



Andrew S. Tanenbaum  
David J. Wetherall

# Computernetzwerke

5., aktualisierte Auflage



**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 plc worldwide

# Computernetzwerke

## Inhaltsverzeichnis

Computernetzwerke

Impressum

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Kapitel 1 - Einleitung

1.1 Einsatz von Rechnernetzen

1.1.1 Geschäftsanwendungen

1.1.2 Anwendungen im Privatbereich

1.1.3 Mobile Benutzer

1.1.4 Gesellschaftliche Aspekte

1.2 Netzhardware

1.2.1 Personal Area Network

1.2.2 Lokale Netze (LANs)

1.2.3 Stadtnetze (MANs)

1.2.4 Fernnetze (WANs)

1.2.5 Internetworks

1.3 Netzsoftware

1.3.1 Protokollhierarchien

1.3.2 Entwurfsaspekte bei Schichten

1.3.3 Verbindungsorientierte und verbindungslose Dienste

1.3.4 Basisoperationen von Diensten

1.3.5 Beziehung zwischen Diensten und Protokollen

1.4 Referenzmodelle

1.4.1 Das OSI-Referenzmodell

1.4.2 Das TCP/IP-Referenzmodell

1.4.3 Das in diesem Buch benutzte Modell

1.4.4 Vergleich: OSI- und TCP/IP-Referenzmodell

1.4.5 Kritik am OSI-Modell und OSI-Protokollen

1.4.6 Kritik am TCP/IP-Referenzmodell

1.5 Beispielnetze

1.5.1 Das Internet

1.5.2 Mobilfunknetze der dritten Generation

1.5.3 Drahtlose LANs: IEEE 802.11

1.5.4 RFID und Sensornetze

1.6 Standardisierung von Netzen

1.6.1 Who's who in der Welt der Telekommunikation

1.6.2 Who's who in der Welt der internationalen Normen

# Inhaltsverzeichnis

1.6.3 Who's who in der Welt der Internetstandards

1.7 Metrische Einheiten

1.8 Überblick über das restliche Buch

## Kapitel 2 - Die Bitübertragungsschicht

### 2.1 Theoretische Grundlagen der Datenübertragung

2.1.1 Fourieranalyse

2.1.2 Signale mit begrenzter Bandbreite

2.1.3 Maximale Datenübertragungsrate eines Kanals

### 2.2 Gerichtete Übertragungsmedien

2.2.1 Magnetische Medien

2.2.2 Twisted-Pair-Kabel

2.2.3 Koaxialkabel

2.2.4 Trägerfrequenzanlagen

2.2.5 Glasfaserleiter

### 2.3 Drahtlose Übertragung

2.3.1 Das elektromagnetische Spektrum

2.3.2 Funkübertragung

2.3.3 Mikrowellenübertragung

2.3.4 Infrarotübertragung

2.3.5 Lichtübertragung

### 2.4 Kommunikationssatelliten

2.4.1 Geostationäre Satelliten

2.4.2 MEO-Satelliten

2.4.3 LEO-Satelliten

2.4.4 Vergleich: Satelliten und Glasfaser

### 2.5 Digitale Modulation und Multiplexing

2.5.1 Basisbandübertragung

2.5.2 Übertragung im Durchlassbereich

2.5.3 Frequenzmultiplexverfahren

2.5.4 Zeitmultiplexverfahren

2.5.5 Codemultiplexverfahren

### 2.6 Das öffentliche Telefonnetz

2.6.1 Aufbau des Telefonsystems

2.6.2 Politik im Bereich Telefonie

2.6.3 Teilnehmeranschlüsse: Modems, ADSL und Glasfaser

2.6.4 Verbindungsleitungen und Multiplexverfahren

2.6.5 Vermittlung

### 2.7 Das Mobiltelefonsystem

2.7.1 Die erste Generation der Mobiltelefone: Analoge Sprache

2.7.2 Die zweite Generation der Mobiltelefone: Digitale Sprache

2.7.3 Die dritte Generation der Mobiltelefone: Digitale Sprache und Daten

# Inhaltsverzeichnis

## 2.8 Kabelfernsehen

- 2.8.1 Gemeinschaftsantennen-Fernsehen
- 2.8.2 Internet über Kabel
- 2.8.3 Zuweisung der Frequenzbereiche
- 2.8.4 Kabelmodems
- 2.8.5 Vergleich: ADSL und Kabel

## Kapitel 3 - Die Sicherungsschicht

### 3.1 Entwurfsaspekte der Sicherungsschicht

- 3.1.1 Dienste für die Vermittlungsschicht
- 3.1.2 Rahmenbildung
- 3.1.3 Fehlerüberwachung
- 3.1.4 Flusskontrolle

### 3.2 Fehlererkennung und -korrektur

- 3.2.1 Fehlerkorrekturcodes
- 3.2.2 Fehlererkennungscode

### 3.3 Grundlegende Protokolle der Sicherungsschicht

- 3.3.1 Ein utopisches Simplexprotokoll
- 3.3.2 Ein Simplexprotokoll mit Stop-and-Wait für einen fehlerfreien Kanal
- 3.3.3 Ein Stop-and-Wait-Simplexprotokoll für verrauschte Kanäle

### 3.4 Schiebefensterprotokolle

- 3.4.1 1-Bit-Schiebefensterprotokoll
- 3.4.2 Protokoll mit Go-back-N
- 3.4.3 Protokoll mit selektiver Wiederholung

### 3.5 Beispiele für Protokolle der Sicherungsschicht

- 3.5.1 Packet over SONET
- 3.5.2 ADSL

## Kapitel 4 - Die MAC-Teilschicht (Medium Access Control)

### 4.1 Die Kanalzuordnung

- 4.1.1 Statische Kanalzuordnung
- 4.1.2 Voraussetzungen für dynamische Kanalzuordnung

### 4.2 Mehrfachzugriffsprotokolle

- 4.2.1 ALOHA
- 4.2.2 CSMA-Protokolle (Carrier Sense Multiple Access)
- 4.2.3 Kollisionsfreie Protokolle
- 4.2.4 Protokolle mit eingeschränkter Konkurrenz
- 4.2.5 Protokolle für drahtlose LANs

### 4.3 Ethernet

- 4.3.1 Bitübertragungsschicht von klassischem Ethernet
- 4.3.2 Ethernet-MAC-Teilschichtprotokoll
- 4.3.3 Leistungsaspekte bei Ethernet

# Inhaltsverzeichnis

- 4.3.4 Switched Ethernet
- 4.3.5 Fast Ethernet
- 4.3.6 Gigabit-Ethernet
- 4.3.7 10-Gigabit-Ethernet
- 4.3.8 Das Ethernet – ein Rückblick

## 4.4 Drahtlose LANs

- 4.4.1 IEEE-802.11-Architektur und -Protokollstapel
- 4.4.2 Die IEEE-802.11-Bitübertragungsschicht
- 4.4.3 Das IEEE-802.11-MAC-Teilschichtprotokoll
- 4.4.4 IEEE-802.11-Rahmenstruktur
- 4.4.5 Dienste

## 4.5 Drahtloses Breitband

- 4.5.1 Vergleich von IEEE 802.16 mit IEEE 802.11 und 3G
- 4.5.2 IEEE-802.16-Architektur und -Protokollstapel
- 4.5.3 IEEE-802.16-Bitübertragungsschicht
- 4.5.4 IEEE-802.16-MAC-Teilschichtprotokoll
- 4.5.5 IEEE-802.16-Rahmenstruktur

## 4.6 Bluetooth

- 4.6.1 Architektur von Bluetooth
- 4.6.2 Bluetooth-Anwendungen
- 4.6.3 Bluetooth-Protokollstapel
- 4.6.4 Bluetooth-Funkschicht
- 4.6.5 Bluetooth-Verbindungsschicht
- 4.6.6 Bluetooth-Rahmenstruktur

## 4.7 RFID

- 4.7.1 Architektur von EPC Gen 2
- 4.7.2 Bitübertragungsschicht von EPC Gen 2
- 4.7.3 Tag-Identifizierungsschicht von EPC Gen 2
- 4.7.4 Nachrichtenformate der Tag-Identifizierung

## 4.8 Switches der Sicherungsschicht

- 4.8.1 Verwendung von Bridges
- 4.8.2 Learning-Bridges
- 4.8.3 Spannbäume und Bridges
- 4.8.4 Repeater, Hubs, Bridges, Switches, Router und Gateways
- 4.8.5 Virtuelle LANs

## Kapitel 5 - Die Vermittlungsschicht

### 5.1 Entwurfsaspekte der Vermittlungsschicht

- 5.1.1 Paketvermittlung unter Verwendung des Store-and-forward-Verfahrens
- 5.1.2 Dienste für die Transportschicht
- 5.1.3 Implementierung eines verbindungslosen Dienstes
- 5.1.4 Implementierung eines verbindungsorientierten Dienstes

# Inhaltsverzeichnis

5.1.5 Vergleich von VC-Netzen und Datagrammnetzen

## 5.2 Routing-Algorithmen

5.2.1 Das Optimalitätsprinzip

5.2.2 Routing nach dem kürzesten Pfad

5.2.3 Fluten

5.2.4 Distanzvektoralgorithmus

5.2.5 Link-State-Routing

5.2.6 Hierarchisches Routing

5.2.7 Broadcast-Routing

5.2.8 Multicast-Routing

5.2.9 Anycast-Routing

5.2.10 Routing für mobile Hosts

5.2.11 Routing in Ad-hoc-Netzen

## 5.3 Algorithmen zur Überlastungsüberwachung

5.3.1 Prinzipien der Überlastungsüberwachung

5.3.2 Routing unter Berücksichtigung des Verkehrs

5.3.3 Zugangssteuerung

5.3.4 Drosseln des Verkehrs

5.3.5 Lastabwurf

## 5.4 Dienstgüte

5.4.1 Anforderungen der Anwendungen

5.4.2 Traffic-Shaping

5.4.3 Scheduling der Pakete

5.4.4 Zugangssteuerung

5.4.5 Integrierte Dienste

5.4.6 Differenzierte Dienste

## 5.5 Internetworking

5.5.1 Unterscheidungsmerkmale von Netzen

5.5.2 Verbindung von Netzen

5.5.3 Tunneling

5.5.4 Internetwork-Routing

5.5.5 Fragmentierung der Pakete

## 5.6 Vermittlungsschicht im Internet

5.6.1 IPv4

5.6.2 IP-Adressen

5.6.3 IP Version 6

5.6.4 Internetsteuerprotokolle

5.6.5 Label Switching und MPLS

5.6.6 OSPF-Protokoll

5.6.7 BGP

5.6.8 Internet-Multicasting

# Inhaltsverzeichnis

5.6.9 Mobiles IP

## Kapitel 6 - Die Transportschicht

### 6.1 Dienste der Transportschicht

6.1.1 Dienste für die oberen Schichten

6.1.2 Dienstprimitive der Transportschicht

6.1.3 Berkeley-Sockets

6.1.4 Beispiel für Socket-Programmierung: Ein Internetdateiserver

### 6.2 Elemente von Transportprotokollen

6.2.1 Adressierung

6.2.2 Verbindungsaufbau

6.2.3 Freigabe von Verbindungen

6.2.4 Fehlerüberwachung und Flusskontrolle

6.2.5 Multiplexing

6.2.6 Systemwiederherstellung

### 6.3 Überlastungsüberwachung

6.3.1 Gewünschte Bandbreitenzuordnung

6.3.2 Regulierung der Senderate

6.3.3 Probleme mit der drahtlosen Übertragung

### 6.4 Internettransportprotokolle: UDP

6.4.1 Einführung in UDP

6.4.2 Entfernte Prozeduraufrufe

6.4.3 Echtzeittransportprotokolle

### 6.5 Internettransportprotokolle: TCP

6.5.1 Einführung in TCP

6.5.2 TCP-Dienstmodell

6.5.3 TCP-Protokoll

6.5.4 TCP-Header

6.5.5 Verbindungsaufbau in TCP

6.5.6 Verbindungsfreigabe in TCP

6.5.7 Modellierung der Verwaltung von TCP-Verbindungen

6.5.8 TCP-Schiebefenster

6.5.9 Verwaltung von Timern in TCP

6.5.10 TCP-Überlastungsüberwachung

6.5.11 Die Zukunft von TCP

### 6.6 Leistungsaspekte

6.6.1 Leistungsprobleme in Rechnernetzen

6.6.2 Messung der Netzwerkleistung

6.6.3 Hostdesign für eine Optimierung der Leistung

6.6.4 Schnelle Segmentverarbeitung

6.6.5 Header-Komprimierung

6.6.6 Protokolle für Long Fat Networks



# Inhaltsverzeichnis

## 6.7 Verzögerungstolerante Netze

6.7.1 DTN-Architektur

6.7.2 Bündel-Protokoll

## Kapitel 7 - Die Anwendungsschicht

### 7.1 DNS – Domain Name System

7.1.1 DNS-Namensraum

7.1.2 Ressourcendatensätze

7.1.3 Nameserver

### 7.2 E-Mail

7.2.1 Architektur und Dienste

7.2.2 Benutzeragenten

7.2.3 Nachrichtenformate

7.2.4 Nachrichtenübertragung

### 7.3 World Wide Web

7.3.1 Übersicht über die Architektur

7.3.2 Statische Webdokumente

7.3.3 Dynamische Webseiten und Webanwendungen

7.3.4 HTTP – HyperText Transfer Protocol

7.3.5 Das mobile Web

7.3.6 Suchen im Web

### 7.4 Streaming Audio und Video

7.4.1 Digitales Audio

7.4.2 Digitales Video

7.4.3 Streaming von gespeicherten Medien

7.4.4 Streaming von Live-Medien

7.4.5 Echtzeitkonferenzen

### 7.5 Content Delivery

7.5.1 Content und Internetverkehr

7.5.2 Serverfarmen und Webproxys

7.5.3 Content-Delivery-Netze

7.5.4 Peer-to-Peer-Netze

## Kapitel 8 - Sicherheit in Netzen

### 8.1 Kryptografie

8.1.1 Einführung in die Kryptografie

8.1.2 Substitutionschiffren

8.1.3 Transpositionschiffren

8.1.4 One-Time Pads

8.1.5 Zwei Grundprinzipien der Verschlüsselung

### 8.2 Algorithmen für die symmetrische Verschlüsselung

8.2.1 DES – Data Encryption Standard

# Inhaltsverzeichnis

8.2.2 AES – Advanced Encryption Standard

8.2.3 Chiffriermodi

8.2.4 Weitere Chiffren

8.2.5 Kryptoanalyse

## 8.3 Algorithmen für öffentliche Schlüssel

8.3.1 RSA

8.3.2 Weitere Algorithmen für öffentliche Schlüssel

## 8.4 Digitale Signaturen

8.4.1 Signaturen mit symmetrischen Schlüsseln

8.4.2 Signaturen mit öffentlichen Schlüsseln

8.4.3 Message Digests

8.4.4 Die Geburtstagsattacke

## 8.5 Verwaltung öffentlicher Schlüssel

8.5.1 Zertifikate

8.5.2 X.509

8.5.3 PKI – Infrastruktur für öffentliche Schlüssel

## 8.6 Kommunikationssicherheit

8.6.1 IPsec

8.6.2 Firewalls

8.6.3 Virtuelle private Netze

8.6.4 Drahtlose Sicherheit

## 8.7 Authentifizierungsprotokolle

8.7.1 Authentifizierung auf der Basis eines gemeinsamen geheimen Schlüssels

8.7.2 Einrichten eines gemeinsamen Schlüssels: Das Schlüsselaustauschprotokoll von Diffie und Hellman

8.7.3 Authentifizierung mithilfe eines Schlüsselverteilungszentrums

8.7.4 Authentifizierung mit Kerberos

8.7.5 Authentifizierung mithilfe öffentlicher Verschlüsselung

## 8.8 E-Mail-Sicherheit

8.8.1 PGP – Pretty Good Privacy

8.8.2 S/MIME

## 8.9 Sicherheit im Web

8.9.1 Bedrohungen der Sicherheit

8.9.2 Sichere Namensvergabe

8.9.3 SSL – Secure Sockets Layer

8.9.4 Sicherheit bei mobilem Code

## 8.10 Soziale Themen

8.10.1 Datenschutz

8.10.2 Redefreiheit

8.10.3 Urheberrechte

## Kapitel 9 - Leseempfehlungen und Bibliografie

# Inhaltsverzeichnis

## 9.1 Empfehlungen für weiterführende Literatur

9.1.1 Einführung und allgemeine Werke

9.1.2 Bitübertragungsschicht

9.1.3 Sicherungsschicht

9.1.4 MAC-Teilschicht

9.1.5 Vermittlungsschicht

9.1.6 Transportschicht

9.1.7 Anwendungsschicht

9.1.8 Netzsicherheit

## 9.2 Alphabetische Bibliografie

Register

Copyright

# Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwort- und DRM-Schutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: **info@pearson.de**

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten oder ein Zugangscode zu einer eLearning Plattform bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.** Zugangscodes können Sie darüberhinaus auf unserer Website käuflich erwerben.

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

**<https://www.pearson-studium.de>**