

# Inhaltsverzeichnis

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

## Einführung in die Künstliche Intelligenz

<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

## Teil 1: Problemlösen durch Suche

<b>3</b>	<b>Graphensuche .....</b>	45
3.1	Grundbegriffe der Graphentheorie.....	45
3.1.1	Vorgehensweise .....	45
3.1.2	Ungerichtete Graphen .....	46
3.1.3	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.....	60
3.3.1	Tiefe-zuerst-Suche von Pfaden .....	60
3.3.2	Optimale Pfade .....	62
3.3.3	DIJKSTRA-Algorithmus .....	63
3.3.4	Gleiche-Kosten-Suche .....	73
3.4	Heuristische Suche .....	73
3.4.1	Erweiterungsmöglichkeiten der blinden Suche .....	73
3.4.2	A*-Algorithmus .....	76
3.5	Anwendungsbeispiel: Bahnanplanung für Industrieroboter .....	84
3.5.1	Aufgabenstellung und Lösungsweg .....	84
3.5.2	Beschreibung kollisionsfreier Bahnen im Konfigurationsraum .....	84
3.5.3	Planungsalgorithmus .....	87
3.5.4	Erweiterungen.....	88
3.6	Zusammenfassung.....	89
3.6.1	Problemlösen durch Suche .....	89
3.6.2	Struktur und Eigenschaften von Suchsystemen.....	89
	Literaturhinweise.....	92
<b>4</b>	<b>Regelbasierte Wissensverarbeitung.....</b>	93
4.1	Zustandsraumdarstellung von Wissensverarbeitungsproblemen .....	93
4.1.1	Darstellung von Wissen in Form von Regeln .....	93
4.1.2	Zustandsraumdarstellung.....	95
4.1.3	Wissensverarbeitung als Graphensuche .....	99
4.2	Problemlösen durch Vorwärtsverkettung von Regeln .....	101
4.2.1	Vorwärtsverkettung .....	101
4.2.2	Verarbeitung von Schlussfolgerungsregeln .....	102
4.2.3	Verarbeitung von Aktionsregeln .....	105

4.2.4	Beispiel: Zusammenfassung von Widerstandsnetzwerken . . . . .	106
4.2.5	Kommutative und nichtkommutative regelbasierte Systeme . . . . .	113
4.2.6	Beispiel: Lösung von Packproblemen . . . . .	115
4.3	Problemlösen durch Rückwärtsverkettung von Regeln . . . . .	122
4.3.1	Rückwärtsverkettung . . . . .	122
4.3.2	Anwendungsgebiete der Rückwärtsverkettung . . . . .	125
4.4	Architektur und Einsatzgebiete regelbasierter Systeme . . . . .	125
4.4.1	Allgemeiner Wissensverarbeitungsalgorithmus . . . . .	125
4.4.2	Architektur regelbasierter Systeme . . . . .	127
4.4.3	Einsatzcharakteristika regelbasierter Systeme . . . . .	129
	Literaturhinweise . . . . .	131
<b>5</b>	<b>Wissensverarbeitung mit strukturierten Objekten</b> . . . . .	133
5.1	Begriffsbildung und strukturierte Objekte . . . . .	133
5.1.1	Begriffshierarchien und Vererbung von Eigenschaften . . . . .	134
5.1.2	Multihierarchien und Sichten . . . . .	136
5.2	Semantische Netze . . . . .	137
5.2.1	Syntax und Semantik . . . . .	137
5.2.2	Kausale Netze . . . . .	139
5.3	Frames . . . . .	143
5.3.1	Grundidee der Wissensrepräsentation mit Frames . . . . .	143
5.3.2	Anordnung von Frames in Generalisierungshierarchien . . . . .	145
5.3.3	Erweiterungsmöglichkeiten . . . . .	146
5.3.4	Vergleich von Frames mit anderen Wissenrepräsentationsformen . . . . .	149
	Literaturhinweise . . . . .	150
<b>6</b>	<b>Funktionale Programmierung in LISP</b> . . . . .	151
6.1	Einführung in die funktionale Programmierung . . . . .	151
6.1.1	Grundidee von LISP . . . . .	151
6.1.2	Rekursive Funktionen . . . . .	154
6.2	Syntax von LISP . . . . .	156
6.2.1	Listen . . . . .	156
6.2.2	LISP-Ausdrücke . . . . .	159
6.2.3	Spezielle Auswertungsregeln . . . . .	161
6.2.4	Verarbeitung von Listen . . . . .	163
6.2.5	Definition von Funktionen . . . . .	169
6.2.6	Bedingte Anweisungen und Let-Konstruktionen . . . . .	170
6.3	Programmbeispiel: Tiefe-zuerst-Suche in Graphen . . . . .	172
6.3.1	Programmelemente . . . . .	172
6.3.2	Zusammenfassung zur Funktion „Erreichbarkeitsbaum“ . . . . .	178
6.4	Merkmale der Programmiersprache LISP . . . . .	181
	Literaturhinweise . . . . .	183

## Teil 2: Logikbasierte Wissensverarbeitung

<b>7 Aussagenlogik</b> .....	185
7.1 Einführung in die logikbasierte Wissensverarbeitung .....	185
7.2 Grundlagen der Aussagenlogik .....	186
7.2.1 Aussagen und logische Ausdrücke .....	186
7.2.2 Semantik logischer Ausdrücke .....	191
7.2.3 Logische Gesetze .....	198
7.2.4 Logische Ausdrücke in Klauselform .....	200
7.3 Aussagenkalkül .....	202
7.3.1 Folgerungen .....	202
7.3.2 Ableitungsregeln der Aussagenlogik .....	204
7.3.3 Beweis aussagenlogischer Ausdrücke .....	208
7.3.4 Eigenschaften des Aussagenkalküls .....	210
7.3.5 Formale Systeme der Aussagenlogik .....	211
7.4 Problemlösen durch Resolution .....	212
7.4.1 Resolutionsprinzip der Aussagenlogik .....	212
7.4.2 Widerspruchsbeweis .....	215
7.4.3 Resolutionskalkül .....	217
7.4.4 Steuerung des Inferenzprozesses .....	220
7.5 Anwendungsbeispiel: Verifikation von Steuerungen .....	225
Literaturhinweise .....	229
<b>8 Prädikatenlogik</b> .....	231
8.1 Grundlagen der Prädikatenlogik .....	231
8.1.1 Prädikate, logische Ausdrücke und Aussageformen .....	231
8.1.2 Prädikatenlogische Ausdrücke in Klauselform .....	236
8.1.3 Semantik prädikatenlogischer Ausdrücke .....	238
8.2 Prädikatenkalkül .....	240
8.2.1 Resolutionsregel der Prädikatenlogik .....	240
8.2.2 Resolutionskalkül .....	243
8.2.3 Merkmale von Resolutionssystemen .....	246
8.3 Resolutionswiderlegung in der logischen Programmierung .....	249
8.3.1 Resolutionsregel für Hornklauseln .....	249
8.3.2 Beweisverfahren der logischen Programmierung .....	252
8.4 Logik als Grundlage der Wissensrepräsentation und der Wissensverarbeitung .....	256
8.4.1 Modellierung technischer Systeme durch logische Ausdrücke .....	256
8.4.2 Beispiel: Prädikatenlogische Beschreibung von Planungsaufgaben .....	257
8.4.3 Vergleich von regelbasierter und logikbasierter Wissensverarbeitung .....	262
8.4.4 Erweiterungsmöglichkeiten der klassischen Logik .....	263
Literaturhinweise .....	264

---

<b>9 Logische Programmierung in PROLOG</b> .....	267
9.1 Einführung in die logische Programmierung .....	267
9.2 Syntax von PROLOG .....	268
9.3 Abarbeitung logischer Programme .....	270
9.3.1 Semantik logischer Programme .....	270
9.3.2 Steuerfluss bei der Verarbeitung logischer Programme .....	271
9.3.3 Interpretation des Ergebnisses .....	275
9.4 Programmelemente .....	277
9.4.1 Listen .....	277
9.4.2 Rekursive Programmierung .....	279
9.4.3 Built-in-Prädikate .....	280
9.5 Programmbeispiele .....	286
9.5.1 Bestimmung von Pfaden in gerichteten Graphen .....	286
9.5.2 Zusammenfassung eines Widerstandsnetzwerkes .....	292
9.5.3 Handlungsplanung für Roboter .....	296
9.6 Anwendungsbereiche von PROLOG .....	301
Literaturhinweise .....	303

### Teil 3: Verarbeitung unsicherer Wissens

<b>10 Nichtmonotonen Schließen und ATMS</b> .....	305
10.1 Probleme und Lösungswege für die Verarbeitung unsicherer Wissens .....	305
10.1.1 Quellen für die Unbestimmtheiten der Wissensbasis .....	306
10.1.2 Probleme der Darstellung und der Verarbeitung unsicherer Wissens .....	309
10.1.3 Überblick über die Behandlungsmethoden für unsicheres Wissen .....	310
10.2 Darstellung veränderlichen Wissens .....	312
10.3 Grundidee des ATMS .....	316
10.3.1 Begründungen .....	316
10.3.2 ATMS-Graph .....	317
10.3.3 Lokale und globale Umgebungen .....	319
10.4 Erweiterungen .....	323
10.4.1 Verwaltung logischer Ausdrücke .....	323
10.4.2 Behandlung logischer Widersprüche .....	325
10.4.3 Zusammenspiel von Problemlöser und ATMS .....	328
10.5 Anwendungsbeispiel: Analyse eines verfahrenstechnischen Prozesses .....	330
10.5.1 Aussagenlogisches Modell .....	330
10.5.2 Bildung des ATMS-Graphen .....	333
10.5.3 Analyse und Prozessüberwachung mit dem ATMS .....	335
10.6 Fehlerdiagnose mit ATMS .....	339
10.6.1 Modellbasierte Diagnose .....	339
10.6.2 Diagnoseprinzip GDE .....	342
10.6.3 Realisierung von GDE mit einem ATMS .....	343

10.6.4 Erweiterungen .....	348
Literaturhinweise.....	352
<b>11 Mehrwertige und unscharfe Logik .....</b>	<b>355</b>
11.1 Mehrwertige Logiken .....	355
11.1.1 Logische Ausdrücke der dreiwertigen Logik.....	355
11.1.2 Ableitungsregel und Theorembeweisen .....	357
11.1.3 Erweiterung von dreiwertiger auf mehrwertige Logiken .....	359
11.2 Wissensverarbeitung mit unscharfen Mengen .....	360
11.2.1 Unscharfe Mengen .....	360
11.2.2 Unscharfe Mengen in der Wissensrepräsentation .....	364
11.2.3 Unscharfe Logik .....	367
11.2.4 Fuzzifizierung und Defuzzifizierung .....	372
11.2.5 Anwendungsbeispiel: Fuzzyregelung.....	375
Literaturhinweise.....	384
<b>12 Probabilistische Logik und Bayesnetze .....</b>	<b>385</b>
12.1 Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle .....	385
12.1.1 Übersicht über die wahrscheinlichkeitstheoretische Behandlung unsicheren Wissens .....	385
12.1.2 Aussagenlogische Beschreibung zufälliger Ereignisse .....	386
12.1.3 Wahrscheinlichkeit logischer Ausdrücke .....	390
12.2 Probabilistische Logik .....	395
12.2.1 Modus Ponens der probabilistischen Logik .....	395
12.2.2 Fehlende Modularität der probabilistischen Logik .....	399
12.2.3 Bayessche Inferenzregel .....	402
12.2.4 Lösung von Diagnoseaufgaben .....	404
12.2.5 Aussagekraft probabilistischer Folgerungen .....	408
12.2.6 Anwendungsgebiete der probabilistischen Logik .....	410
12.3 Bayesnetze .....	411
12.3.1 Abhängige und unabhängige Ereignisse .....	411
12.3.2 Darstellung wahrscheinlichkeitstheoretischer Modelle durch Bayesnetze .....	417
12.3.3 Modellbildung mit Bayesnetzen .....	422
12.3.4 Kausales Schließen mit Bayesnetzen .....	429
12.3.5 Diagnostisches Schließen mit Bayesnetzen .....	436
12.3.6 Erweiterung der Bayesnetze .....	443
12.4 Zusammenfassung und Wertung .....	444
Literaturhinweise.....	447
<b>13 Heuristische Verfahren zur Darstellung und zur Verarbeitung unsicheren Wissens .....</b>	<b>449</b>
13.1 Wissensverarbeitung auf der Grundlage der Evidenztheorie .....	449
13.1.1 Grundlagen der Evidenztheorie .....	450
13.1.2 Dempster-Regel .....	453

---

13.1.3 Erweiterung der Aussagenlogik mit Hilfe der Evidenztheorie .....	454
13.2 Heuristische Methoden .....	458
13.2.1 Beschreibung der Unbestimmtheit des Wissens durch Konfidenz- faktoren .....	458
13.2.2 Verarbeitung der Konfidenzfaktoren bei Ableitungen .....	460
13.3 Vergleichende Zusammenfassung der Methoden zur Verarbeitung unsicheren Wissens .....	462
Literaturhinweise .....	464
<b>14 Merkmale und technische Anwendungsgebiete der Wissensverarbeitung .....</b>	<b>465</b>
14.1 Struktur wissensbasierter Systeme .....	465
14.2 Wissensrepräsentation .....	466
14.2.1 Modellbildung .....	466
14.2.2 Deklaratives und prozedurales Wissen .....	468
14.2.3 Anforderungen an die Wissensrepräsentation .....	469
14.2.4 Wissensrepräsentationsmodelle .....	471
14.2.5 Modularität der Wissensrepräsentation .....	473
14.2.6 Wissenserwerb .....	474
14.3 Wissensverarbeitung .....	475
14.3.1 Zusammenfassung der Verarbeitungsmethoden .....	475
14.3.2 Problemspezifikation und Algorithmierung .....	477
14.4 Ingenieurtechnische Anwendungsgebiete .....	479
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>485</b>

## Anhänge

<b>Anhang 1: Lösung von Übungsaufgaben .....</b>	<b>491</b>
<b>Anhang 2: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung .....</b>	<b>521</b>
<b>Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung .....</b>	<b>527</b>
<b>Anhang 4: Projektaufgabe .....</b>	<b>531</b>
<b>Anhang 5: Fachwörter deutsch – englisch .....</b>	<b>535</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>539</b>

