

Modulare Fuzzy-Reglersynthese zur Positionsregelung eines hydraulischen Translationsantriebs

Andreas Breunig

Forschungsbericht 9/97

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Übersicht: Die modulare Fuzzy-Reglersynthese ist ein Verfahren für den systematischen Entwurf von Fuzzy-Reglern. Gegenstand dieses Berichts ist der Entwurf eines Fuzzy-Reglers für den hydraulischen Gleichgangzylinder-Prüfstand „Langer Zylinder“ im Fachgebiet MSRT. Im zweiten Teil des Berichts wird die Positionsregelung in Verbindung mit einer Sollwertgenerierung auf der Basis eines konfektionierten Fuzzy-Reglers vorgestellt.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg
Meß-, Steuer- und Regelungstechnik
Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	I
1 Einführende Übersicht	1
1.1 Versuchsträger	2
1.2 Modell der Regelstrecke	3
2 Modulare-Fuzzy-Reglersynthese	5
2.1 Klassifizierung	5
2.2 Standard-Fuzzy-Regler	6
2.3 Fuzzy-Synthese-Regler	8
3 Reglersynthese am realen Versuchsträger „Langer Zylinder“	12
3.1 Klassifizierung des Versuchsträgers	12
3.2 Lageregelung des Versuchsträgers	12
4 Sollwertgenerierung	15
5 Zusammenfassung und Ausblick	17
6 Literaturverzeichnis	18
Anhang	19
A Karnaugh-Tafeln	19
B Kennfelder	21
C Simulationsergebnisse	23

Nomenklatur

a	Beschleunigung des Hydraulikkolbens
\tilde{e}	Regelabweichung
$\Delta\tilde{e}$	Änderung der Regelabweichung
k	diskretes Zeitargument
k_e	Skalierungsfaktor der Regelabweichung, Fuzzy-PD-Regler
k_{eI}	Skalierungsfaktor der Regelabweichung, Fuzzy-PI-Regler
$k_{e, sy}$	Skalierungsfaktor der Regelabweichung, Fuzzy-Synthese-Regler
$k_{\Delta e}$	Skalierungsfaktor der Änderung der Regelabweichung, Fuzzy-PD-Regler
$k_{\Delta e I}$	Skalierungsfaktor der Änderung der Regelabweichung, Fuzzy-PI-Regler
$k_{\Delta u}$	Skalierungsfaktor der Änderung der Stellgröße, Fuzzy-PI-Regler
k_u	Skalierungsfaktor der Stellgröße, Fuzzy-PD-Regler
k_{sy}	Skalierungsfaktor der Stellgröße, Fuzzy-Synthese-Regler
m_i	Modalwert der i -ten Fuzzy-Ausgangsmenge
m_E	Anzahl der Fuzzy-Referenzmengen X_i
$m_{\Delta E}$	Anzahl der Fuzzy-Referenzmengen Y_j
$m_{\Delta U}$	Anzahl der Fuzzy-Referenzmengen ΔU_k
p_A, p_B	Druck auf A und B Seite des Hydraulikzylinders
p_o	Versorgungsdruck
p_T	Tankdruck
s	Positions-Sollwert
T	Tastzeit
t	Zeit
t_{an}	Anregelzeit
u	Stellgröße
u_{PI}	Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers
u_{PD}	Stellgröße des Fuzzy-PD-Reglers
u_{sy}	Stellgröße des Fuzzy-Synthese-Reglers
Δu	Änderung der Stellgröße
v_{soll}	Sollgeschwindigkeit
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit
w	Führungsgröße
y	Position des Hydraulikkolbens
y_{mn}	Element der $m \times n$ Zeitreihenobjektmatrix
\dot{y}	Verfahrgeschwindigkeit des Hydraulikkolbens

Mengen:

\mathbb{D}_N	Definitionsbereich normierter Größen $\mathbb{D}_N = [0; 1]$
N	Fuzzy-Menge <i>negativ</i>
NG	Fuzzy-Menge <i>negativ groß</i>
NM	Fuzzy-Menge <i>negativ mittel</i>
NP	Fuzzy-Menge <i>in der Nähe des Nullpunktes</i>
PM	Fuzzy-Menge <i>positiv mittel</i>
PG	Fuzzy-Menge <i>positiv groß</i>
P	Fuzzy-Menge <i>positiv</i>
X_i	Fuzzy-Referenzmenge der Eingangsgröße „Normierte Regelabweichung“ \tilde{e}
Y_j	Fuzzy-Referenzmenge der Ausgangsgröße „Normierte Änderung der Regelabweichung“ $\Delta\tilde{e}$
U_k	Fuzzy-Referenzmenge der Ausgangsgröße „Stellgröße“ u
ΔU_l	Fuzzy-Referenzmenge der Ausgangsgröße „Änderung der Stellgröße“ Δu

Unschärfe Größen:

E	fuzzifizierte Regelabweichung e
ΔE	fuzzifizierte Änderung der Regelabweichung Δe
U	fuzzifizierte Stellgröße u
ΔU	fuzzifizierte Änderung der Stellgröße Δu

Griechische Symbole:

α_s	linke Spannweite der s-ten Menge
β_s	rechte Spannweite der s-ten Menge
μ	Zugehörigkeit einer normierten Eingangsgröße zu einer Fuzzy-Menge
σ_v	Überschwingweite

Vektoren und Matrizen:

A	Systemmatrix
N	Systemmatrix des bilinearen Anteils
Z	Zeitreihenobjektmatrix
ΔZ	zeitliche Änderung der Zeitreihenobjektmatrix
b	Eingangsvektor
c	Ausgangsvektor
u	Testsignalvektor
x	Zustandsvektor

Indices:

i	Laufindex
j	Laufindex
k	Laufindex
l	Laufindex
m	Laufindex
n	Laufindex
PD	Fuzzy-PD-Regler
PI	Fuzzy-PI-Regler
r	Laufindex
s	Laufindex
sy	Fuzzy-Synthese-Regler

Operatoren:

\top	t-Norm
D	Differenzierer
\forall	für alle
\in	Element von
$\frac{\partial}{\partial(\cdot)}$	partiell Differential

1 Einführende Übersicht

Die modulare Fuzzy-Reglersynthese ist ein nichtlineares Regelungskonzept zur Regelung nichtlinearer Regelstrecken (Berger 1994b). Die offene Regelstrecke wird anhand von Sprungantworten klassifiziert. Entsprechend dem Ergebnis der Klassifikation werden dem System konfektionierte Fuzzy-Regler für Systemklassen zugeordnet. Dieses Verfahren erfordert bei dem Anwender kein Wissen über die Fuzzy-Logik (Zadeh 1965). Die Fuzzy-Regler werden durch Skalierungsfaktoren – ähnlich der Reglerverstärkung bei konventionellen Reglern (Kahlert und Frank 1993) – der Regelstrecke angepaßt.

Das systematische Entwurfsverfahren der modularen Fuzzy-Reglersynthese (Berger 1994c) zeigt in der Anwendung am Versuchsträger gute Ergebnisse für unterschiedlichste Anwendungsfälle wie Positions-, Geschwindigkeits- und Kraftregelungen sowohl bei elektrohydraulischen (Berger 1994c, Engmann 1996, Margono 1996), elektro-pneumatischen (Breunig 1996) als auch elektro-mechanischen Systemen (Berger 1994b). Der Anwender bedarf nur eines geringen A-priori-Wissens über die Regelstrecke. Dieser Bericht beschreibt die Anwendung eines konfektionierten Fuzzy-Reglers zur Positionsregelung des Kolbens eines hydraulischen Gleichgangzylinders (Bild 1.1). Auf der Basis der modularen Fuzzy-Reglersynthese wurde für diesen Versuchsträger zunächst in der Simulation ein Konzept zur Positionsregelung entwickelt und anschließend am realen System verifiziert. Im Fol-

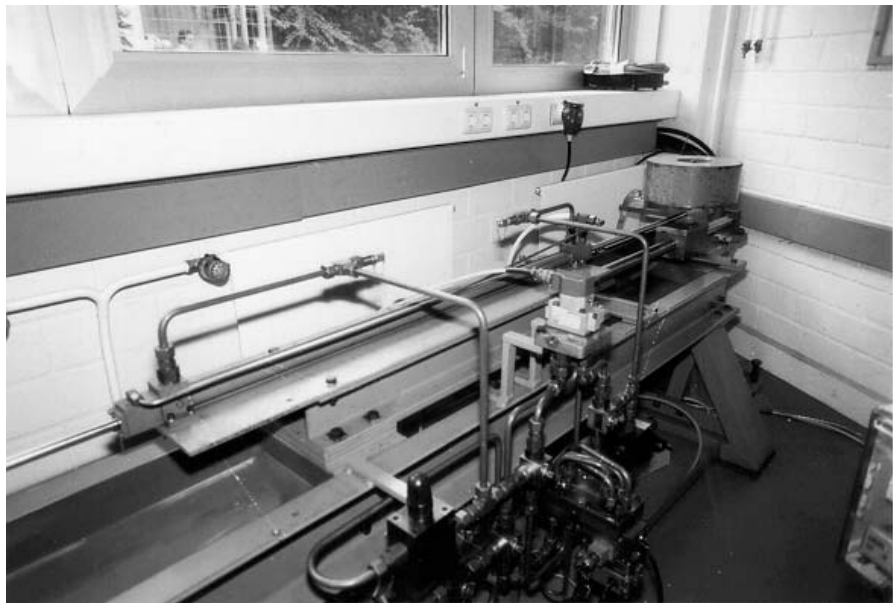


Bild 1.1: Elektrohydraulischer Translationsantrieb

genden wird der Versuchsträger kurz vorgestellt und das verwendete Modell erläutert. Der zweite Abschnitt dieses Berichts behandelt die Theorie der modularen Fuzzy-Reglersynthese. Daran anschließend wird im dritten Abschnitt die Anwendung der modularen Fuzzy-Reglersynthese am Beispiel des Versuchsträgers „Langer Zylinder“ vorgeführt. Der vierte Abschnitt zeigt auf, wie durch die Vorgabe von sollwertgenerierten Führungsprofi-

len das Positionierverhalten der Regelstrecke beeinflusst werden kann. Abschließend werden im sechsten Abschnitt die Ergebnisse kurz zusammengefaßt. Anregungen für weitere Untersuchungen werden gegeben.

1.1 Versuchsträger

Bei dem in diesem Bericht betrachteten Versuchsträger „Langer Zylinder“ (Bild 1.1) handelt es sich um einen hydraulischen Translationsantrieb. Die Regelstrecke besteht aus einem Gleichgangzylinder, der über ein 4/3-Wegeventil angesteuert wird (Bild 1.2).

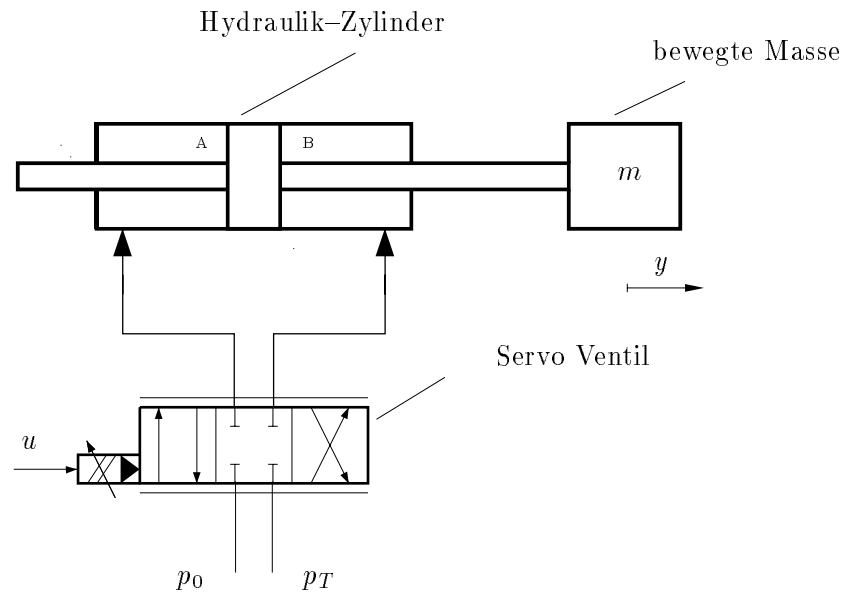


Bild 1.2: Skizze der Regelstrecke

Aufgrund gleich großer Wirkflächen des Kolbens stellt sich ein symmetrisches Verhalten bezüglich der übertragbaren Kräfte und damit des Beschleunigungsverhaltens ein. Das 4/3-Wegeventil ist ein zweistufiges, mechanisch rückgeführtes Servoventil mit externer Elektronik. Es dient der Verteilung des Ölstroms Q_P von der Versorgungs-Pumpe auf die beiden Ringraumseiten A und B. Der meßtechnische Aufbau ist in Bild 1.3 dargestellt.

Die Regelung des Versuchsträgers wird auf einem PC 486 DX2-66 realisiert. Mittels eines inkrementalen Weg-Meßsystems wird die Kolbenposition bestimmt. Zur Auswertung des Wegsignals wird eine Impulzzähler-Karte IK 120 (Heidenhain 1994) eingesetzt. Das Geschwindigkeitssignal wird durch numerische Differentiation aus dem Positionssignal ermittelt. Eine A/D-Wandler-Karte RTI-815 (Analog Devices 1990) dient zur Umsetzung des PC-Stellsignals in ein Steuerspannungssignal für das 4/3-Wegeventil. Alle Versuche werden mit einer Abtastzeit von 1 ms durchgeführt. Die Zeitsteuerung wird mit dem Timer der RTI-815-Karte realisiert.

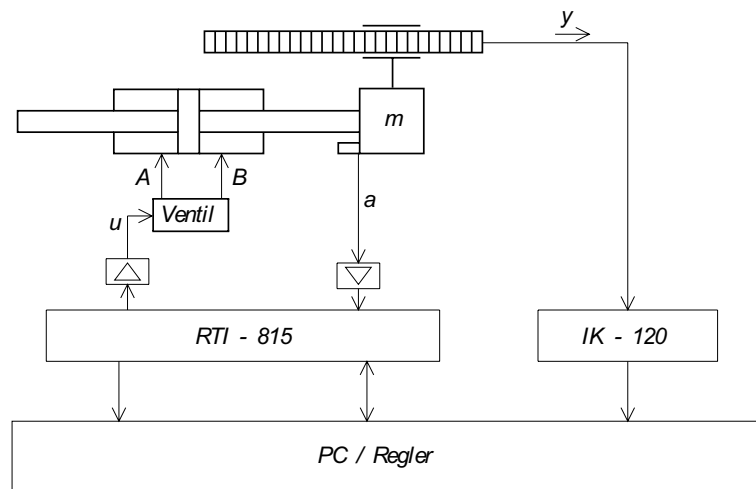


Bild 1.3: Meßtechnischer Aufbau des Versuchsträgers

1.2 Modell der Regelstrecke

Zu Simulationszwecken wird als Modell der Regelstrecke ein quadratisches System mit linearer Steuerung und linearer Eigendynamik (QLS_{LE}) verwendet (Bild 1.4). Dieses

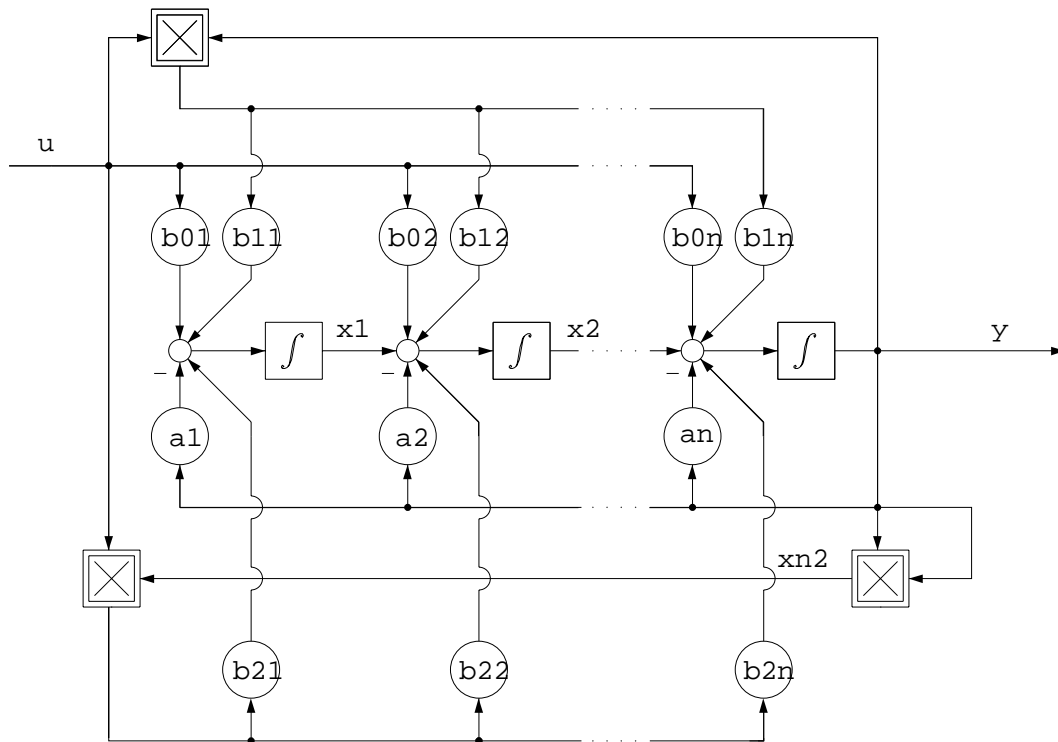


Bild 1.4: Beobachternormalform eines QLS mit linearer Eigendynamik

Modell zeichnet sich durch vergleichsweise geringen Rechenaufwand und damit akzeptabler Rechenzeit bei ausreichender Modellgüte aus (Schwarz und Senger 1997). Das QLS_{LE}

kann in (reduzierter) Keller–Beobachternormalform durch das Zustandsmodell

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 & -a_1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_2 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_n \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \\
 &+ \left(\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ \vdots \\ b_{1n} \end{bmatrix} x_n(t) + \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{22} \\ \vdots \\ b_{2n} \end{bmatrix} x_n^2(t) \right) u(t) \\
 y(t) &= [0 \ \dots \ 0 \ 1] \mathbf{x}(t) = x_n(t) \quad ; \quad \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}(0) \quad ; \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \quad .
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

beschrieben werden. Die mit einem NOCF Geschwindigkeitsmodell vierter Ordnung identifizierten Parameter werden in Schwarz und Senger (1997) angegeben zu:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 8,0410^{-3} & b_{11} &= 2,7110^{-4} \\
 a_2 &= 3,6410^{-2} & b_{12} &= -6,4410^{-3} \\
 a_3 &= 2,7010^{-1} & b_{13} &= 7,1010^{-3} \\
 a_4 &= 4,0910^{-1} & b_{14} &= -2,6310^{-2} \\
 b_1 &= 6,8510^{-3} & b_{21} &= -1,5710^{-3} \\
 b_2 &= -1,8110^{-2} & b_{22} &= -5,6010^{-2} \\
 b_3 &= 5,9110^{-2} & b_{23} &= -1,5610^{-1} \\
 b_4 &= -1,2110^{-1} & b_{24} &= -2,4410^{-1}
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Simulationsergebnisse sind in Anhang C wiedergegeben.

2 Modulare–Fuzzy–Reglersynthese

2.1 Klassifizierung

Grundlage der modularen Fuzzy–Reglersynthese ist die Einordnung des Systems in Systemklassen. Die Systemklassen werden in die natürlichen Systemklassen oszillatorisch, monoton, I–System, Totzeit–System und statische Nichtlinearitäten unterteilt. Zusätzlich wird die natürliche Systemklasse oszillatorisch in die semantischen Systemklassen schwach, mittel und stark oszillatorisch untergliedert. Die natürliche Systemklasse statische Nichtlinearitäten erfährt eine Unterteilung in die semantischen Systemklassen Zweipunktschalter, Dreipunktschalter, Tote–Zone und Begrenzer (Berger 1994b). Entsprechend den Systemklassen werden dem System Standard–Fuzzy–Regler, Fuzzy–Synthese–Regler oder Fuzzy–Regler–Tote–Zone zugewiesen.

Die Klassifizierung erfolgt anhand des offenen Systems. Hierzu wird das offene System mit einem Testsignalvektor

$$\mathbf{u} = [u_{o,1}, u_{o,2}, \dots, u_{o,n}]^T \quad (2.1)$$

mit den Amplituden $u_{o,1} < u_{o,2} < \dots < u_{o,n}$ angeregt und die Systemantwort als $m \times n$ Zeitreihenobjektmatrix

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

mit m Abtastungen aufgezeichnet. Im ersten Ansatz wird ein dreidimensionaler Testsignalvektor, $n = 3$, verwendet. Die Amplituden sind so gewählt, daß der gesamte Stellgrößenbereich erfaßt wird. Bei Bedarf werden weitere Testsignalvektoren, insbesondere zur Untersuchung des Kleinsignalverhaltens, verwendet.

Kann ein System der Systemklasse I–System zugeordnet werden, so erfolgt die weitere Klassifizierung auf der Basis der zeitlichen Änderung der Zeitreihenobjektmatrix

$$\Delta \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \frac{y_{21} - y_{11}}{T} & \frac{y_{22} - y_{12}}{T} & \dots & \frac{y_{2n} - y_{1n}}{T} \\ \frac{y_{31} - y_{21}}{T} & \frac{y_{32} - y_{22}}{T} & \dots & \frac{y_{3n} - y_{2n}}{T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{y_{m1} - y_{(m-1)1}}{T} & \frac{y_{m2} - y_{(m-1)2}}{T} & \dots & \frac{y_{mn} - y_{(m-1)n}}{T} \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Findet eine Zuordnung zu der natürlichen Systemklasse „Statische Nichtlinearität“ statt, ist eine Untersuchung des Kleinsignalverhaltens notwendig. Hierzu wird das offene System mit einem Testsignalvektor erregt, der die Ermittlung des Betrags der statischen Nichtlinearität ermöglicht.

Als Ergebnis der Klassifizierung werden dem System entsprechend der Einordnung in Systemklassen konfektionierte Fuzzy-Regler zugewiesen.

2.2 Standard-Fuzzy-Regler

Die Standard-Fuzzy-Regler werden in den konfektionierten Fuzzy-PI- und den konfektionierten Fuzzy-PD-Regler untergliedert. Der konfektionierte Fuzzy-PD-Regler (Bild 2.1) ist der natürlichen Systemklasse „I-System“ zugeordnet. Entsprechend wird der konfektionierte Fuzzy-PI-Regler (Bild 2.2) den natürlichen Systemklassen oszillatorisch und monoton zugewiesen. Beide Reglertypen sind strukturell gleich aufgebaut. Der Unterschied besteht in der rekursiven Definition der Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers und in den unterschiedlich aufgebauten 5×5 Regelbasen (Anhang A). Die grundsätzliche Struktur kann wie folgt beschrieben werden:

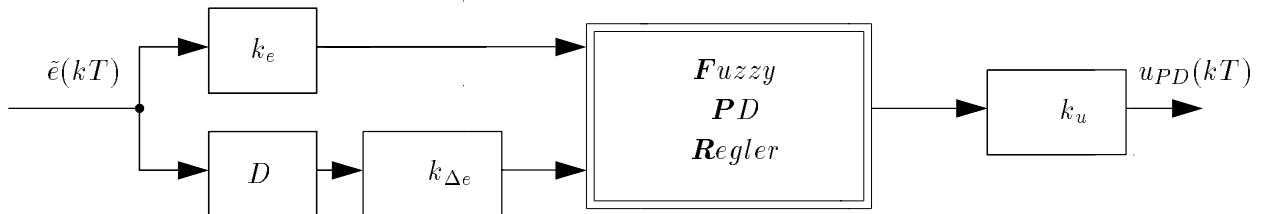


Bild 2.1: konfektionierte Fuzzy-PD-Regler

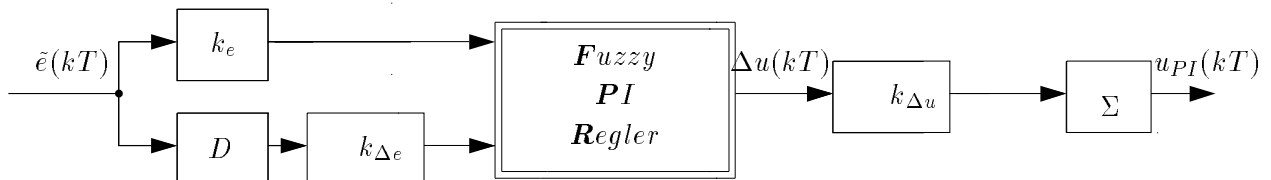


Bild 2.2: konfektionierte Fuzzy-PI-Regler

- Die Regler besitzen als Eingangsgrößen die normierte Regelabweichung

$$\tilde{e}(kT) = (w(kT) - y(kT))k_e \quad (2.4)$$

und die Änderung der normierten Regelabweichung

$$\Delta \tilde{e}(kT) = \left(\frac{\tilde{e}(kT) - \tilde{e}((k-1)T)}{T} \right) k_{\Delta e}. \quad (2.5)$$

- Ausgangsgröße ist die Stellgröße $u_{PD}(kT)$ respektive die Änderung der Regelabweichung $\Delta u_{PI}(kT)$.
- Der Regelsatz der konfektionierten Standard Fuzzy-Regler ist vollständig und widerspruchsfrei (Berger 1994a).
- Die Wertebereiche der Eingangsgrößen ($e(kT)$ und $\Delta e(kT)$) sowie der Ausgangsgrößen ($u_{PD}(kT)$ oder $\Delta u_{PI}(kT)$) sind durch entsprechende Wahl von k_e und $k_{\Delta e}$ auf den Definitionsbereich $\mathbb{D}_N = [-1; 1]$ normiert.
- Die Fuzzy-Mengen der Prämissen sind nach der Definition von Rommelfanger (1993) orthogonal (Berger 1994a).
- Das algebraische Produkt

$$\top_{ap,(r)}(\tilde{\mu}_{X_i}, \tilde{\mu}_{Y_j}) = \mu_{X_i}(\tilde{e}(kT))\mu_{Y_j}(\Delta\tilde{e}(kT)) \quad (2.6)$$

wird zur Prämissenauswertung verwendet (Kahlert und Frank 1993).

- Die Fuzzy-Regeln der 5×5 Regelbasen (Anhang A) haben die Form

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_i) \text{ UND } (\Delta E \text{ IST } Y_j) \text{ DANN } (U \text{ IST } U_k) \quad (2.7)$$

respektive

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_i) \text{ UND } (\Delta E \text{ IST } Y_j) \text{ DANN } (\Delta U \text{ IST } \Delta U_l) \quad (2.8)$$

mit $X_i, Y_j, \Delta U_l, U_k \in \{NG, NM, NP, PM, PG\}$.

- Die Beschreibung der Zugehörigkeitsfunktionen $\tilde{\mu}_{X_i}$ und $\tilde{\mu}_{Y_j}$ erfolgt über Dreiecke und links- sowie rechtsseitige Halbtapeze (Bild 2.3). Fuzzy-Einermengen dienen zur Modellierung der Fuzzy-Referenzmengen der Konklusionen (Bild 2.4).

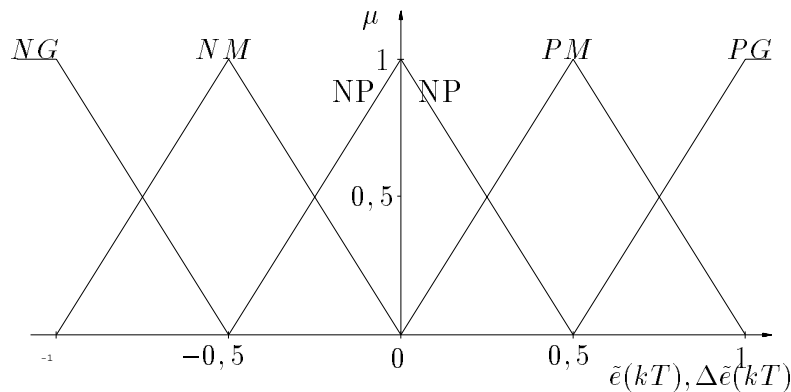


Bild 2.3: Fuzzy-Referenzmengen für die Eingangsgrößen $\tilde{e}(kT)$ und $\Delta\tilde{e}(kT)$

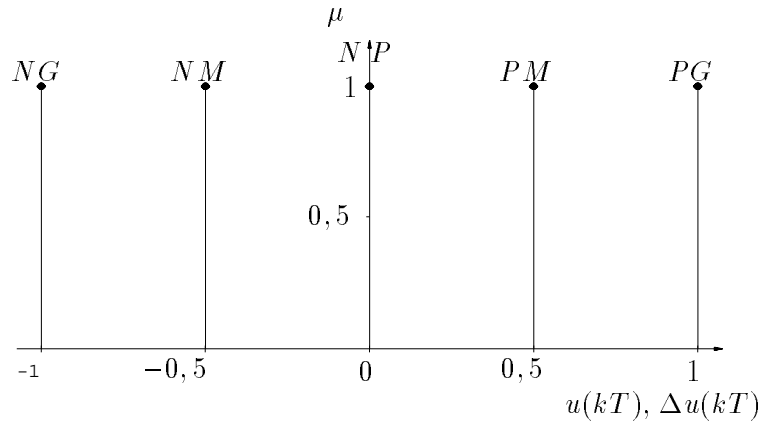


Bild 2.4: Fuzzy-Referenzmengen für die Ausgangsgrößen $u(kT)$ und $\Delta u(kT)$

- Die Defuzzifizierung wird über die Schwerpunktmethode für Fuzzy-Einermengen

$$u(kT) = \left(\frac{\sum_{k=1}^5 \left(\sum_{r=1}^{25} \top_{ap,(k,r)}(\mu_X, \mu_Y) \right) m_k}{\sum_{k=1}^5 \left(\sum_{r=1}^{25} \top_{ap,(k,r)}(\mu_X, \mu_Y) \right)} \right)_{PD}, \text{ sowie} \quad (2.9)$$

$$\Delta u(kT) = \left(\frac{\sum_{l=1}^5 \left(\sum_{r=1}^{25} \top_{ap,(l,r)}(\mu_X, \mu_Y) \right) m_l}{\sum_{l=1}^5 \left(\sum_{r=1}^{25} \top_{ap,(l,r)}(\mu_X, \mu_Y) \right)} \right)_{PI} \quad (2.10)$$

realisiert (Bertram u. a. 1994).

- Mit Hilfe der Skalierungsfaktoren wird der Fuzzy-Regler an die Regelstrecke angepasst.

2.3 Fuzzy-Synthese-Regler

Erfolgt die Zuordnung eines Systems zu mehr als einer Systemklasse werden dementsprechend mehr als ein Standard-Fuzzy-Regler (Fuzzy-PI- und Fuzzy-PD-Regler) zugewiesen. Die Standard-Fuzzy-Regler werden parallel geschaltet. Ihre Ausgangsgrößen $u_{PI}(kT)$ und $u_{PD}(kT)$ sowie die normierte Regelabweichung $\tilde{e}(kT)$ sind die Eingangsgrößen eines weiteren Fuzzy-Reglers, des Fuzzy-Synthese-Reglers, der zu den beiden Standard-Fuzzy-Reglern in Reihe geschaltet wird (Bild 2.5). Strukturell kann der Fuzzy-Synthese-Regler wie folgt beschrieben werden:

- Die Ausgangsgrößen der Standard-Fuzzy-Regler $u_{PI}(kT)$ und $u_{PD}(kT)$ sowie die normierte Regelabweichung $\tilde{e}(kT)$ dienen als Eingangsgrößen des Fuzzy-Synthese-Reglers. Nur die normierte Regelabweichung $\tilde{e}(kT)$ wird fuzzifiziert. Die Stell-

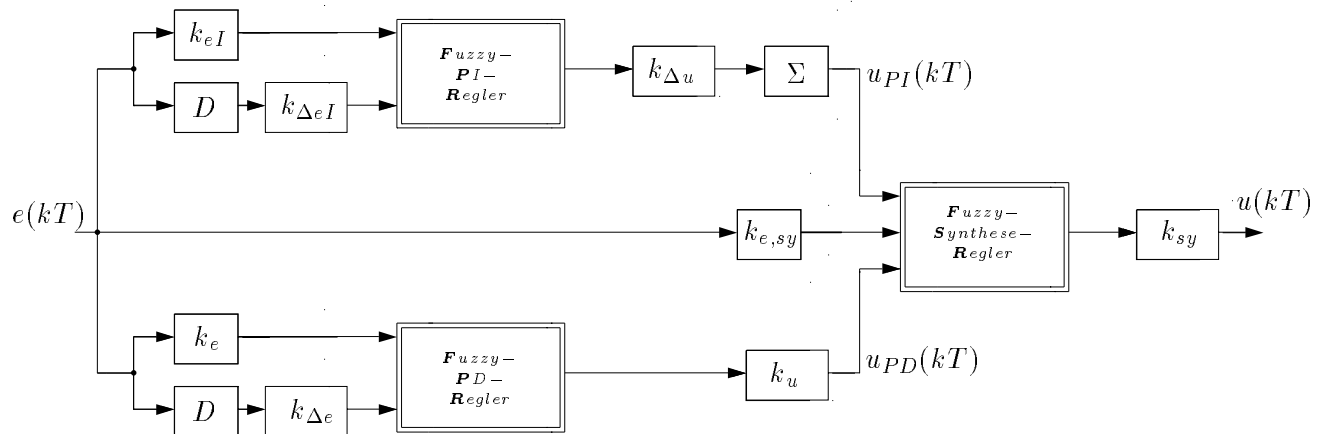


Bild 2.5: Parallelgeschaltete Standard-Fuzzy-Regler mit in Reihe geschaltetem Fuzzy-Synthese-Regler

größen $u_{PI}(kT)$ und $u_{PD}(kT)$ bilden die Modalwerte m (Pedrycz 1993) der Fuzzy-Ausgangsmenge. Damit sind die Modalwerte der Fuzzy-Ausgangsmenge

$$m_{PI}(kT) = u_{PI}(kT) \text{ und} \quad (2.11)$$

$$m_{PD}(kT) = u_{PD}(kT) \quad (2.12)$$

zeitabhängige Größen.

- Die Reglerausgangsgröße ist die Stellgröße $u_{sy}(kT)$.
- Der Wertebereich der Eingangsgröße $e(kT)$ ist auf den Definitionsbereich $\mathbb{D}_N = [-1; 1]$ normiert. Die Normierung der anderen Eingangsgrößen $u_{PI}(kT)$ und $u_{PD}(kT)$ ergibt sich aus der Definition der Standard-Fuzzy-Regler.
- Die Partitionierung der normierten Regelabweichung $\tilde{e}(kT)$ erfolgt auf der Basis dreier Fuzzy-Referenzmengen. Mit diesen sind die drei linguistischen Variablen negativ N , in der Nähe des Nullpunktes NP und positiv P assoziiert (Bild 2.6).
- Mit den Zugehörigkeitsfunktionen

$$\mu_N(\tilde{e}(kT)) = \begin{cases} 1 & \forall \tilde{e}(kT) < m_N \\ \frac{c_N - \tilde{e}(kT)}{\beta_N} & \forall \tilde{e}(kT) \in]m_N, c_N[\\ 0 & \forall \tilde{e}(kT) > c_N \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\mu_{NP}(\tilde{e}(kT)) = \begin{cases} 0 & \forall \tilde{e}(kT) \notin [c_{1,NP}, c_{2,NP}] \\ \frac{\tilde{e}(kT) - c_{1,NP}}{\alpha_{NP}} & \forall \tilde{e}(kT) \in [c_{1,NP}, m_{1,NP}[\\ 1 & \forall \tilde{e}(kT) \in [m_{1,NP}, m_{2,NP}] \\ \frac{c_{2,NP} - \tilde{e}(kT)}{\beta_{NP}} & \forall \tilde{e}(kT) \in]m_{2,NP}, c_{2,NP}] \end{cases} \quad (2.14)$$

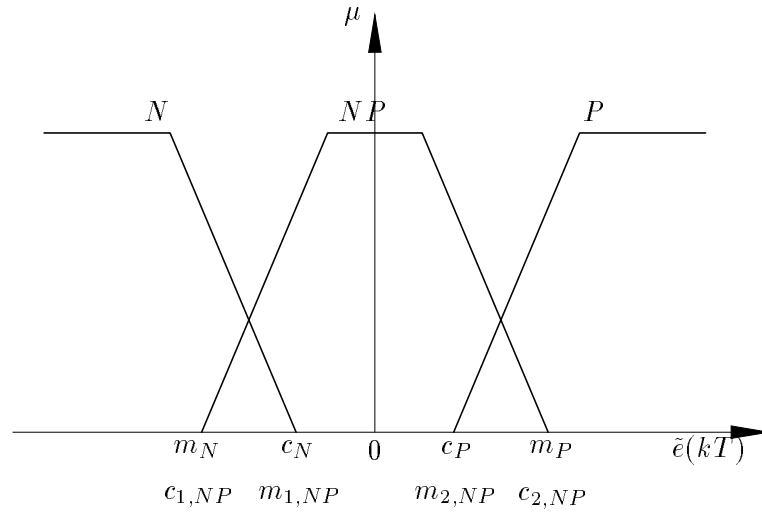


Bild 2.6: Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen der Prämissen des Fuzzy-Synthesereglers

$$\mu_P(\tilde{e}(kT)) = \begin{cases} 0 & \forall \tilde{e}(kT) < c_P \\ \frac{\tilde{e}(kT) - c_P}{\alpha_P} & \forall \tilde{e}(kT) \in [c_P, m_P[\\ 1 & \forall \tilde{e}(kT) \geq m_P \end{cases} \quad (2.15)$$

werden die Zugehörigkeiten erklärt. α_s und β_s , mit $s \in N, NP, P$, sind die linke bzw. rechte Spannweite. Sie beeinflussen die Schärfe der Fuzzy-Referenzmenge (Pedrycz 1993) und werden wie folgt definiert:

$$\beta_N = c_N - m_N \quad (2.16)$$

$$\beta_{NP} = c_{2,NP} - m_{2,NP} \quad (2.17)$$

$$\alpha_{NP} = m_{1,NP} - c_{1,NP} \quad (2.18)$$

$$\alpha_P = m_P - c_P \quad (2.19)$$

- Die Regelbasis besteht aus den relationalen Regeln:

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_N) \text{ DANN } (U \text{ IST } U_{PI}), \quad (2.20)$$

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_{NP}) \text{ DANN } (U \text{ IST } U_{PD}) \text{ und} \quad (2.21)$$

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_P) \text{ DANN } (U \text{ IST } U_{PI}) . \quad (2.22)$$

Für die Modalwerte m_i und die Einflußbereiche c_i , mit $i \in \{N, NP, P\}$ werden die folgenden Beziehungen festgelegt:

$$m_N = c_{1,NP} \quad (2.23)$$

$$c_N = m_{1,NP} \quad (2.24)$$

$$c_P = m_{2,NP} \quad (2.25)$$

$$m_P = c_{2,NP} . \quad (2.26)$$

Sie dienen zur Anpassung des Fuzzy-Synthese-Reglers an die Gegebenheiten des technischen Systems. Außerhalb der rechten und der linken Spannweite ist die Stellgröße $u_{SY}(kT)$ des Fuzzy-Synthese-Reglers gleich der Stellgröße eines der Standard-Fuzzy-Regler. Im Bereich der Spannweiten wird die Stellgröße $u_{SY}(kT)$ aus den Ausgangssignalen der Standard-Fuzzy-Regler generiert.

- Die Fuzzy-Referenzmengen der Konklusionen werden als Fuzzy-Einermengen mit zeitabhängigen Modalwerten $m_i(kT)$ der Fuzzy-Ausgangsmengen U_{PI} und U_{PD} modelliert (Bild 2.7).

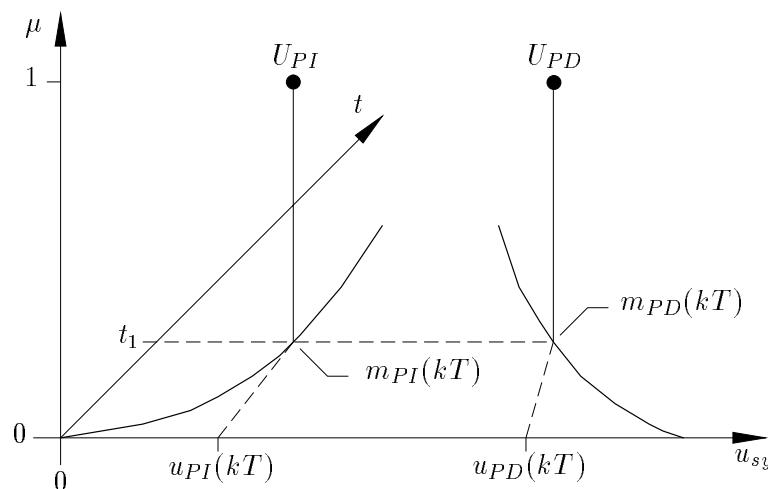


Bild 2.7: Unterteilung der Fuzzy-Referenzmengen der Konklusionen des Fuzzy-Synthese-Reglers

- Über die Schwerpunktmethod für Fuzzy-Einermengen erfolgt die Defuzzifizierung in der $\mu - u$ -Ebene zum Zeitpunkt kT (Bertram u. a. 1994).

$$u_{sy}(kT) = \frac{\mu_N m_{PI}(u_{PI}(kT)) + \mu_{NP} m_{PD}(u_{PD}(kT)) + \mu_P m_{PI}(u_{PI}(kT))}{\mu_N + \mu_{NP} + \mu_P} \quad (2.27)$$

Das prinzipielle Vorgehen bei dem Verfahren der modularen Fuzzy-Reglersynthese kann in den folgenden drei Teilschritten zusammengefasst werden:

1. Klassifizierung des Systems anhand der Zeitreihenobjektmatrix \mathbf{Z} auf der Grundlage von A-priori-Wissen oder durch Verwendung eines unscharfen Klassifikators (Berger 1994b).
2. Auslegung der Fuzzy-Regler-Module durch Auswahl und Implementierung der konfektionierten relationalen Fuzzy-Regler.
3. Anpassen des resultierenden Fuzzy-Reglers an das technische System durch Abgleich der Skalierungsfaktoren und Einflußbereiche.

3 Reglersynthese am realen Versuchsträger „Langer Zylinder“

3.1 Klassifizierung des Versuchsträgers

Das offene System kann bezüglich der Lageregelung der natürlichen Systemklasse „I-System“ zugeordnet werden. Die weitere Klassifizierung erfolgt auf der Basis der zeitlichen Änderung der Zeitreihenobjektmatrix, wie schon in Berger (1994c) und Engmann (1996) durchgeführt. Dadurch erfolgt eine weitergehende Zuordnung des offenen Systems zu der natürlichen Systemklasse „oszillatorisch“ mit der semantischen Systemklasse „mittel oszillatorisch“ (Tabelle 3.1). Dementsprechend wird der Regelstrecke für die Lageregelung ein Fuzzy-Regler für mehrere Systemklassen zugewiesen (Bild 2.5).

	klassifiziert	nicht klassifiziert
oszillatorisch	×	
schwach oszillatorisch		×
mittel oszillatorisch	×	
stark oszillatorisch		×
monoton		×
I-System	×	
Totzeit-System		×
statische Nichtlinearitäten		×

Tabelle 3.1: Klassifizierung des Versuchsträgers „Langer Zylinder“

3.2 Lageregelung des Versuchsträgers

Die Parametrierung des Fuzzy-Reglers für mehrere Systemklassen (Bild 2.5) erfolgt durch acht Skalierungsfaktoren (k_{eI} , $k_{\Delta eI}$, k_e , $k_{\Delta e}$, $k_{e, sy}$, $k_{\Delta u}$, k_u sowie k_{sy}) auf der Basis heuristischer Reglereinstellung. Für die vorliegende Regelstrecke ist eine grundsätzliche Parametrierung mit den Werten:

$$k_{eI} = k_e = k_{e, sy} = 1 \quad (3.1)$$

$$k_{\Delta eI} = k_{\Delta e} = 0,01 \quad (3.2)$$

$$k_{\Delta u} = 0,8 \quad (3.3)$$

$$k_u = 1,0 \quad (3.4)$$

$$c_P = 0,4 \quad (3.5)$$

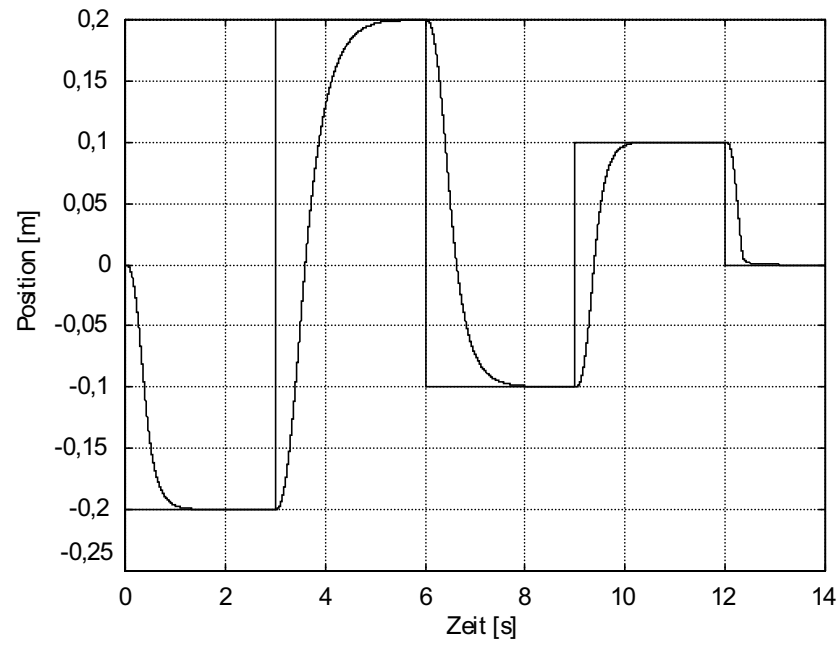


Bild 3.2: Systemantwort auf Führungssprungfolgen mit konfektioniertem Fuzzy-Regler

4 Sollwertgenerierung

Eine Möglichkeit das Positionierverhalten einer Regelstrecke zu beeinflussen, besteht in der Verwendung einer Folgeregelung unter Vorgabe einer Sollwertkurve $s(t)$ (Bild 4.1). Das Ziel besteht darin, der Regelstrecke ein gewünschtes Positionierverhalten im Rahmen der physikalischen Möglichkeiten aufzuprägen.

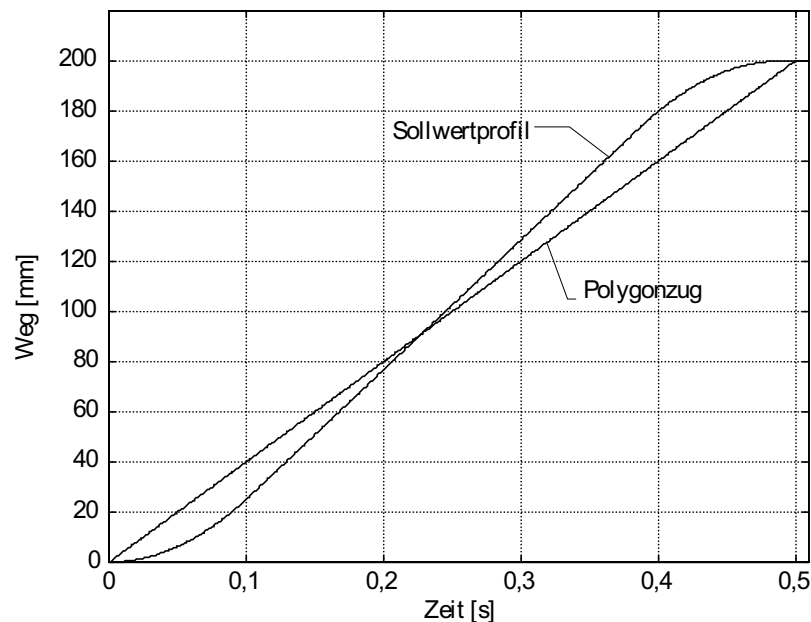


Bild 4.1: Vorgabe eines Weg-Zeit-Polygonzugs und Generierung einer Sollwertkurve

Die Sollwertkurve wird für die vorliegende Regelung aus der Vorgabe eines Weg-Zeit-Polygonzugs generiert (Bild 4.1). Charakteristische Punkte ($s(t = 0)$ und $s(t) = s_{soll}$) des Weg-Zeit-Polygonzugs müssen in der generierten Sollwertkurve enthalten sein. Für die Generierung wird eine Maximal-Geschwindigkeit v_{max} vorgegeben, die, genau wie die entstehende Maximalbeschleunigung, für die Regelstrecke realistisch sein muß. Der Übergang von $v = 0$ m/s auf v_{max} und von v_{max} auf $v = 0$ m/s wird mittels zweier zum Ursprung punktsymmetrischer Parabeln generiert. Der bei einer Positionsvorgabe zweiter Ordnung entstehende Ruck wird in Kauf genommen.

Die Grundeinstellung des konfektionierten Fuzzy-Reglers für mehrere Systemklassen für die Beaufschlagung mit Führungssprüngen ist auch für die Folgeregelung geeignet. Mit dem Skalierungsfaktor k_{sy} wird der Regler entsprechend der Maximal-Geschwindigkeit v_{max} eingestellt.

Der konfektionierte Fuzzy-Regler für mehrere Systemklassen zeigt seine Tauglichkeit auch für die Folgeregelung an der realen Regelstrecke, wie in den Bildern 4.2 und 4.3 zu sehen ist. Wie auch bei konventionellen Regelungskonzepten stellt sich mit dem Fuzzy-Regler ein geschwindigkeitsproportionaler Schleppfehler ein, der umso kleiner wird, je höher der

Skalierungsfaktor k_{sy} gewählt werden kann. Die Höhe des Skalierungsfaktor k_{sy} wird durch den ab einer bestimmten Größe von k_{sy} eintretenden Einschwingvorgang bei Erreichen der Endposition begrenzt. Der Schleppfehler ist bei der Verwendung der gene-

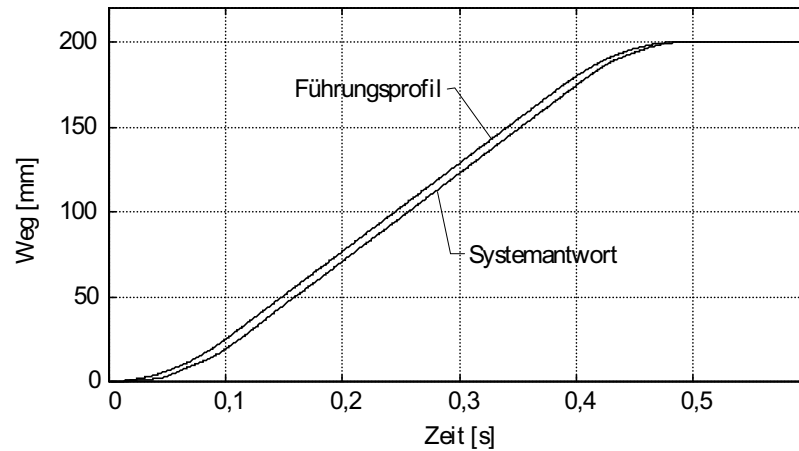


Bild 4.2: Systemantwort auf sollwertgeneriertes Führungsprofil mit konfektioniertem Fuzzy-Regler

rierten Sollwertkurve kleiner als bei der Sollwertvorgabe mittels einfachen Polygonzugs. Die Positioniergüte liegt in beiden Fällen bei ca. $2\mu\text{m}$.

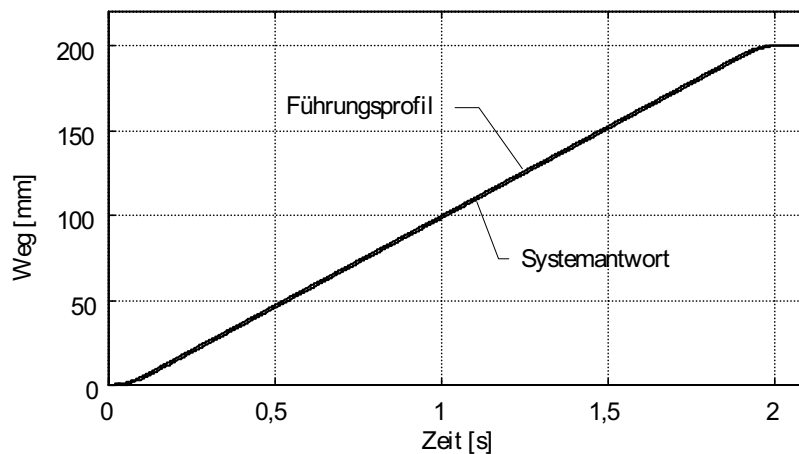


Bild 4.3: Systemantwort auf sollwertgeneriertes Führungsprofil mit konfektioniertem Fuzzy-Regler

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Forschungsbericht behandelte die Positionsregelung eines hydraulischen Translationsantriebs auf der Basis eines konfektionierten Fuzzy-Reglers für mehrere Systemklassen. Dabei zeigte sich, daß Regelungskonzept sowohl für die sprungförmige Vorgabe von Sollwerten als auch für die Vorgabe von Sollwertprofilen geeignet ist.

Der Positionsregelung bei einer Vorgabe einer Führungssprungfolge liegt das übergeordnete Regelungsziel zugrunde, die Anschlagzeit t_{an} bei Vorgabe einer maximalen Überschwingweite σ_v ($\sigma_v < 0,1\%$) zu minimieren. Wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, läßt sich mit dem Fuzzy-Regler eine hohe Regelgüte erzielen. Ohne weitere Zusatzmaßnahmen liegt die Positioniergenauigkeit bei ca. $2 \mu\text{m}$. Nachteilig ist die hohe Anzahl von Parametern, mit denen der Regler auf die Regelstrecke abgestimmt werden muß. Die Einstellung des Reglers kann nach erfolgter Abstimmung mit nur einem Parameter, dem Skalierungsfaktor k_{sy} , erfolgen. Der Skalierungsfaktor k_{sy} weist eine Abhängigkeit von dem Betrag der Sprunghöhe auf. Es ist denkbar, die Parameterempfindlichkeit durch die Verwendung eines Gain-Scheduling auf der Basis eines selbstlernenden Algorithmus zu beheben.

Die Positionsregelung mit Vorgabe eines generierten Führungsprofils auf der Basis einer Sollwertgenerierung ist ein Verfahren, das Positionierverhalten einer Regelstrecke zu beeinflussen. Die Sollwertgenerierung basiert auf der Vorgabe einer Maximalgeschwindigkeit v_{max} und zweier charakteristischer Punkte ($s(t) = 0$ und $s(t) = s_{soll}$). Das gewonnene Führungsprofil ist punktsymmetrisch zu $s(t) = \frac{s_{soll}}{2}$. Nach Abstimmung des Reglers auf die Regelstrecke kann der Regler über den Skalierungsfaktor k_{sy} eingestellt werden. Mit diesem Verfahren wird eine Positioniergenauigkeit von ca. $2 \mu\text{m}$ erzielt. Ein geschwindigkeitsproportionaler Schleppfehler kann beobachtet werden. Der Skalierungsfaktor k_{sy} ist von der Maximalgeschwindigkeit v_{max} abhängig. Der Einsatz des Fuzzy-Reglers „Tote-Zone“ läßt eine Reduzierung des Schleppfehlers erwarten.

6 Literaturverzeichnis

- Analog Devices** 1990. *RTI 800/815. Software Manual.* Norwood/USA: .
- Berger, M.** 1994a. *Analytische Darstellung von Standard-Fuzzy-Reglern.* Forschungsbericht 19/94 MSRT. Universität Duisburg.
- Berger, M.** 1994b. *Klassifizierung und Reglersynthese für Prozesse, die sich aus verschiedenen Systemklassen zusammensetzen.* Forschungsbericht 17/94 MSRT. Universität Duisburg.
- Berger, M.** 1994c. *Konfektionierte relationale Fuzzy-Regler für Systemklassen.* Forschungsbericht 16/94 MSRT. Universität Duisburg.
- Bertram, T., F. Svaricek, T. Bindel, R. Böhm, H. Kiendl, B.-M. Pfeiffer und M. Weber.** 1994. Fuzzy Control: Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. *Automatisierungstechnik* **at** 7. 322–326.
- Breunig, A.** 1996. *Modulare Fuzzy-Reglersynthese für einen pneumatischen Translationsantrieb mit Servo-Druckregelventilen.* Diplomarbeit MSRT. Universität Duisburg.
- Engmann, B.** 1996. *Konfektionierte Fuzzy-Regler zur Geschwindigkeitsregelung eines hydraulischen Translationsantriebes.* Forschungsbericht 6/96 MSRT. Universität Duisburg.
- Heidenhain** 1994. *Benutzerhandbuch IK 120 PC-Zählerkarte.* Traunreut: .
- Kahlert, J. und H. Frank.** 1993. *Fuzzy-Logic und Fuzzy-Control.* Braunschweig: Vieweg.
- Margono, B. S.** 1996. *Entwurf und Erprobung einer Fuzzy-Regelung für eine Bauteilprüfmaschine.* Studienarbeit MSRT. Universität Duisburg.
- Pedrycz, W.** 1993. *Fuzzy control and fuzzy systems.* Taunton/England: Research Studies Press.
- Schwarz, H. und M. Senger.** 1997. Output Feedback Stabilization of Hydraulik Drives Based on Quadratic Approximations and Canonical Observers. *Fifth Symposium on Robot Control SYROCO'97.* Nantes, France. (angenommener Beitrag).
- Zadeh, L. A.** 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8. 338–353.

A Karnaugh-Tafeln

		$\Delta\tilde{e}(kT)$				
		NG	NM	NP	PM	PG
$\tilde{e}(kT)$	NG	NM	NM	NM	NM	NM
	NM	NP	NM	NM	NM	NM
	NP	PM	PM	NP	NM	NM
	PM	PM	PM	PM	PM	NP
	PG	PM	PM	PM	PM	PM

Tabelle A.1: Karnaugh-Tafel des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse oszillatorisch mit der semantischen Systemklasse stark oszillatorisch

		$\Delta\tilde{e}(kT)$				
		NG	NM	NP	PM	PG
$\tilde{e}(kT)$	NG	NM	NM	NG	NG	NG
	NM	NP	NM	NM	NM	NM
	NP	PM	PM	NP	NM	NM
	PM	PM	PM	PM	PM	NP
	PG	PG	PG	PG	PM	PM

Tabelle A.2: Karnaugh-Tafel des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse oszillatorisch mit der semantischen Systemklasse mittel oder schwach oszillatorisch

		$\Delta\tilde{e}(kT)$				
		NG	NM	NP	PM	PG
$\tilde{e}(kT)$	NG	NM	NM	NG	NG	NG
	NM	NP	NM	NM	NM	NM
	NP	PM	NP	NP	NP	NM
	PM	PM	PM	PM	PM	NP
	PG	PG	PG	PG	PM	PM

Tabelle A.3: Karnaugh-Tafel des Fuzzy-PD-Reglers für die natürliche Systemklasse I -System

B Kennfelder

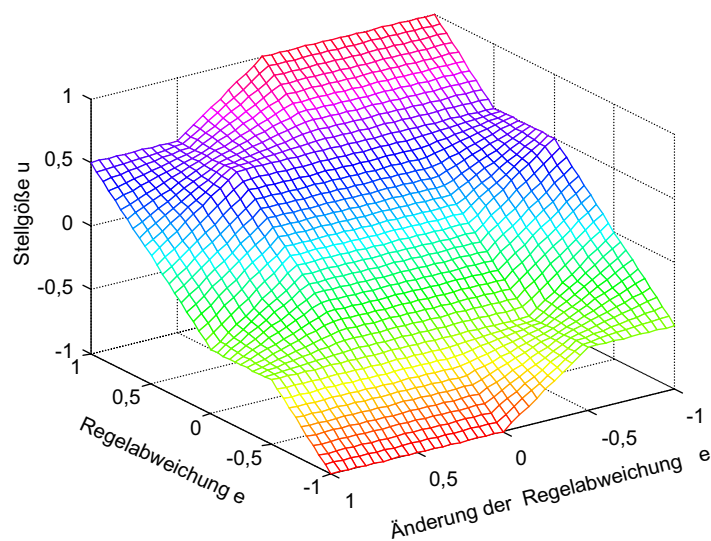


Bild B.1: Kennfeld des Fuzzy-PD-Reglers für die natürliche Systemklasse I-System

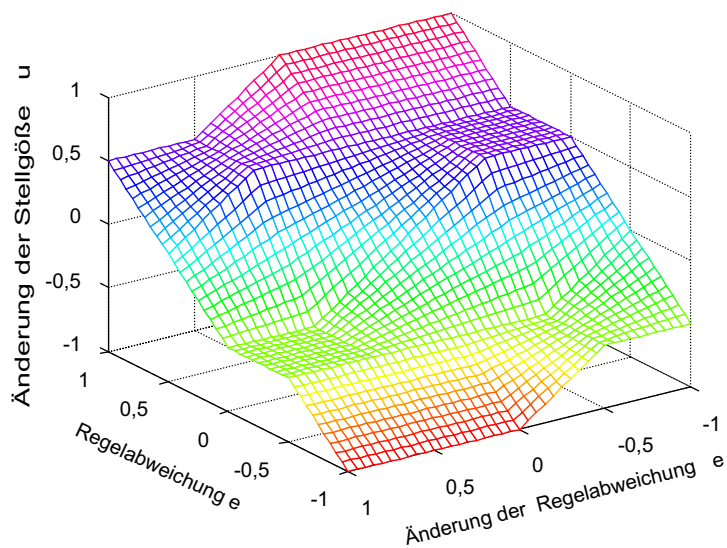


Bild B.2: Kennfeld des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse oszillatorisch mit den semantischen Systemklassen mittel und schwach oszillatorisch

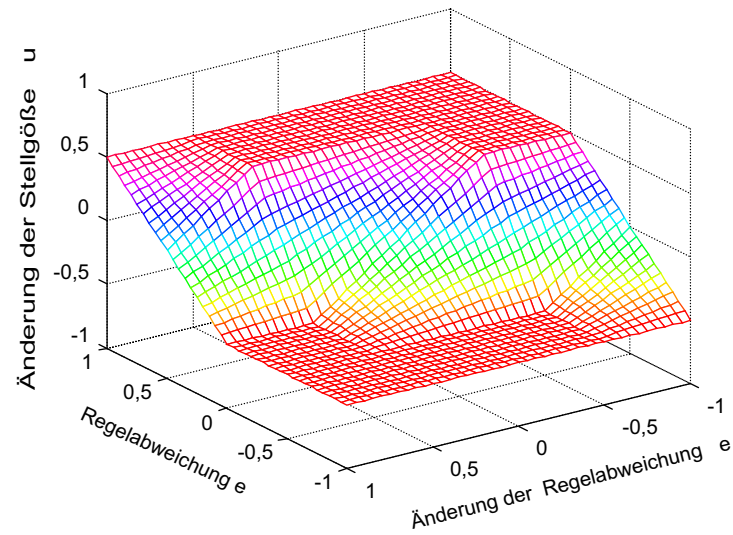


Bild B.3: Kennfeld des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse oszillatorisch mit der semantischen Systemklasse stark oszillatorisch

C Simulationsergebnisse

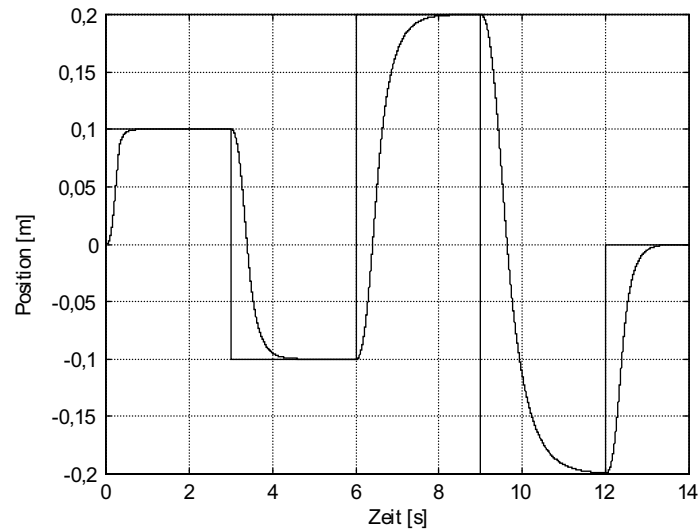


Bild C.1: Systemantwort auf Führungssprungfolgen mit konfektioniertem Fuzzy-Regler

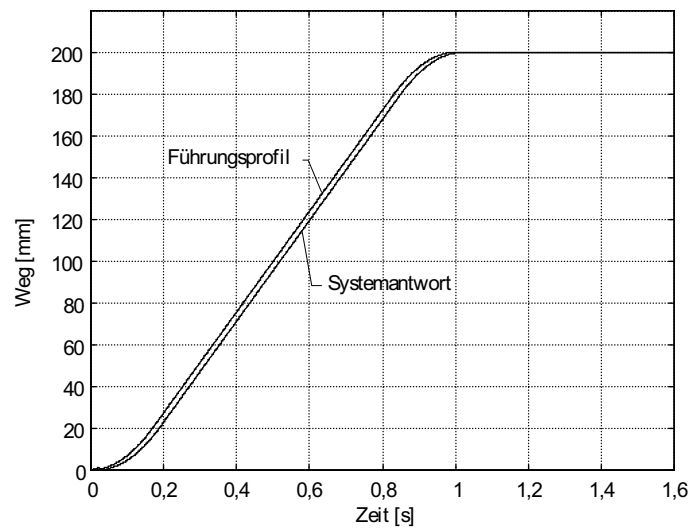


Bild C.2: Systemantwort auf sollwertgeneriertes Führungsprofil mit konfektioniertem Fuzzy-Regler