



Erich Peter KLEMENT, Dr. Univ.-Doz., Jahrgang 1949, Mathematikstudium an der Universität Innsbruck, Promotion zum Dr.phil. 1971, seit 1972 Universitätsassistent am Institut für Mathematik der Universität Linz, 1981 Habilitation mit Arbeiten aus Fuzzy Logic. Seit 1976 Beschäftigung mit Fuzzy Logic, seit 1979 Organisation einer jährlichen internationalen Tagung über Fuzzy Set Theory, 1991 Gründung des Fuzzy Logic Laboratoriums Linz. Längere Forschungsaufenthalte u.a. in Berkeley und in Yokohama, Gastdozent an der Universität für Bildungswissenschaften Klagenfurt (1982), Gastprofessor an der University of Cincinnati (1983) und an der Università degli Studi di Trento (1993).

Publikationen: 3 Bücher, über 30 wissenschaftliche Arbeiten aus dem Bereich Fuzzy Logic, mehrere populärwissenschaftliche Artikel.

Fuzzy Logic – eine vielseitige neue Technologie

Fuzzy Logic macht seit etwa fünf Jahren auch in Europa Schlagzeilen. Diese neue Technologie erweist sich als besonders nützlich bei der Steuerung von U-Bahnen und komplexen industriellen Prozessen, in der Haushalts- und Unterhaltungselektronik sowie bei Diagnose- und anderen Expertensystemen. Die rasante Entwicklung ging vor einigen Jahren von Japan aus und hat mittlerweile auch Europa und die USA erreicht.

Der Fuzzy-Boom in Japan ist nach wie vor ungebrochen, die Zahl der angemeldeten Patente steigt exponentiell an. Die weitaus überwiegende Zahl betrifft theoretisch eher einfache Anwendungen von Fuzzy Control. Fuzzy ist zum Bestandteil des Marketing geworden (1990 war es in Japan zum Wort des Jahres gewählt worden), Elektronikartikel ohne Fuzzy-Komponente erweisen sich zunehmend als unverkäuflich. Die öffentliche Unterstützung ist ebenfalls enorm: das Fuzzy-Forschungsinstitut LIFE in Yokohama (gegründet 1989) hat ein Budget von ca. 500 Millionen Schilling für sechs Jahre, das zu gleichen Teilen vom mächtigen japanischen Wirtschafts- und Transportministerium MITI und von 48 führenden Konzernen aufgebracht wird.

In Europa, aber auch in den USA, war die Forschung zumeist auf Universitäten und dort vor allem auf den theoretischen Bereich konzentriert. Man ist jedoch durch die japanischen Erfolge sensibilisiert und versucht, den

Anschluß nicht zu verlieren. So beschäftigt sich etwa die Weltraumbehörde NASA damit, Fuzzy Control bei komplexen Andockmanövern einzusetzen.

Der europäische Vorreiter ist zweifellos Deutschland: Bisher investierte die Industrie etwa 250 Millionen DM in die Beurteilung von Fuzzy Logic und Fuzzy Control. Die Fuzzy-Initiative Nordrhein-Westfalen (im Februar 1992 vom Wirtschaftsministerium mit 11 Millionen DM dotiert) erleichtert kleineren und mittleren Unternehmen in diesem Bundesland den Einstieg in die neue Technologie.

Grundbegriffe der Fuzzy Logic

Fuzzy Logic ist im Grunde eine mehrwertige Logic, die nicht nur die beiden Wahrheitswerte wahr/falsch, ja/nein, ein/aus, 1/0, schwarz/weiß, ..., sondern

auch Zwischenwerte kennt, die man als Grautöne interpretieren könnte. Ausdrücke wie „ziemlich warm“, „sehr kalt“, ... können mathematisch formuliert und im Computer verarbeitet werden. Damit versucht man der menschlichen Denkweise näher zu kommen als dies die herkömmliche (zweiwertige) Boole'sche Logik vermag, in der davon ausgegangen wird, daß eine Entscheidung zwischen zwei zueinander komplementären Hypothesen stets und eindeutig möglich ist („tertium non datur“).

Fuzzy Logic wurde 1965 von Lotfi A. Zadeh, Informatikprofessor an der University of California in Berkeley, begründet, nachdem es bereits in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts recht theoretische Untersuchungen über mehrwertige Logiken (etwa vom polnischen Mathematiker Jan Lukasiewicz) gegeben hatte. Zadeh, der einer

A	B	NICHT A	A UND B	A ODER B	WENN A, DANN B
1	1	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
0	0	1	0	0	1

Tab. 1: Wahrheitswerttabelle der Boole'schen Logik: 1 steht für wahr und 0 für falsch

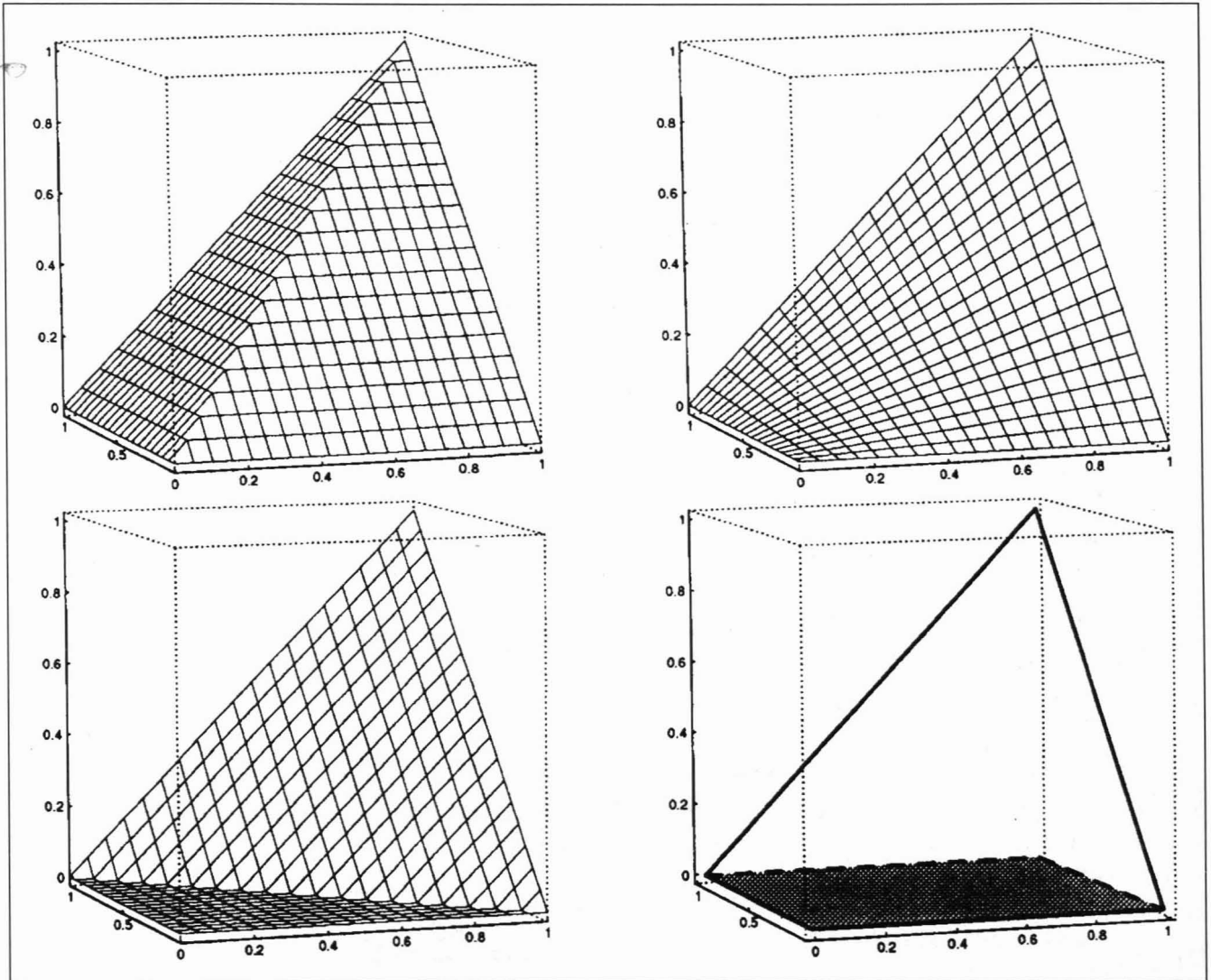


Abb. 1: Dreidimensionale Darstellungen der Funktionen M (links oben), P (rechts oben), F_∞ (links unten) und W (rechts unten)

der Pioniere der mathematischen Systemtheorie gewesen war, wollte seine Ideen immer zur Lösung realer Probleme einsetzen, zum Beispiel in der Zeichenerkennung.

Anstelle der beiden Wahrheitswerte der Boole'schen Logik, die üblicherweise mit 0 (= falsch) und 1 (= wahr) codiert werden, tritt in der Fuzzy Logic das Intervall $[0,1]$, das heißt, ein Wahrheitswert kann eine beliebige reelle Zahl zwischen 0 und 1 sein. Der Wahrheitswert einer Eigenschaft A wird nun durch eine Funktion

$$\mu_A$$

die Wahrheitswert- oder (falls man vorwiegend an Mengen denkt, die ja durch Eigenschaften ihrer Elemente definiert sind) Zugehörigkeitsfunktion („membership function“) beschrieben. Diese Funktion

$$\mu_A$$

ordnet jedem Element x einer Grundmenge X („universe of discourse“)

eine reelle Zahl

$$\mu_A(x)$$

zwischen 0 und 1 zu. Diese Zahl

$$\mu_A(x)$$

gibt den Wahrheitswert an, zu dem x die Eigenschaft A erfüllt oder, was dasselbe ist, den Zugehörigkeitsgrad von x zu der durch die Eigenschaft A definierten (Fuzzy) Menge.

Betrachten wir etwa die Eigenschaft „angenehme Zimmertemperatur“, so erfüllt eine Temperatur von 16° diese Eigenschaft vielleicht nur zum Grad 0.1, eine Temperatur von 21° aber zum Grad 0.95, was eine mögliche zahlenmäßige Formulierung des Sachverhalts sein könnte, daß 21° als wesentlich angenehmere Raumtemperatur empfunden wird als 16° .

Wie die Festlegung der Wahrheitswerte

$$\mu_A(x)$$

für konkrete Eigenschaften A zu erfolgen hat, ist Gegenstand vieler Publikationen gewesen. Unbestritten ist, daß bei der Modellierung der Zugehörigkeitsfunktionen der Kontext, in dem eine Eigenschaft verbal formuliert wird, eine ganz entscheidende Rolle spielt. Ein weiterer Faktor, der auf die Form der Zugehörigkeitsfunktion Einfluß hat, ist ihre einfache Verarbeitbarkeit im Computer (viele Anwender verwenden dreiecks- oder trapezförmige Funktionen, da diese stückweise linear sind und durch drei bzw. vier Zahlenwerte vollständig festgelegt sind).

Elementare Operationen in der Fuzzy Logic

Wie im Fall von nur zwei Wahrheitswerten möchte man nun auch in der Fuzzy Logic Aussagen durch Operationen wie UND, ODER, NICHT, WENN

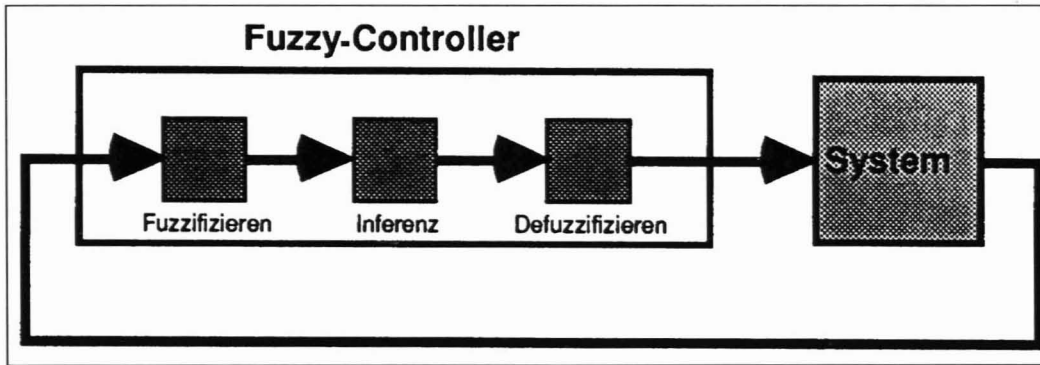


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Fuzzy-Controllers

– DANN, ... miteinander verknüpfen. Diesen logischen Operationen entsprechen in der Mengenlehre der Durchschnitt, die Vereinigung, das Komplement und die Teilmengenbeziehung. In der Boole'schen Logik sind UND, ODER, NICHT sowie WENN–DANN eindeutig bestimmt und etwa durch Wahrheitwerttabellen beschreibbar (siehe Tab. 1).

Will man diese Operatoren auf den Fall unendlich vieler Wahrheitswerte erweitern, so fällt auf, daß dies nicht in eindeutiger Weise möglich ist: die vier im folgenden definierten Funktionen M , P , F_{∞} , und W

$$M(x,y) = \min(x,y)$$

$$P(x,y) = x \cdot y$$

$$F_{\infty}(x,y) = \max(0, x+y-1)$$

$$W(x,y) = \begin{cases} \min(x,y) & \text{falls } \max(x,y) = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

verhalten sich genau so wie die Operation UND, solange man nur Nullen und Einser einsetzt. Es liegt daher nahe, alle vier Werte, $M(x,y)$, $P(x,y)$, $F_{\infty}(x,y)$ und $W(x,y)$, als mögliche mathematische Modelle für „x UND y“ aufzufassen. Insgesamt unterscheiden sich die vier Funktionen allerdings beträchtlich: für „0,6 UND 0,6“ erhält man mit obigen Funktionen der Reihe nach die Zahlenwerte 0,6, 0,36, 0,2 und 0. Die Unterschiede zwischen den vier Funktionen lassen sich auch geometrisch veranschaulichen (siehe Abb. 1). Tatsächlich gibt es sogar unendlich viele „vernünftige“ Funktionen, die im Fall von nur zwei Wahrheitswerten genau das klassische UND ergeben. All diesen t-Normen genannten Operationen ist gemeinsam, daß sie kommutativ („x UND y“ liefert dasselbe wie „y UND x“), assoziativ (3 oder mehr Wahrheitswerte lassen sich problemlos miteinander verknüpfen) und monoton sind (eine Vergrößerung von x und/oder y führt keinesfalls zu einer Verkleinerung von „x UND y“).

Was hier für das logische UND angedeutet wurde, gilt ebenso für NICHT, ODER und WENN–DANN. Das bedeutet, daß man in der Fuzzy Logic zusätzlich zu den unendlich vielen Wahrheitswerten auch noch unbeschränkte Möglichkeiten zur Kombination derselben hat. Dies ermöglicht bei sorgsamer Vorgangsweise eine Modellierung praktisch beliebiger realer Situationen.

Verbreitetste Anwendung: Fuzzy Control

Obwohl Zadeh's ursprüngliche Intention eher in die Richtung ging, die man heute mit Expertensystemen umschreiben würde, sind die weitaus meisten praktischen Anwendungen der Fuzzy Logic der Steuer- und Regelungstechnik, also dem Bereich von Fuzzy Control, zuzuordnen. Die wichtigsten Applikationen lassen sich in folgende besonders typische Bereiche zusammenfassen:

- Prozeßsteuerung (die erste kommerzielle Anwendung von Fuzzy Control war ein Zementdrehrohrföfen in Dänemark, weitere Beispiele sind Industrieroboter, Temperaturregelung sowie viele Anwendungen in der chemischen und der Stahlindustrie)
- Fahrzeugtechnik im weitesten Sinn (hier ist die bekannte U-Bahn-Steuerung in der japanischen Stadt Sendai zu nennen, aber auch Antiblockiersysteme, Automatikgetriebe, Tempomaten, schwingungsfreie Kräne und Aufzugsysteme)
- Foto- und Videotechnik (fast alle Funktionen moderner Kameras werden von Fuzzy Control unterstützt, wie etwa Autofokus, Belichtungsautomatik, Bildstabilisation)
- Haushaltsgeräte (die populärste Realisierung von Fuzzy Control überhaupt ist die vollautomatische

Waschmaschine, die nur mehr über einen Ein/Aus-Schalter verfügt; mittlerweile gibt es in Japan fast alle Haushaltsgeräte mit Fuzzy-Steuerung)

Konzeptuell versucht Fuzzy Control das Verhalten eines Menschen, der die zu steuernde Maschine bedient, möglichst gut abzubilden: bei der U-Bahn wird versucht, die Hand-

lungsweise des Lokführers zu modellieren, bei der Waschmaschine die der Hausfrau. Man könnte auch sagen, daß Fuzzy Control so agieren sollte, wie es ein erfahrener Meister täte. Daher ist auch häufig von intelligenten Steuerungen die Rede, Zadeh selbst spricht vom MIQ, also vom Machine Intelligent Quotient.

Ein Charakteristikum von Fuzzy Control ist, daß zur Beschreibung natürlichsprachlich formulierte Regeln und nicht mathematische Modelle und Gleichungen verwendet werden. Das erlaubt kurze Entwicklungszeiten und ermöglicht die Steuerung von komplexen Prozessen, für die es keine brauchbaren, in Echtzeit ausführbaren mathematischen Modelle gibt. Dies führt allerdings auch zu Problemen bei Stabilitätsaussagen (die bei hohen Risiken ganz wesentlich sind).

Generell kann man sagen, daß bei Regelstrecken, für die die klassische Regelungstechnik zufriedenstellende Lösungen anbietet, Fuzzy Control nichts bringt. Hingegen bieten sich solche Prozesse für Fuzzy Control an, für die es kein exaktes mathematisches Modell gibt, die besonders komplex oder in hohem Maß nichtlinear sind.

Eine unabdingbare Voraussetzung für den Einsatz von Fuzzy Control ist die verbale Beschreibbarkeit des Reglers. Als besondere Vorteile eines Fuzzy-Reglers sind ein geringer Entwicklungsaufwand, ein geringer Bedarf an Daten während der Steuerung, sowie eine auffällige Robustheit gegenüber Störungen und Änderungen von Parametern zu nennen. Der wesentlichste Nachteil in den mangels eines mathematischen Modells kaum vorhandenen Stabilitätsaussagen.

Fuzzy Control arbeitet wissensbasiert, wobei die Wissensbasis aus einer Anzahl linguistisch formulierter Wenn–Dann-Regeln besteht, die typi-

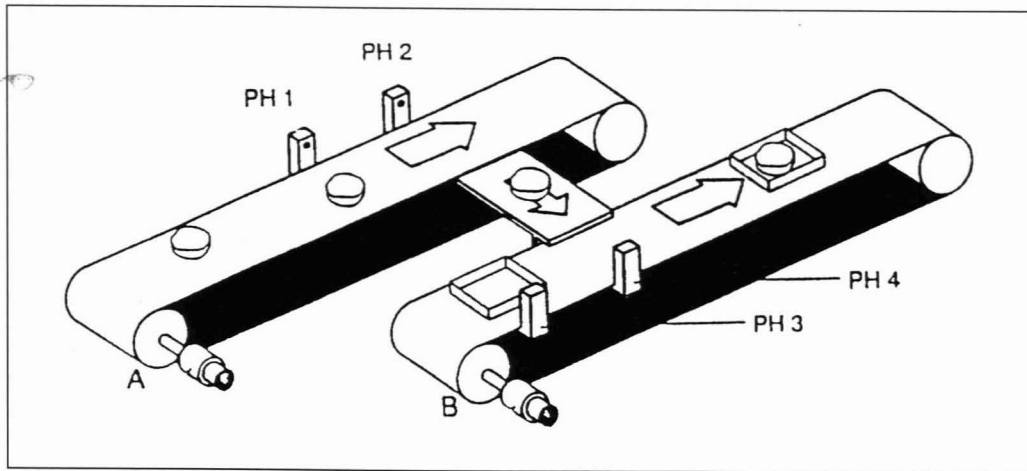


Abb. 3: Synchronisation von Förderbändern: Technologieschema (Quelle: Fa. OMRON)

scherweise aus dem konkret vorhandenen Expertenwissen extrahiert werden. Im Fuzzy-Controller (siehe Abb. 2) werden diese linguistischen Werte dann als Fuzzy-Mengen interpretiert (Fuzzifizieren) und einem Inferenz- (also einem Schluß-)verfahren unterworfen, das als Output wieder eine Fuzzy-Menge liefert. Aus dieser Outputmenge wird ein repräsentativer

Fuzzy Logic in Expertensystemen

Die andere Gruppe wichtiger Anwendungen von Fuzzy Logic zählt zu den Expertensystemen, mit denen die Rolle menschlicher Experten simuliert werden soll. Wesentlichste Themenkreise sind hier Diagnosesysteme (Krediturteilung, medizinische Diagnosen, Erdbebenfrüherkennung, Umwelt-

lich sind als bei Fuzzy Control. Außerdem läßt sich die Wirkungsweise eines (egal ob Fuzzy oder nicht Fuzzy) Expertensystems weniger leicht verifizieren als die einer technischen Steuerung.

Soft- und Hardware-Werkzeuge

Seit zwei, drei Jahren gibt es auf dem Markt Entwicklungsumgebungen, also Programmpakete, durch die das Erstellen eines Fuzzy-Controllers oder eines

Fuzzy-Expertensystems wesentlich erleichtert wird, da nicht mehr der gesamte Vorgang programmiert werden muß. Die Erfahrungen zeigen, daß diese Shells geeignet sind, Erfahrungen mit Fuzzy Logic zu sammeln und ein Gefühl für die charakteristische Denkweise zu entwickeln. Für echte industrielle Anwendungen wird eigens für einen Prozeß geschriebenen Pro-

grammen (die an bestehende Softwarekonfigurationen angepaßt sind) oder Hardware-komponenten der Vorzug gegeben.

Das erste Produkt auf dem Markt war die TIL-Shell der amerikanisch-japanischen Firma Togai InfraLogic,

die zusammen mit dem von der deutschen INFORM erzeugten fuzzyTECH auch auf dem europäischen Markt führend ist. Weitere Produkte stammen von der japanischen Firma OMRON (FS-10AT) sowie von amerikanischen Firmen wie Hyperlogic (CubiCalc) und neuerdings Apronix (FIDE).

Alle diese Entwicklungsumgebungen gestatten, linguistisch formulierte Regelbasen innerhalb eines vorgegebenen Rahmens zu erstellen und diese dann auszuwerten. Das Ergebnis kann in einer gängigen Programmiersprache (etwa in C) in andere Programme exportiert werden.

Ein noch neuerer Trend ist die Herstel-

	Box ist voraus	Box ist gleichauf			Box ist zurück
Box ist schneller	Brems Box stark ab	Brems Box stark ab	Brems Box leicht ab	Beschleunige Box ein wenig	Beschleunige Box
	Brems Box stark ab	Brems Box ab	Brems Box leicht ab	Beschleunige Box ein wenig	Beschleunige Box
Box ist gleich schnell	Brems Box ab	Brems Box leicht ab	Tu nichts	Beschleunige Box ein wenig	Beschleunige Box
	Brems Box ab	Brems Box leicht ab	Beschleunige Box ein wenig	Beschleunige Box	Beschleunige Box stark
Box ist langsamer	Brems Box ab	Brems Box leicht ab	Beschleunige Box ein wenig	Beschleunige Box	Beschleunige Box stark

Tab. 2: Synchronisation von Förderbändern: Linguistische Regelbasis (Quelle: Fa. OMRON)

Zahlenwert ausgewählt (Defuzzifizieren), da für technische Anwendungen eine numerische Regelgröße erforderlich ist.

Eine sehr schöne kommerzielle Anwendung ist die Synchronisation zweier Förderbänder durch die Firma OMRON: die auf einem Band ankommenden Werkstücke sollen in Boxen verpackt werden, die auf einem parallelen Band transportiert werden (siehe Abb. 3 und Tab. 2). Eingangsgrößen sind die relative Position und die relative Geschwindigkeit der beiden Bänder, Ausgangsgröße ist die relative Beschleunigung.

schutz), Mustererkennung (Erkennung handschriftlicher Zeichen, Spracherkennung) und Entscheidungstheorie (vor allem Gruppenentscheidungen).

Zielsetzung ist, einen (menschlichen) Experten bei seinen Entscheidungen optimal zu unterstützen oder ihn ganz zu ersetzen. Generell kann gesagt werden, daß sowohl die Entwicklung wie auch die Verbreitung derartiger Anwendungen noch deutlich hinter denen von Fuzzy Control liegt, was besonders für Japan gilt. Ein Grund dürfte (neben psychologischen Ursachen – welcher Experte läßt sich schon gerne wegrationalisieren?) sein, daß anspruchsvollere theoretische Grundlagen erforder-



lung von Hardwarekomponenten, die 1987 von Professor Takeshi Yamakawa eingeleitet wurde. Sie bringen eine beträchtliche Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit durch die Möglichkeit des Paralleleinsatzes. Pionier war hier die Firma OMRON, aber auch Togai InfraLogic und neuerdings auch INFORM (gemeinsam mit Siemens) verfügen über solche Produkte.

Hat Österreich die Entwicklung verschlafen?

In Österreich wird seit Mitte der siebziger Jahre Forschung auf dem Gebiet von Fuzzy Logic betrieben (vom Autor und von Dozent Klaus-Peter Adlassnig, der an der Universität Wien das medizinische Expertensystem CADIAG 2 entwickelte). Seit 1979 gibt es in Linz jährlich eine internationale Tagung zu mathematischen Aspekten der Theorie. Das Interesse der Anwender erwachte aber erst in den letzten zwei, drei Jahren.

Im Herbst 1991 hatte der Verband der österreichischen Softwareindustrie durch seinen Sprecher Peter Kotauczek dem Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung die Gründung einer Impulsgruppe Fuzzy Logic vorgeschlagen. Ministerialrat Hermann Bodenseher griff diese Anregung auf und gab vorerst zwei Studien zur Fuzzy Logic in Auftrag, die qualifizierte wissenschafts-, aber auch wirtschaftspolitische Entscheidungen im Zusammenhang mit dieser neuen Technologie vorbereiten sollten.

Die Studie Fuzzy Logic-Grundlagen wurde vom Autor gemeinsam mit Peter Bauer verfaßt. Ziel dieser „top-down“-Studie war es, einerseits die wesentlichsten Aspekte von Fuzzy Logic und Fuzzy Control allgemeinverständlich darzustellen und andererseits die inter-

nationale Lage mit Blick auf die spezielle österreichische Situation zu untersuchen. Die Studie enthält neben einer Darstellung der wesentlichsten Grundlagen von Fuzzy Logic und Fuzzy Control und einem Vergleich zwischen den Entwicklungsumgebungen TIL-Shell und fuzzyTECH einen ausführlichen Anhang, der einen Überblick über die international derzeit aktuellsten Themen der Forschung gibt.

Ziel der zweiten Studie Fuzzy Systems in Österreich von DI Monika Reiter (Joanneum Research Graz) und Professor Volkmar H. Haase (Technische Universität Graz) war es, nach der „bottom-up“-Methode eine Beurteilung der Lage aus der Perspektive der österreichischen Unternehmungen und des österreichischen Marktes zu erhalten. Es wurde ein Fragenkatalog erarbeitet und etwa 30 Gesprächspartnern vorgelegt. Die Auswertung der Antworten ergab ein Bild des Ist-Zustandes, der mit dem wünschenswerten Soll-Zustand verglichen wurde. Zusammenfassend empfehlen die Autoren Initiativen im Bereich Ausbildung (Technologie-Zentren, WIFI, HTLs, Universitätslehrgänge, ...), die Schaffung von zwei Fuzzy Logic-Zentren (Fuzzy Logic Laboratorium Linz, Joanneum Research Graz) sowie die Inangriffnahme von drei Demonstrations- und Pilotprojekten, deren Förderung die öffentliche Hand übernehmen sollte.

Die Entwicklung in den letzten Monaten zeigte bereits eine gewisse Abkehr vom bisher üblichen Einzelkämpfertum und positive Ansätze zu gemeinsamen Aktivitäten (Fuzzy-Tage in Linz und Wien). Es ist zu hoffen, daß die öffentliche Hand und die interessierte

Privatwirtschaft die Anregungen der Studien rasch aufgreifen und damit positive Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz von Fuzzy Logic durch die österreichische Wirtschaft schaffen.

Zukunftsperspektiven

- Allgemein rechnet man nicht nur in Japan, sondern vor allem auch in den USA und in Europa mit einer starken mittelfristigen Zunahme von industriellen Anwendungen von Fuzzy Logic. Eine Marktstudie der Prognos AG (Basel, Oktober 1992) schätzt das deutsche Marktvolumen für Fuzzy-Produkte allein in der Prozeßautomatisierung auf 100 Millionen DM im Jahr 1995 und auf über eine halbe Milliarde DM im Jahr 2000.
- Ein deutlich erkennbarer Trend ist die Kombination von konventionellen Steuer- und Regelungstechniken mit Fuzzy Control, indem man Fuzzy-Regler zum Einstellen klassischer Regler oder als Mensch-Maschine-Schnittstelle verwendet.
- Fuzzy wird verstärkt zusammen mit anderen aktuellen Technologien eingesetzt. Hier sind die Neuronalen Netze hervorzuheben, wobei die Lernfähigkeit der letzteren genützt wird. Weitere zusammen mit Fuzzy Logic betrachtete Gebiete sind genetische Algorithmen und die Chaos-Theorie.
- Persönlich erwarte ich eine starke Ausweitung bei Expertensystemen und anderen Bereichen der künstlichen Intelligenz. Hier sollte der Einsatz von Fuzzy Logic ein weites Feld neuer Möglichkeiten, etwa im Umweltschutz, eröffnen.

