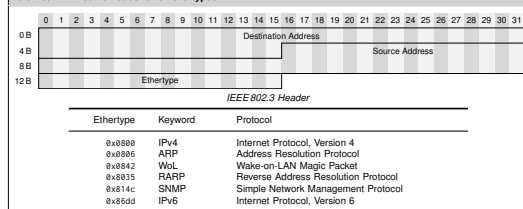
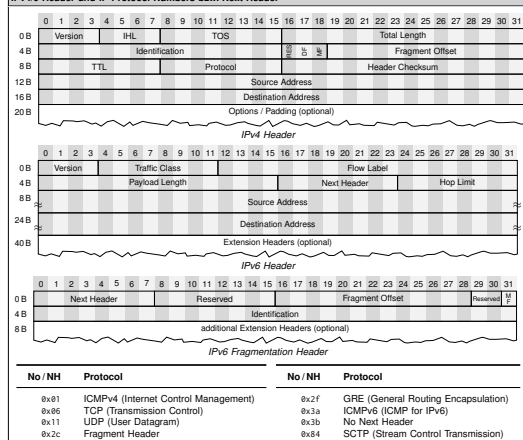


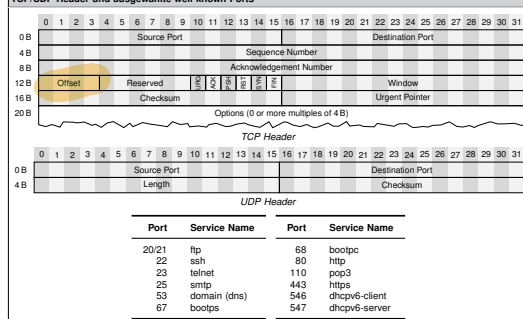
Ethernet / IEEE 802.3 Header and Ethertypes



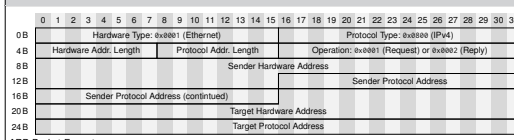
IPv4/6 Header and IP Protocol Numbers bzw. Next Header



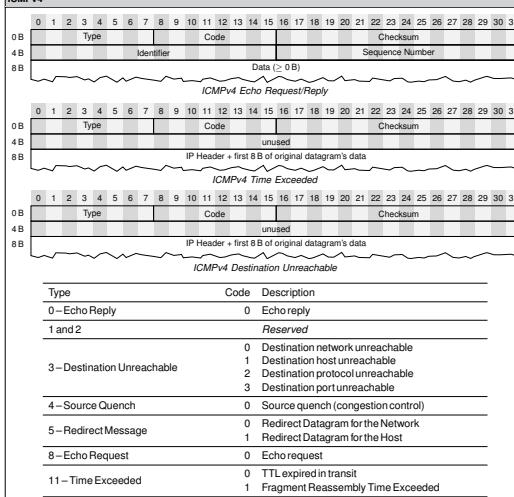
TCP/UDP Header and ausgewählte well-known Ports



ARP



ICMPv4

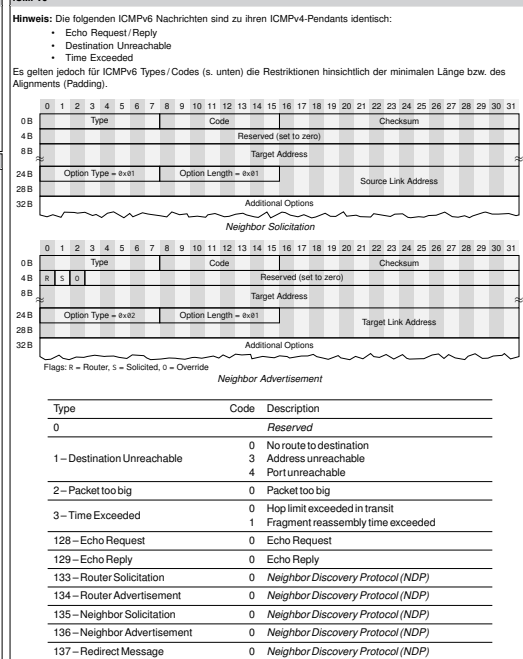


Ausgewählte ICMPv4 Types/Codes

Zahlsysteme 1/2

Dec	Hex	Binär	ASCII	Dec	Hex	Binär	ASCII	Dec	Hex	Binär	ASCII	Dec	Hex	Binär	ASCII
0	00	00000000	NUL	32	20	00100000	SPACE	64	40	00100000		96	60	00100000	
1	01	00000001	SOH	33	21	00100001		65	41	00100001	A	97	61	00100001	a
2	02	00000010	STX	34	22	00100010		66	42	00100010	B	98	62	00100010	b
3	03	00000011	ETX	35	23	00100011		67	43	00100011	C	99	63	00100011	c
4	04	00000100	EOF	36	24	00100100		68	44	00100100	D	100	64	00100100	d
5	05	00000101	ENQ	37	25	00100101		69	45	00100101	E	101	65	00100101	e
6	06	00000110	ACK	38	26	00100110		70	46	00100110	F	102	66	00100110	f
7	07	00000111	BEL	39	27	00100111		71	47	00100111	G	103	67	00100111	g
8	08	00001000	BS	40	28	00101000		72	48	00101000	H	104	68	00101000	h
9	09	00001001	HT	41	29	00101001		73	49	00101001	I	105	69	00101001	i
10	0a	00001010	LF	42	2a	00101010		74	4a	00101010	J	106	6a	00101010	j
11	0b	00001011	VT	43	2b	00101011		75	4b	00101011	K	107	6b	00101011	k
12	0c	00001100	FF	44	2c	00101100		76	4c	00101100	L	108	6c	00101100	l
13	0d	00001101	CR	45	2d	00101101		77	4d	00101101	M	109	6d	00101101	m
14	0e	00001110	SO	46	2e	00101110		78	4e	00101110	N	110	6e	00101110	n
15	0f	00001111	SI	47	2f	00101111		79	4f	00101111	O	111	6f	00101111	o
16	10	00001000	DLE	48	30	00101000		80	50	00101000	P	112	70	00101000	p
17	11	00001001	DC1	49	31	00101001		81	51	00101001	Q	113	71	00101001	q
18	12	00001010	DC2	50	32	00101010		82	52	00101010	R	114	72	00101010	r
19	13	00001011	DC3	51	33	00101011		83	53	00101011	S	115	73	00101011	s
20	14	00001100	DC4	52	34	00101100		84	54	00101100	T	116	74	00101100	t
21	15	00001101	NK	53	35	00101101		85	55	00101101	U	117	75	00101101	u
22	16	00001110	SYN	54	36	00101110		86	56	00101110	V	118	76	00101110	v
23	17	00001111	ETB	55	37	00101111		87	57	00101111	W	119	77	00101111	w
24	18	00010000	CAN	56	38	00110000		88	58	00110000	X	120	78	00110000	x
25	19	00010001	EM	57	39	00110001		89	59	00110001	Y	121	79	00110001	y
26	1a	00010010	GDB	58	3a	00110010		90	5a	00110010	Z	122	7a	00110010	z
27	1b	00010011	ESC	59	3b	00110011		91	5b	00110011	[123	7b	00110011	{
28	1c	00010100	FS	60	3c	00110100		92	5c	00110100	\	124	7c	00110100	
29	1d	00010101	GS	61	3d	00110101		93	5d	00110101]	125	7d	00110101	}
30	1e	00010110	RS	62	3e	00110110		94	5e	00110110	^	126	7e	00110110	~
31	1f	00010111	US	63	3f	00110111		95	5f	00110111	_	127	7f	00110111	DEL

ICMPv6



Ausgewählte ICMPv6 Types/Codes

Zahlsysteme 2/2

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

Physikalische Schicht

Physikalischen Konstanten Zusammenhänge:

Lichtgeschwindigkeit: $c_0 = 3 \cdot 10^8$ 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 $\omega = 2\pi/T$

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

Fouriertransformation: $S(f) \leftrightarrow s(t)$

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

Abtastung, Quantisierung und Rekonstruktion:

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

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

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

Stufenbreite: $\Delta = \frac{b-a}{M}$ mit $M = 2^N$ Stellen bei N Bit Genauigkeit

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

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

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

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

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

Hartley: $C_0 = 2B \log_2(M)$
Shannon/Hartley: $C_0 = 2B \log_2(1 + \text{SNR})$
Signal-to-Noise Ratio: $\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n}$ = Signalleistung / Rauschleistung
Signal-to-Noise Ratio (dB): $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(\text{SNR})$
Obere Schranke: $C_{\text{max}} \leq \min\{C_0, C_S\}$

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

$$X \xrightarrow{k} \boxed{C} \xrightarrow{n} X' \quad \text{Coderate: } R = k/n$$

Modulation:

$$s(t) = \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n \delta(t - nT) \right) \cos(2\pi f_c t) \quad \text{Modulator}$$
$$\left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n \delta(t - nT) \right) \sin(2\pi f_c t) \quad \text{Demodulator}$$

Beispielsband: $-B$ 0 B $f_c - B$ f_c $f_c + B$ f

Sicherungsschicht und Graphen

Serialisierungszust, Ausbreitungsverzögerung, Übertragungszeit, Bandbreitenverzögerungsprodukt:

Serialisierungszeit: $t_s = L/r$
Ausbreitungsverzögerung: $t_p = d/(v/c)$
Übertragungszeit: $t_d = t_s + t_p$
Bandbreitenverzögerungsprodukt: $C \cdot t_p$

Cyclic Redundancy Check (CRC): XOR

Checksumme: $c(x) = m(x) \cdot x^d \bmod r(x)$, mit $n = \text{grad}(r(x))$
Gesendete Nachricht: $s(x) = m(x) \cdot x^d + c(x)$
Überprüfung: $c'(x) = (s(x) + a(x)) \bmod r(x)$, mit Fehlermuster $e(x)$

Adjazenz- und Distanzmatrix:

Adjazenzmatrix: $A = (a_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } (i,j) \in A \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ Distanzmatrix: $D = (d_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{falls } (i,j) \in A \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$
min-plus-Produkt: $D^n = A^n \circ D^{-1} \circ A$, mit $d_{ij}^n = \min_{k \in \mathcal{V}} \{d_{ik}^{n-1} + d_{kj}\}$, $n \geq 1$

Vermittlungsschicht

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

$$\text{Leitungsvermittlung: } T_{CV} = t_s + 4t_p = \frac{L}{r} + \frac{4d}{v}$$

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

$$\text{Packetvermittlung: } T_{PV} = \frac{1}{r} \left(\frac{L}{P_{\text{max}}} \right) L + L + n(L + P_{\text{max}}) + \frac{d}{v}, \quad L_0 = \text{Länge der Paketheader}$$

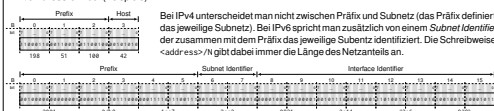
Round Trip Time (RTT): RTT zwischen den Knoten $s, t \in \mathcal{V}$ über den Pfad $P = \{(s, 1), (1, 2), \dots, (n, t)\}$ und den i . nicht symmetrischen Rückweg P' :

$$\text{RTT (allgemein): } \text{RTT}(s, t) = \sum_{(i,j) \in P} (t_{s,i}(i) + t_{p,i}(i)) + \sum_{(i,j) \in P'} (t_{p,i}(i) + t_{s,i}(i))$$
$$\text{RTT (symmetrische Pfade): } \text{RTT}(s, t) = 2 \sum_{(i,j) \in P} (t_{s,i}(i) + t_{p,i}(i))$$

Spezielle IP-Adressen / Adressbereiche:

Adressbereich	Funktion	Adressbereich	Funktion
0.0.0.0/8	Hosts in diesem Netzwerk	::/128	nicht-spezifizierte Adresse
127.0.0.0/8	Loopback, speziell 127.0.0.1	::/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::/128	All Nodes
255.255.255/32	Default Broadcast	ff02::1	Solicited Node Adressen

IPv6 Adressformat (Beispiele)



Transportschicht

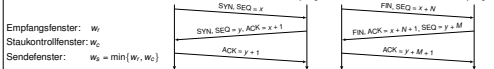
Schiebeprotokolle

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

Go-Back-N: $w_s \leq N - 1$
Selective Repeat: $w_s \leq \frac{N}{2}$

TCP-Handshake und TCP-Tear-down

Fenster bei TCP



TCP Durchsatz in der Congestion Avoidance Phase. Annahme: Segmentverlust im Netzwerk ab $w_c \geq x$ - MSS.

Zeit zwischen Segmentverlust: $T = \left(\frac{2}{\lambda} + 1 \right) \cdot \text{RTT}$
Anzahl gesendeter Segmente in T : $n = \frac{3}{8} \cdot \frac{2}{\lambda} + \frac{3}{4}$
Verlustrate: $\theta = \frac{1}{n}$
Durchsatz: $\frac{n \cdot \text{MSS}}{T} \cdot (1 - \theta)$

Anwendungsschicht

Präfixfreie Codes

Gültige Codewörter eines präfixfreien Code sind niemals Präfix eines anderen Codewörts desselben Codes. Ein optimaler präfixfreier Code minimiert die mittlere Codewortlänge.

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

wobei $p(i)$ die Auftretenswahrscheinlichkeit 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	assoziiieren einen FQDN mit einer IPv4-Adresse
AAAA	assoziiieren einen FQDN mit einer IPv6-Adresse
CNAME	Alias, verweist auf ein „Canonical Name“, welcher wiederum ein FQDN ist
KX	geben den Mailserver als FQDN einer Domain an
TXT	assoziiieren einen FQDN mit einem String (Text)
PTR	assoziiieren eine IPv4- oder IPv6-Adresse mit einem FQDN (Reverse DNS)

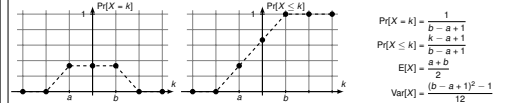
Reverse DNS Zonen

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

Wahrscheinlichkeitsverteilungen

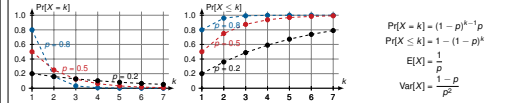
Diskrete Gleichverteilung: $X \sim U(a, b)$:

Drückt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten von mehreren gleichwahrscheinlichen Ereignissen aus, z. B. einer Würfel.



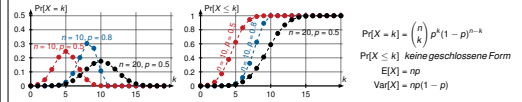
Geometrische Verteilung: $X \sim \text{Geo}(p)$:

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 die Poissonverteilung als Näherung für die Binomialverteilung verwendet werden.



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

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

