Medien

Ausbreitungsgeschwindigkeit

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $c_0 = 299'792'458\,\frac{m}{s}$
Faustregel in Medien: $200'000\,\frac{km}{s} = 20\,\frac{cm}{ns}$

Signaldämpfung

Angegeben in Dezibel; auch: Insertion Loss, Attenuation

Dämpfung $A = 10 * \log(P_1/P_2) = 20 * \log(U_1/U_2)$

Höhere Frequenz → mehr Dämpfung

Halbierung der Leistung entspricht ca. 3dB

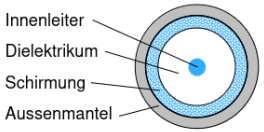
Signal-to-Noise-Ratio SNR

$SNR = 10 * \log(P_{Signal}/P_{Noise})dB$

Kabel

Koaxial

+ besser als twisted pair für hohe Frequenzen
+ relativ unempfindlich gegen elektromagn. Störungen
- mechanisch heikel (knicken/quetschen)



Parasymmetrisch (Twisted Pair)

+ bereits lange im Einsatz
+ bei guter Qualität auch für Breitband geeignet
- mit oder ohne Schild

Shielded Twisted Pair (STP)

Bezeichnet nach ISO 11801: xx/yTP

xx steht für die Gesamtschirmung

U ungeschirmt
F Folienschirm
S Geflechtschirm
SF Folien- & Geflechtschirm

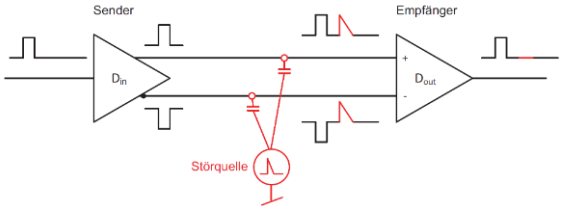
y steht für die Aderpaarschirmung

U ungeschirmt
F Folienschirm
S Geflechtschirm

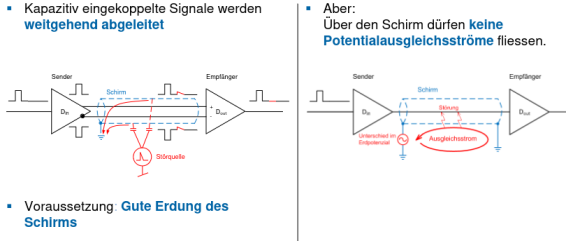
Störungen bei TP

Kapazitive/Induktive Störungen treten bei TP öfter als bei Koax oder Glasfaser auf.

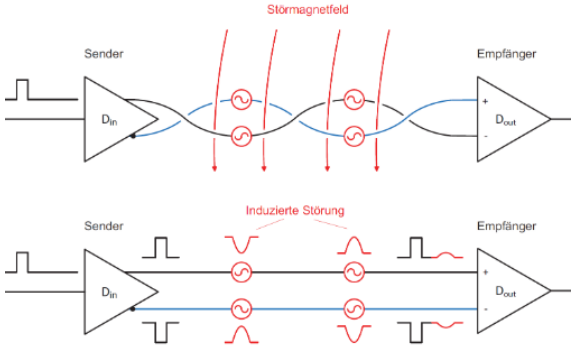
Kapazitive Störungen von benachbarten Leitungen heissen Crosstalk(über-/nebensprechen). Diese Störungen können durch ein invertiertes komplementäres Signal weitgehen aufgehoben werden. Der Empfänger subtrahiert die beiden Signale und eliminiert dadurch Störungen.



Alternativ können kapazitive Störungen mit einem leitenden Schirm abgefangen werden.



Induktive Störungen (durch ein Magnetfeld) können nicht durch ein komplementäres Signal alleine gelöst werden, da die die Störung auf beiden Signalen entgegengesetz ist. Dies kann über verdrillen der Adernpaare gelöst werden, benachbarte Schleifen heben sich so immer auf.



Kategorien

• Cat 1..4	Billigkabel für analoge Sprachübertragung (< 1Mb/s)
• Cat 5	bis 100 MHz, z.B. 100Mb/s oder 1 Gb/s Ethernet bis 100m
• Cat 6	250 MHz, 1 Gb/s Ethernet und 10 Gb/s Ethernet bis 55m
• Cat 7	600 MHz, z.B. für 10 Gb/s Ethernet bis 100m

Lichtwellenleiter

+ hohe Bandbreite → hohe Datenrate
+ geringe Dämpfung → lange übertragungsstrecken
+ resistentt gegen elektromagnetische Störungen

Zentrum aus Kernglas mit hoher optischer Dichte (Brechungsindex $n_{kern} = 1.5$) umschlossen von Mantelglas mir geringer optischer Dichte (Brechungsindex $n_{mantel} = 1.48$). Dadurch werden Lichtstrahlen im Kern totalreflektiert($\beta > 90°$) und keine Energie durch Absorption verloren

Multimode

+ dicker Kern (mehrere Wege/Modes für das Licht)
- hohe Dispersion(Signalverschmierung auf langen Wegen)
  - Kann reduziert werden durch Einsatz von Gradientenfaser (übergang zwischen Kern und Mantel)

Singlemode

+ keine Dispersion
+ hohe Datenraten auf hohe Distanzen
- dünner Kern, nur eine Grundmode

Physical Layer

Begriffe

(Leitungs-)Symbol

Zu einem gewissen Zeitpunk übertragenes physikalisches Signal das mit einer bestimmten Symbolrate seinen Wert verändert.

nicht wie in INCO "eine von N möglichen Nachrichten"

Informationsgehalt/Bit

Informationsgehalt (von Symbol/Nachricht) $N_{Bit} = ld(\text{Anzahl Möglichkeiten})$

Zeichen

Einheit der übetragenen Daten, z.B. ein ASCII Zeichen

Baudrate

Schrittgeschwindigkeit = Leitungs-Symbole pro Sekunde

Maximale Baudrate f_s ist doppelte Bandbreite B (Hz) gemäss Nyquist:

$$f_s = 2B$$

Durchsatz/Bit-/Datenübertragungsrate

übertragung von Information pro Zeit

Maximale Bitrate (Hartley's Gesetz)

$$R \leq 2B * ld(\#\text{unterscheidbare Signalzustände})$$

Potenzen (in der Kommunikation werden NICHT zweierpotenzen verwendet):

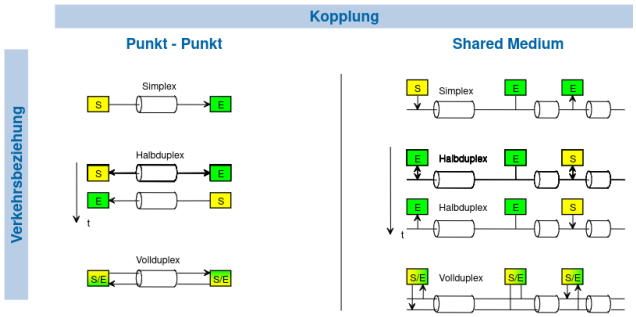
- kBit $= 10^3$ Bit → kbps $= 10^3$ bps
- MBit $= 10^6$ Bit → Mbps $= 10^6$ bps
- GBit $= 10^9$ Bit → Gbps $= 10^9$ bps

Kanalkapazität

Berücksichtigt neben der Bitrate auch Störungen

$$C_s[Bit/s] = B * ld(1 * \frac{S}{N})$$

Verkehrsbeziehung und Kopplung



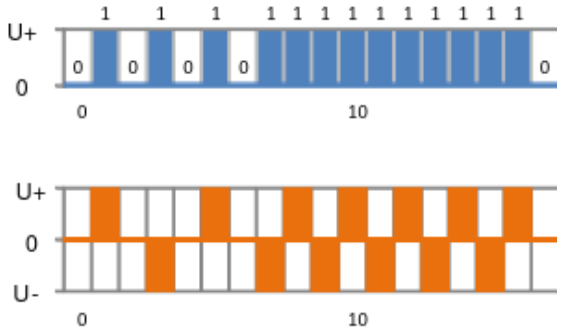
Leitungscodes

Anforderungen:

- Takt sollte im Signal enthalten sein (Taktrückgewinnung)
- effiziente Bandbreitennutzung
- möglichst gleichspannungsfrei (um Sender & Empfänger mit z.B. Transformatoren galvanisch trennen zu können)

3-wertiger AMI (Alternate Mark Inversion)

Wechsel +/- bei jeder 1 sonst 0 → +/- gleichen sich aus somit Gleichspannungsfrei



PAM3

Anwendung bei 10 Mbit/s Ethernet via Single Pair bis 1.2km

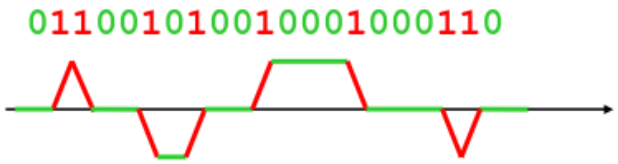
- 4 Bit werden zu 3 ternären Symbolen
- DC/Gleichspannungs Offset wird bei Codierung berücksichtigt

Manchester-Code

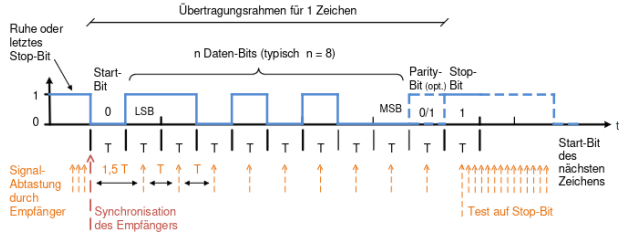
Einsatz bei 10BASE-T
Einfache Codierung: 1 werden als steigende Flanke, 0 als fallende Flanke übertragen. Signalwechsel bei jedem Bit → einfache Taktrückgewinnung

NRZI (Non Return to Zero Inverted)

Einsatz bei 100BASE-TX(mit zusätzlicher 4 zu 5 bit codierung)



RS232



Data Link Layer

Aufgaben:

- fehlerfreie Verbindung direkt verbundener Systeme
- Framing, Nutzdaten erkennen und ent-/verpacken
- Fluss-Steuerung (Flow Control), langsamer Empfänger kannen schnellen Sender bremsen
- Adressierung der Teilnehmer (falls mehrere)
- Medium Zugriff (Media Access) wer darf wann senden

Framing

Asynchron

- keine Daten → nichts wird übertragen (Ruhezustand)
- Start-Bit zu Beginn eines Frames
- Aufbau (meistens): Header + Datenblock + Fehlererkennung

Synchron

- Frames werden permanent gesendet, falls keine daten wird ein Flag gesendet (Bit Stuffing stellt sicher dass das Flag nicht als Nutzdaten vorkommt)
- Aufbau: wie Asynchron aber links & rechts durch Start-/End-Flag begrenzt

Bit-/Framefehlerwarscheinlichkeit

auch **BER** (Bit Error Ratio), NICHT Bitfehlerrate das wären Bitfehler pro Zeit

Für gleichverteilte Fehler, ohne doppelte die sich aufheben; Wahrscheinlichkeit, dass ein Frame mit länge $N \geq 1$ Bitfehler hat

$$FER = P_{FehlerFrame} = 1 - (1 - p_{FehlerBit})^N$$

für $p_{FehlerBit} \ll 1$ gilt näherungsweise $FER \approx N * p_{FehlerBit}$

Andere:

FER Frame Error Ratio, fehlerhaft empfangene Frames
RER Residual Error Ratio, unentdeckete fehlerhaft empfange Frames

Frame-Länge

Trade-Offs von Frame länge

+ hohe Netto-Bitrate wegen Gutem Header/Nutzdaten Verhältnis
- grössere Framefehlerwarscheinlichkeit
- mehr Datenverlust bei einem Fehler
- höhere Wahrscheinlichkeit für unentdeckten Fehler

Fehlererkennung

Hamming-Distanz

die minimale Anzahl Bits in denen sich zwei beliebige Codewörter eines Codes unterscheiden

Hamming-Distanz h herlaubt die Erkennung von h-1 Fehlern

Parity

Even Anzahl 1 inkl. Parity-Bit ist gerade
Odd Anzahl 1 inkl. Parity-Bit ist ungerade
Längs & Quer über mehrere Bytes für jede Spalte / Zeile Parity sowie eine gesamt parity

Prüfsumme

über ein speziell Konstruiertes Polynom wird eine Prüfsumme generiert z.B. CRC

Fehlerkorrektur

Backward Error Correction

Rückfrage des Empfängers nach dem letzen Packet bei Fehler

- Rückkanal benötigt
- Warten auf Quittung
- Warten auf Timeout (abhilfe durch negative Bestätigung)

Forward Error Correction (FEC)

BER reduzieren durch fehlerkorrigierende Codes

Anstatt verwerfen bei Fehler, schätzen der wahrscheinlichsten gesendeten Nachricht.

Regeln für Hamming-Distanz h

- Anzahl der korrigierbaren Bitfehler k ist die abgerundete Hälfte der fehlerbehafteten Zwischencodes $k \leq (h-1)/2$
- Ein Code der genau in der Mitte liegt wird als Fehlerhaft erkennt, kann aber nicht korrigiert werden.
- Allgemein: $k + e = (h-1)$ mit $k \leq (h-1)/2$

Medienzugriff

Master-Slave
+ keine Konflikte weil master alles koordiniert
- single point of failure

Token Sendeberechtigung wird in einer fixen Reihenfolge weitergereicht
+ deterministisch
- Aufwändig

Zeitsteuerung Analog zu Taktfahrplan für Züge
+ Optimierung möglich
- konflikte bei unplanbarem Verkehr

CSMA (Carrier Sense Multiple Access) Alle "master", senden wenn sie niemand sonst hören
- Konflikte möglich falls 2+ gleichzeitig entscheiden zu senden

CSMA/CD Collision Detection, abbrechen und später nochmals versuchen
CSMA/CR Collision Resolution, Hardware unterstütze Arbitrierung

Flowcontrol

Erlaubt Empfänger den Sender temporär zu stoppen Verwendung bei Speichermangel/langsamer Verarbeitung oder Überlast im Netzwerk

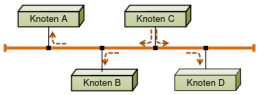
Kann auch implizit vorkommen, in dem der Sender nach jeder Nachricht auf eine Quittung wartet bevor er die nächste schickt

Ethernet

Begriffe

Topologien

Bus

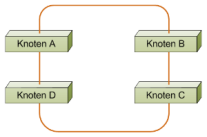


- Alle Stationen
  - sind passiv angeschlossen
  - horchen Leitung permanent ab
  - werden aktiv, wenn sie etwas senden wollen
- Keine festgelegte Ausbreitungsrichtung
- Empfänger erkennt anhand einer Adresse, ob die Daten für ihn relevant sind

Linie

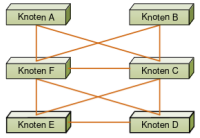
- Punkt-zu-Punkt Verbindungen zwischen benachbarten Knoten
- Alle Stationen müssen
  - Daten empfangen
  - Daten regenerieren
  - falls nötig weiterleiten
- Der Ausfall einer Station führt zur Segmentierung des LAN in zwei Teile

Ring



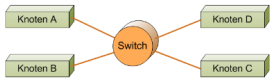
- Benötigt Verfahren zur Verhinderung von "endlosem Kreisverkehr"
- Gewisse Redundanz: beim Ausfall einer Station kann immer noch jede Station erreicht werden

Vermascht (teilweise oder komplett)



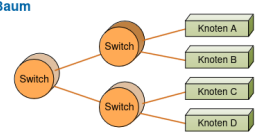
- Weitere Erhöhung der Redundanz:
  - Ausfall einer oder eventuell auch mehrerer Stationen oder Verbindungen kann toleriert werden
  - Zusätzliche Kosten und Aufwand, um mehrfache Lieferung von Daten zu verhindern

Stern



- Jede Station an zentralen Verteiler (Switch/Bridge) angeschlossen
- Verteiler entkoppelt Knoten elektrisch und macht LAN weniger störungsanfällig
- Verteiler sendet Daten, die er von einer Station erhält, an die anderen Knoten weiter

Baum



- Hierarchische Erweiterung der Sterntopologie
- Intelligenten Switches ermöglichen einen Grossteil der Kommunikation „lokal“
  - zwischen A und B bzw. C und D
- Dadurch Verringerung der Last für die einzelnen Switches

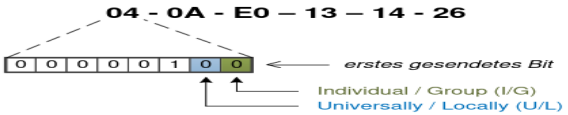
Übertragungsarten

Immer nur ein Sender! Anzahl empfänger unterscheidet sich

Unicast Genau 1 klar definierter Empfänger, Frame trägt dessen Adresse
Multicast Gruppe von Empfängern, Frame trägt Adresse dieser Gruppe
Broadcast An alle Knoten im LAN, Frame trägt Broadcast-Adresse

MAC-Adresse

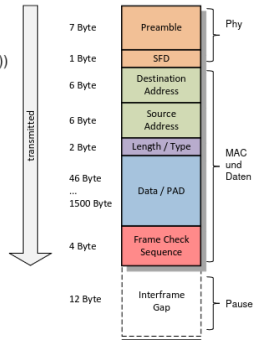
Erste drei Byte Hersteller + Individual/Group & Universally/Locally bits, die letzen drei Bytes Laufnummer durch Hersteller



Ethernet Frame

- Bit Synchronisation durch Präamble, Bytes & Frames durch Start Frame Delimiter (SFD = 1010'1011)
- Frame-Länge 64 .. 1518 Byte (ohne Präable und SFD)
- Bytes nacheinander übertagen, pro Byte LSB zuerst
- Zahlenwerte (Length/Type/...) höchstwertiges Byte zuerst gesendet (Network Byte Order)

- Length/Type (2 Bytes):
  - Fall 1: Länge von DATA ohne PAD (≤ 1500)
  - Fall 2: Typ von DATA = Protokoll der nächsten Schicht (≥ 1536))
    - Beispiel: 0x0800 für IP
- Data / Padding (46 – 1500 Bytes):
  - Enthält die eigentlichen Datenbytes (Nutzinformation)
  - Bei weniger als 46 Bytes Nutzdaten wird mit Padding (PAD) Bytes aufgefüllt
- Frame Check Sequence, FCS (4 Bytes):
  - IEEE CRC-32 Algorithmus
- Interframe Gap, IFG (12 Bytes):
  - "Zwangspause" zwischen aufeinanderfolgenden Frames
  - Ist **NICHT** Teil des Ethernet Frames



Die FCS wird mit IEEE CRC-32 berechnet. Die Hamming-Distanz ist Abhängig von der Frame-Länge: 6 bis 226, danach 5 bis 2974 (Ethernet Limit = 1518)

Kennzahlen zu Ethernet

Overhead 18 Bytes aus DA,SA,L/T,FCS
Frame-Size 64 bis 1518 Bytes
Sendedauer $T_{frame} = \frac{N_{bit}=(\text{FrameSize}+8)*8}{\text{Bitrate}}$
Dauer der Leitungsbelegung $T_{leitung} = \frac{N_{bit}+96}{\text{Bitrate}}$

Network Gear

Kreiren eine Broadcast Domain / LAN, Endgeräte merken davon nichts (transparent) sondern sprechen aus ihrer sicht direkt den Empfänger an.

Repeater/Hubs verstärkt Signal von einem Port und leitet sie weiter auf allen anderen
Bridge/Switch lernt Adressen, leitet Daten weiter an die richtigen ports (Filtering Database)

VLAN (802.1Q)

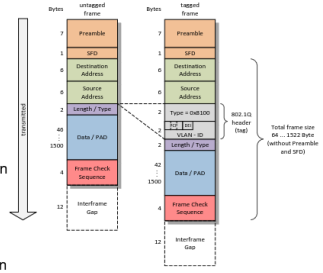
Repräsentiert eigene, virtuelle Broadcastdomain.
Auf einem Switch kann jedem Port nur eine VLAN-ID gegeben werden, da die Zuordnung erst am Switch selbst passiert (muss konfiguriert werden, "managed switch").

Bei VLAN gibt es 2 verschiedene Arten von Links (Verbindung zwischen Geräten).

Access Links nur einem VLAN zugehörig
Trunk Links oft zwischen Switches, gesendete Frames können mehreren VLANs angehören → Frames müssen vom Switch getagged werden

Erweiterung des Ethernet Headers durch einen VLAN-Tag

- Der Type 0x8100 bedeutet, dass das Frame «getagged» ist
- Ein 12 Bit Identifier (VLAN-ID, VID) besagt, welchem VLAN das Frame angehört
- Die 3 Bit des Priority Code Point (PCP) erlauben, das Frame mit einer Priorität zu versenden
- Mit dem Drop Eligibility Indicator (DEI) werden Frames markiert, die bei Überlastsituationen zuerst verworfen werden sollen



Die maximalen Nutzdatenlänge bleibt erhalten, der Ethernet Frame wird 4 Bytes länger

- VLANs können transparent eingesetzt werden

PCP: höhere Prio kann tiefere überholen in der Bridge

(Rapid) Spanning Tree

Ziel: Alle Segmente in einer loop-freien Topologie verbinden
Idee:

1. willkürliche aber eindeutige Root-Bridge wählen
2. von Root aus Baum aufbauen
3. redundante Pfade sperren

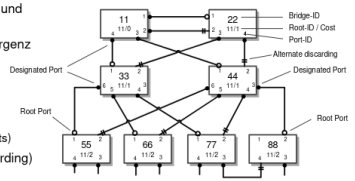
Algorithmus:

1. Initialisierung
   - Alle Ports für Nutzdaten blockiert
   - Annahme: "Ich bin Root"
   - Austausch BPDUs mit Nachbarn

BPDUs (Bridge Protocol Data Units) beinhalten:

Root-ID (aus lokaler Sicht):	8 Byte
Root-Cost (aus lokaler Sicht):	2 Byte
Bridge-ID ("Ich"):	8 Byte
Port-ID (Sende-Port):	2 Byte

2. Aufbau des Spanning Tree
   - Aufdatieren der Info zu Root (kleinste ID) und Pfadkosten zu dieser
   - Austausch aufdatierter BPDUs bis Konvergenz
3. Setzen der Port Roles
   - Freigeben for Nutzdaten von
     - Root-Ports (Empfang der «besten» BPDU)
     - Designated-Ports (Gegenstück zu Root-Ports)
   - Alle anderen Ports bleiben blockiert (Discarding)



Das normale STP konvergiert & reagiert sehr langsam, die Rapid Variante RSTP ist vom Grundkonzept identisch aber reagiert schneller auf Topologieänderungen (∼500ms)

Evolution von Ethernet

Bezeichnung(802.3): [Bitrate in Mbit/s] BASE/BROAD-[Art/Codierung] Bemerkung: früher statt Art/Codierung die max. Segmentlänge in 100m

Beispiele von relevanten in diesem Rahmen

- 10 Mb/s: 10Base-T
- 100 Mb/s: 100Base-TX
- 1000 Mb/s: 1000Base-T

Codierungsarten:

T, TX, T1 Twisted Pair
SR, DR, LR optisch
C Twinax
K Backplane

Autonegotiation

Für Rückwärtskompatibilität, damit Sender & Empfänger wissen was möglich ist.
Umgesetzt mittels Fast Link Pulses **FLP** (seit 100BASE-TX) zwischen den regulären Normal Link Pulses NLP(10BASE-T).

100BASE-TX

Coderiung NRZI + umwandeln von 4 Bits in 5-Bit PCS (4B5B)
Start-of-Stream ähnlich zu 10BASE-T Preamble, bestimmte PCS Zeichen J/K
End-of-Stream markiert Ende des Frame, bestimmte PCS Zeichen T/R
IDLE NEU: die Leitung wird ununterbrochen mit IDLE gefüllt falls keine Nutzdaten, PCS Zeichen I

1000BASE-T

- 5-wertiger Leitungscode PAM-5
- Vollduplex: Alle 4 Aderpaare in beide Richtungen dank Gabelschaltung
- Next-Page bei FLP

10GBASE-T

- 16-wertiger Leitungscode PAM-16
- Effizientere Verteilung der Bits auf Adernpaare
- forward error correction
- neuer Stecker ab CAT7: GG45

IP (Network Layer)

Router/Gateway

Verbinden verschiedene Netze mit potentiell unterschiedlichen Technologien

Lösen 2 Aufgaben:

Routing Aufbau und Update von Routingtabellen
Forwarding Weiterleiten der Pakete anhand Routingtabellen

Routing-Tabelle

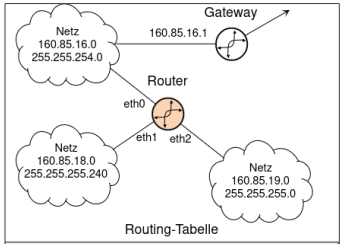
löst: wie Kann ich welches Netz erreichen?

Bei hierarchischem Routing (Router wissen welche Netze an anderen Router sind forwarden entsprechend) kommen oft auch aggregierte Routen vor.
Wenn so z.B. 130.0.0.0/25 und 130.0.128.0/25 beide via den selben Router erreichbar sind wird diese Route aggregiert und als 130.0.0.0/24 zusammengefasst.

Beispiel

- Die Routing-Tabelle sei nach der Länge der Netzmaske sortiert
- Sie wird von oben nach unten durchsucht
- Aus der Zieladresse und Netzmaske wird eine Zielnetzadresse bestimmt
- Verglichen werden nur die Netzadressen
- Der erste Eintrag, der „passt“, wird für die Weiterleitung verwendet (1)
- Der default-Eintrag am Schluss (falls vorhanden) passt immer

(1) Existieren gleichwertige Alternativen, werden zusätzliche Kriterien (z.B. Pfadkosten) verwendet



Routing-Tabelle

Netzadresse	Netzmaske	Port	Gateway
160.85.18.0	255.255.255.240	eth1	(direkt)
160.85.19.0	255.255.255.0	eth2	(direkt)
160.85.16.0	255.255.254.0	eth0	(direkt)
default	0.0.0.0	eth0	160.85.16.1

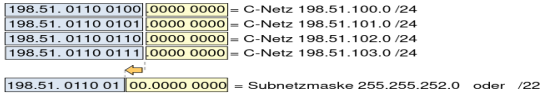
Classful Routing

Ursprünglich wurden IP Adressen in 5 Routing Klassen eingeteilt (Classful Routing). Die ersten vier Adressbits erlauben eine Bestimmung der Klasse. Wird nicht mehr gemacht weil oftmals Adressraum verschwendet wird.

Klasse	Adressbereich	Anzahl Netze	Interfaces pro Netz
A	1.0.0.0 – 127.255.255.255	127	16'777'214
B	128.0.0.0 – 191.255.255.255	16'384	65'534
C	192.0.0.0 – 223.255.255.255	2'097'152	254
D	224.0.0.0 – 239.255.255.555	Multicast Adressen	
E	240.0.0.0 – 255.255.255.255	Reserviert für zukünftige Nutzung	

Subnetting

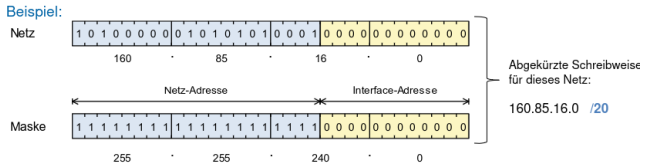
- das Netz in kleinere Subnetze teilen
- funktioniert simplifiziert durch beliebiges erweitern der Netzadresse
- hintereinanderliegende Netze können zusammengefügt werden



Adressierung / IPv4

Adresse eines Host = Netz-Adresse + Interface-Adresse

Subnetzmaske



Netzadresse

- reserviert, darf NICHT für interfaces verwendet werden
- tiefste Adresse im Subnet → alle interface bits 0
- berechnung durch $InterfaceAdresse \wedge Subnetzmaske$

Broadcast-Adresse

- reserviert, darf NICHT für interfaces verwendet werden
- höchste Adresse im Subnet → alle interface bits 1
- berechnung durch $InterfaceAdresse \vee invertierte\,Subnetzmaske$

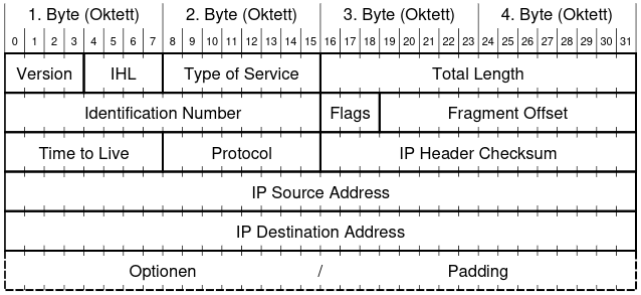
Private Adressen

Die $172.0.0.0/8$ Adressen sind reserviert für Loopback und verlassen den Host nicht. Sie werden an ein emuliertes Loopback-Gerät geschickt dass direkt returned (kein Interface nötig).

Klasse	Netzadresse(n)	Anzahl Netze	Subnetzmaske
A	10.0.0.0	1	255.0.0.0
B	172.16.0.0 – 172.31.0.0	16	255.255.0.0
C	192.168.0.0 – 192.168.255.0	256	255.255.255.0

IPv4 Header

immer minimum 4Byte Blöcke



Version 4 oder 6
IHL Internet Header Length (/ 4 weil immer 4 Byte Blöcke)
- Header ohne optionen = 20 Bytes → IHL = 5
- Maximalwert 15 (4 Bits)

TOS Type of Service, erlaubt prioriesierung

Feld	Position	Funktion	Definition
DSCP	0 – 5	Differentiated Services Codepoints	RFC 2474
ECN	6 – 7	Explicit Congestion Notification (IP Staukontrolle)	RFC 3168

Total Length inclusive Header & Nutzdaten
TTL Time To Live, In Anzahl Hops. Verhindern Loops, jeder Router dekrementiert, bei 0 → Paket verwerfen
Protocol Protokoll der Nutzdaten
1 ICMP Internet Control Message Protocol
6 TCP Transport Control Protocol
17 UDP User Datagramm Protocol
Header Checksum schütz NUR den Header, bei jedem Router neu berechnet(TTL)
Options/Padding variabel, heute selten, Padding für 32 bits
Identification Number identifikation, bleibt für fragmentierte Pakete gleich
Flags 3 Bits, steuert Fragmentierung über einzelne Bits (Aufzählung von links aus)
0. reserviert, immer 0
1. DF, 0/1 → May / Dont Fragment
2. MF, 0/1 → Last / More Fragments

Fragment Offset 13 Bits, steht für Anzahl 8 Byte Blöcke, bestimmt wo im gesamt paket die Daten hingehören

Fragmentierung

IP-Paket maximal 65535 Bytes, aber limitiert durch MTU des Netz.
Problem: spätere Netze haben eventuell tiefere MTU → Fragmentierung.

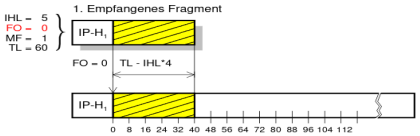
- jedes Fragment erhält seinen eigenen Header
- Identification Number bleibt gleich
- Total Length jeweils die Länge des Paket
- alle Pakete ausser letztes haben MF = 1 in den Flags
- alle Pakete haben die gleiche, vielfaches von 8, maximale Länge (ausser letzes)

Paket mit 112 Bytes Nutzdaten, MTU = 60 Bytes → 3 Fragmente mit 40,40,32 Bytes
- 1. Fragment: TL = 60, Identification = 649, Fragment Offset = 0, MF = 1
- 2. Fragment: TL = 60, Identification = 649, Fragment Offset = 5, MF = 1
- 3. Fragment: TL = 52, Identification = 649, Fragment Offset = 10, MF = 0

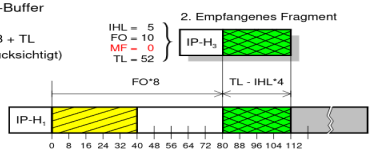
Reassembly

- Fragmente werden erst beim Zielhost zusammengesetzt
- Pakete mit FO = MF = 0 sind "komplett" → brauchen kein Reassembly
- für alle anderen (=Fragmente) wird folgende Datenstruktor alloziert
1. Daten-Buffer für grösstmögliches Paket (64KB)
2. Header-Buffer zur Rekonstruktion des original Headers
3. Timer (ca. 15 Sekunden Timeout)

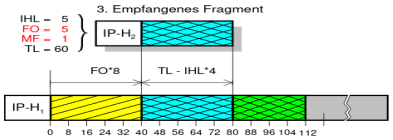
1. Fall: Das vorderste Fragment wird empfangen (FO = 0, MF = 1)
- Header wird in den Buffer kopiert
- Nutzdaten werden am Anfang des Datenbuffers eingefügt
  - Länge der Daten in Bytes beträgt TL – IHL * 4
- Entsprechenden Bits (1 Bit pro 8 Byte) in der Fragment-Block-Bit-Tabelle werden gesetzt



2. Fall: Das hinterste Fragment wird empfangen (MF = 0, FO > 0)
- Nutzdaten werden an Position FO * 8 in den Datenbuffer eingefügt
  - Länge der Daten in Bytes beträgt TL – IHL * 4
- Entsprechenden Bits in der Fragment-Block-Bit-Tabelle werden gesetzt
- Das `Total-Length` Feld im Header-Buffer wird gesetzt
  - Gesamtlänge in Bytes beträgt FO * 8 + TL
  - (Header Länge ist dann ein Mal berücksichtigt)
- Nichtbenötigter Speicherplatz kann freigegeben werden, Gesamtlänge der Daten ist bekannt



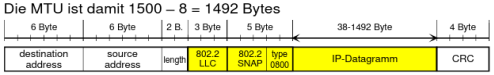
3. Fall: Ein mittleres Fragment wird empfangen (MF = 1, FO > 0)
- Nutzdaten werden an Position FO * 8 in den Datenbuffer eingefügt
  - Länge der Daten in Bytes beträgt TL – IHL * 4



Kapselung

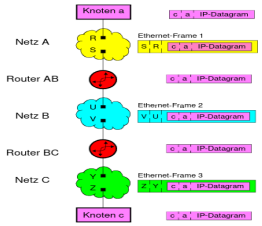
- Ethernet-Encapsulation: das IP-Paket wird als Data des Ethernet Frame übertragen → MTU = 1500
- Type im Ethernet-Frame = 0x0800

Selten wird IEEE 802.2/802.3 Encapsulation verwendet:
- Zusätzlicher Logical Link Control / Subnet Access Protocol (LLC/SNAP) Header vor dem IP Paket eingefügt, z.B. für Flow Control, Error Detection and Retransmission
- Die MTU ist damit 1500 – 8 = 1492 Bytes



Übertragung mit Encapsulation

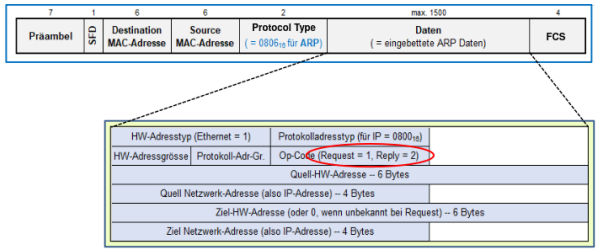
Was geschieht bei der Übertragung genau?
- Knoten **a** sendet ein IP Paket an Knoten **c** → das Paket enthält die IP Adressen von **a** und **c**
- Knoten **a** konsultiert die Routing Tabelle und sieht:
  - dass **c** über den Router **AB** erreicht werden kann, und
  - Kennt nun die IP Adresse von Router **AB**
- Knoten **a** generiert ein Ethernet Frame, welches an die Hardware-adresse **S** von Router **AB** gesendet wird
- Router **AB** empfängt das Ethernet Frame, packt das IP Paket aus und modifiziert den Header (TTL)
- Router **AB** konsultiert die Routing Tabelle und sieht:
  - dass **c** über den Router **BC** erreicht werden kann, und
  - Kennt nun die IP Adresse von Router **BC**
- etc.



Adressauflösung mit Address Resolution Protocol (ARP)

- NICHT teil von IP selbst
- Löst: Host a möchte die Hardware Adresse für die IP Adresse 160.85.20.33
- jeder Host führt lokalen ARP-Cache für bekannte Adressen
- commands:
  - arp -a / ip neigh show
  - arp -d <ipaddr> / ip neigh del
  - arp -s <ipaddr> <hwaddr> / ip neigh add
- Gratuitous ARP (unnötig/unbegründet)
  - z.B. von Windows nach dem Starten
  - nach Adresszuweisung wird ARP request an eigene IP gesendet für Konflikterkennung
  - gratuitous reply für e.g. Cache-Refresh / Broadcast

- ARP-Request und ARP-Response sind je in genau einem Ethernet Frame enthalten mit Type 0806
  - Beim Request ist die Destination Address FF-FF-FF-FF-FF-FF (Broadcast Frame) und die Hardware Address of Target ist 0



Internet Control Message Protocol ICMP

- Fehlermeldungen auf Internet Layer (TTL = 0)
- Test ob anderer Host erreichbar ist (ping)
- Gekaplelt in IP Paketen aber wird zu Network Layer gezählt
- gebräuchliche Typen (in ICMP header)

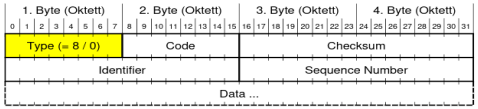
Fehler:
3 Destination Unreachable - e.g. Dont Fragment gesetzt aber MTU zu klein
5 Redirect - Router merkt dass Host direkteren Weg nehmen könnte → Host sendet vervolständigt Routingtabelle und nimmt direkten weg
11 Time Exceeded - Router setzt TTL = 0 oder Timeout für Fragmente
12 Parameter Problem: Bad IP Header - IP Header hat ungültigen Wert

Information:
0 Echo Reply - Host erhält Echo Request → Echo Reply mit gleichen Daten
8 Echo (Request) - Host sendet Echo Request (ping)
13 Timestamp - Wie Echo aber mit Timestamp austausch
14 Timestamp Reply

ICMP Echo / Reply

Test, ob Host "up" ist
- Host antwortet auf Echo Request (Type 8) mit Echo Reply (Type 0), mit gleichem Inhalt wie der Echo Request

Format
- Identifier: Erlaubt Zuordnung von Reply zu welchem Echo gehört
- Sequence Number: Wird innerhalb eines Identifiers jeweils um 1 erhöht
- Data: Beliebige Daten, werden vom Empfänger gespiegelt

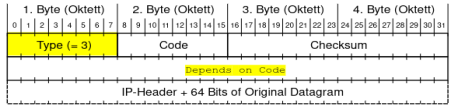


ICMP Destination Unreachable

Vom Router/Zielhost an Absender gesendet, wenn Paket nicht weitergeleitet werden kann

Feld	Wert/Semantik
Type	3
Code	0 = net unreachable, 1 = host unreachable, 2 = protocol unreachable, 3 = port unreachable, 4 = fragmentation needed and DF set, 13 = communication administratively prohibited
Checksum	Prüfsumme über die ICMP Meldung
IP Header + 64 Bits of Original Datagram	Information für den Empfänger zur Zuordnung der Meldung zu einem gesendeten IP Paket

Welche Codes werden von einem Router und welche vom Zielhost generiert?
Welche vermutlich von einer Firewall?

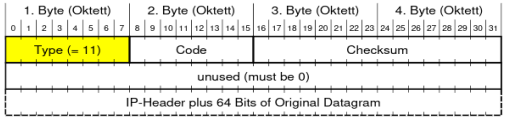


ICMP Time Exceeded

Wird auch für traceroute verwendet, durch inkrementelles erhöhen der TTL können die IP-Adressen der zwischen liegenden Router aus den ICMP Fehlern herausgefunden werden.

Linux command beispiel: `traceroute -n -q1 <ip-addr>`

Time Exceeded wird von einem Router oder Zielhost in diesen zwei Fällen gesendet:
- Router setzt TTL-Feld von 1 auf 0
  → Paket wird verworfen und der Absender informiert (Code = 0)
- Zielhost kann ein fragmentiertes Paket nicht innerhalb nützlicher Zeit reassemblieren
  → Fragmente werden verworfen und der Absender informiert (Code = 1)



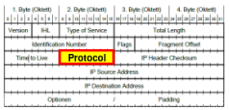
Transport Layer

schliesst Lücke zwischen IP & Applikation
UDP effiziente, schlanke Übertragung (verbindungslos)
TCP zuverlässige Übertragung (verbindungsorientiert)

Kapselung

Applikationdaten werden mittels Transport Layer in ein IP-Paket gekapselt.

Das gekapselte Protokoll wird im IP-Header im Feld Protocol angegeben



Feld 'Protocol' im IP-Header:

Dezimal	TP-Protokoll	Binär
0001	ICMP	0000'0001
0006	TCP	0000'0110
0017	UDP	0001'0001

Port Nummern

- einzelne Applikationen auf den Hosts werden durch Ports identifiziert (de-/multiplexen)
- jedes TCP/UDP Paket enthält source & destination port

Unterteilung der Port-Nummern in 3 Bereiche

- Well-known Ports (Bereich 1 - 1'023) sind durch IANA / IETF **standardisiert**
  - Well-known Ports sind meist zugleich für UDP und TCP reserviert
  - Well-known Ports sollen nicht für andere Anwendungen als die dafür vorgesehenen "missbraucht" werden
- Registered Ports (Bereich 1'024 - 49'151)
  - Reservierter Bereich für herstellerspezifische Applikationen
- Dynamic / Private Ports (Bereich > 49'152 bis 65'536)
  - können nach Belieben verwendet werden

Well-Known und Registered Ports kennt das Betriebssystem

- Windows: c:\\Windows\System32\drivers\etc\services
- Linux/Unix: /etc/services

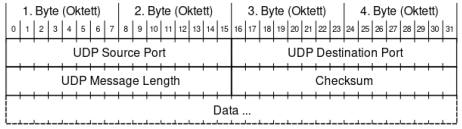
geläufige Well-known Ports

Port	Protocol	Beschreibung
20 / TCP	FTP - Data	File Transfer Protocol – Data
21 / TCP	FTP - Control	File Transfer Protocol – Control
22 / TCP	SSH	Secure shell
23 / TCP	Telnet	Telnet
25 / TCP	SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
43 / TCP	WHOIS	Protokoll zum Abfragen von Internet-Domains und IP-Adressen
53 / UDP/TCP	DNS	Domain Name System
80 / TCP	HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Web)
67 / UDP	BOOTPs / DHCPs	Boot Protocol (Server) / Dynamic Host Configuration Protocol (Server)
68 / UDP	BOOTPc / DHCPc	Boot Protocol (Client) / Dynamic Host Configuration Protocol (Client)
69 / UDP	TFTP	Trivial File Transfer Protocol
110 / TCP	POP3	Post Office Protocol Version 3
143 / TCP	IMAP4	Internet Message Access Protocol
443 / TCP	HTTPS	HTTP over SSL/TLS
465 / TCP	SMTPS	SMTP over SSL/TLS
993 / TCP	IMAP4S	IMAP over SSL/TLS
995 / TCP	POP3S	Post Office Protocol Version 3 over SSL/TLS

UDP - User Datagram Protocol

Verbindungslos Daten werden in UDP Datagramme eingefügt und direkt gesendet
Unzuverlässig keine Massnahmen gegen Verlust oder Vertauschen (gleich wie IP Pakete)

UDP Header



- UDP Source Port (16 Bits, 2 Bytes)
  - Identifiziert sendende Applikation
- UDP Destination Port (16 Bits, 2 Bytes)
  - Identifiziert die Applikation des Empfängers
- UDP Message Length (16 Bits, 2 Bytes)
  - Länge des Datagramms (inkl. Header) in Bytes
  - Maximale Länge eines UDP-Datagramms: 65'535 Bytes
- UDP Checksum (16 Bits)
  - Prüfsumme über einen Pseudo-Header, UDP-Header und Daten
  - Kann Null sein (keine Prüfsumme)
  - Pseudo-Header: IP Source- und Destination Address, Protocol Feld, Länge des Datagramms
    - Damit ist es u.A. möglich, fehlgeleitete Datagramme zu erkennen
    - Dies kann z.B. auf Grund eines Bit-Flip der Destination Address im Memory eines Routers auftreten

TCP - Transmission Control Protocol

Verbindungsorientiert vor Datenaustausch ist Verbindungsaufbau nötig
Zuverlässiger Verbindungsaufbau beide Endpunkte müssen den Verbindungsaufbau aktiv bestätigen
Hohe Zuverlässigkeit kein Datenverlust & richtige Reihenfolge
Vollduplex gleichzeitige, unabhängige Übertragung in beide Richtungen
Punkt zu Punkt immer direkt zwei Applikationen / kein Broad-/Multicast

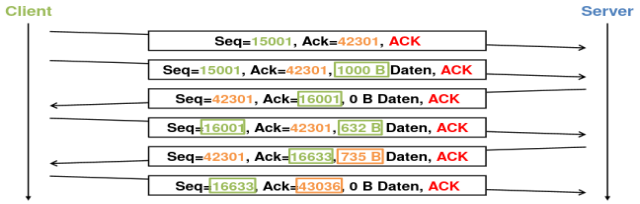
TCP Nachrichtenaustausch

In beide Richtungen:

Sequence Numbers für gesendete Bytes, Position der Datenbytes im Gesamtstrom
- richtige Reihenfolge der Daten
- verlorene Daten erkennen

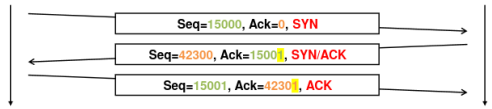
Acknowledge Numbers für empfangene Bytes (von der anderen Seite), Sequence Number der nächsten erwarten Bytes
- Bestätigung korrekt empfangener Daten
- verlorene Daten erkennen

Flags steuern Verbindugsauf-/abbau, signalisieren Gültigkeit von Infos im Header und besondere Situationen
SYN/FIN Verbindungsauf-/abbau
ACK Acknowledge Number im emfpangen Segment ist gültig
PSH Daten sollen schnellstmöglich an Applikation weitergeben werden



TCP Verbindungsaufbau

- **Server** „horcht" (LISTEN) auf einer bestimmten Port Nummer (z.B. 80 für einen HTTP Server)
- **Client** sendet Segment mit SYN=1 und zufälliger initialer **Sequenznummer a (z. Bsp. 15'000)** (ACK=0, weil Acknowledgement Nummer ungültig)
- Server bestätigt Sequenznummer mit **Acknowledement Nummer a+1 (15'001) und ACK=1** und wählt zufällige initiale **Sequenznummer b (z. Bsp. 42'300)** und setzt SYN=1
- Client bestätigt b mit **Acknowledement Nummer b+1 (42'301)**
  - Erstes Byte vom Client zum Server hat Sequenznummer a+1
  - Erstes Byte vom Server zum Client hat Sequenznummer b+1

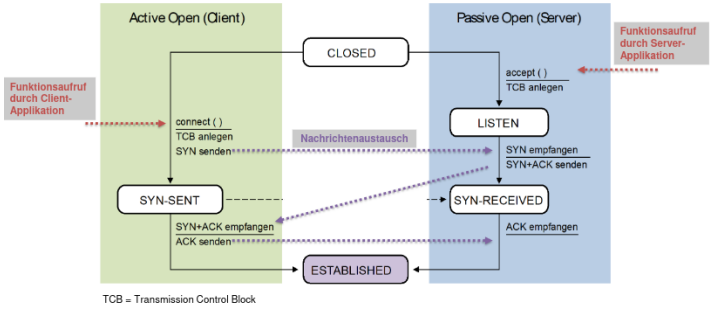


TCP Zustandsdiagramm

- TCP State machine existiert auf Client & Server
- Applikationen ändern state via `listen(); connect(); close()`
- die State Machines signalisieren sich Events mit den SYN, ACK, FIN flags

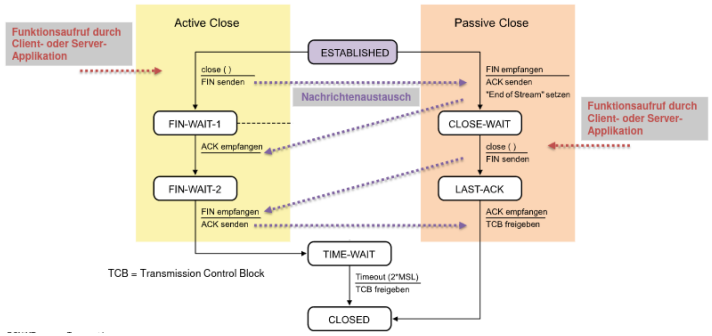
Verbindungsaufbau:

- 3- Wege Handshake



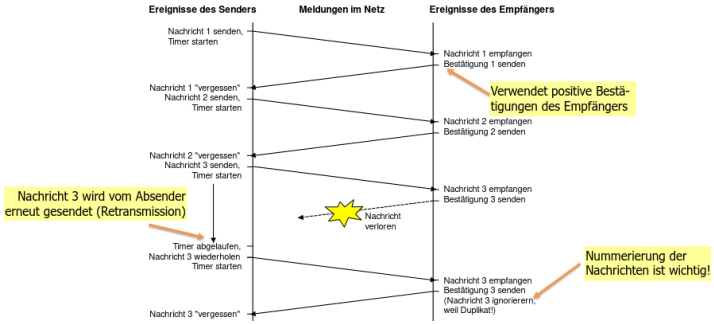
Verbindungsabbau:

- Rollen (Active / Passive Close) beliebig



Verlorene Nachrichten Erkennen / Retransmission-Timeout (RTO)

Stop & Wait:



Vor/Nachteile:

+ keine Überlast beim Empfänger weil Sender zuerst warten muss
- Retransmission-Timeout(RTO) ist hoch variabel anhand von Netzwerkbedingungen. Zur Linderung misst TCP Round-Trip-Time (RTT) und berechnet gewichteten Mittelwert mit Streuung für idealen RTO
- viel Zeit mit warten verbracht

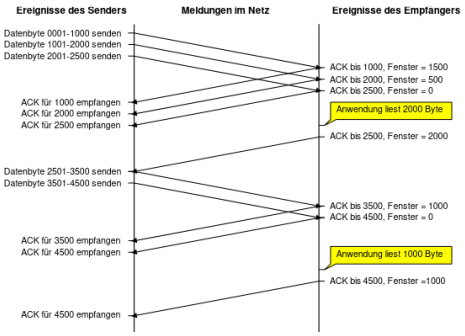
Berechnug des RTO anhand gemessener Round-Trip-Time:

- gewichteter Mittelwert SRTT (Smoothed Round-Trip-Time)
  $SRTT = (1 - \alpha) * SRTT + \alpha * RTT \quad | \quad \alpha = 0.125$
- Streuung RTTVAR, gewichteter Mittelwert der Abweichungen
  $RTTVAR = (1 - \beta) * RTTVAR + \beta * |SRTT - RTT| \quad | \quad \beta = 0.25$
- Retransmission-Timeout RTO
  $RTO = SRTT + 4 * RTTVAR$

TCP Flow-Control / Sliding Window

Weil bei Stop & Wait zuviel Zeit mit Warten/Netzwerklatenz verschwendet wird → mehrere Pakete direkt nacheinander schicken solange diese ins Fenster passen (& nicht durch Congestion Window limitiert).

- beide Seiten haben eigenes Fenster
- Fenstergrösse wird in Anzahl Bytes kommuniziert
- initiale Fenstergrösse wird bei Verbindungsaufbau mittgeteilt
- bei jedem ACK wird der verfügbare Fensterplatz (Bytes) mittgeteilt → Fenstergrösse = 0 heisst keine Daten mehr senden



Annahmen:

- 2'500 Byte Empfangspuffer
  5'000 Bytes Daten

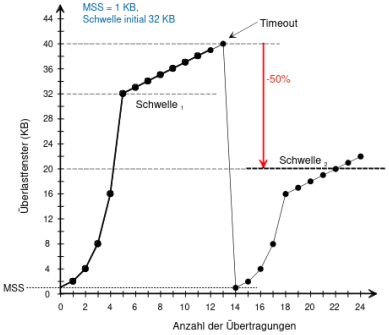
Ablauf:

- Fenstergrösse des Empfängers wird im Window-Feld des TCP-Headers übermittelt
  - Der TCP Header wird in Kürze behandelt
- Wireshark gibt dieses als Advertized Window Size an
- Sender-Applikation benötigt nur einen Aufruf von `listen()` für die gesamten 5'000 Bytes

TCP Congestion Control

Flow-Control schützt nur jeweils einen Empfänger, Congestion Control soll das Netz an sich vor Überlast schützen.

Mögliche Lösung: Slow Start (unter der Annahme, dass Überlast die meisten Fehler verursacht)

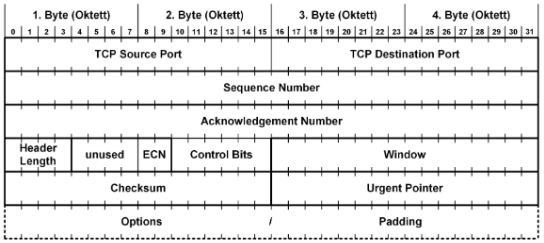


- Ein Überlastfenster (Congestion Window) limitiert zusätzlich die Grösse des Sendefensters
  - Lokale Variable des Senders!
  - Sendelimit: Das Kleinere der beiden Fenster
- Der Sender "testet" die Grenze aus
  - Algorithmen hierzu füllen Hunderte von Fachartikeln
- Original Slow Start Algorithmus
  - Fenstervergrösserung ausgehend von MSS (Maximum Segment Size)
  1. Exponentiell bis Schwelle
  2. Danach linear
  3. **Timeout:** Neudefinition der Schwelle und Neustart bei MSS

Kritikpunkte von Slow Start:

- "Sägezahnkurven" verschiedener Session neigen sich zu synchronisieren
- Bei Wi-Fi sind bitfehler das grösste Problem, nicht Überlast
- effektiv Stop & Wait bei kleinem Congestion Window
- für kurze Sessions immer langsam
- abhängig von Round-Trip-Time

TCP Header



- TCP Header Länge: Mindestens 20 Bytes plus mögliche Optionen (+ max. 40 Bytes)
- Eine TCP-Verbindung besteht aus je einem Datenstrom in jeder Richtung
- Header beinhaltet Information für die "Vorwärtsrichtung" (Sequenznummer etc.) und für die "Rückwärtsrichtung" (Acknowledgement Nummer, Window)