



# Gleitende Genauigkeit durch Fuzzy-Logik Teil 1

In den unscharfen Übergängen liegt der Gewinn

***Diese Artikelserie beschreibt ausführlich die Grundlagen der Fuzzy-Technik. Anhand einer chronologischen Darstellung findet der Einsteiger mühelos Zugang zu diesem interessanten Themenbereich, während auch Fortgeschrittene wertvolle Informationen erhalten.***

## Allgemeines

„Zurück zu den analogen Ursprüngen, weg vom absoluten ja/nein“. So begann ein Fuzzy-Logik-Artikel der ELV-Sonderausgabe 1994. Wie richtig und gut formuliert diese Aussage ist, zeigen dieser und die folgenden Beiträge; Beispiele werden angeführt und Grundlagen beschrieben. Durch einen Einblick in die Historie sowie durch ein Fuzzy-Logik-Lernprogramm ist eine spielerische Abrundung und Vertiefung der gesamten Thematik möglich.

Still und ziemlich unbemerkt - sieht man einmal von den Experten ab - erobert sich

die Fuzzy-Logik auch in deutschen Produkten ihren Platz in der Steuerungs- und Regeltechnik, nachdem sie in vielen unterschiedlichen fernöstlichen Artikeln bereits erfolgreich Einsatz findet. Zu denken ist hier an die Mailänder U-Bahn (Siemens), ein Akku-Schnelladegerät (Bosch) und, seit Anfang des Jahres im Serieneinsatz, das mittendekende Automatikgetriebe (Volkswagen).

Lassen Sie uns diese Anwendung etwas genauer betrachten. Automatikgetriebe sollen den Fahrerinnen und Fahrern die ständig notwendigen Schaltvorgänge, vor allem im Stadtverkehr, abnehmen. Dabei läßt sich eine ab Werk vorgegebene Schalt-

charakteristik nicht immer mit den aktuellen Schaltwünschen in Einklang bringen. Vor allen Dingen der sportlichere Fahrertyp kam nicht auf seine Kosten, da die Automatik meist zu früh hochschaltete. Den Automatikgetrieben haftet aus diesem Grunde ein „Hosenträger-Image“ an. Eine erste Verbesserung brachte die Möglichkeit, zwischen 2 Fahrprogrammen wählen zu können: Wirtschaftlichkeit oder Sportlichkeit, sparsamer Verbrauch oder Durchzugskraft standen zur Verfügung. Dem individuellen Anspruch versuchte man somit Rechnung zu tragen, jedoch läßt sich nicht jeder Mensch einer dieser Gruppen zuordnen. Dies trifft umso mehr zu, als sich der persönliche Fahrstil im Laufe der Zeit verändern kann oder der jeweiligen aktuellen Verkehrssituation anzupassen ist.

Bei der Entwicklung einer neuen Getriebebesteuerung setzten die Volkswagen-Ingenieure auf die Fuzzy-Logik. Statt der scharfen Zuordnung des Fahrstils in sparsam oder spritzig, gibt es nun auch umgangssprachlich definierte Zwischenwerte wie beispielsweise „überwiegend sportlich“ oder „ziemlich verhalten“. Die technische Umsetzung dieses Konzeptes erfolgt über die elektronische Beobachtung des Gaspedals. Dabei wird ständig analysiert, wie weit und wie zügig das Pedal getreten wird. Erfolgt die Betätigung relativ schnell, ist eine hohe Beschleunigung erwünscht, und die nächste Schaltstufe wird erst bei höheren Motordrehzahlen gewählt; anderenfalls orientiert sich die Schaltung an der grundsätzlich verbrauchsoptimierten Fahrcharakteristik bei niedrigen Drehzahlen.

Ein Beispiel soll die Wirkungsweise verdeutlichen: Fließender Verkehr auf der Landstraße oder Autobahn gestattet eine überwiegend gleichmäßige, sparsame Fahrweise. Die Gaspedalstellung bleibt relativ unverändert. Bei einem Überholvorgang jedoch wird der Fahrer instinktiv mehr Gas geben. Durch den Grad der Bewegung des Gaspedals „erkennt“ die Elektronik den Fahrerwunsch; entweder möchte dieser auf der Autobahn nur zügig z. B. an einem Lastwagen vorbeifahren oder auf der Landstraße die Gänge möglichst weit ausdrehen, um den Überholvorgang zu verkürzen. In beiden Fällen wird zugunsten höherer Kraftentfaltung kurzfristig ein leistungsorientierteres, „sportlicheres“ Schaltprogramm gewählt.

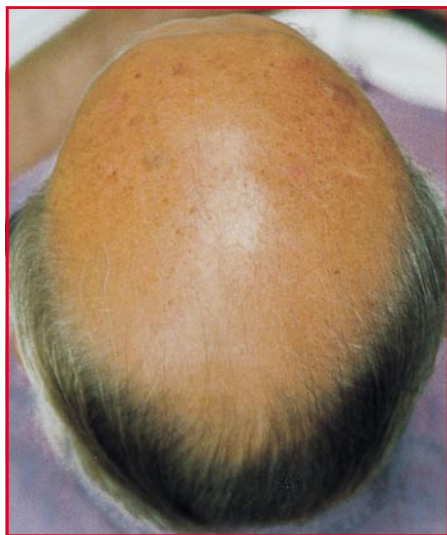
Dieser Wechsel der Fahrcharakteristik, der bisher nur durch ein scharfes Umschalten zwischen den Automatikprogrammen Sport und Economy zu erreichen war, kann mit Hilfe der Fuzzy-Logik sehr viel feinfühlicher erfolgen, da beliebige Zwischenschritte möglich sind. Der Fahrer muß nicht bei jedem Überholvorgang gleich zu 100 % „sportlich“ fahren, sondern kann je nach

Fahrsituation oder Fahrerwunsch auch nur „ein wenig“ oder „ziemlich“ sportlich fahren.

Das Automatikgetriebe paßt sich mit Hilfe der Fuzzy-Logik, bei grundsätzlich verbrauchsorientierter Fahrcharakteristik, dem individuellen Vorhaben des Autofahrers sowie der jeweiligen Fahrsituation an, ohne dabei auf die Leistungsreserven des Fahrzeugs zu verzichten. Dies bedeutet mehr Fahrkomfort durch eine intelligentere Getriebeansteuerung.

## Grundgedanken

Doch wie kam es überhaupt dazu: Schauen wir uns hierzu ein wenig im Fuzzy-Logik-Museum um. Wäre da nicht eine geplatzte Verabredung gewesen, wer weiß, ob Fuzzy-Logik überhaupt jemals entstanden wäre. Im Juli 1964 hatte sich Lofti Zadeh in New York mit einem Freund zum Essen verabredet. Doch der mußte ganz kurzfristig das Treffen absagen und so ergab sich ein freier Abend für Zadeh. Auf dem Bett liegend, seine bevorzugte Position zum Nachdenken, überkam ihn eine erste Ahnung zur Fuzzy-Theorie. Nach weiteren 3 Stunden hatte er „a reasonably good idea of how this whole thing would look“. Sein Grundgedanke dabei war, daß sich nicht alle Beobachtungen und Ereignisse eindeutig mit ja/nein oder 0/1 klassi-



### Wieviel Haare braucht der Mensch?

fizieren lassen. Ist beispielsweise ein 2000 km langer Fluß kurz oder lang? Ist ein 170 cm langer Mensch groß oder klein? Eine interessante Fragestellung ist auch, bei wievielen Haaren ein Mensch keine Glatze mehr hat. Sind es 1.000, 5.000 oder 30.000 Haare? Hierzu sei angemerkt, daß ein Mensch ca. 100.000 Kopfhaare besitzt.

Bei der Betrachtung von Abbildung 1 erkennen wir, daß uns die zweiwertige (boolsche) Logik vorgibt, bei 20.000 Ha-

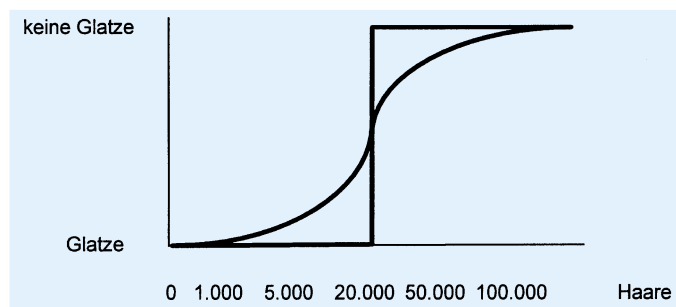


Bild 1: „Haariges“ Diagramm

ren ist der Übergang von einer Glatze zu einer Nichtglatze. Pech für denjenigen, der nur 19.999 Haare sein eigen nennt, und Glück für denjenigen mit 20.001. Gerade an diesem Beispiel läßt sich die Absurdität einer solchen scharfen Begrenzung verdeutlichen. Zadeh läßt hier gleitende Übergänge zu, wie der geschwungene Kurvenverlauf kennzeichnet.

1965 von ihm in Kalifornien weiterentwickelt, zählt die Fuzzy-Logik heute zu den zukunftsweisenden Technologien. Vorauszusehen war diese Zukunft zu Beginn der Entwicklung jedoch nicht, fand sie doch zu einer Zeit statt, in der man glaubte, mit Hilfe der Digitaltechnik alle Probleme lösen zu können, sofern diese nur ausreichend präzise zu formulieren waren. Diesem Präzisionsdenken widersprach scheinbar die Fuzzy-Logik, welche in etwa mit unscharfer Logik zu übersetzen ist. Man verwechselte Unschärfe mit Ungenauigkeit. Tatsächlich verbirgt sich hinter Fuzzy-Logik eine Verallgemeinerung der „klassischen“, zweiwertigen Logik, die in der Lage ist, menschliche Denkweisen und Formulierungen mathematisch darstellbar zu machen. Mit Hilfe der Fuzzy-Logik ist es möglich geworden, menschliche Formulierungen und Denkweisen numerisch aufzunehmen und zu verarbeiten.

Dieser Fähigkeit besann man sich nach der Feststellung, daß in einzelnen Fällen der Diagnose, der Prozeßautomatisierung, der Mustererkennung und anderen Anwendungen die herkömmlichen Methoden und Beschreibungsmittel nicht ausreichten oder versagten. Entweder mangelte es an Möglichkeiten zur Beschreibung des Lösungsweges, oder die Anforderungen konnten nicht rechnergerecht formuliert werden. So führen z. B. fehlende mathematische Modelle oder zu komplexe Modelle von Prozessen zu unbefriedigenden Automatisierungen.

Hier liefert der Mensch mit seinem Expertenwissen nach wie vor das bessere Ergebnis. Die Fuzzy-Logik ist nun in der Lage, dieses Expertenwissen darzustellen und so nutzbar zu machen. Das Ergebnis sind Expertensysteme, Steuerungen oder Diagnosesysteme, die in ihrem Verhalten stabiler und fehlertoleranter sind. Vor allem in Japan wurde die Fuzzy-Logik mit

großem Erfolg sehr schnell der industriellen Nutzung zugeführt und vermarktet.

Besonders in der Automatisierungs-, Steuerungs- und Regeltechnik erregte die Fuzzy-Logik in den letzten Jahren auch in der Bundesrepublik Deutschland großes Aufsehen. Komplexe Prozesse, deren mathematische Beschreibung gar nicht oder nur mit großem Aufwand möglich ist, wurden durch Fuzzy-Logik automatisiert oder in ihrer Qualität aufgewertet. Die Fuzzy-Logik ermöglichte die Aufbereitung des zusammengetragenen unscharfen Expertenwissens und des menschlichen Verhaltens zur Verarbeitung mit Rechensystemen.

Bisherige Anwendungen in den verschiedensten technischen und auch nicht technischen Bereichen weisen auf das hohe Potential der Fuzzy-Logik hin. Ihr Einsatz ist dort angebracht, wo

- Zielgrößen nicht exakt, d. h. nur qualitativ formuliert werden können.
- Größen nicht exakt gemessen, sondern z. B. durch die menschliche Interpretation qualitativ vorliegen.
- Nur eine sprachliche Problembeschreibung vorliegt.
- Die Steuergesetze nicht algebraisch, sondern in Form von unscharfem Expertenwissen vorliegen.

## Die Entwicklung der Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik wurde von Professor Zadeh an der Universität von Berkeley, USA, entwickelt. Dieser mathematischen Methode liegt die unscharfe Mengenlehre (Fuzzy-Set-Theory) zugrunde, die eine Erweiterung und Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre darstellt.

Anfang der siebziger Jahre wurde diese Theorie von dem Informatiker Professor Ebrahim Mamdani vom Queen Mary and Westfield College der Universität London für komplexe industrielle Steuerungen nutzbar gemacht.

Damals konnte mit der Fuzzy-Logik jedoch kein entscheidender Durchbruch erreicht werden. Man erkannte noch nicht die Vorteile des Fuzzy-Konzeptes, das es ermöglicht, empirisches Prozeßwissen und verbal beschreibbare Steuereingriffe in die Prozeßautomatisierung einzubringen. In

dieser Zeit der aufstrebenden Rechnertechnik glaubte man, jedes Problem in den Griff zu bekommen, wenn es nur genau genug beschrieben ist. Was man damals noch nicht wahrhaben wollte, war Zadehs Prinzip der Unvereinbarkeit von hoher Komplexität und Präzision.

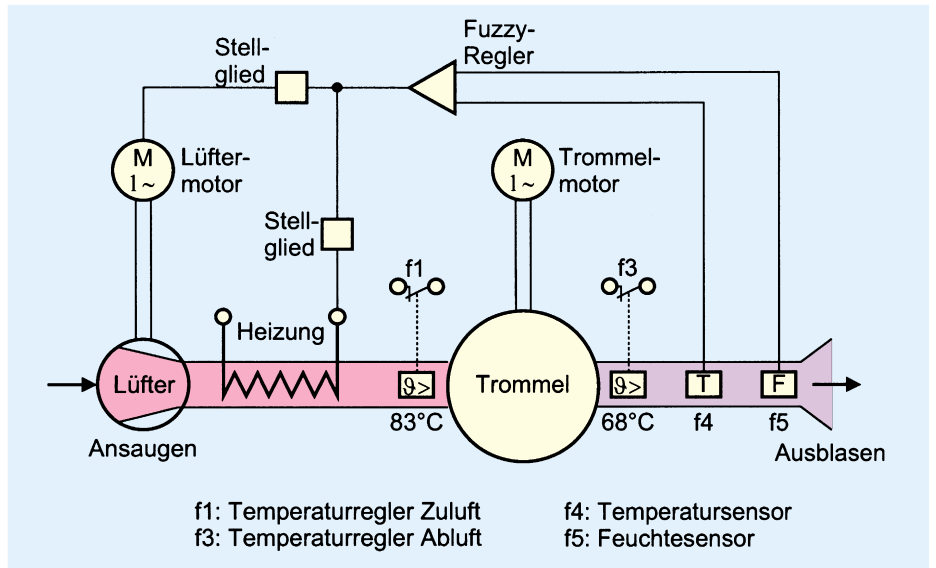
In Japan wurden die Vorteile der Fuzzy-Logik recht schnell erkannt und für eine Vielzahl von Regelungsaufgaben (Fuzzy Control) eingesetzt. Fuzzy Control ist eine Anwendung der Fuzzy-Logik in der Automatisierungstechnik und ergänzt die klassische Regelungstechnik.

**Was ist Fuzzy-Logik?**

Die unscharfe Logik ist eine Form einer mathematischen mehrwertigen Logik, die die Grenzen der starren zweiwertigen Logik 0/1 oder wahr/falsch erweitert und auch Zwischenwerte zuläßt. Dadurch wird es möglich, linguistische Variable, wie „ziemlich falsch“ oder „fast wahr“, durch einen Zahlenwert darzustellen.

Die Fuzzy-Logik beschäftigt sich mit der subjektiven Unbestimmtheit von Begriffen wie „zu hohe Temperatur“, „zu niedriger Druck“ oder „zu geringe Luftfeuchte“ sowie mit der Ableitung von Entscheidungen aufgrund solcher sprachlicher Variablen. Sie erschließt somit die unscharfen Begriffe menschlichen Denkens.

Der Begriff „Fuzzy-Logik“ wird nicht eindeutig benutzt. Man unterscheidet zwischen „Fuzzy-Logik im engeren Sinne“, mit der die genannte mehrwertige Logik gemeint ist. Häufig ist jedoch nur „Fuzzy-Logik im weiteren Sinne“ gemeint, wie sie z. B. beim Fuzzy Control in Erscheinung tritt. Hier werden keine Verfahren der ma-



Prinzipialschaltbild des Wäschetrockners mit Fuzzy-Regler

thematischen mehrwertigen Logik genutzt. Beim Fuzzy Control handelt es sich vielmehr um ein Interpolationsverfahren in einer unscharfen Umgebung.

**Fuzzifizierung**

Für die Verarbeitung linguistischer (sprachlicher) Regeln müssen scharfe Eingangswerte, z. B. physikalische Meßwerte (Temperatur, Druck, Feuchte, Niveau), über eine Zugehörigkeitsfunktion auf unscharfe Mengen abgebildet werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Fuzzifizierung“.

Die Fuzzifizierung erfolgt mit jeder scharfen Eingangsgröße in ein Fuzzy-Modul. Da nach dem Abarbeiten des linguistischen Regelsatzes aus dem Fuzzy-Modul wieder scharfe Ausgangsgrößen, z. B. Stellgröße, ausgegeben werden sollen, ist eine Defuzzifizierung erforderlich.

**Linguistische Regeln**

Kennzeichnend für Fuzzy-Module ist die unmittelbare Verwendung von qualitativ formuliertem Erfahrungswissen in Form von WENN-DANN-Regeln. Das Erfahrungswissen über einen Prozeß wird bei dieser Methode in Regeln der Art „WENN (Vorbedingung), DANN (Schlußfolgerung)“ gefaßt. Die linguistischen Variablen der Vorbedingung sind mit sogenannten Fuzzy-Operatoren miteinander verknüpft.

Beispielsweise werden beim Prototypen des Fachhochschul-Wäschetrockners folgende unscharfe, hier vereinfacht dargestellte, Regeln verwendet:

„Wenn die Temperatur niedrig ist UND die Luftfeuchte hoch ist, DANN soll die Heizung maximal an sein“.

Hierbei werden die linguistischen Va-

riablen „Temperatur niedrig“ und „Luftfeuchte hoch“ durch den Fuzzy-Operator „UND“ miteinander verknüpft. Das Ergebnis der Verknüpfung wird auf die linguistische Variable des „DANN“-Teiles („Heizung maximal an“) übertragen.

Jede Regel des Fuzzy-Moduls wird abgearbeitet und liefert mit ihrem „WENN-Teil“ ein Verknüpfungsergebnis.

WENN-Teil	DANN-Teil
WENN Temperatur niedrig UND Feuchte hoch	DANN Heizung maximal an
ODER	
WENN Temperatur mittel UND Feuchte mittel	DANN Heizung halb an
ODER	
•	
•	
ODER	
WENN Temperatur hoch UND Feuchte niedrig	DANN Heizung aus

Das Ergebnis des „WENN-Teiles“ der Regel bezieht sich auf die linguistische Variable des „DANN-Teiles“ der Regel und somit auf die Ausgangs-Zugehörigkeitsfunktion. Es wird somit ein Wahrheitswert für die Schlußfolgerung jeder Regel ermittelt. Ergibt sich als Verknüpfungsergebnis des „WENN-Teiles“ einer Regel z. B. der Wert 1, so sagt dieser Zahlenwert aus, daß die Regelschlußfolgerung zu 100 % zutrifft. Ist das Verknüpfungsergebnis des „WENN-Teiles“ einer Regel z. B. 0,2, so sagt dieser Zahlenwert aus, daß die Regel-Schlußfolgerung zu 20 % zutrifft. Die Abarbeitung der WENN-DANN-Regeln wird als Inferenz bezeichnet. **ELV**

**Autoren**

Tilo Könnecke, Detlef Puchert, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel



Hardware-Realisation des Fuzzy-Reglers am Beispiel des Fachhochschul-Wäschetrockners