

Computernetzwerke

Prinzipien, Modelle und Algorithmen digitaler
Kommunikation



Lucien Sina

Computernetzwerke

Prinzipien, Modelle und Algorithmen digitaler Kommunikation

Lucien Sina

6.8.2026

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Einführung	3
2.1	Motivation	3
2.2	Kommunikation	5
2.3	Computernetzwerke	8
2.4	Modellvokabular	10
2.5	Buchkonzept	12
I	Grundlagen und Modelle	15
3	Kommunikationsmodelle	16
3.1	Kommunikationssysteme	16
3.2	Informationssysteme	18
3.3	Systemmodelle	21
3.4	Netzwerkmodelle	23
3.5	Abstraktion	25
4	Netzwerkarchitekturen	28
4.1	Schichtenprinzip	28
4.2	Kapselung	30
4.3	Schnittstellen	33
4.4	OSI-Modell	35
4.4.1	Bitübertragungsschicht	37
4.4.2	Sicherungsschicht	38

4.4.3	Vermittlungsschicht	38
4.4.4	Transportschicht	39
4.4.5	Sitzungsschicht	39
4.4.6	Darstellungsschicht	40
4.4.7	Anwendungsschicht	40
4.5	TCP/IP-Modell	41
4.5.1	Die Schichten des TCP/IP-Modells	42
4.5.2	Netzzugangsschicht	42
4.5.3	Internetschicht	43
4.5.4	Transportschicht	43
4.5.5	Anwendungsschicht	44
4.5.6	Zusammenspiel der Schichten	45
4.5.7	Prinzipien des TCP/IP-Modells	45
4.6	Architekturvergleich	46
4.6.1	Entwurfsziel	46
II	Fundamentale Kommunikationsaufgaben	51
5	Identifikation	52
5.1	Identitäten	52
5.2	Adressierung	55
5.3	Namensauflösung	57
5.4	Hierarchien	60
6	Informationsübertragung	64
6.1	Nachrichten	64
6.2	Pakete	67
6.3	Informationskanäle	70
6.4	Informationstheorie	72
6.5	Fehlermodelle	75
7	Zuverlässigkeit von Netzwerken	79
7.1	Fehlererkennung	79
7.2	Fehlerkorrektur	82
7.3	Bestätigungen	86

7.4	Flusskontrolle	89
7.5	Ende-zu-Ende-Prinzip	92
8	Routing	97
8.1	Netzwerkgraphen	97
8.2	Netzwerktopologien	101
8.3	Pfadwahl	105
8.4	Routingalgorithmen	109
8.5	Skalierung	114
III	Große Netzwerke	118
9	Ressourcenverwaltung	119
9.1	Bandbreite	119
9.2	Latenz	122
9.3	Puffer	125
9.4	Warteschlangen	128
9.5	Optimierung	131
10	Verteilte Kommunikation	135
10.1	Kooperation	135
10.2	Synchronisation	138
10.3	Koordination	141
10.4	Emergenz	144
10.5	Selbstorganisation	147
11	Netzwerksicherheit	151
11.1	Bedrohungsmodelle	151
11.2	Vertrauen	154
11.3	Authentizität	157
11.4	Integrität	160
11.5	Verfügbarkeit	164
11.6	Kryptographie	169

IV	Komplexe Netzwerke	173
12	Adaptive Netzwerke	174
12.1	Selbstkonfiguration	174
12.2	Selbstoptimierung	178
12.3	Fehlertoleranz	182
12.4	Anomalieerkennung	186
12.5	KI-Methoden	190
13	Verteilte Systeme	195
13.1	Verteilung	195
13.2	Transparenz	199
13.3	Cloud Computing	203
13.4	Verteilte Anwendungen	207
13.5	Verteilte Programmierung	211
14	Ausblick	216
14.1	Kommunikationsprinzipien	216
14.2	Quantenkommunikation	220
14.3	Autonome Netzwerke	224
14.4	Weiterentwicklungen	228
14.5	Offene Forschungsfragen	233
15	Aufgaben und Lösungen	237
15.1	Grundlagen und Modelle	237
15.2	Kommunikation und Architekturen	239
15.3	Zuverlässigkeit und Routing	241
15.4	Verteilte Systeme und Sicherheit	243
15.5	Komplexe Netzwerke und Zukunft	245
16	Abschliessende Gedanken	248
16.1	Buchempfehlungen	248
17	Impressum	255

Kapitel 1

Vorwort

Dieses Buch beschreibt nicht primär einzelne Netzwerkprotokolle oder konkrete Technologien. Stattdessen untersucht es die fundamentalen Probleme digitaler Kommunikation, ihre mathematischen Modelle und algorithmischen Lösungen. Die vorgestellten Protokolle und Architekturen dienen dabei als Beispiele für allgemeine Prinzipien, die weitgehend unabhängig von ihrer konkreten technischen Umsetzung Bestand haben. Der Ausgangspunkt dieses Buches ist die grundlegende Frage:

Wie können Informationssysteme miteinander kommunizieren und Informationen zuverlässig, effizient und sicher austauschen?

Ausgehend von dieser Fragestellung werden zunächst allgemeine Kommunikationsmodelle entwickelt. Begriffe wie Systeme, Schnittstellen, Abstraktion und Schichtenbildung bilden dabei die Grundlage für das Verständnis moderner Netzwerkarchitekturen. Anschließend werden mit dem OSI-Modell und dem TCP/IP-Modell zwei zentrale Architekturen betrachtet und hinsichtlich ihrer Prinzipien und Zielsetzungen analysiert. Darauf aufbauend untersucht das Buch die fundamentalen Aufgaben, die jedes Kommunikationssystem lösen muss. Dazu gehören die Identifikation von Kommunikationspartnern, die Übertragung von Informationen, die Behandlung von Fehlern, die Auswahl geeigneter Kommunikationspfade sowie die Verwaltung begrenzter Ressourcen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung von Netzwerken als mathematische und algorithmische Systeme. Graphentheorie beschreibt Netzwerkstrukturen, Algorithmen ermöglichen Routing und Optimierung, Informationstheorie liefert Modelle für Kommunikation und Unsicherheit, und systemtheoretische Konzepte erklären das

Verhalten komplexer verteilter Systeme. Moderne Netzwerke sind jedoch weit mehr als reine Übertragungssysteme. Sie sind hochgradig verteilte, adaptive und sicherheitskritische Informationssysteme. Deshalb behandelt dieses Buch auch Themen wie Netzwerksicherheit, autonome Netzwerke, Künstliche Intelligenz, Cloud Computing und verteilte Systeme. Der Aufbau des Buches folgt dabei einem durchgängigen Prinzip:

Problem $\rightarrow$ Modell $\rightarrow$ Mathematik $\rightarrow$ Algorithmus $\rightarrow$ Architektur

Jedes Kapitel beginnt mit einer grundlegenden Kommunikationsaufgabe, entwickelt ein geeignetes Modell und untersucht anschließend die mathematischen sowie algorithmischen Grundlagen ihrer Lösung. Erst danach werden konkrete technische Realisierungen betrachtet. Dieses Vorgehen soll nicht nur erklären, wie heutige Netzwerke funktionieren, sondern vor allem vermitteln, warum sie auf bestimmte Weise entworfen werden. Technologien verändern sich kontinuierlich, während die grundlegenden Herausforderungen digitaler Kommunikation bestehen bleiben. Das Buch richtet sich an Studierende der Informatik, Ingenieurwissenschaften und verwandter Fachrichtungen sowie an alle Leserinnen und Leser, die ein tieferes Verständnis der Prinzipien moderner Computernetzwerke entwickeln möchten. Das Ziel dieses Buches ist es daher nicht, eine Sammlung einzelner Protokolle bereitzustellen, sondern ein theoretisches Fundament zu schaffen, mit dem sich bestehende und zukünftige Netzwerkarchitekturen systematisch verstehen, analysieren und weiterentwickeln lassen.

Kapitel 2

Einführung

2.1 Motivation

Computer sind längst keine isolierten Rechensysteme mehr. Sie kommunizieren miteinander, tauschen Informationen aus, koordinieren ihre Aktivitäten und stellen gemeinsam Dienste bereit. Ob beim Abruf einer Webseite, dem Versand einer E-Mail, einer Videokonferenz oder der Nutzung von Cloud-Diensten – stets arbeiten zahlreiche Computersysteme zusammen, obwohl sie sich häufig an verschiedenen Orten der Welt befinden. Diese Zusammenarbeit setzt die Fähigkeit voraus, Informationen zuverlässig, effizient und sicher zwischen autonomen Teilnehmern auszutauschen. Genau diese Aufgabe erfüllen Computernetzwerke. Sie bilden die technische Grundlage nahezu aller modernen Informationssysteme und verbinden Milliarden von Geräten zu einem weltweiten Kommunikationssystem. Mit zunehmender Vernetzung wächst jedoch nicht nur die Anzahl der beteiligten Systeme, sondern auch die Komplexität ihrer Kommunikation. Bereits ein vergleichsweise einfaches Computernetzwerk muss zahlreiche Kommunikationsprobleme gleichzeitig bewältigen:

- Wie findet ein Teilnehmer seinen Kommunikationspartner?
- Wie werden Teilnehmer eindeutig identifiziert?
- Wie gelangen Informationen über unbekannte Wege zum Ziel?
- Wie werden Übertragungsfehler erkannt und behandelt?

- Wie koordinieren autonome Systeme ihre Zusammenarbeit?
- Wie werden begrenzte Ressourcen effizient genutzt?
- Wie lässt sich Kommunikation gegen Störungen und Angriffe absichern?

Auf den ersten Blick wirken diese Fragestellungen unabhängig voneinander. Tatsächlich beschreiben sie jedoch unterschiedliche Facetten desselben Grundproblems: der zuverlässigen, effizienten und sicheren Kommunikation zwischen autonomen Computersystemen. Ein Computernetzwerk ist daher weit mehr als eine Sammlung einzelner Protokolle oder Übertragungsmedien. Erst das koordinierte Zusammenspiel vieler Mechanismen ermöglicht eine zuverlässige, effiziente und sichere Kommunikation zwischen autonomen Systemen. Viele Lehrbücher stellen Computernetzwerke anhand konkreter Technologien oder der Schichtenmodelle OSI und TCP/IP vor. Diese Sichtweise ist für das Verständnis heutiger Netzwerke zweifellos wichtig. Gleichzeitig besteht jedoch die Gefahr, dass die technischen Realisierungen stärker im Mittelpunkt stehen als die fundamentalen Kommunikationsprobleme, zu deren Lösung sie entwickelt wurden. Dieses Buch verfolgt deshalb einen anderen Ansatz. Ausgangspunkt sind nicht einzelne Protokolle oder Standards, sondern die grundlegenden Aufgaben digitaler Kommunikation. Für jede dieser Aufgaben werden zunächst das Kommunikationsproblem, anschließend geeignete Modelle und schließlich die mathematischen sowie algorithmischen Lösungsprinzipien entwickelt. Erst danach werden ausgewählte Architekturen, Protokolle und Technologien als konkrete Realisierungen dieser allgemeinen Prinzipien vorgestellt. Dadurch entsteht ein zeitloses Verständnis von Computernetzwerken. Während sich Übertragungsmedien, Protokolle und technische Standards im Laufe der Zeit verändern, bleiben die fundamentalen Kommunikationsprobleme weitgehend unverändert. Wer diese Prinzipien verstanden hat, kann sowohl heutige als auch zukünftige Netzwerktechnologien analysieren, einordnen und bewerten.

Prinzip 1. Ein Computernetzwerk dient der zuverlässigen, effizienten und sicheren Verarbeitung, Übertragung und Koordination von Information zwischen autonomen Computersystemen.

Aus diesem Leitprinzip ergibt sich der Aufbau des gesamten Buches. Jedes Fachkapitel folgt demselben didaktischen Grundmuster. Ausgangspunkt ist stets ein grundlegendes Kommunikationsproblem. Darauf aufbauend werden geeignete Modelle entwickelt, mathematische Zusammenhänge beschrieben und algorithmische Lösungsverfahren untersucht. Anschließend werden diese Lösungsprinzipien in Netzwerkarchitekturen

und schließlich in konkreten Protokollen und Technologien wiedergefunden. Diese Vorgehensweise trennt bewusst zwischen Kommunikationsproblemen, allgemeinen Lösungsprinzipien und deren konkreter technischer Realisierung. Dadurch vermittelt das Buch ein nachhaltiges Verständnis der Konzepte, das über einzelne Protokolle und aktuelle Technologien hinaus Bestand hat. Dieser problemorientierte Aufbau bildet den didaktischen Leitfaden des gesamten Buches.

2.2 Kommunikation

Kommunikation bildet die Grundlage jeder Form verteilter Informationsverarbeitung. Immer dann, wenn mehrere autonome Systeme zusammenarbeiten sollen, müssen sie Informationen austauschen. Dies gilt gleichermaßen für Menschen, Computersysteme, Sensoren, Roboter oder komplexe technische Anlagen. Ohne Kommunikation ist keine koordinierte Zusammenarbeit möglich. Allgemein bezeichnet Kommunikation den zielgerichteten Austausch von Information zwischen mindestens zwei Teilnehmern. Dabei erzeugt ein Sender eine Nachricht, überträgt sie über einen Kommunikationskanal und ermöglicht einem Empfänger, die enthaltene Information zu rekonstruieren und weiterzuverarbeiten. Die erfolgreiche Übertragung einer Nachricht setzt voraus, dass Sender und Empfänger gemeinsame Kommunikationsprotokolle verwenden, welche die Darstellung, Übertragung und Interpretation von Information festlegen. Um Kommunikationssysteme wissenschaftlich untersuchen zu können, benötigen wir zunächst einen präzisen Kommunikationsbegriff.

Definition 1 (Kommunikation). *Kommunikation ist der Prozess des Erzeugens, Übertragens, Empfangens und Verarbeitens von Information zwischen autonomen Teilnehmern auf Grundlage gemeinsam vereinbarter Kommunikationsprotokolle.*

Die Definition verdeutlicht, dass jedes Kommunikationssystem aus mehreren grundlegenden Bestandteilen besteht:

- Teilnehmer
- Information
- Nachricht
- Signal

- Kommunikationskanal
- Kommunikationsprotokoll

Dabei ist insbesondere zwischen den Begriffen *Information*, *Nachricht* und *Signal* zu unterscheiden. Obwohl diese Begriffe im alltäglichen Sprachgebrauch häufig synonym verwendet werden, beschreiben sie unterschiedliche Abstraktionsebenen eines Kommunikationsprozesses.

Information Der semantische Inhalt einer Mitteilung, also das, was kommuniziert werden soll.

Nachricht Die formale Repräsentation einer Information, beispielsweise als Text, Bitfolge, Datenpaket oder Datei.

Signal Die physikalische Repräsentation einer Nachricht während ihrer Übertragung.

Zwischen diesen drei Begriffen besteht eine feste Beziehung. Information wird zunächst durch eine Nachricht repräsentiert. Zur Übertragung wird diese Nachricht als physikalisches Signal realisiert. Beim Empfänger erfolgt dieser Prozess in umgekehrter Reihenfolge.

Information → Nachricht
 → Signal
 → Nachricht
 → Information

Dieses Kommunikationsmodell beschreibt die grundlegenden Abstraktionsebenen digitaler Kommunikation. Dieselbe Information kann durch unterschiedliche Nachrichten repräsentiert werden, und dieselbe Nachricht kann über verschiedene physikalische Signalformen übertragen werden. Fehler entstehen in der Regel auf der Signalebene, während Kodierungsverfahren die Beziehung zwischen Information und Nachricht betreffen. Die Bestandteile eines Kommunikationssystems stehen nicht unabhängig nebeneinander, sondern bilden ein zusammenhängendes System. Zwischen ihnen bestehen vielfältige Wechselwirkungen, aus denen grundlegende Kommunikationsprobleme entstehen. Bereits bei einem einfachen Nachrichtenaustausch muss beispielsweise geklärt werden:

- Wer kommuniziert?
- Welche Information soll übertragen werden?
- Wie wird die Information als Nachricht repräsentiert?
- Wie wird die Nachricht als Signal realisiert?
- Über welchen Kommunikationskanal erfolgt die Übertragung?
- Wie erkennt der Empfänger den Beginn und das Ende einer Nachricht?
- Wie werden Übertragungsfehler erkannt und behandelt?
- Woher weiß der Sender, dass die Nachricht erfolgreich angekommen ist?

Diese Fragestellungen bilden keine Besonderheit von Computernetzwerken, sondern treten grundsätzlich in jedem Kommunikationssystem auf. Sie lassen sich daher als allgemeine Kommunikationsprobleme auffassen. Um solche Fragestellungen systematisch untersuchen zu können, führen wir den Begriff des Kommunikationsproblems ein.

Definition 2 (Kommunikationsproblem). *Ein Kommunikationsproblem beschreibt eine grundlegende Fragestellung, deren Lösung notwendig ist, damit Information zwischen autonomen Teilnehmern zuverlässig, effizient oder sicher ausgetauscht werden kann.*

Die Informatik betrachtet Kommunikation nicht nur als technischen Vorgang, sondern als Prozess der Informationsverarbeitung. Aus algorithmischer Sicht lässt sich Kommunikation daher als Folge wohldefinierter Verarbeitungsschritte modellieren:

Information → Kodierung
→ Nachricht
→ Signalkodierung
→ Signal
→ Übertragung
→ Empfang
→ Signaldekodierung
→ Nachricht
→ Interpretation

Jeder dieser Verarbeitungsschritte kann eigene Kommunikationsprobleme erzeugen. Informationen müssen repräsentiert, Nachrichten kodiert, Signale übertragen, Übertragungsfehler erkannt oder korrigiert und empfangene Nachrichten interpretiert werden. Die Entwicklung geeigneter Modelle, mathematischer Beschreibungen und algorithmischer Verfahren zur Lösung dieser Probleme bildet den Gegenstand der digitalen Kommunikation. Im weiteren Verlauf dieses Buches werden sämtliche Aufgaben eines Computernetzwerks als Lösungen solcher Kommunikationsprobleme betrachtet. Nicht einzelne Technologien oder Protokolle stehen dabei im Mittelpunkt, sondern die zugrunde liegenden Prinzipien, Modelle und Algorithmen.

Prinzip 2. Ein Computernetzwerk ist ein System zur Lösung fundamentaler Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Teilnehmern.

2.3 Computernetzwerke

Die vorhergehende Sektion hat Kommunikation als allgemeinen Prozess des Erzeugens, Übertragens, Empfangens und Verarbeitens von Information eingeführt. Computernetzwerke stellen eine spezielle Form solcher Kommunikationssysteme dar. Ihr Zweck besteht darin, die Kommunikation zwischen autonomen Computersystemen zu ermöglichen und so eine verteilte Informationsverarbeitung zu realisieren. Um Computernetzwerke wissenschaftlich untersuchen zu können, benötigen wir zunächst einen präzisen Netzwerkbegriff.

Definition 3 (Computernetzwerk). *Ein Computernetzwerk ist ein System autonomer Computersysteme, die über Kommunikationsverbindungen miteinander gekoppelt sind und mithilfe gemeinsamer Kommunikationsregeln Informationen austauschen, Ressourcen gemeinsam nutzen und ihre Zusammenarbeit koordinieren.*

Diese Definition enthält mehrere wesentliche Aussagen. Erstens besteht ein Computernetzwerk aus *autonomen* Teilnehmern. Jedes Computersystem besitzt einen eigenen Zustand und kann unabhängig von anderen Systemen arbeiten. Kommunikation ist daher keine Eigenschaft eines einzelnen Rechners, sondern entsteht erst durch das Zusammenwirken mehrerer eigenständiger Systeme. Zweitens setzt erfolgreiche Kommunikation gemeinsame *Kommunikationsregeln* voraus. Sender und Empfänger müssen dieselben Regeln zur Darstellung, Übertragung und Interpretation von Nachrichten verwenden. Ohne solche Regeln könnte zwar ein physikalisches Signal übertragen werden,

sein Inhalt bliebe jedoch für den Empfänger bedeutungslos. Drittens dient ein Computernetzwerk nicht ausschließlich der Übertragung von Nachrichten. Sein eigentlicher Zweck besteht darin, verteilte Informationsverarbeitung zu ermöglichen. Rechner tauschen Informationen aus, koordinieren ihre Aktivitäten, greifen auf gemeinsame Ressourcen zu und stellen Dienste für andere Teilnehmer bereit. Die Kommunikation bildet somit nicht das Ziel des Netzwerks, sondern das Mittel zur Zusammenarbeit autonomer Systeme. Aus dieser Sicht ergeben sich unmittelbar die fundamentalen Aufgaben eines Computernetzwerks. Es muss Teilnehmer eindeutig identifizieren, Kommunikationspartner auffindbar machen, Informationen zuverlässig übertragen, geeignete Übertragungswege bestimmen, gemeinsame Ressourcen verwalten, Kommunikationsfehler behandeln und die Kommunikation gegen Störungen sowie Angriffe absichern. Diese Aufgaben bilden den eigentlichen Gegenstand der Netzwerkinformatik. Aus algorithmischer Sicht kann ein Computernetzwerk als System aufeinander abgestimmter Entscheidungsprozesse verstanden werden. Während eines Kommunikationsvorgangs müssen die beteiligten Systeme fortlaufend Entscheidungen treffen. Beispielsweise muss bestimmt werden, an welchen Empfänger eine Nachricht gerichtet ist, über welchen Weg sie übertragen wird, wie Übertragungsfehler behandelt werden und wie gemeinsam genutzte Ressourcen effizient verteilt werden können. Hinter jedem dieser Entscheidungen stehen geeignete Modelle und algorithmische Verfahren. Damit verbindet die Netzwerkinformatik verschiedene Teilgebiete der Informatik und Mathematik. Graphentheorie liefert Modelle für Netzwerkstrukturen und Routingverfahren, Informationstheorie beschreibt die Grundlagen der Informationsübertragung, Codierungstheorie ermöglicht den Umgang mit Übertragungsfehlern, Optimierungsverfahren unterstützen die effiziente Nutzung von Ressourcen und die Wahrscheinlichkeitstheorie hilft, Fehler, Wartezeiten und Netzwerklasten zu analysieren. Computernetzwerke bilden somit ein Anwendungsgebiet, in dem zahlreiche mathematische und algorithmische Konzepte zusammenwirken. Dieses Buch betrachtet Computernetzwerke daher nicht als Sammlung einzelner Protokolle oder technischer Standards. Stattdessen versteht es sie als Systeme zur Lösung fundamentaler Kommunikationsprobleme. Protokolle, Architekturen und Technologien werden dabei als konkrete Realisierungen allgemeiner Prinzipien verstanden. Dadurch entsteht ein Verständnis, das über einzelne Implementierungen hinaus Bestand hat und auch zukünftige Entwicklungen der Netzwerktechnik einordnen kann.

2.4 Modellvokabular

Die vorhergehenden Abschnitte haben die grundlegenden Begriffe *Kommunikation* und *Computernetzwerk* eingeführt. Um Computernetzwerke wissenschaftlich untersuchen zu können, benötigen wir darüber hinaus eine einheitliche Sprache. Erst präzise definierte Begriffe ermöglichen es, Modelle zu entwickeln, mathematische Zusammenhänge zu beschreiben und algorithmische Verfahren systematisch zu analysieren. Die folgenden Definitionen bilden daher das Modellvokabular dieses Buches. Sie beschreiben keine konkrete Netzwerktechnologie, sondern grundlegende Konzepte, die unabhängig von Protokollen, Architekturen oder Übertragungsmedien gelten.

Definition 4 (Teilnehmer). *Ein Teilnehmer ist ein autonomes System, das Informationen erzeugen, empfangen, verarbeiten oder weiterleiten kann.*

Ein Teilnehmer kann beispielsweise ein Computer, ein Server, ein Router, ein Sensor oder ein eingebettetes System sein. Für das Modell ist die konkrete technische Realisierung jedoch unerheblich.

Definition 5 (Kommunikationskanal). *Ein Kommunikationskanal ist eine Verbindung, über die Signale zwischen Teilnehmern übertragen werden können.*

Der Kanal beschreibt ausschließlich die Möglichkeit zur Signalübertragung. Die physikalische Umsetzung, beispielsweise durch Kupferleitungen, Glasfasern oder Funkverbindungen, spielt auf dieser Abstraktionsebene keine Rolle.

Definition 6 (Kommunikationsregel). *Eine Kommunikationsregel beschreibt eine Vereinbarung darüber, wie Information dargestellt, übertragen, interpretiert oder verarbeitet wird.*

Kommunikationsregeln bilden die Grundlage jeder erfolgreichen Kommunikation. Sie legen beispielsweise fest, wie Nachrichten aufgebaut, kodiert oder bestätigt werden.

Definition 7 (Protokoll). *Ein Protokoll ist eine endliche Menge von Kommunikationsregeln, die den geordneten Informationsaustausch zwischen Teilnehmern beschreibt.*

Protokolle stellen somit konkrete Realisierungen allgemeiner Kommunikationsregeln dar.

Definition 8 (Dienst). *Ein Dienst beschreibt eine Funktionalität, die einem Teilnehmer oder einer höheren Abstraktionsebene bereitgestellt wird, ohne deren interne Realisierung offenzulegen.*

Die Trennung zwischen Dienst und Protokoll gehört zu den grundlegenden Abstraktionsprinzipien moderner Netzwerksysteme. Während ein Dienst beschreibt, *was* bereitgestellt wird, legt ein Protokoll fest, *wie* diese Funktionalität realisiert wird.

Definition 9 (Schnittstelle). *Eine Schnittstelle beschreibt die definierte Grenze zwischen zwei Systemkomponenten oder Abstraktionsebenen, über die Dienste angeboten und genutzt werden.*

Schnittstellen ermöglichen die Zerlegung komplexer Systeme in unabhängige Teilsysteme und bilden damit eine wesentliche Voraussetzung für modulare Netzwerkarchitekturen.

Definition 10 (Zustand). *Der Zustand eines Systems umfasst sämtliche Informationen, die dessen zukünftiges Verhalten beeinflussen.*

Netzwerkcommunication verändert fortlaufend die Zustände der beteiligten Systeme. Kommunikation kann daher auch als Folge von Zustandsänderungen aufgefasst werden. Die eingeführten Begriffe lassen sich zu einem einfachen abstrakten Netzwerkmodell zusammenfassen.

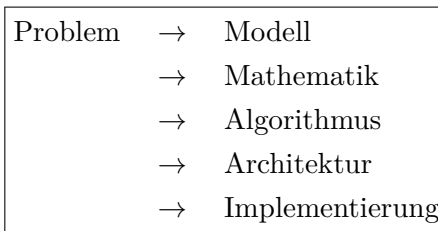
Definition 11 (Abstraktes Netzwerkmodell). *Ein Computernetzwerk wird durch das Tupel $N = (T, K, R)$ beschrieben, wobei T die Menge aller Teilnehmer, K die Menge aller Kommunikationskanäle und R die Menge aller Kommunikationsregeln bezeichnet.*

Dieses Modell erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es dient ausschließlich dazu, die wesentlichen Bestandteile eines Computernetzwerks auf einer hohen Abstraktionsebene zu beschreiben. Unabhängig davon, ob ein lokales Netzwerk, das Internet, ein Sensornetzwerk oder zukünftige Kommunikationssysteme betrachtet werden, finden sich stets Teilnehmer, Kommunikationskanäle und gemeinsame Kommunikationsregeln wieder. Aus algorithmischer Sicht bildet dieses Modell den Ausgangspunkt nahezu aller Fragestellungen der Netzwerkinformatik. Gegeben sind Teilnehmer, Kommunikationskanäle und Kommunikationsregeln. Gesucht werden geeignete Verfahren, um Kommunikationsprobleme effizient, zuverlässig und sicher zu lösen. Die folgenden Kapitel entwickeln auf Grundlage dieses Modellvokabulars schrittweise mathematische Modelle und algorithmische Verfahren für die verschiedenen Aufgaben der Netzwerkcommunication. Das Modellvokabular bildet damit die gemeinsame Sprache des gesamten Buches.

2.5 Buchkonzept

Computernetzwerke gehören zu den komplexesten technischen Systemen der Informatik. Ihre Funktionsweise beruht auf dem Zusammenspiel zahlreicher Komponenten, Algorithmen, mathematischer Modelle und Kommunikationsmechanismen. Diese Komplexität führt häufig dazu, dass Netzwerke hauptsächlich als Sammlung einzelner Protokolle, Standards und Technologien betrachtet werden. Dieses Buch verfolgt bewusst einen anderen Ansatz. Im Mittelpunkt stehen nicht konkrete Implementierungen, sondern die grundlegenden Probleme der digitalen Kommunikation und ihre allgemeinen Lösungsprinzipien. Protokolle, Architekturen und technische Standards werden nicht als Selbstzweck betrachtet, sondern als konkrete Realisierungen abstrakter Modelle und allgemeiner Kommunikationsprinzipien. Ausgangspunkt jedes Kapitels ist daher ein grundlegendes Kommunikationsproblem. Dieses Problem wird zunächst präzisiert, anschließend modelliert, mathematisch analysiert und schließlich durch geeignete Algorithmen gelöst. Erst danach werden konkrete Netzwerkmechanismen betrachtet, welche diese Prinzipien in realen Systemen umsetzen.

Der grundlegende Analysezyklus dieses Buches lautet:



Dieser Ablauf entspricht einer grundlegenden Vorgehensweise der Informatik: Komplexe technische Systeme werden nicht unmittelbar durch ihre konkrete Realisierung verstanden, sondern zunächst durch geeignete Abstraktionen, formale Modelle und algorithmische Lösungsprinzipien untersucht. Jedes Fachkapitel folgt deshalb einem einheitlichen didaktischen Aufbau:

1. Motivation
2. Problemstellung
3. Modell

4. Mathematische Grundlagen
5. Algorithmen
6. Architekturelle Einordnung
7. Praktische Beispiele
8. Grenzen
9. Zusammenfassung
10. Aufgaben

Diese Struktur verfolgt zwei Ziele. Einerseits erhält der Leser einen klaren und nachvollziehbaren Lernpfad. Andererseits wird deutlich, dass Computernetzwerke nicht aus isolierten Einzelverfahren bestehen, sondern aus dem Zusammenspiel verschiedener Modelle, Algorithmen und Systemkomponenten entstehen. Ein weiteres zentrales Merkmal dieses Buches ist die konsequente Betrachtung von Computernetzwerken aus mehreren komplementären Perspektiven. Keine dieser Perspektiven beschreibt das gesamte Netzwerk vollständig. Jede einzelne beleuchtet jedoch einen bestimmten Aspekt des Systems und beantwortet eine eigene wissenschaftliche Fragestellung.

Die *aufgabenorientierte Perspektive* betrachtet Netzwerke ausgehend von ihren grundlegenden Funktionen. Sie untersucht, welche Probleme ein Netzwerk lösen muss, beispielsweise Identifikation, Adressierung, Übertragung, Vermittlung, Synchronisation oder Ressourcennutzung. Die *systemtheoretische Perspektive* betrachtet das Netzwerk als Zusammenspiel miteinander verbundener Komponenten. Im Mittelpunkt stehen dabei Strukturen, Zustände, Schnittstellen, Wechselwirkungen und die Eigenschaften, die aus dem Zusammenspiel vieler Einzelkomponenten entstehen. Die *Perspektive der Informationsverarbeitung* untersucht Netzwerke als Systeme zur Erzeugung, Darstellung, Übertragung und Verarbeitung von Information. Sie bildet eine Verbindung zwischen Informationstheorie, Kommunikation und Informatik. Die *algorithmische Perspektive* fragt danach, mit welchen Verfahren Kommunikationsprobleme gelöst werden können. Routingverfahren, Fehlererkennung, Kodierung, Synchronisation und Ressourcenverwaltung werden dabei als algorithmische Aufgaben betrachtet. Die *mathematische Perspektive* ermöglicht eine formale Beschreibung und Analyse von Netzwerken. Graphentheorie, Wahrscheinlichkeitstheorie, Informationstheorie und Optimierung liefern dabei die theoretischen Grundlagen, um Eigenschaften und Grenzen von Kommunikationssystemen

zu untersuchen. Die *architekturelle Perspektive* betrachtet die Strukturierung von Netzwerken durch Abstraktionen, Schichten, Schnittstellen und Dienste. Sie erklärt, wie komplexe Kommunikationssysteme durch geeignete Zerlegung beherrschbar gemacht werden. Die *Verteilungsperspektive* untersucht Netzwerke als Systeme autonomer Teilnehmer, die ohne zentrale Kontrolle miteinander kooperieren müssen. Sie beschäftigt sich mit Koordination, Synchronisation und der Entstehung globaler Eigenschaften aus lokalen Entscheidungen. Die *Optimierungsperspektive* betrachtet Netzwerke als Systeme mit begrenzten Ressourcen. Sie untersucht beispielsweise die effiziente Nutzung von Bandbreite, Speicher, Energie oder Übertragungskapazität. Die *Sicherheitsperspektive* erweitert die Betrachtung um die Frage, wie Kommunikation gegen Fehler, Missbrauch und Angriffe geschützt werden kann. Dabei stehen Eigenschaften wie Vertraulichkeit, Integrität, Authentizität und Verfügbarkeit im Mittelpunkt. Erst das Zusammenspiel dieser verschiedenen Perspektiven ermöglicht ein umfassendes Verständnis moderner Computernetzwerke. Die folgenden Kapitel greifen diese Sichtweisen wiederholt auf und zeigen, wie unterschiedliche Modelle und Methoden zur Analyse derselben Kommunikationsprobleme beitragen. Keine einzelne Perspektive genügt allein, um moderne Computernetzwerke vollständig zu verstehen. Erst das Zusammenspiel verschiedener Sichtweisen ermöglicht eine ganzheitliche Analyse digitaler Kommunikationssysteme. Der Schwerpunkt dieses Buches liegt daher auf zeitlosen Prinzipien. Übertragungsmedien, Protokolle und technische Standards verändern sich kontinuierlich. Die zugrunde liegenden Kommunikationsprobleme sowie die mathematischen und algorithmischen Prinzipien ihrer Lösung bleiben dagegen weitgehend erhalten. Wer diese Prinzipien verstanden hat, kann nicht nur bestehende Netzwerktechnologien nachvollziehen, sondern auch zukünftige Entwicklungen systematisch analysieren und bewerten.

Prinzip 3 (Didaktisches Prinzip). Dieses Buch vermittelt keine Sammlung einzelner Netzwerktechnologien, sondern allgemeine Modelle, mathematische Grundlagen und algorithmische Prinzipien, mit deren Hilfe Kommunikationssysteme systematisch verstanden, analysiert und entwickelt werden können.

Teil I

Grundlagen und Modelle

Kapitel 3

Kommunikationsmodelle

3.1 Kommunikationssysteme

Im vorhergehenden Kapitel wurde Kommunikation als Prozess des Erzeugens, Übertragens, Empfangens und Verarbeitens von Information definiert. Für eine wissenschaftliche Untersuchung genügt es jedoch nicht, lediglich den Kommunikationsprozess zu betrachten. Ebenso wichtig ist die Frage, welche Strukturen und Komponenten erforderlich sind, um Kommunikation überhaupt zu ermöglichen. Hierzu führen wir den Begriff des Kommunikationssystems ein. Er beschreibt die Gesamtheit aller Teilnehmer, Kommunikationskanäle, Regeln und Mechanismen, die gemeinsam einen geordneten Informationsaustausch ermöglichen. Um Kommunikationssysteme mathematisch und algorithmisch untersuchen zu können, benötigen wir zunächst ein geeignetes Modell.

Definition 12 (Kommunikationssystem). *Ein Kommunikationssystem ist ein System autonomer Teilnehmer, die mithilfe gemeinsamer Kommunikationsregeln über Kommunikationskanäle Informationen austauschen und verarbeiten.*

Diese Definition ist bewusst allgemein formuliert. Sie beschreibt nicht nur Computernetzwerke, sondern ebenso Kommunikationssysteme zwischen Menschen, technischen Anlagen, Sensoren oder autonomen Robotern. Dadurch werden die folgenden Betrachtungen unabhängig von konkreten Technologien. Aus systemtheoretischer Sicht besteht jedes Kommunikationssystem aus mehreren grundlegenden Komponenten:

- Teilnehmer,
- Kommunikationskanäle,
- Nachrichten,
- Kommunikationsregeln,
- Zuständen sowie
- den Beziehungen zwischen diesen Komponenten.

Erst das Zusammenwirken dieser Bestandteile ermöglicht einen geordneten Informationsaustausch. Entfernt man eine dieser Komponenten, kann die Kommunikation eingeschränkt oder sogar vollständig unmöglich werden. Zur formalen Beschreibung betrachten wir ein Kommunikationssystem als Tupel $K = (T, C, R)$, wobei T die Menge der Teilnehmer, C die Menge der Kommunikationskanäle und R die Menge der Kommunikationsregeln bezeichnet. Dieses Modell beschreibt zunächst ausschließlich die Struktur eines Kommunikationssystems. Es trifft noch keine Aussage darüber, welche Information übertragen wird oder mit welchen Algorithmen die Kommunikation erfolgt. Aus algorithmischer Sicht kann Kommunikation als Folge lokaler Operationen der beteiligten Teilnehmer verstanden werden. Jeder Teilnehmer führt dabei einen Kommunikationsalgorithmus aus, der vereinfacht aus vier grundlegenden Schritten besteht:

Empfangen $\rightarrow$ Verarbeiten $\rightarrow$ Entscheiden $\rightarrow$ Senden

Ein Kommunikationssystem entsteht somit nicht durch einzelne Nachrichten, sondern durch das koordinierte Zusammenwirken vieler gleichzeitig ablaufender Kommunikationsprozesse. Jeder Teilnehmer besitzt dabei ausschließlich lokales Wissen und trifft seine Entscheidungen auf Grundlage der ihm aktuell verfügbaren Informationen. Diese Eigenschaft besitzt weitreichende Konsequenzen. Kein Teilnehmer muss das Gesamtsystem vollständig kennen. Dennoch kann durch das Zusammenwirken vieler lokaler Entscheidungen ein global funktionierendes Kommunikationssystem entstehen. Dieses Prinzip begegnet uns später erneut bei Routingalgorithmen, verteilten Systemen, Lastverteilung und Selbstorganisation. Die Betrachtung als Kommunikationssystem verdeutlicht außerdem, dass Kommunikation nicht allein in der Übertragung einzelner Nachrichten besteht. Ebenso wichtig sind die Organisation der Teilnehmer, die Struktur

ihrer Verbindungen sowie die Regeln, nach denen Informationen verarbeitet und weitergeleitet werden. Kommunikation ist daher stets sowohl ein Informationsprozess als auch ein Systemprozess. Im weiteren Verlauf dieses Buches werden Kommunikationssysteme aus verschiedenen wissenschaftlichen Perspektiven untersucht. Die systemtheoretische Perspektive beschreibt ihre Struktur und ihre Komponenten. Die algorithmische Perspektive untersucht die Verfahren zur Lösung von Kommunikationsproblemen. Die mathematische Perspektive liefert die formalen Modelle zur Analyse ihrer Eigenschaften. Erst das Zusammenspiel dieser Perspektiven ermöglicht ein umfassendes Verständnis moderner Computernetzwerke.

3.2 Informationssysteme

Im vorhergehenden Abschnitt wurde ein Kommunikationssystem als System beschrieben, das den Austausch von Information zwischen autonomen Teilnehmern ermöglicht. Kommunikation allein genügt jedoch nicht, um die Aufgabe moderner Computersysteme vollständig zu beschreiben. Informationen werden nicht nur übertragen, sondern auch erzeugt, gespeichert, verarbeitet, interpretiert und genutzt. Damit erweitert sich der Blickwinkel von der Kommunikation auf die Informationsverarbeitung. Diese umfassendere Sicht führt zum Begriff des Informationssystems. Um Informationssysteme wissenschaftlich untersuchen zu können, benötigen wir zunächst eine präzise Definition.

Definition 13 (Informationssystem). *Ein Informationssystem ist ein System, das Informationen erzeugt, repräsentiert, speichert, verarbeitet, überträgt und bereitstellt, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen.*

Diese Definition ist bewusst allgemein gehalten. Sie umfasst sowohl einzelne Computersysteme als auch Datenbanken, Computernetzwerke, Cloud-Plattformen oder verteilte Informationssysteme. Kommunikation bildet dabei lediglich einen Teil der gesamten Informationsverarbeitung. Aus informationsorientierter Sicht durchläuft Information während ihres Lebenszyklus mehrere Verarbeitungsschritte:

Erzeugen → Darstellen
→ Speichern
→ Verarbeiten
→ Übertragen
→ Nutzen

Nicht jedes Informationssystem benötigt alle diese Schritte in gleichem Umfang. Ein Sensor erzeugt beispielsweise neue Informationen, während eine Datenbank hauptsächlich Informationen speichert und verwaltet. Ein Computernetzwerk besitzt dagegen seine zentrale Aufgabe in der zuverlässigen Übertragung von Informationen zwischen verteilten Teilnehmern. Informationssysteme lassen sich daher als Zusammenspiel mehrerer Teilsysteme auffassen. Vereinfacht besteht ein Informationssystem aus

- Informationsquellen,
- Verarbeitungssystemen,
- Speichersystemen,
- Kommunikationssystemen sowie
- Informationsssenken.

Diese Komponenten bilden gemeinsam einen geschlossenen Informationskreislauf. Informationen entstehen, werden verarbeitet, gegebenenfalls gespeichert, an andere Systeme übertragen und schließlich zur Erfüllung einer Aufgabe genutzt. Zur formalen Beschreibung modellieren wir ein Informationssystem als Tupel $I = (Q, V, S, K, N)$, wobei

- Q die Menge der Informationsquellen,
- V die Menge der Verarbeitungseinheiten,
- S die Menge der Speichersysteme,
- K die Menge der Kommunikationssysteme und