

8 Fuzzyanwendungen in der Praxis

Fuzzyanwendungen haben sich zu einem großen Wirtschaftszweig entwickelt. Man schätzt, dass allein in Japan ungefähr eine halbe Milliarde Dollar jährlich für Forschung und Entwicklung von Fuzzysystemen ausgegeben werden. Und derartige Investitionen lohnen sich: Die Einnahmen an Fuzzyprodukten beträgt inzwischen jährlich mehrere Milliarden Dollar.

8.1 Fuzzyanwendungen im Überblick

Einige kommerzielle Anwendungen sollen nun kurz vorgestellt werden. Die Liste ist bei weitem nicht vollständig; sie soll vielmehr das breite Spektrum von Fuzzyanwendungen deutlich machen.

Zementöfen	Hier wird die Zufuhr von Kohlenstaub und Luft so wie der Verbrennungsgrad geregelt. Eingangsröße sind Temperaturen in verschiedenen Bereichen des Ofens, der Sauerstoffgehalt des Ausstoßgases, die Zementqualität in Form der Dichte, die Menge des bewegten Materials, der Kalkgehalt des Zements. Zunächst wurden 75 Regeln formuliert; diese Anzahl wurde dann aber durch einen Optimierungsprozess reduziert. Mit herkömmlichen Mitteln ist die automatische Regelung eines Zementofens bislang noch nicht gelungen.
Spiegelreflex-Kameras	Fuzzy kontrolliert hier die Hauptobjektbestimmung für den Autofocus, das Expertenprogramm (welches eine für die fotografische Szene günstige Kombination aus Blendenwert und Belichtungszeit berechnet) sowie die Zoomeinstellung im "Image-Size-Lock-Modus" (bei dem die Brennweite kontinuierlich so verändert wird, dass das Hauptobjekt seine Größe beibehält, auch wenn es sich relativ zur Kamera bewegt). Die Eingangswerte liefern die Objektiveneinstellung und Sensoren für Lage, Belichtung, Entfernung sowie Bewegung des Objekts.
Fernsehgeräte	Inzwischen gibt es auch Fernsehgeräte, die mit Hilfe von Fuzzy automatisch Kontrast, Helligkeit, Schärfe und Farbe anpassen.
U-Bahn	In der japanischen Stadt Sendai ist eine vollständig automatisierte U-Bahn in Betrieb. Durch die Fuzzyregelung soll die Bahn nicht nur schneller und kostengünstiger, sondern auch in ihrem Fahrverhalten angenehmer für den Fahrgast sein: Weiches Bremsen und Beschleunigen, präzises Anhalten, das sind eben keine schwierigen Aufgaben für Fuzzy.
Waschmaschinen	Die erforderliche Wassermenge und die benötigte Waschzeit hängen von der Art und der Menge der Wäsche sowie dem Grad ihrer Verschmutzung ab. Diese Parameter können über die Saugfähigkeit und die Trübung des Wassers beim Wassereinlass durch Sensoren erfasst werden. Daraus ermittelt das Fuzzyprogramm die erforderliche Wassermenge sowie die Anzahl und die Dauer der einzelnen Waschzyklen, wie sie für einen optimalen Waschvorgang benötigt werden. Die Steuerung selbst ist mit einem Neuronalen Netz ausgestattet und wird damit noch besser auf die Gewohnheiten des Haushaltes abgestimmt. Außerdem wird auch der Schleudervorgang von Fuzzy geregelt.
Autos	Zahlreiche Fahrzeuge besitzen Antiblockiersysteme und automatische Schaltungen, die mit Fuzzy arbeiten.

Staubsauger	Als Eingänge dienen hier der Luftdruck (sehr niedrig, niedrig, mittel, hoch, sehr hoch), die Schmutzmenge (niedrig, mittel niedrig, mittel, mittel hoch, hoch) und die Bodenbeschaffenheit (glatt, mittel, rauh). Als Ausgänge dienen die Saugleistung, Höhe und Geschwindigkeit der Klopfbürste, und jeweils eine Anzeige für Sauberkeit und Staubbeutelwechsel.
Müllverbrennung	Fuzzyregelungen werden auch in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt. Eines der Probleme besteht darin, dass der Brennwert des Abfalls starken Schwankungen unterliegt. Dies führt zu erheblichen Unregelmäßigkeiten bei der Dampferzeugung. In Mannheim konnte z.B. durch den Einsatz einer Fuzzyregelung die Schwankungen bei der Dampferzeugung von ungefähr 30 % auf 3 % reduziert werden. Außerdem konnte die Brenntemperatur stabiler gehalten und der Ausstoß von NO _x , SO ₂ und CO vermindert werden.
Texterkennung	Viele Scanner werden auch zur automatischen Texterfassung benutzt. Die meisten Notepads können handschriftliche Eingaben erkennen. Manche der dazu erforderlichen Programme arbeiten ebenfalls auf der Grundlage von Fuzzymengen.
Finanzprogramme	Fuzzy wird ebenfalls im Finanzbereich eingesetzt. So gibt es Programme, die die Entwicklung von Wertpapieren oder die Kreditwürdigkeit von Kunden einschätzen sollen.

8.2 Antipendelregelung bei Kränen

In den vorangehenden Kapiteln hatten wir schon die Fuzzyregelung einer Laufkatze eingehend studiert. Tatsächlich werden derartige Regelungen in der Praxis schon seit mehreren Jahren eingesetzt. Versuche, auf konventionellem Wege Antipendelregelungen zu entwickeln, hatten sich als unwirtschaftlich erwiesen. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass klassische Regler auf ein Modell des zu regelnden Systems zurückgreifen müssen. Die Modellierung eines Kransystems ist aber recht komplex, und die Entwicklung eines entsprechenden Regelungssystems ist sehr aufwendig.¹



8.1 64-Tonnen-Kran mit Fuzzyregelung

Interessanterweise können Kranführer derartige Systeme manuell recht gut bedienen. Deren Expertenwissen wurde nun zur Entwicklung von Fuzzy-Antipendelregelungen ausgenutzt. Für verschiedene Krantypen entstanden so Fuzzyregelungen: für Containerkräne in Häfen, für Stahlpfannenkräne und für Kräne in Fertigungsbetrieben. So wurde in Deutschland von der Firma Inform ein 64-Tonnen-Kran mit einer Fuzzyregelung versehen. Er transportiert die Lasten jetzt um 20% schneller.

Außerdem wurde bei diesem Kran dadurch die Sicherheit erhöht: Die Kranbediener müssen parallel zum Kran mitgehen und diesen über eine Fernbedienung steuern. Vor dem Einbau der Fuzzyregelung mussten sie die Last ständig im Auge behalten, um deren Auslenkung zu kontrollieren. Dabei stolperten sie häufig über am Boden liegende Teile. Derartige Unfälle gibt es seit dem Einbau

¹Man beachte, dass zur Simulation der Laufkatze im Programm *Fuzzy* auch ein Modell erforderlich ist. Hier wird aber nur ein stark vereinfachtes Kranmodell benutzt. So wird z.B. mit einem starren Stab als Verbindung zwischen Laufkatze und Last gearbeitet und nicht mit flexiblen Kabeln wie bei einem realen Kran.

der Fuzzyregelung nicht mehr. Dass die Kranbediener die Fuzzyregelung akzeptieren und ihr vertrauen, zeigt sich auch darin, dass sie nach Inbetriebnahme im Frühjahr 1995 ständig von den Kranbedienern verwendet worden ist. Auch in dieser Hinsicht hat sich die Fuzzyregelung als erfolgreich erwiesen.

Wenn Sie diesen Kran einmal in Aktion beobachten wollen, schauen Sie sich das Video `kran.avi` an. Sie können es aus dem `Fuzzy`-Programm mit `Experiment|Videos` starten. Die Last hängt bei der Kranfahrt nahezu pendelfrei, und man kann kaum erahnen, dass es sich hier um ein kompliziertes Regelungsproblem handelt. Allenfalls ein wild hin und her schaukelndes Kabel im Hintergrund deutet dies an. Antipendelregelungen in dieser Qualität kommen jedoch nicht mit zwei Eingängen aus. Im Fall des 64-Tonnen-Krans wurden etwa 10 Eingänge, 2 Ausgänge und 75 Regeln benutzt.

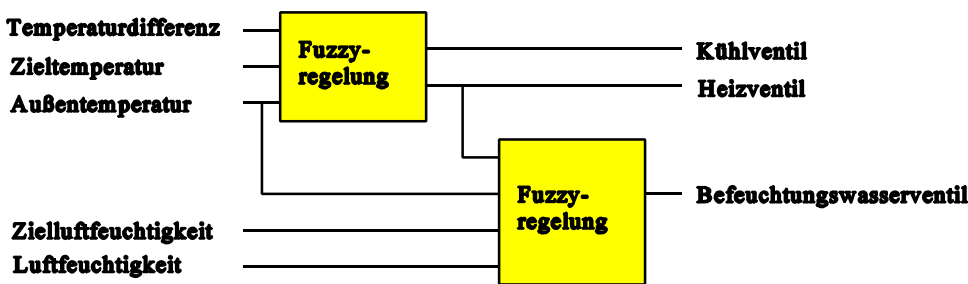
8.3 Klimaanlagen

Klimaanlagen stellen ein reiches Betätigungsfeld für die Entwickler von Fuzzyregelungen dar. Das Spektrum reicht von kleinen mobilen Geräten bis zu großen Anlagen, die einen ganzen Gebäudekomplex umfassen. Eines der Hauptziele dabei ist, die Energiekosten zu reduzieren. In der Tat lassen sich durch Fuzzyregelungen erstaunlich hohe Einsparungen erzielen. So wird von einem Krankenhaus berichtet, das durch die Installation einer Fuzzyregelung seine Ausgaben für Energie um mehr als 25% senken konnte; das entsprachen immerhin 50 000 \$.

Wie arbeitet nun eine solche Fuzzyregelung? Zunächst erhält sie über Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren Daten über das aktuelle Klima. Diese werden von dem Regelungssystem in Abb. 8.2 verarbeitet. Es handelt sich dabei um zwei kaskadenartig angeordnete Regelblöcke. Der eine ist für die Temperatur, der andere für die Feuchtigkeit zuständig. Die Aufteilung in zwei Blöcke macht die Regelung insgesamt übersichtlicher und erleichtert auch deren Entwicklung und Wartung. Allerdings ist es auch gar nicht sinnvoll, zwei vollständig getrennte Blöcke zu benutzen. Man weiß nämlich, dass die relative Luftfeuchtigkeit sinkt, wenn die Temperatur zunimmt. Wird nun vom Temperaturregelblock das Heizwasserventil geöffnet, wird diese Information direkt an den Regelblock für die Feuchtigkeit weitergereicht. Dieser kann unmittelbar darauf reagieren und muss nicht erst warten, bis seine Sensoren eine Veränderung der Luftfeuchtigkeit registrieren. Dies verbessert natürlich die Qualität der Regelung.

8.4 Die Vorteile von Fuzzyregelungen

Bei konventionellen Regelungen wird zunächst versucht, ein vereinfachtes (lineares) Modell des Systems zu entwickeln, aus dem dann ein Algorithmus für die Regelung entwickelt werden kann. Dieser Algorithmus wird in eine Programmiersprache umgesetzt und schließlich am realen System getestet. Derartige Tests sind von entscheidender Bedeutung: Es ist ja nicht von vorne herein



8.2 Fuzzyregelung einer Klimaanlage

gesichert, dass die für ein vereinfachtes Modell entworfene Regelung auch für das komplexe reale System geeignet ist. Sollte ein solcher Test nun negativ ausfallen, müssen sowohl das zugrundeliegende Modell verbessert als auch der Algorithmus angepasst werden – mitsamt seiner Umsetzung in die Programmiersprache. Anschließend erfolgt ein erneuter Test, an den sich weitere derartige Zyklen für Korrektur und Feinabstimmung anschließen können.

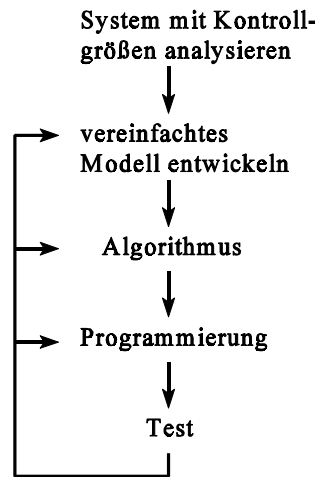
Die Entwicklung einer Fuzzyregelung erfolgt auch zyklisch (Abb. 8.4). Allerdings ist es nicht erforderlich, sich auf ein vereinfachtes Modell zu stützen; vielmehr greift man direkt auf Expertenwissen über das reale System zurück und gibt es in Form von Fuzzymengen und Regeln einer Fuzzyentwicklungsumgebung ein. Auf diese Weise werden einige zeitraubende Schritte bei der Entwicklung und auch bei der Korrektur eingespart. Fuzzy verkürzt also den Entwicklungszyklus.

Mit Fuzzy können komplexe Regelungssysteme durch sprachlich formulierte Regeln beschrieben werden. Dies ist natürlich einfacher als eine modellhafte Erfassung der Systeme, etwa durch Differenzialgleichungen. Auch werden keinerlei Kenntnisse in einer Programmiersprache benötigt. Fuzzy vereinfacht also die Entwicklung eines Regelungssystems.

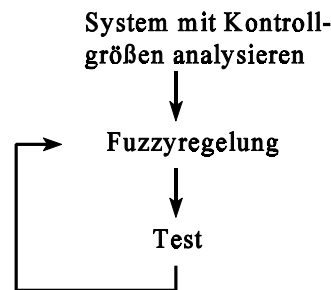
Diese Vereinfachung hat mehrere Konsequenzen. Zunächst einmal verkürzt sie die Entwicklungszeit: Diese wird nämlich bestimmt von der Anzahl der durchzuführenden Schritte einerseits und von deren Komplexität andererseits. In beiderlei Hinsicht zeigt Fuzzy sich aber gegenüber konventionellen Regelungssystemen überlegen.

Die Vereinfachung macht die Regelung aber auch sicherer. Dies mag auf den ersten Blick verwundern; der folgende Bericht wird es aber deutlich machen. Er stammt von D. Michie und R. Johnston und ist ihrem Buch "Der kreative Computer" entnommen.

"Am 28. März 1979, wenige Sekunden nach vier Uhr früh, gab es im Kontrollraum II des Kernkraftwerks Three Mile Island Alarm. Die diensthabenden Techniker blieben zunächst gelassen, denn kleine Störungen waren nichts Ungewöhnliches. Nach einigen Minuten jedoch war ihnen klar, dass es sich dieses Mal um alles Andere als um eine geringfügige Störung handelte. Ein winziges Ventil eines Druckluftsystems hatte geklemmt, der Versager führte zur Abschaltung des sekundären Kühlwasserkreislaufts. Innerhalb von Sekunden erhitzte sich der Urkern des Reaktors, und alle Bemühungen der Ingenieure zum Trotz wurde die Situation immer prekärer. Ein Überdruckventil gab nach, radioaktives Wasser und Dampf strömten ins Reaktorgebäude und von dort aus in die Atmosphäre. Im oberen Teil der Reaktorhülle sammelte sich eine Wasserstoffblase, die jeden Augenblick zu explodieren drohte. Und die Möglichkeit, dass der Urkern zu schmelzen begann, war nicht mehr auszuschließen. In beiden Fällen wäre Pennsylvania radioaktiv verseucht worden.



8.3 Entwicklung einer konventionellen Regelung



8.4 Entwicklung einer Regelung mit Fuzzy

Unter den Augen einer entsetzten Weltöffentlichkeit versuchten die Ingenieure und hinzugezogene Fachleute der Nuclear Regulatory Commission in den darauffolgenden Tagen, den Reaktor wieder unter Kontrolle zu bringen. Pennsylvanias Gouverneur, Richard Thornburgh, ordnete die Evakuierung von Kindern und schwangeren Frauen an, und zahlreiche Menschen flüchteten aus eigenem Entschluss.“

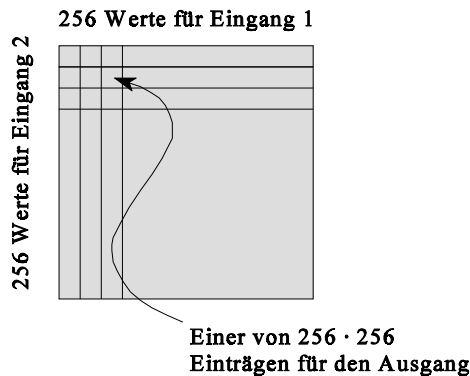
Wie konnte es dazu kommen, dass aus einem eigentlich lösbaren Problem beinahe eine Katastrophe geworden wäre? Die Untersuchungskommission stellte damals fest: “Der gravierendste Umstand, der aus diesem Zwischenfall einen ernststen Unfall machte, war das unangemessene Handeln des technischen Personals“. In der Tat hatte sich herausgestellt, dass Pumpen ein- und ausgeschaltet, Ventile periodisch geöffnet und geschlossen worden waren und selbst der amtliche Reaktorprüfer, Jame Higgins, zugegeben hatte, absolut nicht in der Lage gewesen zu sein, die Vorgänge zu überblicken.

Das war allerdings auch kein Wunder, denn allein in den ersten Minuten gingen 100 bis 200 Alarm-signale ein, und auch später wurde der Kontrollingenieur dermaßen mit Anzeigen, Warnlampen und Ausdrucken eingedeckt, dass er den Fehler und damit auch eine geeignete Gegenmaßnahme nicht finden konnte.

Die Kommission kam zu dem Schluss, dass als Ursache für den Unfall “die mangelnde Berücksichtigung des Faktors Mensch bei der Reaktorsicherheit“ anzusehen sei. Ein Mensch kann einfach nicht in kürzester Zeit Hunderte von Signalen verarbeiten. Und damit wird ein Problem deutlich, dem bislang viel zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden ist: Will man die Kontrolle über ein System behalten, muss man es so gestalten, dass es mitsamt seinen Reaktionen für den Menschen verständlich bleibt. Dabei reicht es nicht aus, die Signale so aufzubereiten, dass sie für den Menschen überschaubar bleiben. Vielmehr ist es erforderlich, auch die Denkweise des Menschen als Benutzer und Überwacher dieses Systems zu berücksichtigen.

Gerade bei zunehmender Komplexität der Systeme ist es wichtig, verstärkten Wert auf eine am Menschen – und nicht so sehr an der Maschine – orientierten Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu legen. Die Fuzzyregelung ist schon von ihrem Prinzip her stark an menschliches Denken angelehnt. Wir haben gesehen, wie dies die Konstruktion von Regelungssystemen erleichtern kann. Nunmehr wird deutlich, dass wir bei Systemen, die mit einem solchen Konzept geregelt werden, auch weniger in Gefahr sind, die Kontrolle zu verlieren. Fuzzy kann daher nicht nur eine Erleichterung, sondern auch eine höhere Sicherheit beim Umgang mit komplexen Systemen bedeuten.

Eines der wichtigsten Argumente für den Hersteller und für den Anwender dürfte aber sein, dass Fuzzy kostengünstig ist. Das ist nicht allein auf die geringen Entwicklungszeiten zurückzuführen. Auch die Kosten für Hardware (genauer: für den benötigten Speicherplatz) sind niedrig. Für die Realisierung einer Fuzzyregelung mit zwei Eingängen und einem Ausgang sind nur wenige Zeilen Quelltext erforderlich (vgl. Anhang). Das Compilat benötigt zusammen mit den Daten für das Fuzzyprojekt höchstens 1 KB Speicherplatz. Würde man die von der Fuzzyregelung berechneten Ausgangswerte durch eine Tabelle erfassen – ein Weg, der gerade bei nichtlinearen Regelungen häufig beschritten wird, wäre der dafür benötigte Speicherplatz um ein Vielfaches größer. Wenn wir für jede der beiden Eingangsgrößen sowie für die Ausgangsgröße 1 Byte reservieren, würde diese Tabelle 64 KByte in Anspruch nehmen (Abb. 8.5). Abge-



8.5 Da jeder Ausgangswert 256 Bit beansprucht, besitzt die Tabelle 256·256·256 Bit = 26 KByte.

sehen davon wäre der Entwicklungsaufwand für eine solche Tabelle enorm – es sei denn, man lässt sie von einer Fuzzyregelung erzeugen (was in der Tat schon praktiziert wurde).

Genauso wichtig für den Anwender ist sicherlich, dass Fuzzyregelungen oft effektiver arbeiten als konventionelle. Viele praktische Beispiele belegen dies eindrucksvoll. 25% Energieeinsparung bei einer Klimaanlage eines großen Krankenhauses oder 10% Energieeinsparung bei einem U-Bahn-system sind schon eine enorme Leistung.

Worin liegen nun aber die Gründe für diese Überlegenheit? Eine der Gründe liegt sicherlich darin, dass mit Fuzzy auch nichtlineare Kennlinien reproduziert werden können. Das wird schon durch das FAT gewährleistet (vgl. Abschnitt 7.4).

Daneben gibt es einen weiteren Grund für die funktionelle Überlegenheit von Fuzzyregelungen: Fuzzyregelungen sind robust! Was bedeutet dies? Die Erfahrung zeigt, dass Fuzzyregelungen in weiten Bereichen unabhängig von internen Parametern des zu regelnden Systems sind. Für unser invertiertes Pendel stellt z. B. die Pendellänge einen solchen internen Parameter dar. Unsere Fuzzyregelung kann ein Pendel mit sehr unterschiedlichen Längen balancieren. Sie gilt also für einen weiten Bereich an Werten für den internen Parameter Pendellänge. Konventionelle Regler benutzen dagegen Modelle, in denen derartige interne Parameter explizit auftauchen. Wenn solche Parameter sich ändern, muss der Regelungsalgorithmus wieder neu angepasst werden.

Wir haben deutlich gemacht: Fuzzyregelungen sind billiger und arbeiten besser. Das ist aber noch nicht alles: Inzwischen gibt es schon verschiedene Möglichkeiten, Fuzzyregelungen automatisch zu erzeugen oder zu optimieren. Diesen Gesichtspunkt werden wir im Kapitel 10 eingehend untersuchen.