

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/220493741>

Computational Intelligence

Article in *at - Automatisierungstechnik* · January 2008

DOI: 10.1524/auto.2008.9055 · Source: DBLP

CITATIONS

14

READS

140

2 authors:



Andreas Kroll

Universität Kassel

209 PUBLICATIONS 1,375 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Ralf Mikut

Karlsruhe Institute of Technology

391 PUBLICATIONS 3,132 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Biointerfaces [View project](#)



Early detection and decision support for critical situations in production environments: Development of assistance systems to support plant operators in critical situations [View project](#)

Computational Intelligence

Computational Intelligence

Andreas Kroll und Ralf Mikut

1 Einführende Übersicht

Der Begriff Computational Intelligence (CI) fasst drei biologisch motivierte Fachgebiete der Informationsverarbeitung zusammen:

- Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind stark vereinfachte technische Realisierungen der Informationsverarbeitung in Gehirn und Nervensystem. Ihre Kennzeichen sind dezentrale und parallele Strukturen, die aus einfachen Elementen aufgebaut sind. Für diese Strukturen existieren spezielle zugeschnittene Lernverfahren, die ein datenbasiertes Lernen aus Beispielen unterstützen.
- Fuzzy-Systeme nutzen natürlichsprachliche Regeln, um Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems zu beschreiben. Während klassische regelbasierte Systeme nur Ja-Nein-Aussagen treffen (Die Bedingung einer Regel ist erfüllt oder nicht erfüllt.), können Fuzzy-Systeme unscharfe Aussagen auswerten und verarbeiten (Die Bedingung ist teilweise erfüllt und die Schlussfolgerung wird entsprechend abgeschwächt.). Fuzzy-Systeme können durch Expertenbefragung oder datenbasiertes Lernen entworfen werden.
- Evolutionäre Algorithmen ahmen die Mechanismen der natürlichen Evolution (Repräsentation durch Gene; Mutation, Rekombination; Selektion nach Bewertungskriterien) auf dem Rechner nach, um Optimierungsaufgaben zu lösen.

Allen drei Fachgebieten ist gemeinsam, dass sie auf einer subsymbolischen Datenverarbeitung basieren und Problemlösungsstrategien objektivieren.

Dabei zeichnen sich Fuzzy-Systeme durch ihre einfache Interpretierbarkeit und Einbringbarkeit von Vorwissen aus. Das motivierte methodische Arbeiten und industrielle Anwendungen insbesondere im Bereich der nichtlinearen Regelung („Fuzzy Control“), der Fuzzy-Modellbildung für einen modellbasierten Reglerentwurf und im Data Mining.

Künstliche Neuronale Netze erzeugen oftmals Netze mit einem guten Assoziationsvermögen, ohne dass die zugrunde liegende nichtlineare Systemstruktur explizit angegeben werden muss. Das führte zu Arbeiten insbesondere im Bereich der datengetriebenen Modellbildung und im Data Mining, wo sie heutzutage zu den bewährten Metho-

den und Werkzeugen gehören. Wie bei allen datenbasierten Verfahren hängt die erreichbare Güte allerdings stark von der Qualität des verfügbaren Datensatzes ab.

Die spezifischen Vorteile führten frühzeitig zu kombinierten Neuro-Fuzzy-Methoden, bei denen die Vorteile beider Ansätze (Interpretierbarkeit und Lernverfahren) verbunden wurden. Die beiden Gebiete haben sich gegenseitig befruchtet; so stehen z. B. mittlerweile sehr leistungsfähige Lernverfahren für Fuzzy-Modelle zur Verfügung. Künstliche Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme gehören beide zu den universellen Approximatoren, die bei geeigneter Struktur und Parametrierung jeden beliebigen funktionalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen abbilden können.

Die Evolutionären Algorithmen (EA) finden insbesondere bei Optimierungsproblemen Anwendung, die mit klassischen Verfahren nicht oder schwer lösbar sind (z. B. multimodale Optimierungsprobleme, nichtdifferenzierbare Zielfunktionen). Auch hier sind Synergien mit Fuzzy-Systemen und KNN entstanden, insbesondere im Bereich optimierungsbasierter Entwurfsmethoden.

Das Thema CI ist stark interdisziplinär ausgerichtet, da insbesondere Ingenieure und Informatiker, aber auch Mathematiker hier eng zusammenarbeiten. Der gelegentlich verwendete Begriff „Soft Computing“ ist als Synonym zu verstehen. Einige Methoden der CI werden in der Bionik (= „Biologie und Technik“) eingesetzt, die durch die Gründung eines VDI-Fachbeirates am 7.3.2007 erst kürzlich eine große Bedeutungsaufwertung erfuhr.

Außerdem ist die CI eng mit dem vorwiegend in der Informatik beheimateten Fachgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) verwandt. Die KI befasste sich frühzeitig mit regelbasierten Expertensystemen und KNN. Sie schließt heutzutage auch Fuzzy-Logik und EA ein, weniger allerdings auf technische Probleme abzielende Methoden wie Fuzzy-Identifikation und Fuzzy Control.

2 Fachausschüsse und Standardisierung

In der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) wurden in den Jahren 1990 bzw. 1991 separate Fachausschüsse zu den Themen „Neuronale Netze

und Evolutionäre Algorithmen“ (unter Leitung von Frau Prof. Hafner, FH Südwestfalen) und „Fuzzy Control“ (1991–2000 unter Leitung von Herrn Prof. Kiendl, Universität Dortmund; Nachfolge ab 2000 Herr Dr. Mikut, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH) gegründet. Der Fachausschuss „Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen“ konzentrierte sich insbesondere auf die Verbindung von Industrie und Forschung und arbeitete mit halbjährlichen Fachbesuchen bei den jeweiligen Mitgliedern. Aus seiner Arbeit entstanden u. a. die VDI-VDE-Richtlinien zur Standardisierung von Begriffen bei Künstlichen Neuronalen Netzen [1] und Evolutionären Algorithmen [2]. Der Fachausschuss „Fuzzy Control“ veranstaltet seit 1991 jährliche Workshops, die traditionell im Haus Bommerholz der TU Dortmund stattfinden. Interessierte können sich über die Inhalte der Workshop-Proceedings online informieren¹. Außerdem erarbeitete er eine VDI-Richtlinie zur Standardisierung von Begriffen bei Fuzzy-Systemen [3] und stellte kommentierte erfolgreiche Fuzzy-Anwendungen in Form von zwei Beiträgen [4] und einem Webportal² zusammen.

Beide Fachausschüsse arbeiteten eng zusammen, beispielsweise bei der Organisation von Fachtagungen und Aussprachetagen (Berlin 1998 [5], Baden-Baden 2000 [6]). Im Jahr 2005 fusionierten beide Fachausschüsse zum neuen GMA-Fachausschuss 5.14 „Computational Intelligence“, der seitdem sowohl die Tradition der Fachbesuche als auch des jährlichen Workshops im Haus Bommerholz fortsetzt. Der Beitrag *Aktuelles aus dem GMA-FA 5.14 Computational Intelligence* in diesem Schwerpunktheft berichtet über die letzten beiden Veranstaltungen.

Zu den weiteren deutschen Arbeitskreisen im Bereich CI zählen die entsprechenden Fachgruppen der Gesellschaft für Informatik (GI³), insbesondere „Fuzzy Systeme und Soft Computing“. Zwischen dem GMA-Fachausschuss und der GI-Fachgruppe besteht eine enge Kooperation bei der Organisation der gemeinsamen Workshops.

3 Entwicklung, Status und Trends

Alle drei Gebiete haben nach einem ruhigen Start eine oder mehrere Phasen der überzogenen Erwartungen durchlaufen. Zu dieser Zeit (z. B. bei Fuzzy-Logik in Deutschland etwa in den Jahren von 1992–1996) wurde zum Teil die Meinung vertreten, klassische Verfahren der Regelungstechnik und Modellbildung würden vollständig durch die neuen Verfahren abgelöst. Es folgte ein großer Boom an Konferenzen, Förderprojekten, Dissertationen, neuen Beratungsgesellschaften usw. Da einige unrealistische Erwartungen enttäuscht wurden, folgte eine Phase der Ernüchterung. Danach etablierten sich realistische Einschätzungen von Vorzügen und Grenzen aller Verfahren, woraus standardisierte industrielle Anwendungen resultierten. Solche Zyklen sind für viele neue Technologien typisch [7].

Fuzzy-Systeme werden insbesondere zur Modellbildung, zum Data Mining, zur Fehlerdiagnose und für Regelungssysteme eingesetzt. Eine systematische Übersicht über Einsatzszenarien, Anwendungsgebiete und Beispiele für erfolgreiche Lösungen gibt [4]. Beim Reglerentwurf bewährt sich in der industriellen Praxis die Vorgehensweise, ein vereinfachtes Prozessmodell (z. B. nichtlineare Statik und lineare Dynamik) aufzubauen und danach die Reglerparameter zumindest qualitativ an ausgewählte Arbeitspunkte anzupassen (Gain-Scheduling). Eine Fuzzy-Komponente schaltet dann weich zwischen verschiedenen linearen (z. B. PID-)Reglern um und dient so zur Interpolation. Auch finden Fuzzy-Module als Sollwertgeneratoren zur Optimierung der Prozessführung Einsatz. Nur in Einzelfällen erfolgreich sind hingegen reine Fuzzy- oder auch neuronale Regler, die lediglich auf Daten oder Expertenbefragungen aufbauen und so auf die Integration regelungstechnischer Grundprinzipien verzichten.

Auf theoretischem Gebiet konzentrierten sich die Arbeiten in den letzten Jahren u. a. auf die Identifikation und Stabilitätsanalyse von Takagi-Sugeno-Kang-Systemen (TSK), bei denen die Regelkonklusionen aus Funktionen bestehen. Hier besteht die Herausforderung darin, die Interpretierbarkeit zu erhalten. Oftmals werden lineare bzw. affine Modelle als Regelkonklusion verwendet, woraus lokal lineare bzw. affine Modelle entstehen. Solche Systeme lassen sich wahlweise als geeignet strukturiertes Fuzzy-System, Künstliches Neuronales Netz oder als „gewöhnliches“ nichtlineares System darstellen. Offene Fragen in der Modellbildung betreffen z. B. eine geeignete Struktursuche mit einer Vielzahl unterlagerter Fragestellungen. Ein Beispiel hierfür sind Regularisierungsprobleme, die in diesem Heft im Beitrag *Zimmerschied und Isermann: Regularisierungsverfahren für die Identifikation mittels lokal-affiner Modelle* behandelt werden.

Außerdem laufen seit einigen Jahren Untersuchungen, inwieweit die Beschreibungssprache der Fuzzy-Logik Vorteile bei der Verarbeitung von Aussagen mit verschiedenen Arten von Unsicherheit ermöglicht, die über Wahrscheinlichkeitsaussagen im Sinne der Statistik hinausgehen. Beispiele hierfür sind sich gegenseitig ergänzende und zum Teil widersprüchliche Aussagen bei der Sensordatenfusion, bei der Fusion von Expertenwissen und Messdaten usw. Diesem Thema widmet sich der Beitrag *Dürrbaum et al.: Systemidentifikation mittels Glaubenskalkülen*.

Bei den **Künstlichen Neuronalen Netzen** sind insbesondere Multi-Layer-Perceptrons (MLP) und Netze mit Radialen Basisfunktionen (RBF) für Aufgaben bei der Analyse, Mustererkennung und Modellbildung industrielle Standardwerkzeuge geworden. In diesen Bereich fällt der Beitrag *Schneider et al.: Künstliches Neuronales Netz zur Regelung von Montageprozessen im Flugzeugbau*, der KNN für eine modellbasierte Regelung bei der Montage von Flugzeugrümpfen einsetzt. Zu den aktuellen Forschungsthemen im Bereich der KNN zählen:

- Anwendungen für hochdimensionale Überwachungs-, Diagnose- und Visualisierungsaufgaben (insbesondere

¹ <http://www.iai.fzk.de/medtech/biosignal/gma>

² <http://www.iai.fzk.de/medtech/biosignal/gma/tutorial>

³ <http://www.gi-ev.de/>

für Self Organizing Maps wie in Frey *et al.*: *Prozessdiagnose und Monitoring feldbusbasierter Automatisierungsanlagen mittels selbstorganisierender Karten und Watershed-Transformation*),

- Eigenschaften und Lernverfahren für dynamische (rekurrente) Netze, z.B. mit sogenannten Spiking-Neuronen sowie
- sich selbst online adaptierende Verfahren zur Modellbildung, wobei hier derzeit noch etablierte Verfahren zur Senkung des Risikos von Konvergenzproblemen fehlen, die bei Regelkreisen letztlich zu einer reduzierten Regelgüte bis hin zu Stabilitätsproblemen führen können.

Die Entwicklung **Evolutionärer Algorithmen** begann weitgehend unabhängig voneinander mit zwei verschiedenen Ansätzen: Genetische Algorithmen (GA) arbeiteten mit einer binären Problemkodierung, Evolutionsstrategien (ES) dagegen direkt mit den reellwertigen Parametern der (in der Regel wertekontinuierlichen) Optimierungsprobleme. Die Adaption von Strategieparametern war von Anfang an Bestandteil der ES, nicht aber von GA. Etwa ab 1990 begann ein reger Austausch zwischen den verschiedenen „Lagern“ und die vormalig sehr unterschiedlichen Ansätze haben sich in vielen Punkten angenähert. So werden beide Welten auch seit etwa 2000 gemeinsam und einheitlich in der Literatur behandelt. Neben GA und ES gibt es noch andere Ansätze wie z.B. Evolutionäres und Genetisches Programmieren.

Wichtige Trends bei Evolutionären Algorithmen sind:

- hybride Verfahren, die gute Weitbereichssucheigenschaften von Evolutionären Algorithmen mit guten Nahbereichssucheigenschaften von lokalen Suchverfahren in der Umgebung lokaler Optima kombinieren,
- die Kombination von evolutionären Optimierungen mit rechenaufwändigen originalen Gütefunktionen (z.B. aus Finite-Elemente-Modellierungen) und deutlich schneller auszuwertenden approximated Gütefunktionen (z.B. auf der Basis Künstlicher Neuronaler Netze), die parallel mit angelernt werden sowie
- die Entwicklung spezieller Verfahren zur effizienten Lösung mehrkriterieller Gütefunktionen (siehe z.B. Beume *et al.*: *SMS-EMOA – Effektive evolutionäre Mehrzieloptimierung*).

Seit einigen Jahren etabliert sich der mit Evolutionären Algorithmen verwandte Bereich der „Schwarmintelligenz“ als weiterer Methodenbereich der CI. Zu ihm zählen insbesondere Methoden der Partikelschwarmoptimierung (PSO) und Ameisenalgorithmen. Die Untersuchung der Übertragbarkeit von Konzepten aus dem Immunsystem auf technische Problemlösungsalgorithmen hat seit einigen Jahren ebenfalls Eingang in die Forschung gefunden.

In Deutschland werden Fragestellungen der Computational Intelligence an vielen Universitäten, Fachhochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und in der Industrie erforscht und eingesetzt. Ein prominentes Beispiel ist der 1997 gegründete SFB 531 „Computational Intelligence“ an der Technischen Universität Dortmund⁴, der

sich in drei Projektbereichen der Methodik, Operationalisierung und (industriellen) Anwendung von CI-Methoden widmet. Außerdem existiert eine Reihe von Forschungsverbünden, z.B. „Neuronale Fuzzy-Logik NRW“ als Verbund Nordrhein-Westfälischer Fachhochschulen⁵.

4 Realisierungsaspekte und Tools

Die Verfügbarkeit von Tools spielt bei der Durchsetzung der Verfahren eine wichtige Rolle. In den letzten Jahren hat es hier eine Reihe von Entwicklungen gegeben, die dem Anwender inzwischen eine breite Auswahl zwischen verschiedenen Werkzeugen geliefert hat.

So sind Fuzzy-Verfahren und Künstliche Neuronale Netze seit Jahren als Teil von größeren kommerziellen Entwicklungsumgebungen (siehe z.B. MATLAB, Clementine der Fa. SPSS), als einzelne kommerzielle Produkte (z.B. fuzzyTech und DataEngine der Fa. MIT GmbH, WinFACT 98 des Ingenieurbüros Kahlert) oder als Freeware-Lösungen (z.B. Nefclass der Universität Magdeburg, SNNS der Universitäten Stuttgart und Tübingen) verfügbar. Dennoch existieren nach wie vor Lücken beim umfassenden Vergleich der Verfahren untereinander, der flexiblen Erweiterbarkeit und der komfortablen grafischen Bedienbarkeit. Dieser Problematik widmet sich der Beitrag Burmeister *et al.*: *Data-Mining-Analysen mit der Matlab-Toolbox Gait-CAD*. Für Evolutionäre Algorithmen sind vergleichsweise wenig Tools verfügbar. Beispiele sind die Matlab „Genetic Algorithm and Direct Search“ Toolbox und die Java-basierte Entwicklungsumgebung JavaEvA der Universität Tübingen.

Bei der direkten Implementierung in Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und Prozessleitsysteme bieten inzwischen alle großen und einige mittelständische Hersteller Fuzzy-Control-Funktionsbausteine an, die meistens mit einfachen Werkzeugen der zugehörigen Engineering Tools ausgelegt werden oder eine Schnittstelle zu einem spezialisierten Engineering Tool für Fuzzy-Systeme aufweisen. 2001 wurde zudem eine herstellerübergreifende Beschreibungssprache für Fuzzy Control als Teil 7 des IEC 61131 Standards verabschiedet. Eine weitere Alternative ist die Approximation von Fuzzy-Systemen und Künstlichen Neuronalen Netzen durch (unter Umständen hierarchisch angeordnete) stückweise lineare Kennfelder, deren Implementierung in vielen Systemen möglich ist. Auch in Kompaktreglern verschiedener Hersteller (z.B. Jumo, Omron, Yokogawa) wurden Fuzzy-Control-Funktionen integriert – insbesondere für schwierige Aufgaben wie bei der Temperaturregelung.

5 Studium und Weiterbildung

Computational Intelligence und eine Auswahl seiner Teilgebiete wird inzwischen an vielen Universitäten und

⁴ <http://sfbc.uni-dortmund.de>

⁵ <http://www3.fh-swf.de/forschung/fv-nfl>

Fachhochschulen als eigenständige Vorlesung in Diplom-, Bachelor- und Masterstudiengängen gelehrt. Die entsprechenden Vorlesungen sind meist in der Elektrotechnik, im Maschinenbau oder in der Informatik angesiedelt. An der FH Südwestfalen existiert seit 2006 sogar ein eigenständiger Masterstudiengang⁶ „Computer Vision and Computational Intelligence“. Somit kommen zunehmend Jungingenieure in der Industrie an, die über CI-Kenntnisse verfügen, die im späteren Berufsleben mit konkreten Projekten vertieft werden müssen.

Seit einigen Jahren existieren neben speziellen Lehrbüchern der Teilgebiete wie z.B. [8–10] umfassende Lehrbücher [11;12], die explizit in die Breite des Gebietes der Computational Intelligence einführen und nicht nur in deren einzelne Teilgebiete. Ein einheitlicher Zugang ist aus verschiedenen Gründen interessant:

- in den Teilgebieten haben sich unterschiedliche Bezeichnungsweisen entwickelt, die dann konsistent dargestellt werden können,
- Analogien und Synergien können besser herausgearbeitet werden und
- die Verfahren können mit Vor- und Nachteilen konsistenter und fairer gegenübergestellt werden.

Mehrere wissenschaftliche Organisationen richten regelmäßig Veranstaltungen zu diesem Thema aus (z.B. die jährlichen Workshops Computational Intelligence im Haus Bommerholz bei Dortmund, Fuzzy-Tagungen in Dortmund und Zittau).

6 Abschließende Bemerkungen

Die Beiträge zum Schwerpunktthema Computational Intelligence werden in zwei aufeinander folgenden Heften behandelt; das zweite Heft ist für Ende 2008 vorgesehen. In beiden Heften wurde jeweils eine Mischung methoden- und anwendungsorientierter Beiträge zusammengestellt. Wir hoffen, dass die Leser Interesse an den Beiträgen dieses Schwerpunktheftes finden, gespannt auf das zweite Schwerpunktheft zur Thematik warten und dass es gelungen ist, einen aktuellen Überblick über verschiedene Aspekte der Computational Intelligence zu vermitteln. Ein großes Dankeschön gilt den beitragenden Autoren und den Gutachtern für das Zustandekommen des Heftes. Dem Chefredakteur Herrn Dr.-Ing. B. Reißerweber sei herzlich für die Ermöglichung dieses Schwerpunktheftes und die redaktionelle Unterstützung gedankt.

⁶ <http://www3.fh-swf.de/fbin/cv-ci.htm>

Literatur

- [1] VDI/VDE-Richtlinie 3550, Blatt 1: Künstliche Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik – Begriffe und Definitionen, 2001.
- [2] VDI/VDE-Richtlinie 3550, Blatt 3: Evolutionäre Algorithmen – Begriffe und Definitionen, 2003.
- [3] VDI/VDE-Richtlinie 3550, Blatt 2: Fuzzy-Logik und Fuzzy Control – Begriffe und Definitionen, 2002.
- [4] Pfeiffer, B.-M.; Jäckel, J.; Kroll, A.; Kuhn, C.; Kuntze, H.-B.; Lehmann, U.; Slawinski, T.; Tews, V.: Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control. at - Automatisierungstechnik, 50, S. 461–471 (Teil 1), S. 511–521 (Teil 2), 2002.
- [5] Computational Intelligence – Neuronale Netze – Evolutionäre Algorithmen – Fuzzy Control im industriellen Einsatz, VDI-Berichte 1381, VDI-Verlag, 1998, Berlin.
- [6] Computational Intelligence im industriellen Einsatz, VDI-Berichte 1526, VDI-Verlag, 2000, Baden-Baden.
- [7] Fenn, J.: The Microsoft System Software Hype Cycle Strikes Again. Gartner Group, July, 1995.
- [8] Kiendl, H.: Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg, München, 1997.
- [9] Eiben, A.; Smith, J.: Introduction to Evolutionary Computing. Springer, 2003.
- [10] Haykin, S.: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [11] Engelbrecht, A. P.: Computational intelligence – an introduction. Chichester: Wiley, 2002.
- [12] Negnevitsky, M.: Artificial Intelligence: A guide to intelligent systems. London: Addison-Wesley, 2005.

Manuskripteingang: 19. Mai 2008.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll leitet seit Oktober 2006 das Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik im Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel. Hauptarbeitsgebiete: Methoden zur Modellbildung, Analyse und Regelung mit Anwendungen im Bereich Maschinenbau und Prozesstechnik.

Adresse: Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, FB 15, Universität Kassel, Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel, E-Mail: andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de



Dr.-Ing. Ralf Mikut ist Projektleiter am Institut für Angewandte Informatik (IAI) der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und leitet den GMA-Fachausschuss 5.14 Computational Intelligence. Forschungsschwerpunkte: Computational Intelligence, Biosignalanalyse, Intelligente Prothetik, Regelungstechnik, Robotik, Bewegungsanalyse.

Adresse: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik (IAI), PF 3640, 76021 Karlsruhe, Tel.: +49-7247-825731, Fax: +49-7247-825702, E-Mail: ralf.mikut@iai.fzk.de