

Anatol BADACH  
Erwin HOFFMANN



# Technik der IP-NETZE

5. Auflage

GRUNDLAGEN DER IPv4-  
UND IPv6-KOMMUNIKATION



Mit über 700 Abbildungen

HANSER



Badach/Hoffmann  
**Technik der IP-Netze**



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Unser **Computerbuch-Newsletter** informiert Sie monatlich über neue Bücher und Termine. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter:

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**





Anatol Badach  
Erwin Hoffmann

# **Technik der IP-Netze**

## **Grundlagen der IPv4- und IPv6- Kommunikation**

5., überarbeitete Auflage

**HANSER**

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Sylvia Hasselbach

Copy editing: Jürgen Dubau, Freiburg/Elbe

Layout: Erwin Hoffmann mit LaTeX

Umschlagdesign: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Umschlagrealisation: Max Kostopoulos

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47371-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47426-0

# 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 $C$ . . . . .	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 MPAS 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 Protokollschichtenmodell 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>



# Vorwort

Das Internet ist inzwischen zum unabdingbaren Kommunikationsmedium geworden, über das jeder zu jeder Zeit Information über fast alles abrufen sowie Nachrichten senden und empfangen kann. Unsere heutige Gesellschaft kann man sich ohne Internet kaum noch vorstellen. Voraussetzung zur Kommunikation zwischen Rechnern sind bestimmte Regeln, die vor allem die Datenformate und die Prinzipien der Datenübermittlung festlegen. Diese Regeln werden als Kommunikationsprotokolle bezeichnet. TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) stellt eine derartige Protokollfamilie dar, sie wird im weltweiten Internet, in privaten Intranets und in anderen Netzen verwendet. Netze, die auf dieser Protokollfamilie aufbauen, bezeichnet man als *IP-Netze*.

Begriff: IP-Netze

Ein IP-Netz – und insbesondere das Internet – besteht nicht nur aus mehreren Rechnern und IP/TCP dazwischen, sondern dahinter verbergen sich sehr komplexe Vorgänge. Das Internet stellt einen weltweiten Dienst zur Übermittlung nicht nur von Daten, sondern auch von audiovisuellen Informationen, also von Audio und Video, in Form von IP-Paketen dar. Vergleicht man diesen Dienst mit dem Briefdienst der Post, so entspricht ein IP-Paket einem Brief und die sogenannte IP-Adresse einer postalischen Adresse. Das massive Wachstum des Internet und die dabei entstehenden Probleme und neuen Anforderungen haben die Entwicklung sowohl eines neuen Internetprotokolls, des IPv6, als auch von Techniken MPLS und GMPLS für die Übermittlung der IP-Pakete über Hochgeschwindigkeitsnetze, insbesondere über optische Netze, vorangetrieben. Noch in der ersten Dekade dieses Jahrhunderts hat man von *Next Generation IP Networks* gesprochen und sie sind bereits Realität geworden.

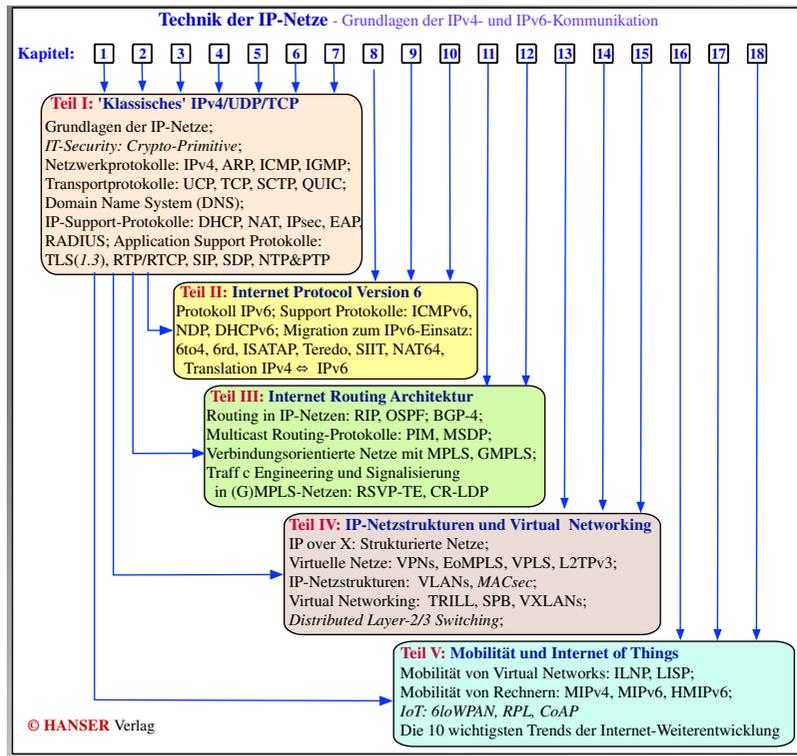
Komplexität und Weiterentwicklung

Dieses Buch gibt eine fundierte Darstellung zentraler Komponenten der TCP/IP-Protokollfamilie, wie z.B. IP, TCP, UDP, DNS und DHCP, sowie von Routing sowohl beim klassischen IP, IPv4 genannt, als auch beim IPv6. Das Buch erläutert die Strategien für die Migration zum Einsatz von IPv6, präsentiert die Konzepte zum Aufbau der IP-Netze auf Basis verschiedener Netztechnologien, wie LANs, WLANs, SDH und WDM, und geht auch auf die IP-Weitverkehrsnetze mit (G)MPLS ein. Die Themen wie die Realisierung von VPNs, *Virtual Networking* in LANs durch die Bildung von VLANs und VXLANs, Konzepte und Einsatz von TRILL und *Shortest Path Bridging* werden ebenso präsentiert. Die Darstellung der Protokolle MIPv4, MIPv6 und HMIPv6 zur Unterstützung der Mobilität von Rechnern wie auch der Protokolle ILNP und LISP, mit denen man die Mobilität virtueller Netzwerke erreichen kann, rundet den Inhalt dieses Buches ab.

Ziel des Buches

Das Buch ist so aufgebaut, dass sowohl die notwendigen technischen Grundlagen fundiert dargestellt als auch verschiedene Aspekte bei der Planung und Verwaltung der IP-Netze diskutiert werden. Damit eignet es sich nicht nur als Lehrbuch für Studenten und Neueinsteiger, sondern auch als Nachschlagewerk für alle Interessenten, die für die

An wen richtet sich das Buch?



Planung, Realisierung, Verwaltung und Nutzung des Internet, von privaten Intranets und anderen IP-Netzen verantwortlich sind.

#### Aufbau des Buches

Zurzeit ist kein Buch verfügbar, in dem die Technik der IP-Netze so breit dargestellt wäre. Daher kann dieses Buch als ein Handbuch für alle Netzwerk-Verantwortlichen dienen. Durch die fundierte und praxisorientierte Darstellung der Inhalte eignet sich gut dieses Buch auch für alle 'Internet-Fans' zum Selbststudium. Dieses Buch präsentiert in 17 Kapiteln, die auf fünf Teile verteilt sind, alle wichtigen Aspekte der IP-Netze und kann nicht wie ein spannender Roman in einem Schlag durchgelesen werden. Das vorliegende Bild zeigt dessen logische Struktur und Abhängigkeiten zwischen Inhalten einzelner Teile, um den Lesern eine Orientierung zu geben, aus welchen Teilen man Kenntnisse benötigt, um beim Lesen verschiedene, voneinander abhängige Themenbereiche besser zu verstehen.

#### Inhalte der Kapitel

Betrachtet man die einzelnen Kapitel dieses Buches etwas detaillierter, so lassen sie sich wie folgt kurz charakterisieren:

#### Kapitel 1

Kapitel 1 präsentiert die Entwicklung des Internet sowie die notwendigen Grundlagen der Rechnerkommunikation und der *Kommunikationsprotokolle* und geht u.a. daher auf die folgenden Probleme ein: Welche Funktionen liegen den Kommunikationsprotokollen zugrunde und wie kann die Kommunikation in IP-Netzen mittels eines Schichtenmodells anschaulich dargestellt werden? Wie können die verbindungslo-

se und die verbindungsorientierte Kommunikation in IP-Netzen interpretiert werden und welche Bedeutung hat die Transportschicht? Welche Sicherheitsziele werden in IP-Netzen verfolgt und wie können diese technisch umgesetzt werden? Wie koordiniert die IETF die technologische Entwicklung des Internet und wie können wir diese verfolgen?

Kapitel 2 führt den Leser in die Problematik der IT-Security ein: Netze sind *Vermittlungsnetze*, die Nachrichten *zuverlässig* und *unveränderlich* von A nach B transportieren sollen. Heute besteht der Bedarf aber auch darin, dass der Nachrichtentransport *vertraulich* erfolgt. Wie das zu bewerkstelligen ist, versucht Kapitel 2 zu vermitteln, indem vier Krypto-Primitive eingeführt und erklärt werden. Moderne Kryptographie (Pre-Quantum) kommt nicht ohne Elliptische Kurven aus, deren Bedeutung und Einsatz hier erläutert wird. Auch die Frage der Benutzer- und Rechnerauthentifizierung als 'Digitale Identitäten' mit und ohne *X.509 Zertifikate* wird beleuchtet. Kapitel 2

Kapitel 3 stellt sowohl IPv4 als auch dessen Hilfsprotokolle ARP und ICMP umfassend dar und erläutert u.a. folgende Fragestellungen: Wie sind IPv4-Pakete aufgebaut und welche Steuerungsangaben kann der Header eines IPv4-Pakets enthalten? Welche Arten von IPv4-Adressen gibt es und wie werden sie aufgebaut? Wie erfolgt die *Adressierung* in IP-Netzen und wie werden Subnetze gebildet? Welche Bedeutung haben die Protokolle ARP und ICMP und wie funktionieren sie? Wie realisiert man *Multicasting* in IP-Netzen mit dem Protokoll IGMP? Kapitel 3

Von großer Bedeutung in IP-Netzen ist die sogenannte *Transportschicht* mit den klassischen Protokollen TCP und UDP; hierzu kommen noch die neuen Protokolle SCTP und UDP-Lite. Weil das IP keine zuverlässige Übermittlung der Pakete garantiert, verwendet man hauptsächlich das TCP und in einigen Fällen das SCTP, um die zuverlässige Übermittlung der IP-Pakete zu gewährleisten. Kapitel 4 präsentiert die Aufgaben der Transportschicht. Diese können einfach gestaltet sein, wie bei UDP, das verbindungslos fungiert; aber auch komplex, wie bei TCP. Hier werden *Sessions* aufgebaut und unterhalten und sich um den Datenfluss gekümmert. Aufbauend hierauf wurde das Protokoll SCTP entwickelt. Einen anderen Ansatz stellt QUIC dar, das auf UDP aufsetzt, intern aber über umfangreiche Mechanismen zur Steuerung und vor allen Datenverschlüsselung entsprechend TLS verfügt. Deren prinzipielle Arbeitsweise wird hier dargestellt und speziell betrachtet: Wie funktioniert der gemeinsame Datenfluss über ggf. mehrere Übertragungsmedien? Kapitel 4

Die Rechner in IP-Netzen werden zwar durch ihre IP-Adressen lokalisiert, aber es ist sinnvoll, statt einer IP-Adresse einen Rechner über seinen Namen anzusprechen – wie es auch unter Menschen üblich ist. Dies ist mit dem *Domain Name System* (DNS) möglich. Kapitel 5 liefert eine fundierte Darstellung von DNS, geht auf verschiedene Möglichkeiten des DNS-Einsatzes ein und erörtert u.a. die folgenden Probleme: Wie funktioniert DNS und welche Aufgaben kann DNS wahrnehmen? Wie erfolgt die Ermittlung der IP-Adresse aufgrund des Hostnamens und umgekehrt? Welche Informationen als Resource Records enthält DNS und wie werden diese strukturiert? Welche Ziele werden mit ENUM, DynDNS und DNSSEC und DNSCurve verfolgt? Kapitel 5

Kapitel 6 stellt, als *IP-Support-Protokolle* bezeichnete, ergänzende Lösungen für das IPv4-Protokoll dar und erläutert hierbei u.a. die folgenden Aspekte: Wie können sich Kapitel 6

Rechner mittels DHCP automatisch eine gültige IPv4-Adresse zuweisen? Welche Lösungen für die Nutzung von privaten IPv4-Adressen mithilfe von NAT (*Network Address Translation*) gibt es und welche Probleme entstehen dabei – insbesondere bei der audiovisuellen Kommunikation? Wie kann *IPsec* zum verschlüsselten und authentisierten Austausch von IP-Paketen genutzt werden? Welche Probleme verursacht NAT bei IPsec und wie können diese bewältigt werden? Welche Probleme ergeben sich bei der Überprüfung von 'Digitalen Identitäten' unter Einsatz von EAP, RADIUS und LDAP?

#### Kapitel 7

Mehrere ergänzende Lösungen sind nicht nur für das IPv4 nötig, sondern in Form spezieller Protokolle auch für Applikationen, sodass wir von *Application Support Protokollen* sprechen. Kapitel 7 präsentiert diese, erläutert deren Aufgaben und geht u.a. auf folgende Fragestellungen ein: Wie kann der Datentransport zwischen Applikationen mittels TLS (1.3) gesichert realisiert werden und welche Voraussetzungen sind hierfür nötig? Welche Protokolle zur Realisierung der Echtzeitkommunikation in IP-Netzen benötigt werden, welche Aufgaben haben sie und wie werden sie konzipiert? Gerade diese Protokolle benötigen eine Zeitsynchronisation zwischen den Teilnehmern. Wie wird dies mittels NTP und PTP ermöglicht, und welche Zeitformate und -referenzen werden hierbei genutzt?

#### Kapitel 8

Um den steigenden Anforderungen an IP-Netze gerecht zu werden, wurde das IPv6 als '*IP der nächsten Generation*' entwickelt und die Ära von IPv6 hat bereits begonnen. IPv6 bringt neue Möglichkeiten und diese reichen von Sicherheitsfunktionen über mehr Flexibilität bis hin zur Unterstützung von neuartigen Anwendungen. Das IPv6 ermöglicht die automatische Konfiguration von Rechnern, sodass man sogar von *Plug&Play-Konfiguration* spricht. Kapitel 8 stellt das IPv6 ausführlich dar und geht u.a. auf die folgenden Probleme ein: Welche Ziele wurden bei der Entwicklung von IPv6 verfolgt? Welche neuen Funktionen bringt IPv6 mit sich? Welche Arten von IPv6-Adressen gibt es und wie können sie den Rechnern zugewiesen werden?

#### Kapitel 9

Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung von IPv6 war die Unterstützung der automatischen Konfiguration von Rechnern. Hierfür stehen die Protokolle ICMPv6, NDP und DHCPv6 zur Verfügung. Diese *IPv6 Support Protokolle* stellt Kapitel 9 dar und geht hierbei u.a. auf folgende Aspekte ein: Wie wurde ICMPv6 konzipiert und welche Aufgaben hat es? Welche Funktionen liefert NDP, um die automatische Konfiguration von Rechnern mit IPv6 zu unterstützen? Wie bekommt ein IPv6-Rechner seine Netzkonfiguration automatisch zugewiesen?

#### Kapitel 10

Da die Umstellung von allen Rechnern, in denen das klassische IPv4 verwendet wird, auf das IPv6 nicht auf einen Schlag geschehen kann, benötigt man geeignete Systemlösungen für die Migration zum IPv6-Einsatz. Kapitel 10 präsentiert verschiedene Ansätze und Systemlösungen für die Koexistenz von IPv4 und IPv6 – vor allem die Konzepte *IPv6 over IPv4* und *IPv4 over IPv6*. Die Integration der IPv4- und der IPv6-Netze dank der Translation *IPv4*  $\leftrightarrow$  *IPv6* wird ebenso präsentiert. Hier werden u.a. folgende Probleme erörtert: Wie kann man sich die Koexistenz von IPv4 und IPv6 in einem Rechner vorstellen, wann ist diese Koexistenz möglich und welche Bedeutung hat sie? Wie kann die IPv6-Kommunikation über IPv4-Netze erfolgen? Wie lassen sich IPv6-Netzsegmente über IPv4-Netze verbinden? Wie können die Rechner aus

IPv6-Netzen auf das IPv4-Internet zugreifen? Wie erfolgt die Translation IPv4 ↔ IPv6 und was ermöglicht sie?

Router fungieren in IP-Netzen als Knoten, ermitteln optimale Übermittlungswege, die sogenannten *Routen*, für die empfangenen IP-Pakete und leiten sie weiter. Kapitel 11 vermittelt eine kompakte Darstellung von Routing-Grundlagen und -Protokollen. Es werden hier die *Routing-Protokolle* RIP-1, RIP-2 und OSPF sowie BGP-4 erläutert. Dieses Kapitel zeigt auch, wie eine redundante Router-Auslegung mithilfe der Protokolle HSRP und VRRP erfolgen kann, und stellt die Protokolle PIM-SM und MSDP für das *Multicast-Routing* dar. Hierbei werden u.a. folgende Fragen beantwortet: Welche Aufgabe haben die Router und wie funktionieren sie? Welche Prinzipien liegen den Routing-Protokollen zugrunde? Wie verlaufen die Routing-Protokolle RIP und OSPF? Welche Erweiterungen dieser Protokolle sind für IPv6 notwendig? Wie funktioniert BGP-4, für welche Zwecke und wie kann es eingesetzt werden? Wie können die Router am Internetzugang redundant ausgelegt werden? Wie realisiert man Multicast-Routing in IP-Netzen?

Kapitel 11

Die IP-Netze im Weitverkehrsbereich basieren überwiegend auf dem MPLS-Konzept und auf der, als GMPLS (*Generalized MPLS*) bezeichneten, dessen Erweiterung. Die Techniken MPLS und GMPLS ermöglichen die Konvergenz von Ethernet u.a. mit SDH- und WDM-Netzen. Dank dieser Konvergenz können Ethernet heutzutage nicht nur als LAN eingerichtet werden, sondern *Ethernet-Services* können sogar weltweit verfügbar gemacht werden. Kapitel 12 stellt die Konzepte und Protokolle zum Aufbau der IP-Netze mit dem MPLS und dem GMPLS vor und geht u.a. auf die folgenden Probleme ein: Worin bestehen die Konzepte MPLS und GMPLS und welche Möglichkeiten entstehen durch deren Einsatz? Welche Services werden durch *Traffic Engineering* in IP-Netzen erbracht? Wie werden (G)MPLS-Netze aufgebaut und wie wird die IP-Kommunikation über sie realisiert? Wie erfolgt die IP-Kommunikation über optische Netze? Wie können Datenpfade über (G)MPLS-Netze dynamisch eingerichtet werden?

Kapitel 12

In vielen Unternehmen können gleichzeitig unterschiedliche Netztechnologien eingesetzt und entsprechend integriert werden. Sie lassen sich mithilfe von *Tunneling-Techniken* so einsetzen, dass virtuelle Standleitungen für den Transport von Daten über öffentliche IP-Netze aufgebaut werden können. Diese Idee hat zur Entstehung von VPNs geführt. Somit erläutert Kapitel 13 einerseits die Konzepte für den IP-Einsatz in Netzen mit klassischen LANs (Ethernet), Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (z.B. physikalischen Standleitungen, Satellitenverbindungen) und WLANs. Andererseits präsentiert dieses Kapitel auch die Lösungen und Protokolle für den Aufbau von VPNs auf Basis sowohl klassischer IP-Netze mittels des IPsec als auch der IP-Netze mit den Techniken MPLS bzw. GMPLS, die auch als *Provider Provisioned VPNs* bezeichnet werden. Hierbei geht dieses Kapitel u.a. auf folgende Fragestellungen ein: Wie kann man sich ein logisches LAN-Modell vorstellen und wie kann die *Multiprotokollfähigkeit in LANs* erreicht werden? Welche Ideen liegen den WLANs nach IEEE 802.11 zugrunde und wie werden WLANs mit einem Ethernet gekoppelt? Welche Typen von virtuellen Netzen gibt es, wie werden sie aufgebaut und wie können sie genutzt werden? Wie lassen sich sichere, virtuelle IP-Netze aufbauen?

Kapitel 13

- Kapitel 14** In den letzten Jahren haben sich einige Megatrends auf der 'Netzwerkwelt' herauskristallisiert. In privaten Netzwerken spricht man heute von *Layer-3-Switching* und von VLANs (*Virtual LANs*). Dabei stellt die Virtualisierung von Rechnern neue Anforderungen an IP-Netze. Die Unterstützung der Mobilität virtueller Rechner und virtueller Netzwerke sowie der Wunsch nach flexibler Möglichkeit, einen Rechner bzw. ein Netzwerk an das Internet parallel anbinden zu können, sind nur die wichtigsten von ihnen. Diese Probleme erläutert Kapitel 14 und präsentiert neue Konzepte und Protokolle hierfür, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Hervorgehoben sei hier *Shortest Path Bridging* (SPB), TRILL, VXLANs, ILNP und LISP. Dieses Kapitel geht u.a. auf folgende Fragen ein: Wie werden moderne IP-Netzwerke physikalisch und logisch strukturiert? Wie funktionieren Layer-2- und Layer-3-Switches, wo und wie werden sie eingesetzt? Wie können komplexe, auch virtuelle Rechner enthaltene VLANs gebildet werden und welche Bedeutung dabei hat VLAN Tagging? Worin bestehen die Ideen von TRILL, SPB, VXLAN, ILNP und LISP? Welche Möglichkeiten der Integration von IPv4 und IPv6 liefert LISP?
- Kapitel 15** Der Gedanke der Virtuellen Netze kann aber von einer IP-basierten Infrastruktur gelöst werden und sehr effizient auf dem Layer 2 umgesetzt werden. Hiermit ergeben sich Konvergenzen von Layer 2 und Layer 3 Verfahren, die unter dem Stichwort 'Distributed Layer-2/3 Switching in Kapitel 15 vorgestellt werden, die bis zu auf Ethernet basierten virtuellen Netzen reicht, sowie so wie sie heute im Provider-Umfeld angeboten werden.
- Kapitel 16** Um die Mobilität in IP-Netzen zu ermöglichen, wurden die Protokolle MIP (*Mobile IP*), MIPv6 (*Mobile IPv6*) und HMIPv6 (*Hierarchical MIPv6*) entwickelt. Kapitel 16 zeigt, wie diese Protokolle funktionieren und was gemacht werden muss, damit ein mobiler Rechner während bestehender Verbindungen ein Subnetz verlassen und in ein neues hinein bewegen kann, ohne die bestehenden Verbindungen abbrechen zu müssen. Auch die Integration von Hotspots mit dem Internet und die Möglichkeiten von Roaming zwischen Hotspots werden präsentiert. Darüber hinaus werden u.a. die folgenden Aspekte erörtert: Welche Ansätze und Protokolle zur Unterstützung der Mobilität in IP-Netzen gibt es? Wie kann *Roaming* zwischen Hotspots realisiert werden? Wie verläuft die Kommunikation beim Einsatz von MIP bzw. von MIPv6?
- Kapitel 17** Ein in der Tat neues 'Kapitel' haben wir mit der Diskussion um das 'Internet of Things' IoT Kapitel 17 aufgeschlagen. Hier stellen wir die wesentlichen Konzepte des 'Internet der Dings', die Adaption von IPv6 für IoT – 6LoWAPN – die nun notwendigen Routingverfahren, sowie das Applikationsprotokoll CoAP vor.
- Kapitel 18** Der Zukunft des Internet und seine möglichen Anwendungen und Perspektiven ist Kapitel 18 gewidmet. Wir wissen ja: "Schwer zu sehen, in ständiger Bewegung die Zukunft ist." (Meister Joda). Trotzdem ist hier der Versuch gewagt, die beherrschenden Tendenzen in systematischer Weise zu betrachten und die aktuelle Diskussion in den Internet-Gremien zu referenzieren.
- Verständnisfragen** Zu jedem einzelnen Kapitel gibt es ergänzend 'Verständnisfragen', durch die der geneigte Leser sein Wissen um zentrale Punkte der einzelnen Kapiteln überprüfen

und ggf. vertiefen kann. Die Antworten auf diesen Fragen finden sich Online auf der Webseite des Buchs.

## Vorwort zur vierten Auflage

Geschuldet der schnellen Entwicklung der Internet-Technologien und der guten Akzeptanz unserer 'Technik der IP-Netze' haben wir unsern 'siebenjährigen' Updatezyklus (erste, zweite und dritte Auflage) etwas beschleunigt und stellen nun mit der vierten Auflage eine aktualisierte Version zur Verfügung. Neben obligatorischen Verbesserungen und Richtigstellungen in einigen Details, sind folgende Aspekte neu hinzugekommen:

- Die heutzutage als unentbehrliche IT-Security bei der Internetnutzung wird auf dem aktuellen Stand umfangreich diskutiert und in Kapitel 2 an zentraler Stelle untergebracht. Wir führen hier die vier zentralen *kryptographischen Primitiven* vor, die eine hervorgehobene Rolle einnehmen.
- Die Switching-Technologien für IP-Netze umfassen nun Layer-2 und Layer-3 Eigenschaften, deren Würdigung in Kapitel 16 zu finden ist.
- Ein wichtiger neuer Aspekt stellt das *Internet of Things* (IoT) dar. Dies würdigen wir in den Kapiteln 17 und 18. Während zunächst Lösungen für Komponenten mit Ressourcen-beschränkter und im Besonderen geringer elektrischer Leistung (6LoWAPN) und die hieraus erwachsenden Konsequenzen, die sich für das Routing und für Applikationen, wie dem *Constrained Application Protocol* (CoAP) ergeben, beschrieben werden, spannen wir in Kapitel 18 dieses neue Umfeld mit seinen vielfältigen Facetten in Gänze auf.

Die vierte Auflage wurde auch typographisch aufgefrischt:

- Das Layout wurde über die vielen Kapitel vereinheitlicht und die Tabellen mit einem modernen Design versehen.
- Beispiele im Buch werden – wie in diesem Fall – mit einem links-seitigen Balken hervorgehoben.

Layout-  
Anpassungen und  
Beispiele

## Vorwort zur fünften Auflage

Diese Auflage beinhaltet im wesentlichen redaktionelle Änderungen und Anpassungen, die der Entwicklung des Internets und seiner Protokolle geschuldet sind. Allerdings verweist diese Auflage bereits auf das nächste Projekt der Autoren, das virtuellen Netzstrukturen gewidmet sein wird.

- *Redaktionelle* Änderungen betreffen die Verlinkung der Inhalte und die Verbesserung der Nutzung des Buchs als PDF-Dokument. Somit kann man im PDF nun zwischen Kapiteln und Abschnitten navigieren. Alle Links zu den IETF-Quellen wurden von *http* auf *https* umgestellt; das trägt zum Komfort bei, da dort keine 'Umleitung' gesetzt wurde. Wir wurden gelegentlich gefragt: *Warum gibt es das Buch nicht als eBook?* Die Antwort ist einfach: 'Technik der IP-Netze' wurde im

Redaktionelles

aktuellen Format mittels  $\text{\LaTeX}$  gesetzt. Darstellung, Seitenumbruch und Lesbarkeit sind darauf abgestimmt. Bei einem eBook-Format gingen dies verloren.

Bei den Abbildungen, wo wir Bitstrukturen erklären, halten wir es nun mit *Edsger Dijkstra* (siehe Vorspann zum Thema 'Internet-Routing-Architektur') und fangen bei '0' zu zählen an: Das erste Bit wird mit '0' nummeriert. Das ist auch die übliche Schreibweise in der Literatur.

Wurde das Manuskript bislang unter MacOS erstellt, findet nun Linux Anwendung. Die neuen Abbildungen wurden mit *InkScape* erstellt, an dessen Nutzung sich der Autor noch gewöhnen muss ;-)

#### Inhaltliches

- *Inhaltliche* Änderungen sind überschaubar, und es mussten lediglich einige wenige Fehler korrigiert werden. In Kapitel 2 wurde die ECC-Kryptographie endlich entsprechend ihrer Bedeutung nach eingeführt. Trotzdem ist 'Technik der IP-Netze' weder ein Lehrbuch der Kryptographie noch der 'IT-Security'. Allerdings ist die Literatur zu diesen Themen relativ überschaubar, sodass wir einen aktuellen Abriss hierzu als notwendig betrachtet haben.

Das Kapitel 4 integriert nun endlich auch Multipath-TCP an der richtigen Stelle, und es wurde dem QUIC-Protokoll ein eigener Abschnitt gewidmet, der versucht, dieses doch recht komplexe Protokoll zumindest in seinen Grundzügen zu erklären. In verteilten System spielt die Zeitsynchronisation von IT-Systemen eine wichtige Rolle (auch weil man Eindringlinge erkennen will). Daher haben wir in Kapitel 7 sowohl die Protokolle NTP als auch PTP beschrieben; nicht immer zur Zufriedenheit des Autors.

Die fünfte Auflage ist dem Internet-Aktivisten *Sven Guckes* gewidmet.

## Technik der IP-Netze – Homepage

Die Homepage des Buches ist unter <https://www.fehcom.de/pub/tipn.html> erreichbar, wo sich auch Korrekturen einfinden werden. Ihre Kritik, Verbesserungsvorschläge und eventuell Ihre Korrekturen sind willkommen und wir nehmen sie gerne entgegen. Für Lehr- und Ausbildungszwecke stellen wir die Abbildungen auf Anfrage zur Verfügung.

## Danksagung

Ein so umfangreiches Buch kann ohne Anregungen von außen und einen entsprechenden Erfahrungsaustausch nicht geschrieben werden.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl. math. Jürgen Müller (Darmstadt) und Herrn Dirk Müller (Koblenz) für die notwendige Sorgfalt, die dritte Auflage des Buches intensiv durchzuarbeiten und uns Korrekturen vorzuschlagen. Ebenso möchten wir Frau Hasselbach als primäre Ansprechpartnerin sowie Frau Irene Weihart und Frau Kristin Rothe und nicht zu vergessen Herrn Jürgen Dubau für das sorgfältige Lektorat auch in dieser Auflage danken. Bei einem so umfangreichen Projekt ergeben sich immer Inkonsistenzen, auf die die aufmerksame Leserschaft stößt.