

# Inhaltsverzeichnis

## Kapitel 1

### Fuzzy-Methoden –

<b>Gegenstandsbedeutung und Zielsetzung</b> .....	1
1.1 Problematik und Funktionalität der Vagheit .....	2
1.1.1 Philosophische Abhandlungen über Vagheit und das Projekt der „idealen Sprache“ .....	2
1.1.2 Relationen zwischen vagen Kategorien und ihren Elementen .....	11
1.1.3 Zweckmäßigkeit von Vagheit und Präzision .....	14
1.2 Relevanz und Spektrum der Fuzzy-Mengentheorie .....	18
1.2.1 Begriffserläuterungen .....	18
1.2.2 Zur wachsenden Bedeutung der Modellierung imperfekten Wissens .....	25
1.2.3 Fuzzy-Mengentheorie – eine Skizze des Forschungs- und Anwendungsspektrums .....	29
1.3 Motivation und Zielsetzung .....	41

## Kapitel 2

### Das Konzept der unscharfen Menge –

<b>Basisdefinitionen und Darstellungsformen</b> .....	47
2.1 Grundbegriffe, Notationen und Gesetze der klassischen Mengenlehre im Überblick .....	48
2.2 Eigenschaften und Darstellungsformen unscharfer Mengen .....	54
2.2.1 Charakterisierung unscharfer Mengen über Zugehörigkeitsfunktionen .....	54
2.2.2 Grundlegende Mengenrelationen und Kenngrößen unscharfer Mengen .....	63
2.3 Typen unscharfer Mengen .....	71

## Kapitel 3

### Mathematische Eigenschaften und Gegenstandsadäquatheit

<b>elementarer Fuzzy-Operatoren</b> .....	75
3.1 Zadehs Verallgemeinerung elementarer Mengenoperationen .....	76
3.2 Alternative unscharfe Mengenoperatoren .....	82
3.2.1 $t$ -Normen und $t$ -Conormen .....	83
3.2.2 „Kompensatorische“ Operatoren .....	87
3.3 Aggregationscharakteristika unscharfer Mengenoperatoren im Überblick .....	93
3.4 Auswahl und Validierung unscharfer Mengenoperatoren .....	104
3.4.1 Bewertungskriterien für unscharfe Mengenoperatoren .....	105

3.4.2	Empirische Verfahren zur Auswahl und Validierung unscharfer Mengenoperatoren .....	109
-------	--	-----

## **Kapitel 4**

	<b>Fuzzy-Arithmetik auf der Basis des Erweiterungsprinzips .....</b>	<b>127</b>
4.1	Definition und Erläuterung des Erweiterungsprinzips .....	128
4.2	Unschärfe Quantitäten, Intervalle und Zahlen .....	133
4.3	Erweiterung arithmetischer Grundoperationen auf unscharfe Quantitäten .....	138
4.4	Effiziente Verfahren für unscharfe Rechenoperationen mit LR-Intervallen .....	144
4.5	Zur Beurteilung der Fuzzy-Arithmetik .....	151

## **Kapitel 5**

### **Verknüpfungen, Eigenschaften und Typen unscharfer Relationen .....**

5.1	Klassische Relationen – Operationen, Eigenschaften und Typen im Überblick .....	156
5.2	Fuzzy-Relationen – Begriffsdefinition und Repräsentationsformen .....	160
5.2.1	Definition und Erläuterung des Begriffs Fuzzy-Relation .....	160
5.2.2	Repräsentationsformen unscharfer Relationen .....	161
5.3	Verknüpfungen unscharfer Relationen .....	166
5.3.1	Gewöhnliche Mengenoperationen über Fuzzy-Relationen .....	166
5.3.2	Spezielle relationale Operationen über Fuzzy-Relationen .....	167
5.4	Eigenschaften unscharfer Relationen .....	175
5.5	Typen unscharfer Relationen .....	177
5.5.1	Nachbarschaftsrelationen und Nachbarschaftsklassen .....	177
5.5.2	Ähnlichkeitsrelationen und Ähnlichkeitsklassen .....	180
5.5.3	Unschärfe Ordnungsrelationen .....	184

## **Kapitel 6**

### **Ansätze der Modellierung linguistischer Hecken .....**

6.1	„Linguistische Hecken“ – eine Begriffserläuterung .....	190
6.2	Zadehs Grundlegung der Modellierung linguistischer Hecken .....	194
6.2.1	Grundideen und elementare Operatoren .....	194
6.2.2	Haupttypen linguistischer Hecken .....	199
6.3	Vorschläge zur Modellierung linguistischer Hecken vom Typ I .....	201
6.3.1	Zadehs Modellierungsvorschläge .....	201
6.3.2	Kritiken, Alternativen und Ergänzungen zu Zadehs Vorschlägen .....	204
6.4	Vorschläge zur Modellierung linguistischer Hecken vom Typ II .....	218
6.4.1	Modifikationen der Gewichtskoeffizienten konvexer Kombinationen unscharfer Bedeutungskomponenten .....	218
6.4.2	Algebraische Verknüpfungen klassifizierter unscharfer Bedeutungskomponenten .....	220
6.4.3	Grenzen der vorgeschlagenen Modellierungsansätze und Erweiterungsvorschläge .....	223

## **Kapitel 7**

<b>Das Konzept der linguistischen Variable</b> .....	227
7.1 Linguistische Variablen und ihre Wertemengen .....	228
7.1.1 Typen und Aufbau linguistischer Variablen .....	228
7.1.2 Eine restriktive ATN-Grammatik für linguistische Variablen .....	234
7.1.3 Linguistische Standardvariablen und Standardwerte .....	237
7.1.4 Sprachexterne und sprachinterne Bedeutungsaspekte linguistischer Variablenwerte .....	244
7.2 Die Problematik der linguistischen Approximation und Methoden ihrer Bearbeitung .....	248
7.2.1 Der Begriff der linguistischen Approximation .....	248
7.2.2 Distanzmaße zur linguistischen Approximation .....	251
7.2.3 Verfahren der linguistischen Approximation .....	253
7.2.4 Offene Probleme und weiterführende Hinweise .....	257

## **Kapitel 8**

<b>Approximatives Schließen auf der Basis des generalisierten Modus ponens</b> .....	263
8.1 Grundkonzepte der Possibilitätstheorie .....	264
8.1.1 Possibilitätsverteilungen .....	265
8.1.2 Possibilitäts- und Notwendigkeitsmaße als spezielle Fuzzy-Maße .....	268
8.2 Zadehs Grundregeln approximativen Schließens .....	270
8.3 Der generalisierte Modus ponens als Spezialfall der Verkettungsschlußregel .....	274
8.3.1 Verkettungsschlußregel .....	275
8.3.2 Der generalisierte Modus ponens .....	276
8.4 Mehrwertige Implikationsoperatoren zur Modellierung unscharfer Inferenzschemata .....	281
8.4.1 Algebraische Anforderungen an Implikationsoperatoren .....	281
8.4.2 Typologien von Fuzzy-Regeln auf der Basis mehrwertiger Implikationsoperatoren .....	288
8.5 Fuzzy-Regelsysteme auf der Grundlage des generalisierten Modus ponens .....	293
8.5.1 Fuzzy-Regelsysteme als Relationalgleichungssysteme .....	293
8.5.2 Ein effizientes Verfahren zur Anwendung des generalisierten Modus ponens auf der Basis der Gödel-Implikation .....	297
8.5.3 Hinweise zu Problemen und alternativen Modellierungsansätzen .....	301

## **Kapitel 9**

<b>Zadehs Fuzzy-Logik und possibilistische Semantiktheorie</b> .....	303
9.1 Hauptmerkmale von Zadehs Fuzzy-Logik .....	304
9.2 Zadehs Testscore-Semantik – eine Referenzsemantik auf der Basis von Possibilitätsverteilungen .....	306
9.2.1 Übersetzungsregeln, Testwerte und Testprozeduren zur Bedeutungsrepräsentation natürlichsprachlicher Aussagen .....	308

9.2.2	Das Konzept einer kanonischen Form .....	312
9.3	Inferenzregeln in Zadehs Fuzzy-Logik .....	313
9.3.1	Kategoriale Inferenzregeln .....	313
9.3.2	Fuzzy-Syllogismen .....	318
9.4	Zadehs dispositionale Logik zur Modellierung des Common Sense .....	323
9.4.1	Die Repräsentation von Dispositionen über die Explikation unscharfer Quantoren .....	324
9.4.2	Inferenzen mit Dispositionen .....	327
9.5	Zur Beurteilung von Zadehs Fuzzy-Logik und Testscore-Semantik .....	329

## **Kapitel 10**

### **„Fuzzy-Pattern-Matching“ –**

<b>Maße der Kompatibilität und Vergleichsalgorithmen .....</b>	<b>333</b>
10.1 Grundkonzepte und Variationen der symbolischen Musterverarbeitung ...	334
10.2 „Fuzzy-Pattern-Matching“ auf der Basis des Erweiterungsprinzips .....	339
10.2.1 Unschärfe Wahrheitswerte und ihre Verknüpfung mit Hilfe des Erweiterungsprinzips .....	339
10.2.2 Die Berechnung unscharfer Wahrheitswerte für komplexe Fuzzy-Prädikate und wahrheitsqualifizierte Fuzzy-Daten .....	342
10.3 „Fuzzy-Pattern-Matching“ auf der Basis von Possibilitäts- und Notwendigkeitsmaßen .....	345
10.3.1 Possibilität und Notwendigkeit als Kompatibilitätsmaße – Definitionen und Erläuterungen .....	345
10.3.2 Die Berechnung der „Kompatibilität“ komplexer Daten und Muster .....	348
10.3.3 Formeln zur effizienten Berechnung der bedingten Possibilität und Notwendigkeit für trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen .....	350
10.3.4 Erweiterungen des Possibilitäts- und Notwendigkeitsmaßes .....	355
10.3.5 Fuzzy-Diskriminationsbäume .....	360

## **Kapitel 11**

<b>Methoden der Fuzzy-Regelungstechnik .....</b>	<b>371</b>
11.1 Allgemeine Merkmale der klassischen Regelungstechnik .....	372
11.2 Fuzzy-Regler auf der Basis „kognitiver Modelle“ .....	376
11.2.1 Zur Herkunft des Konzepts „linguistische Kontrollregeln“ .....	377
11.2.2 Mamdanis und Assilians Experiment der Regelung einer Dampfmaschine mit Hilfe linguistischer Kontrollregeln .....	378
11.2.3 Verarbeitungsmodelle und Inferenzmethoden „kognitiver“ Fuzzy-Regler .....	383
11.2.4 Defuzzifizierungsmethoden .....	388
11.2.5 Funktionsaufbau, Entwurf und Optimierung „kognitiver“ Fuzzy-Regler .....	392
11.3 Fuzzy-Regler auf der Basis „operativer Modelle“ .....	396
11.3.1 Fuzzy-Kontrollregeln zur Beschreibung „operativer Modelle“ .....	396
11.3.2 Die Verarbeitung „operativer Fuzzy-Kontrollregeln“ .....	398
11.4 Leistungsmerkmale, Probleme und Entwicklungslinien der Fuzzy-Regelungstechnik .....	404

11.4.1	Fuzzy-Regelungstechnik und konventionelle Regelungstechnik im Vergleich .....	404
11.4.2	Entwicklungsfelder der Fuzzy-Regelungstechnik .....	407

## Kapitel 12

	<b>Unschärfe- und Unsicherheitsmodellierung in „Fuzzy-Produktionensystemen“ .....</b>	<b>411</b>
12.1	Produktionensysteme und ihre Verarbeitungsmodelle .....	412
12.1.1	Begriffsherkunft und Sprachgebrauch .....	412
12.1.2	Aufbau und Funktionsweise von Produktionensystemen .....	415
12.2	Vorwärtsverkettende Systeme .....	422
12.2.1	Die Propagierung von „Konfidenzwerten“ bei serieller und „paralleler“ Regelausführung in FLOPS .....	422
12.2.2	Approximatives analogisches Schließen mit punkt- und intervallwertigen Zugehörigkeitsfunktionen .....	425
12.3	Rückwärtsverkettende Systeme .....	432
12.3.1	Possibilistische Inferenzschemata zur Verrechnung von Unsicherheit und Ungenauigkeit in SPII .....	432
12.3.2	Die Verarbeitung unscharfer Unsicherheiten und unsicherer Unschärfen mit Hilfe der Fuzzy-Arithmetik und dem generalisierten Modus ponens .....	436
12.4	Vorwärts- und rückwärtsverkettende Systeme .....	442
12.4.1	Die Propagierung einfacher und wahrheitsqualifizierter Unschärfen mit Hilfe des Erweiterungsprinzips .....	442
12.4.2	Lokale Logiken zur Verarbeitung linguistischer Unsicherheiten in MILORD .....	445
12.4.3	Übertragung und Entkopplung von „Wahrheitsgraden“ in FMUFL .....	448

## Kapitel 13

	<b>Unsichere und unscharfe Deduktionen von bewerteten Hornklauseln .....</b>	<b>451</b>
13.1	Basiskonzepte logikorientierter Programmierung: Hornklauseln, Unifikation und Resolution .....	452
13.1.1	Syntax und Semantik der Prädikatenlogik .....	453
13.1.2	Logisches Schließen in der Prädikatenlogik .....	456
13.2	Die Support-Logik von Baldwin .....	461
13.2.1	Support-Paare und ihre Deutung .....	462
13.2.2	Allgemeine Beschränkungen der Support-Verknüpfung .....	463
13.2.3	Das Multiplikationsmodell der Support-Logik .....	465
13.2.4	Evidenzverknüpfung aufgrund multipler Ableitungswege .....	466
13.2.5	Semantische Unifikation .....	468
13.2.6	Deutung der Support-Logik über ein Gruppen-Votierungsmodell .....	468
13.3	Deduktionen über $f$ -Hornklauseln nach Li und Liu .....	470
13.3.1	$f$ -Hornklauseln: Aufbau und Verknüpfungsoperationen .....	470
13.3.2	Prozedurale Interpretation von $f$ -Hornklauseln .....	471
13.4	Die possibilistische Logik von Dubois und Prade .....	474

13.4.1	Axiomatische Grundlagen .....	475
13.4.2	Erweiterte Resolutionsprinzipien auf der Basis des Notwendigkeits- und Possibilitätsmaßes .....	477
13.4.3	Inkonsistenz, Korrektheit und Vollständigkeit .....	481
13.4.4	Possibilistische Resolution mit mehr oder minder widersprüchlichen Informationsquellen .....	487

## **Kapitel 14**

### **Leistungsmerkmale und Defizite von**

<b>Fuzzy-Programmiersprachen</b> .....	491
14.1 Merkmalraum und Darstellungsaspekte .....	492
14.1.1 Zu allgemeinen Beurteilungskriterien für Software und Programmiersprachen .....	492
14.1.2 Programmierstile, Verarbeitungsmodelle und Arten von Programmiersprachen .....	494
14.1.3 Merkmale von Programmiersystemen der KI .....	498
14.1.4 Spezielle Merkmale von Fuzzy-Programmiersprachen und Fuzzy-Programmiersystemen .....	500
14.1.5 Untersuchungs- und Darstellungsprobleme .....	507
14.2 FUZZY – Programmieren mit mustergesteuerten Prozeduren und „Prozedur-Dämonen“ .....	512
14.2.1 Zur Herkunft von FUZZY: PLANNER, MICRO-PLANNER, FUZZY-PLANNER .....	512
14.2.2 Grundkonzepte von FUZZY: mustergesteuerte Prozeduraufrufe über Fuzzy-Assoziationsnetzen .....	515
14.2.3 Ansätze der Repräsentation imperfekten Wissens in FUZZY .....	521
14.2.4 Konzeptionelle Mängel von FUZZY .....	528
14.3 Relationenorientierte Sprachen .....	529
14.3.1 FS-LISP .....	530
14.3.2 FLISP .....	533
14.3.3 FOPS, MONOPL und MONOLIS .....	538
14.4 Regelorientierte Sprachen .....	542
14.4.1 REVEAL .....	542
14.4.2 SPII-1 und SPII-2 .....	544
14.4.3 FLOPS .....	549
14.4.4 FMUFL .....	554
14.4.5 FPS .....	561
14.4.6 SYSTEM Z-11 .....	564
14.4.7 MILORD .....	568
14.5 Logikorientierte Sprachen .....	572
14.5.1 FPROLOG .....	572
14.5.2 FS-PROLOG .....	574
14.5.3 F-PROLOG .....	576
14.5.4 FRIL .....	581
14.6 Resümee .....	588

## **Kapitel 15**

<b>Architektur und Funktionalität von CLIFS .....</b>	<b>593</b>
15.1 Anforderungen .....	594
15.2 Architekturprinzipien .....	600
15.2.1 Charakteristika und Nutzungsformen von (reflexiven) Metaebenen-Architekturen .....	600
15.2.2 CLOS als Grundlage und architektonisches Leitbild von CLIFS .....	609
15.3 Grundelemente und Systemkomponenten .....	616
15.3.1 Grundelemente .....	616
15.3.2 Systemkomponenten .....	630
15.4 Definitionsmakros – Konzeption und Syntaxbeschreibungen .....	636
15.4.1 Das Konzept „generischer“ Definitionsmakros .....	636
15.4.2 Syntaxbeschreibungen der Definitionsmakros .....	638
15.5 Funktionsüberblick .....	649
15.6 Resümee und Ausblick .....	657
<i>Glossar mathematischer Symbole .....</i>	<i>663</i>
<i>Literatur .....</i>	<i>667</i>
<i>Tabellenverzeichnis .....</i>	<i>699</i>
<i>Abbildungsverzeichnis .....</i>	<i>703</i>
<i>Sachverzeichnis .....</i>	<i>707</i>