Lehrstuhl für Netzarchitekturen und Netzdienste
Fakultät für Informatik
Technische Universität München

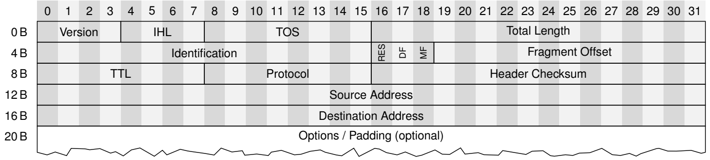
Formelsammlung zu Grundlagen Rechnernetze und Verteilte Systeme (GRNVS IN0010)

Ethernet / IEEE 802.3 Header und Ethertypes

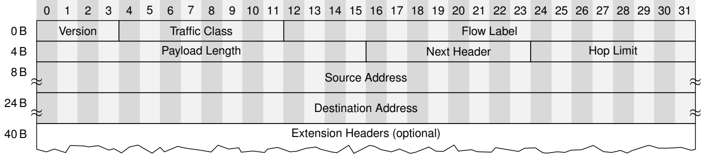
IEEE 802.3 Header

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

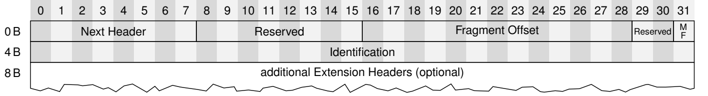
IPv4/6 Header und IP Protocol Numbers bzw. Next Header



IPv4 Header



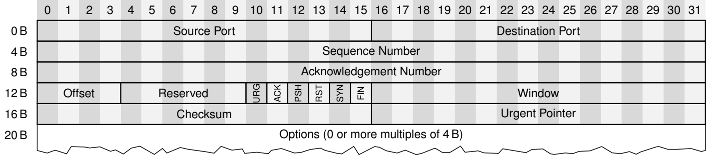
IPv6 Header



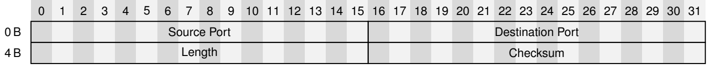
IPv6 Fragmentation Header

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)

TCP/UDP Header und ausgewählte well-known Ports



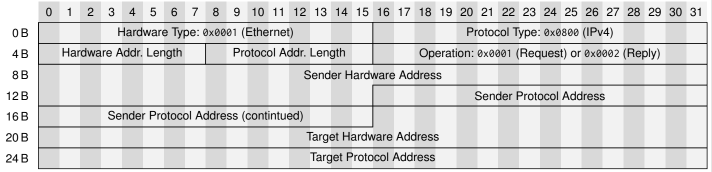
TCP Header



UDP Header

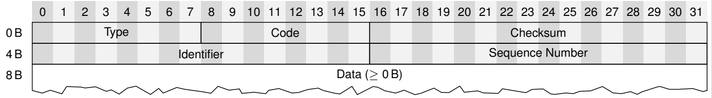
Port	Service Name	Port	Service Name
20/21	ftp	68	bootpc
22	ssh	80	http
23	telnet	110	pop3
25	smtp	443	https
53	domain (dns)	546	dhcpv6-client
67	bootps	547	dhcpv6-server

ARP

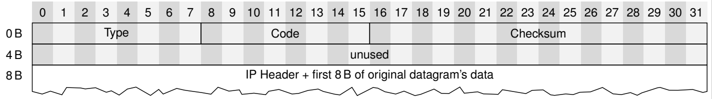


ARP Packet Format

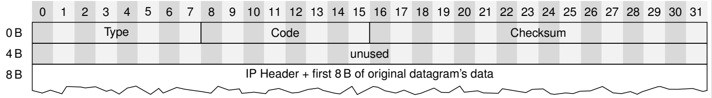
ICMPv4



ICMPv4 Echo Request/Reply



ICMPv4 Time Exceeded



ICMPv4 Destination Unreachable

Type	Code	Description
0 – Echo Reply	0	Echo reply
1 and 2		*Reserved*
3 – Destination Unreachable	0	Destination network unreachable
	1	Destination host unreachable
	2	Destination protocol unreachable
	3	Destination port unreachable
4 – Source Quench	0	Source quench (congestion control)
5 – Redirect Message	0	Redirect Datagram for the Network
	1	Redirect Datagram for the Host
8 – Echo Request	0	Echo request
11 – Time Exceeded	0	TTL expired in transit
	1	Fragment Reassembly Time Exceeded

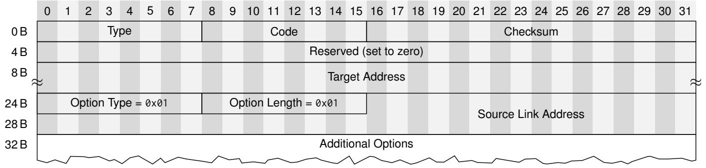
Ausgewählte ICMPv4 Types/Codes

ICMPv6

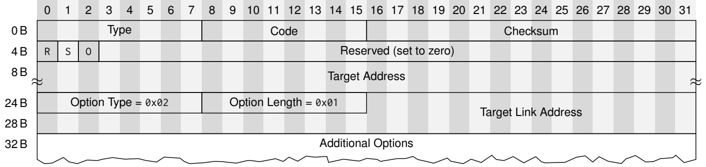
Hinweis: Die folgenden ICMPv6 Nachrichten sind zu ihren ICMPv4-Pendants identisch:

- Echo Request / Reply
- Destination Unreachable
- Time Exceeded

Es gelten jedoch für ICMPv6 Types / Codes (s. unten) die Restriktionen hinsichtlich der minimalen Länge bzw. des Alignments (Padding).



Neighbor Solicitation



Flags: R = Router, S = Solicited, O = Override

Neighbor Advertisement

Type	Code	Description
0		*Reserved*
1 – Destination Unreachable	0	No route to destination
	3	Address unreachable
	4	Port unreachable
2 – Packet too big	0	Packet too big
3 – Time Exceeded	0	Hop limit exceeded in transit
	1	Fragment reassembly time exceeded
128 – Echo Request	0	Echo Request
129 – Echo Reply	0	Echo Reply
133 – Router Solicitation	0	*Neighbor Discovery Protocol (NDP)*
134 – Router Advertisement	0	*Neighbor Discovery Protocol (NDP)*
135 – Neighbor Solicitation	0	*Neighbor Discovery Protocol (NDP)*
136 – Neighbor Advertisement	0	*Neighbor Discovery Protocol (NDP)*
137 – Redirect Message	0	*Neighbor Discovery Protocol (NDP)*

Ausgewählte ICMPv6 Types/Codes

Zahlensysteme 1/2

Dez	Hex	Binär	Ascii	Dez	Hex	Binär	Ascii	Dez	Hex	Binär	Ascii	Dez	Hex	Binär	Ascii
0	00	00000000	NUL	32	20	00100000	SPACE	64	40	01000000	@	96	60	01100000	‘
1	01	00000001	SOH	33	21	00100001	!	65	41	01000001	A	97	61	01100001	a
2	02	00000010	STX	34	22	00100010	”	66	42	01000010	B	98	62	01100010	b
3	03	00000011	ETX	35	23	00100011	#	67	43	01000011	C	99	63	01100011	c
4	04	00000100	EOT	36	24	00100100	$	68	44	01000100	D	100	64	01100100	d
5	05	00000101	ENQ	37	25	00100101	%	69	45	01000101	E	101	65	01100101	e
6	06	00000110	ACK	38	26	00100110	&	70	46	01000110	F	102	66	01100110	f
7	07	00000111	BEL	39	27	00100111	’	71	47	01000111	G	103	67	01100111	g
8	08	00001000	BS	40	28	00101000	(	72	48	01001000	H	104	68	01101000	h
9	09	00001001	HT	41	29	00101001	)	73	49	01001001	I	105	69	01101001	i
10	0a	00001010	LF	42	2a	00101010	*	74	4a	01001010	J	106	6a	01101010	j
11	0b	00001011	VT	43	2b	00101011	+	75	4b	01001011	K	107	6b	01101011	k
12	0c	00001100	FF	44	2c	00101100	,	76	4c	01001100	L	108	6c	01101100	l
13	0d	00001101	CR	45	2d	00101101	-	77	4d	01001101	M	109	6d	01101101	m
14	0e	00001110	SO	46	2e	00101110	.	78	4e	01001110	N	110	6e	01101110	n
15	0f	00001111	SI	47	2f	00101111	/	79	4f	01001111	O	111	6f	01101111	o
16	10	00010000	DLE	48	30	00110000	0	80	50	01010000	P	112	70	01110000	p
17	11	00010001	DC1	49	31	00110001	1	81	51	01010001	Q	113	71	01110001	q
18	12	00010010	DC2	50	32	00110010	2	82	52	01010010	R	114	72	01110010	r
19	13	00010011	DC3	51	33	00110011	3	83	53	01010011	S	115	73	01110011	s
20	14	00010100	DC4	52	34	00110100	4	84	54	01010100	T	116	74	01110100	t
21	15	00010101	NAK	53	35	00110101	5	85	55	01010101	U	117	75	01110101	u
22	16	00010110	SYN	54	36	00110110	6	86	56	01010110	V	118	76	01110110	v
23	17	00010111	ETB	55	37	00110111	7	87	57	01010111	W	119	77	01110111	w
24	18	00011000	CAN	56	38	00111000	8	88	58	01011000	X	120	78	01111000	x
25	19	00011001	EM	57	39	00111001	9	89	59	01011001	Y	121	79	01111001	y
26	1a	00011010	SUB	58	3a	00111010	:	90	5a	01011010	Z	122	7a	01111010	z
27	1b	00011011	ESC	59	3b	00111011	;	91	5b	01011011	[	123	7b	01111011	{
28	1c	00011100	FS	60	3c	00111100	<	92	5c	01011100	\	124	7c	01111100	|
29	1d	00011101	GS	61	3d	00111101	=	93	5d	01011101	]	125	7d	01111101	}
30	1e	00011110	RS	62	3e	00111110	>	94	5e	01011110	^	126	7e	01111110	~
31	1f	00011111	US	63	3f	00111111	?	95	5f	01011111	_	127	7f	01111111	DEL

Zahlensysteme 2/2

Dez	Hex	Binär	Dez	Hex	Binär	Dez	Hex	Binär	Dez	Hex	Binär
128	80	10000000	160	a0	10100000	192	c0	11000000	224	e0	11100000
129	81	10000001	161	a1	10100001	193	c1	11000001	225	e1	11100001
130	82	10000010	162	a2	10100010	194	c2	11000010	226	e2	11100010
131	83	10000011	163	a3	10100011	195	c3	11000011	227	e3	11100011
132	84	10000100	164	a4	10100100	196	c4	11000100	228	e4	11100100
133	85	10000101	165	a5	10100101	197	c5	11000101	229	e5	11100101
134	86	10000110	166	a6	10100110	198	c6	11000110	230	e6	11100110
135	87	10000111	167	a7	10100111	199	c7	11000111	231	e7	11100111
136	88	10001000	168	a8	10101000	200	c8	11001000	232	e8	11101000
137	89	10001001	169	a9	10101001	201	c9	11001001	233	e9	11101001
138	8a	10001010	170	aa	10101010	202	ca	11001010	234	ea	11101010
139	8b	10001011	171	ab	10101011	203	cb	11001011	235	eb	11101011
140	8c	10001100	172	ac	10101100	204	cc	11001100	236	ec	11101100
141	8d	10001101	173	ad	10101101	205	cd	11001101	237	ed	11101101
142	8e	10001110	174	ae	10101110	206	ce	11001110	238	ee	11101110
143	8f	10001111	175	af	10101111	207	cf	11001111	239	ef	11101111
144	90	10010000	176	b0	10110000	208	d0	11010000	240	f0	11110000
145	91	10010001	177	b1	10110001	209	d1	11010001	241	f1	11110001
146	92	10010010	178	b2	10110010	210	d2	11010010	242	f2	11110010
147	93	10010011	179	b3	10110011	211	d3	11010011	243	f3	11110011
148	94	10010100	180	b4	10110100	212	d4	11010100	244	f4	11110100
149	95	10010101	181	b5	10110101	213	d5	11010101	245	f5	11110101
150	96	10010110	182	b6	10110110	214	d6	11010110	246	f6	11110110
151	97	10010111	183	b7	10110111	215	d7	11010111	247	f7	11110111
152	98	10011000	184	b8	10111000	216	d8	11011000	248	f8	11111000
153	99	10011001	185	b9	10111001	217	d9	11011001	249	f9	11111001
154	9a	10011010	186	ba	10111010	218	da	11011010	250	fa	11111010
155	9b	10011011	187	bb	10111011	219	db	11011011	251	fb	11111011
156	9c	10011100	188	bc	10111100	220	dc	11011100	252	fc	11111100
157	9d	10011101	189	bd	10111101	221	dd	11011101	253	fd	11111101
158	9e	10011110	190	be	10111110	222	de	11011110	254	fe	11111110
159	9f	10011111	191	bf	10111111	223	df	11011111	255	ff	11111111

Physikalische Schicht

Physikalische Konstanten/Zusammenhänge:

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

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

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

Fourierreihe: Kreisfrequenz $\omega = 2\pi/T$

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

Fouriertransformation: $s(t) \circ\!\!-\!\!\bullet\, S(f)$

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

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: $Q = \{a + \Delta/2, a + \Delta(1 + 1/2), \dots, a + \Delta(M - 1 + 1/2)\}$
$\mathbb{R} \to Q,\ \hat{s}[n] \mapsto \overline{s}[n]$ (Runden)

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

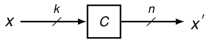
Quantisierungsfehler: $q_e(t) = s(t) - \overline{s}(t) \le \Delta/2$, wenn $a \le s(t) \le b$

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

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 (Kanalkodierung), was jedoch am Informationsgehalt der Nachricht nichts ändert.

Hartley: $C_H = 2B\log_2(M)$
Shannon/Hartley: $C_S = B\log_2(1 + \mathrm{SNR})$
Signal-to-Noise Ratio: $\mathrm{SNR} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}}$
Signal-to-Noise Ratio dB: $\mathrm{SNR\,dB} = 10\log_{10}(\mathrm{SNR})$
Obere Schranke: $C_{\max} \le \min\{C_H, C_S\}$

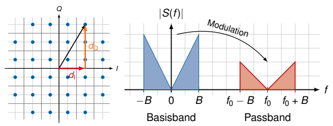
Kanalkodierung: Beispiel Blockcodes: Block der Länge k bit wird n bit lange Kanalwörter abgebildet ($n > k$). Pro Kanalwort können dafür (je nach Code) $m < n - k$ bit korrigiert werden.



Coderate: $R = k/n$

Modulation:

$$s(t) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} d_{\mathrm{I}}[n]g_T(t - nT)\right)\cos(2\pi f_0 t) - \left(\sum_{n=0}^{\infty} d_{\mathrm{Q}}[n]g_T(t - nT)\right)\sin(2\pi f_0 t)$$



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 $n = \mathrm{grad}\, r(x)$
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: $\boldsymbol{A} = (a)_{ij} = \begin{cases} 1 & \exists(i,j) \in \mathcal{A} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ Distanzmatrix: $\boldsymbol{D} = (d)_{ij} = \begin{cases} c_{ij} & \exists(i,j) \in \mathcal{A} \\ 0 & \text{wenn } i = j \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$

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

Vermittlungsschicht

Vermittlungsarten: Übertragungszeit einer Nachricht der Länge der L über n Zwischenstationen mit jeweils identischer Datenrate r über die Gesamtdistanz d:

Leitungsvermittlung: $T_{\mathrm{LV}} = t_s + 4t_p = \frac{L}{r} + \frac{4d}{\nu c}$
Nachrichtenvermittlung: $T_{\mathrm{NV}} = (n+1)t_s + t_p = (n+1)\frac{L_{\mathrm{H}} + L}{r} + \frac{d}{\nu c}$, L_H = Länge des Nachrichtenheaders
Packetvermittlung: $T_{\mathrm{PV}} = \frac{1}{r}\left(\left\lceil \frac{L}{p_{\max}} \right\rceil L_h + L + n(L_h + p_{\max})\right) + \frac{d}{\nu c}$, L_h = Länge der Paketheader

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): $\mathrm{RTT}(s,t) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}} \left(t_s(i,j) + t_p(i,j)\right) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}'} \left(t_s(i,j) + t_p(i,j)\right)$

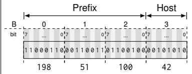
RTT (symmetrische Pfade): $\mathrm{RTT}(s,t) = 2\sum_{(i,j) \in \mathcal{P}} \left(t_s(i,j) + t_p(i,j)\right)$

Spezielle IP-Adressen / -Adressbereiche:

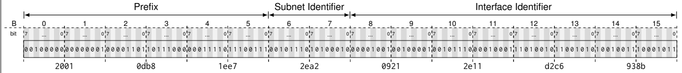
Adressbereich	Funktion
`0.0.0.0/8`	Hosts in diesem Netzwerk
`127.0.0.0/8`	Loopback, speziell 127.0.0.1
`10.0.0.0/8`	private Adressen
`172.16.0.0/12`	private Adressen
`192.168.0.0/16`	private Adressen
`169.254.0.0/16`	Automatic Private IP Addressing
`255.255.255.255/32`	Global Broadcast

Adressbereich	Funktion
`::/128`	nicht-spezifizierte Adresse
`::1/128`	Loopback
`fe80::/10`	Link-Local Adressen
`fc00::/7`	Unique-Local Unicast Adressen
`ff00::/8`	Multicast Adressen
`ff02::1/128`	All Nodes
`ff02::1:ff00:0/104`	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 Subentz identifiziert. Die Schreibweise `<address>/N` gibt dabei immer die Länge des Netzanteils an.



Transportschicht

Schiebefensterprotokolle

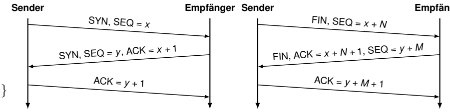
Kardinalität Sequenznummernraum: N. Maximale Größe des Sendefensters w_s um Verwechselungen zu vermeiden:

Go-Back-N: $w_s \le N - 1$
Selective Repeat: $w_s \le \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$

Fenster bei TCP

Empfangsfenster: w_r
Staukontrollfenster: w_c
Sendefenster: $w_s = \min\{w_r, w_c\}$

TCP-Handshake und TCP-Teardown



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

Zeit zwischen Segmentverlust: $T = \left(\frac{x}{2} + 1\right) \cdot \mathrm{RTT}$
Anzahl gesendeter Segemente in T: $n = \frac{3}{8}x^2 + \frac{3}{4}x$
Verlustrate: $\theta = \frac{1}{n}$
Durchsatz: $r_{TCP} = \frac{n \cdot \mathrm{MSS}}{\mathrm{T}} \cdot (1 - \theta)$

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

DNS Resource Records

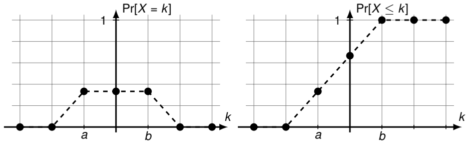
Record-Typ	Funktion
`SOA`	(Start of Authority) markiert die Wurzel einer Zone
`NS`	geben die FQDNs der für die Zone autoritativen Nameserver an
`A`	assoziieren einen FQDN mit einer IPv4-Adresse
`AAAA`	assoziieren einen FQDN mit einer IPv6-Adresse
`CNAME`	Alias, verweist auf ein „Canonical Name“, welcher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

Reverse DNS Zonen

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

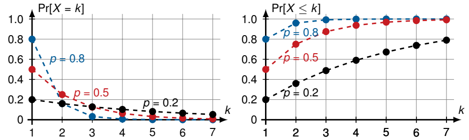
Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Diskrete Gleichverteilung: $X \sim \mathrm{U}(a,b)$:
Drückt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten von mehreren gleichwahrscheinlichen Ereignissen aus, z. B. fairer Würfel.



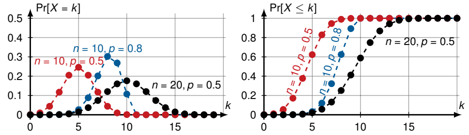
$\Pr[X = k] = \frac{1}{b - a + 1}$
$\Pr[X \le k] = \frac{k - a + 1}{b - a + 1}$
$\mathrm{E}[X] = \frac{a + b}{2}$
$\mathrm{Var}[X] = \frac{(b - a + 1)^2 - 1}{12}$

Geometrische Verteilung: $X \sim \mathrm{Geo}(p)$:
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).



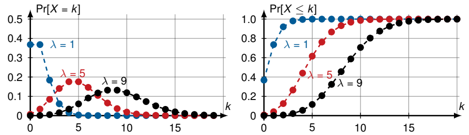
$\Pr[X = k] = (1 - p)^{k-1}p$
$\Pr[X \le k] = 1 - (1 - p)^k$
$\mathrm{E}[X] = \frac{1}{p}$
$\mathrm{Var}[X] = \frac{1 - p}{p^2}$

Binomialverteilung: $X \sim \mathrm{Bin}(n,p)$:
Drückt die Wahrscheinlichkeit für $0 \le k \le n$ Erfolge bei konstanter Erfolgswahrscheinlichkeit p aus, z. B. Lotto. Für $n \to \infty$ und $p \to 0$ erhählt man die Poissonverteilung. Für $n \ge 10$ und $p < 0.5$ kann man die Poissonverteilung als Näherung für die Binomialverteilung verwenden.



$\Pr[X = k] = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$
$\Pr[X \le k]$ *keine geschlossene Form*
$\mathrm{E}[X] = np$
$\mathrm{Var}[X] = np(1 - p)$

Poissonverteilung: $X \sim \mathrm{Po}(\lambda)$:
Zählt das Auftreten unabhängiger und gleich verteilter Ereignisse mit Rate λ. Stellt für $\lambda = np$ den Grenzwert der Binomialverteilung ($n \to \infty, p \to 0$) dar.



$\Pr[X = k] = \frac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda}$
$\Pr[X \le k]$ *keine geschlossene Form*
$\mathrm{E}[X] = \lambda$
$\mathrm{Var}[X] = \lambda$