

Formelsammlung zu Grundlagen Rechnernetze und Verteilte Systeme (GRNVS IN0010)  
SS2021, Seite 1/2, Version: 2021-05-29

### Ethernet / IEEE 802.3 Header und Ethertypes

0 B	Destination Address																												
4 B	Source Address																												
8 B	Ethertype																												
IEEE 802.3 Header																													
Ethertype	Keyword	Protocol																											
0x0800	IPv4	Internet Protocol, Version 4																											
0x0806	ARP	Address Resolution Protocol																											
0x0842	WoL	Wake-on-LAN Magic Packet																											
0x8035	RARP	Reverse Address Resolution Protocol																											
0x814c	SNMP	Simple Network Management Protocol																											
0x86dd	IPv6	Internet Protocol, Version 6																											

### IPv4/6 Header und IP Protocol Numbers bzw. Next Header

0 B	Version																												
4 B	IHL																												
8 B	Identification																												
12 B	TTL																												
16 B	Source Address																												
20 B	Destination Address																												
0 B	Options / Padding (optional)																												
0 B	Version																												
4 B	Traffic Class																												
8 B	Flow Label																												
24 B	Payload Length																												
0 B	Next Header																												
4 B	Identifier																												
8 B	additional Extension Headers (optional)																												
40 B	IP6 Header																												
No / NH	Protocol																												
No / NH	Protocol																												
0x01	ICMPv4 (Internet Control Management)																												
0x06	TCP (Transmission Control)																												
0x11	UDP (User Datagram)																												
0x2c	Fragment Header																												
0x84	SCTP (Stream Control Transmission)																												

### ARP

0 B	Hardware Type: 0x0001 (Ethernet)																												
4 B	Protocol Type: 0x0800 (IPv4)																												
8 B	Sender Hardware Address																												
12 B	Sender Protocol Address																												
16 B	Target Hardware Address																												
20 B	Target Protocol Address																												

### ARP Packet Format

0 B	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

## Physikalische Schicht

### Physikalische Konstanten/Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} \text{Lichtgeschwindigkeit: } c_0 &\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ \text{Relative Ausbreitungsgeschwindigkeit in Kupfer / Glas: } \nu &\approx 2/3 \\ \text{Relative Ausbreitungsgeschwindigkeit in Vakuum / Luft: } \nu &\approx 1 \\ \text{Wellenlänge im Medium: } \lambda &= c/f \end{aligned}$$

### Informationsgehalt und Entropie:

Gedächtnislose Quelle emittiert Zeichen  $x \in \mathcal{X}$ , ausgedrückt durch ZV X:

$$\begin{aligned} \text{Informationsgehalt von } x \in \mathcal{X}: \quad I(x) &= -\log_2(\Pr[X = x]) \\ \text{Entropie der Quelle: } H(X) &= -\sum_{x \in \mathcal{X}} \Pr[X = x] \log_2(\Pr[X = x]) \end{aligned}$$

### Fourierreihe:

Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi/T$

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t) \text{ mit } a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(k\omega t) dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(k\omega t) dt.$$

**Fouriertransformation:**  $s(t) \mapsto S(f)$

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) (\cos(2\pi ft) - j\sin(2\pi ft)) dt \quad (j \text{ bezeichnet die imaginäre Einheit})$$

### Abtastung, Quantisierung und Rekonstruktion:

Abtasttheorem (Nyquist):  $f_N = 2B$  ( $B$  ist die einseitige Grenzfrequenz im Basisband)

Abgetastetes Signal:  $\hat{s}(t) = s(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta[t - nT_a]$ , mit  $\delta[t - nT_a] = \begin{cases} 1 & \text{für } t = nT_a \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Abtastwerte:  $\hat{s}[n] = s(nT_a)$

Stufenbreite:  $\Delta = \frac{b-a}{M}$ , mit  $M = 2^N$  Stufen bei N-bit Genauigkeit

Quantisierungsstufen:  $Q = \{a + \Delta/2, a + \Delta(1+1/2), \dots, a + \Delta(M-1+1/2)\}$

$\mathbb{R} \rightarrow Q, \hat{s}[n] \mapsto \overline{s}[n]$  (Runden)

Quantisiertes Signal:  $\overline{s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{s}[n] \cdot \text{rect}(t - nT_a), \text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } -T_a/2 \leq t \leq T_a/2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Quantisierungsfehler:  $q_e(t) = s(t) - \overline{s}(t) \leq \Delta/2$ , wenn  $a \leq t \leq b$

Rekonstruktion:  $s(t) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{s}[n] \cdot \text{sinc}\left(\frac{t - nT_a}{T_a}\right), \text{sinc}(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$

**Kanalbandbreite:**  $C_{\max}$  ist eine obere Schranke für die erzielbare Netto-Datenrate in bit/s, d. h. Übertragung redundanzfreier Daten. Dazu kann es notwendig sein, Redundanz hinzuzufügen (Kanalcodierung), was jedoch am Informationsgehalt der Nachricht nichts ändert.

Hartley:  $C_H = 2B \log_2(M)$

Shannon/Hartley:  $C_S = B \log_2(1 + \text{SNR})$

Signal-to-Noise Ratio:  $\text{SNR} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}}$

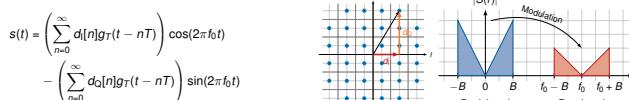
Signal-to-Noise Ratio dB:  $\text{SNR dB} = 10 \log_{10}(\text{SNR})$

Obere Schranke:  $C_{\max} \leq \min\{C_H, C_S\}$

**Kanalcodierung:** Beispiel Blockcodes: Block der Länge  $k$  wird  $n$  bit lange Kanalwörter abgebildet ( $n > k$ ). Pro Kanalwort können dafür (je nach Code)  $m < n - k$  bit korrigiert werden.



### Modulation:



### Sicherungsschicht und Graphen

#### Serialisierungszeit, Ausbreitungsverzögerung, Übertragungszeit, Bandbreitenverzögerungsprodukt:

Serialisierungszeit:  $t_s = L/r$

Ausbreitungsverzögerung:  $t_p = d/(\nu c)$

Übertragungszeit:  $t_d = t_s + t_p$

Bandbreitenverzögerungsprodukt:  $C = t_p r$

#### Cyclic Redundancy Check (CRC):

Addition = XOR

Checksumme:  $c(x) = m(x)x^n \bmod r(x)$ , mit  $n = \text{grad } r(x)$

Gesendete Nachricht:  $s(x) = m(x)x^n + c(x)$

Überprüfung:  $c'(x) = (s(x) + e(x)) \bmod r(x)$ , mit Fehlermuster  $e(x)$

### Adjazenz- und Distanzmatrix:

Adjazenzmatrix:  $A = (a)_{ij} = \begin{cases} 1 & \exists(i, j) \in A \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Distanzmatrix:  $D = (d)_{ij} = \begin{cases} c_{ij} & \exists(i, j) \in A \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$

min-plus-Produkt:  $D^0 = D^{n-1} \otimes D$ , mit  $d_{ij}^0 = \min_{k \in N} \{d_{ik}^{n-1} + d_{kj}\}, n \geq 1$

## Vermittelungsschicht

**Vermittelungssarten:** Übertragungszeit einer Nachricht der Länge der  $L$  über  $n$  Zwischenstationen mit jeweils identischer Datenrate  $r$  über die Gesamtstrecke:

Leitungsvermittlung:  $T_{LV} = t_s + 4t_p = \frac{L}{r} + \frac{4d}{\nu c}$

Nachrichtenvermittlung:  $T_{NV} = (n+1)t_s + t_p = (n+1) \frac{L_H + L}{r} + \frac{d}{\nu c}, L_H = \text{Länge des Nachrichtenheaders}$

Packetvermittlung:  $T_{PV} = \frac{1}{r} \left( \frac{L}{p_{\max}} \right) L_H + L + n(L_h + p_{\max}) + \frac{d}{\nu c}, L_h = \text{Länge der Paketheder}$

**Round Trip Time (RTT):** RTT zwischen den Knoten  $s, t \in N$  über den Pfad  $\mathcal{P} = \{(s, 1), (1, 2), \dots, (n, t)\}$  und den i. A. nicht symmetrischen Rückweg  $\mathcal{P}'$ :

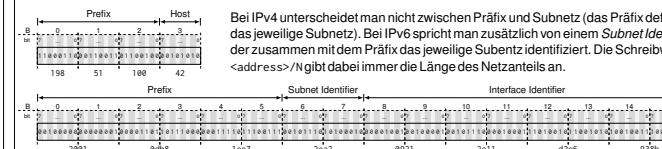
RTT (allgemein):  $\text{RTT} = \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}} (t_s(i, j) + t_p(i, j)) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}'} (t_s(i, j) + t_p(i, j))$

RTT (symmetrische Pfade):  $\text{RTT}(s, t) = 2 \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}} (t_s(i, j) + t_p(i, j))$

### Spezielle IP-Adressen / Adressbereiche:

Adressbereich	Funktion
0..0..0..0/8	Hosts in diesem Netzwerk
127.0..0..0/8	Loopback, speziell 127.0.0.1
10..0..0..0/8	private Adressen
172.16..0..0/12	private Adressen
192.168..0..16	private Adressen
169.254..0..16	Automatic Private IP Addressing
255.255..255.252	Global Broadcast
255.255..255.253	Solicited Node Adressen
255.255..255.254	Link-Local Adressen
fc00..:7/16	Unique Local Unicast Adressen
ff00..:8/16	Multicast Adressen
ff02..:1/128	All Nodes
ff02..:1..ff00..:104	Solicited Node Adressen

### IPv4/6 Adressformat: (Beispiele)



### Transportschicht

#### Schiebefensterprotokolle

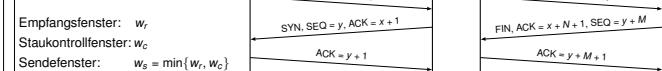
Kardinalität Sequenznummernraum:  $N$ . Maximale Größe des Sendefensters  $w_s$  um Verwechslungen zu vermeiden:

Go-Back-N:  $w_s \leq N - 1$

Selective Repeat:  $w_s \leq \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$

#### Fenster bei TCP

#### TCP-Handshake und TCP-Teardown



**TCP Durchsatz** in der Congestion Avoidance Phase. Annahme: Segmentverlust im Netzwerk ab  $w_s \geq x \cdot \text{MSS}$ .

Zeit zwischen Segmentverlust:  $T = \left(\frac{x}{2} + 1\right) \cdot \text{RTT}$

Anzahl gesendeter Segmente in T:  $n = \frac{3}{8}x^2 + \frac{3}{4}x$

Verlustrate:  $\theta = \frac{1}{n}$

Durchsatz:  $r_{TCP} = \frac{n \cdot \text{MSS}}{T} \cdot (1 - \theta)$

### Anwendungsschicht

#### Präfixfreie Codes

Gültige Codewörter eines **präfixfreien Code** sind niemals Präfix eines anderen Codeworts desselben Codes.

Ein optimaler präfixfreier Code minimiert die mittlere Codewortlänge

$$\sum_{i \in \mathcal{A}} p(i) \cdot |c(i)|,$$

wobei  $p(i)$  die Auftretswahrscheinlichkeit von  $i \in \mathcal{A}$  und  $c(i)$  die Abbildung auf ein entsprechendes Codewort bezeichnen.

#### DNS Resource Records

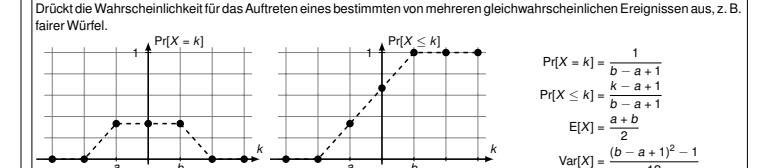
Record-Typ	Funktion
SOA	(Start of Authority) markiert die Wurzel einer Zone
NS	geben die FQDNs der für die Zone autoritativen Nameserver an
A	assoziierten einen FQDN mit einer IPv4-Adresse
AAAA	assoziierten einen FQDN mit einer IPv6-Adresse
CNAME	Alias, weist auf ein „Canonical Name“, welcher wiederum ein FQDN ist
MX	geben den Mailserver als FQDN einer Domain an
TXT	assoziierten einen FQDN mit einem String (Text)
PTR	assoziierten eine IPv4- oder IPv6-Adresse mit einem FQDN (Reverse DNS)

#### Reverse DNS Zonen

IPv4: in-addr.arpa., IPv6: ip6.arpa.

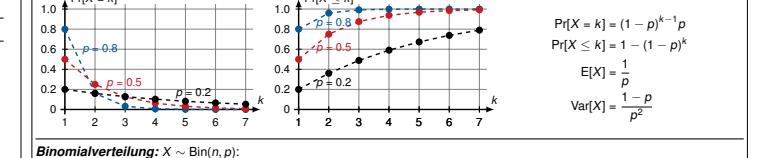
## Wahrscheinlichkeitsverteilungen

#### Discrete Gleichverteilung: $X \sim U(a, b)$ :



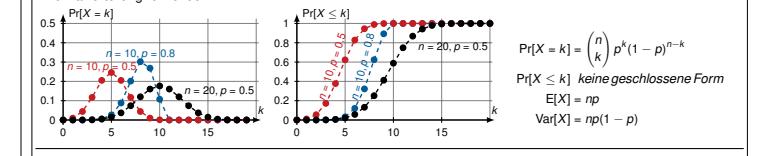
#### Geometrische Verteilung: $X \sim \text{Geo}(p)$ :

Drückt ein zeitdiskretes Warteproblem aus, z. B. zählt die Anzahl der Versuche bis zum Erfolg (bzw. die Anzahl erfolgloser Versuche bis zum Erfolg, wenn der Exponent entsprechend verschoben wird).



#### Binomialverteilung: $X \sim \text{Bin}(n, p)$ :

Drückt die Wahrscheinlichkeit für  $0 \leq k \leq n$  Erfolge bei konstanter Erfolgswahrscheinlichkeit  $p$  aus, z. B. Lotto. Für  $n \rightarrow \infty$  und  $p \rightarrow 0$  erhält man die Poissonverteilung. Für  $n \geq 10$  und  $p < 0.5$  kann man die Poissonverteilung als Näherung für die Binomialverteilung verwenden.



#### Poissonverteilung: $X \sim \text{Po}(\lambda)$ :

Zählt das Auftreten unabhängiger und gleich verteilter Ereignisse mit Rate  $\lambda$ . Stellt für  $\lambda = np$  den Grenzwert der Binomialverteilung ( $n \rightarrow \infty, p \rightarrow 0$ ) dar.

