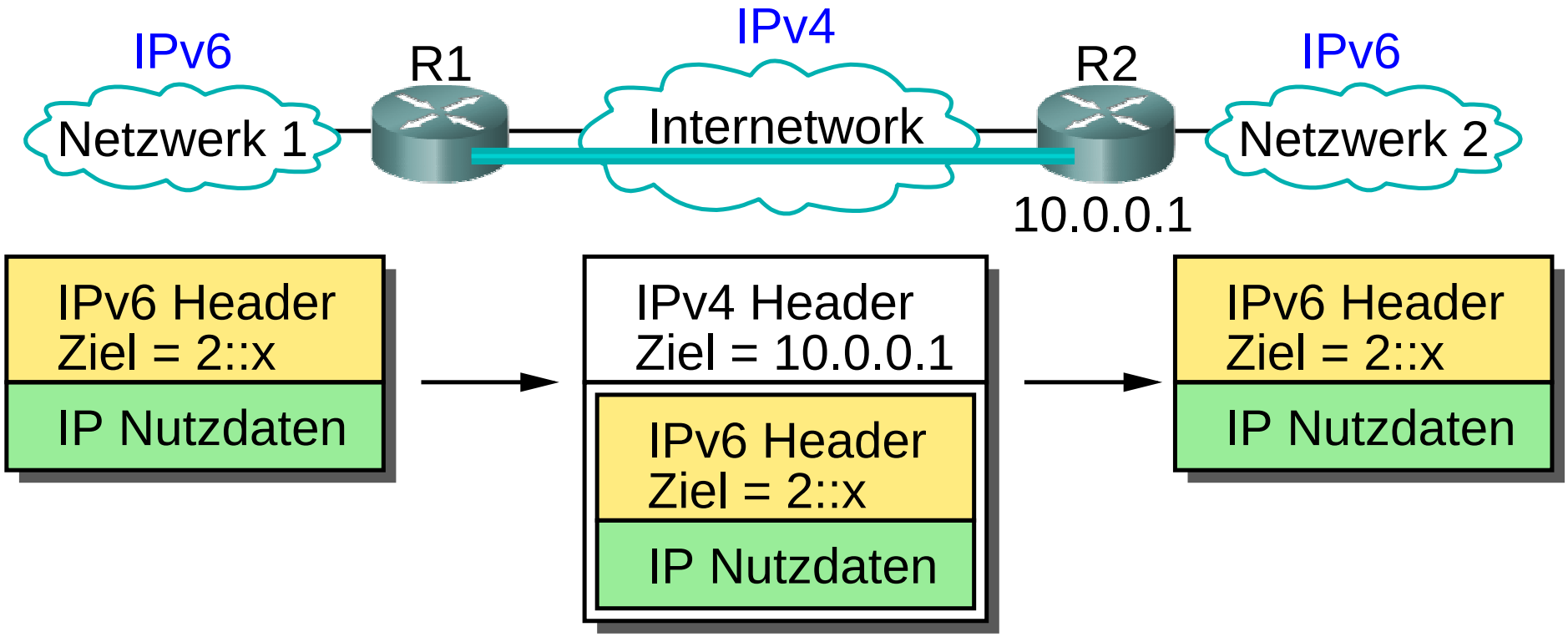
Vorteile:

- Einsparung von IP-Adressen
- Sicherheit: Hosts sind von außen nicht erreichbar, Struktur des lokalen Netzes nach außen verborgen

Verschiedene Ansätze

- Dual-Stack-Ansatz
  - Netzknoten implementieren sowohl IPv6 als auch IPv4
  - Fähigkeiten des Zielknotens über DNS zu ermitteln
    - IPv6-Adresse für IPv6-fähigen Knoten, IPv4-Adresse sonst
  - Router müssen ggf. IP-Header der Pakete anpassen
    - wenn zwischenliegende Router nur IPv4 unterstützen
    - Informationsverlust möglich (z.B. FlowLabel nur in IPv6)
- Tunneling
  - Aufbau eines IPv4-Tunnels zwischen IPv6-Knoten
  - d.h. IPv6-Pakete werden in IPv4-Pakete eingepackt
- Adreßübersetzung analog zu NAT (6to4)

Tunneling



- Weitere Gründe für Tunnel:
  - Verschlüsselung im Tunnel (z.B. mit Secure IP)
  - spezielle Fähigkeiten von R1, R2 (z.B. Multicast)

Stand

- Praktisch alle neuen Features von IPv6 inzwischen auch in IPv4 verfügbar
  - Hauptmotivation: größerer Adreßbereich
- Moderne Betriebssysteme beinhalten IPv4 und IPv6
  - z.B. Linux, Windows (ab XP)
- Bis Juni 2006: Internet-Testbett 6bone
- IPv6 inzwischen im „Produktionseinsatz“
  - einige Dienste nur noch mit IPv6 angeboten
- Zeitrahmen für die Ablösung von IPv4 aber unklar

5.10 Zusammenfassung

- Internetwork: Netz von Netzen
- IP-Protokoll: Best-Effort, run over everything
  - Hierarchische Adressen: Routing nur zwischen Netzen
  - Bessere Skalierbarkeit durch CIDR und Subnetze
- Hilfsprotokolle: ICMP, ARP, NDP, DHCP
- NAT: Umsetzung privater auf globale IP-Aressen

Nächste Lektion:

- Routing