

X . media . press



Christoph Meinel · Harald Sack

Internetworking

Technische Grundlagen und Anwendungen

 Springer

Prof. Dr. Christoph Meinel
Hasso-Plattner-Institut für
Softwaresystemtechnik GmbH
Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3
14482 Potsdam
Deutschland
christoph.meinel@hpi.uni-potsdam.de

Dr. Harald Sack
Hasso-Plattner-Institut für
Softwaresystemtechnik GmbH
Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3
14482 Potsdam
Deutschland
harald.sack@hpi.uni-potsdam.de

ISSN 1439-3107
ISBN 978-3-540-92939-0 e-ISBN 978-3-540-92940-6
DOI 10.1007/978-3-540-92940-6
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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.

Einbandentwurf: KünkelLopka GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Was eigentlich immer noch zum Staunen ist, scheint heute im Alltag vielen schon ganz selbstverständlich: Der alte, die ganze Menschheitsentwicklung antreibende Traum von einer Mobilität über die Grenzen von Zeit und Raum hinweg hat sich in den letzten Jahrzehnten in einem Maße verwirklicht, wie nie zuvor in der Menschheitsgeschichte. Und dabei wurde kein einziges physikalisches Gesetz gebrochen. Der Mensch hat vielmehr gelernt, mit unerwartet vielen Dingen des Lebens in einer entmaterialisierten, digitalisierten Form umzugehen. Entmaterialisiert in dem Sinne, dass anstelle mit den Dingen selbst lediglich mit ihren digitalen „Schatten“ umgegangen wird, also mit Beschreibungen, kodiert in Form von Nullen und Einsen, die über elektromagnetische Signale mit Lichtgeschwindigkeit transportiert und an jedem Computer bearbeitet werden können. Zwei technologische Entwicklungen machen das möglich: Computer in allen ihren Ausprägungen bieten den Kosmos, in dem diese digitalen Schatten ihr Dasein entfalten, in dem sie neu geschöpft, bearbeitet, verknüpft und abgelegt werden können; das Internet bietet die Möglichkeit, diese digitalen Schatten fast mit Lichtgeschwindigkeit an jeden Ort der Welt zu transportieren, damit sie in einem Computer möglicherweise am anderen Ende der Welt ihre Wirkung entfalten können.

Tatsächlich zählen Computer und Internet zu den ganz wenigen technologischen Entwicklungen in der Geschichte der Menschheit, die das Leben und Handeln der Menschen wirklich grundlegend verändert haben. Nachdem die industrielle Revolution des 19. und 20. Jahrhunderts unsere physische Mobilität dramatisch steigern konnte – Autos, Flugzeuge, Raumschiffe erweiterten den körperlichen Aktionsradius des Menschen beträchtlich –, so erweitern Computer- und Internet-Technologien als Treiber der digitalen Revolution unsere gedankliche Mobilität in einem bisher unvorstellbaren Maße und befreien unseren geistigen Aktionsradius von (fast) jeglicher körperlicher Beschränkung. Während selbst modernste Fortbewegungsmittel wohl immer viele Stunden brauchen werden, um einen Menschen von einem Kontinent zum anderen zu bringen, kann er diese Entfernung mit Hilfe des Internets fast augenblicklich überwinden. Empfindungen, Gedanken und Anweisungen lassen sich unmittelbar übermitteln, sekundenschnell kann auf die Wünsche und Anforderungen weit Entfernter reagiert werden – und das anders als im Bereich der physischen Mobilität ohne nennenswerte Kosten.

Aufgrund der noch sehr jungen Geschichte – das Internet ist noch keine 50, das World Wide Web gut 20 Jahre alt – und da die rasante Entwicklung der Computer- und Netzwerk-Technologien ungebrochen anhält, lassen sich die durch die digitale Revolution ausgelösten Veränderungen in Gesellschaft, Wirtschaft und im privaten Bereich erst in allerersten Umrissen absehen. Umso interessanter ist es daher, hinter die Kulissen dieser Entwicklung zu schauen und die technischen Grundlagen zu verstehen, wie Internet und WWW eigentlich funktionieren. Genau dazu

will das vorliegende Buch „Internetworking“ zusammen mit den beiden anderen Bänden „Digitale Kommunikation“ und „Web-Technologien“ unserer Trilogie ein verständiger, umfassender und vertrauenswürdiger, lehr- und detailreicher Führer sein.

Auf der Basis der in Band 1, „Grundlagen der digitalen Kommunikation“ dieser Serie ausführlich dargestellten Konzepte (Rechnernetze, Medien und ihrer Kodierung, Kommunikationsprotokolle und Sicherheit in Rechnernetzen) wird im vorliegenden Band 2 „Internetworking“ vor dem Hintergrund der Entwicklungsgeschichte des Internets und einer kurzen Wegweisung durch das Internet mit seinen verschiedenen Akteuren die eigentliche Funktionsweise der Internet-Technologie, also der TCP/IP-Protokollstapel vorgestellt. Im Detail besprochen werden die für jede digitale Kommunikation grundlegende physikalische Schicht, die Netzzugangsschicht mit ihren zahlreichen Technologien – kabelloses LAN, kabelgebundenes LAN, WAN –, die Internetschicht mit den das Internet tragenden Internetprotokollen IPv4, IPv6 und Mobile IP, die Transportschicht mit dem zweiten, für das Internet namensgebenden Protokoll TCP, und die Anwendungsschicht mit ihren zahlreichen Internet-Diensten, die dem Internet zu seiner die Gesellschaft revolutionierenden Bedeutung verholfen haben. Lediglich das World Wide Web bleibt hier ausgeklammert, denn ihm ist ein eigener, der 3. Band „Web-Technologien“ der Trilogie gewidmet, in dem dann die für das Web grundlegenden Techniken wie URL, HTTP, HTML, CSS, XML, Web-Programmierung, Suchmaschinen, Web2.0 und Semantic Web detailliert vorgestellt werden.

Die mehrdimensionale Gliederung des Materials – allgemeinverständliche Beschreibungen werden von zahlreichen ins technische Detail gehenden Exkursen ergänzt, Glossare bieten kapitelbezogene, kommentierte Indizes und Literaturhinweise laden zum Nachschlagen und Weiterlesen ein – soll dem geneigten Leser den Zugang zur Fülle des behandelten Stoffes soweit wie möglich erleichtern und ihm eine interessen- bzw. themenbezogene Auswahl ermöglichen.

Wir haben uns große Mühe gegeben, um Sie, verehrte Leser, als interessierte Laien durch die Lektüre unseres Buches anzustecken mit der Faszination der neuen digitalen Welt, um Ihnen als fleißige und Anstrengungen nicht scheuende Studenten ein brauchbares und umfassendes Lehrbuch vorzulegen, und Ihnen als gestandene Profis ein zuverlässiges Nachschlagewerk an die Hand zu geben, mit dem Sie Ihre Spezialgebiete leicht und sicher in den Kontext des riesigen Gesamtkomplexes der digitalen Kommunikation einordnen können.

Dank zu sagen gilt unseren Kollegen am Lehrstuhl für „Internetsysteme und Technologien“ am Hasso-Plattner-Institut für jedwede Unterstützung in Forschung und Lehre, dem Springer-Verlag in Person von Hermann Engesser und Dorothea Glaunsinger für das Vertrauen in das Gelingen dieses Buchprojekts und die Geduld bei seiner Realisierung, und bei Euch, Ivana und Anja, für den Langmut und die Toleranz, mit der ihr uns habt während zahlloser Wochenenden und Ferientage in unsere Arbeitszimmer verschwinden lassen, und die uns auch dabei begleitende Liebe.

Potsdam, im Juni 2011

*Christoph Meinel
Harald Sack*

Inhaltsverzeichnis

1	Prolog	1
1.1	Computernetze und das Internet – eine historische Perspektive	4
1.1.1	ARPANET	4
1.1.2	Internet	5
1.1.3	World Wide Web	6
1.1.4	Web 2.0 und das Semantic Web	8
1.2	Wegweiser durch die Welt des Internets	9
1.2.1	Internet Architecture Board – IAB	10
1.2.2	Internet Society – ISOC	14
1.2.3	IANA und ICANN	16
1.2.4	World Wide Web Consortium	18
1.2.5	Offene Standards im Internet – geregelte Anarchie	20
1.2.6	Deutsche Akteure und Provider	24
1.3	Glossar	27
2	Die Grundlage des Internets: TCP/IP-Referenzmodell	31
2.1	Kommunikationsprotokolle und Schichtenmodell	31
2.1.1	Protokollfamilien	32
2.1.2	Schichtenmodell	33
	Exkurs 1: ISO/OSI-Referenzmodell	41
2.2	Die physikalische Schicht als Basis der Rechnerkommunikation ..	46
2.2.1	Physikalische Übertragungsmedien	46
2.2.2	Charakterische Eigenschaften physikalischer Übertragungsmedien	48
2.3	Das TCP/IP-Referenzmodell	48
2.3.1	Historisches und Abgrenzung zum ISO/OSI- Referenzmodell	51
2.3.2	Netzzugangsschicht	53
2.3.3	Internetschicht	57
2.3.4	Transportschicht	59
2.3.5	Anwendungsschicht	61
2.4	Glossar	63

3	Physikalische Schicht	69
3.1	Theoretische Grundlagen	74
3.1.1	Elektromagnetisches Spektrum und Signalübertragung	75
3.1.2	Bandbreitenbeschränkte Signale	81
3.2	Kodierung digitaler Signale	87
3.2.1	Leitungskodierung	88
3.2.2	Analoge Modulationsverfahren	95
3.2.3	Digitale Modulationsverfahren	98
3.2.4	Multiplexverfahren mit konstanter Bandbreite	104
3.2.5	Bandspreizverfahren	111
3.3	Kabelgebundene Übertragungsmedien	119
3.3.1	Koaxialkabel	119
3.3.2	Twisted Pair Kabel	121
3.3.3	Glasfaserkabel	124
3.4	Kabelungebundene Übertragungsmedien	129
3.4.1	Funkübertragung via Kurzwelle und Ultrakurzwelle	131
3.4.2	Funkübertragung via Mikrowellen	132
3.4.3	Infrarot, Millimeterwellen und Lichtwellenübertragung ...	133
3.4.4	Satellitenkommunikation	134
3.5	Glossar	136
4	Netzzugangsschicht (1): Kabelgebundene LAN-Technologien	141
4.1	Netzzugangsschicht	142
4.1.1	Elementare Aufgaben und Protokolle	142
4.1.2	Medium Access Control Layer	151
4.1.3	Logical Link Control	152
4.2	LANs – Local Area Networks	153
4.2.1	Nutzung gemeinsamer Kommunikationskanäle	154
4.2.2	Bedeutung von LANs	155
4.2.3	IEEE 802 Local Area Networks	156
4.2.4	Lokale Adressverwaltung	163
4.2.5	Lokale Datenverwaltung	169
4.2.6	Spezielle Netzwerkhardware	171
4.3	Wichtige Beispiele der LAN-Technologien	173
4.3.1	LAN-Topologien	173
4.3.2	Ethernet – IEEE 802.3	179
	Exkurs 2: Ethernet – Timing und Kollisionsbehandlung	189
	Exkurs 3: Ethernet – Effizienz-Betrachtung	208
4.3.3	Token Ring – IEEE 802.5	214
4.3.4	Fiber Distributed Data Interface – FDDI	228
4.3.5	Asynchronous Transfer Mode – ATM	244
	Exkurs 4: ATM – Zellvermittlung (Switching)	259
4.4	LAN-Erweiterung	261
4.4.1	Grenzen der LAN-Technologie	261
4.4.2	Repeater	262

4.4.3	Hubs	263
4.4.4	Bridges	265
4.4.5	Switches	272
4.4.6	Virtuelle LANs	274
4.5	Glossar	277
5	Netzzugangsschicht (2): Kabellose mobile LAN-Technologien	281
5.1	Grundlagen kabelloser und mobiler Netzwerktechnologien	281
5.2	Wireless LAN (WLAN) – IEEE 802.11	284
5.2.1	IEEE 802.11 – Physikalische Schicht	285
5.2.2	IEEE 802.11 – MAC Subschicht	288
5.2.3	IEEE 802.11 – Datenformat	297
5.2.4	WLAN Sicherheit	308
	Exkurs 5: Kritik am WEP Verfahren	317
5.3	Bluetooth – IEEE 802.15	331
5.3.1	Bluetooth Technologie	332
5.3.2	Bluetooth Protokollstapel	335
5.3.3	Bluetooth Security	344
5.3.4	Bluetooth Profile	346
5.4	ZigBee – IEEE 802.15.4	347
5.4.1	ZigBee Technologie	347
5.4.2	ZigBee Protokolle und Adressierung	351
5.4.3	ZigBee Security	354
5.5	Weitere funkbasierte Netzwerktechnologien	355
5.6	Glossar	357
6	Netzzugangsschicht (3): WAN-Technologien	361
6.1	Einleitung	361
6.2	Paketvermittlung im WAN	363
6.2.1	Grundprinzipien	363
6.2.2	Aufbau eines WANs	364
6.2.3	Speichervermittlung	365
6.2.4	Adressierung im WAN	366
6.3	Routing	368
6.3.1	Das Netzwerk als Graph	369
6.3.2	Berechnung der Routingtabellen im WAN	370
6.3.3	Isolierte Routing-Algorithmen	373
	Exkurs 6: Dijkstra-Algorithmus	377
6.3.4	Distanzvektor Routing	380
6.3.5	Link-State Routing	386
	Exkurs 7: Spezielle Routingverfahren	393
	Exkurs 8: Routingverfahren für Netzwerke mit mobilen Komponenten	401
6.4	Wichtige Beispiele der WAN-Technologie	409
6.4.1	ARPANET	410

6.4.2	X.25	414
6.4.3	ISDN	417
	Exkurs 9: ISDN – Datenformate	423
6.4.4	Frame Relay	426
6.4.5	Broadband ISDN und ATM	434
6.4.6	Distributed Queue Dual Bus – DQDB	434
6.4.7	Cyclic Reservation Multiple Access – CRMA	440
6.4.8	Plesiochronous Digital Hierarchy – PDH	443
6.4.9	Synchronous Digital Hierarchy – SDH, SONET	448
6.4.10	Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) – IEEE 802.16	452
6.5	Zugang zum WAN	457
6.5.1	Zugang über das Telefonnetz – Modems	458
6.5.2	Zugang über ISDN	461
6.5.3	Zugang über Digital Subscriber Line – DSL	462
6.5.4	Kabellose Zugänge zum WAN – GSM, UMTS und LTE ...	466
6.5.5	Alternative Zugangsverfahren	481
6.6	Glossar	484
7	Internetschicht	489
7.1	Virtuelle Netze	490
7.2	Internetworking	495
7.2.1	Verbindungsorientiertes Internetworking	497
7.2.2	Verbindungsloses Internetworking	498
7.2.3	Tunneling	499
7.2.4	Fragmentierung	500
7.2.5	Überlaststeuerung	504
7.2.6	Dienstgüte – Quality of Service	512
7.2.7	Internetwork Routing	517
7.3	Internet Protokoll – IP	518
7.3.1	IP-Adressierung	520
7.3.2	Bindung von Protokolladressen	531
7.3.3	IP-Datagramme	537
	Exkurs 10: IP-Kapselung und IP-Fragmentierung	542
7.4	Internet Protokoll Version 6 – IPv6	545
7.4.1	Eigenschaften und Merkmale von IPv6	547
7.4.2	Das IPv6–Datagramm	548
7.4.3	IPv6 Fragmentierung, Jumbogramme und IPv6 Routing ...	555
7.4.4	IPv6 Adressierung	559
7.4.5	IPv6 Autokonfiguration	569
7.4.6	Koexistenz und Migration von IPv4 nach IPv6	573
7.5	IPsec – sichere Kommunikation in der Internetschicht	578
7.5.1	IPsec Sicherheitsarchitektur	578
7.5.2	IPsec Authentication Header (AH)	582
7.5.3	IPsec Encapsulating Security Payload (ESP)	586

- 7.5.4 IPsec Support Komponenten 590
- Exkurs 11:** IPsec – Schlüsselmanagement 593
- 7.6 Internet Control Message Protokoll – ICMP 602
 - 7.6.1 Aufgaben von ICMP 602
 - 7.6.2 ICMP-Nachrichtenformat 604
 - 7.6.3 ICMP-Fehlermeldungen 605
 - 7.6.4 ICMP-Anfragen und informelle Nachrichten 607
 - 7.6.5 ICMPv6 612
 - 7.6.6 Neighbor Discovery Protocol – NDP 618
- 7.7 Mobile IP 622
 - 7.7.1 Grundproblematik und Anforderungen 622
 - 7.7.2 Prinzipieller Ablauf 624
 - 7.7.3 Mobile IP Nachrichtenformate 626
 - 7.7.4 Mobile IP und Routingeffizienz 631
 - 7.7.5 Mobile IP Version 6 – MIPv6 632
- 7.8 Glossar 633

- 8 Transportschicht** 639
 - 8.1 Aufgaben und Protokolle der Transportschicht 640
 - 8.1.1 Dienste der Transportschicht – eine Übersicht 641
 - 8.1.2 Kommunikationsendpunkte und Adressierung 644
 - 8.1.3 TCP und UDP Ports und Sockets 646
 - 8.1.4 Dienstprimitive auf der Transportschicht 648
 - 8.2 User Datagram Protocol – UDP 650
 - 8.2.1 Aufgabe und Funktion von UDP 650
 - 8.2.2 UDP Nachrichtenformat 651
 - 8.2.3 UDP Anwendungen 653
 - 8.3 Transmission Control Protocol – TCP 654
 - 8.3.1 Funktionen und Aufgaben von TCP 656
 - Exkurs 12:** TCP – Verbindungsmanagement 667
 - 8.3.2 TCP Nachrichtenformat 670
 - 8.3.3 TCP – Zuverlässigkeit, Flusssteuerung und Überlastkontrolle 677
 - 8.4 Network Address Translation – NAT 685
 - 8.4.1 NAT – Funktionen und Aufgaben 686
 - 8.4.2 NAT – Einsatzmöglichkeiten 690
 - 8.4.3 NAT – Vor- und Nachteile 696
 - 8.5 Sicherheit auf der Transportschicht 698
 - 8.5.1 Transport Layer Security und Secure Socket Layer – TLS/SSL 699
 - Exkurs 13:** TLS/SSL Handshake-Verfahren 704
 - 8.6 Glossar 713

9	Anwendungsschicht und Internetanwendungen	719
9.1	Grundbegriffe, Funktion und Überblick	719
9.1.1	Internetdienste und Protokolle der Anwendungsschicht ...	720
9.1.2	Client-/Server-Interaktionsmodell	722
9.1.3	Socket-Schnittstellen	724
9.2	Namens- und Verzeichnisdienste	726
9.2.1	Domain Name System – DNS	726
	Exkurs 14: Sicheres DNS – Domain Name System Security	
	Extensions	750
9.2.2	Verzeichnisdienste	757
9.3	Elektronische Post – E-Mail	760
9.3.1	Message Handling Systeme	760
9.3.2	E-Mail Nachrichtenformat	767
9.3.3	MIME Standard	769
9.3.4	Simple Mail Transfer Protocol – SMTP	774
9.3.5	POP und IMAP	776
9.3.6	Pretty Good Privacy – PGP	784
9.4	Dateitransfer	790
9.4.1	(Secure) File Transfer Protocol – FTP und SFTP	791
9.4.2	Trivial File Transfer Protocol – TFTP	797
9.4.3	Network File System – NFS	802
9.4.4	Remote Procedure Call – RPC	806
9.5	Remote Login	808
9.5.1	Telnet	809
9.5.2	Remote Login – rlogin	815
9.5.3	Secure Shell – SSH	816
9.6	Netzwerkmanagement	818
9.6.1	Dynamic Host Configuration Protocol – DHCP	819
9.6.2	Simple Network Management Protocol – SNMP	829
9.7	Audio- und Videokommunikation	843
9.7.1	Multimedia Anwendungen im Internet	843
9.7.2	Real-time Transport Protocol – RTP	850
9.7.3	Real-Time Transport Control Protocol - RTCP	853
9.7.4	Real-Time Streaming Protocol – RTSP	855
9.7.5	Ressourcenreservierung und Dienstqualität	858
9.8	Weitere Dienste und Anwendungen im Internet	868
9.8.1	World Wide Web	868
9.8.2	Peer-to-Peer Anwendungen	871
9.8.3	Internet Relay Chat – IRC	879
9.8.4	Usenet News	880
9.8.5	Sonstige Dienstangebote über TCP/IP	882
9.9	Sicherheit auf der Anwendungsschicht – Paketfilter und Firewalls .	886
9.9.1	Paketfilter	888
9.9.2	Gateways	889

Inhaltsverzeichnis	XIII
9.9.3 Firewalls – Topologie	890
Exkurs 15: Die Lock-Keeper Technologie	891
9.10 Glossar	894
10 Epilog	901
Personenregister	911
Abkürzungen und Akronyme	921
Literaturverzeichnis	939
Sachverzeichnis	951