

Experimentelle Vertiefung der Ausbildung im Fuzzy-Logik-Reglerentwurf

Emphasizing fuzzy logic control design by means of laboratory experiments

Uwe Hanebeck und Günther Schmidt, München



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Schmidt ist Ordinarius für Steuerungs- und Regelungstechnik an der Technischen Universität München. Hauptarbeitsfelder: Erprobung und Weiterentwicklung neuer Entwurfsmethoden der Steuerungs- und Regelungstechnik; modell- und wissensbasierte Prozeßführung und -diagnose; Autonomiefunktionen bei Roboterzellen und -fahrzeugen; Sensoren für die Erfassung der Umgebung und Sensordatenfusion.

Adresse: Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, D-80290 München, Tel. (089) 21 05-83 95.



Dipl.-Ing. Uwe D. Hanebeck ist wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München. Hauptarbeitsfelder: Mobile autonome Systeme und deren Sensorik, insbesondere Auswertung von entfernungsgebenden Sensoren; biologisch inspirierte Optimierungsverfahren: Fuzzy-Logik-Systeme.

Adresse: siehe oben, Tel. (089) 21 05-34 12.

Dieser Artikel beschreibt Laborexperimente, die mit dem Ziel entwickelt wurden, das in einer Vorlesung über lineare und nichtlineare Regelungssynthese erworbene theoretische Wissen über Fuzzy-Logik-Regelungen praktisch zu vertiefen. Ein erstes Anwendungsbeispiel beschäftigt sich mit Entwurf und simulativem Test eines Fuzzy-Kraftfahrzeug-Abstandreglers mit Kaskadenstruktur. Im zweiten Beispiel wird das Laborexperiment einer Magnetschweberegelung beschrieben, in dessen Verlauf verschiedene Typen von Fuzzy-Reglern entwickelt und bewertet werden. Beide Experimente vermitteln Studenten fundiertere Einsichten über Ablauf, Aufwand und Nutzen grundverschiedener regelungstechnischer Entwurfsansätze. Zur einfacheren Durchführung dieser Experimente wurden Fuzzy-Softwarewerkzeuge entwickelt, die ebenfalls kurz beschrieben werden.

This article details on laboratory experiments that were developed to complement theoretical knowledge on fuzzy logic techniques acquired in a course on linear and nonlinear controller design. A first application example is concerned with an „advanced cruise control system“ for automobiles that consists of a cascaded control structure. Described in the second example is a laboratory experiment „magnetically levitated mass“ during which various types of fuzzy

controllers are developed and tested. Both experiments let students gain a deeper understanding of procedures, expenditures and performance linked to fundamentally different controller design techniques. For convenient experimentation certain fuzzy-software tools were developed which are also briefly described in this paper.

1 Einleitung

Eine moderne Vorlesung über lineare und nichtlineare Reglersynthese sollte neben klassischen, modellorientierten Entwurfsmethoden auch Entwurfsalternativen mittels Fuzzy-Logik- und Neuronalen-Netz-Techniken behandeln. Erfahrungsgemäß kommt es für Studenten gerade bei letztgenannten Methoden sehr darauf an, das in Vorlesungen erworbene theoretische Grundwissen an überschaubaren, praxisnahen Aufgabenstellungen zu erhärten. Dabei wird beim Fuzzy-Logik-Reglerentwurf mehr Wert auf die schnelle Auslegung eines „zufriedenstellend arbeitenden“ Reglers zu legen sein als auf die langwierige Entwicklung eines „optimalen“ Regelgesetzes. Um dieses Lernziel im Rahmen eines Praktikums zu verwirklichen, wurde am Lehrstuhl der Autoren das vielfältige Angebot an Laborexperimenten gezielt um solche Aufgabenstellungen erweitert, die für den Studenten einerseits eine Herausforderung darstellen, andererseits aber doch so geartet sind, daß sie in begrenzter Zeit durchschaut und bearbeitet werden können.

Zur Entlastung des Studenten von mühsamen Programmierarbeiten und im Hinblick auf eine Konzentration auf die eigentliche Entwurfsaufgabe, wurde ein einfacher Präprozessor entwickelt, der einen in Fuzzy-Hochsprache formulierten Regelalgorithmus in eine C-Routine umsetzt. Diese C-Routine evaluiert den Regelsatz mit einer Auflösung von acht Bit. Die Syntax dieses Präprozessors wird im Anhang erläutert.

Die nachfolgend beschriebenen Regelstrecken haben den Vorteil, daß sie mit geringem Aufwand grob modelliert und linearisiert werden können. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, Güte und Robustheit von Fuzzy-Logik-Regelungen mit Regelungen zu vergleichen, die mittels Methoden der linearen Regelungstheorie entworfen wurden. Diese Parallelität erlaubt es Studenten, fundiertere Einsichten über Ablauf, Aufwand und Nutzen grundverschiedener Entwurfsansätze zu gewinnen.

2 Intelligenter Tempomat

2.1 Regelungsaufgabe

Das erste, rechnergestützte Experiment behandelt den Entwurf eines Kraftfahrzeug-Abstandsreglers. Die Aufgabe besteht darin, neben der Fahrzeuggeschwindigkeit V_F auch den Sicherheitsabstand zu einem eventuell vorausfahrenden Führungsfahrzeug zu regeln. Grundlage der Fahrzeugsimulation bildet ein realitätsnahes Modell der Fahrzeuglängsdynamik aus [2], das unter anderem ein Automatikgetriebe und den nichtlinearen Fahrwiderstand einschließt. Bild 1 zeigt die Grobstruktur des Modells, wobei doppelt eingerahmte Blöcke die an einem realen Fahrzeug gemessenen und als Kennlinien vorliegenden nichtlinearen Zusammenhänge beschreiben. Als Regelungsstruktur wird eine zweistufige Kaskade, mit Geschwindigkeitsregelung für das Folgefahrzeug und überlagerter Abstandsregelung zum Führungsfahrzeug, gewählt, Bild 2.

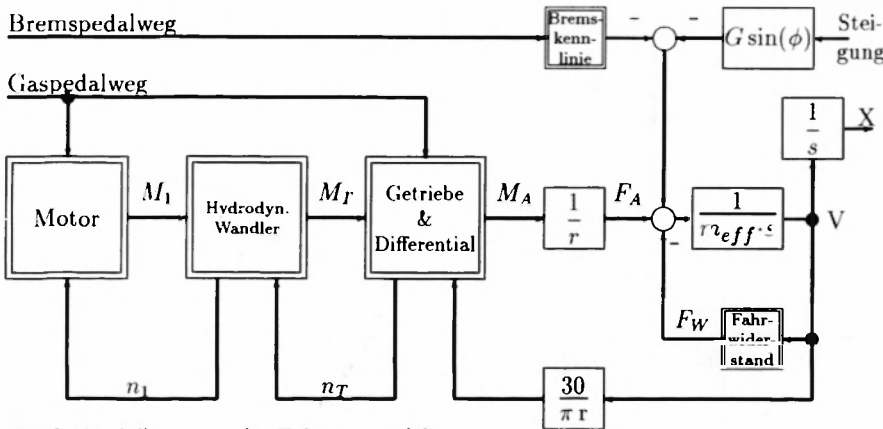


Bild 1. Blockdiagramm des Fahrzeugmodells.

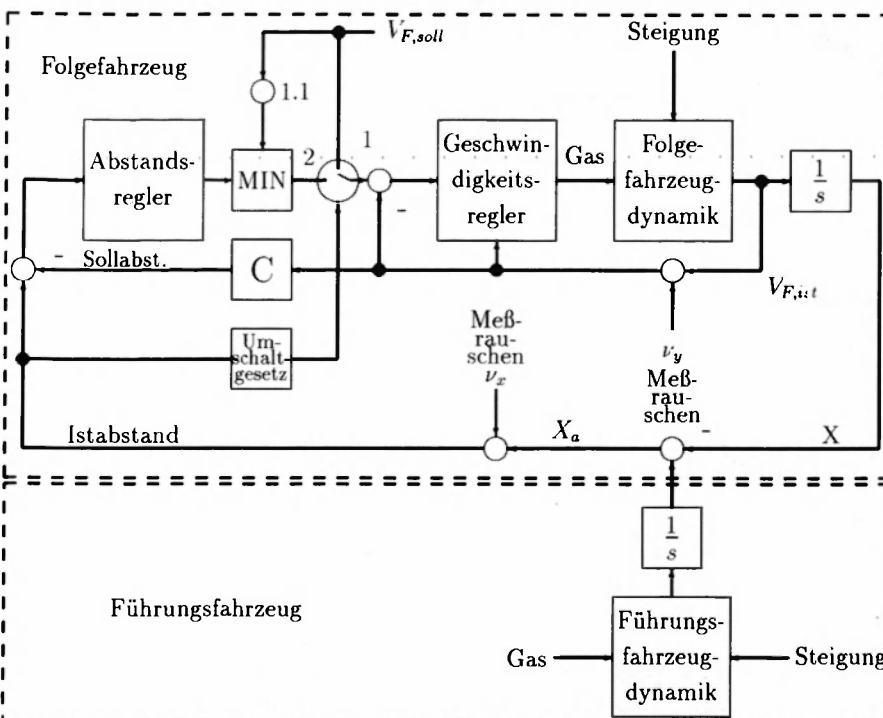


Bild 2. Blockdiagramm der kaskadierten Regelungsstruktur.

Bei freier Fahrbahn wird die äußere Regelschleife automatisch aufgetrennt (Schalter in Stellung 1), so daß eine reine Geschwindigkeitsregelung vorliegt. Ist ein Führungsfahrzeug im Einzugsbereich des Abstandssensors vorhanden, wird bei geschlossener äußerer Schleife (Schalter in Stellung 2) der Abstand zwischen vorausfahrendem und Folgefahrzeug geregelt. Um Arbeitsbewegungen zu vermeiden, erfolgt Strukturumschaltung wie folgt: Befindet sich das Folgefahrzeug im Zustand Geschwindigkeitsregelung und wird der Istabstand zum Führungsfahrzeug < 100 m, so wird auf Abstandsregelung umgeschaltet, d.h. Schalter in Stellung 2 gebracht. Befindet sich das Folgefahrzeug im Zustand Abstandsregelung und wird der Abstand > 150 m, so erfolgt die Umschaltung auf die Geschwindigkeitsregelung des Folgefahrzeugs, d.h. Schalter wird in Stellung 1 gebracht.

Wie in Deutschland üblich, wird der Sollabstand als Konstante C mal Folgegeschwindigkeit $V_{F,ist}$ berechnet, wobei die Konstante zu $C = (0,5 \cdot m \cdot h)/km$ festgelegt wird. Eine Minimumauswahl sorgt dafür, daß die vom Abstandsregler vorgegebene Sollgeschwindigkeit nicht größer als das 1,1-fache der vom Fahrer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit wird.

Dem Istabstandssignal X_a wird ein unkorreliertes, normalverteiltes Rauschen v_x zur Simulation des Meßrauschens und ein weiteres Signal zur Simulation des Einflusses von Fehlmessungen eines fiktiven Abstandssensors überlagert. Diese Fehlmessungen entstehen typischerweise dann, wenn der Abstandssensor vorübergehend das vorausfahrende Fahrzeug verliert. In der Simulation wird im übrigen zur Istfolgegeschwindigkeit ein unkorreliertes, gleichverteiltes Zufallssignal v_y addiert. Die Bewegungssimulation von Führungs- und Folgefahrzeug beruht auf dem gleichen Modell. Es können auch einsichernde und abbiegende Fahrzeuge modelliert werden. Die Abtastintervalle wurden zu 10 ms für die Berechnung der Fahrzeugdynamik und zu 100 ms für den Regler festgelegt.

Die Simulationsprogramme sind in der Programmiersprache C geschrieben; die Benutzerschnittstelle wurde unter MATLAB erstellt. Hierdurch wird die Geschwindigkeit von C-Routinen mit den exzellenten Graphikmöglichkeiten von MATLAB kombiniert. Durch die Verwendung der MEX-Schnittstelle kann der MATLAB-Interpreter C-Routinen ohne Dateiaustausch rufen.

2.2 Linearer Referenzregler

Der Entwurf konventioneller, linearer Regler wird auf der Grundlage eines vereinfachten, linearisierten Fahrzeugmodells durchgeführt, das aus den im Bild 1 dargestellten Zusammenhängen entwickelt wurde. Man erhält daraus ein PT_1 -Glied

$$F(s) = \frac{\Delta V_F}{\Delta G_{as}} = \frac{K(V_0)}{1 + T(V_0)s} \quad (1)$$

mit von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit V_0 abhängigen Parametern K und T . Sowohl für Geschwindigkeits- als auch für die Abstandsregelung wird ein PI-Regler verwendet. Die Minimierung eines quadratischen Gütemaßes

$$J = \int_0^{\infty} (\underline{x}^T Q \underline{x} + u^2) dt \quad (2)$$

mit dem Zustandsvektor $\underline{x}$ und der Gewichtsmatrix

$$Q = \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix}, \quad \varepsilon \geq 0, \mu \geq 0, \quad (3)$$

ergibt folgende analytische Ausdrücke für die Parameter des Geschwindigkeitsreglers

$$K_I^v = \sqrt{\mu} \quad (4)$$

$$K_p^v = \frac{1}{K} \left\{ \sqrt{1 + 2\sqrt{\mu} KT + \varepsilon K^2} - 1 \right\}. \quad (5)$$

Während einer Simulation werden die Parameter des linearen Streckenmodells für die jeweilige Geschwindigkeit V_0 aus einer Tabelle entnommen und die zugehörigen optimalen Reglerkoeffizienten für diese Geschwindigkeit mittels Gleichung (4) und (5) bestimmt.

Durch die unterlagerte Geschwindigkeitsregelung wird das Fahrzeugverhalten bereits so weit linearisiert, daß ein PI-Abstandsregler mit einem festen Koeffizientensatz ausreicht, um die Regelungspole in engen Grenzen zu halten. Die beiden linearen Zustandsregler bilden die „optimale“ Referenz für entsprechende Experimente mit Fuzzy-Logik-Reglern.

2.3 Versuchsablauf

Die Entwurfsaufgabe der Studenten besteht nun darin, nacheinander einen Geschwindigkeits- und einen Abstandsregler mit Fuzzy-Logik-Techniken zu entwerfen und deren Verhalten mit den linearen Referenzreglern zu vergleichen.

Für die Fuzzy-Logik-Geschwindigkeits- und -Abstandsregler wird die gleiche Struktur vorausgesetzt: Eingangsvariablen sind der Geschwindigkeits- bzw. Abstandsfehler und dessen jeweilige Änderung. Ausgangsvariable ist die Änderung der Gaspedalstellung bzw. der Sollgeschwindigkeit. Zur Beurteilung der Regelgüte werden

Energieverbrauch, Fahrkomfort, $E_1 = \int_0^T |e| dt$ und $E_2 = \int_0^T e^2 dt$ herangezogen.

2.4 Ergebnisse

Zu Beginn des Praktikumstermins besteht bei den Studenten in der Regel eine gewisse Skepsis bezüglich der Wirksamkeit des Fuzzy-Logik-Reglerentwurfs. Fuzzy Logik-Grundlagen sind zwar aus der Vorlesung bekannt, ein Gefühl für deren Nutzen in der Praxis besteht jedoch nicht. So beginnen die Studenten zunächst damit, sich am Simulator eine qualitative Vorstellung über Kausalität und dynamisches Verhalten der Strecke zu verschaffen und erste Überlegungen bezüglich der Kontrollregelbasis für den Geschwindigkeitsregler anzustellen.

Typischerweise werden beim Reglerentwurf zwei Vorgehensweisen angewandt: Zum einen werden passende Aktionen in eine Situationstabelle eingetragen; eine andere Strategie besteht darin, alle denkbaren Aktionen aufzulisten und dazu auslösende Situationen zu definieren. Ein so entwickelter erster Reglerentwurf arbeitet im allgemeinen noch nicht zufriedenstellend. Anhand von graphisch darstellbaren Zugehörigkeitsfunktionsverteilungen und Reglerkennfeldern analysieren die Studenten die aufgetretenen Probleme. Sie ändern Form und Überlappung der Zugehörigkeitsfunktionen und modifizieren gegebenenfalls die Regelbasis. Meistens zeigt der Regler bereits nach zwei oder drei Iterationen ein zufriedenstellendes Regelverhalten. Seine Leistungen sind mit den Referenzreglern durchaus vergleichbar, wobei ein geringeres Überschwingen und eine höhere Robustheit gegenüber Meßrauschen und Änderungen von Streckenparametern, z. B. infolge einer Änderung der Zuladung, auffällt.

Bild 3 zeigt typische Verläufe der Istgeschwindigkeit des Folgefahrzeugs im Vergleich zur Sollgeschwindigkeit für optimale und Fuzzy-Logik-Regelung bei einer Zuladung von 600 kg. Eine repräsentative Regelbasis für diesen Geschwindigkeitsregler ist Tabelle 3 im Anhang zu entnehmen. Ähnliche Erfahrungen werden während des nachfolgenden Abstandsreglerentwurfes gesammelt. Die Studenten sind zu diesem Zeitpunkt allerdings schon etwas erfahrener und benötigen deutlich weniger Zeit. Einen typischen Verlauf des Istabstandes für optimale und Fuzzy-Logik-Abstandsregelung zeigt Bild 4. Die Ausreißer im Abstandssignal sind eine Folge simulierter Fehlmessungen. Auch hier erweist sich die Leistung des Fuzzy-Reglers mit der des Referenzreglers vergleichbar, wobei er allerdings eine deutlich höhere Robustheit zeigt: So wird er z. B. mit Situationen fertig, in denen der lineare Referenzregler beinahe einen Auffahrunfall produziert ($t = 85$ s).

Dieser wie der nachfolgend beschriebene Praktikumsversuch wird pro Semester von ca. 80 Studenten durchgeführt. Einige Wochen vor dem Versuchstermin werden dazu ausführliche Anleitungen ausgeteilt; die experimentelle Arbeit im Labor ist auf vier Stunden begrenzt. In dieser Zeit müssen die Studenten beide Fuzzy-Regler entwerfen und sie im Hinblick auf Güte und Robustheit bewerten. Signifikante Simulationsergebnisse sind auszudrucken und mit einer schriftlichen Entwurfsbeschreibung

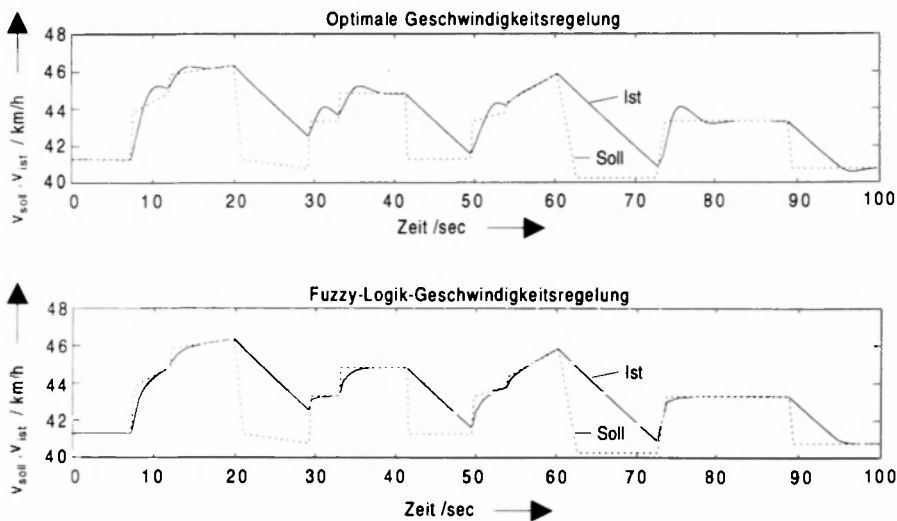


Bild 3. Typischer Verlauf der Istgeschwindigkeit des Folgefahrzeugs im Vergleich mit der Sollgeschwindigkeit für optimale und Fuzzy-Logik-Regelung (Zuladung 600 kg).

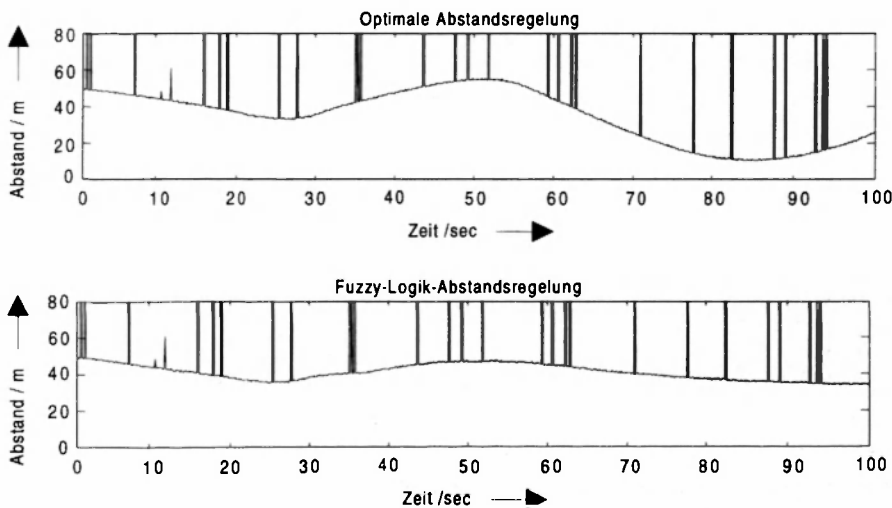


Bild 4. Typischer Verlauf des Istabstandes für klassische und Fuzzy-Logik-Abstands-/Geschwindigkeitsregelung.

bung sowie einer Kritik der erzielten Resultate abzuliefern.

Ein erheblicher Teil des Versuchsablaufs wird vom Simulationsprogramm unterstützt, so daß sich die Studenten auf die spezifischen Probleme des Fuzzy-Reglerentwurfs konzentrieren können.

3 Regelung eines Magnetschwebekörpers

3.1 Regelungsaufgabe

Diesem Experiment liegt ein realer Versuchsaufbau zugrunde. Die Aufgabe besteht darin, einen Eisenkörper in einem Abstand r vom Betriebspunkt durch das magnetische Feld einer stromdurchflossenen Spule frei schwebend zu stabilisieren. Ein Sensor bestimmt die aktuelle Ablage x vom Betriebspunkt. Die Strecke ist nichtlinear

und instabil; sie kann um den Betriebspunkt durch folgendes lineares Modell grob beschrieben werden

$$\ddot{x} - c_1 \dot{x} = c_2 \dot{i},$$

$$c_1 = 854,4 \frac{1}{s^2}, \quad (6)$$

$$c_2 = 6,84 \frac{\text{mm}}{\text{mA} \cdot s^2}.$$

Eine Stabilisierung mit konventionellen Reglern, z. B. einem PD- oder PID-Regler, ist möglich.

Die Strecke ist mit einem PC/XT verbunden; die A/D- und D/A-Wandler haben eine Auflösung von 12 Bit. Die Regelalgorithmen sind in Software implementiert und arbeiten quasikontinuierlich mit einem Abtastintervall $T_A = 1$ ms.

3.2 Versuchsablauf

Im Rahmen des Experiments beschäftigen sich die Studenten intensiv mit dem Experimentieraufbau, um zunächst ein Gefühl für seine Dynamik sowie Verhalten und Leistungsfähigkeit unterschiedlicher linearer Regler zu gewinnen. Dabei wird z. B. beobachtet, daß ein linearer Regler für große Ablagen $|x|$ und große Ablageänderungen $|\Delta x|$ nicht zufriedenstellend arbeitet, d. h., die Regelstrecke ist in diesen Fällen nicht stabilisierbar.

Um das nichtlineare System besser zu beherrschen, erweist sich die Erfahrung als nützlich, daß der einfachste stabilisierende lineare Regler ein PD-Regler ist. Als Eingangsvariablen

für den einfachsten stabilisierenden Fuzzy-Logik-Regler werden deshalb ebenfalls der Ablagefehler e und dessen Änderung Δe über ein Abtastintervall gewählt. Dem Reglerausgang ist der anpaßbare Verstärkungsgrad k_i nachgeschaltet.

Die Aufgabe besteht nun darin, mit Fuzzy-Logik-Techniken eine geeignete nichtlineare Abbildung von e und Δe auf die Stellgröße i zu finden. Dazu halten die Studenten ihre Vorstellungen von der Arbeitsweise des Reglers in einem linguistischen Protokoll fest, wie es Tabelle 1 zeigt.

Dieses Protokoll wird vom Präprozessor in eine C-Routine umgewandelt, die dann den gewünschten Regler implementiert. Um den Fuzzy-Logik-Regler in der gleichen Umgebung (PC/XT) wie den klassischen Regler einzusetzen, mußte auf eine Auswertung der Regeln zur Laufzeit verzichtet werden. Stattdessen wird vorab eine Tabelle mit 256 mal 256 Einträgen erzeugt und zur Laufzeit ausgelesen. Sie stellt die schnellste Implementie-

Bild 7. Struktur des fuzzy adaptierten PD-Reglers für den Magnet-schwebekörper.

Tabelle 2. Regelbasis für den fuzzy adaptierten PD-Regler.

```

CONTROLLER FuzzPd;
IMPLICATION MINIMPLY;
DEFUZZIFICATION COG;

IN x RANGE -7.0 .. 7.0
  MEMBER negativ TRIANGLE -7.0 -7.0 0.0
  MEMBER null TRIANGLE -7.0 0.0 7.0
  MEMBER positiv TRIANGLE 0.0 7.0 7.0;

IN xd RANGE -0.5 .. 0.5
  MEMBER negativ TRIANGLE -0.5 -0.5 0.0
  MEMBER null TRIANGLE -0.5 0.0 0.5
  MEMBER positiv TRIANGLE 0.0 0.5 0.5;

OUT Kp RANGE 0.0 .. 1.0
  MEMBER nominal SINE 2.0 0.0 0.75
  MEMBER gross SINE 2.0 0.25 1.0;

RULE 1    x negativ OR x positiv
  -> Kp gross;

RULE 2    x null
  -> Kp nominal;

RULE 3    xd negativ OR xd positiv
  -> Kp gross;

RULE 4    xd null
  -> Kp nominal;

```

Ziel der Adaption muß es nun sein, im Bereich des Betriebspunkts ein mäßiges K_p zu erzeugen, um eine unnötige Verstärkung von Meßrauschen zu vermeiden. Für große Werte von $|x|$ und $|\Delta x|$ sollte dagegen ein großes K_p vorliegen. Diese Vorstellung kann leicht in ein linguistisches Protokoll für eine Adaptionsstrategie übersetzt werden, Tabelle 2.

K_p wird damit eine Funktion von x und Δx , deren Kennlinienfeld Bild 8 zeigt. Der resultierende hybride Regler zeigt nun das gewünschte Verhalten; er beherrscht insbesondere auch große Sollwertsprünge (Bild 6c) und verursacht um den Betriebspunkt nur kleine Arbeitsbewegungen. Darüberhinaus ist der stationäre Fehler des fuzzy adaptierten PD-Reglers wesentlich kleiner als der eines PD-Reglers mit konstanter Verstärkung. Er zeigt sich auch gegenüber Streckenvariationen robust: Alle in diesem Artikel besprochenen Regler wurden an einen prototypischen Aufbau entworfen und getestet. Beim Einsatz an dem verbesserten, marktreifen Experimentieraufbau zeigt der reine Fuzzy-Logik-Regler ein anderes Verhalten, muß also wieder neu an die Strecke angepaßt

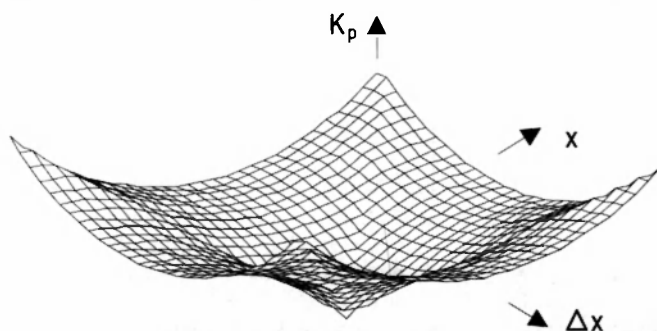


Bild 8. K_p als Funktion von x und Δx .

werden. Der fuzzy adaptierte PD-Regler verhält sich hingegen wie gewünscht.

Um den stationären Fehler komplett zu eliminieren, kann dem Regler ein integraler Anteil hinzugefügt werden.

3.3 Ergebnisse

In diesem Experiment ist ein stabilisierender Regler für eine reale instabile, nichtlineare Strecke mit Fuzzy-Logik-Techniken zu entwerfen.

Während der Einarbeitungsphase des Praktikums sammeln die Studenten wertvolle Erfahrungen über Verhalten und Leistungen der konventionell geregelten Strecke. Fuzzy-Logik-Techniken erlauben es ihnen in der Folge, diese Erfahrungen in den Entwurf verschiedener Fuzzy- und hybrider Fuzzy-Regler einzubringen, und damit wesentliche Verbesserungen im Regelungsverhalten gegenüber linearen Strukturen zu erzielen.

4 Schlußfolgerungen

Die in diesem Artikel vorgestellten Experimente dienen Studenten der Automatisierungstechnik, ihr theoretisches Wissen über den Entwurf von Fuzzy-Logik-Regelungen im Rahmen praxisnaher Aufgabenstellungen anzuwenden und zu vertiefen. Dabei lernt der Student Fuzzy-Logik als ein neues Werkzeug zum Entwurf nichtlinearer Regler kennen, das bewährte Methoden und Vorstellungen nicht ersetzt, sondern sie wirkungsvoll ergänzt.

Im Rahmen des Praktikums erkennen die Studenten schnell, daß fundierte Kenntnisse über Aufbau und Wirkung linearer Regelgesetze und -strukturen zum systematischen Entwurf mit Fuzzy-Logik-Techniken unabdingbar sind. Weiterhin wird ihnen klar, daß die häufig geäußerte Behauptung, der Entwurf von Fuzzy-Logik-Regelungen bedürfe keiner Modellvorstellungen, kaum haltbar ist. Sie finden sehr schnell heraus, daß der Entwurfsingenieur sehr wohl Modellwissen, allerdings in einer zunächst ungewohnten Repräsentationsform, benötigt: Ohne qualitative Vorstellungen über Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit sowie über Kausalität und Dynamik der Regelstrecke wird es in anspruchsvolleren Situationen kaum möglich sein, passende linguistische Kontrollregeln zu formulieren. Der Student erkennt Fuzzy-Logik aber auch als das Werkzeug, dieses qualitative Prozeßwissen in den Entwurfsvorgang einzubeziehen und damit zu verbesserten Regelungsqualitäten zu gelangen. Durch geschickte Reduzierung der beim Fuzzy-Entwurf prinzipiell vorhandenen Freiheitsgrade, z. B. Zugehörigkeitsfunktionen, deren Überlappung, Fuzzifizierungs- und Defuzzifizierungsmethoden, ist es relativ einfach möglich, zu zufriedenstellend arbeitenden nichtlinearen Reglern zu gelangen. Dieser für die Praxis wesentliche Vorteil von Fuzzy-Logik-Techniken wird dem Studenten beim Durcharbeiten der Experimente auf eindrucksvolle Weise bewußt gemacht. Er erfährt schließlich auch, daß häufig in der Verbindung klassischer und Fuzzy-Logik-Techniken ein hohes Verbesserungspotential für den Entwurf von Steuerungen und Regelungen liegt.

5 Anhang

Zur Erläuterung der Syntax des Präprozessors soll auf eine typische Regelbasis für den Geschwindigkeitsregler aus Abschnitt 2.4 zurückgegriffen werden, Tabelle 3.

Schlüsselwörter sind darin mit Großbuchstaben dargestellt. Das Kommentarzeichen # blendet den Rest der Zeile aus; Kommentare können aber auch, wie in der Programmiersprache C üblich, in /* und */ eingeschachtelt werden.

Tabelle 3. Typische Regelbasis für den Geschwindigkeitsregler.

```

/* Name des Reglers: */
CONTROLLER Tempo;
/* Zu verwendende Implikation: */
IMPLICATION MINIMPLY;
/* Zu verwendende Defuzzifizierung: */
DEFUZZIFICATION COG;

# Linguistische Variablen:

# Eingang:

IN Vd RANGE -10.0 ... 10.0
  MEMBER positiv    TRIANGLE 0.0 10.0 10.0
  MEMBER null       TRIANGLE -1.0 0.0 1.0
  MEMBER negativ    TRIANGLE -10.0 -10.0 0.0;

IN DVd RANGE -1.0 ... 1.0
  MEMBER positiv    TRIANGLE 0.0 1.0 1.0
  MEMBER null       TRIANGLE -0.1 0.0 0.1
  MEMBER negativ    TRIANGLE -1.0 -1.0 0.0;

# Ausgang:

OUT Gas RANGE -1.0 ... 1.0
  MEMBER vielmehr   TRIANGLE 0.5 1.0 1.0
  MEMBER mehr       TRIANGLE 0.0 0.5 1.0
  MEMBER gleich     TRIANGLE -0.1 0.0 0.1
  MEMBER weniger   TRIANGLE -1.0 -0.5 0.0
  MEMBER vielweniger TRIANGLE -1.0 -1.0 -0.5;

# Regelbasis:

RULE 1    Vd positiv AND DVd null
          OR  Vd null    AND DVd positiv
          -> Gas mehr;
RULE 2    Vd null      AND DVd null
          OR  Vd positiv AND DVd negativ
          OR  Vd negativ AND DVd positiv
          -> Gas gleich;
RULE 3    Vd negativ AND DVd null
          OR  Vd null  AND DVd negativ
          -> Gas weniger;
RULE 4    Vd positiv AND DVd positiv
          -> Gas vielmehr;
RULE 5    Vd negativ AND DVd negativ
          -> Gas vielweniger;

```

Es müssen in folgender Reihenfolge auftauchen:

1. Bezeichnung des Reglers
2. Zu verwendende Implikation:
 - MINIMPLY Minimumimplikation
 - PRODIMPLY Produktimplikation

3. Zu verwendende Art der Defuzzifizierung:

- COG Schwerpunktmethode
- MOM Berechnung des Mittelwertes der Maxima

4. Linguistische Ein- und Ausgangsvariable mit Bereichsangaben $x_L \dots x_R$ und Typ der Zugehörigkeitsfunktionen:

- POINT a h realisiert eine Zugehörigkeitsfunktion der Form

$$\mu(x) = \begin{cases} h, & x = a \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (7)$$

- POINTS (x1 y1) (x2 y2) ... (xn yn); spezifiziert eine Zugehörigkeitsfunktion mit linear zwischen den angegebenen Punkten interpolierten Werten
- TRIANGLE a b c ergibt eine Zugehörigkeitsfunktion mit

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (8)$$

- SINE g a b ergibt

$$\mu(x) = \begin{cases} \sin^g \left[\pi \left(\frac{x-a}{b-a} \right) \right], & a < x < b \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (9)$$

- RIGHTSINE g a ergibt

$$\mu(x) = \begin{cases} \sin^g \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{x-x_L}{a-x_L} \right) \right], & x_L < x < a \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

- LEFTSINE g a ergibt

$$\mu(x) = \begin{cases} \sin^g \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{x-a}{x_R-a} \right) \right], & a < x < x_R \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (11)$$

Eingangswerte, die außerhalb des Bereiches $x_L \dots x_R$ liegen, werden auf die Bereichsgrenzen abgebildet.

5. Der Regelsatz, wobei der Vorrang von AND vor OR zu beachten ist.

Ein derartiges Protokoll kann vom Präprozessor in ein C-Programm konvertiert werden.

Literatur

- [1] Åstrom, K. J., und Lundh, M.: Lund Control Program Combines Theory with Hands-On Experience. IEEE Control Systems Magazine (1992), S. 22–30.
- [2] Hartwich, E.: Längsdynamik und Folgebewegung des Straßenfahrzeugs und ihr Einfluß auf das Verhalten der Fahrzeugschlanke. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt 1972.
- [3] Hsu, P.: Dynamics and Control Design Project Offers Taste of Real World. IEEE Control Systems Magazine (1992), S. 31–38.
- [4] Yurkovich, S.: Advances in Control Education. IEEE Control Systems Magazine (1992), S. 18–21.