

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	17
Vorwort zur deutschen Auflage	21
Kapitel 1 Einleitung	25
1.1 Einsatzbereiche für Rechnernetze	27
1.1.1 Zugang zu Informationen	27
1.1.2 Kommunikation von Person zu Person	30
1.1.3 E-Commerce	31
1.1.4 Unterhaltung	32
1.1.5 Das Internet der Dinge	33
1.2 Rechnernetzarten	33
1.2.1 Breitbandnetze	33
1.2.2 Mobilfunk- und Drahtlosnetze	34
1.2.3 Netze für Content-Provider	38
1.2.4 Transitnetze	39
1.2.5 Unternehmensnetze	39
1.3 Netztechnologie – von lokal zu global	42
1.3.1 Personal Area Network	42
1.3.2 Lokale Netze (LANs)	43
1.3.3 Heimnetze	46
1.3.4 Stadtnetze (MANs)	48
1.3.5 Fernnetze (WANs)	49
1.3.6 Internetworks	53
1.4 Beispielnetze	54
1.4.1 Das Internet	54
1.4.2 Mobile Netze	66
1.4.3 Drahtlose Netze (WiFi)	72
1.5 Netzprotokolle	76
1.5.1 Designziele	76
1.5.2 Protokollschichten	79
1.5.3 Verbindungen und Zuverlässigkeit	83
1.5.4 Basisoperationen von Diensten	86
1.5.5 Beziehung zwischen Diensten und Protokollen	88
1.6 Referenzmodelle	89
1.6.1 Das OSI-Referenzmodell	90
1.6.2 Das TCP/IP-Referenzmodell	91
1.6.3 Kritik am OSI-Modell und an den OSI-Protokollen	94
1.6.4 Kritik am TCP/IP-Referenzmodell und an den dazugehörigen Protokollen	97
1.6.5 Das in diesem Buch benutzte Modell	98
1.7 Standardisierung	99
1.7.1 Standardisierung und Open Source	99

1.7.2	Who's who in der Welt der Telekommunikation	100
1.7.3	Who's who in der Welt der internationalen Normen	102
1.7.4	Who's who in der Welt der Internetstandards	105
1.8	Politische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte	106
1.8.1	Online-Äußerungen	107
1.8.2	Netzneutralität.	108
1.8.3	Sicherheit	109
1.8.4	Datenschutz	110
1.8.5	Desinformation	112
1.9	Metrische Einheiten	112
1.10	Überblick über das restliche Buch	113
	Zusammenfassung	115
	Übungsaufgaben	116
Kapitel 2	Die Bitübertragungsschicht	121
2.1	Gerichtete Übertragungsmedien.	123
2.1.1	Persistente Speichermedien	123
2.1.2	Twisted-Pair-Kabel	124
2.1.3	Koaxialkabel	126
2.1.4	Powerline Networks	127
2.1.5	Glasfaserleiter	128
2.2	Drahtlose Übertragung	134
2.2.1	Das elektromagnetische Spektrum	135
2.2.2	Frequency Hopping Spread Spectrum	136
2.2.3	Direct Sequence Spread Spectrum	137
2.2.4	Ultrabreitbandkommunikation.	138
2.3	Nutzung des Spektrums für Übertragungen	138
2.3.1	Funkübertragung.	138
2.3.2	Mikrowellenübertragung	140
2.3.3	Infrarotübertragung	142
2.3.4	Lichtübertragung.	142
2.4	Von den Wellenformen zu den Bits	144
2.4.1	Theoretische Grundlagen der Datenübertragung.	144
2.4.2	Maximale Datenübertragungsrate eines Kanals	148
2.4.3	Digitale Modulation	150
2.4.4	Multiplexing	158
2.5	Das öffentliche Telefonnetz	166
2.5.1	Aufbau des Telefonsystems	167
2.5.2	Teilnehmeranschlüsse: Modems, ADSL und Glasfaser.	170
2.5.3	Verbindungsleitungen und Multiplexverfahren	180
2.5.4	Vermittlung	187
2.6	Mobilfunknetze.	192
2.6.1	Gängige Begriffe und Konzepte: Zellen, Handover, Paging.	193
2.6.2	Die erste Generation der Mobiltelefone (1G): Analoge Sprache	194
2.6.3	Die zweite Generation der Mobiltelefone (2G): Digitale Sprache	196
2.6.4	GSM – Global System for Mobile Communications	197
2.6.5	Die dritte Generation der Mobiltelefone (3G): Digitale Sprache und Daten	201

2.6.6	Die vierte Generation der Mobiltelefone (4G): Paketvermittlung .	206
2.6.7	Die fünfte Generation der Mobiltelefone (5G)	207
2.7	Kabelnetze	209
2.7.1	Geschichtlicher Abriss der Kabelnetze: Gemeinschaftsantennen-Fernsehen	209
2.7.2	Breitbandinternetzugang über Kabel: HFC-Netze	210
2.7.3	DOCSIS	213
2.7.4	Gemeinsame Ressourcennutzung in DOCSIS-Netzen: Knoten und Minizeitscheiben	214
2.8	Kommunikationssatelliten	216
2.8.1	Geostationäre Satelliten	218
2.8.2	MEO-Satelliten	222
2.8.3	LEO-Satelliten	222
2.9	Vergleich verschiedener Zugangsnetze	225
2.9.1	Terrestrische Zugangsnetze: Kabel, Glasfaser und ADSL	225
2.9.2	Satelliten im Vergleich zu terrestrischen Netzen.	227
2.10	Politische Entscheidungen im Bereich der Bitübertragungsschicht.	229
2.10.1	Zuweisung der Frequenzbereiche.	229
2.10.2	Das Mobilfunknetz	232
2.10.3	Das Telefonnetz	234
	Zusammenfassung.	237
	Übungsaufgaben	238
Kapitel 3	Die Sicherungsschicht	245
3.1	Entwurfsaspekte der Sicherungsschicht	247
3.1.1	Dienste für die Vermittlungsschicht.	248
3.1.2	Rahmenbildung.	250
3.1.3	Fehlerkontrolle	254
3.1.4	Flusskontrolle	255
3.2	Fehlererkennung und -korrektur	256
3.2.1	Fehlerkorrekturcodes	258
3.2.2	Fehlererkennungscodes.	264
3.3	Grundlegende Protokolle der Sicherungsschicht	271
3.3.1	Einige vereinfachende Annahmen	271
3.3.2	Grundlagen der Übertragung und des Empfangs	272
3.3.3	Simplexprotokolle der Sicherungsschicht	276
3.4	Effizienz verbessern	284
3.4.1	Ziel: Bidirektionale Übertragung, mehrere Rahmen gleichzeitig im Umlauf	284
3.4.2	Beispiele für Vollduplex-Schiebefensterprotokolle.	287
3.5	Protokolle der Sicherungsschicht in der Praxis.	304
3.5.1	Packet over SONET	304
3.5.2	ADSL	308
3.5.3	DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification).	310
	Zusammenfassung.	314
	Übungsaufgaben	315

Kapitel 4	Die MAC-Teilschicht (Medium Access Control)	321
4.1	Die Kanalzuordnung	323
4.1.1	Statische Kanalzuordnung	323
4.1.2	Voraussetzungen für dynamische Kanalzuordnung	325
4.2	Mehrfachzugriffsprotokolle	327
4.2.1	ALOHA	327
4.2.2	CSMA-Protokolle (Carrier Sense Multiple Access)	332
4.2.3	Kollisionsfreie Protokolle	335
4.2.4	Protokolle mit eingeschränkter Konkurrenz	340
4.2.5	Protokolle für drahtlose LANs	343
4.3	Ethernet	347
4.3.1	Bitübertragungsschicht von klassischem Ethernet	347
4.3.2	Ethernet-MAC-Teilschichtprotokoll	349
4.3.3	Leistungsaspekte bei Ethernet	353
4.3.4	Switched Ethernet	355
4.3.5	Fast Ethernet	358
4.3.6	Gigabit-Ethernet	361
4.3.7	10-Gigabit-Ethernet	364
4.3.8	40- und 100-Gigabit-Ethernet	366
4.3.9	Das Ethernet – ein Rückblick	367
4.4	Drahtlose LANs	368
4.4.1	IEEE-802.11-Architektur und -Protokollstapel	369
4.4.2	Die IEEE-802.11-Bitübertragungsschicht	371
4.4.3	Das IEEE-802.11-MAC-Teilschichtprotokoll	374
4.4.4	IEEE-802.11-Rahmenstruktur	381
4.4.5	Dienste	383
4.5	Bluetooth	386
4.5.1	Architektur von Bluetooth	386
4.5.2	Bluetooth-Anwendungen	387
4.5.3	Bluetooth-Protokollstapel	389
4.5.4	Bluetooth-Funkschicht	390
4.5.5	Bluetooth-Verbindungsschicht	391
4.5.6	Bluetooth-Rahmenstruktur	392
4.5.7	Bluetooth 5	394
4.6	DOCSIS	394
4.6.1	Überblick	394
4.6.2	Ranging	395
4.6.3	Zuordnung der Kanalbandbreite	395
4.7	Switches der Sicherungsschicht	396
4.7.1	Verwendung von Bridges	397
4.7.2	Learning-Bridges	399
4.7.3	Spannbäume und Bridges	402
4.7.4	Repeater, Hubs, Bridges, Switches, Router und Gateways	405
4.7.5	Virtuelle LANs	408
	Zusammenfassung	416
	Übungsaufgaben	417

Kapitel 5	Die Vermittlungsschicht	425
5.1	Entwurfsaspekte der Vermittlungsschicht	427
5.1.1	Paketvermittlung unter Verwendung des Store-and-forward-Verfahrens	427
5.1.2	Dienste für die Transportschicht	428
5.1.3	Implementierung eines verbindungslosen Dienstes	429
5.1.4	Implementierung eines verbindungsorientierten Dienstes	431
5.1.5	Vergleich von VC-Netzen und Datagrammnetzen	432
5.2	Routing-Algorithmen	434
5.2.1	Das Optimalitätsprinzip	436
5.2.2	Routing nach dem kürzesten Pfad	437
5.2.3	Flooding	441
5.2.4	Distanzvektoralgorithmus	442
5.2.5	Link-State-Routing	445
5.2.6	Hierarchisches Routing in einem Netz	451
5.2.7	Broadcast-Routing	453
5.2.8	Multicast-Routing	455
5.2.9	Anycast-Routing	458
5.3	Traffic-Management auf der Vermittlungsschicht	459
5.3.1	Der Grund für Traffic-Management: Überlastung	459
5.3.2	Verfahren zum Traffic-Management	462
5.3.3	Hop-by-Hop-Rückstau	476
5.4	Dienstgüte und Erlebnisqualität der Anwendungen	478
5.4.1	Anforderungen an die Erlebnisqualität der Anwendungen	478
5.4.2	Overprovisioning	481
5.4.3	Scheduling der Pakete	481
5.4.4	Integrierte Dienste	490
5.4.5	Differenzierte Dienste	493
5.5	Internetworking	496
5.5.1	Internetworks: Ein Überblick	496
5.5.2	Unterscheidungsmerkmale von Netzen	497
5.5.3	Verbindung von heterogenen Netzen	499
5.5.4	Verbindung von Endpunkten über heterogene Netze hinweg	502
5.5.5	Internetwork-Routing: Routing über mehrere Netze	503
5.5.6	Unterstützung verschiedener Paketgrößen: Paketfragmentierung	505
5.6	Softwaredefinierter Netzbetrieb	509
5.6.1	Überblick	509
5.6.2	Die SDN-Steuerungsebene: Logisch zentralisierte Softwaresteuerung	511
5.6.3	Die SDN-Datenebene: Programmierbare Hardware	513
5.6.4	Programmierbare Netztelemetrie	515
5.7	Vermittlungsschicht im Internet	516
5.7.1	IPv4	519
5.7.2	IP-Adressen	523
5.7.3	IP Version 6	537
5.7.4	Internetsteuerprotokolle	547
5.7.5	Label Switching und MPLS	553

5.7.6	OSPF-Protokoll.	557
5.7.7	BGP.	562
5.7.8	Internet-Multicasting.	570
5.8	Regeln und Richtlinien auf der Vermittlungsschicht.	572
5.8.1	Peering-Dispute	572
5.8.2	Priorisierung von Datenverkehr	573
	Zusammenfassung.	575
	Übungsaufgaben.	576

Kapitel 6 Die Transportschicht 583

6.1	Dienste der Transportschicht	585
6.1.1	Dienste für die oberen Schichten	585
6.1.2	Dienstprimitive der Transportschicht.	587
6.1.3	Berkeley-Sockets	591
6.1.4	Beispiel für Socket-Programmierung: Ein Internetdateiserver.	593
6.2	Elemente von Transportprotokollen	597
6.2.1	Adressierung	599
6.2.2	Verbindungsaufbau	602
6.2.3	Freigabe von Verbindungen.	608
6.2.4	Fehlerkontrolle und Flusskontrolle	613
6.2.5	Multiplexing.	618
6.2.6	Systemwiederherstellung	619
6.3	Überlastkontrolle.	622
6.3.1	Gewünschte Bandbreitenzuordnung.	622
6.3.2	Regulierung der Senderate.	627
6.3.3	Probleme mit drahtloser Übertragung.	631
6.4	Internettransportprotokolle: UDP	634
6.4.1	Einführung in UDP.	634
6.4.2	Entfernte Prozeduraufrufe	636
6.4.3	Echtzeittransportprotokolle.	639
6.5	Internettransportprotokolle: TCP	645
6.5.1	Das Transportschichtprotokoll TCP	646
6.5.2	TCP-Dienstmodell	647
6.5.3	TCP-Protokoll.	649
6.5.4	TCP-Header	651
6.5.5	Verbindungsaufbau in TCP	655
6.5.6	Verbindungsfreigabe in TCP	656
6.5.7	Modellierung der Verwaltung von TCP-Verbindungen	657
6.5.8	TCP-Schiebefenster	659
6.5.9	Verwaltung von Timern in TCP	663
6.5.10	TCP-Überlastkontrolle	666
6.5.11	TCP CUBIC.	677
6.6	Transportprotokolle und Überlastkontrolle	678
6.6.1	QUIC: Schnelle UDP-Internetverbindungen	678
6.6.2	BBR: Überlastkontrolle auf der Basis von Bottleneck-Datenrate	679
6.6.3	Die Zukunft von TCP	681

6.7	Leistungsaspekte	682
6.7.1	Leistungsprobleme in Rechnernetzen	683
6.7.2	Messung der Netzwerkleistung.	684
6.7.3	Messung des Zugangsnetzdurchsatzes	684
6.7.4	Messung der Erlebnisqualität	685
6.7.5	Hostdesign für eine Optimierung der Leistung	686
6.7.6	Schnelle Segmentverarbeitung	689
6.7.7	Header-Komprimierung	693
6.7.8	Protokolle für Long Fat Networks.	695
	Zusammenfassung.	700
	Übungsaufgaben	701

Kapitel 7 Die Anwendungsschicht 707

7.1	DNS – Domain Name System	709
7.1.1	Geschichtliches und Überblick.	709
7.1.2	Der DNS-Nachschlageprozess	710
7.1.3	DNS-Namensraum und -Hierarchie	712
7.1.4	DNS-Anfragen und -Antworten	716
7.1.5	Namensauflösung	724
7.1.6	DNS in der Praxis	725
7.1.7	DNS und Privatsphäre.	726
7.1.8	Namensstreitigkeiten.	728
7.2	E-Mail	729
7.2.1	Architektur und Dienste	730
7.2.2	Benutzeragenten	733
7.2.3	Nachrichtenformate.	736
7.2.4	Nachrichtenübertragung	741
7.2.5	Endzustellung	747
7.3	World Wide Web	750
7.3.1	Übersicht über die Architektur.	751
7.3.2	Statische Webdokumente	761
7.3.3	Dynamische Webseiten und Webanwendungen	762
7.3.4	HTTP und HTTPS	766
7.3.5	Privatsphäre im Web	780
7.4	Streaming von Audio und Video	785
7.4.1	Digitales Audio	787
7.4.2	Digitales Video.	789
7.4.3	Streaming von gespeicherten Medien	793
7.4.4	Echtzeit-Streaming	800
7.4.5	Voice-over-IP	801
7.5	Content Delivery	811
7.5.1	Content und Internetverkehr.	813
7.5.2	Serverfarmen und Webproxys	815
7.5.3	Content-Delivery-Netze.	819
7.5.4	Peer-to-Peer-Netze	824
7.5.5	Die Entwicklung des Internets	830
	Zusammenfassung.	835
	Übungsaufgaben	836

Kapitel 8	Sicherheit in Netzen	841
8.1	Grundlagen der Netzwerksicherheit	844
8.1.1	Allgemeine Sicherheitsprinzipien	845
8.1.2	Allgemeine Angriffsprinzipien	847
8.1.3	Von der Bedrohung zur Lösung.	849
8.2	Die wichtigsten Komponenten eines Angriffs	850
8.2.1	Erkunden	851
8.2.2	Herumschnüffeln und Ausspähen (mit einem Spritzer Spoofing)	853
8.2.3	Spoofing (außer ARP).	855
8.2.4	Disruption.	868
8.3	Firewalls und Systeme zum Erkennen von Eindringlingen	872
8.3.1	Firewalls.	873
8.3.2	Erkennen und Abwehren von Eindringlingen	875
8.4	Kryptografie	880
8.4.1	Einführung in die Kryptografie	880
8.4.2	Zwei Grundprinzipien der Verschlüsselung	883
8.4.3	Substitutionschiffren	885
8.4.4	Transpositionschiffren.	887
8.4.5	One-Time Pads	888
8.5	Algorithmen für die symmetrische Verschlüsselung	893
8.5.1	DES – Data Encryption Standard.	895
8.5.2	AES – Advanced Encryption Standard.	896
8.5.3	Chiffriermodi	898
8.6	Asymmetrische Verschlüsselung	902
8.6.1	RSA	903
8.6.2	Weitere Algorithmen für öffentliche Schlüssel	905
8.7	Digitale Signaturen	906
8.7.1	Signaturen mit symmetrischen Schlüsseln.	907
8.7.2	Signaturen mit öffentlichen Schlüsseln	909
8.7.3	Message Digests	911
8.7.4	Die Geburtstagsattacke.	913
8.8	Verwaltung öffentlicher Schlüssel	915
8.8.1	Zertifikate	916
8.8.2	X.509	918
8.8.3	PKI – Infrastruktur für öffentliche Schlüssel	919
8.9	Authentifizierungsprotokolle	923
8.9.1	Authentifizierung auf der Basis eines gemeinsamen geheimen Schlüssels	924
8.9.2	Einrichten eines gemeinsamen Schlüssels: Das Schlüsselaustauschpro- tokoll von Diffie und Hellman.	929
8.9.3	Authentifizierung mithilfe eines Schlüsselverteilungszentrums	931
8.9.4	Authentifizierung mit Kerberos.	935
8.9.5	Authentifizierung mithilfe öffentlicher Verschlüsselung	937
8.10	Kommunikationssicherheit.	938
8.10.1	IPsec	938
8.10.2	Virtuelle private Netze.	943
8.10.3	Drahtlose Sicherheit.	945

8.11	E-Mail-Sicherheit	949
8.11.1	PGP – Pretty Good Privacy	949
8.11.2	S/MIME	954
8.12	Sicherheit im Web.	954
8.12.1	Bedrohungen der Sicherheit	954
8.12.2	Sichere Namensvergabe und DNSSEC	956
8.12.3	Transportschichtsicherheit	959
8.12.4	Nicht vertrauenswürdigen Code ausführen	963
8.13	Soziale Themen.	966
8.13.1	Vertrauliche und anonyme Kommunikation	966
8.13.2	Redefreiheit	969
8.13.3	Urheberrechte	973
	Zusammenfassung.	977
	Übungsaufgaben	979
Kapitel 9	Leseempfehlungen und Bibliografie	987
9.1	Empfehlungen für weiterführende Literatur	989
9.1.1	Einführung und allgemeine Werke.	989
9.1.2	Die Bitübertragungsschicht.	991
9.1.3	Die Sicherungsschicht.	992
9.1.4	Die MAC-Teilschicht.	992
9.1.5	Die Vermittlungsschicht	993
9.1.6	Die Transportschicht.	995
9.1.7	Die Anwendungsschicht	995
9.1.8	Netzsicherheit	997
9.2	Alphabetische Bibliografie	998
Register		1019