

uwe KASTENS
hans KLEINE BÜNING



4., erweiterte Auflage

Modellierung

GRUNDLAGEN UND
FORMALE METHODEN

HANSER



Im Internet: umfassendes Vorlesungs-
und Übungsmaterial

Bleiben Sie auf dem Laufenden!



Unser **Computerbuch-Newsletter** informiert Sie monatlich über neue Bücher und Termine. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter



www.hanser-fachbuch.de/newsletter



Hanser Update ist der IT-Blog des Hanser Verlags mit Beiträgen und Praxistipps von unseren Autoren rund um die Themen Online Marketing, Webentwicklung, Programmierung, Softwareentwicklung sowie IT- und Projektmanagement. Lesen Sie mit und abonnieren Sie unsere News unter



www.hanser-fachbuch.de/update



Uwe Kastens

Hans Kleine Büning

Modellierung

Grundlagen und formale Methoden

4., erweiterte Auflage

HANSER

Prof. Dr. Uwe Kastens, UKastens@t-online.de
Prof. Dr. Hans Kleine Büning, hkb48@gmx.de

Universität Paderborn
Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
Institut für Informatik



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine juristische Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso übernehmen Autoren und Verlag keine Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt deshalb 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.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN: 978-3-446-45464-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-45539-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2018 Carl Hanser Verlag München
Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Mirja Werner
Herstellung: Franziska Kaufmann
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Coverrealisierung: Stephan Rönigk
Datenbelichtung, Druck und Bindung: Hubert & Co., Göttingen
Printed in Germany

Vorwort

Das Modellieren ist eine für das Fach Informatik typische Arbeitsmethode, die in allen Gebieten des Faches angewandt wird. Aufgaben, Probleme oder Strukturen werden untersucht und als Ganzes oder in Teilaspekten beschrieben, bevor sie durch den Entwurf von Software-Algorithmen, Daten oder Hardware gelöst bzw. implementiert werden. Mit der Modellierung einer Aufgabe zeigt man, ob und wie sie verstanden wurde. Das Modell ist Voraussetzung und Maßstab für die Lösungen und liefert meist auch den Schlüssel für einen systematischen Entwurf. Als Ausdrucksmittel für die Modellierung steht ein breites Spektrum von Kalkülen und Notationen zur Verfügung. Sie sind spezifisch für unterschiedliche Arten von Aufgaben und Problemen. Deshalb werden in den verschiedenen Gebieten der Informatik unterschiedliche Modellierungsmethoden eingesetzt. In den entwurfsorientierten Gebieten, wie Software-Technik und Hardware-Entwurf, ist die Bedeutung der Modellierung und die Vielfalt der Methoden besonders stark ausgeprägt.

Mit diesem Buch soll eine Übersicht über die wichtigsten Kalküle der Informatik und ein grundlegendes Verständnis für jeden der vorgestellten Kalküle vermittelt werden. Die Leser sollen an vielen praktischen Beispielen lernen, die Kalküle zur Modellierung anzuwenden, und dabei Erfahrungen im formalen Beschreiben erwerben. Sie sollen den Nutzen von klaren und präzisen Beschreibungen erkennen. Das angebotene Spektrum von Kalkülen ist als Grundausstattung zu verstehen, die noch wesentlich vertieft und verbreitert werden kann. Deshalb wird hier von jedem Kalkül nur der innere methodische Kern präsentiert und auf die Vorstellung von Erweiterungen und weniger grundlegenden Kalkülen verzichtet.

Das vorliegende Buch ist als Lehrbuch zur Vorlesung *Modellierung* entstanden, mit der die oben genannten Ziele verfolgt werden. Die Vorlesung wird an der Universität Paderborn als eine einsemestrige, vierstündige Pflichtveranstaltung für Studierende der Informatik und der Wirtschaftsinformatik angeboten. Zur Vorlesung gehören praktische Übungen in Form betreuter Kleingruppenarbeit, selbstständiger Hausarbeiten und zentraler Präsentation von Lösungen. Die Übungsaufgaben dieses Buches stammen im Wesentlichen aus diesem Übungsmaterial.

Die beiden Autoren dieses Buches haben die Vorlesung in Abstimmung mit ihren Kollegen inhaltlich konzipiert und seit 1998 im zweijährigen Wechsel gehalten. Wegen ihres unterschiedlichen fachlichen Hintergrundes setzen sie auch verschiedene Schwerpunkte bei der Vermittlung von Modellierungsaspekten: Uwe Kastens arbeitet im Gebiet Programmiersprachen und Übersetzer und ist stark in Themen der Software-Technik verwurzelt. Bei der Modellierung betont er die Anwendung der Kalküle, den Nutzen formaler Beschreibungen und die Trennung von Aufgaben und Lösungen. Hans Kleine Büning ar-

beitet im Gebiet Logik und Wissensbasierte Systeme. Er betont stärker die theoretischen Grundlagen der Kalküle und setzt Schwerpunkte in den Logik-Kalkülen. Die Autoren haben in enger Kooperation versucht, die unterschiedlichen Schwerpunkte und Herangehensweisen einander ergänzend in das Buch und die Vorlesung einzubringen. An diesen Diskussionen hat sich auch der Kollege Hauenschild nachhaltig beteiligt, der im Jahr 2004 die Vorlesung übernommen hat.

Nach der Einführung werden in den Kapiteln 2 bis 7 die Kalküle vorgestellt. Wir haben die Reihenfolge so gewählt, dass Vorgriffe möglichst vermieden werden können. Zu jedem Kalkül werden zunächst die Grundbegriffe eingeführt und dann typische Modellierungstechniken an möglichst anschaulichen Beispielen gezeigt. Jedes Kapitel schließt mit einer Sammlung von Übungsaufgaben. Als durchgängige Aufgabe wird die Modellierung von Aspekten eines Getränkeautomaten in Übungen eines jeden Kapitels aufgegriffen. In Kapitel 8 werden an zwei Fallstudien alle Kalküle im Zusammenhang gezeigt. Einige bibliografische Hinweise finden sich am Ende des Buches.

Im Kapitel 1 wird der Modellbegriff eingeführt, so wie er im Alltag und in der Informatik verwendet wird. Die Tätigkeit des Modellierens wird charakterisiert und ihre Notwendigkeit begründet. Am Schluss zeigen wir eine einfache formale Modellierung im Vorgriff auf später vorgestellte Kalküle.

Das Kapitel 2 führt Mengen als Modellierungskalkül ein: Einfache und zusammengesetzte Mengen definieren die Wertebereiche von Objekten und Eigenschaften des Modells. Abstrakte Konzepte wie kartesisches Produkt, Potenzmenge, Vereinigung, Folgen, Relationen und Funktionen werden zur Strukturierung der Wertemengen eingesetzt. Diese Begriffe sind Grundlagen für jede Art formaler Beschreibung.

Fast alle formalen Kalküle definieren eine Notation für Formeln, in denen Operanden mit Operationen verknüpft werden. Im Kapitel 3 werden deshalb Terme als abstrakte Grundlage von Formeln eingesetzt, die erst im Anwendungskontext spezielle Bedeutung bekommen. Notationen sowie allgemein gültige Begriffe wie Substitution, Umformung nach Regeln und Unifikation werden hier universell für Terme definiert. Im zweiten Teil des Kapitels werden diese Begriffe zu abstrakten und konkreten Algebren ausgebaut. Damit können dann Kalküle und Datenstrukturen algebraisch definiert werden. Wegen der universellen Bedeutung von Termen haben wir sie in einem separaten Kapitel definiert – und nicht als Teil der Prädikatenlogik, wo sie einen angestammten Platz haben.

Kapitel 4 führt die beiden klassischen Gebiete der Logik ein: Aussagenlogik und Prädikatenlogik erster Stufe. Wir beschränken uns auf die für Anfänger wichtigsten Grundlagen der Kalküle: Syntax und Semantik, Umgang mit logischen Operatoren und Quantoren und einfache Normalformen sowie Transformationen. Insbesondere Kalküle und Verfahren des automatischen Beweisens überlassen wir einer späteren Vertiefung.

Der Kalkül der Graphen wird in Kapitel 5 behandelt. Er eignet sich besonders gut zum Modellieren. Er ist leicht zu verstehen, da er nur auf Relationen basiert, und er ist anschaulich, da er sehr suggestive Visualisierungen hat. Graphen sind außerordentlich vielfältig einsetzbar, da Objekte und Beziehungen zwischen Objekten in so vielen unterschiedlichen Bedeutungen beim Modellieren vorkommen. Es werden hier nur die grund-

legenden Eigenschaften von Graphen vorgestellt. Auf weiterführende Begriffe der Graphentheorie wird verzichtet und stattdessen die Vielfalt der Einsatzgebiete und Modellierungstechniken ausbreitet.

In Kapitel 6 führen wir zwei grundlegende Kalküle ein, die sich besonders zur Modellierung struktureller Eigenschaften eignen. Kontextfreie Grammatiken werden als Regelsystem vorgestellt, mit dem Baumstrukturen definiert werden können, um damit geschachtelte Strukturen zu modellieren. Die Definition von Sprachen als Menge von Symbolfolgen, die sonst im Vordergrund steht, spielt hier nur eine Nebenrolle. Im zweiten Teil wird das Entity-Relation-Ship-Modell eingeführt. Damit formuliert man Regeln, nach denen Systeme in Mengen gleichartiger Objekte mit bestimmten Eigenschaften gegliedert sind und zwischen denen Relationen bestehen. Das ER-Modell ist Grundlage sowohl der Schemata objektorientierter Datenbanken als auch der Spezifikation von Strukturen und Beziehungen in Software-Systemen, z. B. mit der Modellierungssprache UML.

In Kapitel 7 führen wir zwei grundlegende Kalküle ein, mit denen Abläufe modelliert werden können: endliche Automaten und Petri-Netze. Sie werden eingesetzt, um das dynamische Verhalten von Systemen zu beschreiben. Man gibt die Zustände an, die das System einnehmen kann, und beschreibt, unter welchen Bedingungen es aus einem Zustand in einen anderen übergehen kann. Beide Kalküle sind mit recht einfachen Regeln definiert und haben sehr anschauliche grafische Repräsentationen. Mit endlichen Automaten werden meist sequentielle, mit Petri-Netzen nebenläufige Prozesse modelliert. Beide dienen als Grundlage komplexer Kalküle (z. B. endliche Automaten für Statecharts), die hier nicht vorgestellt werden.

In Kapitel 8 präsentieren wir die Modellierungen von zwei Aufgaben vollständig im Zusammenhang: Die Auftragsabwicklung in einer Autowerkstatt und Regeln eines Gesellschaftsspiels. Verschiedene Aspekte des Gegenstandsbereiches werden mit jeweils passenden Kalkülen modelliert. Außerdem werden einzelne Aspekte zum Vergleich mit verschiedenen Kalkülen beschrieben. Dabei wird das Vorgehen ausführlich erläutert. Wir zeigen damit, dass es wichtig ist, den Gegenstandsbereich sinnvoll zu zerlegen und für Teilaspekte geeignete Kalküle zu wählen.

Zu diesem Buchprojekt haben die Autoren nachhaltige Unterstützung erfahren: Kollege Hauenschild hat im Jahr 2004 unser Material zur Vorbereitung der Vorlesung übernommen. Er hat uns viele nützliche Hinweise gegeben und zur Behebung einiger Inkonsistenzen beigetragen. Wissenschaftliche Mitarbeiter haben die Übungen zur Vorlesung betreut. Stellvertretend seien hier Dinh Khoi Le, Jochen Kreimer, Theodor Lettmann und Carsten Schmidt genannt. Sie haben sich viele Aufgaben fantasievoll ausgedacht, das Vorlesungsmaterial kritisch hinterfragt und Fehler darin korrigiert. Sigrid Gundelach hat den größten Teil des Manuskriptes geschrieben, spröde Formeln gewissenhaft übertragen und sich engagiert in das manchmal widerspenstige Textsystem eingearbeitet. Michael Thies hat uns geholfen, mit dem System den gewünschten Drucksatz zu produzieren. Sie alle haben zum Gelingen des Buches beigetragen. Wir danken ihnen sehr dafür.

Paderborn, 2005

Uwe Kastens, Hans Kleine Büning

Vorwort zur 4. Auflage

Für die vorliegende vierte Auflage dieses Buches haben wir das Kapitel 8 um eine weitere Fallstudie ergänzt: Darin werden aussagenlogische Formeln als Graphen modelliert und aus diesen Graphen Formeln in konjunktiver Normalform erzeugt. Das Verfahren demonstriert Anwendungen von Kalkülen, die in diesem Buch vorgestellt werden. Darüber hinaus haben wir für diese Auflage einige bibliographische Hinweise aktualisiert und kleinere Verbesserungen vorgenommen.

Paderborn, Herbst 2017

Uwe Kastens, Hans Kleine Büning

Inhalt

1	Einführung	15
1.1	Einführendes Beispiel	15
1.2	Modellbegriff	18
	Übungen	23
2	Modellierung mit Wertebereichen	25
2.1	Mengen	27
2.2	Potenzmengen	29
2.3	Kartesische Produkte	30
2.4	Vereinigung	32
2.5	Folgen	33
2.6	Relationen	34
2.7	Funktionen	38
2.8	Beispiel im Zusammenhang	42
2.9	Fallstudie: Getränkeautomat	44
	2.9.1 Produkte und Vorrat	45
	2.9.2 Kassieren	46
	2.9.3 Bedienung und Zustand	46
	Zusammenfassung	49
	Übungen	49
3	Terme und Algebren.....	57
3.1	Terme	58
	3.1.1 Sorten und Signaturen	58
	3.1.2 Notationen für Terme	61
3.2	Substitution und Unifikation	64
	3.2.1 Substitution	65
	3.2.2 Unifikation	68
3.3	Algebren	70
	3.3.1 Abstrakte Algebra	71
	3.3.2 Konkrete Algebra	72
3.4	Algebraische Spezifikation von Datenstrukturen	73
3.5	Algebraische Spezifikation für den Getränkeautomaten	80
	Übungen	81

4	Logik	87
4.1	Aussagenlogik	88
4.1.1	Syntax der Aussagenlogik	88
4.1.2	Semantik der Aussagenlogik	89
4.1.3	Normalformen	95
4.1.4	Aussagenlogische Modellbildung	99
4.2	Prädikatenlogik	100
4.2.1	Syntax der Prädikatenlogik	100
4.2.2	Semantik der Prädikatenlogik	104
4.2.3	Normalformen	109
4.2.4	Modellbildung mit der Prädikatenlogik	113
4.3	Elementare Beweistechniken	116
4.3.1	Formaler Rahmen und Grundlagen	117
4.3.2	Elementare Beweisstrukturen	120
4.3.3	Quantoren	123
	Übungen	130
5	Modellierung mit Graphen	135
5.1	Grundlegende Definitionen	136
5.2	Wegeprobleme	143
5.3	Verbindungsprobleme	152
5.4	Modellierung mit Bäumen	156
5.5	Zuordnungsprobleme	164
5.6	Abhängigkeiten	168
	Übungen	176
6	Modellierung von Strukturen.....	181
6.1	Kontextfreie Grammatiken	183
6.2	Baumstrukturen in XML	194
6.2.1	XML Notation	195
6.2.2	XML-Texte als Bäume	197
6.2.3	Strukturdefinition für XML-Bäume	200
6.3	Entity-Relationship-Modell	202
6.3.1	Entity-Mengen	203
6.3.2	Attribute	204
6.3.3	Relationen	206
6.4	Klassendiagramme in UML	215
6.4.1	Klassen mit Attributen	216
6.4.2	Assoziationen	216
	Übungen	221
7	Modellierung von Abläufen	227
7.1	Endliche Automaten	228
7.1.1	Zeichenfolgen über Alphabete	230

7.1.2	Deterministische endliche Automaten	232
7.1.3	Nicht-deterministische endliche Automaten	234
7.1.4	Endliche Automaten mit Ausgabe	238
7.1.5	Endliche Automaten in UML	241
7.2	Petri-Netze	244
	Übungen	256
8	Fallstudien.....	263
8.1	Fallstudie Autowerkstatt	263
8.1.1	Informationsstruktur und Zusammenhänge	264
8.1.2	Bedingungen und Regeln	267
8.1.3	Abläufe der Auftragsbearbeitung	268
8.2	Fallstudie Gesellschaftsspiel	270
8.2.1	Strukturen und Zusammenhänge	270
8.2.2	Bedingungen und Regeln	274
8.2.3	Spielabläufe	275
8.3	Fallstudie: Aussagenlogische Formeln transformiert durch Graphen	277
	8.3.1 Erfüllbarkeitsäquivalente Transformation in KNF 277	
	8.3.2 Beispielanwendung	282
	Übungen	283
	Bibliographie.....	287
	Referenzen	290
	Register	293