

Fuzzy-logic

Von Armin P. Barth

Die Fuzzy-logic ist zurzeit einer der Haupttrümpfe der modernen Informatik. Prognostiker schreiben den Fuzzy-Systemen einen dreissigprozentigen Marktanteil an allen Erzeugnissen der Automatisierungstechnik bis ins Jahr 2000 zu. Was für Möglichkeiten verbergen sich hinter dieser «unscharfen» Logik?

Begriff und Zielsetzung

Wörtlich übersetzt heisst «fuzzy-logic» soviel wie «unscharfe Logik» – ein Begriff, der 1965 von *Lofii Zadeh* geprägt wurde, um das von ihm neu geschaffene Modell logischen Schliessens mit einem Namen zu versehen. Ziel der Fuzzy-logic ist es, in unpräziser Form vorliegendes menschliches Wissen, also Faustregeln, der Erfahrung abgewonnene Wenn-dann-Regeln, nutzbar zu machen für die Steuerung technischer Geräte und die Regelung industrieller Prozesse.

Die Regeln *menschlicher Experten* bauen auf unscharfen Begriffen wie z. B. «wesentlich kleiner», «viel zu warm», «sehr vorsichtig», «dunkelrot glühend» auf, die nicht oder nur selten in exakte Zahlenwerte übersetzbar sind. Ebenso sind in der Regelungstechnik Sensor- und Sollwerte meist mit Ungenauigkeiten behaftet; sie sind nicht Zahlen, sondern *Intervalle*, innerhalb deren die tatsächlichen Werte sich mit grösster Wahr-

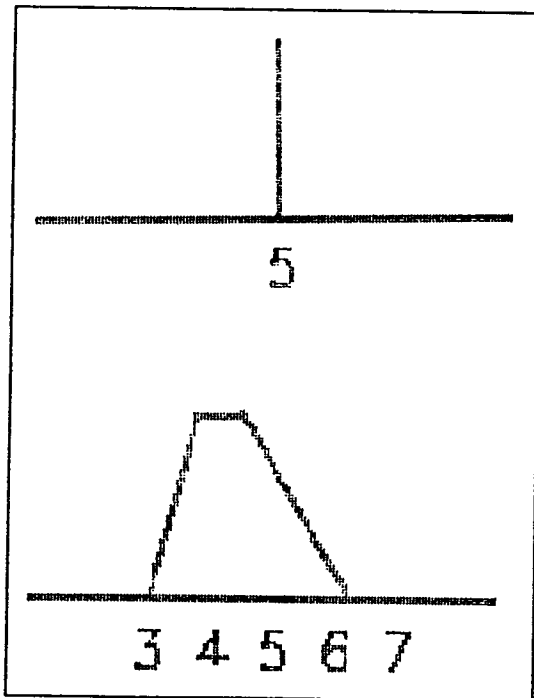


Abb. 1. Scharfe Zahl und Fuzzy-Zahl.

lichkeit bewegen. Bei einer automatischen U-Bahn-Bremmung beispielsweise bestimmt ein Regelsystem den Anhaltspunkt, aber natürlich nicht mit höchster Präzision; das wäre weder wünschenswert noch technisch realisierbar.

Fuzzy-logic will also *berechenbar* machen, was mit herkömmlichen mathematischen Ansätzen der vielen Unschärfen wegen nicht berechenbar ist. Damit rückt sie nahe an die *Wahrscheinlichkeitstheorie*. Es war fast unvermeidlich, dass sich Fuzzy-Logiker und Wahrscheinlichkeitstheoretiker in einen wissenschaftlichen Streit verwickelten. Jede Partei wirft der anderen in zum Teil gehässiger Art und Weise vor, dass ihre Theorie kein adäquates Werkzeug zur Modellierung von Unsicherheiten darstellt.

Mehrwertige Logiken

In der klassischen Logik werden Aussagen allein mit einem der beiden Wahrheitswerte 1 oder 0, «wahr» oder «falsch», bewertet, ein Drittes gibt es nicht (Prinzip vom ausgeschlossenen

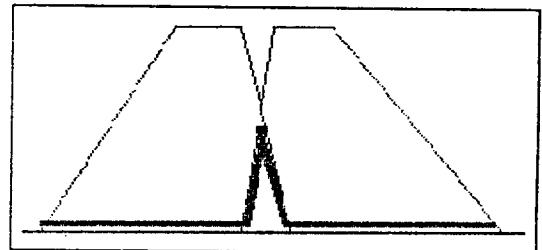


Abb. 2. Operation «Minimumsbildung» mit zwei Fuzzy-Zahlen.

Dritten). Ist eine Aussage also *nicht wahr*, so muss sie *falsch* sein, ist sie *nicht falsch*, so muss sie *wahr* sein. Doch in der Praxis gibt es immer wieder Abstufungen: Aussagen sind manchmal wahr, bis zu einem gewissen Grad wahr, mit grosser Wahrscheinlichkeit wahr usw.

Eine Logik, die den praktischen Anforderungen gerecht werden will, muss also *Unsicherheiten* abbilden können. Deshalb wurde die sogenannte «mehrwertige Logik» erfunden. Anklänge an solche Logiken finden sich schon bei Aristoteles, aber vollständig ausgebaut haben sie erst 1921 der polnische Mathematiker *Jan Lukasiewicz* und sein amerikanischer Kollege *E. L. Post*. Damit war es nun möglich, Aussagen mit *gebrochenen Zahlen* zwischen 0 und 1 zu bewerten.

Unter strafrechtlichem Gesichtspunkt gibt es *erlaubte* Handlungen und *strafbare* Handlungen, aber auch strafbare Handlungen, bei denen von Strafe abgesehen wird, etwa wegen Geringfügigkeit. Trotzdem kann man solche Handlungen nicht «erlaubt» nennen. Hier wäre also eine dreiwertige Einteilung naheliegend, zu deren Behandlung eine *dreiwertige Logik* herangezogen werden könnte.

Das Verdienst Zadehs war es, die Idee der mehrwertigen Logik weiterentwickelt, neue Konzepte wie «unscharfe Zahl» und «unscharfe Operation» eingeführt und eine *technische Realisierbarkeit* angestrebt zu haben. Und das mit grossem Erfolg! Bereits gibt es unzählige gut funktionierende Fuzzy-Systeme in der Regelungstechnik (z. B. Temperaturregelung bei Klimaanlage oder Glasschmelzen) und in der Fahrzeugtechnik (z. B. Fahrt- und Bremsregelung in U-Bahnen). Zahllose Konsumartikel (Fernseher, Waschmaschinen, Staubsauger usw.) erbringen auf Grund ihrer «fuzzy-controller» viel flexiblere und situativere Leistungen.

Allerdings sind fast sämtliche Patente in *japanischen Händen*, weswegen der Westen nun, überspitzt ausgedrückt, von einer Art «Fuzzy-Schock» ergriffen wird und in den kommenden Jahren alles daran setzen wird, den *japanischen Vorsprung* aufzuholen.

Unscharfe Zahlen

Um die Funktionsweise von Fuzzy-Systemen zu erklären, müssen wir etwas ausholen und uns zuerst den «unscharfen Zahlen» und «unscharfen Operationen» zuwenden. Dann werden wir in der Lage sein, die Grundidee des *unscharfen Schliessens* zu skizzieren.

Statt mit präzisen Zahlen arbeitet man in der Fuzzy-logic mit unscharfen Zahlen, Mengen, die gleichzeitig *mehrere Zahlen* mit unterschiedlichem Mass an Zugehörigkeit enthalten. Die herkömmliche Vorstellung von Zahl wird also aufgeweicht. Die Abbildung 1 zeigt (neben der scharfen Zahl 5) die Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl, die darüber Auskunft gibt, wie intensiv eine bestimmte Zahl zur Fuzzy-Menge gehört.

Die abgebildete Fuzzy-Zahl hat dann die Darstellung $(4/1)$, $(5/0,7)$, $(6/0,1)$, weil 4 die Zugehörigkeit 1, 5 die Zugehörigkeit 0,7 und 6 die Zugehörigkeit 0,1 an der Fuzzy-Zahl hat. Eine solche Vorstellung ist gar nicht unnatürlich, wenn man etwa den Vergleich zu einem Klub zieht, in dem man in *unterschiedlicher Intensität* engagiert sein kann.

Unscharfe Operationen

Nun sind unscharfe Zahlen aber recht unspektakulär, wenn es nicht gelingt, sie rechnerisch zu

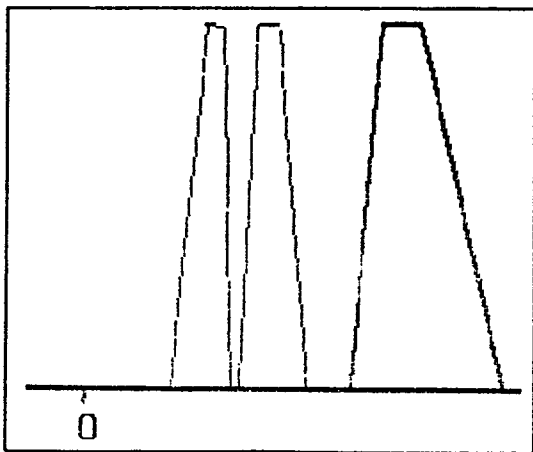


Abb. 3. Addition zweier Fuzzy-Zahlen.

verknüpfen; erst durch Verknüpfung von Zahlen oder allgemeiner von *Aussagen* werden Informationen verarbeitet. Methoden der Verknüpfung gibt es aber unzählige; die Abbildungen 2 und 3 zeigen zwei einfache Beispiele. Die Minimumbildung (Abb. 2) ist eine sehr pessimistische Verknüpfung, denn sie bestimmt bei jeder scharfen Zahl nur deren minimale Zugehörigkeit zu einer

der beiden Fuzzy-Zahlen. Die Addition (Abb. 3) ist ein sehr häufiger Verknüpfungsmechanismus, doch ist a priori unklar, wie die Summe zweier unscharfer Zahlen bestimmt werden soll.

In der Fuzzy-logic fällt die Definition meist so aus: sind Z_1 und Z_2 zwei unscharfe Zahlen, die durch ihre Zugehörigkeitsfunktionen gegeben sind als z. B. $Z_1: (1/0,4)$, $(2/1,0)$ und $Z_2: (2/0,1)$, $(3/0,8)$, $(4/1,0)$, $(5/0,3)$, so wird die Summe eine unscharfe Zahl zwischen 3 (da $1+2=3$) und 8 (da $3+5=8$) sein. Das Zugehörigkeitsmass von z. B. 5 berechnet sich wie folgt: 5 ist die Summe von $1+4$, $2+3$ und $3+2$ (nur Werte aus Z_1 , Z_2 berücksichtigen!); diese Summen haben das jeweils kleinere Zugehörigkeitsmass 0,4, 0,8 und 0,1. Unter diesen ist aber 0,8 der grösste Wert, also wählt man 0,8 als Zugehörigkeitswert von 5.

Auf ähnliche Art und Weise sind alle möglichen Verknüpfungen unscharfer Informationen definierbar, die je nach praktischem Umfeld zur Verwendung gelangen. Mit einer *unscharfen Multiplikation* lässt sich beispielsweise ein elektrischer Leistungsmesser ausrüsten, der aus den unscharfen Sensorwerten für Spannung (U) und Stromstärke (I) die unscharfe Leistung $P=U \times I$ bestimmt.

Unscharfes Schliessen

Nun können wir tiefer in einen «fuzzy-controller» hineinsehen, um wenigstens anzudeuten, wie er in die Lage versetzt wird, Schlussfolgerungen auszuführen, die dem *menschlichen unscharfen Schliessen* nahe kommen. Die klassische Logik erlaubt sogenanntes deduktives Schlussfolgern, das

heisst Schlüsse, die aus *exakt formalisierten* und damit *scharfen Voraussetzungen* mittels logischer Umformregeln Wissen ableiten, das den Voraussetzungen eigentlich schon inhärent ist. Beim Fuzzy-Schliessen andererseits handelt es sich um *näherungsweise Schlussfolgern* bei unsicheren, vagen oder nicht absolut konsistenten Voraussetzungen. Dem Menschen ist solches Schliessen ausserordentlich vertraut, ja es dürfte wohl Hauptbestandteil seines schlussfolgernden Denkens sein.

Betrachten wir einen mit Fuzzy-logic ausgestatteten *Staubsauger*. Verschiedene einfache Sensoren für Teppichart, Verschmutzungsart und Verschmutzungsgrad nehmen Messwerte auf, die natürlich unscharfe Zahlen sind. Bezeichnet Z immer einen der von den Sensoren aufgenommenen Zustände und W immer einen Wert, so enthält der Staubsauger mehrere Regeln der Art $WENN Z_1=W_1$ und $Z_2=W_2$ und $Z_3=W_3$, $DANN actio$, wobei aber alle Zustände und Werte unscharfe Zahlen sind und die Aktion eines von mehreren Saugprogrammen bedeutet. Da nun, wie gesagt, die von den Sensoren gemeldeten Werte unscharf sind, kann man nicht von Übereinstimmung mit den Werten der Regeln sprechen, sondern nur Übereinstimmungsmasse berechnen (mittels geeigneter Operationen).

Letztere sind dann allerdings scharfe Zahlen, die angeben, *wie gut* eine Sensor-Fuzzy-Zahl mit einer Regel-Fuzzy-Zahl übereinstimmt. Schliesslich werden die Übereinstimmungsmasse aller Zustände zu einem einzigen Übereinstimmungsmass verknüpft, das angibt, wie gut eine Regel die tatsächlichen Fakten wiedergibt. Die Regel mit dem *höchsten Übereinstimmungsmass* wird dann ausgeführt. Dadurch ist das Gerät in die Lage versetzt worden, das Saugprogramm der Umgebung anzupassen und die Saugleistung zu optimieren.

Natürlich ist auch die Fuzzy-logic keine heilbringende Lösung aller Probleme. Wenn es ihr aber gelingt, die Effizienz vieler Automaten zu steigern und gleichzeitig sparsamer mit materiellen Ressourcen und Energie umzugehen, dann ist sie jede Welle wert, die sie zurzeit schlägt.