

Sicherungsschicht

TERMINOLOGIE

Knoten: Endsysteme + Router

Links: Übertragungsabschnitt zwischen Knoten

Rahmen: Pakete auf Schicht 2 (IP-Datagramme eingekapselt)

Aufgabe: Übertragung von Datagrammen zwischen benachbarten Knoten über Link

AUFGABEN

Strukturierung des Datenstroms (framing)

~> Datagramm in Rahmen einkapseln

Medienzugangskontrolle bei geteilten Medien

Adressierung mittels MAC-Adressen

Je nach angebotenem Dienst **Fehlererkennung/-behebung** bzw. **Flusskontrolle**

Übertragungsart:

- (Semi-) Broadcast
- Punkt-zu Punkt (Halb-/Vollduplex)

BROADCAST- VS. PUNKT-ZU-PUNKT-LINK

Broadcast-Link:

alle Stationen können alle gesendeten Rahmen sehen (zB WLAN = semi-broadcast)

Punkt-zu-Punkt-Link:

zwei Stationen sind über dedizierten Link verbunden (zB switch-basiertes Ethernet)

PUNKT-ZU-PUNKT-KOMMUNIKATION

Simplex: Übertragung in eine Richtung

Halbduplex: Übertragung in beide Richtungen, nicht zeitgleich

(Voll-) Duplex: Übertragung in beide Richtungen, zeitgleich

SICHERUNGSSCHICHT — IMPLEMENTIERUNG

Sicherungsschicht ist in jedem Knoten (Endsystem, Router, Switch) implementiert (auf Netzadapter oder auf Chip), an Systembus angeschlossen (Kombination von Hardware, Software und Firmware)

SICHERUNGSSCHICHT — KOMMUNIKATION

Sender:

- Datagramm einkapseln
- ggf Felder für Prüfsumme, Flusskontrolle etc hinzufügen

Empfänger:

- Überprüfung hinsichtlich Fehler, Flusskontrolle usw
- Datagramm extrahieren und an Vermittlungsschicht weiterreichen

SICHERUNGSSCHICHT — FEHLERERKENNUNG

Wie Schicht 4: Erkennung/Behebung von Bit- und Paketfehlern

Unterschied Schicht 4:

- zu sendende/empfangende Bitfolge wird bitseriell betrachtet
- Internetprüfsumme basiert auf Wörtern, die bereits im Speicher stehen

Rahmen erhält senderseitig Sicherungssequenz zur Überprüfung auf Empfangsseite

- *frame check sequence* (FCS)
- steht üblicherweise an Rahmenende als Anhang

FEHLERERKENNUNG — CYCLIC REDUNDANCY CHECK (CRC)

Polynom: $0101 \rightarrow 0x^3 + 1x^2 + 0x^1 + 1x^0 = x^2 + 1$

Generatorpolynom: von $g(x)$ generierte Code ist

$$C := \{v(x) \mid \deg(v(x)) < n \wedge g(x) \text{ teilt } v(x)\}$$

Prinzip:

- gleiches Polynom $G(x)$ für Sender und Empfänger
- **Sender:**
 - hängt $\deg(G(x))$ Nullen an Daten
 - berechnet Rest von $M(x)/G(x)$ (m Bit Rahmen $\rightarrow M(x)$)
 - hängt Rest an mit Nullen erweiterte Daten an
- **Empfänger:** Dividiert durch $G(x)$
 - Ergebnis 0: keine Fehler erkannt
 - Ergebnis $\neq 0$: Fehler!

CRC — WICHTIGE GENERATOREN

CRC-12: $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$

CRC-16: $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$

CRC-CCITT: $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

CRC-32: $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

CRC — HARDWAREIMPLEMENTIERUNG

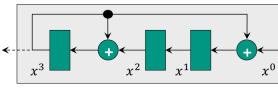
Rückgekoppelte Schieberegister \rightarrow CRC bei Durchschieben berechnet

Prinzip:

- Bitweises Empfangen der Daten, durchlaufen Schieberegister
- Rückkopplung durch **XOR**-Gatter an 1-Stellen des Generators (ohne höchstes Bit)

$$G(x) = 1101$$

$$G(x) = x^3 + x^2 + 1$$



MULTIPLEXING

Problem: Link von mehreren Knoten parallel benutzt

Dimensionen:

- Raum r
- Zeit t
- Frequenz f
- Code c

Wichtig: Schutzabstände erforderlich

MULTIPLEXING — RAUM

Raumeinteilung in Sektoren (zB gerichtete Antennen)

Kupfermultiplex: Zuordnung dedizierter Leitungen

Einsatz: Mobilfunkzellen

MULTIPLEXING — FREQUENZ

Prinzip: verfügbare Bandbreite wird in Frequenzabschnitte unterteilt

Vorteile:

- keine dynamische Koordination nötig
- auch für analoge Signale möglich

Nachteile:

- Bandbreitenverschwendung bei ungleichmäßiger Auslastung
- unflexibel

Einsatz: DSL

MULTIPLEXING — ZEIT

Prinzip: Kanal belegt ganzen Frequenzraum für festgelegte Zeit

Vorteile:

- nur ein Träger gleichzeitig auf Medium
- auch bei großer Teilnehmerzahl hoher Durchsatz

Nachteile:

- genaue Synchronisation nötig

Einsatz: Ethernet

Hinweis: Standard-Multiplexverfahren im Folgenden

MULTIPLEXING — CODE

Prinzip:

- alle Stationen zur gleichen Zeit auf gleicher Frequenz
- **Sender:** verknüpft Signal mit eindeutiger Pseudozufallszahl
- **Empfänger:** kann mithilfe bekannter Pseudozufallszahlfolge + Korrelationsfunktion Originalsignal wiederherstellen

Vorteile:

- keine Frequenzplanung erforderlich
- großer Coderaum im Vergleich zu Frequenzraum
- Vorwärtskorrektur + Verschlüsselung leicht integrierbar

Nachteile:

- höhere Komplexität wegen Signalregenerierung
- alle Signale müssen bei Empfänger gleich stark ankommen

Einsatz: UMTS

MEDIENZUGRIFF

Problem: Unterschiedliche Medien (Kabel + Drahtlos)

Varianten:

- feste Mediumszuteilung (feste Zeitschlitz, Punkt-zu-Punkt-Verbindungen)
- konkurrierende Nutzung \rightarrow Zugriffsorganisation notwendig

ZEITMULTIPLEX — KATEGORIEN

fest

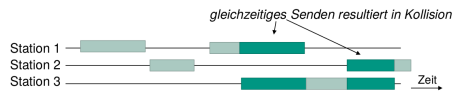
variabel:

- kontrollierter Zugriff
 - zentral
 - dezentral
- zufälliger Zugriff

ZEITMULTIPLEX — ZUFALLSSTRATEGIEN

Aloha:

- verwendbar bei zufälligen, unabhängigen, seltenen Sendewünschen
- gleichzeitiges Senden \leadsto Kollision



Slotted Aloha:

- Verbesserung von Aloha
- Erfordert Knotensynchronisation



CSMA (carrier sense multiple access):

- *Prinzip*: Andere nicht unterbrechen während sie reden
- *listen before talk*: System prüft vor Senden, ob Medium frei ist
- *Medium belegt*: später erneut versuchen
- *Medium frei*: Senden
- *Problem*: mehrere Systeme können quasi gleichzeitig Senden beginnen \leadsto Kollisionen

CSMA/CD (CSMA with collision detection)

- *listen while talk*: Kollisionserkennung durch Abhören während des Sendens
- *Kollision*: Sendungsabbruch, später neu versuchen

ZEITMULTIPLEX — UMSETZUNG ETHERNET

Kollision:

1. Sendungsabbruch
2. Sender sendet *Jamming-Signal*
3. *Backoff-Algorithmus* regelt Sendungswiederholung

Voraussetzungen:

- Senden der Rahmen darf nach Signallaufzeit durch Medium und zurück noch nicht fertig sein
- Mindestlänge für Rahmen (abhängig von Netzausdehnung + Ausbreitungsgeschwindigkeit) erforderlich
- zu kleiner Rahmen: Auffüllen auf Mindestlänge (*padding*)

KOLLISIONSFREIER ZUGRIFF — PRINZIP

Polling: Kontrolle durch zentralen Knoten

- Senderecht sequentiell zugewiesen
- *Nachteil*: koordinierender Knoten nötig, kann ausfallen
- *Einsatz*: Bluetooth

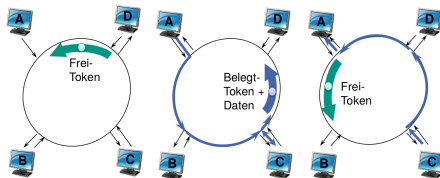
Token Passing: Senderechtsweitergabe von Knoten zu Knoten

- *Nachteil*: Knoten können ausfallen \rightarrow Zugriff blockiert
- *Einsatz*: Token Ring

KOLLISIONSFREIER ZUGRIFF — TOKEN RING

Prinzip:

- Systeme physikalisch Punkt-zu-Punkt-verbunden zu Ring
- Jedes System hat *Vorgänger* und *Nachfolger*
- Senderechtszuteilung durch zirkulierendes Token



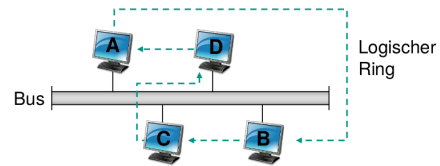
KOLLISIONSFREIER ZUGRIFF — TOKEN BUS

Prinzip:

- Verbindet Vorteile von Ethernet und Token Ring
- Busverkabelung wie bei Ethernet
- *Garantierte Antwortzeiten* durch zirkulierendes Token

Aufbau:

- Alle Stationen physikalisch durch Bus verbunden
- Bildung eines *logischen Rings*



LOKALE NETZE — MAC-ADRESSEN

Theoretisch weltweit eindeutig

Aufbau:

- 24 Bit von IEEE an Hersteller zugewiesen
- 24 Bit von Hersteller durchnummeriert

Funktion: lokal genutzt, um Rahmen von Interface zu benachbartem, physikalisch verbundenem Interface zu übertragen

Format:

- 48 Bit
- stehen im NIC-ROM, können aber auch per Software gesetzt werden
- Darstellung meist hexadezimal (zB 24-2F-EA-76-CC-28)
- Broadcast: FF-FF-FF-FF-FF-FF

LOKALE NETZE — ADDRESS RESOLUTION PROTOCOL (ARP)

Problem: Welche MAC-Adresse hat nächstes System?

Aufgabe: MAC-Adresse zu bekannter IP-Adresse ermitteln

Prinzip: dynamisch Adresszuordnungen lernen

ARP-Cache: kleine Tabelle auf jedem System

- Eintrag IP + MAC + maximale Lebenszeit
- Einträge bei Bedarf gelernt

ARP — ADRESSAUFLÖSUNG

Szenario 1: A sendet Datagramm an B in selbem Subnetz

- *Fall 1:* ARP-Cache von A hat Eintrag für B
 - Paket verschicken
 - Timeout neu setzen
- *Fall 2:* ARP-Cache von A hat Eintrag für B nicht:
 - Broadcast *ARP-Request* mit IP von B
 - Jeder Knoten liest *ARP-Request* — falls eigene IP *ARP-Reply*
 - A trägt Infos in ARP-Cache ein

Szenario 2: A sendet Datagramm an B in anderem Subnetz

1. A sendet *ARP-Request* für Router R
2. A sendet Datagramm an IP von B und MAC von R
3. Router empfängt Datagramm, setzt Ziel-MAC auf B und Sender-MAC auf R
4. Router leitet Datagramm weiter

LOKALE NETZE — ETHERNET

Standard: IEEE 802.3

Medienzuteilung:

- zeitmultiplex, variabel, zufälliger Zugriff
- Verwendung von CSMA/CD (exponentieller Backoff)

Netztopologie: Ursprünglich Bus-, heute Sterntopologie

Varianten:

- *Bezeichnung:* [Datenrate][Baseband/Broadband][Medium]
- *Invariante:* Format Ethernet-Rahmen
- *10Base5:* 10Mbit/s, Baseband, Bustopologie, 10mm Koax
- *10Base2:* 10Mbit/s, Baseband, Bustopologie, 5mm Koax

Ethernet

	10Base5	10Base2	10Base-T
Medium	Koaxialkabel		Twisted Pair
Kodierung		Manchester	
Topologie	Bus		Stern

Fast Ethernet

	100Base-T	100Base-T4	100Base-Tx	100Base-Fx
Medium		Twisted Pair		Glasfaser
Kodierung	Manchester	8B/10T NRZ	4b/5B NRZI & MLT-3	
Topologie			Stern	

Gigabit Ethernet and beyond

	1000Base-SX	1000Base-T	10GBase-SR	10GBase-T
Medium	Glasfaser	Twisted Pair	Glasfaser	Twisted Pair
Kodierung	8B/10B NRZ	PAM-5 & Trellis	66B/68B	PAM-16 & DQ128
Topologie			Stern	

ETHERNET — EXPONENTIELLER BACKOFF

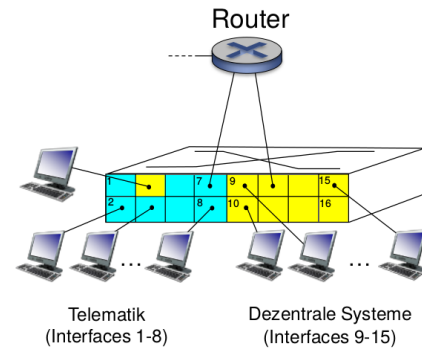
Schema: Station wählt *randomisiert* Anzahl zu wartender Zeitschlitzte nach Schema:

- 1. Kollision: Wartezeit 0/1 Zeitschlitzte
- 2. Kollision: Wartezeit 0/1/2/3 Zeitschlitzte
- i . Kollision: Wartezeit $0/\dots/2^i - 1$ Zeitschlitzte
- $i = 16 \leadsto$ Systemfehler

ETHERNET — ZEITSCHLITZE

Prinzip:

- Kanal wird logisch in Zeitschlitzte fester Länge aufgeteilt
- Dauer = minimale Rahmenlänge \rightarrow Kollisionserkennung vor Zeitschlitz-Ende



ETHERNET — SWITCHES

Prinzip:

- Schicht-2-Netzkopplung
- Trennung von Inter- und Intranet-Verkehr \rightarrow Erhöhung Netzkapazität
- Switches nicht sichtbar für Endsysteme

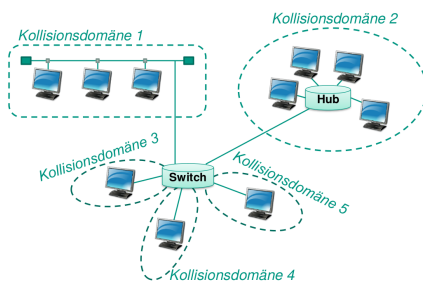
Ziel: Selbstorganisierte Netzkonfiguration mit Switches

Aufgaben:

- Etablierung schleifenfreie Netztopologie (*spanning tree*)
- Etablierung von Wegen zwischen Endsystemen (selbstlernend)

ETHERNET — KOLLISIONSDOMÄNEN

= Netzbereich, auf dem Kollision möglich ist



VIRTUAL LOCAL AREA NETWORK (VLAN)

Idee: Logische Trennung von Datenverkehr auf Ethernet-Ebene
 \leadsto virtuelle Leitung

Sicherheit:

- Trennung in logische Medien ermöglicht gezielte Systemgruppierung
- Bessere Kontrolle über Netzstruktur

Flexibilität:

- Einfache Reorganisation der logischen Medien möglich
- keine Änderungen an physikalischem Medium (Neuverkabelung) nötig

Performance: Broadcast-Last eines Netzes sinkt, wenn physikalisches Medium in mehrere logische aufgeteilt wird

VLAN — INTERFACE-BASIERT

Verkehrsisolation: Rahmen von Interfaces 1-8 können nur Interfaces 1-8 erreichen
 \leadsto Sicherheit, Performance

Dynamische Zuweisung: Interfaces dynamisch anderen VLANs zuordnen
 \leadsto Flexibilität

Weiterleitung zwischen VLANs über Routing (oft über in Switch integrierten Router)

Trunks: Transport von Rahmen zwischen multi-switch-VLANs

- *VLAN-ID:* Jedes VLAN erhält Kennzeichner
- Ethernet-Frames werden mit VLAN-ID getaggt
- Switches entfernen Tagging vor Auslieferung an Endsystem