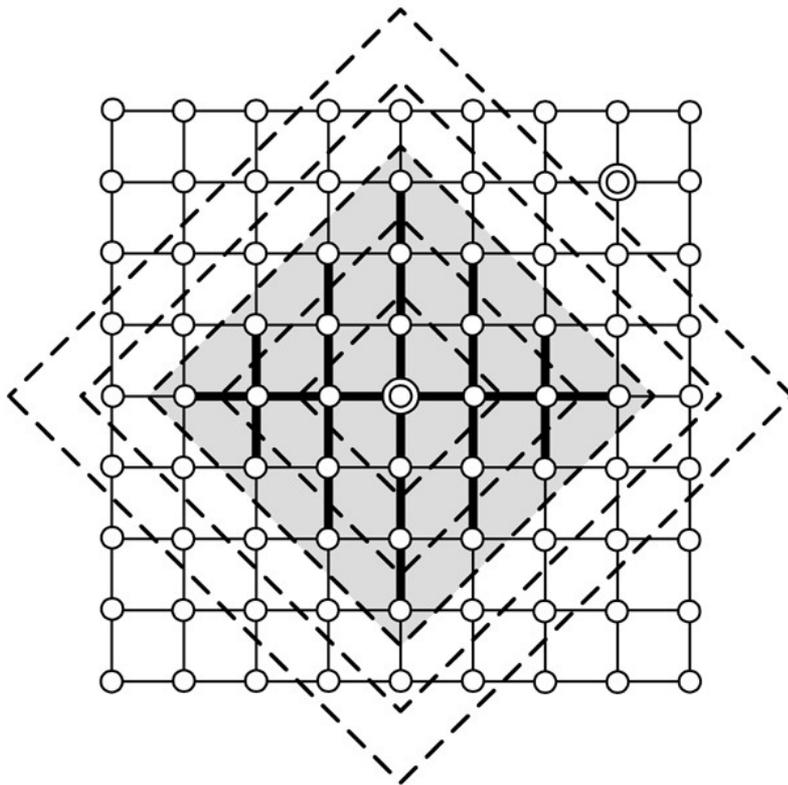




Jan Lunze

# Künstliche Intelligenz für Ingenieure

2. Auflage



Oldenbourg





---

# Künstliche Intelligenz für Ingenieure

---

von  
Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze

---

2., völlig überarbeitete Auflage

---

Oldenbourg Verlag München

---

---

**Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze** studierte von 1970 bis 1974 Technische Kybernetik an der TU Ilmenau; 1980 folgte die Promotion auf dem Gebiet der dezentralen Regelung, 1983 die Habilitation über robuste Regelung. Von 1992 bis 2001 war Jan Lunze Professor für Regelungstechnik an der TU Hamburg-Harburg. Seit 2001 ist er Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum. Gegenstand seiner Forschungsarbeiten sind u.a. die Gebiete der Prozessüberwachung und der Fehlerdiagnose ereignisdiskreter und hybrider Systeme.

#### 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.

© 2010 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH  
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München  
Telefon: (089) 45051-0  
[oldenbourg.de](http://oldenbourg.de)

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

Lektorat: Anton Schmid  
Herstellung: Anna Grosser  
Coverentwurf: Kochan & Partner, München  
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier  
Gesamtherstellung: Grafik + Druck GmbH, München

ISBN 978-3-486-70222-4

# Vorwort

Zur Lösung vieler ingenieurtechnischer Probleme muss man Wissen logisch verarbeiten. So wird aus dem Aufbau eines zu montierenden Gerätes durch logisches Schlussfolgern die Reihenfolge abgeleitet, in der die Teile aneinander zu fügen sind, und daraus die Handlungsfolge für einen Roboter festgelegt. Diagnosesysteme bilden aus Messwerten diskrete Kenngrößen für den aktuellen Prozesszustand und ziehen daraus Schlussfolgerungen über die möglicherweise fehlerbehafteten Komponenten. Intelligente Verkehrsleiteinrichtungen steuern den Straßenverkehr, indem sie aus dem aktuellen Verkehrsaufkommen Geschwindigkeitsvorgaben ableiten und gegebenenfalls Verkehrsströme umleiten.

Um derartige Entscheidungen treffen zu können, ist Wissen über die Problemstellung erforderlich, Beurteilungsvermögen für die möglichen Entscheidungsalternativen sowie die Fähigkeit, Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Künstliche Intelligenz liefert wichtige Grundlagen, um technische Anlagen dazu zu befähigen bzw. um Ingenieure beim Entwurf und der Überwachung solcher Anlagen zu unterstützen. Im Unterschied zu der im Ingenieurbereich verbreiteten Vorgehensweise, Aufgaben in numerisch lösbare Probleme zu überführen, eignen sich die in diesem Buch behandelten Methoden vor allem für diskrete Entscheidungsprobleme, die mit symbolischer Informationsverarbeitung gelöst werden. Für die Realisierung der eingangs genannten Systeme werden häufig beide Vorgehensweisen kombiniert.

Dieses Lehrbuch stellt die Grundlagen der Künstlichen Intelligenz für Ingenieure dar. Es gibt eine detaillierte Einführung in die wichtigsten Methoden der Wissensrepräsentation und der Wissensverarbeitung und zeigt, wie diese Methoden in ingenieurtechnischen Anwendungen eingesetzt werden können.

Damit der Brückenschlag von der Denkwelt der Ingenieure zur Herangehensweise der Künstlichen Intelligenz gelingt, wird auf zwei Dinge besonderer Wert gelegt. Erstens konzentriert sich dieses Lehrbuch auf die in der Technik einsetzbaren Methoden. Neben den logischen Grundlagen der Künstlichen Intelligenz werden die in den letzten Jahren entstandenen Verarbeitungsmethoden für Wissen mit Unsicherheiten behandelt und dabei Verbindungen zu den im Ingenieurbereich eingesetzten wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden hergestellt.

Zweitens wird an zahlreichen Beispielen gezeigt, dass es im Tätigkeitsfeld der Ingenieure viele Probleme gibt, die nicht mit den bewährten Methoden der Ingenieurwissenschaften gelöst werden können, sondern Darstellungs- und Verarbeitungsprinzipien für logisches Denken erfordern. Aus diesem Grunde werden in der ingenieurtechnischen Praxis heute Bayesnetze für die Beschreibung ungenau bekannter Ursache-Wirkungsbeziehungen eingesetzt, Fehlerdiagnosemethoden mit Fehlerbäumen und logischen Modellen, regelbasierte Verfahren zur Lösung von Planungsaufgaben, fuzzylogische Methoden für die Regelung verfahrenstechnischer Prozesse und heuristische Algorithmen für die Routenplanung und die Fahrplangestaltung. Diese und weitere Beispiele sollen die Leser in die Lage versetzen, die Wirksamkeit der hier behandelten

Lösungsansätze für ingenieurtechnische Aufgaben zu beurteilen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

**Inhalt.** In den ersten zwei Kapiteln wird das Anliegen der Künstlichen Intelligenz erläutert und anhand eines einfachen Beispiels gezeigt, welche grundlegenden Probleme bei der Wissensverarbeitung zu lösen sind. Dann konzentriert sich das Lehrbuch auf drei Schwerpunkte:

- **Suche:** Eine wichtige Grundlage der Künstlichen Intelligenz bilden Algorithmen für die Suche in Grafen, die sich in allgemeinerer Form in der Wissensverarbeitung wiederfinden. Viele Begriffe sowie die grundlegende Architektur von Suchsystemen werden im Kapitel 3 für die Grafensuche eingeführt und in den nachfolgenden Kapiteln für regelbasierte und logikbasierte Systeme erweitert.
- **Logik:** In den Kapiteln 4, 6 und 7 werden Regeln und logische Formeln als grundlegende Repräsentationsformen für Wissen behandelt. Ausführlich wird das Resolutionsprinzip zur Verarbeitung derartigen Wissens erläutert und an Beispielen demonstriert.
- **Verarbeitung unsicheren Wissens:** Die Erweiterung der logikbasierten Methoden für die Darstellung und Verarbeitung von unsicherem Wissen in den Kapiteln 10 bis 12 ist für Ingenieur Anwendungen sehr wichtig und führt u. a. auf die in der Praxis vielfach eingesetzten Bayesnetze.

Das Lehrbuch schließt mit einer kurzen Einführung in die Wissensverarbeitung mit strukturierten Objekten und einer Zusammenfassung der Merkmale und der technischen Anwendungsgebiete der Wissensverarbeitung in den Kapiteln 13 und 14. Dabei werden auch Begriffe erläutert, die in der modernen Literatur zu finden sind, aber bei der Darstellung der Grundideen zunächst ausgespart wurden.

Für die Künstlichen Intelligenz gilt in besonderem Maße, dass eine Methode nur dann gut ist, wenn sie sich gut implementieren lässt. Dieser Aspekt wird dadurch hervorgehoben, dass die Erläuterung der Methoden stets in Algorithmen mündet, die problemlos in einer geeigneten Programmiersprache implementiert werden können. Heutige Programmiersprachen verfügen über alle diejenigen Konstrukte, die für Suchverfahren und Symbolmanipulationsmethoden in unterschiedlichen Domänen notwendig sind.

In den Text eingefügt sind zwei Kapitel zur **Softwaretechnik** der Künstlichen Intelligenz. Kapitel 5 zeigt mit einer Einführung in die Programmiersprache LISP, dass die symbolische Informationsverarbeitung in zweckmäßiger Weise auf eine Manipulation von Listen zurückgeführt werden kann. Mit PROLOG wird im Kapitel 8 eine Programmiersprache behandelt, bei der der Interpreter die Suche nach einer Lösung selbst organisiert, so dass die Anwender ihre Probleme nur noch deklarativ zu formulieren brauchen. Beide Kapitel sind keine erschöpfenden Programmieranleitungen, sondern zeigen mit der funktionalen und der logischen Programmierung, welche neuen Programmierstile für die Methoden der Künstlichen Intelligenz zweckmäßig sind. Leser, die sich nur für die Methoden der Künstlichen Intelligenz interessieren, können diese Kapitel ohne Weiteres überspringen.

**Literaturhinweise** am Ende jedes Kapitels weisen auf interessante Originalarbeiten sowie Monografien für ein vertiefendes Studium der behandelten Themen hin. **Übungsaufgaben** regen die Leser dazu an, sich über die hier behandelten Probleme hinaus das Anwendungsgebiet der Künstlichen Intelligenz zu erschließen. Die Lösung der wichtigsten Aufgaben ist im An-

hang 1 zu finden. Mit der **Projektaufgabe** (Anhang 4) können alle behandelten Methoden an einem durchgängigen Anwendungsbeispiel erprobt und verglichen werden. Die **Fragen zur Prüfungsvorbereitung** unterstützen die Wiederholung des behandelten Stoffes.

**Leser.** Dieses Lehrbuch wendet sich in erster Linie an Ingenieure, die die Methoden der Künstlichen Intelligenz in Kombination mit ingenieurtechnischen Verfahren einsetzen wollen. Die hier vermittelte fachübergreifende Sicht ist notwendig, weil „intelligente Maschinen“ nur durch die Kombination von Methoden der Ingenieurwissenschaften mit denen der Informatik entstehen können. Das Buch ist auch für die in der Praxis tätigen Ingenieure gedacht, die die Wissensverarbeitungsmethoden in ihrer Ausbildung nicht kennengelernt haben und sich für eine Erweiterung ihres Methodenspektrums interessieren.

Das Buch setzt nur mathematische Grundkenntnisse und eine gewisse Vertrautheit mit der Programmierung voraus. Die Querbezüge von den Methoden der Künstlichen Intelligenz zu systemtheoretischen Verfahren für die Modellierung und die Analyse kontinuierlicher und ereignisdiskreter dynamischer Systeme gehen über diesen Rahmen hinaus, sind aber für das Verständnis der restlichen Teile des Buches nicht notwendig.

**Zweite Auflage.** Die vorliegende zweite Auflage dieses Lehrbuchs entstand aus einer Neustrukturierung und Überarbeitung der ersten Auflage, in der die damals in zwei Bänden getrennt behandelten Methoden und Anwendungsbeispiele zusammengeführt wurden.

In der Zeit, die seit dem Erscheinen der ersten Auflage vergangen ist, hat sich die Auffassung der Ingenieure von der Künstlichen Intelligenz in mehrerer Weise verändert. In der Mitte der 1990er Jahre versprach man sich von den Methoden der Künstlichen Intelligenz nicht nur neue Repräsentations- und Verarbeitungsformen für Wissen, sondern auch eine neue Softwaretechnik, insbesondere das *rapid prototyping*, und Vorteile durch die avisierte spezielle Hardware, das automatische Programmieren und nichtalgorithmische Lösungsmethoden für Entscheidungsprobleme. Seither haben sich einige dieser Ideen im Ingenieurbereich etabliert, ohne dass man ihre Herkunft stets betont, beispielsweise in der objektorientierten Gestaltung von Softwaresystemen, durch den verbreiteten Einsatz von Klassifikationsmethoden oder im *Model Checking* zur Verifikation diskreter Steuerungen. Eine spezielle Hardware ist heute nicht mehr erforderlich, weil die moderne Rechentechnik auch symbolische Informationen in ausreichender Geschwindigkeit verarbeiten kann.

Allerdings werden die Methoden der Künstlichen Intelligenz noch nicht in der Breite eingesetzt, in der man es sich vor 15 Jahren erhofft hat. In technischen Anwendungsgebieten ist der Einsatz der Wissensverarbeitung auf die Bereiche konzentriert, in denen die Anwendung der Logik unumgänglich ist.

Dieser Wandel hat eine grundlegende Umgestaltung dieses Lehrbuchs erforderlich gemacht, in die auch meine Erfahrungen aus einer gleichnamigen Vorlesung eingegangen sind, die ich seit mehr als 20 Jahren an verschiedenen deutschen Universitäten gehalten habe. Die zweite Auflage des Buchs konzentriert sich auf die logischen Grundlagen der Künstlichen Intelligenz und geht nur noch punktuell auf die Softwaretechnik ein.

**Danksagung.** Ein Buch an der Grenze zwischen Künstlicher Intelligenz und Ingenieurwissenschaften kann nicht ohne einen intensiven Gedankenaustausch mit Vertretern beider Richtungen entstehen. Besonders erwähnen möchte ich gemeinsame Forschungsprojekte und intensive Diskussionen mit Prof. Dr. MARCEL STAROSWIECKI (Lille), Prof. Dr. MOGENS BLANKE (Lyngby), Prof. Dr.-Ing. VOLKER KREBS (Karlsruhe), Dr. LOUISE TRAVE-MASSUYES (Toulouse), Prof. Dr. PETER STRUSS (München) und Prof. Dr.-Ing. FRANK SCHILLER (München). Herr Dr.-Ing. JAN RICHTER (Nürnberg) hat über mehrere Jahre die Übungen zu meiner gleichnamigen Vorlesung gehalten und viele neue Ideen in die Gestaltung der Lehrveranstaltung eingebracht. Eine Reihe von Beispielen habe ich für Weiterbildungsveranstaltungen in der Industrie entwickelt, bei denen nicht primär die Methodik an sich, sondern vor allem die Anwendungsaspekte der hier behandelten Methoden im Mittelpunkt standen. Auch die Diskussionen mit den Industrievertretern haben wesentlich zur Gestaltung dieses Lehrbuchs beigetragen.

Mein Dank gilt weiterhin Frau ANDREA MARSCHALL, die mit großer Geduld und Sorgfalt die Bilder gestaltet hat, Frau Dipl.-Ing. KATRIN LUNZE und Frau HANNELORE HUPP, die die mehrfache Überarbeitung des Textes unterstützt haben, sowie dem Oldenbourg Wissenschaftsverlag für die stets gute Zusammenarbeit. Schließlich danke ich den „Hurtigruten“ für einen ruhigen Platz auf dem Panoramadeck der MS „Mitnatsol“, auf dem ich die letzten Korrekturen an dieser Auflage vorgenommen habe. Alle verbliebenen Fehler sind auf die herrliche norwegische Landschaft zurückzuführen, an der ich in dieser Zeit vorbeifuhr.

Münster, im Juli 2010

*J. Lunze*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Anwendungsbeispiele</b> .....	xvii
<b>Hinweise zum Gebrauch des Buches</b> .....	xxiii

## Teil 1: Problemlösen durch Suche

<b>1 Das Fachgebiet Künstliche Intelligenz</b> .....	1
1.1 Anliegen der Künstlichen Intelligenz .....	1
1.2 Ausgangspunkte .....	6
1.2.1 Mathematische Logik .....	6
1.2.2 Algorithmentheorie .....	8
1.2.3 Rechentechnik .....	12
1.3 Kurzer historischer Rückblick .....	13
1.3.1 Geburtsstunde: Dartmouth-Konferenz 1956 .....	13
1.3.2 Die klassische Epoche: Spiele und logisches Schließen .....	13
1.3.3 Erste Erfolge: Verstehen natürlicher Sprache .....	15
1.3.4 Wissensbasierte Systeme und KI-Markt .....	15
1.3.5 Entwicklungstrend: Kognitive Systeme .....	16
1.4 Ingenieurtechnische Anwendungen der Künstlichen Intelligenz .....	17
1.4.1 Grundstruktur intelligenter technischer Systeme .....	17
1.4.2 Intelligente Agenten .....	21
1.4.3 Impulse der Künstlichen Intelligenz für die Lösung ingenieurtechnischer Probleme .....	23
1.5 Möglichkeiten und Grenzen der Künstlichen Intelligenz .....	26
Literaturhinweise .....	28
<b>2 Einführungsbeispiel</b> .....	31
2.1 Qualitative und quantitative Beschreibung eines Wasserversorgungssystems ..	31
2.2 Einfache Methoden zur Verarbeitung von Regeln .....	37
2.2.1 Umformung der Wissensbasis .....	37
2.2.2 Verschachtelung der Regeln in einem Entscheidungsbaum .....	38
2.2.3 Anordnung der Regeln als Wissensbasis .....	42
2.3 Probleme der Wissensverarbeitung .....	43
Literaturhinweise .....	44

<b>3</b>	<b>Grafensuche</b> . . . . .	45
3.1	Grundbegriffe der Graphentheorie . . . . .	45
3.1.1	Ungerichtete Grafen . . . . .	45
3.1.2	Suchprobleme . . . . .	47
3.2	Bestimmung von Erreichbarkeitsbäumen . . . . .	48
3.2.1	Tremaux-Algorithmus . . . . .	48
3.2.2	Geradeaussuche . . . . .	49
3.2.3	Breite-zuerst-Suche . . . . .	52
3.2.4	Tiefe-zuerst-Suche . . . . .	56
3.2.5	Eigenschaften der Suchalgorithmen . . . . .	59
3.3	Bestimmung von Pfaden . . . . .	59
3.3.1	Tiefe-zuerst-Suche von Pfaden . . . . .	59
3.3.2	Optimale Pfade . . . . .	62
3.3.3	DIJKSTRA-Algorithmus . . . . .	62
3.3.4	Gleiche-Kosten-Suche . . . . .	72
3.4	Heuristische Suche . . . . .	72
3.4.1	Erweiterungsmöglichkeiten der blinden Suche . . . . .	72
3.4.2	A*-Algorithmus . . . . .	74
3.5	Anwendungsbeispiel: Bahnplanung für Industrieroboter . . . . .	82
3.5.1	Aufgabenstellung und Lösungsweg . . . . .	82
3.5.2	Beschreibung kollisionsfreier Bahnen im Konfigurationsraum . . . . .	83
3.5.3	Planungsalgorithmus . . . . .	85
3.5.4	Erweiterungen . . . . .	86
3.6	Zusammenfassung . . . . .	87
3.6.1	Problemlösen durch Suche . . . . .	87
3.6.2	Struktur und Eigenschaften von Suchsystemen . . . . .	88
	Literaturhinweise . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Regelbasierte Wissensverarbeitung</b> . . . . .	91
4.1	Zustandsraumdarstellung von Wissensverarbeitungsproblemen . . . . .	91
4.1.1	Darstellung von Wissen in Form von Regeln . . . . .	91
4.1.2	Zustandsraumdarstellung . . . . .	93
4.1.3	Wissensverarbeitung als Grafensuche . . . . .	97
4.2	Problemlösen durch Vorwärtsverkettung von Regeln . . . . .	99
4.2.1	Vorwärtsverkettung . . . . .	99
4.2.2	Verarbeitung von Schlussfolgerungsregeln . . . . .	99
4.2.3	Verarbeitung von Aktionsregeln . . . . .	103
4.2.4	Beispiel: Zusammenfassung von Widerstandsnetzwerken . . . . .	103
4.2.5	Kommutative und nichtkommutative regelbasierte Systeme . . . . .	110
4.2.6	Beispiel: Lösung von Packproblemen . . . . .	113
4.3	Problemlösen durch Rückwärtsverkettung von Regeln . . . . .	119
4.3.1	Rückwärtsverkettung . . . . .	119
4.3.2	Anwendungsgebiete der Rückwärtsverkettung . . . . .	122
4.4	Architektur und Einsatzgebiete regelbasierter Systeme . . . . .	123
4.4.1	Allgemeiner Wissensverarbeitungsalgorithmus . . . . .	123

4.4.2	Architektur regelbasierter Systeme . . . . .	125
4.4.3	Einsatzcharakteristika regelbasierter Systeme . . . . .	126
	Literaturhinweise . . . . .	129
<b>5</b>	<b>Funktionale Programmierung in LISP</b> . . . . .	<b>131</b>
5.1	Einführung in die funktionale Programmierung . . . . .	131
5.1.1	Grundidee von LISP . . . . .	131
5.1.2	Rekursive Funktionen . . . . .	134
5.2	Syntax von LISP . . . . .	136
5.2.1	Listen . . . . .	136
5.2.2	LISP-Ausdrücke . . . . .	139
5.2.3	Spezielle Auswertungsregeln . . . . .	140
5.2.4	Verarbeitung von Listen . . . . .	143
5.2.5	Definition von Funktionen . . . . .	149
5.2.6	Bedingte Anweisungen und Let-Konstruktionen . . . . .	150
5.3	Programmbeispiel: Tiefe-zuerst-Suche in Grafen . . . . .	152
5.3.1	Programmelemente . . . . .	152
5.3.2	Zusammenfassung zur Funktion „Erreichbarkeitsbaum“ . . . . .	157
5.4	Merkmale der Programmiersprache LISP . . . . .	160
	Literaturhinweise . . . . .	162

## Teil 2: Logikbasierte Wissensverarbeitung

<b>6</b>	<b>Aussagenlogik</b> . . . . .	<b>163</b>
6.1	Einführung in die logikbasierte Wissensverarbeitung . . . . .	163
6.2	Grundlagen der Aussagenlogik . . . . .	164
6.2.1	Aussagen und logische Ausdrücke . . . . .	164
6.2.2	Semantik logischer Ausdrücke . . . . .	168
6.2.3	Logische Gesetze . . . . .	175
6.2.4	Logische Ausdrücke in Klauselform . . . . .	177
6.3	Aussagenkalkül . . . . .	179
6.3.1	Folgerungen . . . . .	179
6.3.2	Ableitungsregeln der Aussagenlogik . . . . .	181
6.3.3	Beweis aussagenlogischer Ausdrücke . . . . .	185
6.3.4	Formale Systeme der Aussagenlogik . . . . .	188
6.3.5	Eigenschaften des Aussagenkalküls . . . . .	189
6.4	Problemlösen durch Resolution . . . . .	190
6.4.1	Resolutionsprinzip der Aussagenlogik . . . . .	190
6.4.2	Widerspruchsbeweis . . . . .	192
6.4.3	Resolutionskalkül . . . . .	194
6.4.4	Steuerung des Inferenzprozesses . . . . .	197
6.5	Anwendungsbeispiel: Verifikation von Steuerungen . . . . .	202
	Literaturhinweise . . . . .	205

<b>7</b>	<b>Prädikatenlogik</b> .....	207
7.1	Grundlagen der Prädikatenlogik .....	207
7.1.1	Prädikate, logische Ausdrücke und Aussageformen .....	207
7.1.2	Prädikatenlogische Ausdrücke in Klauselform .....	212
7.1.3	Semantik prädikatenlogischer Ausdrücke .....	214
7.2	Prädikatenkalkül .....	216
7.2.1	Resolutionsregel der Prädikatenlogik .....	216
7.2.2	Resolutionskalkül .....	219
7.2.3	Merkmale von Resolutionssystemen .....	222
7.3	Resolutionswiderlegung in der logischen Programmierung .....	224
7.3.1	Resolutionsregel für Hornklauseln .....	224
7.3.2	Beweisverfahren der logischen Programmierung .....	227
7.4	Logik als Grundlage der Wissensrepräsentation und der Wissensverarbeitung ..	231
7.4.1	Modellierung technischer Systeme durch logische Ausdrücke .....	231
7.4.2	Beispiel: Prädikatenlogische Beschreibung von Planungsaufgaben ....	232
7.4.3	Vergleich von regelbasierter und logikbasierter Wissensverarbeitung ..	237
7.4.4	Erweiterungsmöglichkeiten der klassischen Logik .....	238
	Literaturhinweise .....	239
<b>8</b>	<b>Logische Programmierung in PROLOG</b> .....	241
8.1	Einführung in die logische Programmierung .....	241
8.2	Syntax von PROLOG .....	242
8.3	Abarbeitung logischer Programme .....	244
8.3.1	Semantik logischer Programme .....	244
8.3.2	Steuerfluss bei der Verarbeitung logischer Programme .....	245
8.3.3	Interpretation des Ergebnisses .....	249
8.4	Programmelemente .....	251
8.4.1	Verarbeitung von Listen .....	251
8.4.2	Rekursive Programmierung .....	253
8.4.3	Built-in-Prädikate .....	254
8.5	Programmbeispiele .....	259
8.5.1	Bestimmung von Pfaden in gerichteten Grafen .....	259
8.5.2	Zusammenfassung eines Widerstandsnetzwerkes .....	265
8.5.3	Handlungsplanung für Roboter .....	269
8.6	Anwendungsgebiete von PROLOG .....	274
	Literaturhinweise .....	276

### Teil 3: Verarbeitung unsicheren Wissens

<b>9</b>	<b>Nichtmonotones Schließen und ATMS</b> .....	277
9.1	Probleme und Lösungswege für die Verarbeitung unsicheren Wissens .....	277
9.1.1	Quellen für die Unbestimmtheiten der Wissensbasis .....	278
9.1.2	Probleme der Darstellung und der Verarbeitung unsicheren Wissens ...	281

9.1.3	Überblick über die Behandlungsmethoden für unsicheres Wissen . . . . .	282
9.2	Darstellung veränderlichen Wissens . . . . .	283
9.3	Grundidee des ATMS . . . . .	287
9.3.1	Begründungen . . . . .	287
9.3.2	ATMS-Graf . . . . .	288
9.3.3	Lokale und globale Umgebungen . . . . .	290
9.4	Erweiterungen . . . . .	294
9.4.1	Verwaltung logischer Ausdrücke . . . . .	294
9.4.2	Behandlung logischer Widersprüche . . . . .	296
9.4.3	Zusammenspiel von Problemlöser und ATMS . . . . .	299
9.5	Anwendungsbeispiel: Analyse eines verfahrenstechnischen Prozesses . . . . .	301
9.5.1	Aussagenlogisches Modell . . . . .	301
9.5.2	Bildung des ATMS-Grafen . . . . .	303
9.5.3	Analyse und Prozessüberwachung mit dem ATMS . . . . .	307
9.6	Fehlerdiagnose mit ATMS . . . . .	311
9.6.1	Modellbasierte Diagnose . . . . .	311
9.6.2	Diagnoseprinzip GDE . . . . .	314
9.6.3	Realisierung von GDE mit einem ATMS . . . . .	315
9.6.4	Erweiterungen . . . . .	319
	Literaturhinweise . . . . .	324
<b>10</b>	<b>Mehrwertige und unscharfe Logik . . . . .</b>	<b>325</b>
10.1	Mehrwertige Logiken . . . . .	325
10.1.1	Logische Ausdrücke der dreiwertigen Logik . . . . .	325
10.1.2	Ableitungsregel und Theorembeweisen . . . . .	327
10.1.3	Erweiterung von dreiwertiger auf mehrwertige Logiken . . . . .	329
10.2	Wissensverarbeitung mit unscharfen Mengen . . . . .	330
10.2.1	Unscharfe Mengen . . . . .	330
10.2.2	Unscharfe Mengen in der Wissensrepräsentation . . . . .	334
10.2.3	Unscharfe Logik . . . . .	337
10.2.4	Fuzzifizierung und Defuzzifizierung . . . . .	342
10.2.5	Anwendungsbeispiel: Fuzzyregelung . . . . .	345
	Literaturhinweise . . . . .	354
<b>11</b>	<b>Probabilistische Logik und Bayesnetze . . . . .</b>	<b>355</b>
11.1	Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle . . . . .	355
11.1.1	Übersicht über die wahrscheinlichkeitstheoretische Behandlung unsicheren Wissens . . . . .	355
11.1.2	Aussagenlogische Beschreibung zufälliger Ereignisse . . . . .	356
11.1.3	Wahrscheinlichkeit logischer Ausdrücke . . . . .	360
11.2	Probabilistische Logik . . . . .	364
11.2.1	Modus Ponens der probabilistischen Logik . . . . .	364
11.2.2	Fehlende Modularität der probabilistischen Logik . . . . .	368
11.2.3	Bayessche Inferenzregel . . . . .	372
11.2.4	Lösung von Diagnoseaufgaben . . . . .	374

11.2.5	Aussagekraft probabilistischer Folgerungen	377
11.2.6	Anwendungsgebiete der probabilistischen Logik	379
11.3	Bayesnetze	380
11.3.1	Abhängige und unabhängige Ereignisse	380
11.3.2	Modellbildung mit Bayesnetzen	388
11.3.3	Kausales Schließen mit Bayesnetzen	397
11.3.4	Diagnostisches Schließen mit Bayesnetzen	403
11.3.5	Erweiterung der Bayesnetze	408
11.4	Zusammenfassung und Wertung	409
	Literaturhinweise	412
<b>12</b>	<b>Heuristische Verfahren zur Darstellung und zur Verarbeitung unsicheren Wissens</b>	<b>413</b>
12.1	Wissensverarbeitung auf der Grundlage der Evidenztheorie	413
12.1.1	Grundlagen der Evidenztheorie	414
12.1.2	Dempster-Regel	417
12.1.3	Erweiterung der Aussagenlogik mit Hilfe der Evidenztheorie	418
12.2	Heuristische Methoden	422
12.2.1	Beschreibung der Unbestimmtheit des Wissens durch Konfidenz-	
	faktoren	422
12.2.2	Verarbeitung der Konfidenzfaktoren bei Ableitungen	424
12.3	Vergleichende Zusammenfassung der Methoden zur Verarbeitung unsicheren Wissens	426
	Literaturhinweise	428
<b>13</b>	<b>Wissensverarbeitung mit strukturierten Objekten</b>	<b>429</b>
13.1	Begriffsbildung und strukturierte Objekte	429
13.1.1	Begriffshierarchien und Vererbung von Eigenschaften	430
13.1.2	Multihierarchien und Sichten	432
13.2	Semantische Netze	433
13.2.1	Syntax und Semantik	433
13.2.2	Kausale Netze	435
13.3	Frames	436
13.3.1	Grundidee der Wissensrepräsentation mit Frames	436
13.3.2	Anordnung von Frames in Generalisierungshierarchien	439
13.3.3	Erweiterungsmöglichkeiten	440
13.3.4	Vergleich von Frames mit anderen Wissenrepräsentationsformen	442
	Literaturhinweise	443
<b>14</b>	<b>Merkmale und technische Anwendungsgebiete der Wissensverarbeitung</b>	<b>445</b>
14.1	Struktur wissensbasierter Systeme	445
14.2	Wissensrepräsentation	446
14.2.1	Modellbildung	446
14.2.2	Deklaratives und prozedurales Wissen	448
14.2.3	Anforderungen an die Wissensrepräsentation	449

---

14.2.4 Wissensrepräsentationsmodelle .....	451
14.2.5 Modularität der Wissensrepräsentation .....	453
14.2.6 Wissenserwerb .....	454
14.3 Wissensverarbeitung .....	455
14.3.1 Zusammenfassung der Verarbeitungsmethoden .....	455
14.3.2 Problemspezifikation und Algorithmierung .....	457
14.4 Ingenieurtechnische Anwendungsgebiete .....	459
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>465</b>

## **Anhänge**

<b>Anhang 1: Lösung von Übungsaufgaben .....</b>	<b>471</b>
<b>Anhang 2: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung .....</b>	<b>493</b>
<b>Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung .....</b>	<b>499</b>
<b>Anhang 4: Projektaufgabe .....</b>	<b>503</b>
<b>Anhang 5: Fachwörter deutsch – englisch .....</b>	<b>507</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>511</b>



# Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

## Intelligente Roboter

Intelligente Robotersteuerung (Beispiel 1.1) .....	20
<b>• Handlungsplanung und Bahnplanung für Industrieroboter</b>	
Bahnplanung für Industrieroboter (Abschn. 3.5) .....	82
Bahnplanung für einen Roboter mit zwei Freiheitsgraden (Aufgabe 3.8) .....	86
Regeln für die Handlungsplanung von Robotern (Aufgabe 4.11) .....	118
Wissensbasis für die Handlungsplanung (Beispiel 13.2) .....	438
PROLOG-Programm für die Handlungsplanung (Abschn. 8.5.3) .....	269
Erweiterung des PROLOG-Programms (Aufgabe 8.8) .....	272
<b>• Handlungsplanung für einen Containerbahnhof</b>	
Zustandsraum der „Klötzchenwelt“ (Aufgabe 4.1 mit Lösung) .....	97, 474
Handlungsplanung für einen Containerbahnhof (Aufgabe 5.6) .....	160
Handlungsplanung mit dem Planungssystem STRIPS (Beispiel 7.5) .....	233
Handlungsplanung für zwei kooperierende Roboter (Aufgabe 7.8) .....	236
Handlungsplanung für einen Serviceroboter (Aufgabe 7.9) .....	236
PROLOG-Programm zum Stapeln von Containern (Aufgabe 8.9) .....	273
Strukturierung der Modellbibliothek für einen Containerbahnhof (Aufgabe 13.3) .....	443

## Fertigungsautomatisierung

Ressourcenzuteilung in einer Fertigungszelle (Aufgabe 8.10) .....	273
Verifikation von Steuerungen (Abschn. 6.5) .....	202
Fehleranalyse einer Fertigungszelle (Aufgabe 11.4 mit Lösung) .....	379, 487
<b>• Lösung eines Packproblems</b>	
Regelbasierte Lösung (Abschn. 4.2.6) .....	113
Lösung bei unterschiedlichem Elementevorrat (Aufgabe 4.10) .....	118

## Intelligente Messsysteme

Verarbeitung von Fehlern bei einer Druckmessung (Beispiel 10.2) .....	335
Wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell eines Messgerätes (Beispiel 11.5) .....	384
Sensorfusion mit Hilfe der Evidenztheorie (Aufgabe 12.1) .....	421

## Steuerung verfahrenstechnischer Prozesse

PROLOG-Programm zur Auswertung von Alarmen (Aufgabe 8.11 mit Lösung) .....	274, 481
Wissensbasis für ein Reglerentwurfssystem (Aufgabe 13.4) .....	443
<b>• Fuzzyregelung eines Behälters</b>	
Fuzzyregelung des Behälterfüllstandes (Beispiel 10.4) .....	347
Entwurf eines Fuzzyreglers (Aufgabe 10.3) .....	352
Erweiterung der Fuzzy-Füllstandsregelung (Aufgabe 10.4) .....	352
<b>• Diagnose einer Flaschenabfüllanlage</b>	
Modellierung einer Flaschenabfüllanlage mit Bayesnetz (Beispiel 11.8) .....	394
Bedingt unabhängige Ereignisse bei der Flaschenabfüllung (Aufgabe 11.5 mit Lösung) ...	397, 487
Diagnose mit einem Bayesnetz (Beispiel 11.10) .....	406
Erweiterung der Diagnose (Aufgabe 11.7) .....	407
<b>• Modellierung und Überwachung eines Wasserversorgungssystems</b>	
Qualitative und quantitative Beschreibung (Abschn. 2.1) .....	31
Entscheidungsbaum für die Verhaltensanalyse (Abschn. 2.2.2) .....	38
Erweiterung des Entscheidungsbaumes (Aufgaben 2.2 und 2.3) .....	41, 41
Regelbasierte Überwachung des Wasserversorgungssystems (Beispiele 4.1 und 4.2) .....	92, 100
Suchraum bei der Vorwärtsverkettung von Regeln (Aufgabe 4.3) .....	102
LISP-Programm zur Vorwärtsverkettung von Regeln (Aufgabe 5.5) .....	160
Rückwärtsverkettung von Schlussfolgerungsregeln (Beispiel 4.3) .....	120
Verhaltensvorhersage mit dem Aussagenkalkül (Beispiel 6.6) .....	186
ATMS-Graf zur Beschreibung des Wasserversorgungssystems (Beispiel 9.1) .....	309
Vorhersage des Verhaltens mit mehrwertiger Logik (Beispiel 10.1) .....	328
Fehlerdiagnose mit dreiwertiger Logik (Aufgabe 10.2) .....	330
Fehlerdiagnose mit unscharfer Logik (Beispiel 10.3) .....	339
Aussagenlogische Beschreibung zufälliger Ereignisse (Beispiel 11.1) .....	358
Vorhersage des Verhaltens mit probabilistischer Logik (Beispiel 11.2) .....	366

Verhaltensvorhersage mit einem Bayesnetz (Beispiel 11.9 und Aufgabe 11.6) .....	401, 403
Fehlerdiagnose bei niedrigem Wasserdruck (Aufgabe 11.9) .....	407
Erweitertes Bayesnetz für die Fehlerdiagnose (Aufgabe 11.11 mit Lösung) .....	409, 491
<b>• Alarmauswertung für einen verfahrenstechnischen Prozess</b>	
Überwachung eines verfahrenstechnischen Prozesses (Abschn. 9.5) .....	301
Einfache Auswertung von Alarmen (Aufgabe 8.11) .....	274
Logikbasierte Diagnose eines Behältersystems mit PROLOG (Aufgabe 8.12 mit Lösung) .	274, 483
Anwendung des ATMS auf ein Behältersystem (Aufgabe 9.2 mit Lösung) .....	309, 483

## Fehlerdiagnose von Fahrzeugkomponenten

Fehlerdiagnose eines Motorkühlsystems mit probabilistischer Logik (Beispiel 11.4) .....	376
Diagnose einer Reifenpanne (Aufgabe 11.2 mit Lösung) .....	377, 485
Taxonomie für die Fehlersuche in einem Kraftfahrzeug (Aufgabe 13.2) .....	433
Realisierung eines Fahrzeugconfigurators (Projektaufgabe A4.1) .....	503
<b>• Beschreibung und Diagnose einer Fahrzeugbeleuchtung</b>	
Fehlerdiagnose einer Fahrzeugbeleuchtung (Aufgabe 1.3) .....	26
Regelbasierte Analyse durch Vorwärtsverkettung (Aufgabe 4.6 mit Lösung) .....	103, 475
Aussagenlogische Beschreibung der Fahrzeugbeleuchtung (Aufgabe 6.12) .....	196
Modellbasierte Diagnose mit einem ATMS (Beispiel 9.2) .....	313
Beschreibung der fehlerfreien Arbeitsweise durch einen ATMS-Grafen (Beispiel 9.3) ....	315
Diagnose mit dem Verfahren GDE (Beispiel 9.4 und Aufgabe 9.3) .....	317, 322
Erweiterung der Diagnose (Beispiel 9.5 und Aufgabe 9.4) .....	320, 323
Analyse der Fahrzeugbeleuchtung mit probabilistischer Logik (Aufgabe 11.1) .....	371
Fehlerdiagnose mit einem Bayesnetz (Aufgabe 11.8) .....	407

## Wissensbasierte Systeme in der Verkehrstechnik

Planung einer Fahrtroute in Amsterdam (Aufgabe 3.6 mit Lösung) .....	80, 473
Routenplanung im Straßen- und Eisenbahnverkehr mit dem A*-Algorithmus (Aufgabe 3.7)	81
<b>• Ampelsteuerung</b>	
Regeln zur Steuerung einer Verkehrsampel (Aufgabe 4.15) .....	129
Verifikation einer Ampelsteuerung (Beispiel 6.10) .....	203