

---

# Algorithmische Mathematik

---

Stefan Hougardy · Jens Vygen

# Algorithmische Mathematik

2., korrigierte und erweiterte Auflage

 Springer Spektrum

Stefan Hougardy  
Forschungsinstitut für Diskrete  
Mathematik, Universität Bonn  
Bonn, Deutschland

Jens Vygen  
Forschungsinstitut für Diskrete  
Mathematik, Universität Bonn  
Bonn, Deutschland

ISBN 978-3-662-57460-7      ISBN 978-3-662-57461-4 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57461-4>

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2016, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Annika Denkert

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Seit es Computer gibt, nimmt die Bedeutung von Algorithmen in fast allen Bereichen der Mathematik ständig zu. An der Universität Bonn wurde daher neben Analysis und Linearer Algebra eine dritte Grundvorlesung für das erste Semester konzipiert: die Algorithmische Mathematik. Dieses Buch gibt genau die Inhalte dieser Vorlesung wieder, die die Autoren mehrfach gehalten haben, und die etwa 30 mal 90 Minuten (zuzüglich Übungen) umfasst. Wir setzen nirgends mehr als Schulwissen voraus; dennoch ist das Buch für Leser ohne mathematische Vorbildung anspruchsvoll.

Im Gegensatz zu den meisten anderen einführenden Büchern über Algorithmen, die vielleicht eher auf Informatikstudenten abzielen, legen wir von Anfang an viel Wert auf eine rigorose mathematische Vorgehensweise. Exakte Definitionen, präzise Sätze und genau ausgearbeitete elegante Beweise sind gerade am Anfang eines Mathematikstudiums unentbehrlich. Das Buch beinhaltet aber auch viele Beispiele, Erläuterungen und Hinweise auf weiterführende Themen.

Bei der Auswahl der Themen haben wir darauf geachtet, ein möglichst breites Spektrum von Algorithmen und algorithmischen Fragestellungen zu zeigen, soweit dies ohne tiefere mathematische Kenntnisse möglich ist. Wir behandeln Grundlagen (Kap. 1–3), numerische Fragen (Kap. 4–5), Graphen (Kap. 6–7), Sortieralgorithmen (Kap. 8), Kombinatorische Optimierung (Kap. 9 und 10) sowie die Gauß-Elimination (Kap. 11). Dabei sind die verschiedenen Themen oft miteinander verzahnt; die Reihenfolge kann daher nicht ohne Weiteres verändert werden. Neben klassischen Algorithmen und deren Analyse wird der Leser wichtige theoretische Grundlagen, viele Querverbindungen und sogar auch Hinweise auf offene Forschungsfragen entdecken.

Algorithmen wirklich zu verstehen und mit ihnen zu arbeiten ist kaum möglich, ohne sie auch implementieren zu können. Parallel zu den mathematischen Themen führen wir daher in diesem Buch in die Programmiersprache C++ ein. Wir bemühen uns dabei, die technischen Details auf das Notwendige zu beschränken – dies ist kein Programmierkurs! – und dennoch das Buch auch für Studienanfänger ohne Programmiererfahrung zugänglich zu machen.

Die von uns sorgfältig konzipierten Programmbeispiele sollen einerseits die wichtigsten Elemente der Sprache C++ lehren und darüber hinaus zum Selbststudium anregen.

Andererseits sind sie aber auch stets so gewählt, dass sie thematisch den jeweiligen Stoff ergänzen. Natürlich kann man nicht wirklich programmieren lernen, ohne es selbst zu tun, ebenso wenig wie man Mathematik lernen kann, ohne selbst Aufgaben und Probleme zu lösen. Dazu möchten wir alle Studienanfänger von Beginn an mit Nachdruck ermuntern.

Wir wünschen allen Lesern viel Freude an der Algorithmischen Mathematik!

Bonn  
März 2015

Stefan Hougardy  
Jens Vygen

---

## Vorwort zur 2. Auflage

Neben viel positiver Resonanz, die wir zur ersten Auflage unseres Buches erhalten haben, gab es mehrfach den Wunsch, dass eine Neuauflage Übungsaufgaben enthalte. Diesem Wunsch sind wir nun nachgekommen und haben an das Ende eines jeden Kapitels einen Abschnitt mit Übungsaufgaben hinzugefügt. Ansonsten ist die zweite Auflage inhaltlich identisch mit der ersten Auflage; wir haben lediglich einige kleinere Fehler behoben.

Hinweise auf noch verbliebene Fehler nehmen wir gerne entgegen.

Bonn  
März 2018

Stefan Hougardy  
Jens Vygen

---

### Anmerkungen zu den C++-Programmen

Dieses Buch enthält eine Reihe von Programmbeispielen in C++. Der Sourcecode aller dieser Programme kann über die Webseiten der Autoren heruntergeladen werden. Wir benutzen in diesem Buch die in ISO/IEC 14882:2011 [6] spezifizierte C++-Version, die auch unter dem Namen C++11 bekannt ist. Zum Kompilieren der Programmbeispiele eignen sich alle gängigen C++-Compiler, die diese C++-Version unterstützen. Beispielsweise unterstützt der frei verfügbare GNU C++ Compiler g++ ab der Version 4.8.1 alle in diesem Buch benutzten Sprachelemente von C++11. Gute Lehrbücher zu C++11 sind z. B. [5, 26, 33]. Ausführliche Informationen zu C++11 findet man auch im Internet, z. B. unter <http://de.cppreference.com> oder <http://www.cplusplus.com>.

---

## Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen bedanken, die uns im Laufe der Jahre Anregungen und Verbesserungsvorschläge zu diesem Buch gegeben haben. Neben den Studierenden aus unseren Vorlesungen möchten wir uns hier insbesondere bei Christoph Bartoschek, Ulrich Brenner, Helmut Harbrecht, Stephan Held, Dirk Müller, Philipp Ochsendorf, Jan Schneider und Jannik Silvanus bedanken.

Für Hinweise auf verbleibende Fehler und weitere Verbesserungsvorschläge sind wir natürlich jederzeit dankbar.

Stefan Hougardy  
Jens Vygen

---

## Symbolverzeichnis

$\mid$	mit der Eigenschaft, dass
$\exists$	es gibt (mindestens) ein
$\forall$	für alle
$\emptyset$	leere Menge
$\subseteq$	Teilmenge
$\subset$	echte Teilmenge
$\cup$	Vereinigung von Mengen
$\cap$	Schnitt von Mengen
$\dot{\cup}$	disjunkte Vereinigung von Mengen
$\Delta$	symmetrische Differenz
$\times$	kartesisches Produkt
$\wedge$	logisches und
$\vee$	logisches oder
$[\cdot]$	obere Gaußklammer
$[\cdot]$	untere Gaußklammer
$\approx$	ungefähr gleich
$\leftarrow$	Zuweisung im Pseudocode
$T$	Transposition



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	1
1.1	Algorithmen . . . . .	1
1.2	Berechnungsprobleme . . . . .	2
1.3	Algorithmen, Pseudocode und C++ . . . . .	4
1.4	Einfacher Primzahltest . . . . .	7
1.5	Sieb des Eratosthenes . . . . .	13
1.6	Nicht alles ist berechenbar . . . . .	17
1.7	Übungsaufgaben . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Darstellungen ganzer Zahlen</b> . . . . .	25
2.1	<i>b</i> -adische Darstellung natürlicher Zahlen . . . . .	25
2.2	Exkurs: Aufbau des Hauptspeichers . . . . .	29
2.3	<i>b</i> -Komplementdarstellung ganzer Zahlen . . . . .	31
2.4	Rationale Zahlen . . . . .	34
2.5	Beliebig große ganze Zahlen . . . . .	39
2.6	Übungsaufgaben . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Rechnen mit ganzen Zahlen</b> . . . . .	45
3.1	Addition und Subtraktion . . . . .	45
3.2	Multiplikation . . . . .	46
3.3	Euklidischer Algorithmus . . . . .	48
3.4	Übungsaufgaben . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Approximative Darstellungen reeller Zahlen</b> . . . . .	53
4.1	<i>b</i> -adische Darstellung reeller Zahlen . . . . .	53
4.2	Maschinenzahlen . . . . .	55
4.3	Rundung . . . . .	57
4.4	Maschinenzahlenarithmetik . . . . .	59
4.5	Übungsaufgaben . . . . .	60

<b>5</b>	<b>Rechnen mit Fehlern</b> . . . . .	63
5.1	Binäre Suche . . . . .	64
5.2	Fehlerfortpflanzung . . . . .	66
5.3	Kondition . . . . .	67
5.4	Fehleranalyse . . . . .	69
5.5	Newton-Verfahren . . . . .	70
5.6	Übungsaufgaben. . . . .	72
<b>6</b>	<b>Graphen</b> . . . . .	75
6.1	Grundlegende Definitionen . . . . .	75
6.2	Wege und Kreise . . . . .	77
6.3	Zusammenhang und Bäume. . . . .	79
6.4	Starker Zusammenhang und Arboreszenzen . . . . .	81
6.5	Exkurs: Elementare Datenstrukturen . . . . .	83
6.6	Darstellungen von Graphen . . . . .	87
6.7	Übungsaufgaben. . . . .	93
<b>7</b>	<b>Einfache Graphenalgorithmen</b> . . . . .	95
7.1	Graphendurchmusterung . . . . .	95
7.2	Breitensuche. . . . .	97
7.3	Bipartite Graphen. . . . .	99
7.4	Azyklische Digraphen . . . . .	100
7.5	Übungsaufgaben. . . . .	101
<b>8</b>	<b>Sortieralgorithmen</b> . . . . .	103
8.1	Das allgemeine Sortierproblem . . . . .	103
8.2	Sortieren durch sukzessive Auswahl . . . . .	104
8.3	Sortieren nach Schlüsseln . . . . .	110
8.4	Mergesort . . . . .	111
8.5	Quicksort . . . . .	112
8.6	Binäre Heaps und Heapsort . . . . .	115
8.7	Weitere Datenstrukturen . . . . .	120
8.8	Übungsaufgaben. . . . .	121
<b>9</b>	<b>Optimale Bäume und Wege</b> . . . . .	123
9.1	Optimale aufspannende Bäume . . . . .	123
9.2	Implementierung von Prim's Algorithmus . . . . .	127
9.3	Kürzeste Wege: Dijkstra's Algorithmus . . . . .	130
9.4	Konservative Kantengewichte . . . . .	133
9.5	Kürzeste Wege mit beliebigen Kantengewichten. . . . .	135
9.6	Übungsaufgaben. . . . .	137

---

<b>10 Matching und Netzwerkflüsse</b> .....	139
10.1 Das Matching-Problem .....	139
10.2 Bipartites Matching .....	140
10.3 Max-Flow-Min-Cut-Theorem .....	142
10.4 Algorithmen für maximale Flüsse .....	145
10.5 Übungsaufgaben .....	147
<b>11 Gauß-Elimination</b> .....	149
11.1 Die Operationen der Gauß-Elimination .....	151
11.2 LU-Zerlegung .....	154
11.3 Gauß-Elimination mit rationalen Zahlen .....	157
11.4 Gauß-Elimination mit Maschinenzahlen .....	160
11.5 Matrixnormen .....	163
11.6 Kondition linearer Gleichungssysteme .....	165
11.7 Übungsaufgaben .....	169
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	171
<b>Sachverzeichnis</b> .....	173