

# Neuronale Netze

**Springer**

*Berlin*

*Heidelberg*

*New York*

*Barcelona*

*Budapest*

*Hongkong*

*London*

*Mailand*

*Paris*

*Santa Clara*

*Singapur*

*Tokio*

Heinrich Braun

# Neuronale Netze

Optimierung durch Lernen und Evolution

Mit 64 Abbildungen und 17 Tabellen



Springer

Heinrich Braun  
Seewiesenäckerweg 35  
76199 Karlsruhe

ISBN-13: 978-3-642-64535-8 e-ISBN-13: 978-3-642-60743-1  
DOI: 10.1007/978-3-642-60743-1

Deutsche Bibliothek – Einheitsaufnahme

Braun, Heinrich:  
Neuronale Netze: Optimierung durch Lernen und Evolution/  
Heinrich Braun. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona;  
Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara;  
Singapur; Tokio: Springer, 1997

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 1997

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1997

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, Werbeagentur, Heidelberg  
Satz: Reproduktionsfertige Vorlagen des Autors  
SPIN 10566650 33/3142– 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Vorwort

Dieses Buch ist aus meiner Habilitationsschrift an der Universität Karlsruhe entstanden. Zielsetzung meines Buches ist es, dem Leser einen vertieften Einblick in die vielfältigen Lern- und Optimierungsmethoden für neuronale Modelle zu geben. Um diesen Ansatz nicht durch eine allzu große Modellvielfalt zu überfrachten, habe ich mich im wesentlichen auf zwei wichtige neuronale Modelle beschränkt:

- Das *Multilayer Perceptron*, das meistverwendete Modell für Klassifikation und Funktionsapproximation, als Repräsentant für die implizite Wissensrepräsentation.
- Das *Modell der radialen Basisfunktionen*, geeignet zur Modellierung von Neuro-Fuzzy-Ansätzen, als Repräsentant für die explizite Wissensrepräsentation.

Falls ein Leser das von ihm verwendete neuronale Modell hier nicht findet, sollte es ihm dennoch gelingen, die Grundprinzipien der in diesem Buch behandelten Lernverfahren und evolutionären Optimierungsmethoden auf *sein* Modell zu übertragen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist auch ein umfangreiches Softwaresystem zur Optimierung neuronaler Netze entstanden: *ENZO* – ein *Evolutionärer Netzwerk-Optimierer*. *ENZO* ist seit Oktober 1995 im Verbund mit dem *Stuttgarter Neuronale Netze Simulator SNNS* erhältlich und für Forschungszwecke frei verfügbar. Mit dieser Entwicklungsumgebung kann der interessierte Leser die wesentlichen Methoden und vorgeschlagenen Verfahren in einfacher Weise an selbst gewählten Beispielen erproben und deren Effizienz experimentell validieren.

Ein solch umfangreiches Projekt war für mich nur in Zusammenarbeit mit vielen hilfreichen Mitarbeitern durchführbar. Für die gute Arbeitsatmosphäre und intensive Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen Kollegen bedanken, die mit ihren zahlreichen Ratschlägen und Hinweisen zum Gelingen dieses Werkes beitrugen. Insbesondere sind hier zu nennen: Dr. Martin Riedmiller (adaptive Lernverfahren, Reinforcement-Lernen), Dr. Joachim Weisbrod (erste Version von *ENZO*), Thomas Ragg (Weiterentwicklung von *ENZO*), Johannes Feulner (Strategielernen bei Spielen), Dr. Rainer Malaka (neurobiologische Aspekte des Reinforcement-Lernens) und Dr. Martin Kummer (Komplexitätstheorie).

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studenten, die mit ihren Ideen zur Entwicklung der Verfahren beitrugen und mit großer Sorgfalt die umfangreichen experimentellen Untersuchungen durchführten: Martin Albrecht, Axel Dold, Jörg Harthroth, Detlev Koll, Hans Lawitzke, Heiko Landsberg, Karl-Heinz Preut, Udo Pütz, Johannes Schäfer, Andreas Sprenger, Ngoc Long Tu, Volker Ullrich und Peter Zagorski.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Wolfram Menzel, durch dessen langjährige Unterstützung diese Arbeit erst ermöglicht wurde. Seine konstruktive Kritik war mir steter Ansporn.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Helge Ritter, meinem Zweitgutachter, und Herrn Prof. Holk Cruse, denen ich insbesondere während meines Forschungsjahres am Zentrum für interdisziplinäre Forschung in Bielefeld vielfältige Anregungen verdanke.

Dem Springer-Verlag, besonders Herrn Hermann Engesser, Frau Brygida Georgiadis, Frau Ulrike Stricker und Frau Ursula Zimpfer, danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Buchgestaltung.

Karlsruhe, im Frühling 1997

Heinrich Braun

Für  
Sarina, Elisa und Hiltrud

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINFÜHRUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Überblick .....	1
1.2 Aufbau.....	2
<b>2 NEURONALE MODELLE VON EXPERTENWISSEN</b>	<b>5</b>
2.1 Einführung .....	7
2.1.1 Überblick (neuronalen Modelle) .....	7
2.1.2 Anmerkungen aus der Berechenbarkeitstheorie .....	10
2.1.3 Anmerkungen aus der Komplexitätstheorie .....	12
2.1.4 Komplexität des Lernproblems .....	15
2.2 Implizite Wissensrepräsentation (Interpolation) .....	16
2.2.1 Überblick .....	16
2.2.2 Gradientenabstieg für das Multilayer Perceptron .....	18
2.2.3 Gradientenabstiegsmethoden mit Schrittweitensteuerung .....	19
2.2.4 Resilient Backpropagation (Rprop) .....	22
2.2.5 Rprop auf dichten Lernmengen .....	26
2.2.6 Gradientenabstieg für quadratische Polynome .....	33
2.2.7 Lernverfahren für ENZO.....	36
2.3 Explizite Wissensrepräsentation (Prototypen) .....	36
2.3.1 Überblick .....	36
2.3.2 Winner-takes-all-Modelle .....	38
2.3.3 Adaptive Resonanz-Theorie .....	40
2.3.4 Selbstorganisierende Karten (Kohonen-Netz).....	43
2.3.5 Auswahl neuronaler Experten durch Klassifikation .....	52
2.3.6 Radiale Basisfunktionen.....	54
2.3.7 Neuronale Modelle für unscharfe Logik .....	69



2.4 Semantische Netze – Optimierung durch Relaxation .....	72
2.4.1 Einführung .....	72
2.4.2 Modellierung eines Optimierungsproblems zu einer Datenbank....	73
2.4.3 Brain-State-in-a-Box-Modell – Gradientenabstieg .....	78
2.4.4 Hopfield-Netz – Hillclimbing .....	79
2.4.5 Boltzmann-Maschine – Simulated Annealing.....	82
2.4.6 Hopfield/Tank-Netz – Meanfield Annealing .....	85
2.4.7 Annealing der Optimierungsfunktion.....	93
2.4.8 Ein Beispiel – Interactive Activation and Competition.....	94
<b>3 NEURONALE MODELLE FÜR STRATEGIELERNEN</b> .....	<b>99</b>
3.1 Problemstellung .....	99
3.2 Lernen nach Beispielen .....	100
3.3 Lernen nach Zielvorgabe.....	102
3.3.1 Direktes Ziel.....	102
3.3.2 Fernziel .....	103
3.4 Reinforcement-Lernen .....	107
3.4.1 Dynamisches Programmieren.....	111
3.4.2 Überwachtes Lernen mit absoluten Bewertungen .....	113
3.4.3 Überwachtes Lernen mit relativen Bewertungen.....	116
3.4.4 Komprimieren der Kodierung einer optimalen Strategie .....	124
3.4.5 Value Iteration .....	126
3.4.6 Real Time Dynamic Programming.....	128
3.4.7 Temporal Difference Learning.....	131
3.4.8 Q-Learning, ein Modell-freier Ansatz.....	141
3.4.9 Spezialfall: Zielorientiertes Lernen/Strategiespiele.....	143
3.4.10 Vergleichende Bewertung am Benchmark-Problem Mühle .....	161
<b>4 EVOLUTION NEURONALER NETZE</b> .....	<b>167</b>
4.1 Evolutionäre Algorithmen.....	167
4.1.1 Grundalgorithmus .....	168
4.1.2 Repräsentation – Kodierung der Individuen .....	170
4.1.3 Generierung von Nachkommen.....	171

---

4.1.4 Selektion .....	176
4.1.5 Mehrstufige Optimierung.....	182
4.1.6 Evolution der Evolutionsparameter.....	183
4.1.7 Historischer Rückblick.....	184
4.1.8 Vergleich zu anderen Optimierungsheuristiken .....	190
4.2 Grundkonzeption von ENZO .....	192
4.2.1 Aufgabenstellung .....	192
4.2.2 Grundkonzept.....	193
4.2.3 Historischer Rückblick über die Evolution neuronaler Netze .....	202
4.3 ENZO für Überwachtes Lernen .....	208
4.3.1 Generierung der Nachkommen .....	208
4.3.2 Lernen .....	217
4.3.3 Minimierung von Multilayer Perceptrons .....	222
4.3.4 Minimierung von RBF-Netzen.....	232
4.3.5 Andere Optimierungskriterien.....	238
4.4 ENZO für Reinforcement-Lernen .....	241
4.4.1 Wissenstransfer von den Eltern – Lamarckismus.....	242
4.4.2 Minimierung des neuronalen Bewerter.....	244
4.4.3 Strategiespiele: Reinforcement-Lernen im Turnier .....	250
4.5 ENZO für unscharfe Regler .....	252
4.6 Lernen und Evolution auf einem Parallelrechner .....	259
4.6.1 Überblick .....	259
4.6.2 Parallel Intelligent Neural Network Simulator Karlsruhe (PINK) .....	260
4.6.3 Vergleich der Performanz von PINK .....	265
<b>5 SCHLUSSBEMERKUNG</b>	<b>267</b>
<b>6 LITERATUR</b>	<b>271</b>