Sonderforschungsbereich 531
Design und Management komplexer Prozesse und Systeme mit Methoden der Computational Intelligence

Hans-Paul Schwefel und Ulrich Hammel

SFB 531, Universität Dortmund

1 Einleitung

Fuzzy-Systeme, *künstliche Neuronale Netzwerke* und *Evolutionäres Rechnen* – im folgenden unter dem Begriff CI-Methoden (CI = *Computational Intelligence*) subsumiert – haben, grob betrachtet, vieles gemeinsam:

- Ihre Grundkonzepte sind seit langem bekannt und waren zeitweise umstritten. Ein Grund für die anfänglich zögerliche Akzeptanz bestand unter anderem in der Nichtverfügbarkeit ausreichender Rechenleistung. Außerdem galt es, Widerstände in etablierten Disziplinen zu überwinden. Und, wie in anderen Forschungsfeldern auch, mußte sich zunächst eine „kritische Masse" bilden, welche die Initialzündung für eine breite Forschung auslöste.
- Sie werden zunehmend erfolgreich und immer breiter angewandt. Analog zu vielen anderen Wissenschaftszweigen entstand auch auf dem Gebiet der CI die kritische Masse im Bereich der Anwendungsforschung. Konkrete, praktische Probleme existieren und müssen gelöst werden, unabhängig davon, ob die Grundlagenforschung dies wahrnimmt oder nicht, vielleicht sogar die generelle Unlösbarkeit unter gewissen Prämissen zeigt. Neue Methoden werden oft zunächst versuchsweise angewandt und erweisen sich gegebenenfalls in der Praxis als nützlich, ohne daß der formale Nachweis der Anwendbarkeit a priori geführt wurde. Die Existenzberechtigung der Methoden lautet: „Es funktioniert". Das ist dann Stimulans für die Suche nach dem „Warum?" bzw. „Wann und wann nicht?".
- Ihre theoretischen Grundlagen sind noch sehr unvollkommen. Die Grundlagenforschung reagiert häufig eher abwartend, bevor sie neue Methoden assimiliert, deren Funktionstüchtigkeit formal nur schwer, wenn überhaupt, nachweisbar ist. Zwar wurden in Teilbereichen erhebliche Erfolge erzielt – am weitesten sind im Bereich der CI zweifellos die Grundlagen der Fuzzy-Logik entwickelt –, ein Gesamtbild fehlt aber.
- Es werden ständig neue spezielle Varianten nach dem „Trial-and-Error" Prinzip kreiert. Ursache für die entsprechend ineffiziente, „das Rad immer wieder neu erfindende" Vorgehensweise ist das Fehlen einer adäquaten, theoretisch fundierten Basis.
- Ihre Anwendungsbereiche überlappen sich. Angewandt werden CI-Methoden vernünftigerweise nur dort, wo herkömmliche Konzepte nicht hinreichen oder

einen zu hohen Aufwand für eine sichere und exakte Lösung erfordern. CI-Verfahren begnügen sich dann mit meist guten Approximationen und positiven Erfolgswahrscheinlichkeiten. Oftmals können sie alternativ eingesetzt werden. Typische Anwendungsbereiche sind unter anderem die nichtlineare Steuerungs- und Regelungstechnik, Optimierung, Modellierung, Identifikation, Klassifikation, Bildverarbeitung, Mustererkennung sowie die Entscheidungsunterstützung, oft unter mehrfacher (konkurrierender) Zielsetzung.

- Sie ergänzen sich vorzüglich. Aus der Anwendung von CI-Methoden ergeben sich häufig neue Probleme, die ebenfalls (noch) nicht analytisch zu lösen sind. Als Beispiele seien die Struktur- und Gewichtsoptimierung in Neuronalen Netzen, die Parametrisierung und Operatorenauswahl bei Evolutionären Algorithmen sowie die Bestimmung von Fuzzy-Regelmengen und Zugehörigkeitsfunktionen genannt. Solche Aufgaben können häufig durch Kombination von CI-Methoden in der Praxis gelöst werden. Diese Hybridisierung von Verfahren geschieht heute zumeist sequentiell (Methode A als Vorverarbeitungsstufe für B). Es besteht aber die Vermutung, daß durch kompetentere Kopplungskonzepte wesentlich mehr erreicht werden kann, wenn erst die Grundlagen besser verstanden wurden.
- Sie sind Instanzen eines übergeordneten Konzepts. Ziel ist letztlich das Vordringen von Problemlösungsalgorithmen in neue Komplexitätsklassen. Hier gibt es zahlreiche Verwandtschaften zu anderen Verfahren mit gleicher Zielsetzung. Beispiele sind Zellularautomaten, Immunnetzwerke und Agentensysteme, possibilistische Ansätze und mehrwertige Logik sowie kompetitive Systeme und sich selbst organisierende Strukturen. Man kann erwarten, daß das Gebiet der CI in dieser Beziehung noch stark erweitert werden wird.
- Sie wurden im Duden-Lexikon der Informatik von 1988 noch nicht einmal erwähnt. In der neueren Ausgabe von 1993 findet man allerdings Abschnitte zu den Stichworten Fuzzy-Logik, Neuronale Netze und Genetische Algorithmen. Letzteres betrifft wenigstens eine der beiden amerikanischen Varianten der Evolutionären Algorithmen. Die Forschung beginnt, die Potenz der CI-Verfahren zu erkennen. Die Wirtschaft nutzt sie schon länger, und auch die Informatik-Lehre greift das Thema allmählich auf.

2 Naturanaloges paralleles Problemlösen

Die Gemeinsamkeiten der Methoden reichen aber tiefer. Abgesehen von der hauptsächlich subsymbolischen (numerischen) Repräsentation der Information – ganz im Gegensatz zur klassischen, rein symbolisch-basierten Repräsentation in der *Künstlichen Intelligenz* (KI) – stellen die CI-Techniken von der Intention her algorithmische Nachbildungen von Informationsverarbeitungsprozessen in natürlichen Systemen dar. Außer der Faszination, welche die beobachtbaren Leistungen der natürlichen Vorbilder ausüben, spielen zwei Motive bei der Beschäftigung mit ihnen eine wesentliche Rolle:

- Der Drang des Naturforschers, die Phänomene zu verstehen.

– Der Versuch des Ingenieurs, sich diese *Patente der Natur* nutzbar zu machen.

Das Gebiet der Computational Intelligence kann als Fortsetzung älterer Bemühungen gesehen werden, die als Kybernetik bzw. Bionik in die Wissenschaftsgeschichte eingegangen sind. Hinzu gekommen sind, zugleich als Instrument für die (simulative) Analyse und als Zielsystem für die Nutzbarmachung der naturanalogen Problemlösungsmechanismen, der Rechner und zunehmend ganze Netzwerke von Prozessoren. Eine Voraussetzung für diese Verbindung war und ist der Übergang von analytischen zu algorithmisch umsetzbaren Modellen der betrachteten Prozesse sowie der Übergang von rein sequentiellen zu immanent parallelen Abläufen, wobei die Parallelität nicht im Sinne von „divide et impera“, sondern im Sinne kollektiver Nutzung diverser Einzelaktionen zu verstehen ist.

Dennett [1] sieht bereits Darwins Leistung hauptsächlich darin, die natürliche Evolution als iterativen (und parallelen) Prozeß erkannt bzw. gedeutet zu haben. Ähnliches kann man für alle anderen zur CI gehörenden Paradigmen behaupten. Damit öffnet sich einerseits der eher spielerische Weg der Simulation künstlicher Lebensprozesse auf Rechnern, wie er im Bereich *Artificial Life* (AL) noch großenteils begangen wird, andererseits aber auch der Weg zur Nutzung von Informatikgrundlagen zur Analyse und somit zu einem tieferen Verständnis der Phänomene anhand der Sezierung der algorithmischen Modelle mit dem Ziel der Schaffung eines konstruktiven, methodischen Ansatzes. Dieser SFB hat sich auf den zweiten Weg begeben.

3 Die Entwicklung der Computational Intelligence

Das internationale Interesse an der CI-Forschung und ihre praktische Bedeutung wird sowohl durch entsprechende nationale Forschungsförderungen, vor allem in Japan und den USA, als auch durch eine stetig wachsende Zahl von Veröffentlichungen und Konferenzen [2] belegt. Die zur Zeit wichtigsten Teilgebiete der CI bilden die *Neuronalen Netze* (NN) [3], die *Fuzzy-Logik* (FL) [4] und die *Evolutionären Algorithmen* (EA) [5]. Die starke methodische Verwandtschaft dieser Ansätze wurde insbesondere auf dem ersten *IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI)* deutlich [6], welcher maßgeblich zur Etablierung der CI beigetragen hat. Eine Folgekonferenz ist für Mai 1998 in Anchorage, Alaska, angekündigt.

Der Begriff *Computational Intelligence*, der in der hier verwendeten Bedeutung von Bezdek vorgeschlagen wurde [7,8], ist seither als Oberbegriff für die genannten Methoden etabliert. In diesem Umfeld haben sich weitere Arbeitsgebiete entwickelt, von denen insbesondere *Autonomous Agents (AA)* und *Simulation of Adaptive Behavior (SAB)* zu nennen sind. Obgleich die CI, vornehmlich in den USA, als neuer Zweig der *Künstlichen Intelligenz* (KI) verstanden wird, unterscheiden sich ihre Methoden grundlegend vor allem in der Art der Wissensrepräsentation und -verarbeitung von den traditionellen KI-Ansätzen, wie sie im Bereich der *Expertensysteme* (XPS) benutzt werden. Zur Abgrenzung sei ein kurzer Rückblick auf die Entwicklung der CI erlaubt.

Mit der Verfügbarkeit der ersten Digitalrechner und der Entdeckung ihrer Berechnungsuniversalität schien für die Realisierung eines langgehegten Traumes, der Konstruktion von künstlichen intelligenten Systemen, das geeignete Medium bereit zu stehen. Anfangs galt das Interesse vornehmlich dem Entwurf universeller, lernfähiger und adaptiver Systeme auf der Basis einfacher (numerischer) Repräsentationen. Zahlreiche Ansätze wurden verfolgt, darunter das von Rosenblatt Mitte der 50er Jahre entwickelte *Perzeptron*-Modell [9], das als Vorläufer der Neuronalen Netze gilt. Auch die Grundlagen der Evolutionären Algorithmen wurden in jener Zeit gelegt. So entwickelten in den USA unabhängig voneinander Holland [10,11] die *Genetischen Algorithmen* (GA) als Modell für Adaptations- und Klassifikationsprozesse und Fogel [12,13] das *Evolutionary Programming* (EP) zur Zeitreihenvorhersage mittels endlicher Automaten. Nahezu zeitgleich dazu entwarfen Rechenberg [14,15] und Schwefel [16,17] in Deutschland die Evolutionsstrategien (ES) als Heuristiken für die experimentelle Optimierung. Ebenfalls in den 60er Jahren propagierte der amerikanische Systemtheoretiker Zadeh den Übergang zu unscharf abgegrenzten Mengen in einer qualitativ neuartigen Modellbildungsstrategie und schuf damit die Grundlagen der Fuzzy-Logik [18].

Der entscheidende Erfolg dieser Ansätze blieb aber zunächst aus, was einerseits auf die zu geringe Leistungsfähigkeit der damals verfügbaren Hardware, andererseits aber auch auf die unzulängliche theoretische Durchdringung der neuen Konzepte zurückzuführen war. So wiesen Ende der 60er Jahre Minsky und Papert die begrenzte Berechnungsfähigkeit des Perzeptronmodells nach [19], worauf das Interesse an konnektionistischen Modellen zunächst stark nachließ. In der Folge konzentrierte sich die KI-Forschung auf die symbolische Wissensrepräsentation, genauer gesagt, die Wissensverarbeitung auf der Basis „scharfen" Wissens im Gegensatz zum unscharfen bzw. unvollständigen Wissen. Zadeh hat hierfür das vielleicht treffendere Begriffspaar „crisp computing" versus „soft computing" geprägt. Die Konstruktion von Expertensystemen und Entwicklungsumgebungen führte in den 70er und 80er Jahren zu einigen spektakulären Erfolgen [20–22]. Die Evolutionären Algorithmen gerieten in dieser Phase fast in Vergessenheit.

Mitte der 80er Jahre zeichneten sich aber auch die Grenzen der rein symbolischen Wissensverarbeitung ab. Beispielsweise besitzen viele (insbesondere technische) Probleme häufig inhärent numerische (subsymbolische) Repräsentationen, für die sich rein symbolische Lösungsverfahren als ungeeignet erwiesen. Aus diesem Bedarf heraus und mit der Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Hardware erlebten Teilbereiche der CI eine Renaissance. So führten die Arbeiten von Hopfield [23], Rumelhart, McClelland und der PDP Research Group [24] zu einer Wiederbelebung der NN-Forschung, und erste spektakuläre Einzelerfolge NN-, EA- und FL-basierter Systeme (siehe etwa Sejnowski und Rosenberg [25], Kohonen et al. [26], Goldberg [27,28], Hartmann [29], Holmblad/Østergaard [30]) ließen die Forschungsaktivitäten in diesen Bereichen weltweit stark ansteigen mit der Folge einer Fülle erfolgreicher Anwendungen, welche die Problemlösungspotentiale dieser drei Paradigmen in eindrucksvoller Weise belegen (siehe etwa Alanders Bibliographie [31] mit über 3000 Referenzen zum Thema EA , Klimaskausas [32] zu NN sowie Hirota [33], Sugeno [34] und Gupta, Yamakawa [35] zu FL).

Bezdek [7] charakterisiert die Methoden der CI durch folgende Eigenschaften:

- Anpassungsfähigkeit,
- Fehlertoleranz,
- Verarbeitungsgeschwindigkeiten im Bereich menschlicher Kognitionsprozesse (insbesondere unter Ausnutzung der inhärenten Parallelität) und
- Optimalität der Fehlerraten (Verhältnis von Lernaufwand zu Fehlerhäufigkeit).

Das Attribut *Computational* bezieht sich auf die subsymbolische, numerische Problemrepräsentation und die daraus folgende subsymbolische Wissensaggregation und Informationsverarbeitung.

Bezdek bewertet die *Computational Intelligence* nur als im Sinne eines Trägers notwendige, nicht aber als hinreichende Bedingung zur Konstruktion künstlicher intelligenter Systeme. Der SFB 531 nimmt einen pragmatischen Standpunkt ein: Im Vordergrund steht nicht die Konstruktion intelligenter Systeme, sondern vielmehr die Erschließung der CI-Methoden zur Lösung komplexer (technischer) Aufgaben.

4 Stand der CI-Forschung und künftige Entwicklungen

Grob zusammengefaßt, kann das Gebiet CI derzeit durch folgenden Zustand charakterisiert werden:

- Es gibt eine Reihe von Insellösungen für spezielle Aufgabentypen, die von ihren Verfechtern gegen Angriffe von außen hart verteidigt werden (siehe Genetische Algorithmen versus Evolutionary Programming).
- Praktiker greifen, teilweise recht wahllos, CI-Methoden auf und verzeichnen Erfolge, ohne daß klar wird, warum die Methoden erfolgreich sind und ob nicht noch bessere Lösungen existieren.
- Die Vielzahl der erfolgreichen Anwendungen führt zu Euphorie und diese wiederum treibt Entwickler zu immer neuen ad-hoc-Strategievarianten.
- Grundlegende Erkenntnisse stellen sich unter solchen Bedingungen eher zufällig ein und bleiben zum großen Teil zusammenhanglos. Am weitesten vorangekommen ist die Grundlagenforschung heute bei Fuzzy-Systemen.
- Eine integrative Sichtweise ist erst ansatzweise erkennbar, etwa innerhalb der Klasse Evolutionäre Algorithmen.
- Es fehlt noch ein methodischer Überbau für die CI-Methoden (FL, NN und EA). Darum existiert auch noch kein konstruktives Konzept zur Überwindung von ad-hoc-Vorgehensweisen.

Als ein in der Praxis groß gewordenes Forschungsfeld erlebt die CI heute eine Phase, die in vielen jungen Disziplinen, gerade auch in der Informatik, zu beobachten war. Man denke an die frühen Programmiersprachen vor der

Entwicklung des theoretischen Überbaus (formale Sprachen, Automatentheorie, Komplexitätstheorie und formale Logik), an den Einfluß der Coddschen Relationenalgebra auf die Entwicklung von Datenbanken, an den Einfluß der formalen Logik auf die symbolische KI oder an den Einfluß der Theorie der Datentypen auf das Softwareengineering.

Komplexe Anwendungen („grand challenges“) in technischen Disziplinen, Naturwissenschaften (z. B. Molekularbiologie) und der Informatik selbst (z. B. Datenbanken, Bildverarbeitung, Data Mining, Visualisierung) erfordern effektive und effiziente Verfahren, die mit Eigenschaften wie Adaptivität, Fehlertoleranz, hohem Durchsatz und geringer Fehlerrate eine Annäherung an die Problemlösungskapazitäten lebender Systeme ermöglichen. Neben der Verwendung einzelner CI-Techniken wird zur Handhabung derartig komplexer Anwendungen zunehmend eine Kopplung von CI-Techniken untereinander und mit etablierten Techniken aus der Künstlichen Intelligenz, der mathematischen Optimierung und der statistischen Datenanalyse nötig werden, womit bisher ungenutzte Synergieeffekte dieser Verfahren zugänglich und sogenannte Intelligente Systeme (BMBF-Bezeichnung eines Förderschwerpunkts) von qualitativ völlig neuartigem Verhalten entwickelbar werden. Daher steht, neben der Analyse und Weiterentwicklung einzelner CI-Methoden, auch die Kopplung von Methoden im Mittelpunkt des Sonderforschungsbereichs.

Als weitere Paradigmen biologischer Informationsverarbeitung sind aber auch Immun-Netzwerke, Zellularautomaten und Multiagentensysteme zu nennen, die wohl in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen werden.

5 Ziele des Sonderforschungsbereichs

Entscheidend für die Popularität und den Erfolg von CI-Techniken ist die weitgehende Problemunabhängigkeit und damit die breite Verwendbarkeit CI-basierter Verfahren. Die Mehrzahl der praktischen Anwendungen findet sich in den technischen Disziplinen. Auch die Zahl der betriebswirtschaftlichen Anwendungen nimmt ständig zu, wie Biethahn und Nissen [36] zeigen. In beiden Bereichen treten häufig Probleme auf, die einerseits aufgrund ihrer Darstellung subsymbolische Lösungsverfahren erfordern, für die aber andererseits keine problemspezifischen analytischen oder auch numerisch approximativen Verfahren bekannt sind. Formal sind diese Probleme zumeist nicht exakt oder nicht effizient exakt lösbar, oder der Aufwand zur Erarbeitung exakter Lösungsverfahren steht in keinem vertretbaren Verhältnis zum Nutzen. In der Praxis begnügt man sich dann mit groben Näherungen auf der Basis von Erfahrungswissen. In solchen Fällen bieten sich CI-Methoden als generelle Heuristiken zur Implementierung von Lösungsverfahren an.

Der Wunsch und die Notwendigkeit, komplexe Problemstellungen in nahezu allen Bereichen wenigstens näherungsweise zu lösen, werden sich mit fortschreitender Technologisierung und Entwicklung des internationalen Wettbewerbs verstärken. Dazu ist es erforderlich,

– die existierenden Methoden weiterzuentwickeln, untereinander und mit traditionellen Techniken zu koppeln,
– ihre Leistungsfähigkeit an ständig neuen, in ihrer Komplexität zunehmenden Problemen, zu messen – insbesondere auch im Vergleich mit existierenden anderen Verfahren,
– ihre formalen Grundlagen zu analysieren und so ihre Möglichkeiten und Grenzen zu erkennen, sowie
– Alternativen zu suchen und zu prüfen.

Der SFB 531, der mit Beginn des Jahres 1997 seine Arbeit aufnahm, stellt an sich selbst die Forderung, wesentliche Beiträge zu den drei erstgenannten Themenkreisen zu leisten. Erklärtes Ziel ist es, die Theorie der informationsverarbeitenden Netze (Neuronale Netze sind nur eine spezielle Gruppe daraus), der Verarbeitung unscharfer bzw. unvollständiger Information und der evolutionären Selbstorganisation – auch in Kombination miteinander – voranbringen. Ihr Potential zur rechnergestützten Problemlösung soll ausgelotet und auch ihre Grenzen sollen klar absteckt werden. Und nicht zuletzt soll anhand prototypischer Anwendungen verbesserter und weiterentwickelter CI-Methoden diesem in anderen Ländern schon etablierten Gebiet – insbesondere von der Informatik her – ein Anschub in Deutschland geben werden. Die Vision des Sonderforschungsbereichs besteht darin, einen Prozeß zur Entwicklung eines konstruktiv-methodischen Überbaus anzustoßen und diese Entwicklung mitzugestalten. Dazu ist aber eine Strategie der kleinen Schritte notwendig:

Die Teilprojekte des SFB werden sich zunächst auf die etablierten CI-Techniken Fuzzy-Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen konzentrieren und sich dabei um ein besseres Verständnis der Funktionsweise und Grenzen der Methoden bemühen. Desgleichen müssen die Anwendungsbereiche klassifiziert und abgegrenzt werden. Es werden hybride Verfahren entwickelt und versucht, ihre Synergieeffekte zu verstehen. Schließlich ist es notwendig, das Forschungsgebiet CI besser zu definieren und abzugrenzen, wobei auch diejenigen verwandten Verfahren berücksichtigt werden sollen, die innerhalb dieser Grenzen liegen.

Es besteht die Hoffnung, aus dieser zunächst eher analytisch und experimentell ausgerichteten Vorgehensweise zu einem derart tiefen Verständnis der Verfahren zu gelangen, daß daraus eine synthetische Methodik entwickelt werden kann: Die Synthese konkreter Verfahren aus wohlverstandenen Bausteinen („building blocks“ im Jargon der Genetischen Algorithmen). Hierin besteht die langfristige Perspektive des Sonderforschungsbereichs.

Die Anwendungsprojekte des SFB wurden aus den Ingenieurwissenschaften gewählt, und zwar aus den Bereichen Elektrotechnik, Maschinenbau und Chemietechnik. Die erarbeiteten Lösungskonzepte werden sich aber auch auf andere Aufgabenbereiche, außerhalb der Ingenieurdisziplinen, übertragen lassen, da es um so allgemeine Aufgaben wie z. B. Identifikation, Modellierung, Klassifikation, Mustererkennung, Bildverarbeitung, Steuerung/Regelung und Optimierung geht.

Schließlich bleibt noch anzumerken, daß bei manchen der beteiligten Wissenschaftler der Gedanke nicht ruht, mit den gewonnenen Erkenntnissen über die

Leistungsfähigkeit der von der Natur inspirierten Algorithmen auch ein wenig das Verstehen der (selbstverständlich stark vereinfacht) modellierten Vorbilder voranzubringen. Wenn dies gelingt, dann wäre das nicht nur ein Beitrag zur vielfach geforderten Mathematisierung in den Naturwissenschaften, die auf diesem Wege noch nicht so weit vorangekommen sind wie beispielsweise die Physik. Es wäre vielleicht sogar eine wichtige Komponente, um mit immer komplexeren artifiziellen Systemen, eingebettet in die teils sehr empfindliche natürliche Umwelt, sachgerecht umzugehen. Die benutzten Paradigmen sind jedenfalls Beispiele robuster und oft erstaunlich effizienter Prozesse, die eine lang andauernde Bewährungsprobe bereits bestanden haben.

Die Fülle der aus der Natur abschaubaren Problemlösungskonzepte ist mit Sicherheit noch nicht annähernd ausgeschöpft. Angefangen von der Frage, warum Adaptivität so oft an Kritikalitätsgrenzen anzutreffen ist und ob man daraus etwas lernen kann, bis hin zu Multiagenten-Strategien mit kooperativem bis altruistischem Verhalten einzelner Individuen und Teilpopulationen, die besonders geeignet sein mögen für die Suche nach Pareto-optimalen Lösungen zwischen Scylla (effiziente aber wenig robuste Methoden) und Charybdis (effektive aber zu aufwendige Methoden): Es gibt noch viel zu entdecken!

Literatur

1. D. C. Dennett. *Darwin's Dangerous Idea.* Simon & Schuster, New York, 1995.
2. H.-P. Schwefel. Parallel problem solving from nature. In A. Kent, J. G. Williams, und C. M. Hall, Hrsg., *Encyclopedia of Computer Science and Technology.* Marcel Dekker, New York, 1997, (im Druck).
3. E. Fiesler und R. Beale, Hrsg. *Handbook of Neural Computation.* Oxford University Press, New York, 1996.
4. E. Ruspini, P. Bonissone, und W. Pedrycz, Hrsg. *Handbook of Fuzzy Computation.* Oxford University Press, New York, 1997 (im Druck).
5. Th. Bäck, D. B. Fogel, und Z. Michalewicz, Hrsg. *Handbook of Evolutionary Computation.* Oxford University Press, New York, 1997.
6. J. M. Zurada, R. J. Marks II, und C. J. Robinson, Hrsg. *Computational Intelligence: Imitating Life.* IEEE Press, New York, 1994.
7. J. C. Bezdek. What is Computational Intelligence? In Zurada et al. [6], Seiten 1–12.
8. J. C. Bezdek. Computational Intelligence and Edge Detection. In A. Grauel, Hrsg., *Proc. Fuzzy-Neuro-Systems '97 — Computational Intelligence*, Seiten 1–31. infix-Verlag, Sankt Augustin, 1997.
9. F. Rosenblatt. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6):386–408, 1958.
10. J. H. Holland. Outline for a logical theory of adaptive systems. *J. of the ACM*, 3:297–314, 1962.
11. J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* The Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
12. L. J. Fogel. Autonomous automata. *Industrial Research*, 4:14–19, 1962.
13. L. J. Fogel, A. J. Owens, und M. J. Walsh. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution.* Wiley, New York, 1966.

14. I. Rechenberg. Cybernetic solution path of an experimental problem. Royal Aircraft Establishment, Library translation No. 1122, Farnborough, Hants., UK, August 1965.
15. I. Rechenberg. *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution.* Dissertation, TU Berlin, 1971.
16. H.-P. Schwefel. Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse. Interner Bericht HE/F 35-B, AEG Forschungsinstitut, Berlin, Oktober 1968.
17. H.-P. Schwefel. *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung.* Dissertation, TU Berlin, Mai 1975.
18. L. A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
19. M. Minsky und S. Papert. *Perceptrons.* MIT Press, Cambridge, MA, 1969.
20. F. Hayes-Roth, D. A. Waterman, und D. B. Lenat, Hrsg. *Building Expert Systems.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.
21. R.K. Lindsay, B.G. Buchanan, E.A. Feigenbaum, und J. Lederberg. *Applications of Artificial Intelligence for Organic Chemistry: The DENDRAL Project.* McGraw-Hill, New York, 1980.
22. B.G. Buchanan und E.H. Shortcliff. *Rule Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1985.
23. J. J. Hopfield. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. National Academy of Science*, 79:2554–2558, 1982.
24. D. E. Rumelhart und J. L. McClelland. *Parallel Distributed Processing – Explorations in the Microstructure of Cognition*, Band 1: Foundations. MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
25. T.J. Sejnowski und C. R. Rosenberg. Parallel Networks that Learn to Pronounce English Text. *Complex Systems*, 1:145–168, 1987.
26. T. Kohonen, M. Shozakai, J. Kangas, und O. Venta. Microprocessor implementation of a large vocabulary speech recognizer and phonetic typewriter for Finnish and Japanese. In J.A. Laver und M.A. Jack, Hrsg., *Proc. Europ. Conf. on Speech Technology*, Seiten 377–380. CEP Consultants, Edinburgh, 1987.
27. D. E. Goldberg. Genetic algorithms and rule learning in dynamic system control. In J. J. Grefenstette, Hrsg., *Proc. First Int'l Conf. Genetic Algorithms and Their Applications*, Seiten 8–15. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1985.
28. D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
29. D. Hartmann. Optimization in CAD: On the applicability of nonlinear evolution-strategies for optimization problems in CAD. In J.S. Gero, Hrsg., *Optimization in Computer-Aided Design*, Seiten 293–305. Elsevier, Amsterdam, 1985.
30. L. P. Holmblad und J. J. Østergaard. Control of a cement kiln by fuzzy logic. *FIDP*, Seiten 389–399, 1982.
31. J. T. Alander. An Indexed Bibliography of Genetic Algorithms: Years 1957–1993. Art of CAD Ltd, Espoo, Finnland, 1994.
32. C. C. Klimaskausas, Hrsg. *The 1989 Neuro-Computing Bibliography.* MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
33. K. Hirota. *Industrial Applications of Fuzzy Technology.* Springer, Tokyo, 1993.
34. M. Sugeno. *Industrial Applications of Fuzzy Control.* North-Holland, Amsterdam, 1985.
35. M. M. Gupta und T. Yamakawa, Hrsg. *Fuzzy Computing: Theory, Hardware and Applications.* Elsevier, Amsterdam, 1988.
36. J. Biethahn und V. Nissen. *Evolutionary Algorithms in Management Applications.* Springer, Berlin, 1995.