

Leitfäden der Informatik

Sander/Stucky/Herschel

Automaten – Sprachen – Berechenbarkeit

Leitfäden der Informatik

Herausgegeben von

Prof. Dr. Hans-Jürgen Appelrath, Oldenburg

Prof. Dr. Volker Claus, Stuttgart

Prof. Dr. Günter Hotz, Saarbrücken

Prof. Dr. Lutz Richter, Zürich

Prof. Dr. Wolffried Stucky, Karlsruhe

Prof. Dr. Klaus Waldschmidt, Frankfurt

Die Leitfäden der Informatik behandeln

- Themen aus der Theoretischen, Praktischen und Technischen Informatik entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft in einer systematischen und fundierten Darstellung des jeweiligen Gebietes.
- Methoden und Ergebnisse der Informatik, aufgearbeitet und dargestellt aus Sicht der Anwendungen in einer für Anwender verständlichen, exakten und präzisen Form.

Die Bände der Reihe wenden sich zum einen als Grundlage und Ergänzung zu Vorlesungen der Informatik an Studierende und Lehrende in Informatik-Studiengängen an Hochschulen, zum anderen an „Praktiker“, die sich einen Überblick über die Anwendungen der Informatik(-Methoden) verschaffen wollen; sie dienen aber auch in Wirtschaft, Industrie und Verwaltung tätigen Informatikern und Informatikerinnen zur Fortbildung in praxisrelevanten Fragestellungen ihres Faches.

W. Stucky (Hrsg.)

Grundkurs Angewandte Informatik IV

Automaten Sprachen Berechenbarkeit

Von Dr. rer. pol. Peter Sander, Frankfurt/Main
Prof. Dr. rer. nat. Wolffried Stucky
Universität Karlsruhe
und Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Herschel
Fachhochschule Ulm

2., durchgesehene Auflage



B. G. Teubner Stuttgart 1995

Dr. rer. pol. Peter Sander

1962 geboren in Uelzen. 1982 bis 1988 Studium der Mathematik (Nebenfach Informatik) an der Technischen Universität Clausthal. 1988 Diplom in Mathematik. Von 1988 bis 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH). 1992 Promotion bei W. Stucky mit einer Arbeit im Gebiet „Deduktive Datenbanken“. Seit 1993 als Unternehmensberater tätig.

Prof. Dr. rer. nat. Wolffried Stucky

1939 geboren in Bad Kreuznach. 1959 bis 1965 Studium der Mathematik an der Universität des Saarlandes. 1965 Diplom in Mathematik. 1965 bis 1970 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent am Institut für Angewandte Mathematik der Universität des Saarlandes. 1970 Promotion bei G. Hotz. 1970 bis 1975 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der pharmazeutischen Industrie. 1971 bis 1975 Inhaber des Stiftungslehrstuhls für Organisationstheorie und Datenverarbeitung (Mittlere Datentechnik) der Universität Karlsruhe. Seit 1976 ordentlicher Professor für Angewandte Informatik an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH).

Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Herschel

1925 geboren in Görlitz/Schlesien. 1951 Diplom in Mathematik an der Universität Würzburg. 1959 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Technischen Universität München. 1956 bis 1962 Mitarbeiter am Forschungsinstitut der AEG Telefunken in Ulm. 1962 bis 1987 Professor für Informatik an der Fachhochschule Ulm. Seit 1987 im Ruhestand.

ISBN-13: 978-3-519-12937-0

e-ISBN-13: 978-3-322-84873-4

DOI: 10.1007/978-3-322-84873-4

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Grundkurs angewandte Informatik / W. Stucky (Hrsg.). – Stuttgart : Teubner.

(Leitfäden der Informatik)

NE: Stucky, Wolffried [Hrsg.]

4. Sander, Peter: Automaten, Sprachen, Berechenbarkeit. – 2., durchges. Aufl. – 1995

Sander, Peter:

Automaten, Sprachen, Berechenbarkeit / von Peter Sander, Wolffried Stucky

und Rudolf Herschel. – 2., durchges. Aufl. – Stuttgart : Teubner, 1995

(Grundkurs angewandte Informatik ; 4)

(Leitfäden der Informatik)

NE: Stucky, Wolffried.; Herschel, Rudolf:

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1995

Gesamtherstellung: Zechnersche Buchdruckerei GmbH, Speyer

Einband: Peter Pfitz, Stuttgart

Vorwort zum gesamten Werk

Ziel dieses vierbändigen *Grundkurses Angewandte Informatik* ist die Vermittlung eines umfassenden und fundierten Grundwissens der Informatik. Bei der Abfassung der Bände wurde besonderer Wert auf eine verständliche und anwendungsorientierte, aber dennoch präzise Darstellung gelegt; die präsentierten Methoden und Verfahren werden durch konkrete Problemstellungen motiviert und anhand zahlreicher Beispiele veranschaulicht. Das Werk richtet sich somit sowohl an Studierende aller Fachrichtungen als auch an Praktiker, die an den methodischen Grundlagen der Informatik interessiert sind. Nach dem Durcharbeiten der vier Bände soll der Leser in der Lage sein, auch weiterführende Bücher über spezielle Teilgebiete der Informatik und ihrer Anwendungen ohne Schwierigkeiten lesen zu können und insbesondere Hintergründe besser zu verstehen.

Zum Inhalt des *Grundkurses Angewandte Informatik*: Im ersten Band *Programmieren mit Modula-2* wird der Leser gezielt an die Entwicklung von Programmen mit der Programmiersprache Modula-2 herangeführt; neben dem „Wirthschen“ Standard wird dabei auch der zur Normung vorliegende neue Standard von Modula-2 (gemäß dem ISO-Working-Draft von 1990) behandelt. Im zweiten Band *Problem – Algorithmus – Programm* werden – ausgehend von konkreten Problemstellungen – die allgemeinen Konzepte und Prinzipien zur Entwicklung von Algorithmen vorgestellt; neben der Spezifikation von Problemen wird dabei insbesondere auf Eigenschaften und auf die Darstellung von Algorithmen eingegangen. Der dritte Band *Der Rechner als System – Organisation, Daten, Programme* beschreibt den Aufbau von Rechnern, die systemnahe Programmierung und die Verarbeitung von Programmen auf den verschiedenen Sprachebenen; ferner wird die Verwaltung und Darstellung von Daten im Rechner behandelt. Der vierte Band *Automaten – Sprachen – Berechenbarkeit* schließlich beinhaltet die grundlegenden Konzepte der Automaten und formalen Sprachen; daneben werden innerhalb der Berechenbarkeitstheorie die prinzipiellen Möglichkeiten und Grenzen der Informationsverarbeitung aufgezeigt.

Der *Grundkurs Angewandte Informatik* basiert auf einem viersemestrigen Vorlesungszyklus, der seit vielen Jahren – unter ständiger Anpassung an neue Entwicklungen und Konzepte – an der Universität Karlsruhe als Informatik-Grundausbildung für Wirtschaftsingenieure und Wirtschaftsmathematiker gehalten wird. Insoweit haben auch ehemalige Kollegen in Karlsruhe, die an der Durchführung dieser Lehrveranstaltungen ebenfalls beteiligt waren, zu der

inhaltlichen Ausgestaltung dieses Werkes beigetragen, auch wenn sie jetzt nicht als Koautoren erscheinen. Insbesondere möchte ich hier Hans Kleine Büning (jetzt Universität Duisburg), Thomas Ottmann und Peter Widmayer (beide jetzt Universität Freiburg) erwähnen. Für positive Anregungen sei allen dreien an dieser Stelle herzlich gedankt. Kritik an dem Werk sollte sich aber lediglich an die jeweiligen Autoren alleine richten.

In der Grundausbildung Informatik verfolgen wir zuallererst das Ziel, die Studenten mit einem Rechner vertraut zu machen. Dies soll so geschehen, daß die Studenten – etwa unter Anleitung durch Band I dieses Grundkurses – mit einer höheren Programmiersprache an den Rechner herangeführt werden, in der die wesentlichen Konzepte der modernen Informatik realisiert sind. Diese Konzepte sowie die allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung von Programmen sollen dabei exemplarisch durch "gutes Vorbild" geübt werden; die Konzepte selbst werden dann in den nachfolgenden Bänden jeweils ausführlich erläutert.

Karlsruhe, im September 1991

Wolffried Stucky (für die Autoren des Gesamtwerkes)

Vorwort zu Band IV

Dieser vierte Band des *Grundkurses Angewandte Informatik* führt den Leser in die Gebiete der Automaten, formalen Sprachen und Algorithmen ein. Sie gehören zum theoretischen Kern der Informatik und stellen eine wichtige Grundlage für das Verständnis vieler "anwendungsorientierter" Disziplinen dar. So spielt die Theorie der Automaten und formalen Sprachen in der Informatik eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Sprachen, z. B. von Programmiersprachen und Datenbanksprachen, sowie von entsprechenden Übersetzer- und Interpreterprogrammen. Die Theorie der Automaten und der Algorithmen gibt einen Einblick in die prinzipielle Leistungsfähigkeit von Rechnern und in die Grenzen der Problemlösung mit Algorithmen.

Das vorliegende Buch ist so angelegt, daß der Studierende einen breiten Überblick über die genannten Gebiete erhält. Es wurde auf eine anschauliche und dennoch präzise Darstellung Wert gelegt. Zahlreiche Beispiele und Aufgaben am Schluß der Kapitel sollen die Inhalte veranschaulichen und festigen. Um bei der Lektüre des Buches nicht vom Wesentlichen abzulenken, wurde auf die Darstellung einiger sehr technischer oder sehr langwieriger Beweise verzichtet.

Der Leser wird über den Begriff des endlichen Automaten und des Kellerautomaten in ausführlicher Weise in die Thematik eingeführt. Anschließend werden die wichtigsten Sprachklassen und ihre Beziehungen zu den einzelnen Automatentypen diskutiert. Im letzten Kapitel werden Turing-Maschinen und grundlegende Begriffe wie "Algorithmus", "Berechenbarkeit" und "Entscheidbarkeit" untersucht. Auswahl und Gliederung des Stoffes orientiert sich in Teilen an dem 1974 im Oldenbourg Verlag erschienenen Buch von R. Herschel *Einführung in die Theorie der Automaten, Sprachen und Algorithmen*. Wir danken dem Oldenbourg Verlag für die Zustimmung, Teile dieses Werkes in überarbeiteter Fassung in diesem Buch verwenden zu dürfen.

Für das sorgfältige Erstellen der Druckvorlagen und viele konstruktive Anregungen bedanken sich die Autoren bei Andrea Geisel und Ulrich Klein. Wir danken auch Hartmut Schmeck für Diskussionen und Anregungen.

Karlsruhe, im März 1992

Peter Sander

Wolffried Stucky

Rudolf Herschel

Vorwort zur zweiten Auflage

Die positive Resonanz von Lehrenden und Studenten nach dem Erscheinen des Buches hat uns darin bestärkt, den Inhalt weitgehend unverändert zu lassen. Für die zweite Auflage wurden lediglich einige Fehler und Ungenauigkeiten im Text eliminiert. Die Autoren bedanken sich bei Kollegen und Studenten, die uns auf notwendige Verbesserungen aufmerksam gemacht haben. Ein besonderer Dank gilt den Herren Hartmut Schmeck, Universität Karlsruhe, und Hermann Walter, TH Darmstadt, für besonders wertvolle Hinweise.

Karlsruhe, im November 1994

Peter Sander

Wolffried Stucky

Rudolf Herschel

Inhaltsverzeichnis

1	Mathematische Grundlagen.....	11
1.1	Mengen und Relationen.....	11
1.2	Funktionen und Verknüpfungen.....	18
1.3	Halbgruppen und Monoide.....	20
2	Automaten.....	26
2.1	Endliche Automaten.....	26
2.1.1	Beispiele für endliche Automaten.....	26
2.1.2	Endliche Automaten ohne Ausgabe.....	33
2.1.3	Endliche Automaten mit Ausgabe.....	49
2.1.4	Äquivalenz und Minimierung endlicher Automaten.....	58
2.1.5	Nichtdeterministische endliche Automaten.....	73
2.2	Kellerautomaten.....	84
3	Formale Sprachen.....	98
3.1	Klassifizierung und Übersicht.....	98
3.2	Reguläre Sprachen.....	102
3.3	Semi-Thue-Systeme und Chomsky-Grammatiken.....	119
3.3.1	Semi-Thue-Systeme.....	119
3.3.2	Die Chomsky-Hierarchie.....	121
3.3.3	Typ-3-Sprachen (reguläre Sprachen).....	126
3.3.4	Typ-2-Sprachen (kontextfreie Sprachen).....	135
3.3.5	Typ-1-Sprachen (kontextsensitive Sprachen).....	161
3.3.6	Typ-0-Sprachen (allgemeine Sprachen).....	167
4	Turing-Maschinen, Algorithmen und berechenbare Funktionen.....	172
4.1	Algorithmen, Berechenbarkeit und Entscheidbarkeit im intuitiven Sinne.....	173
4.2	Turing-Maschinen.....	184
4.2.1	Das Maschinenmodell.....	185
4.2.2	Turing-Maschinen als Akzeptoren.....	191
4.2.3	Turing-Berechenbarkeit und -Entscheidbarkeit.....	198
4.2.4	Die Simulation von Turing-Maschinen und das Halteproblem.....	206
4.2.5	Turing-Maschinen mit linearer Bandbeschränkung.....	215

4.3	Berechenbare Funktionen	218
4.3.1	Primitiv rekursive Funktionen.....	221
4.3.2	μ -rekursive Funktionen	229
4.4	Sprachklassen und Automaten im Überblick	236
4.4.1	Entscheidbare Sprachen	236
4.4.2	Überblick.....	242
	Lösungen.....	245
	Literaturverzeichnis.....	261
	Index.....	263