

Detlef Nauck
Frank Klawonn
Rudolf Kruse

**Neuronale Netze
und Fuzzy-Systeme**

Artificial Intelligence

Künstliche Intelligenz

herausgegeben von Wolfgang Bibel und Walther von Hahn

Künstliche Intelligenz steht hier für das Bemühen um ein Verständnis und um die technische Realisierung intelligenten Verhaltens.

Die Bücher dieser Reihe sollen Wissen aus den Gebieten der Wissensverarbeitung, Wissensrepräsentation, Expertensysteme, Wissenskommunikation (Sprache, Bild, Klang, etc.), Spezialmaschinen und -sprachen sowie Modelle biologischer Systeme und kognitive Modellierung vermitteln.

Auswahl der bisher erschienenen Titel:

Automated Theorem Proving

von Wolfgang Bibel

Prolog

von Ralf Cordes, Rudolf Kruse, Horst Langendörfer, Heinrich Rust

Wissensbasierte Systeme

von Doris Altenkrüger und Wilfried Büttner

Logische Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

von Michael R. Genesereth und Nils J. Nilsson

Wissensbasierte Echtzeitplanung

von Jürgen Dorn

Modulare Regelprogrammierung

von Siegfried Bocionek

Logische und Funktionale Programmierung

von Ulrich Furbach

Parallelism in Logic

von Franz Kurfeß

Schließen bei unsicherem Wissen in der Künstlichen Intelligenz

von der Gruppe Léa Sombé

Wissensrepräsentation und Inferenz

von Wolfgang Bibel (zusammen mit St. Hölldobler und T. Schaub)

Deduktive Datenbanken

von Armin B. Cremers, Ulrike Griefahn und Ralf Hinze

Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme

von Detlef Nauck, Frank Klawonn und Rudolf Kruse

Detlef Nauck
Frank Klawonn
Rudolf Kruse

Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme

Grundlagen des Konnektionismus,
Neuronaler Fuzzy-Systeme und
der Kopplung mit wissensbasierten Methoden



Das in diesem Buch enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Die Autoren und der Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1994

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1994

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Verlagsgruppe Bertelsmann International.



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.

ISSN 090-0699

ISBN-13: 978-3-528-05265-2 e-ISBN-13: 978-3-322-85993-8

DOI: 10.1007/ 978-3-322-85993-8

Vorwort

Neuronale Netze erfreuen sich einer wachsenden Popularität, die sich in einer Vielzahl von Veröffentlichungen und industriellen Anwendungen ausdrückt. Ihre Fähigkeit, aus Beispielen lernen zu können, ohne im herkömmlichen Sinne programmiert werden zu müssen, macht einen wesentlichen Teil ihrer Faszination aus. Die Arbeit an Neuronalen Netzen, die auch als „konnektionistische Systeme“ bezeichnet werden, war zunächst biologisch motiviert. Die Forscher wollten an ihnen mehr über Eigenschaften des Gehirns lernen. Das erste lernfähige künstliche Neuronale Netz, das *Perceptron*, wurde 1958 von Frank Rosenblatt vorgestellt. Nachdem jedoch in den sechziger Jahren gezeigt wurde, daß dieses damals bevorzugt untersuchte Perceptron sogenannte *linear nicht separierbare* Probleme nicht lösen konnte, wurde die Forschung an Neuronalen Netzen einige Jahre lang sehr stark eingeschränkt.

Nach der Entdeckung neuer und mächtiger Lernverfahren in den achtziger Jahren lebte das Interesse jedoch wieder auf. Nun war man in der Lage, auch nicht linear separierbare Probleme, wie z.B. die XOR-Funktion, von einem Neuronalen Netz lösen zu lassen. Die Industrie hat die Neuronalen Netze für sich entdeckt und wendet sie in Bereichen wie z.B. Bildverarbeitung, Schrift- und Spracherkennung an. Es gibt bereits eine Vielzahl kommerzieller und frei verfügbarer Entwicklungsumgebungen, die eine Erstellung eines Neuronalen Netzes am Computer ermöglichen und die Entwicklungen von Anwendungen erleichtern. Selbst „Neuronale Hardware“ ist mittlerweile entwickelt worden. Dabei handelt es sich um Zusatzhardware für Computersysteme zur Unterstützung der Rechenvorgänge in Neuronalen Netzen.

Die Forschung an künstlichen Neuronalen Netzen, d.h. an vom Computer simulierten Neuronalen Netzen, ist ein hochgradig interdisziplinäres Gebiet. Biologen und Neurophysiologen untersuchen sie, um mehr über biologische Neuronale Netze, also den Aufbau und die Funktionsweise von Gehirnen zu erfahren. Psychologen bzw. Kognitionswissenschaftler befassen sich mit ihnen, um menschliche Verhaltensweisen z.B. kognitive Leistungen zu simulieren. Mathematiker, Ingenieure und Informatiker verwenden sie zur Datenanalyse, zur Regelung und Steuerung und untersuchen sie als parallele informationsverarbeitende Modelle. Die Grenzen zwischen diesen Bereichen sind fließend und gerade zwischen den beiden letztgenannten Gebieten bestehen starke Überschneidungen.

Dem Vorteil der Lernfähigkeit Neuronaler Netze gegenüber herkömmlichen Verfahren der Informationsverarbeitung steht jedoch ein Nachteil entgegen: Neuronale Netze können nicht interpretiert werden, sie stellen sich dem Entwickler und dem Anwender als eine „Black Box“ dar. Das in ihnen enthaltene „Programm“ oder „Wissen“ entzieht sich einer formalen Untersuchung, wodurch die Verifikation eines Neuronalen Netzes unmöglich wird.

Neben ihrer Fähigkeit des Lernens sind Neuronale Netze in der Lage, mit unvollständigen, gestörten oder ungenauen Eingaben zu arbeiten und dennoch eine akzeptable Ausgabe zu produzieren. Sie sind von daher für den Bereich des „Soft-Computing“ von Interesse. Mit Soft-Computing werden wissensbasierte Techniken bezeichnet, die in der Lage sind, mit unsicheren und impräzisen Daten zu arbeiten. Auf diese Weise können sie zu Ergebnissen gelangen, wenn andere herkömmliche, meist logikbasierte KI-Ansätze versagen, die auf „scharfe“ (engl. crisp), d.h. exakte Daten angewiesen sind. Zu dem Bereich des Soft-Computing werden neben Neuronalen Netzen auch Fuzzy-Systeme und probabilistische Verfahren (z.B. Bayessche Netze) gezählt.

Die Themenauswahl in diesem Buch konzentriert sich nach einer Darstellung der für Neuronale Netze notwendigen Grundlagen und der Vorstellung einiger wichtiger Neuronaler Architekturen und Lernverfahren auf Kopplungsmöglichkeiten konnektionistischer Modelle mit anderen wissensbasierten Methoden. Als Resultate der Integration werden die *konnektionistischen Expertensysteme* und die *Neuronalen Fuzzy-Systeme* diskutiert. Man erhofft sich durch diese Kopplung lernfähige und dennoch interpretierbare wissensbasierte Systeme. Während konnektionistische Expertensysteme sich noch in einer konzeptionellen Phase befinden, trifft man die Neuronalen Fuzzy-Systeme bereits in zahlreichen industriellen Anwendungen an. Sie sind Gegenstand regen Forschungsinteresses, weshalb wir ihnen auch einen größeren Teil dieses Buches widmen.

Wesentliche Teile dieses Buches basieren auf Vorlesungen, Arbeitsgemeinschaften und Seminaren, die von den Autoren an der Technischen Universität Braunschweig gehalten wurden. Einige Ergebnisse unserer aktuellen Forschungsarbeiten sind ebenfalls eingeflossen. Wir wenden uns mit diesem Buch an Forscher und Anwender aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz sowie an Studierende der Informatik und angrenzender Gebiete. Das Buch ist in sich abgeschlossen, so daß keine Vorkenntnisse über Neuronale Netze, Fuzzy-Systeme oder Expertensysteme notwendig sind.

Für die Unterstützung bei der Entstehung des Buches bedanken wir uns bei Hermann-Josef Diekgerdes, Patrik Eklund, Steffen Förster, Jörg Gebhardt, Ingrid Gerdes, Michael Kruse, Joachim Nauck, Ulrike Nauck, Uwe Neuhaus und Thomas Scholz. Hartmut Wolff danken wir für die fachliche Unterstützung in diversen Projekten zum Thema Fuzzy-Systeme. Bei dem Vieweg-Verlag, insbesondere bei Dr. Reinald Klockenbusch, bedanken wir uns für die uns entgegengebrachte Geduld und die gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I Grundlagen Neuronaler Netze	9
1 Historische und Biologische Aspekte	11
2 Ein generisches Modell für Neuronale Netze	19
2.1 Die Struktur Neuronaler Netze	19
2.2 Die Arbeitsweise Neuronaler Netze	24
2.3 Strukturveränderung – Lernen	28
2.4 Lernparadigmen	34
II Architekturen Neuronaler Netze	37
3 Perceptrons	39
3.1 Das formale Modell des Perceptrons	41
3.2 Lineare Separabilität	46
3.3 Der Lernalgorithmus des Perceptrons	49
4 Einfache lineare Modelle	59
4.1 Das formale Modell Linearer Neuronaler Netze	60
4.2 Das ADALINE und die Delta-Regel	62
4.3 Matrixspeicher und die Hebbsche Lernregel	67

5	Multilayer-Perceptrons	71
5.1	Das formale Modell des Multilayer-Perceptrons	72
5.2	Backpropagation – Die verallgemeinerte Delta-Regel	74
5.3	Anwendung des Backpropagation-Algorithmus	77
5.4	Linear nicht-separable Lernaufgaben	80
5.5	Multilayer-Perceptrons als universelle Approximatoren	87
5.6	Anwendungen	91
6	Wettbewerbslernen	95
7	Selbstorganisierende Karten	103
7.1	Das formale Modell	104
7.2	Anwendungen selbstorganisierender Karten	107
7.3	Counterpropagation	112
8	Hopfield-Netze	115
8.1	Das formale Modell des Hopfield-Netzes	116
8.2	Die Energiefunktion eines Hopfield-Netzes	118
8.3	Das Hopfield-Netz als autoassoziativer Speicher	120
8.4	Die Lösung von Optimierungsproblemen mit Hopfield-Netzen	125
8.5	Das kontinuierliche Hopfield-Modell	132
9	Simulated Annealing und Boltzmann-Maschinen	137
9.1	Simulated Annealing	137
9.2	Boltzmann-Maschinen	139
10	Neuronale Regler	147
III	Konnektionistische Expertensysteme	153
11	Grundlagen der Expertensysteme	155
12	Wissensrepräsentation in Neuronalen Netzen	163
12.1	Der Wissensbegriff in der KI-Forschung	163

12.2	Wissensrepräsentation	164
12.3	Kognitionswissenschaftliche Aspekte der Wissensrepräsentation	169
12.4	Wissensverarbeitung	171
12.5	Konnektionistische Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung	172
13	Modellierung Konnektionistischer Expertensysteme	179
13.1	Konzeptionelle Überlegungen	180
13.2	Regelfolgende Modelle	188
13.3	Regelbeherrschte Modelle	203
14	Preprocessing	223
14.1	Transformationen und Merkmalsausprägung	224
14.2	Erlernen der Transformationen	226
IV	Neuronale Fuzzy-Systeme	231
15	Modellierung Neuronaler Fuzzy-Systeme	233
15.1	Kognitive Modellierung von Expertenverhalten	234
15.2	Fuzzy-Regler	236
15.3	Kombinationen Neuronaler Netze und Fuzzy-Regler	253
16	Kooperative Neuronale Fuzzy-Regler	269
16.1	Adaptive Fuzzy-Assoziativspeicher	269
16.2	Linguistische Interpretation selbstorganisierender Karten	278
16.3	Erlernen von Fuzzy-Mengen	281
17	Hybride Neuronale Fuzzy-Regler	285
17.1	Das ARIC-Modell	285
17.2	Das GARIC-Modell	295
17.3	Weitere Modelle	305
18	Das NEFCON-Modell	315
18.1	Anforderungen an das Modell	316
18.2	Die Architektur	318

18.3 Die Arbeitsweise	323
18.4 Fuzzy-Fehler-Propagation – Der Lernalgorithmus	325
18.5 Erlernen einer Regelbasis	334
18.6 Beurteilung des NEFCON-Ansatzes	337
18.7 NEFCON-I – Eine Implementierung	340
19 Neuronale Netze und Fuzzy-Prolog	355
19.1 Neuronale Netze und Logik	355
19.2 Fuzzy-Logik	357
19.3 Neuronale Netze und Fuzzy-logische Programme	362
19.4 Der Lernalgorithmus	376
Literaturverzeichnis	383
Index	404