

Hanspeter A. Mallot

**Sehen und die Verarbeitung  
visueller Information**

# Computational Intelligence

herausgegeben von Wolfgang Bibel und Rudolf Kruse

Die Bücher der Reihe behandeln Themen, die sich dem weitgesteckten Ziel des Verständnisses und der technischen Realisierung intelligenten Verhaltens in einer Umwelt zuordnen lassen. Sie sollen damit Wissen aus der künstlichen Intelligenz und der Kognitionswissenschaft (beide zusammen auch Intellektik genannt) sowie aus interdisziplinär mit diesen verbundenen Disziplinen vermitteln. Computational Intelligence umfaßt die Grundlagen ebenso wie die Anwendungen.

## **Das rechnende Gehirn**

von Patricia S. Churchland und Terrence J. Sejnowski

## **Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme**

von Detlef Nauck, Frank Klawonn und Rudolf Kruse

## **Fuzzy-Clusteranalyse**

von Frank Höppner, Frank Klawonn und Rudolf Kruse

## **Einführung in Evolutionäre Algorithmen**

von Volker Nissen

## **Neuronale Netze**

Grundlagen und Anwendungen

von Andreas Scherer

## **Betriebswirtschaftliche Anwendungen des Soft Computing**

von Biethahn et al. (Hrsg.)

## **Fuzzy Theorie und Stochastik**

von Rudolf Seising (Hrsg.)

## **Multiobjective Heuristic Search**

von Pallab Dasgupta, P.P. Chakrabarti und S. C. DeSarkar

## **Sehen und die Verarbeitung visueller Information**

von Hanspeter A. Mallot

Titel aus dem weiteren Umfeld,  
erschieden in der Reihe Künstliche Intelligenz des Verlages Vieweg:

## **Automated Theorem Proving**

von Wolfgang Bibel

## **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic**

Foundation of Application – from a Mathematical Point of View

von Siegfried Gottwald

## **Fuzzy Systems in Computer Science**

von Rudolf Kruse, Jörg Gebhard und Rainer Palm (Hrsg.)

## **Automatische Spracherkennung**

von Ernst Günter Schukat-Talamazzini

## **Deduktive Datenbanken**

von Armin B. Cremers, Ulrike Griefhahn und Ralf Hinze

## **Wissensrepräsentation und Inferenz**

von Wolfgang Bibel, Steffen Hölldobler und Torsten Schaub

**Vieweg**

Hanspeter A. Mallot

# **Sehen und die Verarbeitung visueller Information**

**Eine Einführung**

2., überarbeitete und erweiterte Auflage



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei  
Der Deutschen Bibliothek erhältlich

1. Auflage 1998  
2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2000

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2000

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH,  
Braunschweig/Wiesbaden, 2000



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

<http://www.vieweg.de>

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.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

Konzeption und Layout: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-528-15659-6

ISBN 978-3-663-11347-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-11347-8

# Vorwort

Was wir über unsere Umwelt wissen, verdanken wir unseren Sinnen. Beim Sehen nehmen wir das von den Objekten einer Szenerie ausgehende Licht auf und ermitteln daraus eine Fülle von Informationen, die von der räumlichen Tiefe und Farbe von Oberflächen über die Einteilung und den Zusammenschluss von Bildbereichen zu Figuren und Objekten bis hin zur Einschätzung der Stimmungen und Gesichtsausdrücke eines Gesprächspartners reichen. Die Ausgangsdaten für alle diese Leistungen sind Bilder, d.h. zweidimensionale Verteilungen von Helligkeiten, die für sich genommen weder Tiefe noch Form oder gar Stimmungen enthalten. Dass wir alles dies trotzdem „sehen“ können, gehört zu den faszinierendsten Leistungen unseres Gehirns.

Das vorliegende Buch versucht, die angedeuteten Leistungen des Wahrnehmungsapparates auf dem Niveau der Informationsverarbeitung zu beschreiben. Dabei gehen Ansätze aus der Psychophysik und der quantitativen Neurobiologie ebenso ein, wie die Verfahren, die für das Maschinensehen und die Fotogrammetrie entwickelt worden sind. Die Grundidee der vorliegenden Darstellung ist es, eine Verbindung zwischen Wahrnehmungsforschung, Neurobiologie und Informatik herzustellen, wie sie im angelsächsischen Bereich unter der Bezeichnung *Computational Vision* bekannt ist. Dabei habe ich mich überwiegend auf den seit BELA JULESZ und DAVID MARR so genannten Bereich der *early vision* beschränkt, d.h. auf die ganz oder überwiegend datengetriebenen Verarbeitungsschritte, die keine Rückwirkung von übergeordneten Systemen erfordern. Einige wichtige Bereiche des aktiven Sehens, wie etwa Augenbewegungen als Voraussetzung für die aktive Auswahl geeigneter Blickpunkte oder die Auswertung des durch Eigenbewegung erzeugten optischen Flusses, werden im jeweiligen Zusammenhang angesprochen. Kognitive Aspekte der visuellen Wahrnehmung, also z.B. die Steuerung der Aufmerksamkeit, die Wahrnehmungsorganisation sowie die vielfältigen Erkennungsleistungen, werden nur am Rande berührt.

Dieses Buch ist aus Vorlesungen hervorgegangen, die ich seit 1987 an den Universitäten Mainz, Bochum und Tübingen gehalten habe. Es richtet sich zum einen an Studenten der Biologie und Psychologie, die über Grundkenntnisse in Mathematik verfügen und an der Wahrnehmung und ihrer mathematischen Modellierung interessiert sind. Gleichzeitig richtet sich das Buch an Studenten der Ingenieurwissenschaften, der Informatik und der Physik, die in den letzten Jahren ein großes und erfreuliches Interesse an Neuroinformatik und theoretischer Neurobiologie gezeigt haben.

Neben der Darstellung der biologischen und technischen Sachverhalte verfolgt das Buch noch ein zweites Ziel. So wurde versucht, in jedem Kapitel die jeweils relevante Mathematik exemplarisch einzuführen und damit gleichzeitig einen Einblick in die vielfältigen mathematischen Methoden, die in der Sehforschung Verwendung finden, zu geben. Dabei wurde großer Wert auf die Anschauung gelegt. Mathematische Zusammenhänge sind nicht nur in Formeln, sondern auch in Text und Abbildungen dargestellt. Lesern, die mit mathematischen Texten weniger Erfahrung haben, sei daher empfohlen, beim ersten Lesen über die Formeln hinwegzugehen. Zur Auffrischung von Schul- und Vordiplomwissen, wie auch als Einstieg in die Literatur wurde ein Glossar mathematischer Begriffe zusammengestellt.

Die Gliederung des Buches in Kapitel folgt im Wesentlichen der Einteilung der Vorlesung. Jedes Kapitel enthält jedoch zusätzlichen Stoff, so dass für eine zweistündige Vorlesung eine Auswahl zu treffen wäre. Auf eine Reihe von Wahrnehmungseffekten, die sich für Demonstrationen im Rahmen einer Vorlesung eignen, wird im Text und in Abbildungen hingewiesen. Weitere Experimente und Demonstrationen findet man in den zitierten Büchern von Metzger (1975) und von Campenhausen (1993).

Mein Dank gilt den Kollegen und Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen, die mich in allen Phasen der Entstehung dieses Buches unterstützt haben. Die Fertigstellung des Manuskriptes wurde durch einen Aufenthalt am Wissenschaftskolleg zu Berlin ermöglicht. Für die Überlassung von Abbildungen danke ich Gerd-Jürgen Giefing, Walter Gillner, Holger Krapp und Roland Hengstenberg. Für Kommentare zu Text und Darstellung danke ich Matthias Franz, Karl Gegenfurtner, Sabine Gillner, Heiko Neumann sowie meiner Frau, Bärbel Foese-Mallot.

Tübingen, im November 1997

Hanspeter Mallot

**Nachtrag zur 2. Auflage.** In der zweiten Auflage liegt das Buch nun in einer erweiterten Fassung vor, in der der verhaltensorientierte Aspekt durch die Aufnahme eines Kapitels über „Visuelle Navigation“ verstärkt werden konnte. Darüber hinaus wurden im gesamten Text einige kleinere Verbesserungen angebracht und bekannt gewordene Fehler und Irrtümer korrigiert.

Tübingen, im September 1999

Hanspeter Mallot

# Inhaltsverzeichnis

<b>I Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Biologische Informationsverarbeitung . . . . .	3
1.2 Information in Bildern . . . . .	7
1.3 Weiterführende Literatur . . . . .	15
<b>2 Bildentstehung</b>	<b>18</b>
2.1 Bildintensitäten . . . . .	18
2.2 Abbildende Systeme . . . . .	26
2.3 Perspektivische Projektion . . . . .	33
2.4 Augenbewegung . . . . .	42
<b>II Kontrast, Form und Farbe</b>	<b>49</b>
<b>3 Bildrepräsentation und Bildverarbeitung</b>	<b>51</b>
3.1 Beispiele . . . . .	51
3.2 Abtastung . . . . .	53
3.3 Bildverarbeitung . . . . .	59
3.4 Auflösung . . . . .	68
<b>4 Kantendetektion</b>	<b>75</b>
4.1 Bedeutung von Kanten . . . . .	75
4.2 Kantendetektion in einer Dimension . . . . .	80
4.3 Kantendetektion in zwei Dimensionen . . . . .	91
<b>5 Farbe und Farbkonstanz</b>	<b>96</b>
5.1 Die Farbe isolierter Lichtpunkte . . . . .	97
5.2 Farbe in Bildern . . . . .	112

<b>III Räumliche Tiefe</b>	<b>119</b>
<b>6 Stereopsis</b>	<b>121</b>
6.1 Parallaxische Bildunterschiede . . . . .	121
6.2 Stereogeometrie (binokulare Perspektive) . . . . .	124
6.3 Stereo-Algorithmen . . . . .	132
6.4 Neuronale Netze . . . . .	140
6.5 Psychophysik . . . . .	142
<b>7 Form aus Schattierung</b>	<b>145</b>
7.1 Psychophysik . . . . .	146
7.2 Problemstellung . . . . .	148
7.3 Eindimensionale „Bilder“ . . . . .	153
7.4 Schattierungsanalyse in zwei Dimensionen . . . . .	156
<b>8 Textur und Oberflächenorientierung</b>	<b>161</b>
8.1 Textur und Texturgradienten . . . . .	161
8.2 Regelmäßige Muster: Fluchtpunkte . . . . .	162
8.3 Statistische Muster 1: Dichtegradient . . . . .	165
8.4 Statistische Muster 2: Formgradient . . . . .	169
<b>IV Bewegung</b>	<b>175</b>
<b>9 Bewegungsdetektion</b>	<b>177</b>
9.1 Problemstellung . . . . .	177
9.2 Der Korrelationsdetektor . . . . .	181
9.3 Gradientenverfahren . . . . .	186
9.4 Orientierung im Orts-Zeit-Bild . . . . .	192
9.5 Bewegungen zweiter Ordnung . . . . .	196
<b>10 Optischer Fluss</b>	<b>198</b>
10.1 Informationen im optischen Fluss . . . . .	198
10.2 Bewegungsvektorfelder . . . . .	199
10.3 Flussfelder bei Eigenbewegung . . . . .	204
10.4 Schätzaufgaben . . . . .	216
<b>11 Visuelle Navigation</b>	<b>222</b>
11.1 Wegintegration . . . . .	222
11.2 Navigation nach Landmarken . . . . .	226
11.3 Zusammengesetzte Umgebungen . . . . .	234
11.4 Neurophysiologie des Ortsgedächtnisses . . . . .	239



<b>V Anhang</b>	<b>241</b>
<b>Glossar mathematischer Begriffe</b>	<b>242</b>
<b>Mathematische Symbole und Maßeinheiten</b>	<b>260</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>261</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>281</b>