Wolfhard WEGSCHEIDER, Dipl.-Ing. Dr.techn., Jahrgang 1950, ist Arbeitsgruppenleiter und Universitätsdozent für Analytische Chemie an der Technischen Universität Graz. Seit der Dissertation (1975) über toxische Schwermetalle im Staub arbeitet er an Problemen der Spurenanalyse und Chemometrie an der Universität Denver, als IAEA-Experte, für Philip Morris Research (Richmond); Träger des Feigl-Preises 1980 der Österr. Gesellschaft für Analyt. Chemie, des Pregl-Preises 1986 der Österr. Akademie der Wissenschaften und dzt. Sekretär der Intern. Chemometrics Society sowie Vorsitzender von EURACHEM-Austria, der Kommission zur Entwicklung der Qualitätssicherung in chemischen Labors. Fuzzy Theory für chemische und spektroskopische Probleme ist seit 1986 Forschungsthema an der TU Graz.

Klare Vorteile durch unscharfe Logik

Fuzzy Theorie als Basis intelligenter Steuerung und Regelung

Der Beitrag ist Herrn Hofrat MR Dr. med. Alfons Wegscheider, Oberstadtphysikus i.R., in Dankbarkeit zum 70. Geburtstag gewidmet.

Noch haben die westlichen Industriekapitäne nicht die Auswirkungen der Qualitäts- und Produktivitätsphilosophie (Quality Engineering, Total Quality Management, Quality and Productivity), die die japanische Industrie vorexerziert, umgesetzt, als uns schon – basierend auf „fuzzy logic" – eine neue Automatisierungswelle überflutet. Der Konsument nimmt die neuen Möglichkeiten des gestiegenen Machine Intelligence Quotient (MIQ) gerne an, und verhilft so den Japanern zu neuen Umsatzrekorden. Wieder – wie vorher beim Thema Qualität – stammen Idee und Theorie aus dem Westen, Implementation und Marktfähigkeit aus Japan. Im folgenden werden Prinzipien und Anwendungen der „Theorie der unscharfen Regelung" vorgestellt, und dann wird die Frage gestellt, wie ohne weiteren Zeitverlust diese Methodik in Europa in die Betriebe eingeführt werden kann.

Die Grundidee ist ebenso einfach wie einleuchtend: nicht alle Information, die man zur Gestaltung des menschlichen Alltags heranzieht, ist exakt beschreibbar. Jederman weiß, was gemeint ist, wenn man von einer „jungen Frau" spricht, und nur Pedanten werden darauf bestehen, das Alter der Dame ganz exakt zu kennen. Oder: viele Entscheidungen, die wir treffen, können nicht so lange warten, bis alle Prämissen und Randbedingungen bekannt sind; auch ohne über präzise Information darüber zu verfügen, ob es heute regnen wird, entscheiden wir uns beim Verlassen des Hauses für die Mitnahme eines Regenschirmes, oder dagegen.

Diese beiden Alltagsbeispiele sollen zwei wichtige Fakten aufzeigen: erstens gibt es viele Daten, die von vornherein vage (verschwommen, unscharf, engl. „fuzzy") sind, und nicht deshalb genauer werden, weil uns die Informatiker gelehrt haben, jede Zahl in bis zu 32 Bit anzugeben. Besonders linguistische Variable („alt", „kalt", „groß", „windig", „kreditwürdig", etc.) sind dazu nur sehr schlecht geeignet, so daß sie in der Vergangenheit entweder gar nicht der elektronischen Datenverarbeitung zugänglich waren, oder aber in der relativ primitiven Form einer Stringvariable, bei deren Verarbeitung nur die einfachsten Vergleichsoperationen rechnerintern zugelassen waren. Daneben gibt es aber Eingangsdaten, die aufgrund von Problemen bei der Messung unscharf sind, obwohl sie eigentlich scharfe (engl. „crisp") Variable beschreiben sollen: eine Videokamera vermag zwar ein Objekt mit scharf begrenzten Ausdehnungen abbilden, doch ist das produzierte Bild zweifellos mit Unschärfen behaftet. Ist eine solche Unschärfe nicht als Zufallsstreuung aufzufassen – wie bei der Videokamera –, so widersetzt sie sich auch einer Behandlung durch viele statistische Werkzeuge. Es ist daher wichtig zu verstehen, daß die „fuzzy theory" nicht mit den klassischen Ideen der Statistik konkurrieren will, sondern diese erweitern hilft.

Bevor die computergerechte Darstellung von unscharfen Zahlen erklärt wird, soll nochmals auf das Beispiel vom Mitnehmen (Zuhauselassen) des Regenschirms zurückgekommen werden. Dieses zeigt nämlich, daß Entscheidungen oft nicht nur auf Basis unscharfer Grundlagen getroffen werden müssen, sondern auch dann, wenn einige Grunddaten überhaupt fehlen. Solche Entscheidungen werden selbst nicht exakter sein können als die Prämissen, auf denen sie bauen: wir müssen sie als ungefähre Schlußfolgerungen (engl. „approximate reasoning") verstehen, die dennoch sehr nützliche Ergebnisse bringen können.

Die seit 1965 entwickelte Theorie der unscharfen Logik gibt in mehr als 5000 Originalarbeiten und etlichen Dutzend Büchern dem aufgeschlossenen Techniker Werkzeuge in die Hand, mit denen sehr wirklichkeitsnahe Probleme bearbeitet werden können.

Fuzzy-Zahlen und -Operationen

Die Darstellung unscharfer Zahlen erfolgt über Funktionen, die die Möglichkeit ausdrücken, daß diese unscharfe Zahl einen gewissen Wert annimmt. Soll etwa eine Zahl in der Domäne „Innentemperatur" als „kalt" dargestellt werden, so kann dies wie in Abb. 1 erfolgen. Einer ja/nein Situation

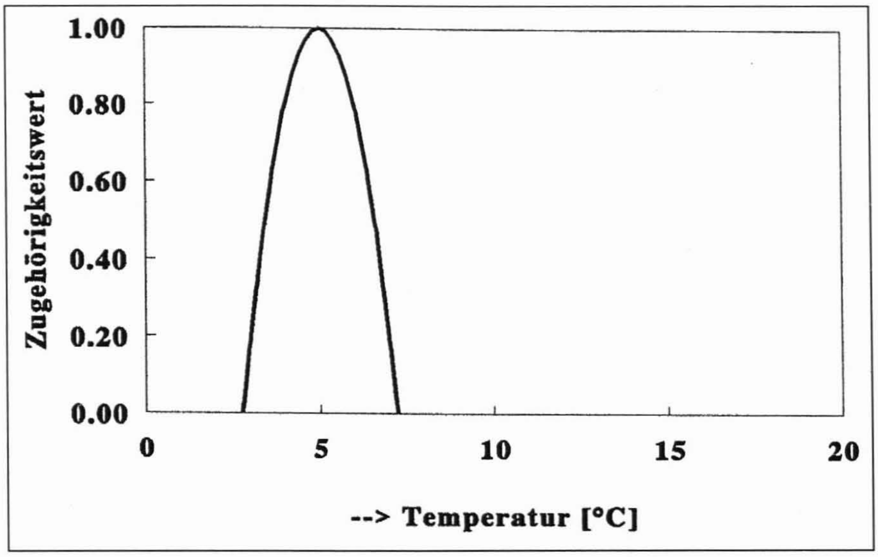

Abb. 1: Die Raumtemperatur „kalt" beträgt etwa 5° C und wird als eine unscharfe Fünf durch eine Zugehörigkeitsfunktion definiert. Die hier verwendete Funktion ist eine Parabel, doch hängt die Form von der Anwendung ab.

(„kalt" oder „nicht kalt"), die wir von der klassischen Logik her kennen, steht hier eine Abstufung des Begriffes „kalt" gegenüber, die als Grad der Zugehörigkeit zu einer Menge „kalt" verstanden werden kann. Diese Betrachtungsweise als „Grad der Zugehörigkeit zu einer Menge" hat als Namensgeber für Funktionen die Art von Abb. 1 fungiert: diese Funktionen werden Zugehörigkeitsfunktionen (engl. membership functions) genannt.

Die Funktionen ergeben sich aus der Anwendung und werden meist nicht von Mathematikern, sondern von den Technikern selbst so vorgegeben, so wie diese für den aktuellen Fall passen. Mit anderen Worten, zwei unterschiedliche Funktionen werden für „kalt" definiert, je nachdem, ob es um die Beschreibung des Zustandes einer Klimaanlage in einem Büro oder in einer Tiefkühlhalle geht.

Nun da Zahlen dargestellt werden, muß mit diesen auch gerechnet werden können. Zwei einfache Operationen sollen an dieser Stelle erklärt werden, bei denen die Funktionen als Mengen angesehen werden: die Vereinigungs- und die Durchschnittsmenge sind für unscharfe Mengen in Abb. 2 gezeigt. Wie man sieht, kann die Durchschnittsmenge als Minimum und die Vereinigungsmenge als Maximum der beiden Mengen dargestellt werden.

Der Bezug zur klassischen Mengenlehre kann über den Graphen einer 0,1-Logik hergestellt werden: eine klassische Boole'sche Menge hat als Zugehörigkeitsfunktion ein Rechteck, da eine Zahl entweder ein Element oder kein Element dieser Menge ist (0,1-Zugehörigkeit). Dieser Zusammenhang ist deshalb wichtig, da auf diese Art die Boole'sche Menge ein Sonderfall einer Fuzzy-Menge ist, allerdings mit senkrechten Begrenzungen.

Fuzzy-Logik und Fuzzy-Regelung

Die Spezialliteratur kennt viele mathematische Operationen mit unscharfen Zahlen, nicht nur Durchschnitt und Vereinigung, selbstverständlich sind auch alle Grundrechenarten darunter zu finden. Die wichtigste (und wohl lukrativste) Klasse der industriellen Anwendungen ist aber trotzdem in der Regelungstechnik zu finden und die gründet sich auf logische Operationen. Dazu zählen das logische UND, das logische ODER und die Verneinung, das logische NICHT. Eine logische Kette der Art,

„wenn der Himmel bedeckt ist UND die Atmosphäre schwül, DANN packe den Regenschirm ein"

versteht sich in Fuzzy-Logik als:

„wenn der Himmel bedeckt ist mit (einem Wert der Zugehörigkeitsfunktion von) 0.87 UND die Atmosphäre schwül ist mit (einem Wert der Zugehörigkeitsfunktion von) 0.65, DANN packe den Regenschirm ein mit (einem Wert der Zugehörigkeitsfunktion von) 0.76".

Dabei werden zwei Probleme offenbar: (a) es muß das logische UND (gegebenenfalls auch das ODER) realisiert werden, und (b) es muß geklärt werden, wie man einen Regenschirm „mit 0.76" einpackt. Das logische UND wird oft mit der Minimumfunktion realisiert. Das Minimum der Prämissen (0.87, 0.65) ist 0.65 und damit sind die Prämissen zu 0.65 (65 %) erfüllt. Ein logisches ODER kann als Maximumfunktion verstanden werden, das logische NICHT (Negation) als Komplementfunktion. Damit ist die logische Relation als Durchschnitt bzw. Vereinigung wie in Abb. 2 aufzufassen. Die zweite Frage, wie ein Regenschirm zu 0.76 eingepackt werden soll, wollen wir bei der Diskussion der Fuzzy-Regelung beantworten.

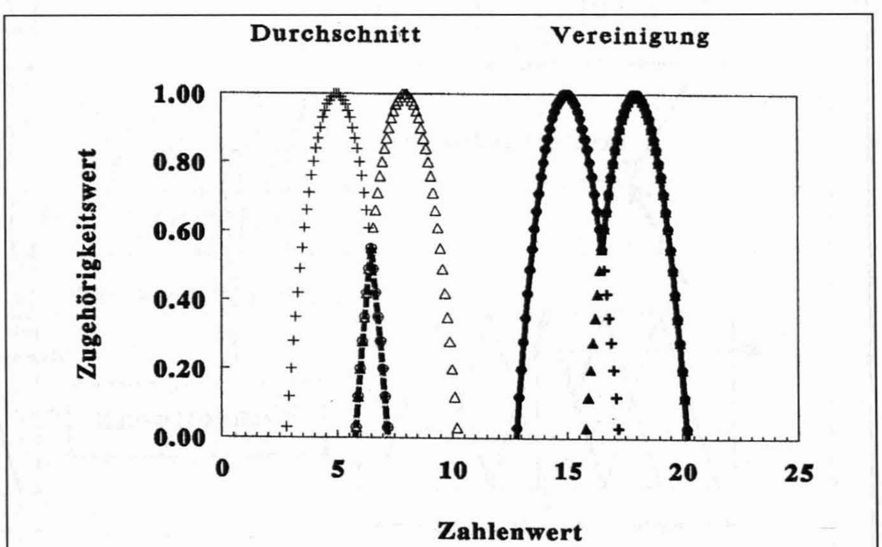

Abb. 2: Die mengentheoretischen Operationen der Durchschnitts- und Vereinigungsmenge entsprechen auch der Minimum- bzw. Maximumfunktion. Für rechteckige Zugehörigkeitsfunktionen entsprechen diese Operationen den in der Boole'schen Logik üblichen.

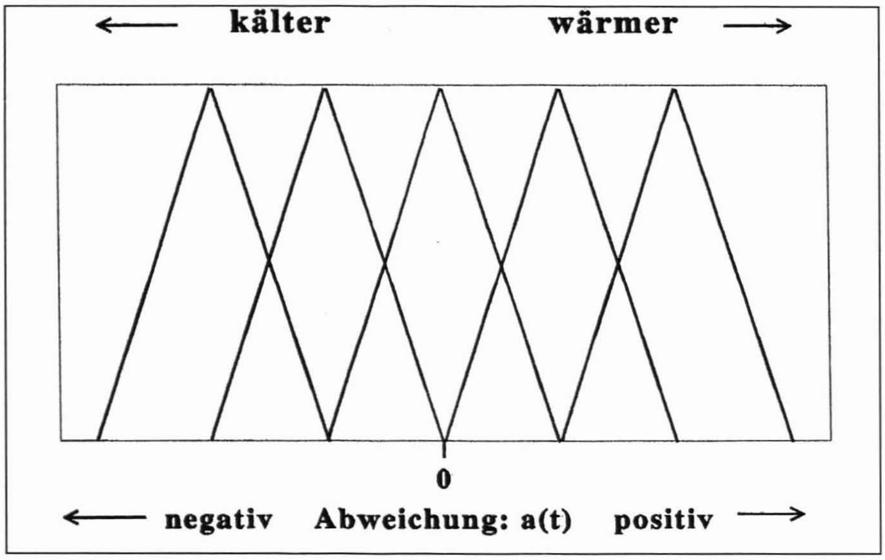

Abb. 3: Dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen definieren unterschiedliche Zustände von „kalt“ bzw. unterschiedliche Abweichungen vom Sollwert

Wird diese Art der Logik in ein Feedbacksystem verpackt, so kann damit geregelt werden, wenn die Prämissen zu Eingangsgrößen (Regelgrößen) werden und die Konsequenzen auf die Stellgrößen wirken. Es wird also die Mathematik und Modellbildung, auf der die klassische Regelungstheorie aufbaut, durch Regeln ersetzt, die bei jedem Systemzustand zu ganz bestimmten Konsequenzen führen, so daß der Sollwert optimal eingehalten wird. Bei jedem Zustand wird eine ganz bestimmte Teilmenge aller Regeln „feuern“, wobei ein möglichst kontinuierlicher Übergang zwischen den Regeln durch die Definition von mehreren Zugehörigkeitsfunktionen pro Variable erreicht wird, die einander zusätzlich noch überlappen. Es wird also, um bei dem Beispiel von vorhin zu bleiben, nicht nur „kalt“ definiert, sondern es werden – wie in Abb. 3 durch dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen gezeigt – „extrem kalt“, „sehr kalt“, „kalt“, „mäßig kalt“ und „kaum kalt“ definiert. Für jeden dieser Zustände wird es unterschiedliche Konsequenzen für die eingestellte Kühlleistung geben, die ebenso mehrfach definiert werden, etwa „niedrige“, „normale“ und „starke“ Kühlleistung.

Es ist wichtig zu verstehen, daß auf diese Art nicht nur klassische Regler gut emuliert werden können, sondern auch (schlecht modellierbares) Wissen von Experten eingebracht werden kann, indem die Regelbasis entsprechend erweitert wird. Selbstverständlich können auch nicht-lineare Regler gebaut werden.

Da die Regelung immer auf einen gewissen Sollwert hin ausgelegt ist, kann man nun die spezielle Notation, wie „extrem kalte“ Innentemperatur oder „starke“ Kühlleistung, durch einen normierten Bereich um den Nullpunkt ersetzen. Statt „extrem kalt“ wird also „stark negativ“, statt „wenig kalt“ wird „stark positiv“ gesetzt (Abb. 3, untere Skala). Weiters wissen wir, daß Regler mit Abweichungen vom Sollpunkt und der Veränderung dieser Abweichungen mit der Zeit (erster Ableitung der Abweichung) arbeiten. Wir können die Abweichung also mit

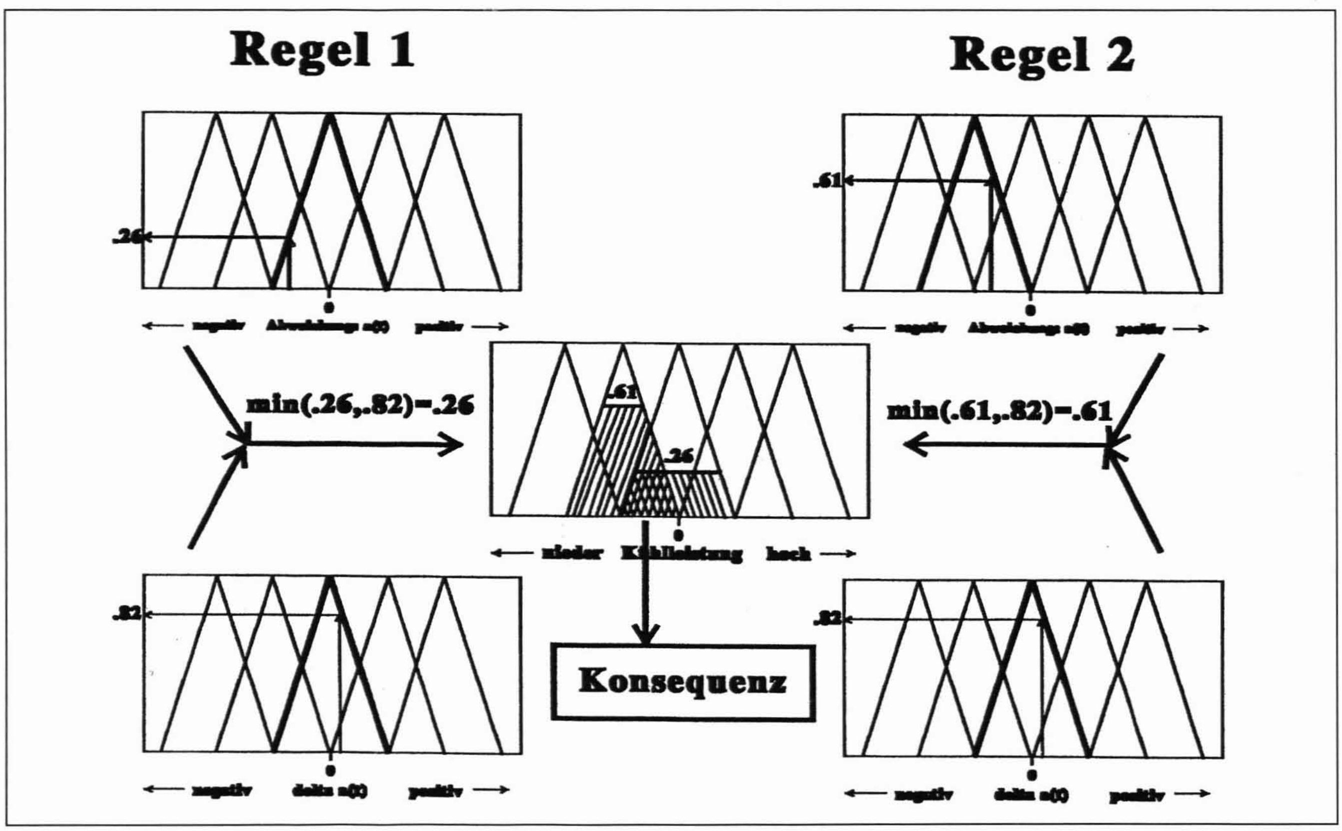

Abb. 4: Modell des Fuzzy-Reglers mit zwei Regeln für a(t)<0 und $\Delta a(t)>0$. Jede der beiden Regeln wird unterschiedlich stark aktiviert und trägt damit unterschiedlich stark zum Stellsignal („Konsequenz“) bei. Letztere wird durch gewichtete Mittelwertbildung der Einzelkonsequenzen (mittleres Schema) errechnet.

$$a(t) = T_{soll}(t) - T_{ist}(t)$$

und die Änderung der Abweichung mit

$$\Delta a = a(t) - a(t\text{-}1)$$

definieren und können uns jetzt Regeln ableiten, die zum Ziel haben a und Δa möglichst klein zu halten, da minimale Abweichungen einer optimalen Regelung entsprechen. Zwei typische Regeln sind:

1. Wenn a gleich null und Δa gleich null, dann Kühlleistung gleich null.
2. Wenn a gleich wenig negativ und Δa gleich null, dann Kühlleistung wenig negativ.

In der Praxis müssen noch ca. weitere 10 Regeln definiert werden, die die Stabilität, gutes Ansprechverhalten und geringes Überschwingen des Reglers verhindern. Wenn das System etwas zu kalt ist ($a(t) < 0$, Abb. 4, links und rechts oben) und eine ganz kleine Veränderung nach oben als Funktion der Zeit zeigt ($\Delta a(t) > 0$, Abb. 4, links und rechts unten), so werden beide Regeln gleichzeitig aktiviert. Das Ausmaß der Aktivierung ist aber unterschiedlich, und das logische UND wird als Minimum-Funktion emuliert. Die linke Hälfte der Abbildung zeigt, daß unter diesen Bedingungen Regel 1 zu 26 % und Regel 2 zu 61 % aktiviert werden. Der scheinbare Konflikt, der durch das gleichzeitige Ansprechen beider Regeln entsteht, wird durch eine gewichtete Mittelwertsbildung gelöst: die Konsequenz (Abb. 4, Mitte) ist, daß die Kühlleistung etwas gegenüber dem Normwert zurückgenommen wird. Dies wird ein Ansteigen der Temperatur zur Folge haben, und damit wird jetzt also Regel 1 gegenüber Regel 2 mehr und mehr Bedeutung bekommen, da die Abweichung vom Sollwert kleiner wird.

Freilich gibt es zahlreiche Spielarten der Fuzzy-Regelung, deren Vor- und Nachteile weitgehend heuristisch in der Literatur beschrieben sind. Allgemeine Richtlinien sind nicht leicht zu geben, sie sind aber glücklicherweise nicht besonders wichtig: die Regelung beruht auf Fachwissen (Regeln), die sich oft schon aus einfachen Überlegungen (Hausverstand!) ergeben und ohne großen Aufwand durch neue Regeln ergänzt werden können, wenn dies sinnvoll erscheint.

Anwendungen der Fuzzy-Regelung

Der Boom bei Fuzzy-Regelung macht den Versuch jeder Aufzählung unvollständig: so wie die Liste erstellt ist, ist sie durch neue Anwendungen schon überholt. Trotzdem sei ein Versuch gewagt, der dem Ziel dient, die große Spannweite nützlicher Anwendungen auszuleuchten.

Für Wärmetauschersysteme, Abwasserreinigung, Verkehrsregelung, Zementproduktion, Robotersteuerung, Drehbank, Einparken von Autos, Steuerung der Fahrgeschwindigkeit, automatisches Getriebe, Steuerung eines Dieselmotors, Zugsteuerung, automatischer Kran, Tunnelbelüftung, Aminosäureproduktion und Orthodontie sind Versionen der Fuzzy-Regelung veröffentlicht worden. Zahlenmäßig überwiegen aber jene Anwendungen, die bei Konsumartikeln dazu dienen, mit relativ geringen Mitteln den Komfort zu erhöhen. Solche Anwendungen, die nach einem Ausspruch des Vaters der Fuzzy Logik, Professor Zadeh aus Stanford, den „machine intelligence quotient" (MIQ) erhöhen, sind außerdem an den Einbau eines Sensors gebunden, der die gewünschte Regelgröße liefert. Dies gilt für Staubsauger, Waschmaschine, Camcorder, Klimaanlage, Zeichenerkennung u.a.m., bei all denen schon Fuzzy-geregelte Produkte am Markt sind.

Vor- und Nachteile der Fuzzy-Regelung

Am besten lassen sich Vorteile an jenen Anwendungsbeispielen aufzeigen, die sich bis jetzt der klassischen Regelungstechnik widersetzt haben, jedoch durch Fuzzy-Regelung gelöst wurden. Dazu gehören einerseits sehr einfache, kleine Systeme und andererseits sehr komplizierte und/oder nicht-lineare.

Bei den kleinen Systemen im Konsumgüterbereich scheint der Aufwand, um mit Fuzzy-Regelung zu einem brauchbaren, stabilen Regelkreis zu kommen, geringer zu sein, als bei klassischer Regelung. Signale einfacher Sensoren – an der richtigen Stelle verwendet – müssen nur mit wenigen Regeln kombiniert werden, um nennenswerte Verbesserungen des Systems zu erzielen. Ganze Produktserien, wie etwa Klimaanlagen mit geringer, mittlerer und großer Leistung, können ohne Neuentwurf eines mathematischen Modells lediglich durch Nachjustieren („tuning") derselben Regeln implementiert werden.

Sehr komplexe Systeme oder solche mit stark verrauschten Regelgrößen können hinreichend stabil wenigstens so gut gesteuert werden, wie es bisher manuell gemacht wurde. Die konsequente, weil computergesteuerte Anwendung des gesamten Regelsatzes, wie auch das Hinzunehmen von nur wenigen neuen Regeln führt dann zu praktischen Verbesserungen gegenüber dem täglichen Betrieb.

Bei vielen Systemen, die derzeit zufriedenstellend auf Basis klassischer Steuerung arbeiten, ist es technisch zwar nicht sinnvoll diese Basis sofort zu verlassen, doch ist hier von grundsätzlicher Bedeutung, daß die wichtigsten Regelmodelle allesamt auch schon in Fuzzy-Regelung verfügbar sind. Bei Neuentwürfen hat man dann die Wahl nach klassischer oder nach Fuzzy-Regelung vorzugehen, je nachdem wie man schneller zum Ziel zu kommen glaubt.

Als bedeutende Nachteile der Fuzzy-Regelung sind heute zwei Punkte anzuführen, ein theoretischer und ein praktischer. Theoretisch ist dieser Weg, der erst vor 15 Jahren „erfunden" wurde, noch nicht so im Detail entwickelt. Dies gilt besonders für Stabilitätsaussagen, obwohl die Praxis lehrt, daß es im allgemeinen einfacher ist, mit Fuzzy-Regelung Stabilität zu erreichen als über den klassischen Weg.

Praktisch steht dem Einsatz – jedenfalls in Mitteleuropa – der Mangel an einschlägig ausgebildeten Ingenieuren entgegen. Nur wenige Firmen, wie etwa die deutsche Siemens AG, sind schon mit eigenen Entwicklungsgruppen „dabei". Den Ingenieurschulen kann ein schnelles Umdenken sehr empfohlen werden: das Arbeiten mit Heuristiken erlaubt jedem Techniker, die Methode zu verstehen und kann so helfen, die Regelungstechnik von der Spezialdisziplin zu einem selbstverständlichen und aufgewerteten Werkzeug aller Ingenieure werden zu lassen. In der Zwischenzeit sollte – um keine Zeit zu verlieren – der Wissenstransfer durch postgraduale Ausbildung bewerkstelligt werden. Ein entsprechendes Modell unter EG-Ägide hat die erste Erprobungsphase schon positiv überstanden, von nachhaltiger Breitenwirkung ist es aber noch weit entfernt.

Literatur:

[1] DUBOIS, D.; PRADE H.: Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty, New York: Plenum 1988.

[2] GRAHAM, I.; JONES P.L.: Expert Systems Knowledge, Uncertainty and Decision, New York: Chapman and Hall, 1988

[3] SUGENO, M.; ed: Industrial Applications of Fuzzy Control, Amsterdam: North Holland, 1985

[4] KLIR, G.J.; FOLGER T.A.: Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Englewood Cliffs: Prentice Hall 1988

[5] ZIMMERMANN, H.J.: Fuzzy Set Theory and its Applications, Boston: Kluwer Academic Publishers 1985

[6] ZIMMERMANN, H.J.: Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems, Boston: Kluwer Academic Publishers 1987