

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>'Klassisches' IPv4/UDP/TCP</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Grundlagen der IP-Netze</b>	<b>3</b>
1.1	Entwicklung des Internet . . . . .	4
1.1.1	Internet vor der Nutzung des WWW . . . . .	4
1.1.2	Die Schaffung des WWW . . . . .	6
1.1.3	Internet nach der Etablierung des WWW . . . . .	9
1.1.4	Meilensteine der Internet-Entwicklung und Trends . . . . .	10
1.2	Funktionen der Kommunikationsprotokolle . . . . .	17
1.2.1	Prinzipien der Fehlerkontrolle . . . . .	18
1.2.2	Realisierung der Flusskontrolle . . . . .	20
1.2.3	Überlastkontrolle . . . . .	22
1.3	Schichtenmodell der Kommunikation . . . . .	23
1.3.1	Konzept des OSI-Referenzmodells . . . . .	24
1.3.2	Schichtenmodell der Protokollfamilie TCP/IP . . . . .	27
1.4	Allgemeine Prinzipien der IP-Kommunikation . . . . .	29
1.4.1	Bildung von IP-Paketen . . . . .	30
1.4.2	Netzwerkschicht in IP-Netzen . . . . .	31
1.4.3	Verbindungslose IP-Kommunikation im Internet . . . . .	33
1.4.4	Transportschicht in IP-Netzen . . . . .	34
1.4.5	Multiplexmodell der Protokollfamilie TCP/IP . . . . .	37
1.5	Komponenten der Protokollfamilie TCP/IP . . . . .	38
1.5.1	Protokolle der Netzwerkschicht . . . . .	38
1.5.2	Protokolle der Transportschicht . . . . .	39
1.5.3	Protokolle der Supportschicht und für Echtzeitkommunikation . . . . .	40
1.5.4	Komponenten der Anwendungsschicht . . . . .	42
1.6	IETF und Internet-Standards . . . . .	44
1.7	Schlussbemerkungen . . . . .	46
1.8	Verständnisfragen . . . . .	48
<b>2</b>	<b>Sicherheit in der IP-Kommunikation</b>	<b>49</b>
2.1	Grundlagen und Entwicklung der IT-Sicherheit . . . . .	50
2.1.1	Daten und ihre Nutzung . . . . .	51
2.1.2	Rolle der IT-Security . . . . .	53
2.1.3	Akteure und Identitäten bei der Datenverarbeitung . . . . .	55
2.1.4	Entwicklung der Internet-Kryptographie . . . . .	58
2.1.5	Schichtenspezifische IT-Security-Protokolle . . . . .	60
2.2	Prinzipien und Primitive der Kryptographie . . . . .	62
2.2.1	Verschlüsselungs-Primitiv $\mathcal{C}$ . . . . .	63
2.2.2	Schlüsseltausch-Primitiv $\kappa$ . . . . .	63
2.2.3	Hash-Primitiv $h$ . . . . .	65
2.2.4	Signatur-Primitiv $\sigma$ . . . . .	67
2.2.5	Zusammenspiel der Krypto-Primitive . . . . .	68

2.3	Hashfunktionen und ihr Einsatz . . . . .	70
2.3.1	Hashfunktionen zur Nachrichtensicherung . . . . .	70
2.3.2	Message Authentication Codes . . . . .	71
2.3.3	Hashfunktionen für Passwörter . . . . .	73
2.4	Symmetrische Verschlüsselung . . . . .	75
2.4.1	Stromchiffren . . . . .	77
2.4.2	Blockchiffren . . . . .	79
2.4.3	Klassische Betriebsarten . . . . .	80
2.4.4	Counter Mode und AEAD . . . . .	82
2.5	Schlüsseltauschverfahren . . . . .	84
2.5.1	Ablauf des RSA-Schlüsseltauschs . . . . .	86
2.5.2	Ablauf des DH-Verfahrens . . . . .	87
2.5.3	ElGamal-Schlüsseltausch-Protokoll . . . . .	89
2.6	Kryptographie auf Elliptischen Kurven . . . . .	90
2.6.1	Schlüsseltausch mit ECC . . . . .	92
2.6.2	Digitale Signaturen mit ECC . . . . .	93
2.7	Identitäten und Authentisierung . . . . .	97
2.7.1	Authentisierung mit MS-ChapV2 . . . . .	99
2.7.2	Digitale Identitäten mit X.509-Zertifikaten . . . . .	101
2.7.3	Der X.509-Datencontainer . . . . .	102
2.7.4	X.509-Einsatzgebiete . . . . .	103
2.7.5	Öffentliche und private Zertifikate . . . . .	105
2.7.6	Verifikation und Validierung von Zertifikaten . . . . .	106
2.8	Gesicherte und vertrauliche Datenübertragung . . . . .	108
2.9	Schlussbemerkungen . . . . .	113
2.10	Verständnisfragen . . . . .	114
<b>3</b>	<b>Internet-Netzwerkprotokolle IPv4, ARP, ICMP und IGMP</b>	<b>115</b>
3.1	Aufgaben von IPv4 . . . . .	116
3.2	Aufbau von IPv4-Paketen . . . . .	117
3.2.1	Differentiated Services . . . . .	119
3.2.2	Fragmentierung der IPv4-Pakete . . . . .	122
3.2.3	Optionen in IP-Paketen . . . . .	124
3.3	IPv4-Adressen . . . . .	127
3.3.1	Darstellung von IP-Adressen . . . . .	129
3.3.2	Standard-Subnetzmaske . . . . .	130
3.3.3	Vergabe von IP-Adressen . . . . .	131
3.4	Bildung von Subnetzen . . . . .	134
3.4.1	Bestimmen von Subnetz-IDs und Host-IDs . . . . .	135
3.4.2	Zielbestimmung eines IP-Pakets beim Quellrechner . . . . .	138
3.4.3	Adressierungsaspekte in IP-Netzen . . . . .	139
3.5	Klassenlose IP-Adressierung (VLSM, CIDR) . . . . .	142
3.5.1	Konzept der klassenlosen IP-Adressierung . . . . .	143
3.5.2	VLSM-Nutzung . . . . .	147
3.5.3	CIDR-Einsatz . . . . .	151

3.6	Protokolle ARP und RARP . . . . .	155
3.6.1	Protokoll ARP . . . . .	156
3.6.2	Proxy-ARP . . . . .	159
3.6.3	Protokoll RARP . . . . .	162
3.7	Protokoll ICMP . . . . .	163
3.7.1	ICMP-Nachrichten . . . . .	164
3.7.2	ICMP-Fehlermeldungen . . . . .	165
3.7.3	ICMP-Anfragen . . . . .	167
3.7.4	Pfad-MTU Ermittlung . . . . .	168
3.8	IP-Multicasting . . . . .	169
3.8.1	Multicast-Adressen . . . . .	170
3.8.2	Internet Group Management Protocol . . . . .	171
3.9	Schlussbemerkungen . . . . .	175
3.10	Verständnisfragen . . . . .	178
<b>4</b>	<b>Transportprotokolle TCP, UDP, SCTP und QUIC</b>	<b>179</b>
4.1	Grundlagen der Transportprotokolle . . . . .	180
4.2	Konzept und Einsatz von UDP . . . . .	182
4.2.1	Aufbau von UDP-Paketen . . . . .	183
4.2.2	Protokoll UDP-Lite . . . . .	184
4.3	Funktion des Protokolls TCP . . . . .	186
4.3.1	Aufbau von TCP-Paketen . . . . .	187
4.3.2	Konzept der TCP-Verbindungen . . . . .	191
4.3.3	Auf- und Abbau von TCP-Verbindungen . . . . .	192
4.3.4	Flusskontrolle bei TCP . . . . .	195
4.3.5	TCP Sliding-Window-Prinzip . . . . .	197
4.4	Implementierungsaspekte von TCP . . . . .	201
4.4.1	Klassische TCP-Implementierungen . . . . .	201
4.4.2	Abschätzung der Round Trip Time . . . . .	203
4.4.3	Verbesserung der Effizienz von TCP . . . . .	204
4.4.4	Datendurchsatz beim TCP . . . . .	206
4.4.5	TCP Socket-Interface . . . . .	209
4.4.6	Angriffe gegen den TCP-Stack . . . . .	211
4.4.7	Socket Cloning und TCP-Handoff . . . . .	213
4.4.8	MSS Clamping . . . . .	213
4.5	Explicit Congestion Notification . . . . .	214
4.5.1	Anforderungen an ECN-fähige Netzknoten . . . . .	215
4.5.2	Überlastkontrolle mit ECN . . . . .	216
4.5.3	Signalisierung von ECN in IP- und TCP-Headern . . . . .	218
4.5.4	Ablauf des ECN-Verfahrens . . . . .	220
4.6	Multipath TCP . . . . .	223
4.6.1	Typischer Einsatz von MPTCP . . . . .	224
4.6.2	Transportschicht mit MPTCP . . . . .	226
4.6.3	Multipath-Kommunikation mit MPTCP . . . . .	229
4.6.4	MPTCP-Angaben im TCP-Header . . . . .	233
4.6.5	Aufbau einer MPTCP-Verbindung . . . . .	235

4.6.6	Anpassung des TCP-Headers für MPTCP . . . . .	237
4.6.7	Abbau einer MPTCP-Verbindung . . . . .	238
4.6.8	Middleboxen als Störfaktoren bei MPTCP . . . . .	239
4.7	Konzept und Einsatz von SCTP . . . . .	240
4.7.1	SCTP versus UDP und TCP . . . . .	241
4.7.2	SCTP-Assoziationen . . . . .	241
4.7.3	Struktur der SCTP-Pakete . . . . .	243
4.7.4	Aufbau und Abbau einer SCTP-Assoziation . . . . .	244
4.7.5	Daten- und Nachrichtenübermittlung nach SCTP . . . . .	245
4.8	Das QUIC-Protokoll . . . . .	249
4.8.1	Ziele von QUIC . . . . .	250
4.8.2	QUIC-Pakete in UDP und Transport über IP-Netze . . . . .	251
4.8.3	Aufbau von QUIC-Nachrichten und der Payload . . . . .	252
4.8.4	QUIC-Verbindungen und Datenströme . . . . .	256
4.8.5	Verbindungsmanagement bei QUIC . . . . .	259
4.9	Schlussbemerkungen . . . . .	261
4.10	Verständnisfragen . . . . .	262
<b>5</b>	<b>Domain Name System (DNS)</b> . . . . .	<b>263</b>
5.1	Aufgaben des DNS . . . . .	264
5.1.1	Namen als Schlüssel zu Internet-Ressourcen . . . . .	265
5.1.2	Organisation des DNS-Namensraums . . . . .	266
5.1.3	Internet Root-Server . . . . .	269
5.1.4	Architektur und Komponenten des DNS-Dienstes . . . . .	270
5.1.5	Abfrage von IP-Adressen . . . . .	273
5.1.6	Ermittlung des FQDN für eine IP-Adresse . . . . .	275
5.1.7	Direkte Abfrage von Resource Records . . . . .	277
5.2	Resource Records . . . . .	277
5.2.1	Taxonomie der Resource Records . . . . .	279
5.2.2	Resource Records für IPv6 . . . . .	281
5.2.3	Internationalisierung des DNS (IDN) . . . . .	283
5.3	Zonen und Zonentransfer . . . . .	284
5.3.1	Zonendatei . . . . .	285
5.3.2	Zonentransfer . . . . .	287
5.4	DNS-Nachrichten . . . . .	289
5.4.1	DNS-Nachrichtenformate . . . . .	289
5.4.2	DNS-Nachrichten mit EDNS(0) . . . . .	292
5.5	DNS Security mit DNSSEC . . . . .	294
5.5.1	Typische Bedrohungen bei DNS . . . . .	295
5.5.2	Sicherung des Zonentransfers . . . . .	296
5.5.3	Konzept von DNSSEC . . . . .	297
5.5.4	Funktionale DNS-Erweiterung bei DNSSEC . . . . .	299
5.5.5	Ablauf des DNSSEC-Verfahrens . . . . .	300
5.6	Vertrauliche DNS-Nachrichten mit CurveDNS . . . . .	305
5.6.1	Kryptographisches Konzept von CurveDNS . . . . .	307
5.6.2	CurveDNS-Nachrichtenformate . . . . .	308

5.7	DNS und Internetdienste . . . . .	311
5.7.1	DNS und E-Mail nach SMTP . . . . .	311
5.7.2	DNS und die ENUM-Domain . . . . .	313
5.7.3	DNS und VoIP mit SIP . . . . .	315
5.8	Autoritative Records in der DNS-Zone . . . . .	317
5.8.1	DNS-Based Authentication of Named Entities: DANE . . . . .	318
5.8.2	DomainKeys Identified Mail Signatures . . . . .	321
5.8.3	Certification Authority Authorization . . . . .	324
5.9	Internetanbindung und DNS . . . . .	325
5.9.1	Domain Name Registrare . . . . .	328
5.9.2	Dynamisches DNS . . . . .	329
5.10	Multicast-DNS-Dienste . . . . .	330
5.10.1	Multicast-DNS . . . . .	331
5.10.2	Dienstleistungsprotokolle LLMNR und UPnP . . . . .	334
5.11	Schlussbemerkungen . . . . .	336
5.12	Verständnisfragen . . . . .	338
<b>6</b>	<b>IP-Support-Protokolle</b> . . . . .	<b>339</b>
6.1	IPv4-Autoconfiguration . . . . .	340
6.1.1	Einrichten von IP-Adressen . . . . .	342
6.1.2	Stateless Autoconfiguration für IPv4 – APIPA . . . . .	342
6.2	Vergabe von IP-Adressen mit DHCP . . . . .	344
6.2.1	Aufbau von DHCP-Nachrichten . . . . .	346
6.2.2	Ablauf beim Protokoll DHCP . . . . .	347
6.2.3	Aufgabe von DHCP-Relay-Agents . . . . .	350
6.2.4	DHCP im Einsatz . . . . .	351
6.2.5	DHCP und PXE . . . . .	352
6.3	Network Address Translation (NAT) . . . . .	352
6.3.1	Klassisches NAT . . . . .	353
6.3.2	Konzept von NAT . . . . .	355
6.3.3	Prinzip von Full Cone NAT . . . . .	356
6.3.4	Prinzip von Restricted Cone NAT . . . . .	357
6.3.5	NAT und Echtzeitkommunikationsprotokolle . . . . .	358
6.3.6	Session Traversal bei NAT . . . . .	360
6.3.7	Carrier-Grade NAT . . . . .	365
6.4	IP Security Protocol (IPsec) . . . . .	367
6.4.1	Ziele von IPsec . . . . .	367
6.4.2	Erweiterung der IP-Pakete mit IPsec-Angaben . . . . .	369
6.4.3	Aufbau einer IPsec-Sicherheitsvereinbarung . . . . .	370
6.4.4	IPsec im Authentication Mode . . . . .	375
6.4.5	Encapsulating Security Payload (ESP) . . . . .	376
6.4.6	IPsec-basierte Virtuelle Private Netze . . . . .	378
6.4.7	NAT-Traversal bei IPsec . . . . .	382
6.5	Extensible Authentication Protocol . . . . .	383
6.5.1	EAP-Funktionskomponenten . . . . .	384
6.5.2	EAP-Nachrichten . . . . .	386

6.5.3	Ablauf der EAP-Authentisierung . . . . .	387
6.6	Einsatz des Protokolls RADIUS . . . . .	390
6.6.1	Remote Access Services und RADIUS . . . . .	390
6.6.2	Konzept von RADIUS . . . . .	392
6.6.3	RADIUS-Nachrichten . . . . .	395
6.7	Lightweight Directory Access Protocol . . . . .	397
6.7.1	Directory Information Tree . . . . .	398
6.7.2	LDAP-Server . . . . .	400
6.7.3	LDAP-Client-Zugriff . . . . .	401
6.8	Schlussbemerkungen . . . . .	403
6.9	Verständnisfragen . . . . .	405
<b>7</b>	<b>Protokolle der Supportschicht und für Echtzeitkommunikation</b>	<b>407</b>
7.1	Konzept und Einsatz von SOCKS . . . . .	408
7.1.1	SOCKS-Ablauf . . . . .	409
7.1.2	Gesicherte Verbindungen mit SOCKS . . . . .	411
7.2	Transport Layer Security (TLS) . . . . .	412
7.2.1	TLS-Dienste im Schichtenmodell . . . . .	415
7.2.2	Ablauf des TLS-Verfahrens – bis TLS 1.2 . . . . .	416
7.2.3	Ablauf der Verbindungsaufnahme bei TLS 1.3 . . . . .	418
7.2.4	Record Layer Protocol . . . . .	422
7.2.5	Cipher Suites . . . . .	424
7.2.6	Erzeugung der TLS-Schlüssel . . . . .	425
7.2.7	Verzögerte TLS-Verbindung mittels STARTTLS . . . . .	428
7.2.8	Datagram TLS . . . . .	429
7.3	Protokolle für die Echtzeitkommunikation . . . . .	431
7.3.1	RTP/RTCP und Transportprotokolle in IP-Netzen . . . . .	432
7.3.2	Real-time Transport Protocol (RTP) . . . . .	434
7.3.3	Das Protokoll RTCP im Überblick . . . . .	445
7.4	Das Protokoll SIP . . . . .	449
7.4.1	SIP und Transportprotokolle . . . . .	449
7.4.2	Eigenschaften des Protokolls SDP . . . . .	451
7.4.3	Aufbau von SIP-Adressen . . . . .	452
7.4.4	Funktion eines SIP-Proxy bei der IP-Videotelefonie . . . . .	453
7.4.5	Trapezoid-Modell von SIP . . . . .	454
7.4.6	Unterstützung der Benutzermobilität bei SIP . . . . .	456
7.4.7	Beschreibung von Sessions mittels SDP . . . . .	459
7.5	Zeitprotokolle und Zeitsynchronisation . . . . .	462
7.5.1	Von Kalendern, Uhren und Zeitzonen . . . . .	463
7.5.2	Temps Atomic International . . . . .	466
7.5.3	Network Time Protocol . . . . .	467
7.5.4	Precision Time Protocol . . . . .	474
7.6	Schlussbemerkungen . . . . .	481
7.7	Verständnisfragen . . . . .	483

<b>II</b>	<b>Internet Protocol Version 6</b>	<b>485</b>
<b>8</b>	<b>Das Protokoll IPv6</b>	<b>487</b>
8.1	Neuerungen bei IPv6 gegenüber IPv4 . . . . .	488
8.2	Header-Struktur bei IPv6 . . . . .	490
8.3	Erweiterungs-Header . . . . .	492
8.4	IPv6-Flexibilität mit Options-Headern . . . . .	495
8.4.1	Aufbau von Options-Headern . . . . .	496
8.4.2	Belegung des Option-Feldes . . . . .	497
8.5	Einsatz von Jumbo Payload . . . . .	498
8.6	Source Routing bei IPv6 . . . . .	499
8.7	Fragmentierung langer IPv6-Pakete . . . . .	501
8.8	Aufbau von IPv6-Adressen . . . . .	502
8.8.1	Darstellung von IPv6-Adressen . . . . .	503
8.8.2	IPv6-Adressensystematik und -Gültigkeitsbereiche . . . . .	506
8.8.3	Interface-Identifer in IPv6-Adressen . . . . .	507
8.8.4	Interface-Index bei Link-Local IPv6-Adressen . . . . .	509
8.9	Unicast-Adressen bei IPv6 . . . . .	510
8.9.1	Globale Unicast-Adressen . . . . .	511
8.9.2	Vergabe globaler IPv6-Adressen . . . . .	514
8.9.3	Unicast-Adressen von lokaler Bedeutung . . . . .	515
8.9.4	IPv4-Kompatibilitätsadressen . . . . .	516
8.10	Multicast- und Anycast-Adressen bei IPv6 . . . . .	518
8.10.1	Automatische Multicast-Adressen . . . . .	520
8.10.2	Anycast-Adressen . . . . .	522
8.11	Zuweisung von IPv6-Unicast-Adressen . . . . .	523
8.11.1	Privacy Extensions . . . . .	524
8.11.2	Auswahl der 'richtigen' IPv6-Quelladresse . . . . .	526
8.12	Schlussbemerkungen . . . . .	527
8.13	Verständnisfragen . . . . .	528
<b>9</b>	<b>IPv6-Support-Protokolle ICMPv6, NDP und DHCPv6</b>	<b>529</b>
9.1	Nachrichten des Protokolls ICMPv6 . . . . .	530
9.2	Das Neighbor Discovery Protokoll . . . . .	532
9.2.1	Bestimmen des Ziels eines IPv6-Pakets . . . . .	535
9.2.2	Ermittlung von Linkadressen . . . . .	537
9.2.3	Router Advertisement/Solicitation . . . . .	539
9.2.4	Unsolicited Router Advertisements . . . . .	541
9.2.5	IPv6-Paket-Umleitung . . . . .	542
9.3	Stateless Address Autoconfiguration (SLAAC) . . . . .	543
9.3.1	SLAAC und Router Advertisements . . . . .	545
9.3.2	SeND – Secure Neighbor Discovery . . . . .	546
9.4	Konzept und Einsatz von DHCPv6 . . . . .	549
9.4.1	Client/Relay/Server-Architektur bei DHCPv6 . . . . .	550
9.4.2	Aufbau von DHCPv6-Nachrichten . . . . .	552
9.4.3	Ablauf von DHCPv6 im stateful Mode . . . . .	554

9.4.4	Verlängerung der Ausleihe einer IPv6-Adresse . . . . .	556
9.4.5	Schnelle Umadressierung mit DHCPv6 . . . . .	557
9.4.6	Ablauf von DHCPv6 im stateless Mode . . . . .	558
9.4.7	Einsatz von DHCPv6-Relays . . . . .	559
9.5	Schlussbemerkungen . . . . .	561
9.6	Verständnisfragen . . . . .	562
<b>10</b>	<b>Migration zum IPv6-Einsatz</b>	<b>563</b>
10.1	Arten der Koexistenz von IPv6 und IPv4 . . . . .	564
10.1.1	IPv6-Kommunikation über IPv4-Netze . . . . .	568
10.1.2	IPv4-Kommunikation über IPv6-Netze . . . . .	570
10.1.3	IP-Kommunikation durch Translation IPv4 $\Leftrightarrow$ IPv6 . . . . .	570
10.2	Dual-Stack-Verfahren . . . . .	571
10.2.1	Dual-Stack-Rechner in einem LAN-Segment . . . . .	571
10.2.2	Betrieb von Dual-Stack-Rechnern in IPv4-Netzen . . . . .	571
10.2.3	Dual-Stack Lite . . . . .	572
10.3	Tunneling-Protokolle: IPv6 über X . . . . .	574
10.3.1	Erweiterung eines IPv4-Netzes um ein IPv6-Netz . . . . .	574
10.3.2	Kopplung der IPv6-Netze über ein IPv4-Netz . . . . .	576
10.3.3	Zugang zum IPv6-Internet über Tunnel-Broker . . . . .	576
10.4	Von 6to4 nach 6rd . . . . .	578
10.4.1	Bedeutung von 6to4 . . . . .	578
10.4.2	Aufbau von 6to4-Adressen . . . . .	578
10.4.3	IPv6-Kommunikation über IPv4-Netz . . . . .	579
10.4.4	Probleme bei 6to4 mit NAT . . . . .	581
10.4.5	IPv6 Rapid Deployment – 6rd . . . . .	582
10.5	IPv6 over IPv4 mit ISATAP . . . . .	584
10.5.1	Kommunikation mit ISATAP . . . . .	584
10.5.2	Struktur und Bedeutung von ISATAP-Adressen . . . . .	585
10.5.3	Funktionsweise von ISATAP . . . . .	587
10.6	IPv6 in IPv4-Netzen mit NAT (Teredo) . . . . .	589
10.6.1	Teredo-Adresse und -Pakete . . . . .	590
10.6.2	Bestimmung der Art von NAT . . . . .	593
10.7	Protokoll-Translation: IPv4 $\Leftrightarrow$ IPv6 . . . . .	595
10.7.1	Stateless IPv4/IPv4 Translation (SIIT) . . . . .	596
10.7.2	Adressierung bei SIIT . . . . .	596
10.7.3	Translation IPv4 $\Leftrightarrow$ IPv6 . . . . .	598
10.7.4	Translation ICMPv4 $\Leftrightarrow$ ICMPv6 . . . . .	601
10.8	NAT64 und DNS64 . . . . .	602
10.8.1	NAT64-Arbeitsmodell . . . . .	603
10.8.2	NAT64-IPv6-Adressen . . . . .	604
10.8.3	NAT64 Stateful Translation . . . . .	605
10.8.4	DNS-Integration bei NAT64 . . . . .	606
10.9	Schlussbemerkungen . . . . .	607
10.10	Verständnisfragen . . . . .	608



<b>III Internet-Routing-Architektur</b>	<b>609</b>
<b>11 Routing in IP-Netzen</b>	<b>611</b>
11.1 Routing-Grundlagen	612
11.1.1 Grundlegende Aufgaben von Routern	612
11.1.2 Adressierung beim Router-Einsatz	614
11.1.3 Routing-Tabelle	617
11.1.4 Routing-Verfahren	620
11.1.5 Inter-/Intra-Domain-Protokolle	624
11.2 Routing Information Protocol (RIP)	624
11.2.1 Erlernen von Routing-Tabellen beim RIP	625
11.2.2 Besonderheiten des RIP-1	631
11.2.3 Routing-Protokoll RIP-2	635
11.2.4 RIP für das Protokoll IPv6 (RIPng)	638
11.3 Open Shortest Path First (OSPF)	640
11.3.1 Funktionsweise von OSPF	640
11.3.2 Nachbarschaften zwischen Routern	643
11.3.3 OSPF-Einsatz in großen Netzwerken	647
11.3.4 OSPF-Nachrichten	654
11.3.5 Besonderheiten von OSPFv2	661
11.3.6 OSPF für IPv6 (OSPFv3)	661
11.4 Border Gateway Protocol (BGP-4)	662
11.4.1 Grundlagen des BGP-4	662
11.4.2 Funktionsweise des BGP-4	664
11.4.3 BGP-4-Nachrichten	664
11.4.4 Multiprotocol Extensions for BGP-4 (MP-BGP)	670
11.4.5 Sicherung des BGP-Nachrichtenaustauschs	674
11.4.6 BGP Blackholing	678
11.5 Redundante Auslegung von Routern	679
11.5.1 Konzept des virtuellen Routers	679
11.5.2 Funktionsweise von VRRP	682
11.5.3 Idee und Einsatz des HSRP	685
11.6 Multicast Routing-Protokolle	688
11.6.1 Einige Aspekte von MC-Routing	689
11.6.2 Aufgaben von MC-Routing	691
11.6.3 Intra-Domain-MC-Routing mit PIM-SM	695
11.6.4 Inter-Domain-MC-Routing mit MSDP	701
11.7 Schlussbemerkungen	705
11.8 Verständnisfragen	708
<b>12 Verbindungsorientierte IP-Netze mit MPLS und GMPLS</b>	<b>709</b>
12.1 Weg zu neuer Generation der IP-Netze	710
12.1.1 Notwendigkeit von (G)MPLS	710
12.1.2 Bedeutung von Traffic Engineering in IP-Netzen	711
12.1.3 Multiplane-Architekturen moderner IP-Netze	713
12.1.4 Schritte zu einem Label Switched Path (LSP)	714

12.2	Multi-Protocol Label Switching (MPLS) . . . . .	715
12.2.1	Multiplane-Architektur der MPLS-Netze . . . . .	716
12.2.2	MPLS als Integration von Routing und Switching . . . . .	717
12.2.3	Logisches Modell des MPLS . . . . .	718
12.2.4	Prinzip des Label-Switching . . . . .	720
12.2.5	Logische Struktur der MPLS-Netze . . . . .	721
12.2.6	Bildung der Klassen von IP-Paketen und MPLS-Einsatz . . . . .	722
12.2.7	MPLS und die Hierarchie von Netzen . . . . .	724
12.2.8	MPLS und verschiedene Übermittlungsnetze . . . . .	726
12.2.9	Virtual Private Networks mit MPLS . . . . .	727
12.3	Konzept von GMPLS . . . . .	728
12.3.1	Vom MPLS über MP $\lambda$ S zum GMPLS . . . . .	729
12.3.2	Struktur optischer Switches bei GMPLS . . . . .	730
12.3.3	Interpretation der Label . . . . .	731
12.3.4	Interpretation des Transportpfads . . . . .	732
12.3.5	Bedeutung des LMP in GMPLS-Netzen . . . . .	733
12.4	Traffic Engineering in (G)MPLS-Netzen . . . . .	736
12.4.1	Traffic Trunks und LSPs . . . . .	736
12.4.2	Aufgaben und Schritte beim MPLS-TE . . . . .	738
12.4.3	Routing beim Traffic Engineering . . . . .	739
12.4.4	Attribute von Traffic Trunks . . . . .	739
12.4.5	Constraint-based Routing . . . . .	741
12.4.6	Re-Routing und Preemption . . . . .	743
12.5	Signalisierung in (G)MPLS-Netzen . . . . .	743
12.5.1	Einsatz des RSVP-TE . . . . .	744
12.5.2	Einsatz des GMPLS RSVP-TE . . . . .	749
12.5.3	Einsatz des CR-LDP . . . . .	751
12.6	Schlussbemerkungen . . . . .	754
12.7	Verständnisfragen . . . . .	755

## **IV Virtuelle Netzstrukturen 757**

<b>13</b>	<b>IP over X und virtuelle IP-Netze</b>	<b>759</b>
13.1	IP über LANs . . . . .	760
13.1.1	Übermittlung der IP-Pakete in MAC-Frames . . . . .	762
13.1.2	Multiprotokollfähigkeit der LANs . . . . .	763
13.2	Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit PPP . . . . .	765
13.2.1	PPP-Dateneinheiten . . . . .	766
13.2.2	PPP-Zustände . . . . .	768
13.2.3	LCP als Hilfsprotokoll von PPP . . . . .	769
13.2.4	IPv4 Control Protocol (IPCP) bei PPP . . . . .	770
13.2.5	Protokollablauf beim PPP . . . . .	771
13.2.6	Benutzerauthentisierung beim PPP . . . . .	772
13.3	Grundlagen der WLAN . . . . .	773
13.3.1	WLAN-Betriebsarten . . . . .	775

13.3.2	Beitritt zum WLAN . . . . .	776
13.3.3	WLAN MAC-Frame: MSDU . . . . .	777
13.3.4	Kommunikation zwischen WLAN und Ethernet . . . . .	781
13.3.5	Robust Security Network . . . . .	782
13.4	Virtual Private Networks (VPN) . . . . .	783
13.4.1	Tunneling als Basis für VPNs . . . . .	784
13.4.2	VPN-Taxonomie . . . . .	786
13.4.3	Von Providern bereitgestellte VPNs . . . . .	788
13.4.4	Layer-2-Tunneling über IP-Netze . . . . .	799
13.5	Schlussbemerkungen . . . . .	804
13.6	Verständnisfragen . . . . .	806
<b>14</b>	<b>IP-Netzwerke und Virtual Networking</b>	<b>807</b>
14.1	Moderne Netzstrukturen . . . . .	808
14.1.1	Funktionsbereiche in Netzwerken . . . . .	808
14.1.2	Strukturierter Aufbau von Netzwerken . . . . .	809
14.2	Virtual Networking in LANs . . . . .	811
14.2.1	Arten und Einsatz von VLANs . . . . .	811
14.2.2	Layer-2-Switching . . . . .	812
14.2.3	Layer-3-Switching . . . . .	814
14.2.4	Bedeutung von VLAN Tagging . . . . .	816
14.3	Bildung von VLANs im Client-LAN . . . . .	819
14.3.1	Intra- und Inter-VLAN-Kommunikation . . . . .	819
14.3.2	Modell der Bildung von VLANs im Client-LAN . . . . .	821
14.4	Bildung von VLANs im Server-LAN . . . . .	822
14.4.1	Multilayer-Struktur im Server-LAN . . . . .	822
14.4.2	Anbindung virtueller Server an Access Switches . . . . .	823
14.4.3	Modelle der Bildung von VLANs im Server-LAN . . . . .	824
14.5	Abgesicherte VPNs mit MACsec . . . . .	826
14.5.1	MACsec-Schlüsselhierarchien . . . . .	828
14.5.2	Trusted MAC Frame Format . . . . .	830
14.5.3	MACsec-Implementierungsaspekte . . . . .	832
14.5.4	MACsec Key Agreement Protocol & Security Association . . . . .	834
14.6	Virtual Networking mit TRILL und SPB . . . . .	835
14.6.1	Konzept und Bedeutung von TRILL . . . . .	836
14.6.2	Idee und Einsatz von Shortest Path Bridging . . . . .	838
14.7	VXLAN – VLAN mit VM . . . . .	844
14.7.1	Vom VLAN zum VXLAN . . . . .	845
14.7.2	VXLANs oberhalb Layer-3-Netzwerke . . . . .	846
14.8	Mobilität von Virtual Networks . . . . .	848
14.8.1	Konzept und Bedeutung von ILNP . . . . .	849
14.8.2	LISP – Idee und Bedeutung . . . . .	858
14.9	Schlussbemerkungen . . . . .	864
14.10	Verständnisfragen . . . . .	868

<b>15 Distributed Layer-2/3-Switching</b>	<b>869</b>
15.1 Genesis der Idee von VPLS und EVPN	870
15.2 Konzept und Einsatz von VPLS	873
15.2.1 Grundlegende Idee von VPLS	873
15.2.2 Ethernet over MPLS	875
15.2.3 VPLS als Vollvermaschung von VSIs	877
15.2.4 Grundlegende Funktionen von VSIs	878
15.2.5 VPLS-Modell für die Vernetzung von VSIs	879
15.2.6 Information in PEs über bereitgestellte VPLSs	881
15.2.7 PE Forwarding Table – Learning und Forwarding	882
15.2.8 Learning von MAC-Adressen aus Broadcast-Frames	884
15.2.9 Learning von MAC-Adressen aus Unicast-Frames	885
15.2.10 Skalierbarkeit von VPLSs	886
15.2.11 Auto-Discovery and VPLS Signaling	887
15.2.12 Bekanntgabe von Informationen über PW Labels	888
15.2.13 Hierarchical VPLS (H-VPLS) – Multi-Tenant-VPLS	889
15.2.14 H-VPLS und VLAN-Stacking	890
15.3 Ethernet Virtual Private Networks	891
15.3.1 Grundlegende Architektur von EVPN	892
15.3.2 Datacenter und grundlegende EVPN-Topologie	894
15.3.3 Allgemeines EVPN-Konzept im Überblick	897
15.3.4 EVI als emulierter L2-Switch – Basisfunktionen	899
15.3.5 EVIs als emulierter L2-Switch – spezielle Funktionen	900
15.3.6 EVI als emulierter L3-Switch – Basisfunktionen	902
15.3.7 Arten von EVI Service Interfaces	904
15.3.8 Control Plane in EVPNs	906
15.4 Schlussbemerkungen	907
15.5 Verständnisfragen	908
<b>V Mobilität und Internet of Things</b>	<b>909</b>
<b>16 Unterstützung der Mobilität in IP-Netzen</b>	<b>911</b>
16.1 Ansätze zur Unterstützung der Mobilität	912
16.1.1 Bedeutung von WLAN- und Hotspot-Roaming	912
16.1.2 Hauptproblem der Mobilität in IP-Netzen	914
16.1.3 Die grundlegende Idee des Mobile IP	915
16.1.4 Idee des Mobile IPv4	916
16.1.5 Idee des Mobile IPv6	918
16.2 Roaming zwischen Hotspots	918
16.2.1 Hotspot-Roaming zwischen mehreren WISPs	919
16.2.2 Ablauf des Hotspot-Roaming	920
16.3 Funktionsweise des MIPv4	921
16.3.1 Beispiel für einen Ablauf des MIP	922
16.3.2 Agent Discovery	924
16.3.3 Erkennen des Verlassens des Heimatsubnetzes	925

16.3.4	Erkennen des Wechsels eines Fremdsubnetzes . . . . .	926
16.3.5	Erkennen einer Rückkehr in das Heimatsubnetz . . . . .	928
16.3.6	Registrierung beim Heimatagenten . . . . .	928
16.3.7	Mobiles IP-Routing . . . . .	933
16.4	Konzept des MIPv6 . . . . .	936
16.4.1	MN hat sein Heimatsubnetz verlassen . . . . .	936
16.4.2	MN hat das Fremdsubnetz gewechselt . . . . .	938
16.4.3	MN ist in sein Heimatsubnetz zurückgekehrt . . . . .	939
16.4.4	MIPv6-Nachrichten . . . . .	940
16.4.5	Kommunikation zwischen MN und CN . . . . .	941
16.4.6	Home Agent Binding . . . . .	943
16.4.7	Correspondent Node Binding . . . . .	944
16.4.8	Entdeckung eines Subnetzwechsels . . . . .	944
16.4.9	Entdeckung der Home-Agent-Adresse . . . . .	945
16.5	Hierarchical MIPv6 . . . . .	946
16.5.1	Unterstützung der Mobilität mit dem HMIPv6 . . . . .	946
16.5.2	Finden eines MAP . . . . .	948
16.5.3	Unterstützung der Mikromobilität . . . . .	949
16.5.4	Unterstützung der Makromobilität . . . . .	950
16.5.5	Datentransfer zwischen MN und CN . . . . .	951
16.6	Schlussbemerkungen . . . . .	953
16.7	Verständnisfragen . . . . .	956
<b>17</b>	<b>Internet of Things – Technische Grundlagen und Protokolle</b>	<b>957</b>
17.1	Herkömmliches Internet und IoT . . . . .	958
17.1.1	Allgemeine Definition von IoT . . . . .	958
17.1.2	IoT aus funktionaler Sicht . . . . .	960
17.1.3	Grundlegendes technisches Konzept von IoT . . . . .	962
17.1.4	Cloud Computing und Fog Computing im IoT . . . . .	964
17.1.5	Near Real-Time IoT Services mit Fog Computing . . . . .	966
17.1.6	Funktionales Multilayer-Modell von IoT . . . . .	968
17.1.7	Bedeutung von SDN im IoT . . . . .	971
17.1.8	Protokollarchitektur von Devices im IoT . . . . .	973
17.1.9	Protokollarchitektur von IoT Access Gateways . . . . .	975
17.1.10	Struktur von MAC-Frames in Low Rate WPANs . . . . .	976
17.2	6LoWPAN – IPv6-Adaption für das IoT . . . . .	978
17.2.1	Grundlegende Topologien von LR-WPANs . . . . .	979
17.2.2	Adressierung von Instanzen in Rechnern mit IPv6 . . . . .	980
17.2.3	Adressierung von Instanzen bei 6LoWPAN Devices . . . . .	982
17.2.4	LoWPAN als IPv6-Adaptation-Layer-Struktur . . . . .	984
17.2.5	Redundante Angaben im IPv6- und im UDP-Header . . . . .	986
17.2.6	Dispatch Header und seine Nutzung bei 6LoWPAN . . . . .	987
17.2.7	Komprimierung der IPv6- und UDP-Header . . . . .	990
17.2.8	Multi-hop Communication in WPANs . . . . .	992
17.2.9	Fragmentierung langer IPv6-Pakete in WPANs . . . . .	994

17.3	RPL – Routing-Protokoll im IoT	997
17.3.1	Funktionales Modell von RPL	998
17.3.2	Hauptfunktion von RPL	999
17.3.3	RPL-Begriffe: Objective Function, Metric und Rank	1001
17.3.4	Logische Strukturierung von LLNs	1003
17.3.5	Besonderheiten von Routing mit RPL	1005
17.3.6	Traffic Patterns in LLNs	1007
17.3.7	Routing Metrics und Constraints	1009
17.3.8	Nutzung von Metric Container in Nachrichten DIO	1011
17.3.9	RPL-Nachrichten – Struktur und Typen	1013
17.3.10	Bildung von Virtual Root Nodes	1015
17.3.11	Nutzung der RPL-Nachricht DIO	1016
17.4	CoAP – Applikationsprotokoll im IoT	1019
17.4.1	CoAP im Protokollsichtenmodell von IoT	1019
17.4.2	Proxying zwischen HTTP und CoAP	1021
17.4.3	CoAP Messages und Timeout-Mechanismus	1024
17.4.4	Requests und Responses von CoAP	1026
17.4.5	Adressierung von Ressourcen bei CoAP	1029
17.4.6	Struktur und Typen von CoAP Messages	1031
17.4.7	Mapping zwischen HTTP und CoAP	1034
17.5	Schlussbemerkungen	1036
17.6	Verständnisfragen	1038
<b>18</b>	<b>Networking-Trends</b>	<b>1039</b>
18.1	Internet of Things (IoT)	1040
18.1.1	Industrial Internet of Things (IIoT)	1041
18.1.2	Internet of Robotic Things	1042
18.1.3	Internet of Vehicles	1043
18.1.4	Internet of Drones	1044
18.1.5	Mobility in IoT	1045
18.1.6	IoT Security	1045
18.2	Software-Defined Networking (SDN)	1047
18.2.1	Software-Defined WANs (SD-WANs)	1049
18.2.2	Software-Defined Optical Networking (SDON)	1050
18.2.3	Software-Defined Data Centers (SDDCs)	1051
18.2.4	Software-Defined IoT (SD-IoT)	1051
18.2.5	Wireless Software-Defined Networking	1052
18.2.6	Software-Defined Internet of Vehicles (SD-IoV)	1054
18.3	Network Function Virtualization (NFV)	1055
18.3.1	Software-Defined VNFs Networking	1056
18.3.2	Service Function Chaining (SFC)	1057
18.3.3	VNFs Management and Orchestration	1058
18.3.4	Network Slicing	1059
18.4	(Docker) Container Networking	1060
18.4.1	Container-based Network Services	1062
18.4.2	Cloud Computing Containerization	1062

---

18.4.3	Mobile VNFs Networking	1063
18.4.4	Containerized IoT Services	1064
18.5	Cloud Computing Services	1064
18.5.1	Infrastructure-as-a-Service (IaaS)	1065
18.5.2	Software-Defined Cloud Computing Networking	1066
18.5.3	Cloud-Native Microservices	1067
18.5.4	Mobile Cloud Computing in 5G	1068
18.6	Fog Computing und Artificial Intelligence	1069
18.6.1	Time-Sensitive IoT/5G Applications	1071
18.6.2	Intelligent IoT, Cognitive IoT	1072
18.6.3	Ambient Intelligence in IoT	1074
18.6.4	IoT Service Orchestration	1075
18.7	Next 5G und 6G (Generation) Mobile Networks	1076
18.7.1	5G-enabled Mobile IoT Applications	1077
18.7.2	Vehicle-to-Everything (V2X) Services	1078
18.7.3	SDN and NFV for 5G Mobile Networks	1079
18.7.4	5G Network Slicing	1080
18.7.5	5G Network Security	1082
18.7.6	6G als zukünftige Vision der Mobilfunknetze	1083
18.8	Information-Centric Networking and Services	1084
18.8.1	Software-Defined ICN (SD ICN)	1086
18.8.2	Information-Centric IoT (IC IoT)	1088
18.8.3	Information-Centric Services für Smart Cities	1090
18.8.4	ICN Security	1091
18.9	Time-Sensitive and Deterministic Networking	1092
18.9.1	Time-Sensitive Networking	1093
18.9.2	Deterministic Networking	1095
18.9.3	6TiSCH Wireless Industrial Networks	1096
18.9.4	Time-Sensitive SDN	1097
18.10	AI-based Networking	1099
18.10.1	AI-enabled SDN	1101
18.10.2	Data-Driven Networking	1101
18.10.3	Cognitive Networks	1103
18.10.4	Intent-based Networking	1104
18.10.5	Autonomic Networking	1105
18.10.6	AI, IoT and 5G Convergence	1106
18.11	Abschließende Bemerkungen	1107
18.11.1	Vom IoT zum Intelligent IoT	1108
18.11.2	Rückblick auf 50 Jahre Rechnerkommunikation	1109
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>1117</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>1129</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>1137</b>