



**Andrew S. Tanenbaum
David J. Wetherall**

Computernetzwerke

5., aktualisierte Auflage

PEARSON

Higher Education

München • Harlow • Amsterdam • Madrid • Boston
San Francisco • Don Mills • Mexico City • Sydney
a part of Pearson pic worldwide

Inhaltsübersicht

Vorwort		15
Kapitel 1	Einleitung	21
Kapitel 2	Die Bitübertragungsschicht	119
Kapitel 3	Die Sicherungsschicht	233
Kapitel 4	Die MAC-Teilschicht (Medium Access Control)	303
Kapitel 5	Die Vermittlungsschicht	411
Kapitel 6	Die Transportschicht	565
Kapitel 7	Die Anwendungsschicht	693
Kapitel 8	Sicherheit in Netzen	863
Kapitel 9	Leseempfehlungen und Bibliografie	989
Register		1015

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	15
Kapitel 1 Einleitung	21
1.1 Einsatz von Rechnernetzen	24
1.1.1 Geschäftsanwendungen	24
1.1.2 Anwendungen im Privatbereich	27
1.1.3 Mobile Benutzer	32
1.1.4 Gesellschaftliche Aspekte	36
1.2 Netzhardware	39
1.2.1 Personal Area Network	41
1.2.2 Lokale Netze (LANs)	42
1.2.3 Stadtnetze (MANs)	46
1.2.4 Fernnetze (WANs)	47
1.2.5 Internetworks	51
1.3 Netzsoftware	53
1.3.1 Protokollhierarchien	53
1.3.2 Entwurfsaspekte bei Schichten	58
1.3.3 Verbindungsorientierte und verbindungslose Dienste	60
1.3.4 Basisoperationen von Diensten	63
1.3.5 Beziehung zwischen Diensten und Protokollen	65
1.4 Referenzmodelle	66
1.4.1 Das OSI-Referenzmodell	66
1.4.2 Das TCP/IP-Referenzmodell	70
1.4.3 Das in diesem Buch benutzte Modell	73
1.4.4 Vergleich: OSI- und TCP/IP-Referenzmodell*	74
1.4.5 Kritik am OSI-Modell und OSI-Protokollen*	76
1.4.6 Kritik am TCP/IP-Referenzmodell*	79
1.5 Beispielnetze	80
1.5.1 Das Internet	80
1.5.2 Mobilfunknetze der dritten Generation*	91
1.5.3 Drahtlose LANs: IEEE 802.11*	96
1.5.4 RFID und Sensornetze*	100
1.6 Standardisierung von Netzen	103
1.6.1 Who's who in der Welt der Telekommunikation	104
1.6.2 Who's who in der Welt der internationalen Normen	106
1.6.3 Who's who in der Welt der Internetstandards	108
1.7 Metrische Einheiten	110
1.8 Überblick über das restliche Buch	111
Zusammenfassung	113
Übungsaufgaben	114

Kapitel 2	Die Bitübertragungsschicht	119
2.1	Theoretische Grundlagen der Datenübertragung	121
2.1.1	Fourieranalyse	121
2.1.2	Signale mit begrenzter Bandbreite	122
2.1.3	Maximale Datenübertragungsrate eines Kanals	125
2.2	Gerichtete Übertragungsmedien	127
2.2.1	Magnetische Medien	127
2.2.2	Twisted-Pair-Kabel	128
2.2.3	Koaxialkabel	130
2.2.4	Trägerfrequenzanlagen	130
2.2.5	Glasfaserleiter	132
2.3	Drahtlose Übertragung	137
2.3.1	Das elektromagnetische Spektrum	138
2.3.2	Funkübertragung	141
2.3.3	Mikrowellenübertragung	143
2.3.4	Infrarotübertragung	147
2.3.5	Lichtübertragung	147
2.4	Kommunikationssatelliten*	149
2.4.1	Geostationäre Satelliten	150
2.4.2	MEO-Satelliten	154
2.4.3	LEO-Satelliten	154
2.4.4	Vergleich: Satelliten und Glasfaser	157
2.5	Digitale Modulation und Multiplexing	159
2.5.1	Basisbandübertragung	159
2.5.2	Übertragung im Durchlassbereich	164
2.5.3	Frequenzmultiplexverfahren	167
2.5.4	Zeitmultiplexverfahren	169
2.5.5	Codemultiplexverfahren	170
2.6	Das öffentliche Telefonnetz	173
2.6.1	Aufbau des Telefonsystems	174
2.6.2	Politik im Bereich Telefonie	177
2.6.3	Teilnehmeranschlüsse: Modems, ADSL und Glasfaser	180
2.6.4	Verbindungsleitungen und Multiplexverfahren	189
2.6.5	Vermittlung	197
2.7	Das Mobiltelefonsystem*	202
2.7.1	Die erste Generation der Mobiltelefone: Analoge Sprache	204
2.7.2	Die zweite Generation der Mobiltelefone: Digitale Sprache	208
2.7.3	Die dritte Generation der Mobiltelefone: Digitale Sprache und Daten	212
2.8	Kabelfernsehen*	217
2.8.1	Gemeinschaftsantennen-Fernsehen	217
2.8.2	Internet über Kabel	218
2.8.3	Zuweisung der Frequenzbereiche	220
2.8.4	Kabelmodems	221
2.8.5	Vergleich: ADSL und Kabel	224
	Zusammenfassung	226
	Übungsaufgaben	227

Kapitel 3	Die Sicherungsschicht	233
3.1	Entwurfsaspekte der Sicherungsschicht	235
3.1.1	Dienste für die Vermittlungsschicht	235
3.1.2	Rahmenbildung	238
3.1.3	Fehlerüberwachung	242
3.1.4	Flusskontrolle	243
3.2	Fehlererkennung und -korrektur	244
3.2.1	Fehlerkorrekturcodes	246
3.2.2	Fehlererkennungs_codes	252
3.3	Grundlegende Protokolle der Sicherungsschicht	258
3.3.1	Ein utopisches Simplexprotokoll	263
3.3.2	Ein Simplexprotokoll mit Stop-and-Wait für einen fehlerfreien Kanal	265
3.3.3	Ein Stop-and-Wait-Simplexprotokoll für verrauschte Kanäle	267
3.4	Schiebefensterprotokolle	271
3.4.1	1-Bit-Schiebefensterprotokoll	274
3.4.2	Protokoll mit Go-back-N	277
3.4.3	Protokoll mit selektiver Wiederholung	284
3.5	Beispiele für Protokolle der Sicherungsschicht	291
3.5.1	Packet over SONET	291
3.5.2	ADSL	295
	Zusammenfassung	298
	Übungsaufgaben	299

Kapitel 4	Die MAC-Teilschicht (Medium Access Control)	303
4.1	Die Kanaluordnung	305
4.1.1	Statische Kanaluordnung	305
4.1.2	Voraussetzungen für dynamische Kanaluordnung	307
4.2	Mehrfachzugriffsprotokolle	309
4.2.1	ALOHA	309
4.2.2	CSMA-Protokolle (Carrier Sense Multiple Access)	314
4.2.3	Kollisionsfreie Protokolle	317
4.2.4	Protokolle mit eingeschränkter Konkurrenz	322
4.2.5	Protokolle für drahtlose LANs	325
4.3	Ethernet	328
4.3.1	Bitübertragungsschicht von klassischem Ethernet	329
4.3.2	Ethernet-MAC-Teilschichtprotokoll	331
4.3.3	Leistungsaspekte bei Ethernet	335
4.3.4	Switched Ethernet	337
4.3.5	Fast Ethernet	339
4.3.6	Gigabit-Ethernet	342
4.3.7	10-Gigabit-Ethernet	346
4.3.8	Das Ethernet - ein Rückblick	347
4.4	Drahtlose LANs	349
4.4.1	IEEE-802.11-Architektur und -Protokollstapel	349
4.4.2	Die IEEE-802.11-Bitübertragungsschicht	351
4.4.3	Das IEEE-802.11-MAC-Teilschichtprotokoll	353

4.4.4	IEEE-802.11-Rahmenstruktur	360
4.4.5	Dienste	362
4.5	Drahtloses Breitband*	364
4.5.1	Vergleich von IEEE 802.16 mit IEEE 802.11 und 3G	365
4.5.2	IEEE-802.16-Architektur und -Protokollstapel	366
4.5.3	IEEE-802.16-Bitübertragungsschicht	367
4.5.4	IEEE-802.16-MAC-Teilschichtprotokoll	369
4.5.5	IEEE-802.16-Rahmenstruktur	371
4.6	Bluetooth*	372
4.6.1	Architektur von Bluetooth	373
4.6.2	Bluetooth-Anwendungen	374
4.6.3	Bluetooth-Protokollstapel	375
4.6.4	Bluetooth-Funkschicht	376
4.6.5	Bluetooth-Verbindungsschicht	377
4.6.6	Bluetooth-Rahmenstruktur	378
4.7	RFID*	380
4.7.1	Architektur von EPC Gen 2	381
4.7.2	Bitübertragungsschicht von EPC Gen 2	382
4.7.3	Tag-Identifizierungsschicht von EPC Gen 2	383
4.7.4	Nachrichtenformate der Tag-Identifizierung	385
4.8	Switches der Sicherungsschicht	386
4.8.1	Verwendung von Bridges	386
4.8.2	Learning-Bridges	388
4.8.3	Spannbäume und Bridges	391
4.8.4	Repeater, Hubs, Bridges, Switches, Router und Gateways	394
4.8.5	Virtuelle LANs	397
	Zusammenfassung	405
	Übungsaufgaben	406

Kapitel	Die Vermittlungsschicht	411
5.1	Entwurfsaspekte der Vermittlungsschicht	413
5.1.1	Paketvermittlung unter Verwendung des Store-and-forward-Verfahrens	413
5.1.2	Dienste für die Transportschicht	414
5.1.3	Implementierung eines verbindungslosen Dienstes	415
5.1.4	Implementierung eines verbindungsorientierten Dienstes	417
5.1.5	Vergleich von VC-Netzen und Datagrammnetzen	418
5.2	Routing-Algorithmen	420
5.2.1	Das Optimalitätsprinzip	422
5.2.2	Routing nach dem kürzesten Pfad	423
5.2.3	Fluten	427
5.2.4	Distanzvektoralgorithmus	428
5.2.5	Link-State-Routing	431
5.2.6	Hierarchisches Routing	437
5.2.7	Broadcast-Routing	439
5.2.8	Multicast-Routing	441
5.2.9	Anycast-Routing	444

5.2.10	Routing für mobile Hosts	445
5.2.11	Routing in Ad-hoc-Netzen.	448
5.3	Algorithmen zur Überlastungsüberwachung	452
5.3.1	Prinzipien der Überlastungsüberwachung.	454
5.3.2	Routing unter Berücksichtigung des Verkehrs.	455
5.3.3	Zugangssteuerung	457
5.3.4	Drosseln des Verkehrs.	458
5.3.5	Lastabwurf	463
5.4	Dienstgüte	465
5.4.1	Anforderungen der Anwendungen.	466
5.4.2	Traffic-Shaping	468
5.4.3	Scheduling der Pakete.	473
5.4.4	Zugangssteuerung	477
5.4.5	Integrierte Dienste.	481
5.4.6	Differenzierte Dienste.	484
5.5	Internetworking	487
5.5.1	Unterscheidungsmerkmale von Netzen	488
5.5.2	Verbindung von Netzen	490
5.5.3	Tunneling	493
5.5.4	Internetwork-Routing.	494
5.5.5	Fragmentierung der Pakete.	496
5.6	Vermittlungsschicht im Internet	500
5.6.1	IPv4.	503
5.6.2	IP-Adressen.	507
5.6.3	IP Version 6.	520
5.6.4	Internetsteuerprotokolle.	531
5.6.5	Label Switching und MPLS.	536
5.6.6	OSPF-Protokoll.	540
5.6.7	BGP.	546
5.6.8	Internet-Multicasting	551
5.6.9	Mobiles IP.	553
	Zusammenfassung	557
	Übungsaufgaben.	558
Kapitel 6	Die Transportschicht	565
6.1	Dienste der Transportschicht	567
6.1.1	Dienste für die oberen Schichten.	567
6.1.2	Dienstprimitive der Transportschicht	569
6.1.3	Berkeley-Sockets	573
6.1.4	Beispiel für Socket-Programmierung: Ein Internetdateiserver	575
6.2	Elemente von Transportprotokollen	580
6.2.1	Adressierung.	581
6.2.2	Verbindungsaufbau.	584
6.2.3	Freigabe von Verbindungen	591
6.2.4	Fehlerüberwachung und Flusskontrolle.	595
6.2.5	Multiplexing.	601
6.2.6	Systemwiederherstellung	602

6.3	Überlastungsüberwachung	604
6.3.1	Gewünschte Bandbreitenzuordnung	605
6.3.2	Regulierung der Senderate	609
6.3.3	Probleme mit der drahtlosen Übertragung	614
6.4	Internettransportprotokolle: UDP	616
6.4.1	Einführung in UDP	616
6.4.2	Entfernte Prozeduraufrufe	618
6.4.3	Echtzeittransportprotokolle	621
6.5	Internettransportprotokolle: TCP	628
6.5.1	Einführung in TCP	628
6.5.2	TCP-Dienstmodell	629
6.5.3	TCP-Protokoll	632
6.5.4	TCP-Header	633
6.5.5	Verbindungsaufbau in TCP	637
6.5.6	Verbindungsfreigabe in TCP	638
6.5.7	Modellierung der Verwaltung von TCP-Verbindungen	639
6.5.8	TCP-Schiebefenster	642
6.5.9	Verwaltung von Timern in TCP	646
6.5.10	TCP-Überlastungsüberwachung	649
6.5.11	Die Zukunft von TCP	659
6.6	Leistungsaspekte*	660
6.6.1	Leistungsprobleme in Rechnernetzen	661
6.6.2	Messung der Netzwerkleistung	662
6.6.3	Hostdesign für eine Optimierung der Leistung	666
6.6.4	Schnelle Segmentverarbeitung	669
6.6.5	Header-Komprimierung	672
6.6.6	Protokolle für Long Fat Networks	674
6.7	Verzögerungstolerante Netze*	679
6.7.1	DTN-Architektur	680
6.7.2	Bündel-Protokoll	683
	Zusammenfassung	686
	Übungsaufgaben	687
Kapitel 7	Die Anwendungsschicht	693
7.1	DNS - Domain Name System	695
7.1.1	DNS-Namensraum	696
7.1.2	Ressourcendatensätze	699
7.1.3	Nameserver	703
7.2	E-Mail*	708
7.2.1	Architektur und Dienste	709
7.2.2	Benutzeragenten	711
7.2.3	Nachrichtenformate	716
7.2.4	Nachrichtenübertragung	725
7.3	World Wide Web	734
7.3.1	Übersicht über die Architektur	735
7.3.2	Statische Webdokumente	752
7.3.3	Dynamische Webseiten und Webanwendungen	763

7.3.4	HTTP - HyperText Transfer Protocol	775
7.3.5	Das mobile Web	787
7.3.6	Suchen im Web	789
7.4	Streaming Audio und Video	792
7.4.1	Digitales Audio	794
7.4.2	Digitales Video	799
7.4.3	Streaming von gespeicherten Medien	808
7.4.4	Streaming von Live-Medien	817
7.4.5	Echtzeitkonferenzen	821
7.5	Content Delivery	832
7.5.1	Content und Internetverkehr	833
7.5.2	Serverfarmen und Webproxys	836
7.5.3	Content-Delivery-Netze	841
7.5.4	Peer-to-Peer-Netze	846
	Zusammenfassung	857
	Übungsaufgaben	858
Kapitel 8 Sicherheit in Netzen		863
8.1	Kryptografie	868
8.1.1	Einführung in die Kryptografie	868
8.1.2	Substitutionschiffren	871
8.1.3	Transpositionschiffren	873
8.1.4	One-Time Pads	874
8.1.5	Zwei Grundprinzipien der Verschlüsselung	879
8.2	Algorithmen für die symmetrische Verschlüsselung	881
8.2.1	DES - Data Encryption Standard	883
8.2.2	AES - Advanced Encryption Standard	886
8.2.3	Chiffriermodi	890
8.2.4	Weitere Chiffren	895
8.2.5	Kryptoanalyse	896
8.3	Algorithmen für öffentliche Schlüssel	897
8.3.1	RSA	898
8.3.2	Weitere Algorithmen für öffentliche Schlüssel	900
8.4	Digitale Signaturen	* 901
8.4.1	Signaturen mit symmetrischen Schlüsseln	902
8.4.2	Signaturen mit öffentlichen Schlüsseln	903
8.4.3	Message Digests	905
8.4.4	Die Geburtstagsattacke	909
8.5	Verwaltung öffentlicher Schlüssel	911
8.5.1	Zertifikate	912
8.5.2	X.509	914
8.5.3	PKI - Infrastruktur für öffentliche Schlüssel	915
8.6	Kommunikationssicherheit	919
8.6.1	IPsec	919
8.6.2	Firewalls	924
8.6.3	Virtuelle private Netze	927
8.6.4	Drahtlose Sicherheit	929

8.7	Authentifizierungsprotokolle	934
8.7.1	Authentifizierung auf der Basis eines gemeinsamen geheimen Schlüssels.	935
8.7.2	Einrichten eines gemeinsamen Schlüssels: Das Schlüsselaustauschprotokoll von Diffie und Hellman.	940
8.7.3	Authentifizierung mithilfe eines Schlüsselverteilungsentrums	942
8.7.4	Authentifizierung mit Kerberos.	945
8.7.5	Authentifizierung mithilfe öffentlicher Verschlüsselung	948
8.8	E-Mail-Sicherheit*	949
8.8.1	PGP - Pretty Good Privacy.	949
8.8.2	S/MIME	954
8.9	Sicherheit im Web	954
8.9.1	Bedrohungen der Sicherheit	954
8.9.2	Sichere Namensvergabe.	955
8.9.3	SSL - Secure Sockets Layer.	961
8.9.4	Sicherheit bei mobilem Code.	965
8.10	Soziale Themen.	969
8.10.1	Datenschutz	969
8.10.2	Redefreiheit	972
8.10.3	Urheberrechte.	976
	Zusammenfassung	979
	Übungsaufgaben.	981
Kapitel 9	Leseempfehlungen und Bibliografie	989
9.1	Empfehlungen für weiterführende Literatur*	990
9.1.1	Einführung und allgemeine Werke	990
9.1.2	Bitübertragungsschicht	991
9.1.3	Sicherungsschicht	992
9.1.4	MAC-Teilschicht	993
9.1.5	Vermittlungsschicht	993
9.1.6	Transportschicht	995
9.1.7	Anwendungsschicht	995
9.1.8	Netzsicherheit	996
9.2	Alphabetische Bibliografie*	997
Register		1015