

## I. Einführung

### WAS IST DAS INTERNET?

#### Komponentensicht

1. *Hosts* – führen Netzwerkanwendungen aus
2. *Kommunikationsmedien* – Kupferkabel, Glasfaser, Funk
3. *Zwischensysteme* – Weiterleitung durch Router und Switches

#### Dienstansicht

- ⇒ Infrastruktur, die Dienste für *verteilte* Anwendungen bereitstellt
- *Kommunikation* (Mail, Messaging, soziale Medien)
  - *Information* (Surfen)
  - *Unterhaltung* (Streaming, Spiele)

**Protokolle** definieren Regel und Formate für Kommunikation

### RAND DES INTERNET

**Endsysteme:** Clients, Server

**Zugangsnetze:** Heimnetz, Mobiles Zugangsnetz, Unternehmensnetz

### KERN DES INTERNET

**Pakete:** Voneinander unabhängige Einheiten für die Weiterleitung – werden durch das Netz zur Zielanwendung geleitet

#### Interne Struktur:

- Zugangs-ISP's verbunden mit Globalen Tier 1 ISP's
- Verknüpft durch peering links und an IXP's (Internet Exchange Point)
- Dazu Content Provider Networks und Regionale Netze

### INTERNET-HISTORIE

**Paradigmenwechsel:** Telefonnetz (Leitungsvermittelt, Zentral)  
⇒ Internet (Paketvermittelt, Dezentral)

**Anfang: ARPAnet** (1969), dann weitere Netze, Protokolle  
Zunächst Universitäten, dann zunehmende Kommerzialisierung

**Entwurfprinzipien:** Minimalism/Autonomy, Best Effort Service, Stateless Routers, Decentralized Control

## II. Anwendungsschicht

Application
Transport
Network
Data Link
Physical

### HISTORIE

**70er/80er:** Textbasierte Anwendungen (EMail, Remote Access)

**90er:** World Wide Web, Instant Messaging, P2P-Filesharing

**seit 2000:** steigende Vielfalt + Allgegenwärtigkeit: (⇒ Kritische Infrastruktur)  
Voice over IP, Streaming, Gaming, Soziale Netzwerke, Smartphones

### SCHICHTENMODELL

**Prozess:** Programm, das im Endsystem (Anwendungsschicht) abläuft

**Nachricht:** Ausgetauscht zwischen Prozessen auf *unterschiedlichen* Endsystemen  
Kommunikation in Schichten organisiert

**Anwendungsschicht:** oberste Schicht

- enthält Anwendungsprotokolle
- Anwendung kümmert sich nicht um Datentransport

**Datentransport:** unter Anwendungsschicht liegende Schichten

- Intern für Anwendung transparent
- Aber: Anwendung merkt Verzögerungen (Latenzen)

### VERZÖGERUNG (LATENZ)

**Ausbreitungsverzögerung**  $t_a = \frac{d}{v}$

Zeitspanne zwischen Absenden eines Signals und dessen Eintreffen am anderen Ende des Mediums

Abhängig von: Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ , Länge des Mediums  $d$

**Sendezeit**  $t_s = \frac{X}{r}$

Zeit zwischen Beginn und Abschluss der Sendung

Abhängig von: Datenmenge  $X$ , Datenrate (Durchsatz) des Mediums  $r$

**Achtung:** Nach Sendungsabschluss sind die Daten noch nicht beim Empfänger!

↪ Ausbreitungsverzögerung  $t_a$

#### Verzögerung im Router

- *Pufferung* der Daten in Warteschlange
- *Verarbeitung* (Fehlerüberprüfung usw.)

### PROTOKOLLSTACK

**Application:** SMTP, HTTP, XMPP,...

**Transport:** TCP, UDP

**Network:** IP

**Data Link:** Ethernet, 802.11 (WiFi)

**Physical:** Bits auf Medium

### SOCKET UND INTERFACE

*Programmierschnittstelle für verteilte Anwendungen*

Von OS bereitgestellte API

Anwendungsprozess sendet/empfangt Nachrichten zum/vom Socket

**Portnummern:** (De-) Multiplexing auf Endsystemen

Viele Prozesse auf einem Endsystem kommunizieren gleichzeitig über Netzwerk

↪ eindeutige Socket-Identifikation über Portnummer

### CLIENT-SERVER-ANWENDUNGEN

**Server:** Ständig in Betrieb, permanente IP-Adresse, häufig in Datenzentren

**Clients:** Kommunizieren mit Server, *nicht* direkt miteinander, dynamische IP-Adresse

### PEER-TO-PEER-ANWENDUNGEN

Endsysteme kommunizieren direkt miteinander

- Fordern Dienste von anderen Peers an und stellen selbst Dienste bereit
- Nicht permanent verbunden, wechseln dynamisch IP-Adressen
- ↪ komplexes Management

**Selbst-skalierend:** Neue Peers erhöhen Kapazität, fordern aber auch Dienste an

### WEB UND HTTP — WEB-DOKUMENTE

Webseiten bestehen aus Basis-HTML-Datei und anderen Objekten (.js, .png,...)

Jedes Objekt über URL (*uniform resource locator*) referenzierbar

### HTTP (HYPERTEXT TRANSFER PROTOCOL)

ASCII-basiertes Transfereprotokoll der Anwendungsschicht im Web

Basiert auf Client/Server-Modell

*Client (Request):* Browser, der Web-Objekte anfordert

*Server (Response):* Sendet über HTTP angeforderte Objekte

Zustandslos: Jeder Request individuell, keine Zustandsinformation auf dem Server

Kommunikation per TCP:

1. Client initiiert Verbindungsaufbau (Standard-Port: 80)
2. Server akzeptiert Verbindung
3. Austausch von HTTP-Nachrichten
4. Abbau der TCP-Verbindung

HTTP-Anfragen können verschiedene **Methoden** nutzen:

**GET:** Ressource von Server zu Client übertragen (z.B. normale Webseite)

**POST:** Daten zu Ressource übertragen (z.B. Web-Formular)

**PUT** — neue Ressource anlegen

**DELETE** — Ressource löschen

**HEAD** — wie GET, aber nur HTTP-Header übertragen

**Status-Codes:** Verarbeitungsindikator (Erfolg/Fehlslag + Gründe)

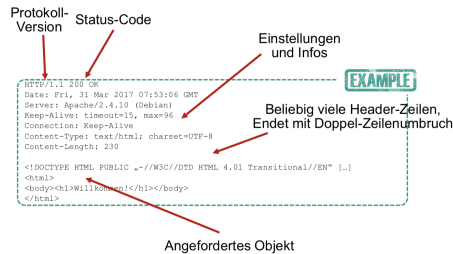
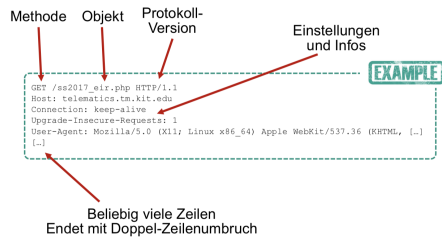
**200:** Erfolg; Antwort ist in dieser Nachricht

**301:** Angefragtes Objekt wurde verschoben (neue URL in Nachricht spezifiziert)

**400:** Server hat Anfrage nicht verstanden

**404:** Angefordertes Objekt existiert nicht

**505:** HTTP-Version nicht unterstützt



## HTTP — VERBINDUNGEN

**Round Trip Time (RTT):** Zeit, die Paket von Sender zu Empfänger und zurück benötigt

**Non-persistent HTTP:** Höchstens ein Objekt über eine TCP-Verbindung, danach geschlossen ~> Mehrere Objekte erfordern mehrere TCP-Verbindungen (evtl. parallel)

**Antwortzeit:**  $2 * RTT + t_s$  pro Objekt

- eine RTT für Verbindungsaufbau
- eine RTT für HTTP-Anfrage und erste Antwortbytes
- Zeit  $t_s$  für Senden des Objekts

**Persistent HTTP:** Mehrere Objekte über eine TCP-Verbindung

**Antwortzeit:** Nur eine RTT für nachfolgende Objekte

## HTTP — COOKIES

*Speichert Nutzer-Server-Zustand*

~> Server kann Inhalt abhängig von Nutzeridentifikation bereitstellen

**Komponenten:**

- Cookie-Information in HTTP-Response-Nachricht (*Set-Cookie*)
- Cookie-Information wird in nachfolgenden HTTP-Requests genutzt
- Datei mit Cookies wird auf Nutzer-Endsystem vom Browser verwaltet
- Datenbank bei Webseite ~> Server muss Cookies richtig interpretieren können

**Privatsphäre:** Webseiten unterscheiden Nutzer durch Cookies

~> Werbeanbieter können Nutzer über viele Seiten tracken, viel über Nutzer lernen

## MAIL — KOMPONENTEN

**User Agent (UA):** Lesen, senden, weiterleiten

**Mailserver:** User-Mailboxen, *mail transfer agent (MTA)* / *mail delivery agent (MDA)*

## MAIL — SMTP (SIMPLE MAIL TRANSFER PROTOCOL)

Transfer von Mails zwischen Mailservern sowie vom User Agent zum Mailserver  
Drei Phasen:

1. Handshake
2. Nachrichtenübermittlung (E-Mail aus Header + Body)
3. Abschluss

Client/Server-Model, Command/Response-Interaktionen

- Ähnlich Request/Response bei HTTP, nutzt ebenfalls TCP (Port 25)
- Kommandos: ASCII-Text
- Antwort: Statuscode + Nachricht

## MAIL — MIME (MULTIPURPOSE INTERNET MAIL EXTENSIONS)

**Problem:** SMTP kann nur 7-Bit ASCII-Texte versenden, keine Dateien

**MIME:** erweitert Kopfteil einer Nachricht um Formatinformation

*Content-Type:* Definiert Typ des E-Mail-Inhalts; *Content-Transfer-Encoding*

## MAIL — POSTFACH-ABFRAGE

**POP3** (*post office protocol 3*): Verwaltung im UA, *keine* Synchronisation

Client holt am Mailserver gespeicherte Nachrichten ab

nur einfache Funktionalität (*list, retr, dele*)

**IMAP** (*interactive mail access protocol*): Zentrale Verwaltung auf Mailserver

Erweiterte Kommandos (Ordner, Filter)

**Web-Mail**

## WHATSAPP — XMPP (EXTENSIBLE MESSAGING AND PRESENCE PROTOCOL)

*Echtzeit-XML-Streaming-Protokoll*

Dezentral, ähnlich wie E-Mail

WhatsApp nutzt einen Zentralen Server und proprietäre Variante des Protokolls

**Clients:** zu ihrem jeweiligen Server verbunden

**Server:** verbinden sich untereinander zur Nachrichtenübermittlung

**Nachricht:** XML-Dokumente (erweiterbares Format)

**Adressformat:** Server + Username, evtl. Client (z.B. `alice@jabber.org/laptop`)

## DNS (DOMAIN NAME SYSTEM)

**Ziel:** Verwendung von Namen statt IP-Adressen

**Aufgabe:** Zuordnung IP-Adresse ↔ Name (Subdomäne . Domäne . Top-Level-Domain)

**Funktionalitäten:**

- *Registrierung* von Namen + IP-Adressen
- *Auflösung* von Namen in IP-Adressen
- *Host Alias:* Löse einfacher zu merkende Alias-Namen in kanonische Namen auf
- *Mail Server Alias:* Liefere E-Mail-Server zu einer Domain
- *Lastverteilung:* Mehrere IPs von redundanten Servern in zufälliger Reihenfolge

Protokoll der Anwendungsschicht, über UDP (Port 53) realisiert, Client-Server-Modell  
Basisdienst, keine eigentliche Anwendung: Komplexität am Rand des Netzes

## DNS — AUFBAU

Probleme mit zentralem Server: Singuläre Fehlerquelle, Verkehrsaufkommen, geografische Entfernung, Verwaltungsaufwand, Abhängigkeit

Verteilte Datenbank in einer **Hierarchie** von Name-Servern (DNS-Servern)

**Lokaler Name-Server:** Erste Anfrage immer zu lokalem Server, Antwort aus eigener

Zuordnungsdatenbank, dem Cache oder nach Befragung anderer DNS-Server

**Autoritativer Name-Server:** Enthält autoritative Abbildungen, jeder Host ist bei einem registriert (in seinem Netz)

**Top-Level Domain (TLD) Server**

**Root-Server:** Enthalten nur Einträge für TLDs, fixe IP-Adressen, 13 Root-Server-Cluster

## DNS — ANFRAGEN

**Rekursiv:** kennt angefragter Server Antwort nicht, fragt dieser weitere Server, bis er Antwort zurückliefern kann

**Iterativ:** kennt ein Server die Antwort nicht, verweist er den *Client* an andere Server

**Üblich:** Client fragt lokalen Name-Server rekursiv, dieser dann iterativ

## DNS — RESOURCE RECORDS (RR)

DNS ordnet Domänen zu Einträgen zu

**A / AAAA** (Address): Abbildung Name auf IPv4/IPv6-Adresse

**MX** (Mail Exchange): Mailserver einer Domäne (IP-Adresse)

**NS** (Name Server): Nameserver einer Domäne (Hostname)

**CNAME** (Canonical Name): Alias-Namen für Rechner/Domänen (Domain)

**PTR** (Pointer): Abbildung IP-Adresse auf Name (Domain)

## CONTENT DELIVERY NETWORKS (CDN)

**Beispiel: Videostreaming** (hohe Datenrate, Datenqualität)

**DASH (Dynamic, Adaptive Streaming over HTTP):** Video aufgeteilt in Chunks, jeweils in mehreren Qualitäten (Bitraten) verfügbar, URLs und Infos in Manifest-Datei

Client wählt adaptiv bestmögliche Bitrate für jeden Chunk

**Content Distribution:** Content zu hunderttausend Nutzern bringen

Mega-Server: Skaliert nicht (Single Point of Failure, Netzwerküberlastung, Entfernung)

**CDN:** Content auf geographisch verteilte Server kopieren

Third-Party CDNs (z.B. Akamai, Limelight), Private CDNs (z.B. Google für YouTube)

Zwei Strategien:

- Enter Deep: Viele kleine Cluster in Zugangsnetzen nahe beim Nutzer
- Bring Home: Wenige große Cluster in wichtigen IXPs für geringeren Verteilungs- und Wartungsaufwand

DNS-Manipulation: Autoritativer DNS-Server des CDN passt Antwort an IP-Adresse des anfragenden lokalen DNS-Server an, wählt einen nahe gelegenen CDN-Server aus

### III. Transportschicht



#### ZIELE UND PRINZIPIEN

Kommunikation zwischen Prozessen

Verbergen von Transportdetails vor höheren Schichten

Bereitstellung von Transportdiensten

- logische **Nutzer-zu-Nutzer-Kommunikation** (Anwendungen)
- Vermittlungsschicht: Ende-zu-Ende-Kommunikation (Endsysteme)

Transportprotokoll läuft auf Endsystemen

**Sender:**

- Segmentieren von Anwendungsnachrichten
- Weiterleiten an Vermittlungsschicht

**Empfänger:**

- Reassemblieren der Segmente in Nachrichten
- Weiterleiten an Anwendungsschicht

#### PROTOKOLLE

**UDP** (user datagram protocol):

bietet verbindungslosen, **unzuverlässigen** Transportdienst

**TCP** (transmission control protocol):

bietet verbindungsorientierten, **zuverlässigen** Transportdienst

**Unzuverlässig:** keine Fehlermaßnahmen

→ unklar, wie viel der gesendeten Daten korrekt ankommt

**Zuverlässig:** Fehlermaßnahmen garantieren

- Korrektheit, Vollständigkeit, Reihenfolge
- keine Duplikate, keine Phantom-Pakete

#### (DE-)MULTIPLEXING — PORTS

Ausliefern von Segmenten an den korrekten Socket (nutze Transportheader)

Port = Adresse der *Transportschicht* (Kennzeichnung der Prozesse)

Unstrukturierte Nummer (16 Bit), 0 bis 65535

**Well known ports:** viele Portnummern unter 1024 für häufig benutzte Anwendungen reserviert (Telnet, HTTP, SMTP, FTP, ...)

Eindeutige Adressierung eines Prozesses: "IP-Adresse : Port" (z.B. 129.13.41.1:80)

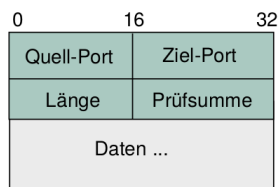
#### UDP (USER DATAGRAM PROTOCOL)

Sehr einfaches Transportprotokoll mit sehr geringem Overhead (8 Byte)

**Eigenschaften:**

- (De-) Multiplexen von Segmenten für Prozesse
- Prüfsumme für Bitfehler
- best effort: keine Zusagen über Auslieferung bei Empfänger
- verbindungslos
- keine Verbindungsaufbauphase: sofortiges Senden → keine weitere Verzögerung
- kein Verbindungszustand: keine Verbindungsinformationen im Endsystem
- skaliert z.B. für Server besser
- Unreguliertes Senden: kann Daten so schnell senden wie von Anwendung geliefert und von Netz abgenommen

**Verwendung:** DNS, Multimedia (VoIP)



#### BITFEHLER

Verfälschung von Bits während dem Datentransport

**Ursachen:** Dämpfung, Übersprechen, Synchronisationsverlust, ...

**Einzelbitfehler:** ein einzelnes Bit fehlerhaft

**Bündelfehler:** mehrere direkt aufeinanderfolgende Bits fehlerhaft

**Bitfehlerrate:** Maß für Fehlerhäufigkeit

$$\text{Bitfehlerrate} = \frac{\text{Summe gestörter Bits}}{\text{Summe übertragener Bits}}$$

#### BITFEHLER — ERKENNUNG/KORREKTUR

**Fehlererkennung** (error detecting code, EDC)

**Fehlerkorrektur** (forward error correction, FEC)

Hinzufügen von Redundanz (Paritätsbit ( $d_{\min} = 2$ ), Prüfsumme, ...)

→ Ausreichend stark unterscheidende Codewörter

**Hamming-Abstand**  $d_{i,j}$ : Anzahl Stellen, an denen sich Codewörter unterscheiden

Hamming-Abstand des Codes  $d_{\min}$ : Minimaler Abstand zwischen Codewörtern

Erkennen von bis zu  $d_{\min} - 1$  Bitfehlern

Korrigieren von bis zu  $\lfloor \frac{d_{\min}-1}{2} \rfloor$  Bitfehlern

Kontrollmatrix  $H$ , für übertragenes Wort  $w$  gilt:

Syndrom  $S = w \cdot H^T = 0$ , falls Übertragung fehlerfrei ( $w$  ist Codewort)

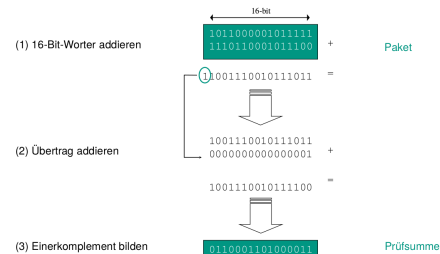
Ansonsten kann das Syndrom die Position des Bitfehlers angeben

#### BITFEHLER — INTERNET-PRÜFSUMME (UDP, TCP, IP)

**Prinzip:** Aufaddieren aller übertragenen Wörter (16 Bit, als Integer interpretiert), evtl.

Übertrag addieren, bitweise negieren (Einerkomplement)

**Nachteil:** Falsche Reihenfolge kann nicht erkannt werden



#### PAKETFEHLER

Verlust / Duplizierung von Paketen

Phantom-Pakete

Reihenfolgenvertauschung

**Ursachen:**

- Zwischensystemüberlastung
- Unterschiedliche Wege durch Netz
- Verfrühte Datenwiederholung, ...

#### PAKETFEHLER — ERKENNUNG/KORREKTUR

**Sequenznummern** (sequence number):

- Pakete werden durchnummeriert
- Empfänger kann Vollständigkeit, Reihenfolge, Duplikate feststellen

**Quittungen** (acknowledgements)

- Empfänger informiert Sender, ob Paket angekommen ist
- positiv: Daten erhalten (ACK) / negativ: Daten nicht erhalten (NACK)
- selektiv: Einzelnes Paket / kumulativ: Paketmenge (bis zu einer Sequenznummer)

**Zeitgeber** (timer)

- Sender merkt nicht, wenn ein Paket nicht angekommen ist
- Nach zeitlicher Obergrenze wird vermutet, dass Paket nicht angekommen ist
- Sendewiederholung (retransmissions)

**Automatic Repeat Request (ARQ)**

Grundlegende Sendewiederholungsvariante:

Sender erhält positive Quittungen, kann Sendewiederholungen ausführen

#### ARQ — STOP-AND-WAIT

**Prinzip:** Sender wartet auf Quittung nach jedem gesendeten Paket

- Erst nach Quittungserhalt wird nächstes Paket gesendet

- Keine Quittung nach Wartezeit (Zeitgeber) → Sendewiederholung

**Sequenznummern:** 1 Bit reicht (Empfänger kann nur Paket doppelt erhalten)

Sehr einfaches ARQ-Verfahren (z.B. im WLAN)

**Auslastung:**  $U = \frac{1}{1+2a}$  (mit  $a = \frac{t_a}{t_s}$ ) ( $t_{Ges} = t_s + 2t_a$ )

$a = \frac{t_a}{t_s}$  ist Verhältnis der Länge des Mediums in Bit zur Länge der Dateneinheit

Bandbreitenverzögerungsprodukt  $\frac{m}{v} r$

Länge des Mediums in Bit

(Länge  $m$ , Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ , Datenrate  $r$ )

## ARQ — GO-BACK-N

**Ziel:** Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Stop-and-Wait erhöhen

**Prinzip:** Sender sendet mehrere Pakete bis Quittungspflicht

- Begrenzte Anzahl (**Fenster**, *window*) an nicht quittierten Paketen
- Quittierung durch kumulative Quittungen

**Fehlerfall:**

- Empfänger empfängt fehlerhaftes Paket, verwirft alle nachfolgenden Pakete
- Sender wiederholt bei Ablauf des Zeitgebers alle nicht quittierten Pakete

$$\text{Auslastung: } U = \begin{cases} 1 & W \geq 1 + 2a \\ \frac{W}{1+2a} & \text{sonst} \end{cases}$$

## ARQ — SELECTIVE REPEAT

**Ziel:** Datenaufkommen von Go-Back-N reduzieren

**Prinzip:** Wie Go-Back-N, Empfänger quittiert selektiv

**Fehlerfall:** Empfänger puffert und bestätigt nachfolgende, korrekte Pakete

- Sender wiederholt nur nicht korrekt empfangene Pakete

**Selective Repeat:** Fehlerhaftes Paket wird nicht bestätigt, Sender wartet auf Timeout

**Selective Reject:** Empfänger versendet für fehlerhaftes Paket negative Quittung

- Sender wiederholt sofort und wartet nicht auf Timeout

## PAKETFEHLER — VORWÄRTSFEHLERKORREKTUR

**Ziel:** Empfänger muss nur drei von vier Paketen korrekt empfangen um fehlendes Paket rekonstruieren zu können

**Prinzip:** XOR-Verknüpfung der drei Pakete → fehlendes Paket

## FLUSSKONTROLLE

**Problem:** Überlastung von Empfänger durch Sender → Datenverlust

Sender muss Größe des Empfangspuffers berücksichtigen

**Anforderungen:** einfach, fair, stabil, möglichst wenig Netzressourcen nutzen

## FLUSSKONTROLLE — HALT-UND-WEITER

**Prinzip:** Empfänger sendet **halt** und **weiter**-Signal

**Bewertung:**

- nur auf Vollduplex verwendbar
- nicht effektiv bei hohen Verzögerungen
- Probleme bei Verlust der **halt**-Meldung

**Beispiel:** Fast-/Gigabit-Ethernet

## FLUSSKONTROLLE — STOP-AND-WAIT

**Prinzip:** Empfänger sendet Quittung erst, wenn er wieder empfangen kann

Sender wird durch Zurückhalten gebremst

**Problem:** Sender kann nicht zwischen Datenverlust und Überlastung unterscheiden

## FLUSSKONTROLLE — KREDITBASIERT

**Prinzip:**

- Sender kann höchstens  $n$  Pakete unquittiert senden
- $n$  = Pufferkapazität des Senders ⇒ **Sendekredit**
- Alternativbezeichnung: Fenster (*sliding window*)
- Fenster wird durch korrekte positive Quittung weitergeschaltet
- Empfänger kann Kredit bestimmen (z.B. in TCP)

## TCP — PRINZIP

**Zuverlässiger**, verbindungsorientierter Transportdienst zwischen Anwendungen

Erhält **Bytestrom** von Anwendung (über **Socket**), übergibt **TCP-Segmente** an IP

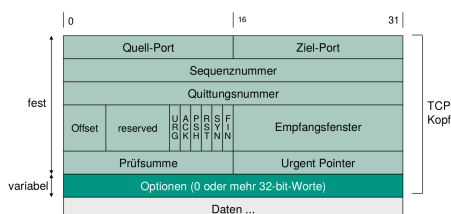
Wann wird ein TCP-Segment erzeugt und versendet?

- MSS (*maximum segment size*): Anwendungsdatenlänge (z.B. 1460 Byte)
- Push (**PSH** in TCP-Segmentskopf): Sender verlangt sofortiges Versenden der Daten
- Zeitgeber: Nach Zeitintervall der Inaktivität vorhandene Daten senden

**Fehlerkontrolle:** Sequenznr., Prüfsumme, Quittierungen, Sendewiederholungen

**Sequenznummern:** pro Byte, nicht pro Segment (erstes Byte in Segment, initiale Sequenznummer von Endsystem zufällig gewählt)

**Quittungen:** positive kumulative Quittungen (Sequenznummer des nächsten Bytes, das erwartet wird), mit Datenssegment versendet (**piggybacked** im Header)



## TCP — FELDER

**Quell-/Ziel-Port:** Identifizieren Verbindungsendpunkte

**Sequenznummer:** gemessen in Byte, nicht pro Segment

**Quittung:** nächste von Empfänger erwartete Sequenznummer

**Offset:** Anzahl 32 Bit-Wörter in TCP-Kopf

**URG:** 1, falls *urgent pointer* verwendet wird (idR leer)

**SYN:** Bei Verbindungsaufbau *connection request* oder *connection confirmation*

**ACK:** Gültigkeit des Quittungsfeldes; unterscheidet bei gesetztem SYN-Bit zwischen Request und Confirmation;

**FIN:** Sender möchte nichts mehr senden

**RST:** Verbindung zurücksetzen

**PSH:** übergebene Daten sollen sofort weitergeleitet werden (idR leer)

**Empfangsfenster:** Flusskontrolle

**Prüfsumme:** Prüfsumme über TCP-Kopf, Daten und Pseudoheader

**Urgent-Zeiger:** relativer Zeiger auf wichtige Daten

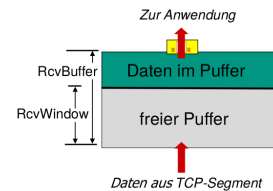
**Optionen-Feld:** Optionen variabler Länge ( $n \cdot 32$  Bit)

## TCP — FLUSSKONTROLLE

**Ziel:** Empfänger nicht überlasten

**Prinzip:**

- **Empfänger:** reserviert Pufferplatz pro Verbindung (explizite Kreditvergabe)
- **RcvBuffer:** gesamter Pufferplatz (default 4096 Byte)
- **RcvWindow:** freier Pufferplatz (Empfangsfenster) in TCP-Header mitsenden
- Sender sendet nicht mehr unbestätigt als in **RcvWindow** passt



## TCP — VERBINDUNGEN

**Verbindungslos (UDP):** Daten werden ohne vorherigen Handshake gesendet

- **Vorteil:** schnelle Datenversendung möglich

- **Nachteil:** kein Feedback, keine Bestätigung

**Verbindungsorientiert (TCP):** Expliziter Verbindungsaufbau/-abbau

- **Vorteil:** Kommunikationsparameter können ausgehandelt werden

- **Nachteile:** Verzögerter Datenaustausch, Overhead ggf größer als Daten

Probleme mit 2-Wege-Handshake: Verzögerungen + Wiederholte Nachrichten können zu halboffenen Verbindungen führen

**3-Wege-Handshake:** SYN, SYN/ACK, ACK (letztes ACK kann Nutzdaten enthalten)

**Abbau:** Richtungen unabhängig jeweils durch FIN, ACK schließen, danach Warten vor vollständigem löschen (falls Wiederholungen auftreten)

Abbruch: RST, Verbindung wird unmittelbar geschlossen

## TCP — STAUKONTROLLE

**Ziel:** Netz nicht überlasten (Pufferüberläufe in Routern vermeiden)

**Staukontrollfenster** (*congestion window*, **Cwnd**) beschränkt maximale Datenmenge:

$$\text{LastByteSent} - \text{LastByteAcked} \leq \min\{\text{Cwnd}, \text{RcvWindow}\}$$

**Stauerkennung:** Vermutung einer Stausituation bei ausbleibender Quittung

**Staubehaltung:** Reduktion von **Cwnd**

Langsames Erhöhen von **Cwnd** → herantasten an Netzkapazität

**Start:** **Cwnd** = 1 MSS (*maximum segment size*)

**Slow-Start**, falls **Cwnd** ≤ **SSTresh** & Quittungen rechtzeitig da

- Exponentielles Erhöhen **Cwnd** (**Cwnd** += 1 bei jeder empfangenen Quittung)

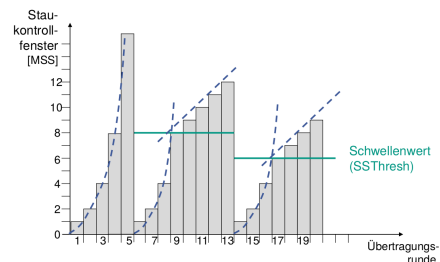
**Congestion Avoidance**, falls **Cwnd** > **SSTresh** & Quittungen rechtzeitig da

- Lineares Erhöhen **Cwnd** (**Cwnd** +=  $\frac{1}{\text{Cwnd}}$  bei jeder empfangenen Quittung)

**Congestion**, falls Quittung nicht rechtzeitig da: Stau vermutet

- **SSTresh** =  $\max(\frac{\text{FlightSize}}{2}, 2 * \text{MSS})$  (FlightSize = unquitierte, gesendete Daten)

- **Cwnd** zurücksetzen (neue Slow-Start-Phase): **Cwnd** = 1 MSS



## IV. Vermittlung

### LEITUNGSVERMITTLUNG

Verbindung ist *durchgehender Kanal* mit konstanter Bandbreite für exklusive Nutzung

**Multiplexing:** *starrs Multiplexing* möglich

- *Frequenzmultiplex:* Feste Zuweisung eines Frequenzabschnitts im Frequenzband
- *Zeitmultiplex:* Feste Zuweisung eines Zeitschlitz (*time slot*) in jedem Frame

**Eigenschaften:**

- Aufbau eines durchgehenden Übertragungskanal zwischen Endsystemen
- Zwischensysteme: Zustandshaltung statt Adressinformation nötig
- zugesicherte, feste Datenrate  $\leadsto$  ungenutzte Ressourcen bei Nichtverwendung
- Übertragungsverzögerungen nur physikalisch bedingt
- $\leadsto$  keine Schwankungen durch Puffer
- Reihenfolgetreue Bitfolgenübertragung

**Einsatzgebiete:** Telefonnetze, GSM

### PAKETVERMITTLUNG

**Prinzip:** Weiterleitung anhand von Kontrollinformation in Paket

(Zieladresse in Datagrammen, lokale Kennung bei virtuellen Verbindungen)

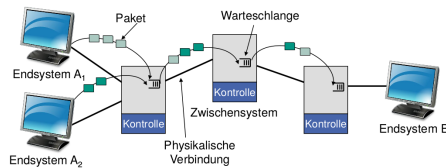
Zwischensysteme speichern Pakete in *Warteschlangen*  $\leadsto$  Paketverlust möglich

Variable Verzögerungszeiten

Üblicherweise Zeitmultiplex (keine Reservierung von Ressourcen)

**Varianten:**

- *verbindungslos:* Datagramme
- *verbindungsorientiert:* virtuelle Verbindungen



### PAKETVERMITTLUNG — DATAGRAMME

Pakete (= Datagramme) werden als isolierte Einheiten betrachtet

**Zieladresse** in jedem Datagramm enthalten  $\leadsto$  keine Verbindungsverwaltung nötig

**Routing:** Pakete können verschiedene Wege im Netz nehmen

$\leadsto$  Datagramme können bei Empfänger unsortiert ankommen

### PAKETVERMITTLUNG — VIRTUELLE VERBINDUNGEN

Fester Übertragungsweg zwischen zwei Endsystemen

**Reihenfolgetreue:** Alle Pakete nehmen den selben Weg

**Kennung:** *virtual circuit identifier* (VCI) für jeden Übertragungsabschnitt

**Zieladresse** nur bei Aufbau nötig, Vermittlungsinformationen in Zwischensystemen

**Ablauf:** Verbindungsaufbau  $\rightarrow$  Datenübertragung  $\rightarrow$  Verbindungsabbau

### NACHRICHTENVERMITTLUNG

Vermittlung von *Anwendungsnachrichten*

Vermittlung üblicherweise mittels mehrerer Pakete

$\leadsto$  *Segmentierung und Reassemblierung* in Zwischensystemen (alle Teile müssen jeweils an gleiches System weitergeleitet werden)

$\leadsto$  *Ende-zu-Ende-Verzögerung* wesentlich höher als bei Paketvermittlung

### VERMITTLUNGSSCHICHT — ÜBERBLICK

**Ende-zu-Ende:** transportiert Segmente zwischen Endsystemen

Sender: Kapselt Segmente in Datagramme

Empfänger: Segmente werden an Transportschicht ausgeliefert

Protokolle in *allen* Endsystemen und Routern

**Router** werten Felder im Kopf aller Datagramme aus, die sie passieren

### FORWARDING UND ROUTING

**Forwarding** (*Weiterleitung*): Datenebene

- Pakete werden von Eingang an passenden Ausgang (Tabelle) weitergeleitet
- Funktionen lokal in Router

**Routing** (*Wegwahl*): Kontrollebene

- Ermittelt Wege für Pakete und darauf basierend Weiterleitungstabelle
- Betrachtet gesamtes Netz, benötigt Routingalgorithmus und -protokoll
- **Konzepte:**
  - traditionell: in jedem Router implementiert, interagieren auf Kontrollebene
  - *software defined networking* (SDN): in logisch zentralen Servern implementiert

### VERMITTLUNGSSCHICHT — BEGRIFFE

**Router:** Auf Vermittlungsschicht operierendes Zwischensystem

- leitet Datagramme mithilfe von Weiterleitungstabelle weiter
- tauscht über Routingprotokolle Informationen mit anderen Routern aus

**Route:** Weg eines Datagramms: Sequenz von Routern zwischen zwei Endsystemen

**Link:** Übertragungsabschnitt zwischen 2 Routern (kann z.B. auch Brücken enthalten)

**Port:** Eingangs-/Ausgangs-Netzwerkschnittstelle

### VERMITTLUNGSSCHICHT — PROTOKOLLE

**IP** (*internet protocol*):

- unzuverlässige Datagrammübertragung

**ICMP** (*internet control message protocol*):

- Kontrollinformationsaustausch innerhalb der Vermittlungsschicht

**ARP** (*address resolution protocol*):

- Zuordnung von IP-Adressen zu Adressen der Sicherungsschicht

**RARP** *reverse ARP*:

- Umkehrfunktionen von ARP

**BGP** (*border gateway protocol*), **RIP** (*routing information protocol*), **OSPF** (*open short test path first*): Routingprotokolle

### VERMITTLUNG — IP (INTERNET PROTOCOL)

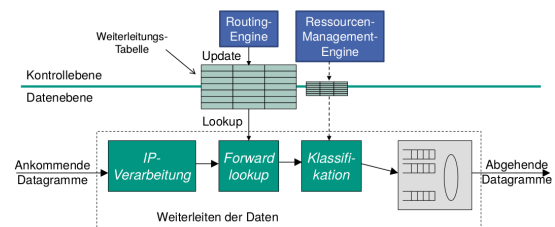
Verbindungsloser, unzuverlässiger Vermittlungsdienst

(kein Kontext in Zwischen- oder Endsystemen)

IP macht die ganze Vermittlung  $\leadsto$  nur ein einziges Vermittlungsprotokoll

- Interoperabilität erhöhen: Anzahl unterschiedlicher Interfaces verringern

- Kleinsten gemeinsamen Nenner: Anzahl nutzbarer Netze maximieren



0	4	8	14	16	19	31
Version	Header Length	Type of Service: DSCP(6) and ECN(2)	Total Length			
Identifier				Flags	Fragment Offset	
Time to Live	Protocol		Header Checksum			
Source Address						
Destination Address						
Options and Padding (variabel)						
Data (variabel)						

■ Overhead: 20 Byte TCP-Kopf + 20 Byte IP-Kopf = 40 Byte Overhead

### IP — FRAGMENTIEREN + REASSEMBLIEREN

Anpassung an Maximallänge unterliegender Netze (**MTU:** *maximum transfer unit*)

Fragmentieren überall möglich, Reassemblieren nur in Endsystem

**Fragment-Offset** (Einheit: 8 Bytes) + Flag-Felder im IP-Kopf

### IP — WEITERLEITUNG

**Endsystem:**

- Rechner mit Zieladresse direkt verbunden  $\rightarrow$  Datagramm direkt zustellen
- Sonst: Datagramm-Übergabe an Standardrouter

**Weiterleitungstabelle:** Für jede Zieladresse (Endsystem- oder Netzadresse)

- *Next-Hop-Router* (falls nicht im gleichen Netz)
- *Netzschnittstelle*, an die Paket weitergeleitet wird (Schnittstelle, an der Next-Hop bzw. Endsystem hängt)
- Flags

### IP — EMPFANGSPROZESS

**Überprüfen:**

- *Kopflänge*, *Datagrammlänge*, *Prüfsumme*
- *Versionsnummer* IP, *Protokoll-Identifikation*
- *Lebenszeit*, *Adressklassen*

**Fehlerfall:** Benachrichtigung ICMP (*internet control message protocol*) — möglicherweise wird ICMP-Paket ausgesendet



## IP — ADRESSIERUNG

**Ziel:** Eindeutige Identifizierung aller Interfaces von Routern/Endsystemen

**IP-Adressen:** Adressen der Vermittlungsschicht – Kennung für Interfaces

- IPv4: 32 Bit (z.B. 207.142.131.235)
- IPv6: 128 Bit (z.B. 2001:0db8:85a3:08d3:1319:8a2e:0370:7344)

IP-Adresse unterteilt in

- Subnetz-Teil: high order bits
- Endsystem-Teil: low order bits

**Subnetz:** Interfaces mit selbem Subnetz-Teil, können ohne Router kommunizieren

**CIDR** (Classless Inter-Domain Routing): Subnetz-Teil kann unterschiedlich lang sein  
Format: a.b.c.d/x (x: Anzahl Bits im Subnetz-Teil, z.B. 200.23.16.0/24)

## ADRESSZUTEILUNG

**Provider:** Erhält Block von ICANN (*internet corporation for assigned names/numbers*)

Allokiert IP-Adressen, verwaltet DNS, weist Domainnamen zu  
Netz bekommt Subnetz-Teil von seinem Provider zugeordnet

**Manuell:** Durch Systemadministrator

**Dynamisch:** DHCP-Server liefert auf Anfrage IP-Adresse für Client

## DHCP (DYNAMIC HOST CONFIGURATION PROTOCOL)

Dynamischer Bezug von IP-Adressen durch Endsysteme

Beschränkte zeitliche Gültigkeit (*lease*)

Zusätzlich Subnetzmaske, Adresse des Default-Gateways, DNS-Server, ... möglich

**Ablauf:** [Discover, Offer], Request, Ack (jeweils als Broadcast)

## INTERNET CONTROL MESSAGE PROTOCOL (ICMP)

Einzelne Datagrammverluste meldet IP nicht (unzuverlässiger Dienst)

Schwerwiegende Probleme (z.B. Leitungsunterbrechung): Mitteilung via ICMP

⇒ ICMP tauscht Fehlermeldungen, Statusanfragen und Zustandsinformationen aus

**Echo** + Antwort (*echo and echo reply*):

- Aktivitätsüberprüfung von Kommunikationssystemen
- Empfänger von Echo-Anfrage sendet erhaltene Daten in Echo-Antwort zurück

**Zeitstempel** + Antwort (*timestamp and timestamp reply*):

- Bestimmung von Umlaufzeiten (*round trip time*, RTT)

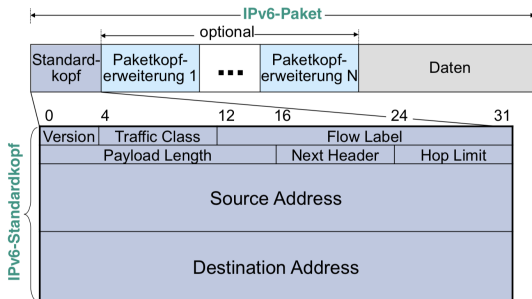
## IPv6

**Problem:** Adressraum von IPv4 geht aus ⇒ Erhöhung Adresslänge von 32 auf 128 Bit

Optimiere **Format des Headers** für schnelle Verarbeitung:

- feste Kopflänge (40 Byte), Optionen als Erweiterungsköpfe (*next header*)
- keine Unterstützung von Fragmentierung, keine Prüfsumme

ICMPv6: neue Version von ICMP



## ROUTING — PRINZIPIEN

**Ziel:** Guten Weg durch Netz finden (geringste Kosten)

**Netzgraph:** Netz wird als Graph verstanden

- Knoten: Router
- Kanten: Übertragungsabschnitte (Kantenkosten z.B. Verzögerung, Preis,...)

**Pfad:** Folge von Knoten (meist Pfad mit kürzester Länge gesucht)

## ROUTING-VERFAHREN — DYNAMIK

**Nicht adaptiv:** Routen ändern sich sehr selten, wesentlich seltener als Verkehr

**Adaptiv:** Routen ändern sich abhängig von Verkehr und Topologie

- Routenänderungen periodisch oder reaktiv
- Zielkonflikt: Systeme haben ggf kein Live-Abbild des Netzes
- ggf hohe Netzbelastung durch Routing-Informationsaustausch

## ROUTING-VERFAHREN — STATISCHES ROUTING

**Beispiel:** Abhängig von Zufallszahl weiterleiten nach B, C oder D

## ROUTING-VERFAHREN — ZENTRALISIERT

Adaptives Verfahren

**Routing Control Center:** Für Berechnung/Verteilung der optimalen Pfade

- Systeme senden periodisch Zustand an RCC
- (aktive Nachbarn, Warteschlangenlängen,...)

**Vorteile:**

- RCC hat alle Informationen ~> kann perfekte Entscheidungen treffen
- Systeme müssen kein Routing betreiben

**Nachteile:**

- Berechnungsdauer für große Netze ggf sehr lang
- Ausfall RCC lähmt ganzes Netz
- Inkonsistenzen möglich, da Systeme nah an RCC Tabellen schneller erhalten
- starke Belastung des RCC

## ROUTING-VERFAHREN — ISOLIERT

**Prinzip:** Jedes System entscheidet nur anhand eigener Informationen

kein Austausch von Routinginformationen zwischen Systemen

**Fluten:** Jedes eingehende Datagramm auf jeder Übertragungsleitung weiterleiten

*Fluteindämmung:*

- Sequenznummern für Duplikaterkennung
- Lebensdauerkontrolle durch Zählen der Übertragungsabschnitte (*hops*)

**Varianten:**

- selektives Fluten: Weiterleitung nicht auf allen Übertragungsabschnitten
- random walk: Zufällige Auswahl eines Übertragungsabschnittes

**Hot Potato:** Datagramme so schnell wie möglich weiterleiten

- ~> Übertragungsabschnitt mit kürzester Warteschlange wählen

**Varianten:**

- nie an Herkunftsleitung weiterleiten
- Kombination mit statischem Routing: statisches Verfahren zur Auswahl von Leitung mit Warteschlangenlänge unter Schwellwert

## ROUTING-VERFAHREN — VERTEILTES ADAPTIVES ROUTING

**Prinzip:** Systeme tauschen Routing-Informationen mit Nachbarn aus

- jedes System unterhält Routing-Tabelle

**Varianten:**

- periodischer Informationsaustausch
- Austausch nur bei größeren Änderungen

## ROUTING-ALGORITHMEN — ÜBERSICHT

**Distanz-Vektor-Algorithmen:**

- Distanz als Routing-Metrik
- jeder Router kennt Distanz zu allen anderen Systemen im Netz
- dazu Austausch der Distanzen zwischen Nachbarn
- Problem: kürzerer langsamer Weg wird längerem schnelleren vorgezogen

**Link-State-Algorithmen:**

- Unterschiedliche Routing-Metriken
- berücksichtigt aktuelle Zustände der Netzanschlüsse
- jeder Router kennt und nutzt ganze Netztopologie zur Berechnung

## LINK-STATE VS. DISTANZ-VEKTOR

**Komplexität Kontroll-Pakete:**

- Link-State: jedes System muss Kosten aller Links kennen, Änderungen müssen an alle Systeme geschickt werden ~>  $O(nE)$  Pakete
- Distanz-Vektor: Änderungen nur an benachbarte Systeme weitergegeben

**Konvergenzgeschwindigkeit:**

- Link-State: schnelle Konvergenz ( $O(n^2)$ ), schleifenfrei, Oszillationen möglich
- Distanz-Vektor: langsame Konvergenz, Schleifen sowie Count-to-Infinity möglich

**Robustheit:**

- Link-State: Routenberechnungen separiert ~> Robustheit
- Distanz-Vektor: ein System kann inkorrekte Pfade zu allen Zielen verbreiten

**Fazit**

- Link-State: Konvergiert schneller, ist robuster
- Distanz-Vektor: einfacher zu implementieren

## ROUTING-ALGORITHMEN — DISTANZ-VEKTOR

**verteilt:** jeder Router erhält Infos von direkten Nachbarn, führt Berechnung durch und verteilt dann neue Informationen an direkte Nachbarn

**iterativ:** Verteilen + Berechnen von Informationen so lange, bis keine Information mehr ausgetauscht wird

## DISTANZ-VEKTOR — DISTANZ-VEKTOR-TABELLE

### Distanz-Vektor-Tabelle:

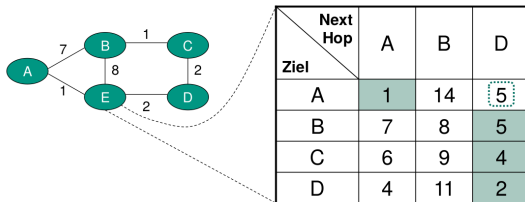
- Grundlegende, in jedem System vorhandene Datenstruktur
- Zeilen für alle möglichen Ziele, Spalten für direkte Nachbarn

**Beispiel:**  $X$  will Daten über direkten Nachbar  $Z$  an  $Y$  weiterleiten

$$D^X(Y, Z) = c(X, Z) + \min_w \{D^Z(Y, w)\}$$

**Beispiel:**  $D^E(A, D)$

- erster Übertragungsabschnitt:  $E \rightarrow D$
- Tabelleneintrag: Kosten  $E \rightarrow D$  (2) + minimale Kosten  $D \rightarrow A$  (3)



## DISTANZ-VEKTOR — DISTANZ-VEKTOR-ALGORITHMMUS (BELLMAN-FORD)

### Initialisierung:

- für alle Nachbarn  $v$ :  $D^X(*, v) = \infty$ ,  $D^X(v, v) = c(X, v)$
- für alle Ziele  $y$ : sende  $\min_w D^X(y, w)$  allen Nachbarn ( $w$  enthält alle Nachbarn)

### Schleife:

- geänderte Abschnittskosten: für alle Ziele  $y$ :  $D^X(y, V) := D^X(y, V) + d$
- Update von Nachbarn: kürzester Pfad von  $V$  zu Ziel  $Y$  hat sich um  $\alpha$  geändert  
 $\leadsto D^X(Y, V) := c(X, V) + \alpha$   
 $\leadsto$  Falls neuer Minimalwert für ein Ziel  $Y$ , sende an alle direkten Nachbarn

**Komplexität:**  $O(n^2 k)$  für  $n$  Knoten und  $k$  Kanten

## DISTANZ-VEKTOR — UPDATEAUSBREITUNG

**Good news:** schnelle Ausbreitung

**Bad news:** langsame Ausbreitung, ggf Routing-Schleifen

$\leadsto$  **Count to Infinity-Problem**

**Poisoned Reverse:** Vermeidung von Routing-Schleifen, indem Routing-Information  $Y$  vorenthalten wird, wenn Weg über  $Y$  kürzer

## ROUTING-ALGORITHMMEN — LINK-STATE-ROUTING

**Prinzip:** Jedes System berechnet kürzeste Pfade durch gesamtes Netz

- Systeme müssen zu Beginn nur direkte Nachbarn kennen
- Entdecken von neuen Nachbarn zB mittels HELLO-Pakete
- *link state broadcast*: Identität + Kosten zu Nachbarn werden allen Routern im Netz weitergeleitet (Fluten)
- Systeme lernen Topologie durch LSAs der anderen Systeme
- *Ergebnis*: Alle Systeme haben *identisches* Wissen über Netz

**Implementierung:** Dijkstra-Algorithmus

## SOFTWARE DEFINED NETWORKING

### Zentrale Eigenschaften:

- Separierung von Kontroll- und Datenebene
- Flow-basierte Paketweiterleitung
- Logik an externen Controller ausgelagert
- Netzwerk programmierbar

**Umsetzung:** *open flow*-Protokoll (quasi-Standard, Alternativen existieren)

- regelt Kommunikation zwischen Controller und Switch

## TRADITIONELLES IP-ROUTING

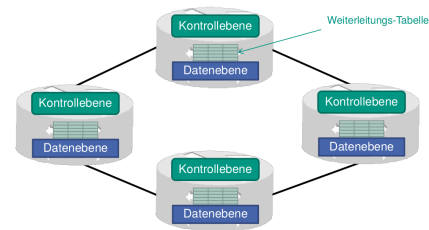
Kontroll- und Datenebene in jedem Router

### Vorteile:

- Ausfallsicherheit (selbstorganisiert, verteilte Kontrolle, hohe Redundanz)
- Schnelle Reaktion (optimierte Routing-Hardware, lokale Routingentscheidung)
- Bewährtes Konzept

### Nachteile:

- proprietäre Management-Schnittstellen (Mischbetrieb schwierig)
- unflexibel (neue Funktionen hinzufügen schwierig, aufwändige Standardisierung)
- teuer (hochqualifiziertes Personal + Overprovisioning benötigt)



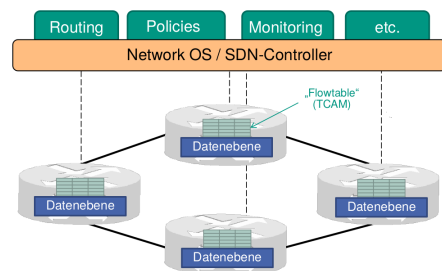
## SDN-ROUTING

### Vorteile:

- logisch zentralisierte Sicht (Controller hat Netzüberblick, einfacher Einsatz von Graphenalgorithmen)
- neue Funktionalität in Software (als App im Controller, kürzere Entwicklungszeit)
- Trennung von Kontroll- und Datenebene (Innovationen unabhängig möglich, herstellerunabhängig durch offene Schnittstellen)

### Nachteile:

- Skalierbarkeit
- *single point of failure*
- Kommunikation mit Controller langsam



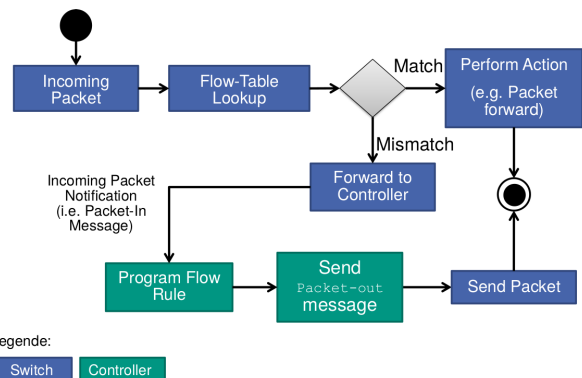
## SDN — PAKETWEITERLEITUNG

### Traditioneller IP-Router:

- kennt keine Flows
- Weiterleitung über Ziel-IP-Adresse (Longest Prefix Matching)

### SDN-Switch:

- Weiterleitung über Flowtable
- nutzt verschiedene IP-Kopf-Felder
- speichert Zustand pro Flow



Legende:



## V. Sicherungsschicht

### TERMINOLOGIE

**Knoten:** Endsysteme + Router

**Links:** Übertragungsabschnitt zwischen benachbarten 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 einpacken hinzufügen

**Medienzugangskontrolle** bei geteilten Medien

**Adressierung** mittels MAC-Adressen

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

**(Semi-) Broadcast:** Alle Stationen sehen alle Rahmen (zB WLAN = semi-broadcast)

**Punkt-zu-Punkt-Link:** Zwei Stationen sind über dedizierten Link verbunden (zB switch-basiertes Ethernet)

- *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 — 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 Sicherungssequenz *frame check sequence* (FCS)

(üblicherweise als Anhang am Rahmenende)

### FEHLERERKENNUNG — CYCLIC REDUNDANCY CHECK (CRC)

Jede zyklische Verschiebung eines Codeworts führt wieder zu einem Codewort

**Code** → **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:**

·  $m$  Bit Rahmen →  $M(x)$  (Polynom/Codewort)

· hängt  $r = \deg(G(x))$  Nullen an Daten (→  $x^r \cdot M(x)$ )

· berechnet Rest von  $M(x)/G(x)$

· hängt Rest an ursprüngliche Daten (statt der Nullen von oben)

- **Empfänger:** Dividiert durch  $G(x)$

· Ergebnis 0: keine Fehler erkannt

· Ergebnis  $\neq 0$ : Fehler!

### CRC — HARDWAREIMPLEMENTIERUNG

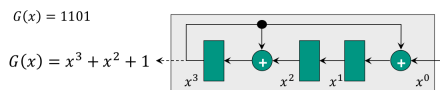
Rückgekoppelte Schieberegister → CRC bei Durchschieben berechnet

**Prinzip:**

- Bitweises Empfangen der Daten, durchlaufen Schieberegister

- Rückkopplung durch **XOR**-Gatter an 1-Stellen des Generators (ohne höchstes Bit)

- Nach Durchlaufen von Codewort und angehängter Nullen Prüfsumme im Register



### MULTIPLEXING — MEDIENZUGRIFF

**Problem:** Link von mehreren Knoten parallel benutzt

**Varianten:**

- feste Mediumszuteilung (nach einer Dimension, Punkt-zu-Punkt-Verbindungen)

- konkurrierende Nutzung → Zugriffsorganisation notwendig

**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

Space Division Multiple Access (SDMA)

### 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

**Nachteil:** genaue Synchronisation nötig

**Einsatz:** Ethernet, WLAN

**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

### ZEITMULTIPLEX — ZUFALLSSTRATEGIEN

**Aloha:** zufällige, unabhängige, seltene Sendewünsche

- gleichzeitiges Senden → 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

- **Kollisionen,** wenn mehrere Systeme gleichzeitig zu Senden beginnen

**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

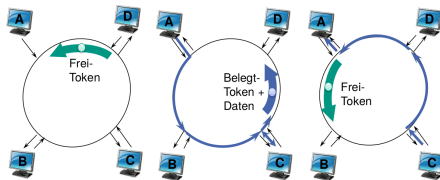
- *Nachteil:* Knoten können ausfallen → Zugriff blockiert
- *Einsatz:* Token Ring

### KOLLISIONSFREIER ZUGRIFF — TOKEN RING

#### Prinzip:

- Systeme physikalisch Punkt-zu-Punkt-verbunden zu Ring
- Jedes System hat *Vorgänger* und *Nachfolger*
- Senderechtszuteilung durch zirkulierendes Token
- Sendendes System nimmt Daten auch wieder vom Ring

Monitor: Endsystem zur Überwachung des Rings, Tokenmanagement (komplex!)  
Strukturierte Verkabelung von Gebäuden, Viele Endsysteme möglich



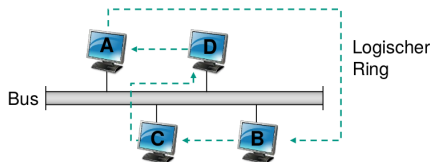
### KOLLISIONSFREIER ZUGRIFF — TOKEN BUS

#### Prinzip:

- Verbindet Vorteile von Ethernet und Token Ring
- Busverkabelung wie bei Ethernet (robust: Ausfall eines Endsystems für Netz egal)
- *Garantierte Antwortzeiten* durch zirkulierendes Token

#### Aufbau:

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



### LOKALE NETZE — MAC-ADRESSEN

Theoretisch weltweit eindeutig

Jeder Netzadapter muss in einem lokalen Netz eindeutige MAC-Adresse haben

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

#### Format:

- 48 Bit (24 Bit von IEEE an Hersteller zugewiesen, 24 Bit durchnummeriert)
- stehen im NIC-ROM, können aber auch per Software gesetzt werden
- Darstellung meist hexadezimal (z.B. 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 im eigenen Subnetz?

**Aufgabe:** MAC-Adresse zu bekannter IP-Adresse ermitteln

**Prinzip:** dynamisch Adresszuordnungen lernen

**ARP-Cache:** kleine Tabelle auf jedem System, Einträge bei Bedarf gelernt

- Eintrag IP + MAC + maximale Lebenszeit (typisch 20 Minuten)

#### 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 (IEEE 802.3)

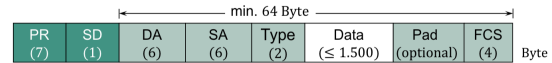
#### Medienzuteilung:

- zeitmultiplex, variabel, zufälliger Zugriff, CSMA/CD
- Kanal wird logisch in Zeitschlitz fester Länge aufgeteilt
- Dauer = minimale Rahmenlänge → Kollisionserkennung vor Zeitschlitz-Ende
- Exponentieller Backoff: Warte nach i. Kollision zufällig  $[0, 2^i - 1]$  Zeitschlitz

**Netztopologie:** Ursprünglich Bus-, heute Sterntopologie (Switches statt Repeatern)

**Varianten:** [Datenrate][Baseband/Broadband][Medium] (z.B. 10Base5)

Ethernet-Rahmen (immer gleich)



Präambel, Start of Frame Delimiter, Destination Address, Source Address, Type/Length, Data, Padding, Frame Check Sequence

### ETHERNET — SWITCHES

**Prinzip:** Schicht-2-Netzkopplung (innerhalb eines IP-Subnetzes)

- Leitet Rahmen zwischen Interfaces weiter und puffert sie zwischen
- Trennung von Inter- und Intranetz-Verkehr → Erhöhung Netzkapazität
- Switches nicht sichtbar für Endsysteme

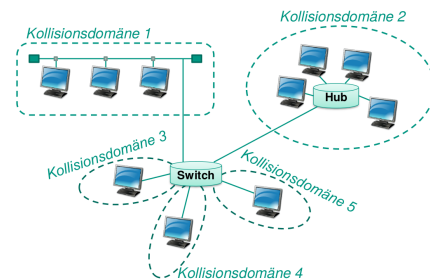
**Ziel:** Selbstorganisierte Netzkonfiguration mit Switches

#### Aufgaben:

- Schleifenfreie Netztopologie (*spanning tree* Algorithmus)
- Wege zwischen Endsystemen (selbstlernend; Ziel unbekannt: Fluten)

### ETHERNET — KOLLISIONSDOMÄNEN

Netzbereich, der von Kollision betroffen ist (gemeinsames Broadcastmedium)



### VIRTUAL LOCAL AREA NETWORK (VLAN)

**Idee:** Logische Trennung von Datenverkehr auf Ethernet-Ebene → 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

Ein einziger physikalischer Switch arbeitet als mehrere virtuelle Switches

Jeweils mehrere Interfaces werden zu einem virtuellen Switch gruppiert

**Verkehrsisolation:** Rahmen von einem Interface können nur Interfaces in der gleichen Gruppe erreichen → Sicherheit, Performance

**Flexible Zuweisung:** Interfaces dynamisch anderen VLANs zuordnen

**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

## VI. Architektur

### GRUNDMODELL

Daten überbrücken räumliche Distanz (abstrakten Übertragungsabschnitt)  
Abstraktion auf Basis von **Schichten**, stellen Dienste über Schnittstellen bereit  
Höhere Schicht erfordert Dienste der darunterliegenden Schicht

#### Ziele:

- Komplexitätsreduktion (Vereinheitlichung, Modularisierung)
- Interoperabilität (Hersteller-/Systemunabhängigkeit)
- Flexibilität und Erweiterbarkeit

**Horizontale Kommunikation:** zwischen Sender und Empfänger

- Protokollinstanzen einer Schicht tauschen Daten aus um Dienst zu erbringen

**Vertikale Kommunikation:** zwischen verschiedenen Schichten in einem System

- Protokollinstanz Schicht n greift auf Dienste von Protokollinstanz Schicht n-1 zu

### OSI-REFERENZMODELL

**Logisches** Modell (gedankliche Strukturierung), nicht Implementierungsmodell

Keine Protokolle (nur Prinzipien), offener Standard

Unterteilung in Transportsystem (1-4) und Anwendungssystem (5-7)

**Schicht 1:** Bit-Übertragungsschicht (*physical layer*)

- Bitübertragung
- Verwendung von Leitungscodes usw
- keine Pufferung, *kein* zuverlässiger Dienst
- Ziel: Übertragungsqualität

**Schicht 2:** Sicherungsschicht (*data link layer*)

- Ziel: Kommunikation zwischen physikalisch benachbarten Systemen
- Erkennung/Behebung von Fehlern der Bitübertragungsschicht
- Bitstrom in Rahmen gliedern
- Puffern bei Sender + Empfänger

**Schicht 3:** Vermittlungsschicht (*network layer*)

- Ziel: Verknüpfung von Übertragungsabschnitten zu Netz
- Wegewahl im Kommunikationssystem
- Geräteadressierung
- Multiplexing

**Schicht 4:** Transportschicht (*transport layer*)

- Ziel: Übertragung von Daten zwischen Anwendungen
- Abstrahiert von Diensten der Vermittlungsschicht
- Fehlererkennung/-behebung
- Pufferung
- Adressierung von Transportdienstnutzern
- Multiplexing

**Schicht 5:** Sitzungsschicht (*session layer*)

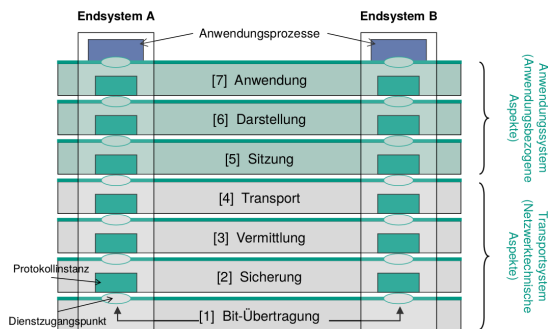
- Ziel: Nichtunterbrechbarkeit von Kommunikationsbeziehungen
- Datenaustauschgliederung nach Gesichtspunkten der Anwendung
- Ablaufsteuerung/Koordination - Bereitstellen von Sitzungen

**Schicht 6:** Darstellungsschicht (*presentation layer*)

- Ziel: Einheitliche Datendarstellung
- Kommunikation zwischen heterogenen Geräten
- Beibehaltung der Informationssemantik bei Überführung der Syntax

**Schicht 7:** Anwendungsschicht (*application layer*)

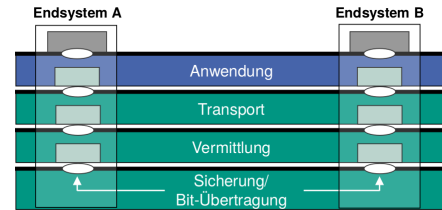
- Ziel: Austausch anwendungsabhängiger Daten



### INTERNET-REFERENZMODELL

Einfacheres Modell, nur 4 Schichten (manchmal 5 bei Trennung von Sicherung und Bit-Übertragung)

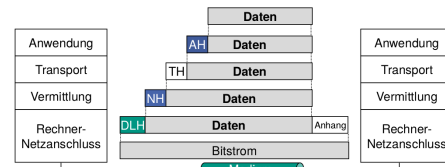
Darstellungs- und Sitzungsaufgaben in Anwendungen verlagert



### DATENKAPSELUNG

Information wird durch alle Schichten durchgereicht

Daten werden in jeder Schicht gekapselt (mit Header und/oder Trailer versehen)



### PROTOKOLLE UND DIENSTE

**Protokoll:** Regeln und Formate für Datenaustausch *innerhalb* einer Schicht

**Dienst:** Bündelung zusammengehöriger Funktionen

- Zusammenwirkung von Protokollinstanzen *innerhalb* einer Schicht
- Schichten gehen über gesamtes Kommunikationssystem hinweg
- *Diensthierarchie:* einzelne Dienstteile unabhängig voneinander nutzbar
- *Dienstprimitiv:* Einzelvorgänge einer Dienstfunktion
  - request (Req) — Beauftragung (Nehmer → Geber)
  - indication (Ind) — Partnerbenachrichtigung (Nehmer ← Geber)
  - response (Rsp) — Partnerbeantwortung (Nehmer → Geber)
  - confirmation (Cnf) — Abschlussbenachrichtigung (Nehmer ← Geber)
- *Diensthierarchie:* Dienst baut auf anderen Diensten auf (Dienstbringer/-nehmer)
- *Dienstzugangspunkte:* Dienstschnittstellen

### ABLAUF — WEBSEITENAUFTRUF

**Start:** Einstecken Netzwerkabel

**Ende:** Seitenempfang

**Netzverbindung:** IP erhalten, Router + DNS kennenlernen

1. DHCP-Anfrage (verpackt in UDP, IP, 802.3)
2. Ethernet-Paket wird im LAN gebroadcastet
3. DHCP-Server im Router empfängt + entpackt Paket
4. DHCP-Server erstellt DHCP ACK-Paket mit Client-IP, Router-IP, DNS-IP
5. DHCP-Antwort wird verpackt und direkt an Client gesendet
6. Client empfängt und entpackt Paket

**ARP:** MAC des Routers kennenlernen

1. ARP-Anfrage an Broadcast-Adresse
2. Router sendet seine MAC in ARP-Antwort

**DNS:** IP-Adresse der angeforderten Webseite kennenlernen

1. IP-Datagramm mit DNS-Anfrage wird von LAN-Switch zu lokalem Router geleitet
2. IP-Datagramm: lokales Netz → ISP-Netz → DNS-Server (mit RIP oder OSPF)
3. Paket wird an DNS-Server entpackt
4. DNS-Server antwortet Client mit angeforderter IP

**TCP:** Aufbau einer TCP-Verbindung

1. Eröffnung eines TCP-Sockets zum Webserver
2. TCP-SYN-Segment wird zu Server geroutet
3. Server antwortet mit SYNACK

**HTTP:** Webseite laden

1. HTTP-Anfrage wird per TCP-Socket gesendet
2. IP-Datagramm mit HTTP-Anfrage wird zu Webserver geroutet
3. Server antwortet mit HTTP-Antwort
4. IP-Datagramm mit HTTP-Antwort wird zurück zu Client geroutet

## VII. Sicherheit

### ANGRIFFE

Klassischer Angreifer (Dolev-Yao): Omnipräsent im Netz

- kann Pakete abhören / manipulieren / eigene Pakete erzeugen
- kein Zugriff auf Endsysteme
- keine Entschlüsselung ohne Schlüssel

Abhören, Einfügen, Manipulieren, Man in the Middle, Replay, Denial of Service,

~> **System/Protokoll** verwendet **Bausteine** um **Schutzziele** zu realisieren und vor **Angriffen** zu schützen

### SCHUTZZIELE (CIA)

Anforderungen an eine Komponente oder ein System, die erfüllt werden müssen, um schützenswerte Güter vor Bedrohen zu schützen

**Confidentiality** (Vertraulichkeit): keine unautorisierte Informationsgewinnung  
- Bausteine: Asymmetrische/Symmetrische Verschlüsselung

**Integrity** (Integrität): Kein Ersetzen, Einfügen oder Löschen von Daten  
- **starke Integrität**: Keine unautorisierte Manipulation von Daten möglich  
- **schwache Integrität**: Manipulation von Daten nicht *unbemerkt* möglich  
- Manipulationen in vielen Fällen nicht zu verhindern ~> schwache Integrität  
- Bausteine: Tamper Proof-Module, Message Authentication Codes (MAC)

**Availability** (Verfügbarkeit)  
- Beschreibt, in welchem Maße die Systemfunktionalität von berechtigten Subjekten unabhängig von Einflüssen in Anspruch genommen werden kann

### Authentizität

- Die angegebene Datenquelle ist tatsächliche Quelle + Datenintegrität
- **Subjektheit**: Bob will sicherstellen, dass er tatsächlich mit Alice spricht
- ~> **Authentifikation**
- **Datenechtheit**: Bob will sicherstellen, dass Daten tatsächlich von Alice sind
- Bausteine: Zertifikate, Signaturen, gemeinsames Geheimnis

weitere Schutzziele: Privatheit, (Nicht-)Abstreitbarkeit

### VERSCHLÜSSELUNG

**symmetrisch**: Ent- und Verschlüsseln mit einem Schlüssel, sehr effizient

**asymmetrisch**: Verschlüsseln: öffentlicher Schlüssel, Entschlüsseln: privater  
Beispiel: RSA (Details: Siehe VL)

### KRYPTOGRAPHISCHE HASHFUNKTION

Einwegfunktion ( $H(m)$  effizient,  $H^{-1}(c)$  nicht)

Zu gegebenen  $b$  schwierig,  $a$  zu finden mit  $H(a) = b$

Schwache Kollisionsresistenz: Zu  $a$  ein  $a'$  mit  $H(a) = H(a')$  schwer findbar

Starke Kollisionsresistenz: Paar  $a \neq a'$  mit  $H(a) = H(a')$  schwer findbar

### INTEGRITÄTSSICHERUNG

Daten sollen beim Empfänger genau so eintreffen, wie sie versendet wurden  
Manipulationen können nicht verhindert, nur erkannt werden -> Schwache Integrität

#### Message Authentication Code:

- Ziel: Empfänger erkennt Manipulation an empfangenen Daten
- Voraussetzung: Alice und Bob haben gleichen symmetrischen Schlüssel
- Vorgehensweise: Alice hängt Hash von (Nachricht + Schlüssel) an Nachricht an

#### Digitale Signatur: Sichert Integrität

- Ziel: Bob kann prüfen, dass wirklich Alice dieses Dokument unterschrieben hat
- Vorgehensweise: Hash des Dokuments mit privatem Schlüssel verschlüsseln, als Signatur mitsenden, entschlüsseln mit öffentlichem Schlüssel

#### Digitales Zertifikat: Sichert Authentizität

- Ziel: Verifizieren, dass jemand der ist, für den er sich ausgibt (öffentlicher Schlüssel tatsächlich zu ihm gehört)
- Problem: kann man nicht selbst überprüfen ~> verlassen auf Dritte
- Vorgehensweise: Überprüfung durch *certificate authority* (CA), ID-Zertifikat = Authentifikation des öffentlichen Schlüssels

### E-MAIL SICHERHEIT — PGP (PRETTY GOOD PRIVACY)

SSL/TLS nur scheinbare Sicherheit: Weiterverarbeitung im Backend unverschlüsselt  
e-Mail Verschlüsselung mit PGP: Bietet Vertraulichkeit, Integrität und Authentizität  
Verwendet symmetrischen Schlüssel, der asymmetrisch Verschlüsselt zusammen mit Nachricht versendet wird

Problem: Öffentliche Schlüssel müssen vor Versand bekannt sein  
Zugehörigkeit zur Mailadresse muss überprüfbar sein  
Bekanntgabe auf öffentlichen Schlüsselservern

**Web of Trust**: Dezentraler, anarchischer Vertrauensansatz (ohne CAs)

- Transitive Überprüfung der Authentizität eines öffentlichen Schlüssels
  - Nutzer bestimmt Vertrauens in die Signaturen anderer Nutzer (Signatory Trust)
  - Key Legitimacy bestimmt sich aus Anzahl der vertrauten Signaturen
- In der Realität: Viele Probleme (Inseln)

### INFRASTRUKTURSICHERHEIT

**Firewall**: Zugriffskontrolle durch Paketfilterung

- Teile des Netzes vor Eindringen unerwünschter Pakete schützen
- Netzbereiche (Intern, Internet, Demilitarized Zone) voneinander isolieren
- Zustandslos (IP, Port, Protokoll, Interface) mit Access Control List (ACL)
- Zustandsbehaftet (Überwacht TCP-Verbindungen)
- Application Layer Gateway: Filtern auf Basis von Nutzdaten (z.B. Username)

#### Intrusion Detection and Prevention:

- Bekannte Angriffe erkennen / verhindern
- Deep Packet Inspection (Analyse der Nutzdaten)
- Anomaly Detection (Alarm bei Abweichungen vom Normalverhalten)

#### Organisatorische Maßnahmen:

- Schulungen, Verantwortlicher, Notfallplan, Richtlinien, Datensicherung, ...