Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage 1

Vorwort zur 2. überarbeiteten und erweiterten Auflage 3

Kapitel I: Geschichte und Anwendungen *(J. H. Siekmann)* 5

1 Einleitung 5
2 Frühgeschichte 6
3 Erste Deduktionssysteme 12
4 Die Zeit nach 1965 15
5 Teilgebiete 19
6 Anwendungen 21
7 Schlußwort 22
Literatur 23

Kapitel II: Grundlagen und Beispiele *(N. Eisinger, H. J. Ohlbach)* 25

1 Einführung 25
2 Prädikatenlogik erster Stufe 26
2.1 Syntax von PL1 27
2.2 Semantik von PL1 28
2.3 Normalformen in PL1 31
2.4 Beschränkungen und Modifikationen von PL1 33
3 Kalküle für die Prädikatenlogik erster Stufe 35
3.1 Gentzen-Kalküle (Kalküle des natürlichen Schließens) 37
3.2 Resolution 39
3.3 Theorieresolution 44
4 Repräsentation 48
4.1 Tableaus 49
4.2 Klauselgraphen 52
4.2.1 Klauselgraphen als Datenstruktur und Indexierungshilfsmittel 52
4.2.2 Klauselgraphen mit allgemeinen Reduktionsregeln 56
4.2.3 Klauselgraphen mit spezifischen Reduktionsregeln 59
4.2.4 Graphen als Repräsentation von Beweisen 62
4.2.5 Extraktion von Widerlegungsbäumen aus Klauselgraphen 67
4.3 Matrizen 69
4.3.1 Zusammenhang zwischen Matrix- und Tableauverfahren 72
4.3.2 Zusammenhang zwischen Matrix- und Resolutionsverfahren. 73
4.4 Abstrakte Sichtweise der Repräsentationsschicht 75
5 Steuerung 79
5.1 Restriktionsstrategien 79
5.2 Ordnungsstrategien 81
6 Zwei konkrete Deduktionssysteme 84
6.1 MKRP 84
6.2 OTTER 85
Literatur 87

Kapitel III: Die Gleichheitsrelation 91
1 Das Problem der Gleichheit *(K. H. Bläsius, H. J. Ohlbach, A. Präcklein)* 91
1.1 Formalisierung der Gleichheit innerhalb der Prädikatenlogik 92
1.2 Gleichheit als Teilproblem 93
1.3 Teilgebiete der Gleichheitsbehandlung 95
2 Allgemeine Gleichheitsverfahren *(K. H. Bläsius, A. Präcklein)* 96
2.1 Untertermersetzung: Paramodulation 96
2.2 Kontrolle Resolution - Gleichheit: E-Resolution 99
2.3 Abstandsverringerung: RUE-Resolution 101
2.4 Planen: Equality Graphs 105
2.5 Schlußbemerkungen 109
Literatur 110
3 Unifikationstheorie *(H.-J. Bürckert)* 112
3.1 Robinson-Unifikation 112
3.2 Theorieunifikation 113
3.3 Eigenschaften von Lösungsmengen 115
3.4 Die Unifikationshierarchie 116
3.5 Einige Resultate für spezielle Theorien 118
3.6 Kombination von Theorien und universelle Unifikation 119
3.7 Ein Beispiel: Unifikation in Booleschen Ringen 123
3.8 Schlußbemerkungen 124
Literatur 124
4 Termersetzungssysteme *(N. Eisinger, A. Nonnengart, A. Präcklein)* 126
4.1 Einführung 126
4.2 Termersetzungsregeln 128
4.3 Eigenschaften von Termersetzungssystemen 129
4.4 Kritische Ausdrücke und kritische Paare 131
4.5 Das Knuth-Bendix-Verfahren 134
4.6 Knuth-Bendix-Vervollständigung modulo einer Äquivalenzrelation 136
4.7 Das Knuth-Bendix-Verfahren als Beweisprozedur für Gleichungen 138
4.8 Knuth-Bendix-Vervollständigung mit Theorieunifikation 139
4.9 Das Knuth-Bendix-Verfahren als Beweisprozedur für Klauseln 142
4.10 Das Knuth-Bendix-Verfahren als Induktionsbeweiser 144
Literatur 147

Kapitel IV: Deduktion als Berechnung *(H.-J. Bürckert)* 151
1 Einführung: Logische Programme 151
2 Resolution für Horn-Formeln 154
3 Kompilation von logischen Programmen 158
4 Theorieunifikation in logischen Programmen 161
5 Sorten und Typen 165
6 Logische Programme mit Constraints 167
7 Schlußbemerkungen 175
Literatur 176

Kapitel V: Vollständige Induktion *(D. Hutter)* 179
1 Einführung 179
2 Grundlagen 180
3 Aufbau einer Datenbasis 183
3.1 Definition von Datenstrukturen 183

3.2 Definition von Funktionen 186
3.2.1 Eindeutigkeit und Vollständigkeit 188
3.2.2 Terminierung 189
4 Nachweis von Funktionseigenschaften (Lemmata) 195
4.1 Verwendung der Induktionsschemata 195
4.1.1 Erzeugung von Induktionsschemata 196
4.1.2 Auswahl eines Induktionsschemas 200
4.1.3 Induktion über beliebige Terme 201
4.2 Spezielle Strategien für Induktionsbeweise 203
4.2.1 Symbolische Auswertung 203
4.2.2 Rippling 205
4.3 Generalisierung 207
4.4 Existenzbeweise 209
5 Schlußbemerkungen 211
Literatur 211

Kapitel VI: Beweissysteme mit Logiken höherer Stufe *(M. Kohlhase)* 213
1 Einführung in die Typtheorie 213
1.1 Typen 215
1.2 Syntax von PLΩ 216
1.3 Semantik von PLΩ 216
1.4 Existenzaxiome 217
1.5 λ-Kalkül 218
1.6 Normalformen 220
1.7 Beispiele 222
1.8 Varianten und Erweiterungen der einfachen Typtheorie 223
2 Beweisverfahren in der Typtheorie 226
2.1 Unifikation in der Typtheorie 226
2.2 Prä-Unifikation 230
2.3 Beweisprüfer 230
2.4 Automatische Beweisverfahren 231
2.5 Huets Constrained Resolution 232
2.6 Beispiele 235
Literatur 237

Kapitel VII: Modal- und Temporallogik *(A. Nonnengart, H. J. Ohlbach)* 239
1 Modallogiken 239
1.1 Einfache Modallogik 239
1.1.1 Doxastische Interpretation 240
1.1.2 Epistemische Interpretation 241
1.1.3 Temporale Interpretation 242
1.2 Formale Definition der einfachen Modallogik 243
1.2.1 Syntax 243
1.2.2 Semantik 243
1.3 Relationale Übersetzung in Prädikatenlogik 247
1.4 Korrespondenzeigenschaften 249
1.5 Modallogik mit parametrisierten Modaloperatoren 257
1.6 Funktionale Übersetzung in Prädikatenlogik 258
1.7 Nachbarschaftssemantik 267
2 Temporallogik 270

2.1 Konstruktion der Grundlogik 271
2.2 Topologie der Zeit 277
2.2.1 Linearität 277
2.2.2 Dichte Zeit 278
2.2.3 Diskrete Zeit 278
2.2.4 Endliche oder unendliche Zeit 280
2.3 METATEM 281
3 Zusammenfassung 282
Literatur 283

Anhang 285

Weiterführende Literatur 285
Stichwortverzeichnis 287

Vorwort zur 1. Auflage

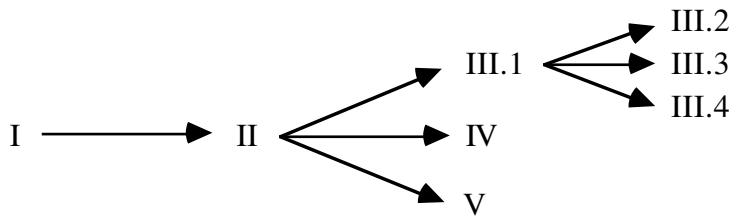
Die Fähigkeit, logische Schlüsse zu ziehen, ist eine wesentliche Grundlage intelligenten Verhaltens. Deshalb sind Schlußfolgerungs- oder Deduktionskomponenten fester Bestandteil vieler Systeme der Künstlichen Intelligenz (KI). Die Anwendungen für Deduktionssysteme gehen also über das automatische Beweisen mathematischer Theoreme – der ursprünglichen Motivation für die Entwicklung solcher Systeme – hinaus. Aus ihnen wurden logische Programmierspachen wie PROLOG entwickelt und sie werden inzwischen bei natürlich-sprachlichen Systemen ebenso verwendet wie in Expertensystemen oder für intelligente Robotersteuerung. Darüberhinaus haben auch die logikorientierten Methoden dieses Gebietes Eingang in die Grundlagenforschung fast aller KI-Gebiete gefunden.

Der Bedarf an einführenden Veranstaltungen und an Lehrmaterial zum Thema Deduktions-systeme wurde in den letzten Jahren immer wieder von Wissenschaftlern und Anwendern aus den unterschiedlichsten Gebieten der Künstlichen Intelligenz deutlich gemacht. Solche Anregungen, die besonders auf den KI-Konferenzen vorgebracht wurden, waren für uns Anlaß, ein Tutorium über Deduktionssysteme für die 1987er GWAI (German Workshop on Artificial Intelligence) vorzubereiten und dazu ein Buch mit einführenden Aufsätzen zu diesem Thema herauszugeben.

Dieses Buch richtet sich an alle Studenten, Wissenschaftler und Anwender mit Interesse an der Künstlichen Intelligenz und soll dem Leser einen leicht zugänglichen und trotzdem umfassenden Einblick in das Gebiet der Deduktionssysteme ermöglichen. Grundlegende Begriffe und Methoden der Duduktionsysteme werden vorgestellt und – unterstützt durch zahlreiche Beispiele und graphische Darstellungen – erläutert. Dabei erleichtert eine gewisse Vertrautheit mit der Prädikatenlogik das Verständnis. Trotz des einführenden Charakters gibt das Buch in vielen Fällen den aktuellen Forschungsstand wieder und weist auch für den Experten auf diesem Gebiet interessante und neue Aspekte auf.

Das Buch ist in fünf Kapitel unterteilt. Zur Einstimmung und Motivation bietet das erste Kapitel zunächst eine historische Übersicht über die automatische Deduktion und stellt verschiedene Anwendungsgebiete vor. Den Kern des Buches bildet das zweite Kapitel, in dem die wesentlichen Grundlagen des Gebietes unter Verwendung zahlreicher Beispiele erläutert werden. Geleitet von einem Schichtenmodell eines automatischen Deduktionssystems stellen die beiden Autoren relevante Logiken, wichtige Kalküle, Repräsentationsformen und Kontrollmechanismen vor. Kapitel III befaßt sich mit der Spezialbehandlung der Gleichheit. In Beiträgen über allgemeine Gleichheitsbehandlung, über Unifikationstheorie und über Termersetzungssysteme werden die Bedeutung der Gleichheit und damit verbundenene Probleme aufgezeigt sowie Lösungsansätze beschrieben. Kapitel IV stellt theoretische Grundlagen des logischen Programmierens vor und Kapitel V gibt eine Einführung in das automatische Beweisen mit vollständiger Induktion.

Die Kapitel III, IV und V sind relativ unabhängig voneinander und können in beliebiger Reihenfolge gelesen werden. Das gleiche gilt für die Abschnitte 2, 3 und 4 in Kapitel III. Empfohlen wird also eine Reihenfolge, die sich an folgendem Diagramm orientiert:



Automatische Deduktion hat in Deutschland eine gewisse Tradition: Bereits vor der Publikation des Resolutionsprinzips im Jahre 1965 arbeitete eine Gruppe unter der Leitung von Prof. Dr. G. Veenker in Bonn an automatischen Beweisverfahren. Seit Anfang der 70er Jahre existiert eine international bekannte Arbeitsgruppe unter Leitung von Dr. W. Bibel in München. Vor etwa zehn Jahren entstand die „Markgraf Karl Gruppe“ in Karlsruhe, die später mit Prof. Dr. J. Siekmann nach Kaiserslautern wechselte. Die Autoren der Beiträge in diesem Buch sind bzw. waren Mitglieder dieser ebenfalls international anerkannten Arbeitsgruppe und haben an der Entwicklung des Markgraf Karl Systems mitgearbeitet, das als eines der leistungsfähigsten bestehenden Deduktionssysteme bekannt ist.

Bei allen Autoren möchten wir uns ganz herzlich für das Zustandekommen dieses Buches bedanken. Sie haben nicht nur mit ihren eigenen Aufsätzen, sondern auch durch viele Anregungen und gemeinsame Diskussionen am Entstehen des Buches mitgewirkt. Norbert Eisinger und Hans Jürgen Ohlbach haben mit ihrem gemeinsamen Beitrag den Grundstock für die übrigen Artikel und damit für das gesamte Buch gelegt. Desweiteren haben sie durch zahlreiche Hinweise wesentlichen Anteil an der für eine Aufsatzsammlung relativ einheitlichen Darstellung. Ihnen sei daher an dieser Stelle noch einmal besonders gedankt. Prof. Dr. J. Siekmann hat sich bereiterklärt, dem Buch mit einem einleitenden Kapitel den nötigen historischen Rahmen und einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsbereiche für Deduktionssysteme zu geben. Dafür und für seine Kommentare zur Gestaltung des Buches und seine hilfreiche Kritik an den einzelnen Beiträgen danken wir ihm herzlich. Bedanken möchten wir uns außerdem – auch im Auftrag der Autoren – bei Susanne Biundo, Peter Borst, Richard Göbel, Birgit Hummel, Manfred Kerber, Achim Posegga, Robert Rehbold, Wolfgang Reif, Prof. Dr. Michael M. Richter, Ingrid Walter, Dr. Christoph Walther und Martin Weigele, die jeweils Teile der Manuskripte gelesen und wichtige Hinweise geliefert haben.

Konstanz und Kaiserslautern, im Juli 1987

Karl Hans Bläsius und Hans-Jürgen Bürckert

Vorwort zur 2. überarbeiteten und erweiterten Auflage

Nachdem die erste Auflage des vorliegenden Buches im Sommer 1991 vergriffen war und aufgrund des regen Interesses hat sich der Oldenbourg-Verlag entschlossen, eine weitere Auflage dieses Buches in Druck zu geben. Die Herausgeber und insbesondere die Autoren waren gerne bereit, für diese Neu-Auflage das Buch zu überarbeiten. Dabei wurden fast alle Kapitel von den jeweiligen Autoren (in einem Fall unter Hinzuziehen eines weiteren Autors (Abschnitte des Kapitels III)) einer intensiven Bearbeitung unterzogen und zum Großteil erweitert bzw. dem neueren Stand der Forschung angepaßt. Besonders erfreulich war, daß sich weitere Autoren fanden, die zwei neue Kapitel – über Logik höherer Stufe und über nicht-klassische Logik – beisteuerten. Auch damit folgt das Buch nun dem aktuelleren Stand der Forschung, der in den letzten Jahren seit der Erst-Auflage (1987) insbesondere in diesen beiden Bereichen zu neuen Resultaten im Hinblick auf die Operationalisierung dieser Logiken und ihre Anwendungen in der Künstlichen Intelligenz gebracht hat. Die beiden neuen Kapitel sind relativ unabhängig von den anderen, wenn sie auch ein gewisses vertieftes Verständnis der Prädikatenlogik erster Stufe voraussetzen – nicht zuletzt, weil sie in weniger bekannte Bereiche der formalen Logik führen.

Aufgrund einiger Kritiken und Rezensionen der ersten Auflage bzw. der englischen Übersetzung möchten wir an dieser Stelle nochmals darauf hinweisen, daß sich das Buch nicht an den Laien richtet, sondern gedacht war und ist als eine Einführung für KI-Forscher und KI-Anwender in die Methoden und formalen Grundlagen der Deduktionssysteme: die Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten und Operationalisierungstechniken für Logik und deduktive Inferenzen. Dabei sollte weniger Wert auf formale Tiefe der Darstellung gelegt, als vielmehr versucht werden, die Materie auch für Leser verständlich aufzubereiten, die weniger versiert sind in mathematischer Logik oder die auf die (beweis-)technischen Hintergründe verzichten wollen, aber sich einen Überblick über die Methoden und Möglichkeiten automatischer Deduktionssysteme verschaffen möchten. Es liegt wohl in der Natur der Sache, daß einige der Kapitel zum tieferen Verständnis der Darlegungen ein zumindest grobes Wissen und Verständnis der Grundlagen der mathematischen Logik erfordern, die wir bei dem angesprochenen Leserkreis allerdings zumindest in Grundzügen erwarten dürften: Die meisten KI-Lehrbücher vermitteln ein ausreichendes Grundwissen in mathematischer Logik.

Wir möchten uns bei allen Autoren dafür bedanken, daß sie die Mühen der Überarbeitung auf sich genommen haben – insbesondere auch den beiden neu hinzugekommen Autoren.

Trier und Saarbrücken, im Januar 1992

Karl Hans Bläsius und Hans-Jürgen Bürckert