

# Fuzzy-Bildverarbeitung

**Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH**

Hamid R. Tizhoosh

# Fuzzy-Bildverarbeitung

Einführung in Theorie und Praxis

Mit 137 Abbildungen  
und 23 Tabellen



Springer

Hamid R. Tizhoosh  
Otto-von-Guericke-Universität  
Lehrstuhl für Technische Informatik  
Postfach 4120, D-39016 Magdeburg

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme  
Tizhoosh, Hamid R.: Fuzzy-Bildverarbeitung: Einführung in Theorie und Praxis/Hamid R. Tizhoosh. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1998  
ISBN 978-3-540-63137-8      ISBN 978-3-642-58742-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-58742-9

**ISBN 978-3-540-63137-8**

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998  
Originally published by Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York in 1998

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:* Künkel + Lopka, Heidelberg  
*Satz:* Reproduktionsfertige Autorenvorlage, belichtet von perform, Heidelberg  
Gedruckt auf säurefreiem Papier    SPIN: 10630433    45/3142 - 5 4 3 2 1 0

Für die schönsten Bilder meines Lebens:  
Rezwan, Nahayat und Andische

# Vorwort

نه هر کلکی شکر دارد، نه هر زیری زبر دارد  
نه هر چشمی نظر دارد، نه هر بحری گهر دارد  
- مولوی -

Nicht aus jeder Feder fließt Poesie,  
Nicht jedes Unten hat ein Oben.  
Nicht jedes Auge hat den Blick,  
Nicht jedes Meer bringt Juwelen.<sup>1</sup>

*Moulawi, persischer Dichter und Philosoph*

Fuzzy-Systeme gewinnen für die digitale Bildverarbeitung mehr und mehr an Bedeutung. Seit über dreißig Jahren befassen sich engagierte Wissenschaftler mit theoretischen und praktischen Aspekten der Fuzzy-Logik. Fast genauso alt sind auch die Forschungsarbeiten, die die Anwendungen dieser Logik in der Mustererkennung und speziell in der Bildverarbeitung untersuchen, in jüngerer Zeit zunehmend intensiv.

Fuzzy-Logik ist nicht nur eine mathematische Theorie. Sie ist vielmehr eine Philosophie, eine Art Weltanschauung. Oft kann man die Idee des Unschärfen allein dadurch realisieren, daß man konzeptionell die Abstufung der Wahrheit akzeptiert, ohne sich mathematisch konkret der Fuzzy-Logik bedienen zu müssen. Deshalb liegt das Erfolgsrezept beim Anwenden von Fuzzy-Logik nicht im Erlernen von neuen und noch mehr Formeln, was mit Sicherheit oft notwendig ist, sondern im Umdenken von einer dualen, idealisierenden Vorgehensweise in das Verständnis für die durch und durch mit Vagheit und Ungenauigkeit behaftete Welt, die uns umgibt.

Der Weg der Bilder ins menschliche Gehirn ist von der Aufnahme bis hin zur Verarbeitung und endgültigen Schlußfolgerung mit vagen und mathematisch kaum modellierbaren Steinen gepflastert. Es wird sicherlich noch lange Zeit in Anspruch nehmen, bis wir uns von der Erblast der aristotelischen Schwarzweißbetrachtung realer Vorgänge befreit und uns der realen unscharfen Welt gestellt haben – der Welt von Buddha, Max Black<sup>2</sup>, Bertrand Russell, Albert Einstein, Jan Lukasiewicz und, nicht zuletzt, der Welt von Lotfi Zadeh, der uns die faszinierende Fuzzy-Logik beschert hat.

---

<sup>1</sup> Übersetzung von Iradj Zohari

<sup>2</sup> Er untersuchte als erster Philosoph die logische Vagheit (vgl. Black (1937))

Die Arbeit an diesem Buch war in mancher Hinsicht eine große Herausforderung, nicht zuletzt deshalb, weil ich als Fremdsprachiger die Hürden der deutschen Sprache überwinden mußte. Die eigentliche Herausforderung steckte aber in der Thematik selbst. Man bewegt sich auf Neuland, wo immer wieder Neues zu entdecken ist. Es gibt Erfolge, die einen begeistern, und Mißerfolge, die wiederum die Sachlichkeit des wissenschaftlichen Arbeitens die Oberhand gewinnen lassen. Nichts ist aufregender, als in solch einem Auf und Ab die Stärken und Schwächen einer Theorie zu erleben. Der wissenschaftliche Fortschritt lebt von Enthusiasmus. Probleme lassen sich aus dem Weg räumen, wenn man mit Leib und Seele dabei ist. Man muß von der Theorie überzeugt sein, um die Hürden der Praxis hinter sich lassen zu können. Dies bedeutet aber nicht, daß Sachlichkeit und strenge wissenschaftliche Maßstäbe dabei zu kurz kommen müssen. Wenn wir uns auf der theoretischen Seite abgesichert, die Beweise in der Tasche und die Ergebnisse in der Hand haben, dann können wir ruhig vor Freude in die Luft springen, die anderen mit begeistern und enthusiastisch an neue Probleme herangehen. Nur so können wir jungen Wissenschaftlern vor Augen führen, daß die Forschung zwar sehr sachlich und nüchtern, aber auf keinen Fall trocken und langweilig ist. Nur so können wir für die junge Generation demonstrieren, wie faszinierend, aufregend und herausfordernd die Forschung sein kann.

Dieses Buch ist deshalb ein erster Versuch, der bestimmt nicht ausführlich genug und wahrscheinlich trotz aller Bemühungen nicht fehlerfrei ist. Ich bin aber sicher, daß es durch die Kritik der Leser erweitert und verbessert werden kann. Fuzzy-Bildverarbeitung ist trotz aller Forschungsergebnisse der letzten Jahre ein sehr junger Zweig der Wissenschaft. Vieles muß noch geklärt, verfeinert, verbessert, untersucht und kritisiert werden. Fuzzy-Algorithmen müssen sich in der Praxis der Bildverarbeitung bewähren. Wer behauptet, er habe die beste Theorie, muß noch längst nicht die besten Methoden haben. Zwischen Theorie und Praxis liegen Welten voller Probleme. Wir sind ziemlich am Anfang eines langen steinigen Weges. Wir brauchen viel Geduld und Ausdauer, falls wir die Potentiale der Fuzzy-Bildverarbeitung erkennen und praxisgerecht nutzen wollen.

Der Bedarf an Lehr- und Fachbüchern ist in diesem Gebiet noch recht groß. Viele Kollegen engagieren sich in der Erforschung unterschiedlicher Aspekte der Fuzzy-Bildverarbeitung. So veröffentlichten Kruse et al. (1997) ein exzellentes Buch über die Fuzzy-Clusteranalyse. Einige andere Kollegen sind ebenfalls dabei, Monographien bzw. Sammelwerke im Bereich der Fuzzy-Bildverarbeitung zu verfassen. Dies wird in der Zukunft die objektive Beurteilung von Einsatzmöglichkeiten der Fuzzy-Logik für die Bildverarbeitung sicherlich unterstützen.

Zum Entstehen dieses Buches haben viele beigetragen. Ohne die Hilfe meiner Kollegen am Lehrstuhl für Technische Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg hätte dieses Buch sicherlich nicht in dieser Form und zu diesem Zeitpunkt veröffentlicht werden können. Zu besonderem Dank bin ich Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Michaelis, Dr. rer. nat. Kerstin Jungnickel und Dr.-Ing. Gerald Krell verpflichtet, die die mühsame Korrektur des Manuskripts übernommen und durch inhaltliche Kritik zur Verbesserung des Buches beigetragen haben.

Auch mein Kollege Dipl.-Ing. Frank Püschel und Dr. rer. nat. Helmut Freudenstein (Marburg) haben mich bei den Korrekturarbeiten unterstützt.

Mein Dank gilt auch Prof. Raghu Krishnapuram (University of Missouri, USA), Prof. Michel Grabisch (Central Research Laboratory, Frankreich), Prof. Isabelle Bloch (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Frankreich), Dr. Hamid R. Berenji (NASA Ames Research Center, USA) und Dr. Tuan D. Pham (University of Sydney, Australien), die mich mit vielen Daten und Antworten versorgt haben. Dr. Hans Wössner (Springer-Verlag, Heidelberg) bin ich für die hervorragende Zusammenarbeit zu Dank verpflichtet.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Rezwan Hemmesi bedanken, die mich mit viel Liebe und Verständnis stets unterstützt und motiviert hat.

Magdeburg, im Juli 1997

Hamid R. Tizhoosh



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Unsicherheit in der Bildverarbeitung .....	4
1.1.1 Unsicherheit bei der Grauwertmanipulation.....	5
1.1.2 Unsicherheit bei der geometrischen Interpretation.....	5
1.1.3 Unsicherheit bei der Bildanalyse.....	6
1.2 Quellen der Unsicherheit .....	6
1.3 Ansätze: Zugehörigkeit versus Wahrscheinlichkeit .....	7
1.4 Warum Fuzzy in der Bildverarbeitung?.....	9
1.5 Über das vorliegende Buch.....	10
<b>2 Bausteine der Fuzzy-Systeme</b> .....	12
2.1 Grundlagen .....	12
2.1.1 Klassische Mengen .....	13
2.1.2 Fuzzy-Mengen .....	14
2.1.3 $\alpha$ -Schnittmengen .....	17
2.1.4 Konvexität.....	18
2.1.5 Zugehörigkeit: ihre Bedeutung und Darstellung .....	19
2.1.6 Generierung von Zugehörigkeiten.....	20
2.1.7 Mengentheoretische Operationen.....	22
2.1.8 Fuzzy-Mengen als Punkte im Hyperwürfel.....	25
2.2 Fortgeschrittene Aspekte der Fuzzy-Systeme .....	28
2.2.1 Fuzzy-Relationen .....	28
2.2.2 Das Erweiterungsprinzip.....	30
2.2.3 Fuzzy-Arithmetik .....	33
2.2.4 Fuzzy-Maße .....	35
2.2.5 Fuzzy-Integrale .....	36
2.2.6 Konzept der linguistischen Variablen .....	38
2.2.7 Fuzzy-Logik.....	41
<b>3 Theorie der Fuzzy-Bildverarbeitung</b> .....	44
3.1 Bilder unscharf verstehen .....	45
3.1.1 Unschärfe Bilddefinition.....	46
3.1.2 Bilder fuzzyfizieren.....	48
3.1.3 Fuzzyfizierung und Bewältigung der Unsicherheit .....	54
3.1.4 Bilder unscharf verarbeiten .....	55
3.1.5 Theoretischer Zugang zur Fuzzy-Bildverarbeitung.....	58

3.2 Zugang über Fuzzy-Geometrie .....	59
3.3 Zugang über die Maße der Unschärfe und der Bildinformation .....	70
3.4 Zugang über Fuzzy-Inferenzsysteme .....	85
3.4.1 Entwurf von Fuzzy-Inferenzsystemen .....	86
3.4.2 Ablauf von Fuzzy-Inferenz Systemen .....	89
3.4.3 Inferenzsysteme als Funktions-Approximator .....	101
3.5 Zugang über Fuzzy-Clusteralgorithmen.....	105
3.5.1 Fuzzy c-Means (FCM) .....	106
3.5.2 Variationen von Fuzzy-Clustering .....	115
3.5.3 Possibilistic c-Means (PCM) .....	117
3.5.4 Klassengültigkeit der Fuzzy-Klassifikation.....	121
3.6 Zugang über Fuzzy-Morphologie .....	124
3.6.1 Binäre Dilatation .....	125
3.6.2 Binäre Erosion .....	126
3.6.3 Von binärer zur Fuzzy-Morphologie.....	127
3.6.4 Fuzzy-Erosion und Fuzzy-Dilatation .....	130
3.7 Zugang über Fuzzy-Grammatik .....	138
3.7.1 Formale Sprachen und Grammatiken .....	138
3.7.2 Fuzzy-Sprachen.....	139
3.7.3 Fuzzy-Grammatik.....	139
3.7.4 Fraktionale Fuzzy-Grammatik.....	142
3.7.5 Verschiedene Typen von Fuzzy-Grammatik .....	142
3.7.6 Fuzzy-Sprachen lernen.....	143
3.8 Zugang über Fuzzy-Integral.....	146
3.8.1 Fuzzy-Maße .....	146
3.8.2 Sugeno-Maße .....	147
3.8.3 Fuzzy-Integral .....	148
3.8.4 Verallgemeinertes Fuzzy-Integral .....	149
3.8.5 Klassifikation mit Fuzzy-Integral .....	151
3.9 Zugang über Neuro-Fuzzy-Ansätze .....	155
3.9.1 Hybride Neuro-Fuzzy-Systeme .....	159
3.9.2 Fuzzy-Neuronale Netze.....	160
3.9.3 Fuzzy-Neuronen .....	161
3.9.4 Fuzzy-Assoziativspeicher.....	165
3.9.5 Fuzzy-Kohonen-Netz .....	169
3.10 Zugang über fuzzy-genetische Ansätze.....	172
3.10.1 Genetische Algorithmen mit einer Fuzzy-Fitneßfunktion .....	175
3.10.2 Genetische Optimierung einer Fuzzy-Regelbasis.....	177
<b>4 Fuzzy-Algorithmen in der Bildverarbeitung.....</b>	<b>179</b>
4.1 Fuzzy-Bildverbesserung .....	180
4.1.1 Verbesserung mit Fuzzy-Erwartungswert .....	181
4.1.2 Verbesserung durch Minimierung der Unschärfe.....	184
4.1.3 Fuzzy-Histogramm-Hyperbolisierung .....	189
4.1.4 Regelbasierte Bildverbesserung .....	195

4.1.5 $\lambda$ -Verbesserung .....	197
4.2 Fuzzy-Segmentierung .....	201
4.2.1 Segmentierung durch Minimierung von Unschärfe.....	201
4.2.2 Segmentierung mit Fuzzy-Integral .....	207
4.3 Fuzzy-Skelettierung .....	211
4.4 Fuzzy-Kantendetektion .....	214
4.4.1 Kantendetektion durch optimale Fuzzyfizierung.....	215
4.4.2 Regelbasierter Kantendetektor .....	219
4.4.3 Fuzzy-morphologische Kantendetektoren.....	222
4.4.4 Fuzzy-perzeptuale Gruppierung.....	223
4.5 Ausblick.....	226
<b>Anhang A: Tabelle der T-Normen .....</b>	<b>228</b>
<b>Anhang B: Tabelle der S-Normen.....</b>	<b>229</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>231</b>
<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>241</b>