

Christoph Beierle | Gabriele Kern-Isberner

Methoden wissensbasierter Systeme

Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen

4. Auflage

► Mit Online-Service

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

Christoph Beierle | Gabriele Kern-Isberner

Methoden wissensbasierter Systeme

Christoph Beierle | Gabriele Kern-Isberner

Methoden wissensbasierter Systeme

Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen

4., verbesserte Auflage

Mit 147 Abbildungen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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.

Das in diesem Werk enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Der Autor übernimmt infolgedessen keine Verantwortung und wird keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2002
2. Auflage 2003
3. Auflage 2005
- 4., verbesserte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Sybille Thelen | Andrea Broßler

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0504-1

für

Christian

Vorwort zur 1. Auflage

Die Frage nach Notwendigkeit und Möglichkeiten der Künstlichen Intelligenz (KI) wird durch wissensbasierte Systeme in pragmatischer Form beantwortet. Ungezählte intelligente Computersysteme sind weltweit im Einsatz, wobei die Spanne von autonom agierenden Robotern über entscheidungsunterstützende Systeme bis hin zu intelligenten Assistenten reicht. Ungeachtet ihrer vielfältigen Erscheinungsformen und Anwendungsgebiete haben alle wissensbasierten Systeme eine gemeinsame Kernstruktur, nämlich *Wissensbasis und Inferenzkomponente* – Wissen muss adäquat dargestellt und verarbeitet werden, und die Behandlung dieses zentralen Problems steht auch im Mittelpunkt dieses Buches. Hier steht eine breite Palette an Methoden zur Verfügung, und wir werden eine Reihe wichtiger Repräsentations- und Inferenzformen vorstellen, auf ihre spezifischen Eigenheiten eingehen, Stärken und Schwächen aufzeigen und mögliche Anwendungsgebiete durch Beispiele illustrieren. Auf diese Weise wollen wir ein grundlegendes und kritisches Verständnis für die Arbeitsweise wissensbasierter Systeme vermitteln, das für Implementierer und Wissensingenieure wichtige Voraussetzung für ihre Arbeit ist, von dem aber auch der “einfache” Benutzer profitiert.

Immer noch wird das allgemeine Bild wissensbasierter Systeme geprägt von hochfliegenden Erwartungen und unterschwelligem Ängsten. Dabei zeigen die bisherigen Erfahrungen ganz deutlich, dass die Vorstellung eines *general problem solvers*, also einer allwissenden und omnipotenten Maschine, unrealistisch ist, und auch *Expertensysteme* konnten kompetente Fachleute nicht verdrängen. Intuition und Kreativität, zwei herausragende Leistungen menschlichen Denkens, lassen sich nicht einfach implementieren. In einem begrenzten und klar definierten Aufgabenbereich können intelligente Computersysteme jedoch wertvolle Hilfe leisten und von wirklichem Nutzen sein. Dabei wuchs in den letzten Jahren stetig das Interesse an interaktionsfreudigen Systemen, die menschliche und maschinelle Fähigkeiten geschickt kombinieren. Auch im Hinblick auf eine solche aktive Einbeziehung des Benutzers ist es wichtig, Wissensrepräsentation und Inferenz verständlich und transparent zu gestalten und die Vorzüge ebenso wie die Grenzen der gewählten Methoden genau zu kennen.

Neben der Perspektive möglichen wirtschaftlichen Nutzens erklärt sicherlich auch die Faszination, die von der Beschäftigung mit menschlicher und maschineller Intelligenz ausgeht, das besondere Interesse an wissensbasierten Systemen.

Nach einer allgemeinen Einführung in das Gebiet der wissensbasierten Systeme gehen wir auf Fragen der *Wissensrepräsentation und Inferenz* (mit schwerpunktmäßiger Behandlung der klassischen Logiken) ein. *Regelbasierte Systeme* sind sozusagen die Grundform eines wissensbasierten Systems und werden daher in einem eigenen Kapitel behandelt. *Maschinelles Lernen* ist ein Teilgebiet, das gerade in letzter Zeit mit Anwendungen im Bereich des *Data Mining* an Bedeutung gewonnen hat. Eine Alternative zur regelbasierten Wissensrepräsentation bietet das in jüngster Zeit ebenfalls recht erfolgreiche fallbasierte Schließen (*case-based reason-*

ing). Das *Planen* von Handlungsabläufen ist insbesondere für autonom agierende Agenten unerlässlich.

Von den meisten Systemen erwartet man zufriedenstellendes Verhalten auch bei unvollständiger Information. Dies führt auf das Problem des *nichtmonotonen Schließens*, mit dem oft der Begriff der *Default-* oder *Standard-Regel* verbunden wird. Zur flexiblen Anpassung an sich verändernde Umgebungen werden insbesondere *truth maintenance*-Verfahren benötigt. Ganz andere Möglichkeiten bieten die *quantitativen Verfahren*. Hier stellen wir unter anderem die Methode der *Bayesischen Netze* vor, die gerade in den letzten Jahren im Bereich des *probabilistischen Schließens* neue, effiziente Möglichkeiten eröffnet und in vielen Anwendungen, etwa in der Medizin oder in Steuerungssystemen, große Bedeutung erlangt hat.

Das Buch präsentiert damit ein breites Spektrum anspruchsvoller Ansätze zur Wissensrepräsentation und Inferenz. Der gemeinsame Bezugspunkt aller vorgestellten Methoden ist eine logikbasierte Vorgehensweise. Dabei wurde durchgängig eine vollständige und modulare Darstellung gewählt, so dass das Buch, das sich an Leser mit Grundkenntnissen in der Informatik richtet, zum Studium einer grundlegenden und umfassenden Methodik der Wissensrepräsentation und Inferenz ebenso einlädt wie zum Erlernen einzelner Methoden.

Der Lehrbuchcharakter des Buches, das sich sowohl zum Selbststudium als auch als Grundlage oder Begleittext zu einer entsprechenden Vorlesung eignet, wird auch dadurch unterstützt, dass jedes Kapitel des Buches eine Reihe von *Selbsttestaufgaben* enthält. Diese Aufgaben sind an den Stellen im Text eingebettet, an denen der Leser sie beim Studium des jeweiligen Kapitels bearbeiten sollte, um den präsentierten Stoff zu vertiefen und den eigenen Lernfortschritt bestmöglich überprüfen zu können. Darüberhinaus bieten wir zu diesem Buch einen Online-Service unter der Adresse

<http://www.fernuni-hagen.de/pi8/wbs>

an; insbesondere stehen dort zu jeder Selbsttestaufgabe des Buches ausführliche Lösungshinweise zur Verfügung.

Dieses Buch basiert auf einer überarbeiteten und erweiterten Version unseres Kurses “Wissensbasierte Systeme”, der an der FernUniversität Hagen im Fachbereich Informatik angeboten wird. Viele Personen haben uns bei seiner Erstellung tatkräftig unterstützt; ihnen allen sind wir zu Dank verpflichtet.

Unser Mitarbeiter Manfred Widera setzte sich wiederholt und kritisch mit den Inhalten von Buch und Kurs auseinander, machte uns auf Fehler und Ungereimtheiten aufmerksam und gab wertvolle Anregungen. Der Kurs ermunterte eine Reihe von Betreuern und Studenten zu konstruktiver Kritik. Für Korrektur- und Verbesserungsvorschläge danken wir insbesondere Katharina Pieper, Benjamin Köhnen, André Platzer, Achim Walter Hassel, Peter Zessin, Dr. Barbara Messing und Marija Kulaš. Dr. Jan Freudenberg erwies sich nicht nur als aktiver Leser und Kritiker des Kurstextes, sondern stand uns auch bei der “Proteinklassifikation” (4. Auflage: Abschnitt 12.7.1) mit Rat und Tat zur Seite. Auch für andere Anwendungsbeispiele nahmen wir die “Erste Hilfe” einschlägiger Fachleute in Anspruch: Dr. Robert Meisen und Dr. Peter Terhoeven erklärten uns viele wichtige Dinge im Zusammenhang mit “Herzerkrankungen bei Neugeborenen” (4. Auflage: Abschnitt 12.7.2), und

Dr. Helmut Devos beriet uns in Sachen “Suchterkrankungen und psychische Störungen” (4. Auflage: Abschnitt 12.7.3). Von den anonymen Gutachtern des Buches erhielten wir wertvolle Anregungen zur Darstellung und für die Themenauswahl. Unserer besonderer Dank gilt außerdem Prof. Dr. Gerd Brewka, dessen gezielte Kritik uns veranlasste, wichtige Aspekte und Probleme klarer herauszustellen. So gerieten wir auf regennasser Straße nicht ins Schleudern, und auch der Delphin Flipper landete (scheinbar) korrekt im Karpfenteich.

Auch bei der Gestaltung des Buches legten mehrere Leute mit Hand an: Petra Boshoff leistete im Kampf mit unseren L^AT_EX-Makros und anderen Widrigkeiten unermüdliche Editierarbeit. Jens Fisseler erstellte fast alle Graphiken dieses Buches in jeder gewünschten Version und Größe. Manfred Widera war außerdem ein kompetenter Ratgeber in allen System- und L^AT_EX-Fragen. Silja Isberner verbesserte mit ihren Cartoons schließlich den künstlerischen Gesamteindruck des Werkes.

Ferner möchten wir allen danken, die das Erscheinen dieses Buches unterstützt haben, insbesondere Dr. Klockenbusch vom Vieweg-Verlag sowie den Herausgebern dieser Reihe, Prof. Dr. Bibel und Prof. Dr. Kruse.

Besonders bedanken wir uns bei unseren Familien, die bei der Erstellung des Buches oft auf uns verzichten mussten. Hätten sie nicht so viel Verständnis und Ermunterung für uns und unsere Arbeit gehabt, gäbe es dieses Buch nicht.

Hagen,
Dezember 2000

Christoph Beierle und Gabriele Kern-Isberner

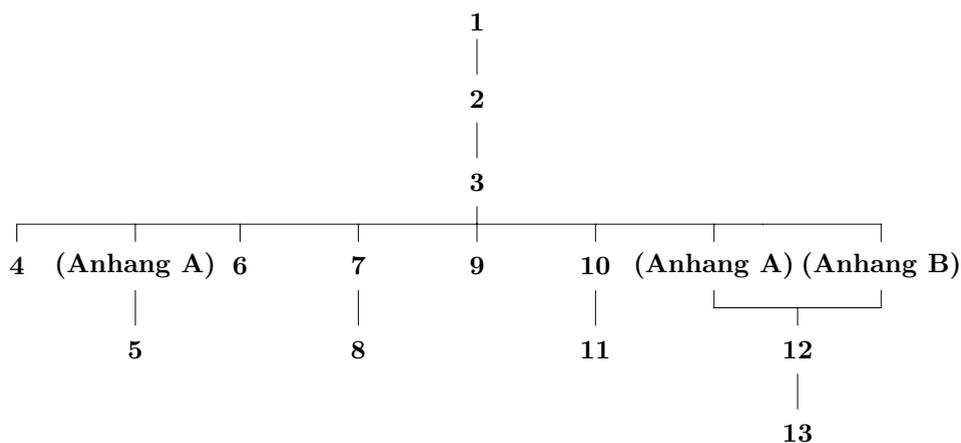
Vorwort zur 3., überarbeiteten und erweiterten Auflage

Mit dem Erscheinen der zweiten Auflage hatten wir die Möglichkeit genutzt, mit dem Kapitel über *logisches Programmieren* ein Gebiet von hohem praktischen und theoretischen Potential neu in das Buch aufzunehmen, wobei wir das logische Programmieren aber nicht nur in seiner klassischen Form, sondern auch erweiterte logische Programme mit der Semantik der *Antwortmengen*, einen der modernsten und effizientesten Ansätze unter den nichtmonotonen Formalismen, behandeln.

Nachdem auch die zweite Auflage vergriffen war, haben wir uns entschlossen, das Themenspektrum des Buches nochmals zu erweitern. Kaum ein anderes Paradigma hat die Entwicklung der Künstlichen Intelligenz in den letzten Jahren so beeinflusst und vorangetrieben wie das Konzept der *Agenten*. In dem neuen Kapitel über Agenten konzentrieren wir uns aus dem Blickwinkel unseres Buches heraus auf die Wissenskomponente eines Agenten, in der Methoden und Prozesse zur Repräsentation und intelligenten Verarbeitung von Informationen umgesetzt werden. Wir gehen dabei von dem (maschinellen) Agenten als Gesamtkonzept aus, in dem die in diesem Buch behandelten Methoden prinzipiell zur Anwendung kommen können. So stellen z.B. die verschiedenen Varianten des logischen und plausiblen Schlussfolgerns, die wir in diesem Buch ausführlich besprechen, Basismethoden oder mögliche Ansätze für die Gestaltung und Implementation der Wissenskomponente eines Agenten dar.

Darüber hinaus wurden alle Themenbereiche des Buches überarbeitet und aktualisiert. Für alle Selbsttestaufgaben, deren Anzahl wir nochmals erhöht haben, stehen ausführliche Lösungshinweise im erweiterten Online-Service zu diesem Buch unter <http://www.fernuni-hagen.de/pi8/wbs> zur Verfügung.

Der modulare, in sich geschlossene Charakter des Buches wurde aufrechterhalten. So können nach den grundlegenden Kapiteln 1 – 3 die folgenden Kapitel relativ unabhängig von den anderen bearbeitet werden. In den Anhängen A und B haben wir die wichtigsten Begriffe zur Probabilistik und zur Graphentheorie zusammengestellt, soweit sie in diesem Buch für die Themengebiete *Maschinelles Lernen* und *Quantitative Methoden* benötigt werden. Damit ergeben sich im Wesentlichen die folgenden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kapiteln:



Die Mithilfe vieler Personen, die wir in dem Vorwort zur ersten Auflage namentlich erwähnt haben, ging auch in die Gestaltung der dritten Auflage ein. Zusätzliche, wertvolle Hinweise erhielten wir von Brigitta Meier, Prof. Dr. Pfalzgraf, Matthias Kleine und weiteren engagierten Lesern des Buches. Dr. Klockenbusch vom Vieweg-Verlag danken wir für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Im Vorwort zur zweiten Auflage hatten wir Katharina Pieper, die sich mit großer Sorgfalt um sprachliche und inhaltliche Korrektheit des Manuskripts kümmerte, und Dr. Barbara Messing, die Phantasie und Engagement bei der Konzipierung vieler ansprechender Aufgaben bewies und uns auch bei der dritten Auflage tatkräftig unterstützte, besonders erwähnt. Ferner halfen Petra Boshoff, Dr. Manfred Widera, Jens Fisseler, Silja Isberner und René Ramacher bei der Bewältigung großer und kleiner Aufgaben erneut bereitwillig mit. Ihnen allen sei an dieser Stelle noch einmal herzlich gedankt.

Unserer besonderer Dank gilt unseren Familien für ihr Verständnis, ihre Unterstützung und die Kraft, die sie uns geben.

Hagen und Dortmund,
Februar 2006

Christoph Beierle und Gabriele Kern-Isberner

Vorwort zur 4. Auflage

Für die nun vorliegende 4. Auflage haben wir den gesamten Text noch einmal durchgesehen und verbessert. Neu hinzugekommen sind eine Reihe zusätzlicher, motivierender Selbsttestaufgaben mit praktischen Anwendungshintergrund. Ausführliche Lösungshinweise dazu werden im erweiterten Online-Service zum Buch angeboten, der weiterhin unter der Adresse

<http://www.fernuni-hagen.de/pi8/wbs>

zu finden ist. Alle in der 4. Auflage neu hinzugekommenen Selbsttestaufgaben wurden von Dr. Barbara Messing erstellt; wir danken ihr für ihre Ideenvielfalt und ihren Einsatz bei der Erstellung dieser Aufgaben. Von engagierten Nutzern und Lesern dieses Buches haben wir wieder einige wertvolle Hinweise erhalten. Dem Vieweg-Verlag danken wir für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Vorbereitung der neuen Auflage.

Dieses Buch gäbe es nicht ohne die stetige Unterstützung, das Verständnis und den Rückhalt unserer Familien; ihnen möchten wir deshalb an dieser Stelle wiederum ganz besonders danken.

Hagen und Dortmund,
April 2008

Christoph Beierle und Gabriele Kern-Isberner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage	vii
Vorwort zur 3., überarbeiteten und erweiterten Auflage	ix
Vorwort zur 4. Auflage	xi
Inhaltsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Über dieses Buch	1
1.2 Themenbereiche des Buches	2
2 Wissensbasierte Systeme im Überblick	7
2.1 Beispiele für wissensbasierte Systeme	7
2.1.1 Geldabheben am Automaten	7
2.1.2 Medizinische Diagnose	9
2.2 Wissensbasierte Systeme und Expertensysteme	11
2.3 Eigenschaften von Experten und Expertensystemen	11
2.4 Zur Geschichte wissensbasierter Systeme	13
2.5 Das medizinische Diagnosesystem MYCIN	14
2.6 Aufbau und Entwicklung wissensbasierter Systeme	16
2.6.1 Architektur eines wissensbasierten Systems	16
2.6.2 Entwicklung eines wissensbasierten Systems	19
3 Logikbasierte Wissensrepräsentation und Inferenz	20
3.1 Formen der Inferenz	20
3.1.1 Menschliches Schließen und Inferenz	20
3.1.2 Charakterisierung der Inferenzrelation nach Peirce	23
3.1.3 Deduktives Schließen	26
3.1.4 Unsicheres Schließen	26
3.2 Logische Systeme	28
3.2.1 Signaturen	29
3.2.2 Formeln	29
3.2.3 Interpretationen	31
3.2.4 Erfüllungsrelation	32
3.3 Eigenschaften klassisch-logischer Systeme	34
3.3.1 Erfüllungsrelation und Wahrheitsfunktionalität	34
3.3.2 Modelle und logische Folgerung	35
3.3.3 Inferenzregeln und Kalküle	38
3.3.4 Korrektheit und Vollständigkeit von Kalkülen	39
3.3.5 Logisches Folgern durch Widerspruch	40
3.3.6 Entscheidbarkeitsresultate	41
3.4 Logische Grundlagen: Aussagenlogik	42
3.4.1 Syntax	42

3.4.2	Semantik	43
3.4.3	Äquivalenzen und Normalformen	45
3.4.4	Wahrheitstafeln und Ableitungen in der Aussagenlogik	47
3.5	Logische Grundlagen: Prädikatenlogik 1. Stufe	47
3.5.1	Signaturen und Interpretationen	48
3.5.2	Terme und Termauswertung	50
3.5.3	Formeln und Formelauswertung	51
3.5.4	Äquivalenzen	55
3.5.5	Ableitungen in der Prädikatenlogik 1. Stufe	57
3.5.6	Normalformen	60
3.5.7	Unifikation	63
3.6	Der Resolutionskalkül	64
3.7	Erweiterungen	67
3.8	Wie kommt der Delphin in den Karpfenteich?	69
4	Regelbasierte Systeme	72
4.1	Was sind Regeln?	72
4.2	Die Wissensbasis eines regelbasierten Systems	76
4.3	Inferenz in einem regelbasierten System	79
4.3.1	Regelnetzwerke	79
4.3.2	Datengetriebene Inferenz (Vorwärtsverkettung)	82
4.3.3	Zielorientierte Inferenz (Rückwärtsverkettung)	84
4.4	Das Problem der Widersprüchlichkeit	86
4.5	Die Erklärungskomponente	87
4.6	Signalsteuerung im Eisenbahnverkehr durch Regeln	88
4.7	MYCIN – ein verallgemeinertes regelbasiertes System	90
4.8	Modularität und Effizienz regelbasierter Systeme	96
4.9	Ausblick	97
5	Maschinelles Lernen	98
5.1	Definition des Lernens	98
5.2	Klassifikation der Ansätze zum maschinellen Lernen	99
5.2.1	Klassifikation gemäß der benutzten Lernstrategie	100
5.2.2	Klassifikation gemäß dem gelernten Typ von Wissen	104
5.2.3	Klassifikation gemäß dem Anwendungsbereich	105
5.3	Erlernen von Entscheidungsbäumen	105
5.3.1	Entscheidungsbäume	106
5.3.2	Erzeugung von Regeln aus Entscheidungsbäumen	108
5.3.3	Generieren von Entscheidungsbäumen	109
5.3.4	Bewertung des Lernerfolges und Anwendungen	115
5.3.5	Die induktiven Lernverfahren ID3 und C4.5	116
5.4	Lernen von Konzepten	120
5.4.1	Eine Konzeptlernaufgabe	120
5.4.2	Allgemeine Problemstellung	122
5.4.3	Repräsentation von Beispielen und Konzepten	124
5.4.4	Lernen von Konzepten als Suchproblem	125

5.4.5	Versionenräume	128
5.4.6	Das Versionenraum-Lernverfahren	130
5.4.7	Anwendungsbeispiel	132
5.4.8	Eigenschaften des Versionenraum-Lernverfahrens	137
5.4.9	Konzeptlernen mit Merkmalsbäumen	138
5.5	Data Mining und Wissensfindung in Daten	143
5.5.1	KDD – Knowledge Discovery in Databases	143
5.5.2	Der KDD-Prozess	145
5.5.3	Data Mining	146
5.5.4	Assoziationsregeln	147
5.5.5	Warenkorbanalyse	152
6	Fallbasiertes Schließen	158
6.1	Motivation	158
6.2	Ein Beispiel	159
6.3	Fallbasiertes Schließen und CBR-Systeme	160
6.3.1	Grundzüge des fallbasierten Schließens	160
6.3.2	CBR-Systeme	161
6.3.3	Anwendungsgebiete des fallbasierten Schließens	163
6.3.4	Fallbasiertes Schließen im Vergleich mit anderen Methoden	164
6.3.5	Die Grundtypen fallbasierten Schließens	165
6.4	Der Prozess des fallbasierten Schließens	165
6.4.1	Der CBR-Zyklus	165
6.4.2	Die Prozesse im Einzelnen	166
6.5	Die Repräsentation von Fällen	170
6.5.1	Die Komponenten eines Falles	171
6.5.2	Problem- und Situationsbeschreibung	172
6.5.3	Die Repräsentation von Lösungen	173
6.5.4	Das Resultat eines Falles	174
6.5.5	Methoden der Fallrepräsentation	175
6.6	Die Indizierung von Fällen	176
6.6.1	Das Indexvokabular	177
6.6.2	Die Kennzeichnung eines Falles durch Indizes	179
6.7	Suche nach geeigneten Fällen	182
6.8	Organisationsformen der Fallbasis	186
6.9	Die Bestimmung der Ähnlichkeit	188
6.9.1	Die Hamming-Ähnlichkeit	189
6.9.2	Die gewichtete Hamming-Ähnlichkeit	190
6.9.3	Verallgemeinerte Ähnlichkeiten	192
6.9.4	Beispiel: Ähnlichkeiten im PATDEX/2 - System	196
6.9.5	Andere Ähnlichkeitsbestimmungen	199
6.10	Adaption	199
6.10.1	Substitutionsmethoden	200
6.10.2	Andere Adaptionismethoden	202
6.11	Wie ein fallbasiertes System lernt	203
6.12	Einige abschließende Bemerkungen	204

7	Truth Maintenance-Systeme	205
7.1	Die Rolle des nichtmonotonen Schließens in der KI	205
7.2	Monotone vs. nichtmonotone Logik	207
7.3	Truth Maintenance-Systeme	209
7.4	Justification-based Truth Maintenance-Systeme – JTMS	211
7.4.1	In’s und Out’s – die Grundbegriffe eines JTMS	211
7.4.2	Der JTMS-Algorithmus	216
7.4.3	Anwendungsbeispiele	224
7.4.4	Die JTMS-Inferenzrelation	230
7.5	Assumption-based Truth Maintenance-Systeme – ATMS	233
7.5.1	Grundbegriffe	233
7.5.2	Arbeitsweise eines ATMS	233
7.6	Verschiedene TMS im Vergleich	238
7.7	Ausblicke	239
8	Default-Logiken	241
8.1	Default-Logik nach Reiter	241
8.1.1	Aussehen und Bedeutung eines Defaults	241
8.1.2	Die Syntax der Default-Logik	243
8.1.3	Die Semantik der Default-Logik	245
8.1.4	Ein operationaler Zugang zu Extensionen	248
8.1.5	Prozessbäume	253
8.1.6	Berechnung von Prozessbäumen	257
8.1.7	Eigenschaften der Reiter’schen Default-Logik	258
8.1.8	Normale Defaults	262
8.2	Die Poole’sche Default-Logik	264
8.3	Nichtmonotone Inferenzrelationen für Default-Logiken	269
8.4	Probleme und Alternativen	272
9	Logisches Programmieren und Antwortmengen	274
9.1	Klassische logische Programme	275
9.2	Anfragen und Antwortsubstitutionen	275
9.3	Resolution von Hornklauseln	278
9.3.1	SLD-Ableitungen	279
9.3.2	Berechnete Antwortsubstitutionen	280
9.3.3	Suchraum bei der SLD-Resolution	282
9.4	Fixpunktsemantik logischer Programme	284
9.5	Erweiterte logische Programme	285
9.6	Die stabile Semantik normaler logischer Programme	289
9.7	Die Antwortmengen-Semantik erweiterter logischer Programme	293
9.8	Stabile Semantik und Antwortmengensemantik	297
9.9	Truth Maintenance-Systeme und Default-Theorien	299
9.10	Erweiterungen der Antwortmengensemantik	301
9.11	Implementationen und Anwendungen	303
9.12	Kriterien zur Beurteilung nichtmonotoner Inferenzoperationen	303
9.13	Rückblick	305

10 Aktionen und Planen	307
10.1 Planen in der Blockwelt	307
10.2 Logische Grundlagen des Planens	308
10.3 Der Situationskalkül	309
10.3.1 Aktionen	309
10.3.2 Situationen	309
10.3.3 Veränderungen zwischen Situationen	310
10.3.4 Ausführungsbedingungen und Effektaxiome	310
10.3.5 Zielbeschreibungen	312
10.4 Probleme	313
10.4.1 Das Rahmenproblem	313
10.4.2 Das Qualifikationsproblem	314
10.4.3 Das Verzweigungsproblem	314
10.5 Plangenerierung im Situationskalkül	315
10.6 Planen mit STRIPS	317
10.6.1 Zustände und Zielbeschreibungen	317
10.6.2 STRIPS-Operatoren	318
10.6.3 Planen mit Vorwärtssuche	320
10.6.4 Planen mit Rückwärtssuche	320
10.6.5 Behandlung des Rahmenproblems in STRIPS	323
10.7 Nichtklassische Planungssysteme	326
10.8 Planen mit Antwortmengen	330
10.8.1 Systeme zur Berechnung von Antwortmengen	330
10.8.2 Planen mit SMOBELS	331
10.8.3 Behandlung des Rahmenproblems	335
10.9 Ausblick und Anwendungen	336
11 Agenten	338
11.1 Das Konzept des Agenten	338
11.2 Abstrakte Agentenmodelle	343
11.2.1 Umgebungen, Aktionen und Läufe eines Agenten	343
11.2.2 Wahrnehmungen	345
11.2.3 Innerer Zustand	348
11.2.4 Aufgabe und Erfolg eines Agenten	349
11.3 Reaktive Agenten und Schichtenarchitekturen	352
11.4 Logikbasierte Agenten	353
11.5 Belief-Desire-Intention-(BDI)-Agenten	357
11.5.1 Praktisches Denken	357
11.5.2 BDI-Architektur	359
11.5.3 Procedural Reasoning System (PRS)	362
11.6 Multiagentensysteme	363
12 Quantitative Methoden I – Probabilistische Netzwerke	365
12.1 Ungerichtete Graphen – Markov-Netze	366
12.1.1 Separation in Graphen und probabilistische Unabhängigkeit	366
12.1.2 Markov-Eigenschaften und Markov-Graphen	370