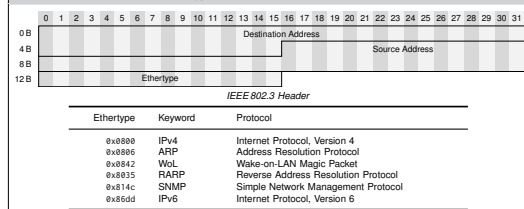
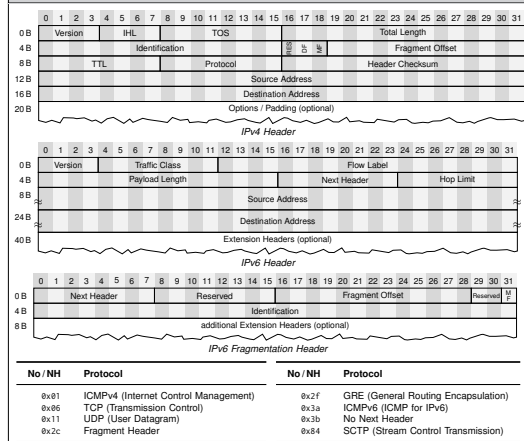


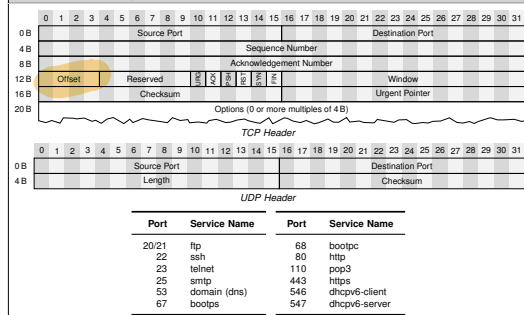
Ethernet / IEEE 802.3 Header and Ethertypes



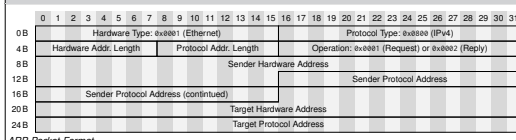
IPv4/6 Header and IP Protocol Numbers bzw. Next Header



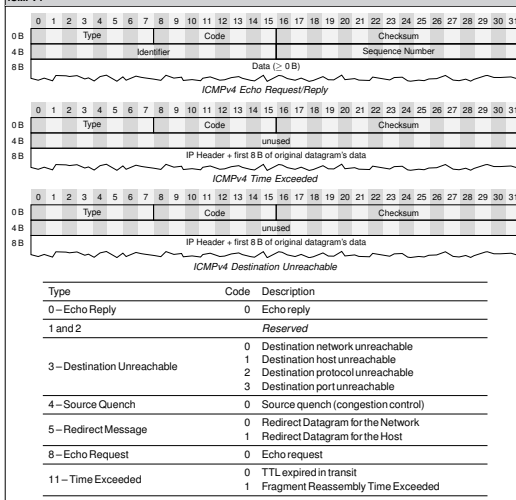
TCP/UDP Header and ausgewählte well-known Ports



ARP



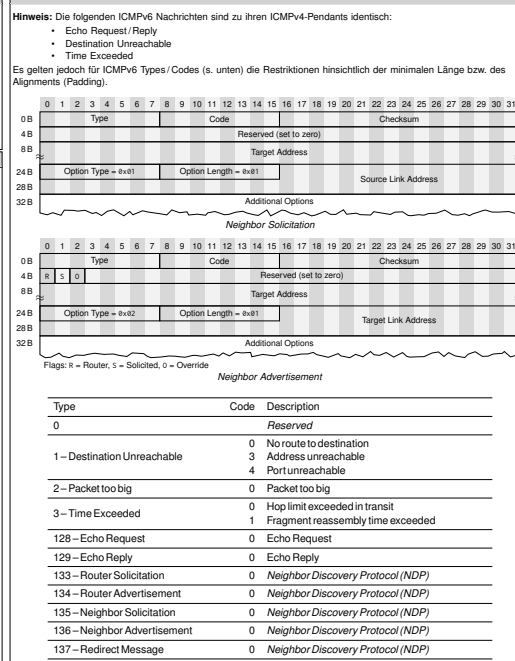
ICMPv4



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	0	80	50	00101000	P	112	70	00101000	p
17	11	00001001	DC1	49	31	00101001	1	81	51	00101001	Q	113	71	00101001	q
18	12	00001010	DC2	50	32	00101010	2	82	52	00101010	R	114	72	00101010	r
19	13	00001011	DC3	51	33	00101011	3	83	53	00101011	S	115	73	00101011	s
20	14	00001100	DC4	52	34	00101100	4	84	54	00101100	T	116	74	00101100	t
21	15	00001101	NAK	53	35	00101101	5	85	55	00101101	U	117	75	00101101	u
22	16	00001110	SYN	54	36	00101110	6	86	56	00101110	V	118	76	00101110	v
23	17	00001111	ETB	55	37	00101111	7	87	57	00101111	W	119	77	00101111	w
24	18	00010000	CAN	56	38	00110000	8	88	58	00110000	X	120	78	00110000	x
25	19	00010001	EM	57	39	00110001	9	89	59	00110001	Y	121	79	00110001	y
26	1A	00010010	SUB	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



Zahlsysteme 2/2

	Dec	Hex	Binär	Dec	Hex	Binär	Dec	Hex	Binär	Dec	Hex	Binär			
128	80	00000000		160	A0	00000000	SPACE	192	C0	00000000	@	224	E0	00000000	`
129	81	00000001		161	A1	00000001	!	193	C1	00000001	A	225	E1	00000001	a
130	82	00000010		162	A2	00000010	"	194	C2	00000010	B	226	E2	00000010	b
131	83	00000011		163	A3	00000011	#	195	C3	00000011	C	227	E3	00000011	c
132	84	00000100		164	A4	00000100	\$	196	C4	00000100	D	228	E4	00000100	d
133	85	00000101		165	A5	00000101	%	197	C5	00000101	E	229	E5	00000101	e
134	86	00000110		166	A6	00000110	&	198	C6	00000110	F	230	E6	00000110	f
135	87	00000111		167	A7	00000111	'	199	C7	00000111	G	231	E7	00000111	g
136	88	00001000		168	A8	00001000	(	200	C8	00001000	H	232	E8	00001000	h
137	89	00001001		169	A9	00001001	)	201	C9	00001001	I	233	E9	00001001	i
138	8A	00001010		170	AA	00001010	*	202	CA	00001010	J	234	EA	00001010	j
139	8B	00001011		171	AB	00001011	+	203	CB	00001011	K	235	EB	00001011	k
140	8C	00001100		172	AC	00001100	,	204	CC	00001100	L	236	EC	00001100	l
141	8D	00001101		173	AD	00001101	-	205	CD	00001101	M	237	ED	00001101	m
142	8E	00001110		174	AE	00001110	.	206	CE	00001110	N	238	EE	00001110	n
143	8F	00001111		175	AF	00001111	/	207	CF	00001111	O	239	EF	00001111	o
144	90	00001000		176	B0	00001000	0	208	D0	00001000	P	240	F0	00001000	p
145	91	00001001		177	B1	00001001	1	209	D1	00001001	Q	241	F1	00001001	q
146	92	00001010		178	B2	00001010	2	210	D2	00001010	R	242	F2	00001010	r
147	93	00001011		179	B3	00001011	3	211	D3	00001011	S	243	F3	00001011	s
148	94	00001100		180	B4	00001100	4	212	D4	00001100	T	244	F4	00001100	t
149	95	00001101		181	B5	00001101	5	213	D5	00001101	U	245	F5	00001101	u
150	96	00001110		182	B6	00001110	6	214	D6	00001110	V	246	F6	00001110	v
151	97	00001111		183	B7	00001111	7	215	D7	00001111	W	247	F7	00001111	w
152	98	00010000		184	B8	00010000	8	216	D8	00010000	X	248	F8	00010000	x
153	99	00010001		185	B9	00010001	9	217	D9	00010001	Y	249	F9	00010001	y
154	9A	00010010		186	BA	00010010	:	218	DA	00010010	z	250	FA	00010010	z
155	9B	00010011		187	BB	00010011	;	219	DB	00010011	[	251	FB	00010011	[
156	9C	00011000		188	BC	00011000	<	220	DC	00011000	\	252	FC	00011000	\
157	9D	00011001		189	BD	00011001	=	221	DD	00011001	^	253	FD	00011001	^
158	9E	00011010		190	BE	00011010	>	222	DE	00011010	_	254	FE	00011010	_
159	9F	00011011		191	BF	00011011	?	223	DF	00011011		255	FF	00011011	

Physikalische Schicht

Physikalischen Konstanten Zusammenhänge:

- Lichtgeschwindigkeit: $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$ m/s
Relative Ausbreitungsgeschwindigkeit in Kupfer / Glas: $v \approx 2/3$
Relative Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum / Luft: $v \approx 1$
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: $s(t) \leftrightarrow S(f)$

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

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: $q_e(t) = s(t) - \hat{s}(t) \leq \Delta/2$, 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: $C_H = 2B \log_2(M)$
Shannon/Hartley: $C_S = B \log_2(1 + \text{SNR})$
Signal-to-Noise Ratio: $\text{SNR} = \frac{P_S}{P_N}$ = Rauschleistung
Signal-to-Noise Ratio (dB): $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(\text{SNR})$
Obere Schranke: $C_{\text{max}} \leq \min\{C_H, C_S\}$

Kanalkodierung: Beispiel Blockcodes: Block der Länge k bit wird in n bit lange Kanalkodewörter abgebildet ($n > k$). Pro Kanalkodewort 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:

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

Sicherungsschicht und Graphen

Serialisierungszust, Ausbreitungsverzögerung, Übertragungszeit, Bandbreitenverzögerungsprodukt:

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

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: $c'(x) = (s(x) + e(x)) \bmod r(x)$, 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: $D = (d_{ij}) = \begin{cases} 0 & \exists (i,j) \in A \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$

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

Vermittlungsschicht

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

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

$$\text{Nachrichtenvermittlung: } T_{NV} = (n+1)t_s + t_p = (n+1)\frac{L}{r} + \frac{d}{v \cdot c}, L_0 = \text{Länge des Nachrichtenheaders}$$

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

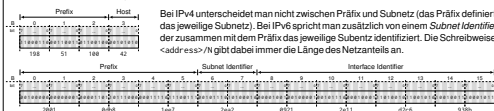
Round Trip Time (RTT): RTT zwischen den Knoten $s, t \in \mathcal{N}$ über den Pfad $P = \{(s, 1), (1, 2), \dots, (n, t)\}$ und den i . nicht symmetrischen Rückweg P' :

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

Spezielle IP-Adressen / Adressbereiche:

Adressbereich	Funktion	Adressbereich	Funktion
0.0.0.0/8	Hosts in diesem Netzwerk	::/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	Global Broadcast	ff02::1	Solicited Node Adressen

IPv6 Adressstruktur (Beispiele)



Transportschicht

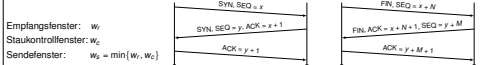
Schiebeprotokolle

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

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

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

Anwendungsschicht

Präfixfreie Codes

Gültige Codewörter eines präfixfreien Codes 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
MX	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)

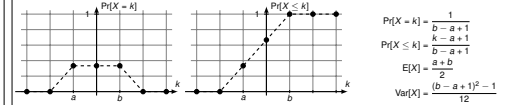
Reverse DNS Zonen

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

Wahrscheinlichkeitsverteilungen

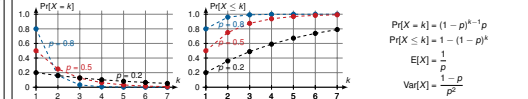
Diskrete Gleichverteilung: $X \sim \text{Un}(a, b)$:

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



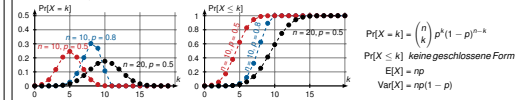
Geometrische Verteilung: $X \sim \text{Geo}(p)$:

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.

