

### 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																											
24 B	Options / Padding (optional)																											
IPv4 Header																												

0 B	Version																											
4 B	Traffic Class																											
8 B	Flow Label																											
12 B	Next Header																											
16 B	Identification																											
20 B	additional Extension Headers (optional)																											
IPv6 Header																												

No / NH	Protocol	No / NH	Protocol
0x01	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x2f	GRE (General Routing Encapsulation)
0x06	TCP (Transmission Control)	0x3a	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x11	UDP (User Datagram)	0x3b	No Next Header
0x2c	Fragment Header	0x84	SCTP (Stream Control Transmission)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8001	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8001	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8001	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8001	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8001	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8042	WoL	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8035	RARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x814c	SNMP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x86dd	IPv6	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8000	ICMPv4 (Internet Control Management)	0x8000	ICMPv6 (ICMP for IPv6)
0x8006	ARP	0x8000	ICMPv6 (ICMP for

## 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  $\omega = 2\pi/T$

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

### Fouriertransformation:

$s(t) \mapsto S(f)$ ,  $\omega = 2\pi f$  bzw.  $\omega = 2\pi/T$ , falls normiert auf Periode eines Grundimpulses.

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

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

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

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

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

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

### 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:  $C_S = B \log_2(1 + \text{SNR})$

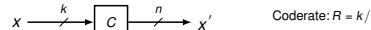
Signal-to-Noise Ratio:  $\text{SNR} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}}$

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

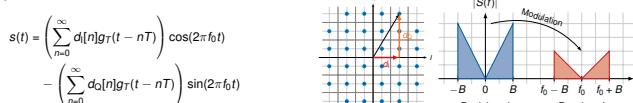
Obere Schranke:  $C_{\max} \leq \min\{C_H, C_S\}$

### 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:  $D = (d)_{ij} = \begin{cases} c_{ij} & \exists(i, j) \in A \\ 0 & \text{wenn } i = j \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$

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

## Vermittelungsschicht

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

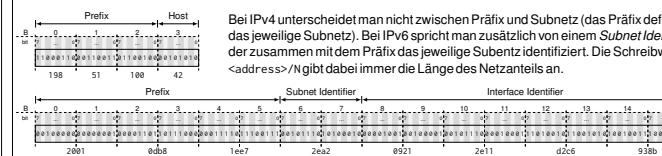
RTT (allgemein):  $\text{RTT} = \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}} (t_s(i, j) + t_p(i, j)) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}'} (t_s(i, j) + t_p(i, j))$

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	Adressbereich	Funktion
0..0..0..0/8	Hosts in diesem Netzwerk	::1/128	nicht-spezifizierte Adresse
127.0..0..0/8	Loopback, speziell 127.0.0.1	::1/128	Loopback
10..0..0..0/8	private Adressen	fe80::/10	Link-Local Adressen
172.16..0..0/12	private Adressen	fc00::/7	Unique Local Unicast Adressen
192.168..0..0/16	private Adressen	ff00::/8	Multicast Adressen
169.254..0..0/16	Automatic Private IP Addressing	ff02::1/128	All Nodes
255.255..255.255/32	Global Broadcast	ff02::1:ff00::104	Solicited Node Adressen

### IPv4/6 Adressformat: (Beispiele)



Bei IPv4 unterscheidet man nicht zwischen Präfix und Subnetz (das Präfix definiert das jeweilige Subnetz). Bei IPv6 spricht man zusätzlich von einem Subnet Identifier, der zusammen mit dem Präfix das jeweilige Subnetz identifiziert. Die Schreibweise <address>/N gibt dabei immer die Länge des Netzanteils an.

### Transportschicht

#### Schiebefensterprotokolle

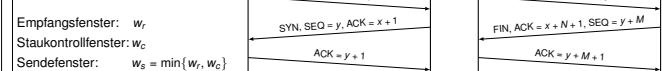
Kardinalität Sequenznummernraum:  $N$ . Maximale Größe des Sendefensters  $w_s$  um Verwechslungen zu vermeiden:

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

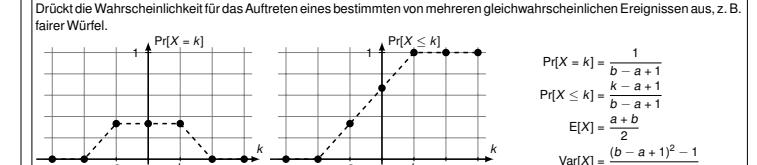
Record-Type	Funktion
SOA	(Start of Authority) markiert die Wurzel einer Zone
NS	geben die FQDNs der für die Zone autoritativen Nameserver an
A	assoziierten einen FQDN mit einer IPv4-Adresse
AAAA	assoziierten einen FQDN mit einer IPv6-Adresse
CNAME	Alias, verweist auf ein „Canonical Name“, welcher wiederum 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.

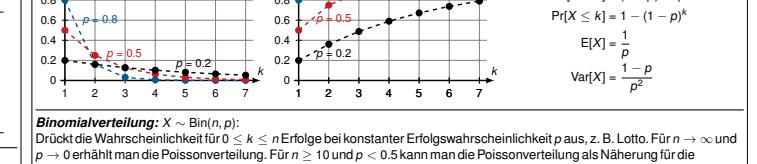
## Wahrscheinlichkeitsverteilungen

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



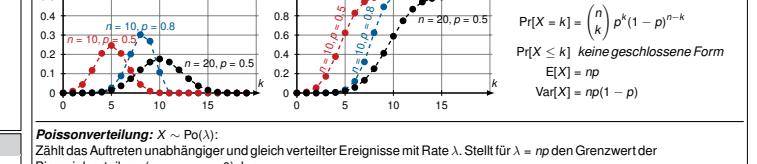
#### Geometrische Verteilung: $X \sim \text{Geo}(\rho)$ :

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).



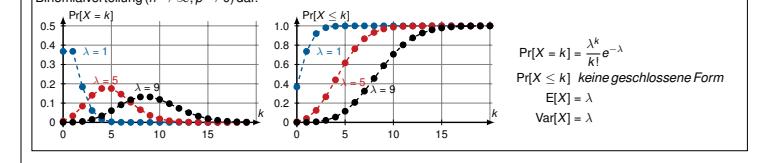
#### Binomialverteilung: $X \sim \text{Bin}(n, p)$ :

Drückt die Wahrscheinlichkeit für  $0 \leq k \leq n$  Erfolg 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.

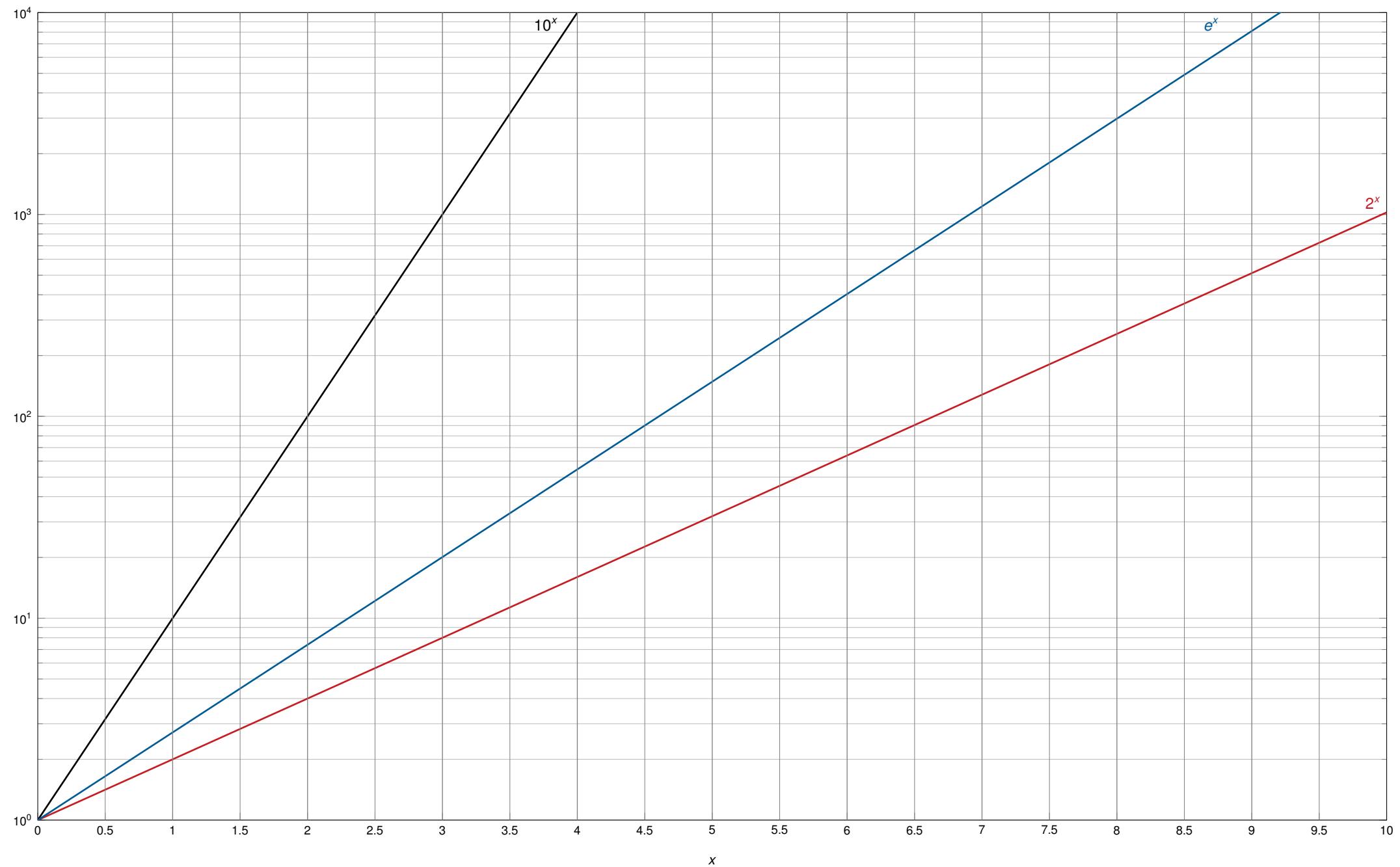


#### Poissonverteilung: $X \sim \text{Po}(\lambda)$ :

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.



Plots zum ablesen verschiedener Funktionswerte auf linearer x-Achse mit logarithmischer y-Achse



Plots zum ablesen verschiedener Funktionswerte auf logarithmischer x-Achse mit linearer y-Achse

