

V Fuzzy Logik

V.1 Die Grundbegriffe

Hinter der leider etwas irreführenden Bezeichnung (fuzzy = unscharf, verschwommen) verbirgt sich eine geniale Mischung aus Analogtechnik, Logik und wissensbasiertem System. Unscharf oder gar zufällig ist Fuzzy Logik in keinerlei Weise. Vielmehr arbeitet sie nach genau vorgegeben Regeln und liefert ein völlig determiniertes Ergebnis. Fuzzy Logik eignet sich ganz hervorragend für Steuerungen und Regelungen aller Art. Diese praktische Anwendung von Fuzzy Logik wird Fuzzy Control (=Regelung) genannt. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, daß man sehr schnell zu einer gut funktionierenden Lösung kommt. Vor allem ist es sehr einfach, praktische Erfahrung als Verhaltensregeln in das System einzubringen. Änderungen und Anpassungen sind jederzeit in einfacher Weise möglich.

Die Kehrseite der Medaille sieht so aus, daß man immer einen Signalprozessor einsetzen muß. Spezielle Fuzzy-Prozessoren wurden von der Weiterentwicklung von Microcontrollern etc. überholt. Nachdem die Hardware heute in der Regel nicht die Hauptkosten eines Systems verursacht und der Prozessor auch andere Aufgaben durchführen kann, gleicht der Vorteil einer kürzeren Entwicklungszeit den kleinen Mehraufwand mehr als aus.

Jede Fuzzy Regelung arbeitet so, daß andauernd in rascher Folge 3 Arbeitsschritte durchlaufen werden:

Im ersten Schritt, der **Fuzzifizierung**, werden alle Eingangswerte des Sy-

stems anhand der zugehörigen Klassenschemata in Wahrheitsgrade ("Belief") umgesetzt. Die Wahrheitsgrade mit Werten zwischen 0 und 1 ersetzen die analogen Eingangswerte herkömmlicher Regler.

Im zweiten Schritt kommt die eigentliche Fuzzy Logik in Gestalt der **logischen Inferenzen** zum Zug. Sie verknüpfen die Wahrheitsgrade mit UND- und ODER-Operatoren wie die digitalen Logik. Die Ergebnisse sind aber keine Ja/Nein Entscheidungen sondern wiederum Wahrheitsgrade, diesmal aber für die Aktivitäten der Stellglieder des Systems.

Im dritten Schritt, der **Defuzzifizierung**, werden für jedes Stellglied des Systems die von allen Inferenzen gelieferten Wahrheitsgrade zusammengefaßt und in die Stellgröße umgesetzt. Dies geschieht nach einem Gewichtungsverfahren, bei dem die Ergebnisse aller logischen Inferenzen zum Endresultat beitragen.

Die große Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Fuzzy Reglern beruht vor allem auf der Verknüpfung der Wahrheitsgrade der Eingangsgrößen durch die logischen Inferenzen und die demokratische Auswertung der Ergebnisse. Sie gestatten es in einfacher Weise, beliebig geformte Regelkennlinien stückweise mit weichen Übergängen zusammensetzen. Auch praktische Erfahrungen lassen sich sehr einfach durch logische Inferenzen ausdrücken. So kann in einem Fuzzy Regler ein regelrechtes Expertensystem enthalten sein. Probleme in bestimmten Situationen

können sofort durch neue logische Inferenzen berücksichtigt werden. Auch eine Veränderung der Kennlinien der Fuzzyfizierung kann durchgeführt werden. Beispielsweise kann man das Einschwingen eines Reglers erst kurz vor Erreichen des Sollwerts stark abbremsern, um rasches Einschwingen ohne Überschwingen zu erhalten.

V.2 Die Fuzzyfizierung

Die Fuzzyfizierung der Eingangsgrößen erfolgt für jede einzelne Eingangsgröße mit einem Klassenschema. Darin sind die Wahrheitsgrade der einzelnen Klassen in Abhängigkeit von der Eingangsgröße aufgetragen. Abb. 5-1 zeigt ein Klassenschema für eine Temperatur als Eingangsgröße. Wenn diese ihren Wertebereich durchläuft, nehmen der Reihe nach die einzelnen Klassen einen Wahrheitsgrad zwischen 0 und 1 an. Die Einteilung ist dabei so, daß für jeden Wert der Eingangsgröße die Summe aller Wahrheitsgrade = 1 ist. Mit den heute üblichen 8-Bit Prozessoren stellt man die Wahrheitsgrade von 0 bis 1 durch die Binärzahlen 0

bis 255 dar. Diese Auflösung reicht erfahrungsgemäß vollkommen aus.

Der gestrichelt gezeichnete Wert der Temperatur als Eingangsgröße in Abb. 5-1 ergibt bei der Fuzzyfizierung für die Klasse "tief" den Wahrheitsgrad 0,8, die Klasse "normal" den Wahrheitsgrad 0,2 und alle anderen Klassen den Wahrheitsgrad 0.

Möchte man beispielsweise die Temperatur besonders genau auf "normal" einregeln, so kann man die Klassengrenzen schmaler machen und so die Regelverstärkung erhöhen.

Im Klassenschema in Abb. 5-2 für die Temperaturänderung erhält die Eingangsgröße für die Klasse "steigt" den Wahrheitsgrad 0,75 und die Klasse "steigt rasch" den Wahrheitsgrad 0,25. In dieser Weise werden alle Eingangsgrößen anhand ihrer Klassenschemata in Wahrheitsgrade umgesetzt. Die ziemlich grobe Einteilung in Klassen erlaubt auch den Einsatz relativ ungenauer bzw. wenig auflösen-

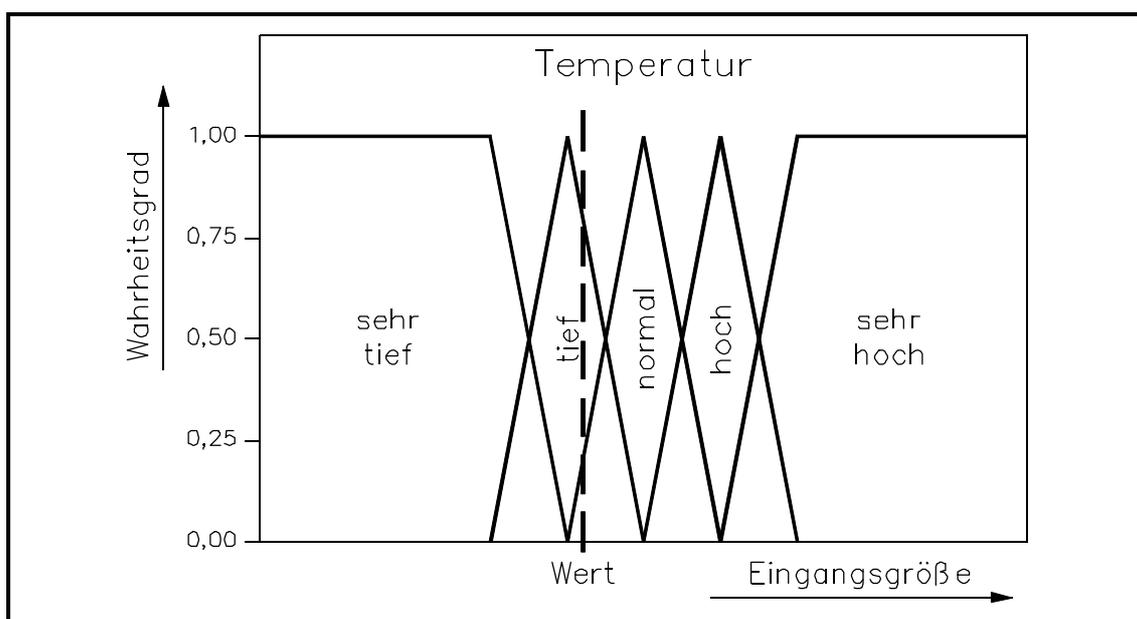


Abb. 5-1: Klassenschema der Temperatur

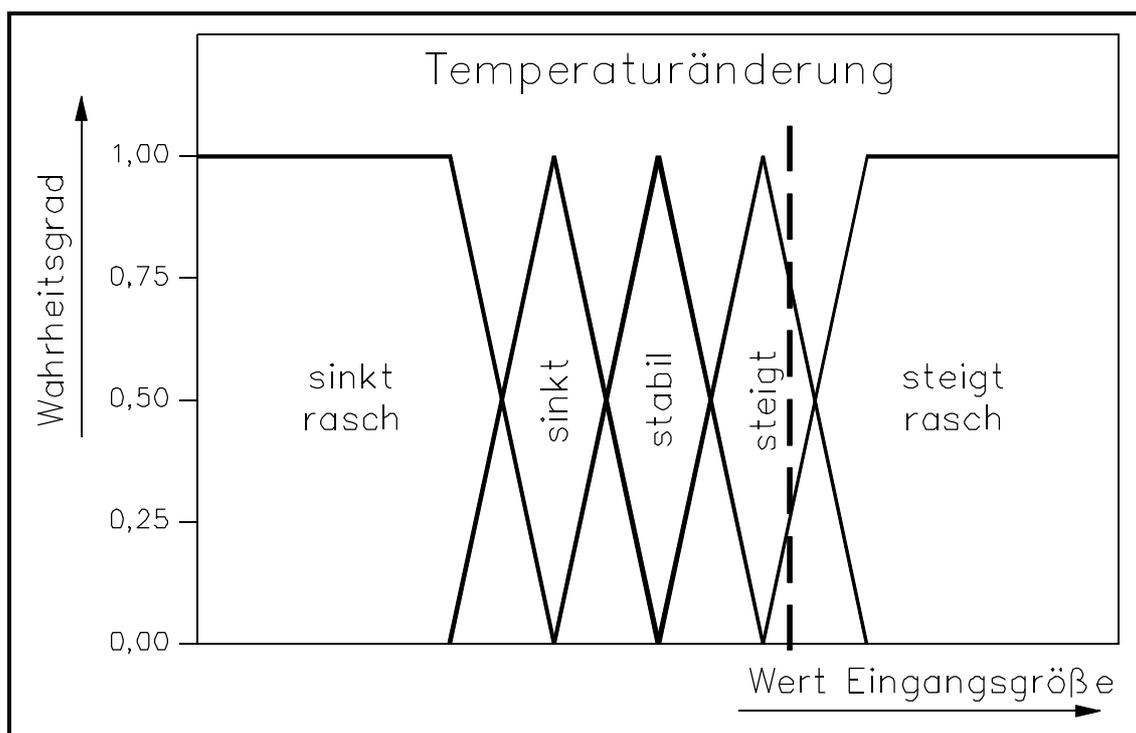


Abb. 5-2: Klassenschema der Temperaturänderung

der Sensoren.

V.3 Die logischen Inferenzen

Die logischen Inferenzen weisen aufgrund der Wahrheitsgrade der Klassen der Eingangsgrößen den Klassen der Ausgangsgrößen Wahrheitsgrade zu. So wird festgelegt, welchen Klassen der Stellorgane welche Wahrheitsgrade zugewiesen werden. Nehmen wir eine Temperaturregelung mit den 2 Eingangsgrößen Temperatur T und Temperaturänderung Δ

(Schemata in Abb. 5-1 und 5-2) und der Ausgangsgröße Ventil V an.

Die logischen Inferenzen könnten beispielsweise folgendermaßen aussehen. Dabei ist hinter jede Klasse in Klammern ihr Wahrheitsgehalt gemäß den Abbildungen 5-1 und 5-2 geschrieben:

Die ersten 5 Inferenzen würden einen einfachen P-Regler ergeben. Die Stärke von Fuzzy Logik liegt aber in

Logische Inferenzen eines Temperaturreglers

- 1: WENN T sehr hoch (0) DANN V zu (0)
- 2: WENN T hoch (0) DANN V wenig auf (0)
- 3: WENN T normal (0,2) DANN V halb auf (0,2)
- 4: WENN T tief (0,8) DANN V weit auf (0,8)
- 5: WENN T sehr tief (0) DANN V ganz auf (0)

Inferenzen mit Einbeziehung der T -Änderung

- 6: WENN T normal (0,2) UND T steigt rasch (0,25) DANN V zu (0,2)
- 7: WENN T normal (0,2) UND T steigt (0,75) DANN V wenig auf (0,2)
- 8: WENN T hoch (0) UND T sinkt (0) DANN V halb auf (0)
- 9: WENN T hoch (0) UND T sinkt rasch (0) DANN V weit auf (0)

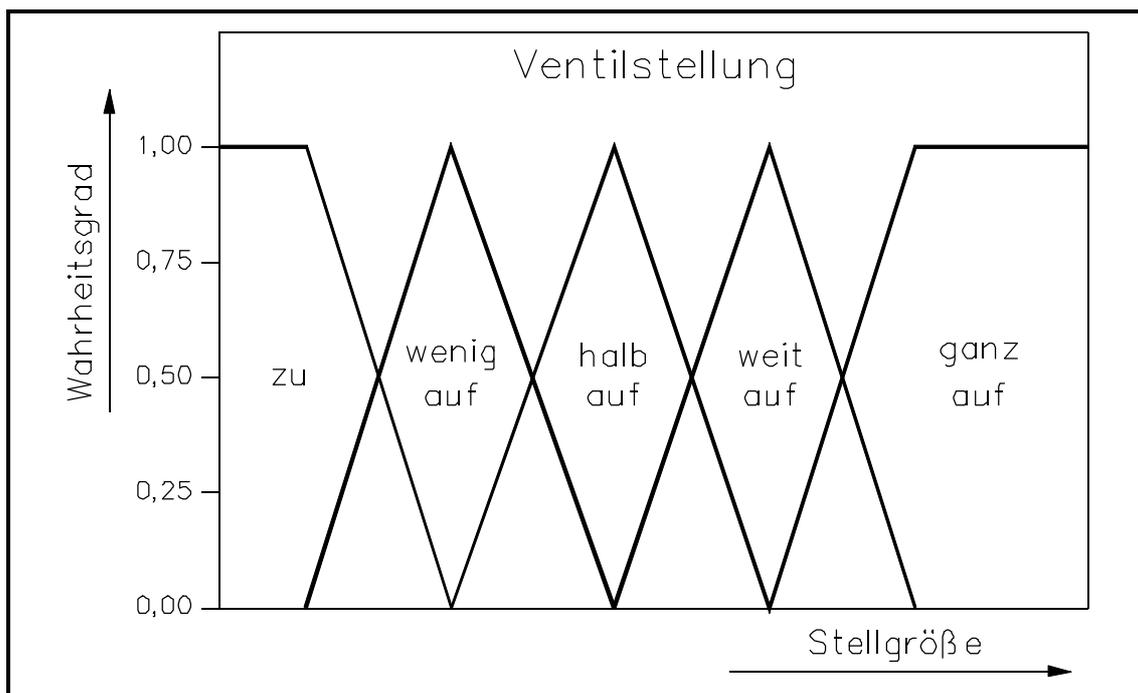


Abb. 5-3: Klassenschema der Ventilstellung

den logischen Inferenzen. Beim Fuzzy-UND wird der kleinste der beteiligten Wahrheitsgrade genommen, beim ODER der größte. Die Inferenzen 6-8 enthalten logische Operationen:

gen anpassen, die sich in zusätzlichen Inferenzen niederschlagen. Auf diese Weise kann man allen möglichen Eingangszuständen je eine Ventilstellung zuordnen.

Die Einbeziehung der Temperaturänderung entspricht einem D-Anteil. Man kann damit den Fuzzy-Regler ganz gezielt an praktische Erfahrung-

Trägt man die Klassen der Temperatur und der T-Änderung in eine Matrix (Tab. 1) ein, so ergibt sich eine sehr übersichtliche Darstellung aller Kom-

Temperatur	sinkt rasch	sinkt	stabil	steigt (0,75)	steigt rasch (0,25)
sehr tief	ganz auf	ganz auf	ganz auf	weit auf	halb auf
tief (0,8)	ganz auf	weit auf	weit auf	halb auf (0,75)	wenig auf (0,25)
normal (0,2)	ganz auf	weit auf	halb auf	wenig auf (0,2)	zu (0,2)
hoch	weit auf	halb auf	wenig auf	wenig auf	zu

Tab. 1: Matrix der logischen Inferenzen mit Wahrheitsgraden

Klasse	zu	wenig auf	halb auf	weit auf	ganz auf
Summe d. Wahrh.-grade	0,2	0,45	0,75		
Normierte Summe	0,143	0,321	0,536		

Tab. 2: Wahrheitsgrade der Klassen der Ventilstellung

binationen der beiden. Den in der Matrix angegebenen Ventilstellungen entsprechen 25 kombinierte Inferenzen.

V.4 Die Defuzzyfizierung

Die Defuzzyfizierung benutzt wieder Klassenschemata, die denen für die Fuzzyfizierung völlig gleichen. Die Defuzzyfizierung geschieht in folgenden Etappen:

- Für alle logischen Inferenzen werden aus den Wahrheitsgraden der Eingangsgrößen die Wahrheitsgrade für die Ventilstellung errechnet.
- Die Resultate für die jeweils gleiche Ventilstellung werden summiert.
- Die Summe aller resultierenden Wahrheitsgrade wird auf 1 normiert.
- Die Größe der Flächen im Klassenschema des Ventils wird entspre-

chend dem Wahrheitsgrad der Klasse verkleinert.

e) Der Schwerpunkt der resultierenden Flächenstücke wird ermittelt, seine Abszisse ist die resultierende Stellung des Ventils.

Man kann sich die Defuzzyfizierung anschaulich so vorstellen, daß jedes Flächenstück des Schemas mit dem Wahrheitsgrad seiner Klasse gewichtet und der resultierende Schwerpunkt der ganzen Anordnung ermittelt wird.

Tabelle 1 zeigt die Matrix der logischen Inferenzen mit den resultierenden Wahrheitsgraden. Alle Klassen ohne Zahlenangabe haben den Wahrheitsgrad 0. Die Summen sind in Tabelle 2 summiert und in der nor-

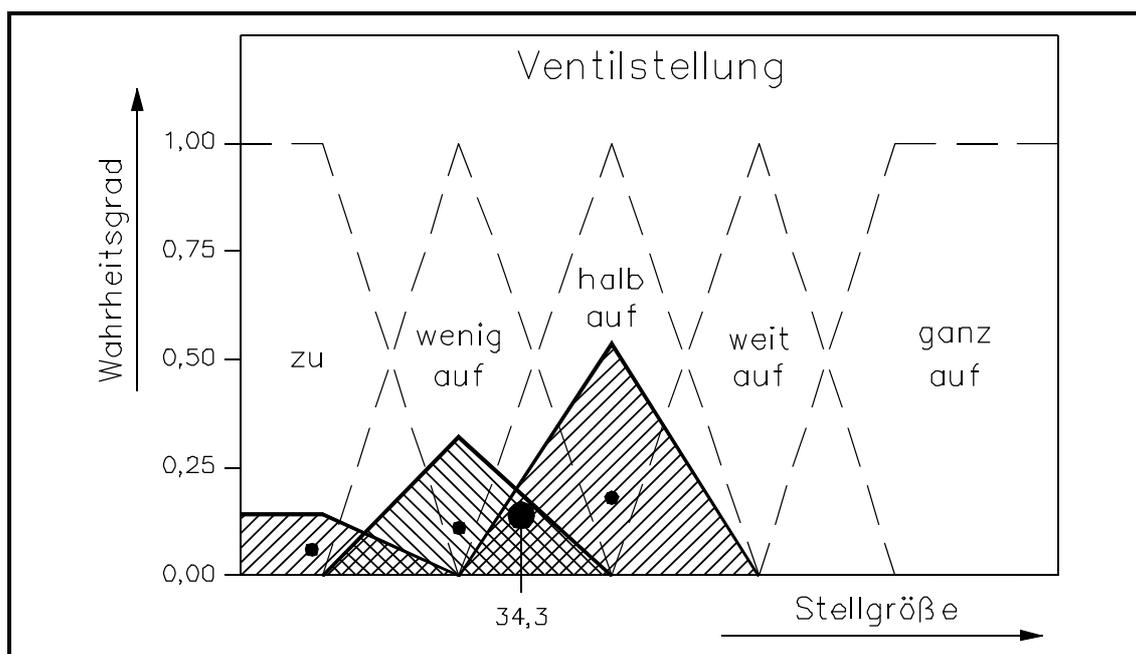


Abb. 5-4: Defuzzyfizierung der Ventilstellung

mierten Summe auf 1 normiert. Abb 5-4 zeigt das Klassenschema der Ventilstellungen mit den in der Höhe eingestellten Klassen. Der Gesamtschwerpunkt ist groß markiert. Seine Abszisse ist die Stellung des Ventils, die aus den Eingangsgrößen und den logischen Inferenzen von Abb. 5-3 resultiert. Die Stellung beträgt 34,3% der X-Achse. Man sieht, daß dies Ergebnis in vollkommen determinierter Weise erhalten wird und sich kontinuierlich verändern kann.

Einander widersprechende Resultate einzelner logischer Inferenzen machen keine Probleme, da jedes bei der Schwerpunktbildung mit seinem Gewicht beiträgt. Natürlich schwächen sich einander widersprechende Ergebnisse gegenseitig ab. Die Entscheidung wird dann durch die anderen Inferenzen getroffen.

Man kann sich regelrecht bildlich vorstellen, wie bei steigender Temperatur die Wahrheitsgrade der oberen Klassen anwachsen und den Gesamtschwerpunkt nach rechts drücken.

Eine wichtige praktische Erfahrung beim Einsatz von Fuzzy Reglern besagt, daß es äußerst wichtig ist, allen möglichen Kombinationen der Eingangsgrößen mindestens eine von 0 verschiedene Klasse im Klassenschema der Defuzzyfizierung zuzuordnen. Die Matrix der logischen Inferenzen muß also völlig besetzt sein. Damit wird gewährleistet, daß die Regelung immer irgendeinen definierten Ausgangszustand einnimmt. Aus der klassischen Regelungstechnik ist so ein Verhalten als "toter Bereich" oder "Lose" ebenfalls als ungünstig bekannt.

Die Stärke von Fuzzy-Logik liegt darin, daß sie in sehr anschaulicher Weise das Zustandekommen der Ausgangsgröße nachvollziehbar macht und daß man jederzeit durch zusätzliche logische Inferenzen das Verhalten korrigieren kann. So fließen praktische Erfahrungen aus dem Betrieb einer Anlage in einfacher und mit Worten ausdrückbarer Weise in das Regelverhalten ein.

Wie jeder andere Regler auch, ordnet ein Fuzzy-Regler den Eingangszuständen Werte der Ausgangsgröße(n) zu. Der wesentliche Vorteil liegt in der Übersichtlichkeit der Programmierung und in der einfachen Korrektur und Änderung von Regeleigenschaften.

V.5 Neuronale Netze

Neuronale Netze arbeiten nach einem Prinzip, das man in den Gehirnen von Lebewesen gefunden hat. Alle Ausgangswerte entstehen als gewichtete Summe der Eingangswerte. Die Funktion des Netzes wird durch die Gewichte (=Faktoren) festgelegt.

Zur Ermittlung der Gewichte wird das Netz anhand sehr vieler Kombinationen von Eingangswerten und den gewünschten Ausgangswerten trainiert. Dabei erhalten die Gewichte die Werte, welche für die Funktion nötig sind. Auch neuronale Netze können mit ungenauen Eingangswerten auskommen. Sie werden heute zur Erkennung von Handschrift (Postleitzahlen), Spracherkennung etc. eingesetzt.