

Fuzzy Cognitive Maps: Kausale Prädiktorsysteme in den Wirtschafts-, Sozial-, Politik-, Gesundheits- und Verhaltenswissenschaften

PD Dr. Michael Zaus, FB 5 Psychologie A6
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
D-26111 Oldenburg, Postfach 2503
email zaus@psychologie.uni-oldenburg.de

Zusammenfassung

Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) sind nichtlineare dynamische Prädiktorsysteme für qualitative und quantitative Kausalanalysen. Ihre Konzeption wurde aus Hyperwürfelkalülen der neuronalen Netzwerktheorie abgeleitet und bildet angesichts der soliden mathematischen Basis des Gesetzes der konkomitanten Veränderung eine völlig neue Grundlage zur Analyse und Vorhersage von Ursache- und Wirkungszusammenhängen.

Der Beitrag soll dies für die Gebiete der Wirtschafts-, Sozial-, Politik-, Gesundheits- und Verhaltenswissenschaften deutlich machen. Es gilt aufzuzeigen, daß FCMs eine Technologie für Verhandlungs- und Entscheidungsprozesse der Wirtschaftswissenschaft, für Kausalszenarien in der Sozialwissenschaft, für die Problematik der Wahlverdrossenheit in der Politikwissenschaft, für Therapie und Rehabilitationsprozesse in Medizin und Gesundheitswesen sowie für Organisations- und Kooperationsprozesse in Psychologie und Pädagogik bereitstellen. Im Beitrag werden formale Aspekte zugunsten konzeptioneller Klarheit zurückgestellt, da unsere Leser die mehr mathematischen Aspekte in einschlägigen Werken einsehen können (Kosko 1997, Zaus 1999).

Die Bandbreite dieses Anwendungsspektrums weist darauf hin, daß FCMs eine universelle Methodik zugrundeliegt, die durch ihre Flexibilität von hohem intra- und transdisziplinären Interesse ist. Da jede FCM als Kausalnetzwerk mit Kausalkonzepten und gerichteten Kausalverbindungen repräsentierbar ist, wird dessen Anwendungspotential durch die mannigfache Interpretationsmöglichkeit der Kausalkonzepte verständlich. Darüber hinaus eignen sich FCMs zur Modellierung realer und virtueller Welten, wobei letztere die Exploration realer Weltmodelle zulassen, zum anderen aber auch die Animation und Simulation komplexer Strukturen und Prozesse, beispielsweise komplexe Ökosysteme, Krankheitsverläufe, Krisenszenarien inklusive Verhandlungsstrategien.

Die herausragendste Eigenschaft von FCMs besteht darin, daß sie kooperative Lernprozesse zulassen, aufgrund derer das Kausalwissen über einen praxisrelevanten Anwendungsbereich zunehmend präziser erfaßt wird und dem zugrundeliegenden Kausalnetzwerk die notwendigen und hinreichenden Eigenschaften eines nichtlinearen dynamischen Systems zur Vorhersage kausaler Ereignisse und Ereignissequenzen verleiht.

1 Einführung in Fuzzy Cognitive Maps

Da sich dieser Beitrag an eine Leserschaft mit sehr unterschiedlichem fachlichen Hintergrund wendet, soll die Konzeption von FCMs mit angemessener Pragmatik vorgestellt werden. Wenn die ARD mit ihren Beiträgen zum 7. Sinn im Straßenverkehr oder der ADAC Ratschläge zu verkehrsgerechtem Verhalten publizieren, so appellieren beide an antizipatorisches Verhalten. Dazu zählt insbesondere vorausschauende Rücksichtnahme gegenüber anderen und sich selbst. Die folgende FCM mit den Kausalkonzepten $C_1 - C_4$ macht dies als Kausalnetzwerk für die Wirkung von Ruhepausen bei Langstreckenfahrten deutlich.

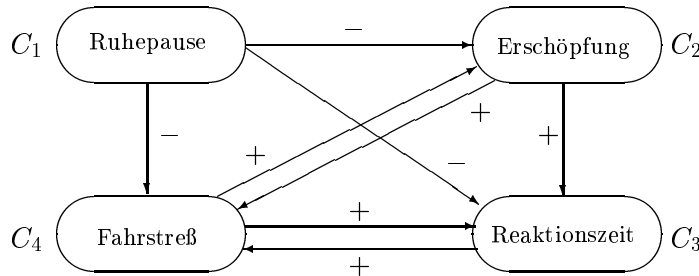


Abb. 1 FCM zum 7. Sinn im Straßenverkehr

Ein Kausalnetzwerk mit vier Kausalkonzepten gestattet prinzipiell die Erstellung von $2^4 = 16$ „Was passiert, wenn ...“ Fragen. Wieviele davon tatsächlich beantwortbar sind, hängt von der Konnektivität des Netzwerkes ab. Zum Beispiel: „Was passiert, wenn Ruhepause bevorzugt wird?“. Die Antworten liegen hier auf der Hand, denn eine Ruhepause reduziert Erschöpfung, sie reduziert Reaktionszeit und sie reduziert Fahrstreß. Alle drei Fälle beinhalten negative Kausalität, was durch das Minuszeichen kenntlich gemacht wird, da mit einer zunehmend längeren Ruhepause (Ursache) zunehmende Abnahmen von Erschöpfung, Reaktionszeit und Fahrstreß einhergehen (Wirkungen). Negative Kausalität besagt, daß mit einer Zunahme der Ursachenvariable eine Abnahme der Wirkungsvariable, und mit einer Abnahme der Ursachenvariable eine Zunahme der Wirkungsvariable einhergehen.

Obige FCM enthält aber auch positive Kausalität, was durch das Pluszeichen kenntlich gemacht wird, da beispielsweise mit einer Zunahme an Erschöpfung (Ursache) eine Zunahme an Reaktionszeit (Wirkung) einhergeht. Generell besagt positive Kausalität, daß mit einem Anstieg der Ursachenvariable ein Anstieg der Wirkungsvariable, und mit einem Abstieg der Ursachenvariable ein Abstieg der Wirkungsvariable einhergehen (Mehr Erschöpfung, längere Reaktionszeit; weniger Erschöpfung, kürzere Reaktionszeit).

Zudem enthält die FCM in Abb. 1 Kausalität im Gegenverkehr mit einem Rollenaustausch von Ursache und Wirkung. Zunehmende Erschöpfung bewirkt zunehmenden Fahrstreß, und zunehmender Fahrstreß bewirkt zunehmende Erschöpfung. Dieser Zyklus zeichnet sich durch positive Rückkopplung aus, d.h. er kann sich abweichungsvermehrend aufschaukeln, bis es zum Kontrollverlust des Fahrzeuges führt. Entsprechendes gilt für die Kausalzyklen Fahrstreß und Reaktionszeit sowie für Erschöpfung, Reaktionszeit und Fahrstreß.

Durch die Aktivierung des Kausalkonzepts „Ruhepause“ werden aufgrund der negativen Kausalität alle positiv rückgekoppelten Kausalzyklen dahingehend kontrolliert, daß sie zu abweichungsmindernden oder zumindest abweichungsresistenten Zyklen werden, d.h. „Ruhepause“ unterbindet die Aufschaukelung zur exzessiven Ausprägung der Wirkungsvariablen Erschöpfung, Reaktionszeit und Fahrstreß.

2 Das Gesetz der konkomitanten Veränderung

Nach dieser kurzen und informellen Einführung in FCMs soll nun deren mathematisches Rückgrat umrissen werden, das durch das Gesetz der konkomitanten Veränderung gegeben ist. Die einfachste Fassung dieses Gesetzes lautet

$$\dot{e}_{ij} = -e_{ij} + \dot{C}_i(x_i) \dot{C}_j(x_j) = -e_{ij} + \frac{dC_i(x_i)}{dt} \frac{dC_j(x_j)}{dt}; \quad (1)$$

$$e_{ij}(t+1) = e_{ij}(t) + \dot{e}_{ij} \quad (2)$$

In Worten: Multipliziere die Ableitungen der Kausalkonzepte C_i und C_j und aktualisiere das Produkt additiv mit der kausalen Abklingrate $-e_{ij}$. Als Ergebnis (2) erhalten wir das neue kausale Kantengewicht e_{ij} zur Zeit $t+1$. Der kausale Abklingfaktor erzwingt Nullkausalität zwischen unveränderlichen Kausalkonzepten. Abbildung 2 illustriert dieses von Kosko (1988, 1992) eingeführte Gesetz unter der Voraussetzung, daß alle Kausalkonzepte durch kontinuierliche Kausalvariablen in Form unscharfer Mengen repräsentierbar sind.

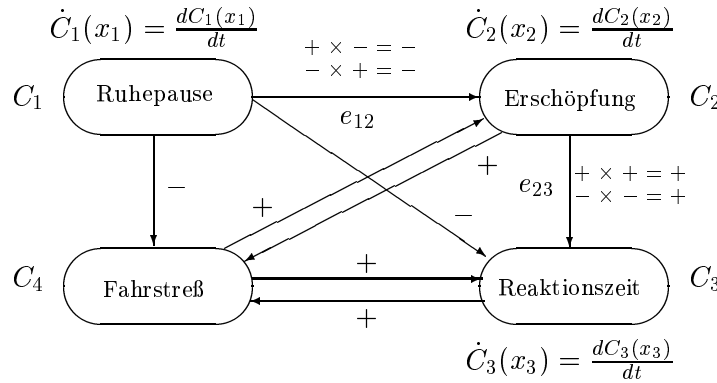


Abb. 2 Vorzeichenregel und konkomitante Veränderung

An Hand der eingetragenen Vorzeichenregel ist erkennbar, daß negative Kausalitäten stets mit negativen und positive Kausalitäten stets mit positiven Differentialprodukten verbunden sind. Das entscheidende Merkmal dieses Gesetzes liegt darin, daß Konkomitanz durch das Differentialprodukt $\dot{C}_i \dot{C}_j$ und Veränderung durch Ableitungen über die Zeit modellierbar werden. Folglich treibt konkomitante Veränderung die nichtlineare Kausaldynamik in kontinuierlichen FCMs an. Obigem Gesetz ist insofern eine hohe Bedeutung beizumessen, als sie Kausalnetzwerken eine solide mathematische Basis verleiht. Zudem relativiert es rigide Kausalkonzepte konventioneller Theorien zugunsten praxisrelevanter Kausalanalysen.

Im Gegensatz zu kontinuierlichen FCMs, die sich derzeit aufgrund nicht abgeschlossener Stabilitätsanalysen noch im Entwicklungsstadium befinden, repräsentieren sogenannte *einfache FCMs*, in welchen Kausalkonzepte bivalent und Kausalkanten mehrwertig ($e_{ij} \in [-1, 0, 1]$) sind, den state-of-the-art für die Praxis (Zaus 1999a). Sie lassen sich relativ einfach als dynamische Prädiktorsysteme auf dem Rechner implementieren und bieten eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten, von welchen wir hier aus Platzgründen nur einige näher skizzieren können. Zuvor soll klar gestellt werden, daß FCMs in ein konkretes *Forschungsprogramm* eingebunden sind.

3 Forschungs- und Anwendungsstrategien von FCMs

Kausalwissen, kausale Schlußfolgerungen, und kausal bedingte Vorhersagen erfordern eine angemessene Forschungsstrategie, die für Praktiker transparent sein muß. Die Konzeption von FCMs und das damit verbundene *Causal Knowledge Engineering* basieren auf einer mententheoretisch fundierten Kausalalgebra, soliden Hyperwürfelkalkülen, sowie auf dem bereits vorgestellten Gesetz der konkomitanten Veränderung, das aus Differentialgleichungen der Hebb'schen Lerntheorie neuronaler Netzwerke hervorging (Kosko 1988, 1992, 1997; Zaus 1999a, 1999b). Was die konkrete Umsetzung von FCMs anbelangt, sind folgende Schwerpunkte hervorzuheben.

1. **Qualitative Analyse:** FCM-Kausalnetzwerke können aus qualitativen Analysen von Dokumenten, Berichten und Expertisen generiert werden, deren Inhalte auf Kausalzusammenhänge geprüft und strukturiert werden (Kosko 1988, 1992; Zaus 1999a).
2. **Labor- & Feldexperimente:** FCM-Kausalnetzwerke bilden Kausalwissen in Form kausaler Kognitionen und kausaler Schlußfolgerungen ab, das unter Berücksichtigung der psychologischen Testdiagnostik in Labor- und Feldexperimenten überprüfbar ist und den Erwerb kausalen Wissens fördert (Zaus 1999a, 1999b).
3. **Interaktive Konstruktion:** FCM-Kausalnetzwerke lassen sich in Zusammenarbeit mit Fachspezialisten durch strukturierte Interviews interaktiv konstruieren, inklusive der Zuhilfenahme von Transskripten und Videoaufzeichnungen. Zudem wird die interaktive Konstruktion durch FCM-Shells erleichtert, die auf einer differenzierten Kausalalgebra aufbauen und entsprechend ableitbare Kontrollfragen zulassen (Kosko 1997; Hyperlogic Corporation 1997; Zaus 1999c).
4. **Interpersonelle Aggregation:** Individuelle FCM-Kausalnetzwerke sind ohne Willkür und ohne Unterdrückung von Informationen additiv in ein kollektives FCM-Kausalnetzwerk aggregierbar, so daß ein repräsentatives Sampling ein ökologisch valides Kausalnetzwerk generiert (Kosko 1992; Zaus 1999a).
5. **Quantitative Analyse:** FCM-Kausalnetzwerke sind quantitativ im Hinblick auf ihre Glaubwürdigkeit, fehlerhafter Kausalbeziehungen, Auslassungsfehler, Widersprüche, kausale Fehleinschätzungen und Fehlschlüsse analysierbar (gerichtete vs. rückgekoppelte Kausalität, indirekte vs. Gesamtwirkungen, Grenzyklen n^{ter} Ordnung, etc.). Die dazu gehörigen Tools werden kontinuierlich weiterentwickelt zwecks Erzielung adaptiver FCM-Shells (Kosko 1997, Zaus 1999a, 1999c).
6. **Computergestützte Technologie:** FCM-Kausalnetzwerke lassen sich prinzipiell über Internet-Delphi und Cross-Impact Verfahren generieren und als dynamisches Virtual World oder Real World Modell auf dem Rechner implementieren und evaluieren (Zaus 1999a, 1999c).
7. **Komplexitätsminimierung:** Ein FCM-Kausalnetzwerk mit 15 Kausalkonzepten gestattet theoretisch $2^{15} \approx 32000$ „Was passiert, wenn“ Fragen, was ein gezieltes Handling der Abfragetechniken via FCM-Shells erfordert. Zudem lassen sich komplexe FCMs als Netzwerke in Netzwerken über *nested arrays* repräsentieren, was entscheidend zur Komplexitätsreduzierung beiträgt (Kosko 1997; Zaus 1999a).
8. **VLSI-Implementierung:** FCM-Kausalnetzwerke können zudem auf VLSI-Chips (Very Large Scale Integrated Circuits) implementiert werden und somit massive Abfragen sekundenschnell abwickeln (Kosko 1997).

Aus diesen Schwerpunkten wird ersichtlich, daß Fuzzy Cognitive Maps ein respektables Forschungs- und Entwicklungsprogramm für innovative Kausalanalysen offerieren, das sich durch das gesamte Spektrum der Wirtschafts-, Sozial-, Politik-, Gesundheits- und Verhaltenswissenschaften erstreckt. Größte Priorität besitzen dabei praktische Anwendungen zwecks

Vorhersage von Kausalzusammenhängen, die Herausfilterung verdeckter Kausalzusammenhänge, sowie die Ableitung von Maßnahmen, um negative Wirkungen innerhalb eines Kausalgefüges zu unterbinden und positive Wirkungen zu ermöglichen. In praxi werden nahezu alle Repräsentanten der o.g. Wissenschaftsgebiete mit Kausalszenarien konfrontiert, seien sie subjektiver oder objektiver Art. Derartige Kausalszenarien adäquat zu repräsentieren und sie zum Gegenstand nichtlinearer dynamischer Prädiktorsysteme zu machen, ist das Hauptanliegen dieses zukunftssträchtigen Anwendungsgebietes der Fuzzy Logik.

4 FCMs in den Wirtschaftswissenschaften

Der praktische Nutzen von FCMs für die Wirtschaftswissenschaften läßt sich am Beispiel der Anspruchsanpassungstheorie (AAT) transparent machen (Selten 1998). Nach der AAT sind in ökonomischen Entscheidungssituationen begrenzte Rationalität und die Suche nach tatsächlich bestmöglichen Alternativen aus Gründen praktischer Notwendigkeit eher einzulösen als die in der normativen Spiel- und Entscheidungstheorie geforderte uneingeschränkte Rationalität bezüglich *theoretisch optimaler* Alternativen.

Die Anspruchsanpassungstheorie von Reinhard Selten basiert im Gegensatz zur Bayes'schen Entscheidungstheorie auf Verfahren, in welchen die Suche nach akzeptablen Entscheidungsalternativen auf zwei wesentlichen Strukturkomponenten basiert: (1) Kognitive Modelle in Form kausaler Einflußschemata, in welchen Entscheider ihre Erwartungen ausdrücken, ob ihre Aktionen bezüglich instrumenteller und intervenierender Variablen eine Zu- oder Abnahme der Zielvariablen bewirken, und (2) Anspruchsanpassungsschemata, die das Suchen nach praktisch erreichbaren Alternativen anleiten und die Selektion von Alternativen mit bester Anpassung an die Dringlichkeit der Zielvariablen ermöglichen, wobei sich der Suchraum aus multiattributiven Anspruchsanpassungsgittern zusammensetzt.

Kausalschemata der AAT lassen sich als Kausalnetzwerke mit instrumentellen, intervenierenden und Zielvariablen direkt in Fuzzy Cognitive Maps überführen, ungeachtet dessen, ob sie zyklisch oder wie in Abbildung 3 azyklisch sind.

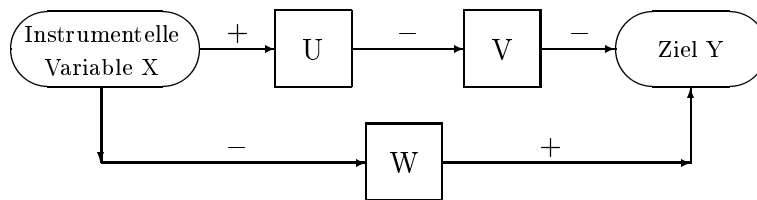


Abb. 3 Kausales Einflußschema der AAT (Selten 1998)

Da der Kausalpfad $X \xrightarrow{+} U \xrightarrow{-} V \xrightarrow{-} Y$ zusammenfassend ein positives Vorzeichen und der Kausalpfad $X \xrightarrow{-} W \xrightarrow{+} Y$ zusammenfassend ein negatives Vorzeichen aufweist, liegt ein unbalanciertes Kausalnetzwerk mit konfigrierenden Einflußpfaden vor. Es bleibt demnach unentscheidbar, inwieweit sich die instrumentelle Variable X positiv oder negativ auf die Zielvariable Y auswirkt. Diese Unbestimmtheitsproblematik ist durch FCMs elegant lösbar, da hier unscharfe Kausalkonnektive qualitativer oder quantitativer Art zugrunde gelegt werden, wobei die Vorzeichen durch unscharfe linguistische Terme (z.B. gar nicht, wenig, mäßig, viel, sehr viel, total) oder durch Werte $\alpha \in [-1, 1]$ des bipolaren Einheitsintervalles ersetzt werden. Diese gestatten ihrerseits den Aufbau von Kausalalgebren zur effektiven und effizienten Entscheidungsfindung. Zu diesbezüglichen methodischen und mathematischen Verfahrensschritten siehe Zaus (1999a, Kapitel 8).¹

¹Auf weitere Beispiele zu FCMs, insoweit sie als *decision support systems* fungieren, seien unsere Leser auf Zhang & Chen (1988), Zhang et al. (1989), Taber (1991) und Zaus (1999a, 1999b) verwiesen.

5 FCMs in sozialwissenschaftlichen Problemfeldern

Als Paradigma des Soft Computing eignen sich FCMs insbesondere auch für Kausalanalysen in sozialwissenschaftlichen Problemfeldern. Herkömmliche Verfahren wie LISREL oder AMOS haben sicher ihre Vorzüge, basieren aber auf Korrelations- und Regressionskoeffizienten in rigiden Strukturgleichungsmodellen, deren Datenanpassung auf dem denkbar schwächsten statistischen Testparameter basiert, dem χ^2 , einem simplen skalaren Entropiemaß. Anstatt kausale Einflüsse in die Daten hinein zu interpretieren, sind Sozialwissenschaftler besser beraten, kausale Beziehungen in einem Kausalnetzwerk, das der Komplexität des zugrunde liegenden Problemfeldes gerecht wird, aufzuzeigen.

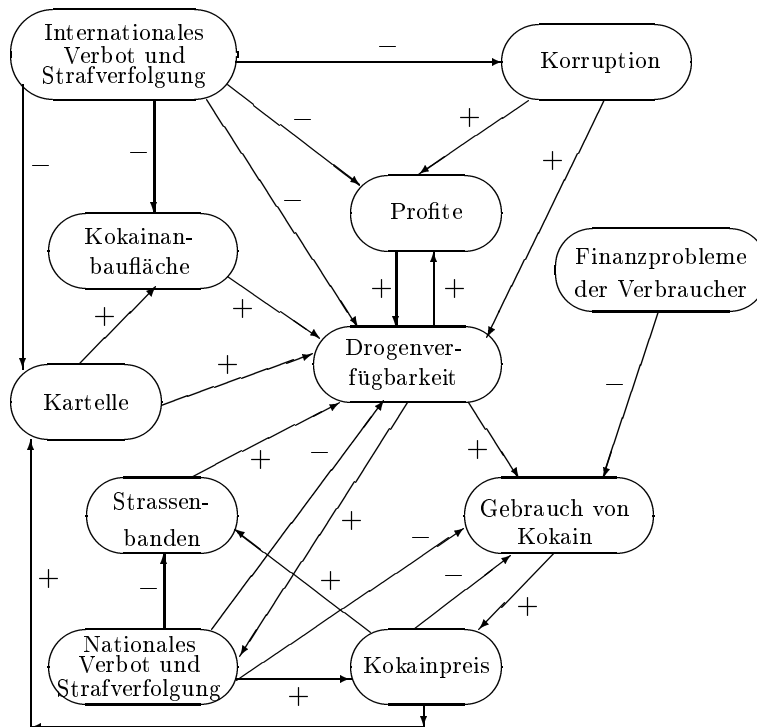


Abb. 4 FCM zur Drogenkontrollproblematik (Taber 1991)

Abbildung 4 zeigt eine einfache FCM, die in Bezug auf die Kontrollmöglichkeiten des Kokainmarktes in den USA entwickelt wurde (Taber 1991; Kosko 1993). Theoretisch gestattet dieses aus 11 Kausalkonzepten bestehende Netzwerk über 2000 „Was passiert, wenn ...“ Fragen. Zum Beispiel, „Was passiert, wenn Drogenverfügbarkeit zunimmt?“. Der Leser kann hier die Konsequenzen an den gerichteten Kausalkanten durch das Netzwerk hindurch verfolgen. Dennoch wird ein Laie nur einen minimalen Bruchteil aller potentiellen Fragen stellen können. Doch selbst Experten stoßen hier auf ihre Grenzen, so daß die eigentliche Analyse des Netzwerkes einer computergestützten Auswertung übertragen werden muß. Hinzu kommt, daß diese FCM ja nicht als l'art pour l'art Produkt entwickelt wurde, sondern als Instrument zur Ableitung von Kontrollmaßnahmen durch Behörden.

In Abhängigkeit davon, welche Kausalkonzepte aktiviert oder deaktiviert sind, sagt die FCM bestimmte Ereignisse oder ganze Ereignissequenzen in Form von Grenzzyklen voraus. Damit wird deutlich, daß FCMs kausale Prädiktorsysteme sind, die den Vorhersagecharakter

von Ursache und Wirkungszusammenhängen herausstellen. FCMs sind in dieser Hinsicht spezielle antizipatorische Systeme, da sie uns vermitteln, was wir zu **erwarten** haben, wenn bestimmte Kausalkonzepte aktiviert werden, da kompetentes Kausalwissen aufgrund seiner prädiktiven Natur stets vorausschauendes Verhalten impliziert. Das Beispiel der Drogenkontrollproblematik steht hier stellvertretend für andere gewichtige Probleme. Ausländerfeindlichkeit, sexuelle Kindesmißhandlung, rechtsradikaler Vandalismus, stille Gewalt und Mobbing sind nur vier weitere Beispiele sozialwissenschaftlicher Problemfelder, über deren Ursachen und Wirkungen wir noch wenig wissen. Deren komplexe Kausalgefüge zu ermitteln und daraus entsprechende FCM-Kausalnetzwerke abzuleiten, würde neue Maßstäbe zur Dokumentation und Vermeidung von Mißständen setzen.

6 FCMs in Demoskopie und Politikwissenschaften

Kommunal-, Landtags- und Bundestagswahlen ereignen sich periodisch und gestalten dabei politische Machtverhältnisse ständig neu. Bei jedem dieser Ereignisse verursacht Politikverdrossenheit auf der Wählerseite auch Wahlverdrossenheit, wobei mit letzterer ein erhebliches Wählerpotential verbunden ist, das es zu überwinden gilt, um daraus Stimmenkapital für die eigene Partei zu schöpfen.

Mit sozio-politischen FCMs bieten sich der Demoskopie wie auch den Politikwissenschaften Instrumente der Wahlforschung an, um die Ursachen und Wirkungen der Wahlverdrossenheit genauer zu untersuchen. Abbildung 5 zeigt das Fragment einer umfassenderen FCM zum Phänomen der Wahlverdrossenheit.

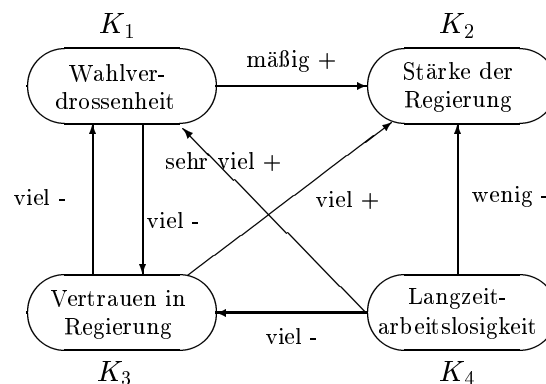


Abb. 5 Qualitative FCM zur Wahlverdrossenheit

Im vorliegenden Beispiel werden für die Kausalbeziehungen linguistische Terme mit Vorzeichen verwendet, wobei die Termmenge $LT = \{\text{gar nicht, wenig, mäßig, viel, sehr viel, total}\}$ verwendet wird, wobei „gar nicht“ Nullkausalität und „total“ 100% Kausalität bedeuten, dazwischen liegen die qualitativen Unschärfegrade. Alle Kausalangaben sind hier exemplarischer Natur, da sie noch nicht auf Fakten beruhen. Die Angaben verdeutlichen aber, daß wir bereits mit einem qualitativen Kausalnetzwerk partielle Gesamtwirkungen aus indirekten Wirkungen erschließen können. Wir zeigen dies an Hand zweier Kausalfade von K_4 nach K_2 unter Vernachlässigung des dritten, der am Ergebnis nichts ändern würde. Konkret geht es um die indirekten Wirkungen $I_1(K_4, K_2)$ und $I_2(K_4, K_2)$, in welchen das Kausalkonzept „Langzeitarbeitslosigkeit“ jeweils der Startknoten und das Kausalkonzept „Stärke

der Regierung“ der Zielknoten ist. Wieviel Kausalität weist K_4 bezüglich K_2 auf? In anderen Worten, wie steht es um die Gesamtwirkung $G(I_1, I_2)$? Wir erhalten sie, indem wir die Minima der indirekten Wirkungen bestimmen und daraus das Maximum wählen, wie es Tabelle 1 zeigt. Der entsprechende Kausalschluß beinhaltet, daß „Langzeitarbeitslosigkeit“ *mäßig positive* Kausalität in Bezug auf die „Stärke der Regierung“ aufweist, insoweit sie mit „Wahlverdrossenheit“ in einem Kausalzusammenhang steht.

I_1	$\{K_4 \xrightarrow{\text{sehr viel}+} K_1 \xrightarrow{\text{mäßig}+} K_2\}$	$\min\{\text{sehr viel}+, \text{mäßig}+\} = \text{mäßig}+$
I_2	$\{K_4 \xrightarrow{\text{viel}-} K_3 \xrightarrow{\text{viel}+} K_2\}$	$\min\{\text{viel}-, \text{viel}+\} = \text{viel}-$
G_{12}	$G_{12}(I_1, I_2) = \max$	$\max\{\text{mäßig}+, \text{viel}-\} = \text{mäßig}+$

Tabelle 1: Kausalalgebra mit qualitativen Termen

Sachverhalte dieser Art sind insbesondere für Demoskopien von Interesse, da sie Kausalzusammenhänge nicht nur paarweise, sondern auch im Hinblick auf indirekte Wirkungen erfassen möchten. Zusammenfassend sei hervorgehoben, daß die indirekte Wirkung die Kennzeichnung der schwächsten Kausalverbindung in einem Kausalfpfad beinhaltet. Die Gesamtwirkung umfaßt indessen die Kennzeichnung der stärksten unter den schwächsten Kausalverbindungen (Kosko 1986, Zaus 1999a).

Liegen indessen durch Expert-Pooling auf der Basis spezieller Delphitechniken numerische Angaben für die Kausalverbindungen vor, wie es Abbildung 6 zeigt, so läßt sich das Kausalnetzwerk als dynamisches kausales Prädiktorsystem auf dem Rechner implementieren und dessen isomorphe Kausalmatrix mit Standardtechniken der unscharfen Graphen- und Matrizenrechnung systematisch auswerten (Zaus 1999a, 1999b).

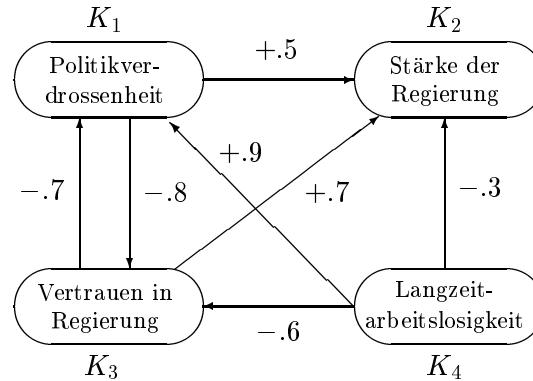


Abb. 6 Quantitative FCM zur Wahlverdrossenheit

Auf Details müssen wir hier allein aus Platzgründen verzichten, dennoch sollte der Hinweis gegeben werden, daß hierzu auch stochastische Verfahren (Gauß-Quetelet Analyse) in Frage kommen, deren Daten implizit in der FCM enthalten sind. Was qualitative FCMs gemäß Abbildung 5 anbelangt, lassen sich diese auch ausschließlich durch positive Kausalbeziehungen repräsentieren, indem negative Beziehungen durch die Einführung zusätzlicher Komplementärkonzepte (z.B. Vertrauen vs. Mißtrauen) in positive konvertiert werden. Die Binärzahl „1“ zeigt dann bestehende Kausalität an, während die Binärzahl „0“ Nullkausalität im Netzwerk anzeigt. Damit bieten sich binäre viz. paritätslogische Repräsentationen von FCMs an, die extrem schnelle Berechnungsverfahren und VLSI-chips zulassen (Zaus 1999b).

7 FCMs in Medizin und Gesundheitswesen

Vom Standpunkt der Medizin sind FCMs Kausalkarten. Es sind **Ätiographen**, welche die Ursachen und Wirkungen einer Krankheit oder eines schwerwiegenden psychischen Problems repräsentieren, um adäquate medizinisch-therapeutische Interventionen zu ermöglichen. Abbildung 7 zeigt einen Ätiograph mit drei abweichungsvermehrenden Zyklen der Schmerzspirale von Tumorkranken (Payk 1979).

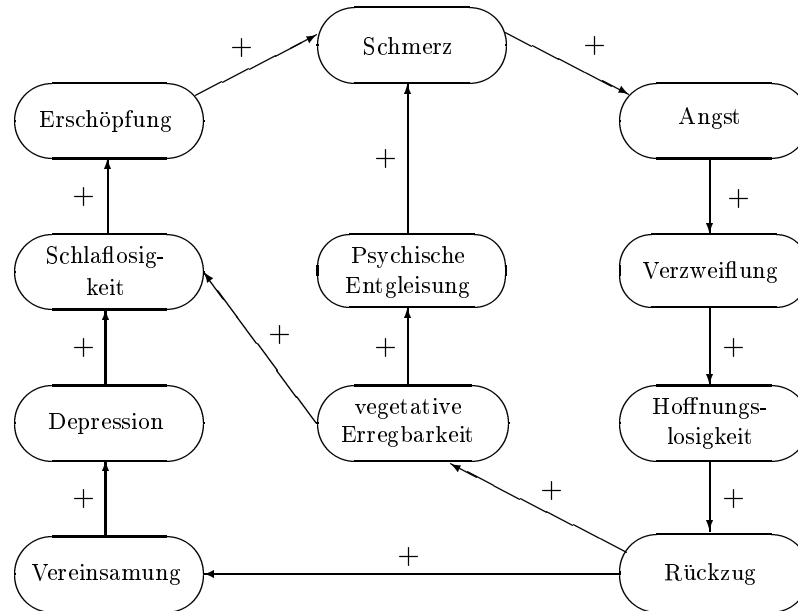


Abb. 7 Schmerzspirale von Tumorkranken

Abweichungsvermehrend bedeutet, daß ein sich aufschaukelnder Kausalprozeß mit positiver Rückkopplung vorliegt, für den Ärzte oder Therapeuten angemessene Medikationen und Interventionen ermitteln, um Patienten aus ihrem „circulus vitiosus“ zu befreien. Wir müssen hier aus Platzgründen eine Fülle weiterer Beispiele aus Medizin und klinisch-diagnostischer Psychologie zurückstellen, die allesamt in Fuzzy Cognitive Maps transformierbar sind, wobei wir wiederum qualitative von quantitativen FCMs unterscheiden müssen. Letztere gehen aus ersteren hervor, wenn hinreichend Daten vorhanden sind, um qualitative Kausalkonzepte wie Schmerz, Angst, Schlaflosigkeit und dergleichen quantitativ zu repräsentieren (Quantisierung der Kausalkonzepte und Linearisierung in trigonale unscharfe Mengen).

Von primärer Bedeutung ist hier das Potential von FCMs für das gesamte Gesundheitswesen. Erstens ließen sich für Ärzte und Therapeuten als behandelnde Institution medizinische oder psychotherapeutische FCM-Shells entwickeln, die zu ätiographischen Datenbanken ausbaubar sind. Zweitens besteht in Bezug auf Kostensenkungen für Krankenkassen und Versicherungen ein substantielles Interesse daran, Behandlungen und die damit verbundenen Kausalgefüge transparent zu machen. Sowohl für den Arzt gegenüber den Kassen zwecks Ausweisung unverzichtbarer Maßnahmen als auch für den Arzt gegenüber Patienten zwecks Förderung und Beschleunigung des Genesungsprozesses, was letztlich auch für Kassen und Versicherungen von Vorteil ist. Drittens lassen sich die aus der Praxis hervorgehenden FCMs für die Ausbildung an Fachhochschulen und Universitäten einsetzen, indem hierzu eine auf

dem InterNet zugreifbare FCM-Technologie entwickelt wird, die von *allen* Bildungsinstitutionen nutzbar wird. Es sei nochmals betont, daß sich frühe Ansätze zur Entwicklung von Kausalkarten, die an der Unbestimmtheitsproblematik signierter Graphen scheiterten, durch FCMs erneut in Angriff genommen werden können und zu nichtlinearen dynamischen Systemen in Form kausaler Prädiktorsysteme erweiterbar sind.

8 Verhaltenswissenschaftliche FCMs

In Psychologie und Pädagogik werden Kausalzusammenhänge gegenwärtig noch primär in hierarchischen Netzwerken mit der klassischen Unterteilung in abhängige, intervenierende und unabhängige Kausalvariablen untersucht. Einfachheit wird hier zum Preis der Unvereinbarkeit verschiedener Hierarchien erkauft, die sich aus einem Problembereich ergeben können. Unterschiedliche Fuzzy Cognitive Maps lassen sich indessen ohne jegliche Verzerrung der Kausalinformation in ein gemeinsames Kausalnetzwerk aggregieren.

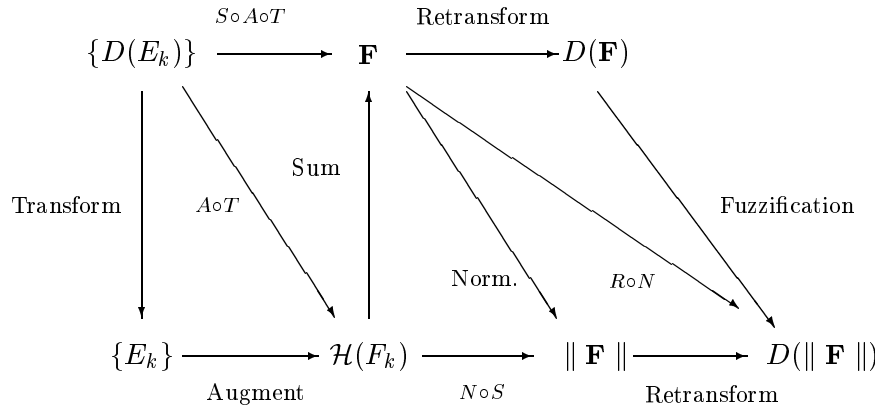


Abb. 8 Interpersonelle Aggregation von FCMs

Dieser Aggregationsprozeß bildet die Grundlage für **kooperative Lernprozesse**, in deren Verlauf kleine fragmentarische FCMs, die partielles Kausalwissen reflektieren, zu einer umfangreichen FCM führen. Letztere liefert dann eine repräsentative Wissensbasis des zugrunde liegenden Kausalgefüges. Abbildung 8 zeigt im Rahmen eines kommutativen Diagramms diesen Aggregationsprozeß (Kosko 1988, Zaus 1999a, 1999b).

Ausgangspunkt sind dabei k individuelle FCMs $D(E_k)$ in Form signierter Digraphen. Diese werden in k Kausalmatrizen E_k transformiert und mittels einer Augmentation bzw. Expansion in k dimensionsverträgliche Matrizen F_k konvertiert, die zusammen genommen eine Hypermatrix $\mathcal{H}(F_k)$ bilden. Durch Aufsummierung der darin enthaltenen Kausalmatrizen erhalten wir schließlich die aggregierte Kausalmatrix $\mathbf{F}$. Durch anschließende Normalisierung ergibt sich ferner die unscharfe Kausalmatrix $\|\mathbf{F}\|$, die isomorph in einen unscharfen Digraphen $D(\|\mathbf{F}\|)$ zurücktransformiert wird, womit uns das endgültige Kausalnetzwerk vorliegt, das dann zum Gegenstand detaillierter Kausalanalysen wird.

Aufgrund dieser logisch konsistenten Prozedur liegt es auf der Hand, den kooperativen Lernprozeß über Delphi-Techniken auf dem InterNet zu realisieren, so daß durch Expert-Pooling eine FCM erzielbar ist, die hohe ökologische Rationalität, Reliabilität und Validität aufweist. Da es sich hierbei um ein Instrument zur Vorhersage kausaler Ereignisse handelt, müssen zu deren Validierung auch die in der psychologischen Testtheorie üblichen Kriterien berücksichtigt werden (Zaus 1999a).

9 Perspektiven der theoretischen Weiterentwicklung von Fuzzy Cognitive Maps zu Antizipatorischen Systemen

Jede FCM ist vom Standpunkt der Mathematik ein unscharfer Digraph mit einer Topologie 0-ter Ordnung, der sich isomorph als quadratische $n \times n$ Kausalmatrix repräsentieren läßt, deren Zeilen und Spalten den n Kausalkonzepten C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) und deren spezifische Matrixeinträge $e_{ij} \in \{-1, 0, 1\}$ bzw. $e_{ij} \in [-1, 1]$ den Werten der Kausalkanten entsprechen².

Dabei bildet die Kausalmatrix $\mathbf{E} = (e_{ij})$ der FCM die Wissensbasis der Kausalzusammenhänge, da sie eine Fülle struktureller Informationen enthält, die mit Standardtechniken der Graphen- und Matrizenrechnung extrahierbar sind. Die i te Zeile der Kausalmatrix $\mathbf{E}$ enthält die aktivierenden und hemmenden Kausalverbindungen vom Kausalkonzept C_i zu den übrigen Kausalkonzepten C_j , während die i te Spalte von $\mathbf{E}$ alle Kausalverbindungen enthält, die in das i te Kausalkonzept C_i eingehen. Da Eigenkausalität ausgeschlossen wird, enthält die Hauptdiagonale von $\mathbf{E}$ nur 0-Werte.

Das innere Produkt $\tilde{\mathbf{C}}(t) \circ \mathbf{E}$, d.h. das additive Vektor-Matrizenprodukt $\tilde{\mathbf{C}}(t) + . \times \mathbf{E}$, bestehend aus einem binären Abfragevektor $\tilde{\mathbf{C}}(t) = C_1(t), C_2(t), \dots, C_n(t)$ und der Kausalmatrix $\mathbf{E}$, bildet die Ausgangsbasis zur dynamischen Repräsentation einfacher FCMs mit bivalenten Kausalkonzepten und mindestens trivalenten Kausalkanten.

Durch Einführung einer Schwellenoperation $\tilde{\mathbf{C}}(t+1) \leftarrow S[\tilde{\mathbf{C}}(t) \circ \mathbf{E}]$, in welcher die Schwelle $S = 0$ oder $S = \frac{1}{2}$ gesetzt wird, erhalten wir für den Abfragevektor $\tilde{\mathbf{C}}(t)$ eine bestimmte Systemantwort $\tilde{\mathbf{C}}(t+1)$ der FCM, d.h. einen Ausgabevektor in Form eines Grenzyklus mit Angabe spezifischer Ereignisse. Die Komponenten des Ausgabevektors werden konkret durch **iterierte Vektor-Matrizen Multiplikation** der Gleichung

$$\tilde{C}_i(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{für } \tilde{\mathbf{C}}(t) \circ E^i > S \\ 0 & \text{für } \tilde{\mathbf{C}}(t) \circ E^i \leq S \end{cases} \quad (3)$$

bestimmt, wobei E^i für die i te Spalte der Kausalmatrix $\mathbf{E}$ steht. Gleichung (3) setzt die Grundidee zur Enkodierung kausaler Kognitionen derart um, daß etwas dann und nur dann geschieht, wenn es durch etwas geschehen kann. Ist dies nicht der Fall, klingt die kausale Aktivierung ab. In den meisten einfachen FCMs werden die Kausalkonzepte synchron aktualisiert, so daß im Endeffekt FCM-Inferenzen in Form von Resonanzzuständen des Kausalnetzwerkes ausgegeben werden. Dabei entspricht jedem Resonanzzustand ein Grenzyklus bestimmter Ordnung, z.B. Fixpunkte (Einzelereignisse), alternierende Ereignisse, periodische Ereignissequenzen, oder raum-zeitliche Muster, je nach Beschaffenheit der FCM (Kosko 1997, Zaus 1999a). Komplexere FCMs mit zeitlich variierenden Kausalkonzepten und zeitlich variierenden Kausalkonnektiven (siehe Abschn. 2) sind derzeit noch weitgehend im Entwicklungsstadium.

Als kausale Prädiktorsysteme sagen FCMs Ereignissequenzen voraus, die vorausgreifende Widerspiegelungen der Wirklichkeit repräsentieren. Insofern sind FCMs bereits rudimentäre antizipatorische Systeme. Was sie jedoch von regulären Antizipationssystemen unterscheidet, ist die Tatsache, daß sie keine Selbst-Referentialität besitzen. Sie sind iterativ, gegebenenfalls auch rekursiv, aber nicht inkursiv. Inkursivität steht für implizite Rekursivität, d.h. Systeme

²In einfachen FCMs können die Kantengewichte trivalent oder mehrwertig sein; Mehrwertigkeit liegt i.d.R. bei einer kollektiven FCM vor, die aus der Aggregation k individueller FCMs hervorgegangen ist.

mit dieser Eigenschaft enthalten sich selbst in dem Modell, das sie von ihrer Aufgabenumgebung bilden (Dubois 1998). Bei inkursiv antizipativen Systemen hängt ein zukünftiger Zustand $S(t+\Delta t)$ nicht nur von vergangenen und gegenwärtigen Zuständen ... $S(t-\Delta t)$, $S(t)$ ab, sondern auch von dessen zukünftigen Zuständen $S(t+\Delta t)$, $S(t+2\Delta t)$, ..., die es antizipiert. In abstrakt mathematischer Form wird Inkursivität durch die Gleichung

$$x(t+1) = \mathbf{F}[\dots, x(t-1), x(t), x(t+1), \dots] \quad (4)$$

repräsentiert, wobei der Wert der Zustandsvariable $x(t+1)$ zur Zeit $t+1$ eine Funktion dieser Variable in Vergangenheit, Gegenwart und zukünftigen Zeitpunkten ist. Dadurch wird das herkömmliche Konzept der Rekursivität erweitert.

Das Grundprinzip antizipatorischer Systeme wurde bereits 1913 in der deutschen Lern-, Denk- und Gedächtnispsychologie von Otto Selz beschrieben (Selz 1913). Auch der russische Neurophysiologe und Hirnforscher Piotr Kusmitch Anochin hob es als das „historische Fundament für das Auftreten aller höheren Formen des Vorgehens künftiger Ereignisse“ hervor (Anochin 1962). Abbildung 9 zeigt die Emergenz von Antizipationen nach Anochin.

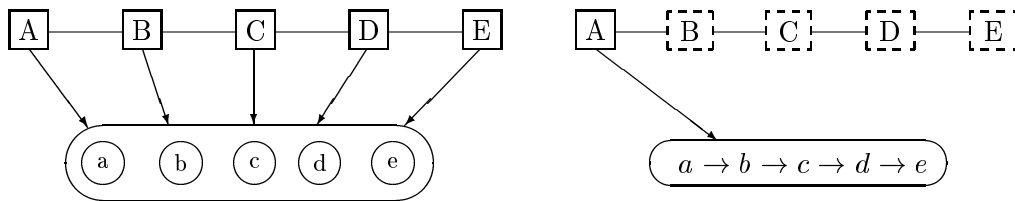


Abb. 9 Emergenz von Antizipationen

Im linken Teil von Abbildung 9 sind (A,B,...,E) sich nacheinander abspielende äußere Ereignisse in verschiedenen Zeitintervallen, während (a,b,...,e) Protoplasmareaktionen sind, die infolge der individuellen energetischen Besonderheiten jeder einzelnen äußeren Einwirkung auftreten. Aus dem rechten Teil von Abb. 9 wird ersichtlich, daß nach zahlreichen Wiederholungen der aufeinander folgenden Erscheinungsreihe (A,B,...,E) im Protoplasma eine ununterbrochene Kette chemischer Vorgänge gebildet wird, die schließlich schon als Antwort auf das erste Ereignis (A) der Außenwelt auftritt.

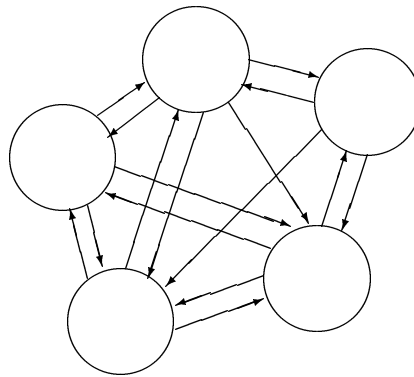
Der antizipatorische Prozeß im Protoplasma eilt dem Ablauf der nacheinander folgenden Ereignisse in der Außenwelt voraus, d.h. die Reaktion (e) ist bereits eingetreten, während das Ereignis (E) erst in Zukunft eintreten wird. Wir können heute davon ausgehen, daß die Evolution zu einem sehr frühen Zeitpunkt diesen universellen Aktivierungsprozeß als einen überlebenswichtigen Mechanismus für die Anpassung von Organismen an ihre Umwelt hervorgebracht hat. Er ist nicht nur die Grundlage zur Ausbildung bedingter Reflexe, sondern auch der Ausgangspunkt für höhere geistige Prozesse, in welchen „look ahead behavior“, „foresight“ und „causal predictability“ eine zentrale Rolle spielen. Die Weiterentwicklung von Fuzzy Cognitive Maps wird diesen Perspektiven antizipatorischer Systeme Rechnung tragen müssen und sie daher zunehmend in den Brennpunkt des „emergent and evolutionary computings“ rücken.

Mit dieser Perspektive schließen wir vorliegenden Beitrag und hoffen, der Leserschaft einen informativen Überblick zu FCMs vermittelt zu haben. Sie weisen ein dezidiert hohes intra- wie interdisziplinäres Anwendungspotential auf und verdienen gerade in einer Welt, wo sich die Ereignisse überschlagen können, besondere Beachtung. Fortschritte auf diesem Gebiet sind aber nur dann zu erzielen, wenn hierzu Investitionsbereitschaft von Anwendern aus Industrie, Forschung und Technik signalisiert **und** realisiert wird.

Literatur

- [1] Anochin, P.M. 1962 Vorgreifende Widerspiegelung der Wirklichkeit. In: Anochin, P.M. 1978 Beiträge zur allgemeinen Theorie des funktionellen Systems, 61-76, Fischer, Jena
- [2] Axelrod, R. 1976 Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites. Princeton University Press, Princeton
- [3] Bonham, G.M. 1993 Cognitive Mapping as a Technique for Supporting International Negotiation. *Theory & Decision*, 34, 255-273
- [4] Bougon, M., Weick, K. & Binkhorst, D. 1977 Cognition in Organizations: An Analysis of the Utrecht Jazz Orchestra. *Administrative Science Quarterly*, Vol. 22, 606-639
- [5] Dickerson, J.A. & Kosko, B. 1994 Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps. *Presence*, Vol. 3, No. 2, 173-189
- [6] Dickerson, J.A. & Kosko, B. 1997 Virtual Worlds in Fuzzy Cognitive Maps. In: Kosko, B. 1997 Fuzzy Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River
- [7] Dubois, D.M. 1998 Computing Anticipatory Systems with Incursion and Hyperincursion. AIP Conference Proceedings 437, Computing Anticipatory Systems: CASYS-First International Conference, Liege, Belgium 1997. Published by The American Institute of Physics, pp. 3-29
- [8] Goto, K. & Yamaguchi, T. 1991 Fuzzy Associative Memory Application to a Plant Modelling. In: Kohonen, T. et al. 1991 Artificial Neural Networks. Elsevier Sc. Publ., North-Holland, Amsterdam
- [9] Juliano, B.A. & Bandler, W. 1996 Tracing Chains-of-Thought. Fuzzy Methods in Cognitive Diagnosis. Physica-Verlag, Heidelberg
- [10] Kosko, B. 1986 Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24, 65-75
- [11] Kosko, B. 1988 Hidden Patterns in Combined Adaptive Knowledge Networks. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2, 377-393
- [12] Kosko, B. 1991 Fuzzy Associative Memory Systems. In: Kandel, A. 1991 Fuzzy Expert Systems. CRC Press Inc., Boca Raton
- [13] Kosko, B. 1992 Neural Networks and Fuzzy Systems. A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice Hall, Englewood Cliffs
- [14] Kosko, B. 1993 Fuzzy Thinking. The New Science of Fuzzy Logic. Hyperion, New York
- [15] Kosko, B. 1997 Fuzzy Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River
- [16] Maruyama, M. 1963 The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes. *American Scientist*, Vol. 51, 164-179
- [17] Mentazemi, A. & Conrath, D. 1986 The use of cognitive mapping for information requirement analysis. *Management Information Systems Quarterly*, March 1986
- [18] Payk, Th.R. 1979 Schmerzbehandlung mit Psychopharmaka. *Med. Welt*, Vol. 30, 1039
- [19] Satur, R., Liu, Z. & Gahegan, M. 1995 Multi-Layered FCMs Applied to Context Dependent Learning. *Proceedings of the IEEE FUZZ-95*, Vol. II, 561-568
- [20] Selz, O. 1913 Ueber die Gesetze des geordneten Denkverlaufs. Eine experimentelle Untersuchung. Speemann, Stuttgart
- [21] Schneider, M., Shnaider, E., Kandel, A. & Chew, G. 1995 Constructing Fuzzy Cognitive Maps. *Proceedings of the IEEE Fuzz-95*, Vol. IV, 2281-2288

- [22] Styblinski, M.A. & Meyer, B.D. 1988 Fuzzy Cognitive Maps, Signal Flow Graphs, and Qualitative Circuit Analysis. *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Neural Networks, ICNN-87*, Vol. II, 549-556
- [23] Taber, W.R. 1991 Knowledge Processing with Fuzzy Cognitive Maps. *Expert Systems with Applications*, No. 2, 83-87
- [24] Taber, R.W. & Siegel, M. 1987 Estimation of expert credibility weights using fuzzy cognitive maps. *Proceedings of the IEEE 1987 International Conference on Neural Nets (IEEE ICNN-87)*, Vol. II, No. 1, 82-87
- [25] Wender, P.H. 1968 Vicious and virtuous circles: The role of deviation-amplifying feedback in the origin and perpetuation of behavior. *Psychiatry*, Vol. 31, 309-324
- [26] Weick, K.E. 1995 Der Pozeß des Organisierens. suhrkamp taschenbuch wissenschaft, Band 1194, Suhrkamp, Frankfurt
- [27] Zhang, W.R., Chen, S.S. Bezdek, J.C. 1989 Pool 2: A Generic System for Cognitive Map Development and Decision Analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 1, 31-39
- [28] Zhang, W.R. & Chen, S.S. 1988 A Logical Architecture for Cognitive Maps. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. I, 231-238
- [29] Zaus, M. 1999a Crisp and Soft Computing with Hypercubical Calculus. New Approaches to Modeling in Cognitive Science and Technology with Parity Logic, Fuzzy Logic, and Evolutionary Computing. Physica-Verlag, Heidelberg (January 1999)
- [30] Zaus, M. 1999b Einführung in die interdisziplinäre Kausalforschung. In Vorb. für SS 1999 (Vorlesungsskript & Buchprojekt), FB 5 Psychologie, Universität Oldenburg
- [31] Zaus, M. 1999c Causal Knowledge Engineering with Fuzzy Cognitive Maps in APL. Technical Report, Dept. of Psychology, University of Oldenburg, Germany
- [32] Zaus, M. 1998 Kausalnetzwerke der Fuzzy Logik als Grundlage moderner Wahlforschung. Projektentwurf, Fachbereich 5 Psychologie, Universität Oldenburg



Schlußbemerkung: Um unseren Lesern einen möglichst repräsentativen Überblick zur FCM-Literatur zu ermöglichen, wurden in obige Liste mehr Quellentexte einbezogen als im Artikel verwendet. Interessierten Lesern sollte damit der Zugriff zur vertiefenden Literatur erleichtert und die Kommunikation über FCMs angeregt werden.