

Klassifizierung und Reglersynthese für Prozesse, die sich aus verschiedenen Systemklassen zusammensetzen

Michael Berger

Forschungsbericht Nr. 17/94

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Übersicht: In diesem Bericht wird die grundsätzliche Verwendbarkeit von Standard–Fuzzy–Reglern für verschieden zusammengesetzte Systeme untersucht. Den Schwerpunkt dieser Untersuchungen bilden Prozesse, die sich aus den Systemklassen *I–System* und *oszillatorisch* oder *monoton* zusammensetzen. Die Klassifikation sowie die Reglersynthese werden an einem linearen sowie an einem nichtlinearen Drehschwingersystem dokumentiert. Des Weiteren wird eine Modifikation der Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler) vorgestellt. Dabei wird der Skalierungsfaktor der Änderung der Stellgröße in Abhängigkeit der Regelabweichung und der Änderung der Regelabweichung über einem nichtlinearen relationalen Zusammenhang beschrieben.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
1 Einleitung	1
1.1 Standard–Fuzzy–Regler	2
2 Klassifizierung	4
3 Reglersynthese für zwei Systemklassen	6
4 Reglersynthese am Beispiel eines Drehschwingersystems	9
4.1 Linearer Drehschwinger	9
4.1.1 Klassifizierung des linearen Drehschwingers	10
4.1.2 Regelung des linearen Drehschwingers	12
4.2 Realer Drehschwinger	14
4.2.1 Klassifizierung des nichtlinearen Drehschwingers	15
4.2.2 Regelung des nichtlinearen Drehschwingers	18
5 Standard–Fuzzy–Regler mit Fuzzy–$k_{\Delta u}$–Adaption	25
5.1 Regelung des Drehschwingersystems mit den modifizierten Standard–Fuzzy–Reglern	29
6 Zusammenfassung und Ausblick	31
7 Literaturverzeichnis	33
Anhang	35
A Stellgrößenverläufe	35
B Messungen des Winkels φ_2 für verschiedene Sollwerte w	36

Nomenklatur

a	:	Betrag der Toten-Zone
c_F	:	Federsteifigkeit
$c_{1,2}$:	Begrenzung des Einflußbereiches der Fuzzy-Mengen
Σ	:	Summation
d	:	Dämpfung
D	:	Differenzierer
e	:	Regelabweichung
\tilde{e}	:	normierte Regelabweichung
e_∞	:	bleibende Regelabweichung
Δe	:	Änderung der Regelabweichung
$\Delta \tilde{e}$:	normierte Änderung der Regelabweichung
k	:	diskretes Zeitargument
k_e	:	Skalierungsfaktor der Regelabweichung des Fuzzy-PD-Reglers
k_{eI}	:	Skalierungsfaktor der Regelabweichung des Fuzzy-PI-Reglers
$k_{e,sy}$:	Skalierungsfaktor der Regelabweichung des <i>Fuzzy-Synthese-Reglers</i>
$k_{\Delta e}$:	Skalierungsfaktor der Änderung der Regelabweichung des Fuzzy-PD-Reglers
$k_{\Delta eI}$:	Skalierungsfaktor der Änderung der Regelabweichung des Fuzzy-PI-Reglers
k_u	:	Skalierungsfaktor der Stellgröße des Fuzzy-PD-Reglers
$k_{\Delta u}$:	Skalierungsfaktor der Änderung der Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers
k_{sy}	:	Skalierungsfaktor der Stellgröße des <i>Fuzzy-Synthese-Reglers</i>
K_k	:	Systemklassen
m	:	Modalwert
NL	:	Statische Nichtlinearität
R_A	:	Widerstand
R_r	:	r -te relationale Regel
t	:	Zeit
T	:	Abtastzeit
T_M	:	Meßzeit
u	:	Stellgröße
u_{PD}	:	Stellgröße des Fuzzy-PD-Reglers
u_{PI}	:	Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers
Δu_{PI}	:	Änderung der Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers
u_a	:	Spannung
u_{off}	:	Offset der Stellgröße
Δu_{off}	:	Offset der Änderung der Stellgröße
Δu_{PI}	:	Änderung der Stellgröße des Fuzzy-PI-Reglers

\ddot{u}	:	Übersetzungsverhältnis
w	:	Führungsgröße
y	:	Systemantwort

Mengen:

\mathbb{D}_N	:	Definitionsbereich normierter Größen
GR	:	Fuzzy-Menge <i>groß</i>
K_m	:	Fuzzy-Referenzmengen der Ausgangsgröße Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$
KL	:	Fuzzy-Menge <i>klein</i>
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>
NPK	:	Fuzzy-Menge <i>in der Nähe des Nullpunktes klein</i>
NSK	:	Fuzzy-Menge <i>negativ sehr klein</i>
P	:	Fuzzy-Menge <i>positiv</i>
PG	:	Fuzzy-Menge <i>positiv groß</i>
PM	:	Fuzzy-Menge <i>positiv mittel</i>
PSK	:	Fuzzy-Menge <i>positiv sehr klein</i>
X_i	:	Fuzzy-Referenzmenge der Eingangsgröße normierte Regelabweichung $\tilde{\epsilon}$
Y_j	:	Fuzzy-Referenzmenge der Eingangsgröße normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{\epsilon}$
U_k	:	Fuzzy-Referenzmenge der Ausgangsgröße Stellgröße u
ΔU_l	:	Fuzzy-Referenzmenge der Ausgangsgröße Änderung der Stellgröße Δu

Unscharfe Größen:

E	:	fuzzifizierte Größe $\tilde{\epsilon}$
ΔE	:	fuzzifizierte Größe $\Delta \tilde{\epsilon}$
U	:	fuzzifizierte Größe u
ΔU	:	fuzzifizierte Größe Δu
$K_{\Delta u}$:	fuzzifizierte Größe $k_{\Delta u}$

Vektoren und Matrizen:

A	:	Systemmatrix
G	:	Gewichtsmatrix
m	:	Merkmalsvektor
m_{is}	:	Merkmalsvektor zur Klassifikation von I-Systemen
u	:	Testsignalvektor

z	:	Zeitreihenobjektvektor
Δz	:	Zeitliche Änderung des Zeitreihenobjektvektors
Z	:	Zeitreihenobjektmatrix
ΔZ	:	Zeitliche Änderung der Zeitreihenobjektmatrix

Griechische Buchstaben:

α	:	Erfülltheitsgrad
α_s	:	linke Spannweite der Fuzzy–Referenzmenge
β_s	:	rechte Spannweite der Fuzzy–Referenzmenge
η	:	Wirkungsgrad
Θ	:	Trägheitsmoment
λ	:	Eigenwert
μ_A	:	Zugehörigkeitsgrad zur Menge A
φ_1	:	Drehwinkel der Masse 1 des Drehschwingersystems
φ_2	:	Drehwinkel der Masse 2 des Drehschwingersystems
$\dot{\varphi}$:	Drehwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$:	Drehwinkelbeschleunigung
ψ	:	Spulenfluß
ω_o	:	Eigenfrequenz

Indizierung:

$(\cdot)^T$:	Transponierte Matrix bzw. transponierter Vektor
$(\cdot)_{i,j,k,l}$:	Laufindex
ISE	:	Integralkriterium des quadratischen Fehlers (integral squared error)
ITAE	:	zeitbeschwertes Integralkriterium des absoluten Fehlers (integral of time multiplied absolute value of error)

1 Einleitung

Nachdem in Berger (1994a) eine grundsätzliche Einteilung von Systemen in natürliche und semantische Systemklassen mittels eines unscharfen Klassifikators (Bothe 1993, Bocklisch 1987b, Schroer, Frey, Vater und Klein 1994) durchgeführt und Standard–Fuzzy–Regler für Systemklassen nach heuristischen Gesichtspunkten (Lenat 1983) erstellt wurden, wird in diesem Bericht die Systematik des Regelungskonzeptes der Standard–Fuzzy–Regler auf Prozesse erweitert, die sich aus mehr als einer Systemklasse zusammensetzen. Die Schwerpunkte bilden hier die natürlichen Systemklassen *I–System* und die Systemklassen *oszillatorisch* und *monoton*. Die natürliche Systemklasse *oszillatorisch* unterteilt sich weiter in die semantischen Systemklassen

- *schwach oszillatorisch*,
- *mittel oszillatorisch* und
- *stark oszillatorisch*.

Es wird gezeigt, daß sich die Klassifikation (Nagao 1990), wenn ein Objekt (charakterisiert durch einen Satz von Meßdaten am realen System) unter anderem zur Systemklasse *I–System* gehört, wesentlich vereinfachen läßt in der Form, daß die in Berger (1994a) aufgestellten Merkmale zur Klassifikation weiter verwendet werden können. Wenn nicht der Zeitreihenobjektvektor \mathbf{z} bzw. die Zeitreihenobjektmatrix \mathbf{Z} (Bocklisch 1987a) sondern die zeitliche Änderung des Zeitreihenobjektvektors $\Delta\mathbf{z}$ bzw. die zeitliche Änderung der Zeitreihenobjektmatrix $\Delta\mathbf{Z}$ zur Klassifizierung verwendet wird.

In Abschnitt 3 wird aufgezeigt, wie eine mögliche Kombination zweier Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PD–Regler und Fuzzy–PI–Regler) aussehen kann, wenn der Prozeß zu zwei Systemklassen gehört. Zu diesem Zweck wird ein *Fuzzy–Synthese–Regler* entwickelt, der als Eingangsgrößen die Stellgrößen u_{PI} und u_{PD} der parallel geschalteten Standard–Fuzzy–Regler und die normierte Regelabweichung \hat{e} hat. Der *Fuzzy–Synthese–Regler* ist in Reihe zum Prozeß geschaltet. Die Besonderheit dieses *Fuzzy–Synthese–Reglers* liegt in den zeitabhängigen Modalwerten m (Böhme 1993, Pedrycz 1993) der Fuzzy–Referenzmengen der Konklusionen.

Bei der Zuordnung der Standard–Fuzzy–Regler werden zunächst sämtliche Parameter (Skalierungsfaktoren k , Modalwerte m und Begrenzungen des Einflußbereiches c der Fuzzy–Referenzmengen) sowie die Regelbasis der Standard–Fuzzy–Regler aufgrund der einmaligen Auslegung der Standard–Fuzzy–Regler bezüglich der Systemklassen (Berger 1994b) übernommen, das heißt, es werden keine Anpassungen der Parameter an das physikalische System des Drehschwingers vorgenommen.

In einem zweiten Schritt wird die Anpassungsfähigkeit des Regelungskonzeptes der Standard–Fuzzy–Regler dokumentiert, in dem die Modalwerte m und die Begrenzungen des

Einflußbereiches c (Böhme 1993, Kruse, Gebhardt und Klawonn 1993) der Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse des *Fuzzy–Synthese–Reglers* nach heuristischen Verfahren verändert werden.

Desweiteren werden die Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler) in der Form modifiziert bzw. erweitert, daß nicht ein konstanter Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ (*global* definiert), sondern ein Skalierungsfaktor der Form $k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$ (*lokal* definiert) verwendet wird, mit der normierten Regelabweichung

$$\tilde{e}(kT) = (w(kT) - y(kT)) k_e \quad (1.1)$$

und der normierten Änderung der Regelabweichung

$$\Delta \tilde{e}(kT) = \left(\frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \right) k_{\Delta e} . \quad (1.2)$$

Der funktionale Zusammenhang wird hier jedoch nicht wie bei Peng, Liu und Yamakawa (1988) durch eine lineare Funktionsvorschrift realisiert, sondern durch einen nichtlinearen Funktionszusammenhang. Dieser nichtlineare Funktionszusammenhang wird als linguistische Beschreibung formuliert und in Form eines zusätzlichen Fuzzy–Reglers (*Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption*) im eigentlichen Fuzzy–PI–Regler implementiert. Diese zusätzliche *Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption* besitzt die Eingangsgröße normierte Regelabweichung \tilde{e} und normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ sowie den Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ als Ausgangsgröße.

Die Klassifizierung und die Reglersynthese werden an einem linearen Simulationsmodell sowie an einem realen Drehschwingersystem dokumentiert. Das reale Drehschwingersystem (Bertram 1993) zeichnet sich besonders durch seine zahlreichen Nichtlinearitäten aus. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick in Abschnitt 6 schließen den Forschungsbericht.

1.1 Standard–Fuzzy–Regler

Die verwendeten Standard–Fuzzy–Regler für die Systemklassen sind grundsätzlich gleich aufgebaut und besitzen die Merkmale:

- Als Eingangsgröße ist die normierte Regelabweichung \tilde{e} und die normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ definiert.
- Ausgangsgröße ist die Stellgröße u bzw. die Änderung der Stellgröße Δu .
- Der Regelsatz ist vollständig und eindeutig (Drechsel, Stauch und Pandit 1994).
- Die Wertebereiche der Eingangsgrößen e und Δe und der Wertebereich der Ausgangsgröße u bzw. Δu sind auf dem Definitionsbereich $\mathbb{D}_N = [-1; 1]$ normiert.

- Die Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse sind orthogonal (Rommelfanger 1993).
- Die Prämissenauswertung wird über das algebraische Produkt (Böhme 1992) realisiert.
- Die Regelbasis wird durch 25 relationale Fuzzy–Regeln der Form

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_i) \text{ UND } (\Delta E \text{ IST } Y_j) \text{ DANN } (U \text{ IST } U_k) \quad (1.3)$$

bzw.

$$\text{WENN } (E \text{ IST } X_i) \text{ UND } (\Delta E \text{ IST } Y_j) \text{ DANN } (\Delta U \text{ IST } \Delta U_l) \quad (1.4)$$

mit

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

gebildet.

- Die Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{X_i}(\tilde{\epsilon})$ und $\mu_{Y_j}(\Delta \tilde{\epsilon})$ werden über Dreiecke, halbe Trapeze^L und halbe Trapeze^R beschrieben und die Fuzzy–Referenzmengen der Konklusionen sind als Fuzzy–Einermengen (Bertram u.a. 1994) modelliert (Bild 1.1)(Berger 1994b).

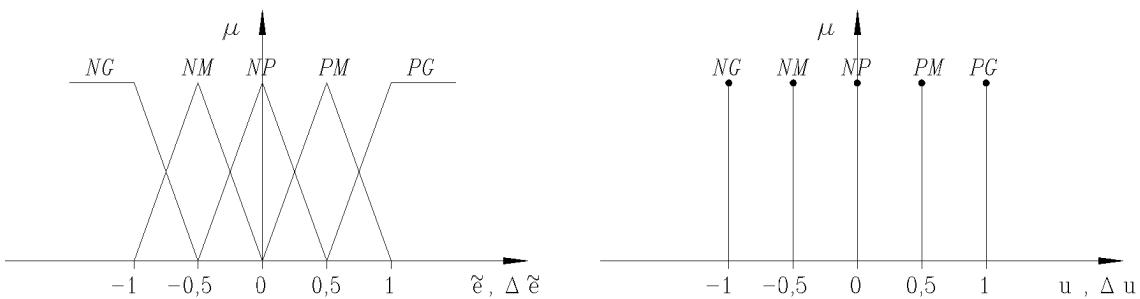


Bild 1.1: Fuzzy–Referenzmengen der Partialprämissen X_i und Y_j (links) und der Konklusionen U_k und ΔU_l (rechts)

- Die Defuzzifizierung erfolgt über die Schwerpunktmethode für Fuzzy–Einermengen (Kahlert und Frank 1993, Bertram u.a. 1994).

2 Klassifizierung

Die Klassifizierung eines Systems (Bild 2.1) (Bothe 1993, Tilli 1993) in Systemklassen K_k erfolgt über eine Erregung des offenen Systems mit einem Testsignalvektor

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

mit den Amplituden $u_{o,1} < u_{o,2} < \dots < u_{o,n}$ (Berger 1994b).

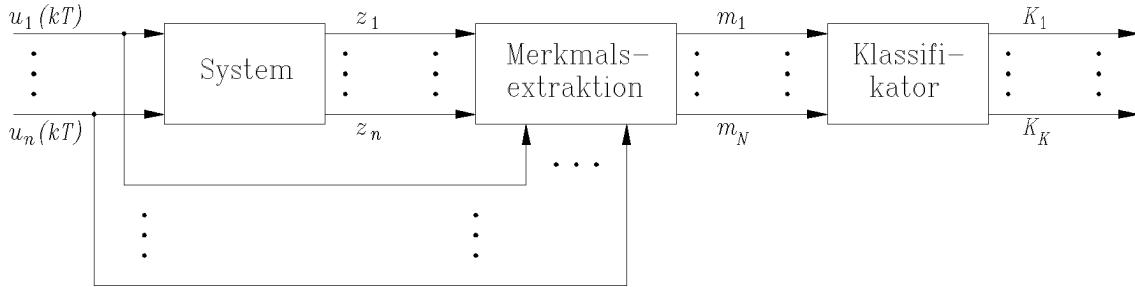


Bild 2.1: Vorgehensweise bei der Klassifikation eines Systems (Objekt)

Um die Meßdaten am offenen System zu reduzieren, wird im ersten Klassifikationsschritt ein dreidimensionaler Testsignalvektor verwendet. Die Amplituden sind so gewählt, daß annähernd der gesamte Stellgrößenbereich abgedeckt ist. Entsprechend wird eine $m \times 3$ Zeitreihenobjektmatrix \mathbf{Z} zur Klassifizierung ausgewertet (Bocklisch 1987a)

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & y_{m3} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

wobei m die Anzahl der Abtastungen ist. Wird ein Objekt der Systemklasse I -System zugeordnet, so wird aus Gründen der Vereinfachung der Klassifizierung nicht weiter der Zeitreihenobjektvektor \mathbf{z} bzw. die Zeitreihenobjektmatrix \mathbf{Z} zur Merkmalsextraktion verwendet, sondern die zeitliche Änderung der Zeitreihenobjektvektoren $\Delta\mathbf{z}$ in Form eines einfachen Differenzenquotienten. Das heißt, zur weiteren Klassifizierung wird die zeitliche Änderung der Zeitreihenobjektmatrix $\Delta\mathbf{Z}$ in der Form

$$\Delta\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \frac{y_{21} - y_{11}}{T} & \frac{y_{22} - y_{12}}{T} & \frac{y_{23} - y_{13}}{T} \\ \frac{y_{31} - y_{21}}{T} & \frac{y_{32} - y_{22}}{T} & \frac{y_{33} - y_{23}}{T} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{y_{m1} - y_{(m-1)1}}{T} & \frac{y_{m2} - y_{(m-1)2}}{T} & \frac{y_{m3} - y_{(m-1)3}}{T} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ausgewertet. Aus diesem Grund entsteht an der Stelle der Klassifikation eines I-Systems eine Verzweigung des Ablaufplans der Klassifizierung (Bild 2.2). Eine weitere Verzweigung in der Klassifikation ergibt sich, wenn ein Objekt der Systemklasse *statische Nichtlinearitäten* zugeordnet wird. Ist dies der Fall und konnte der Betrag der statischen Nichtlinearität (Tote-Zone, Begrenzung) nicht anhand der Erregung durch den Testsignalvektor \mathbf{u} ermittelt werden, wird die Sprungfunktion $u(kT) = u_{o,1}(kT)$ (erstes Element des Testsignalvektors \mathbf{u}) systematisch um eine Amplitude von $\Delta u_o = 0,1$ bzw. wenn nötig um $\Delta u_o = 0,01$ erhöht, um so einen ersten Wert für den Betrag der statischen Nichtlinearität $NL(x_e, x_a)$ (Schwarz 1991) zu erhalten. In Bild 2.2 ist der Ablaufplan der Klassifizierung dargestellt.

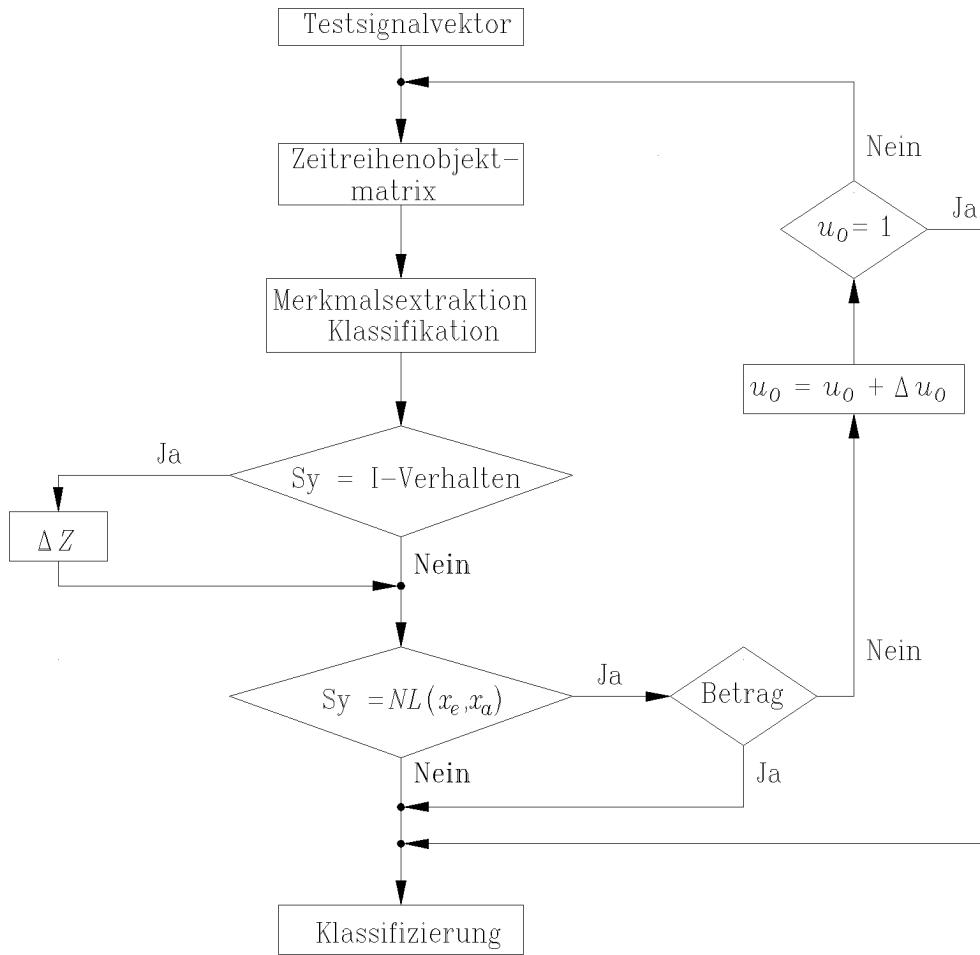


Bild 2.2: Ablaufplan der Klassifizierung

3 Reglersynthese für zwei Systemklassen

Wird ein Objekt mehr als einer Systemklasse zugeordnet, so werden dem System auch mehr als ein Standard–Fuzzy–Regler zugeordnet. Bei der hier entwickelten Reglersynthese für die Systemklassen *I–System* (Fuzzy–PD–Regler) und für die Systemklassen *oszillatorisch* und *monoton* (Fuzzy–PI–Regler) werden die Standard–Fuzzy–Regler parallel und ein zusätzlicher Fuzzy–Regler (*Fuzzy–Synthese–Regler*) in Reihe zur Strecke geschaltet (Bild 3.1).

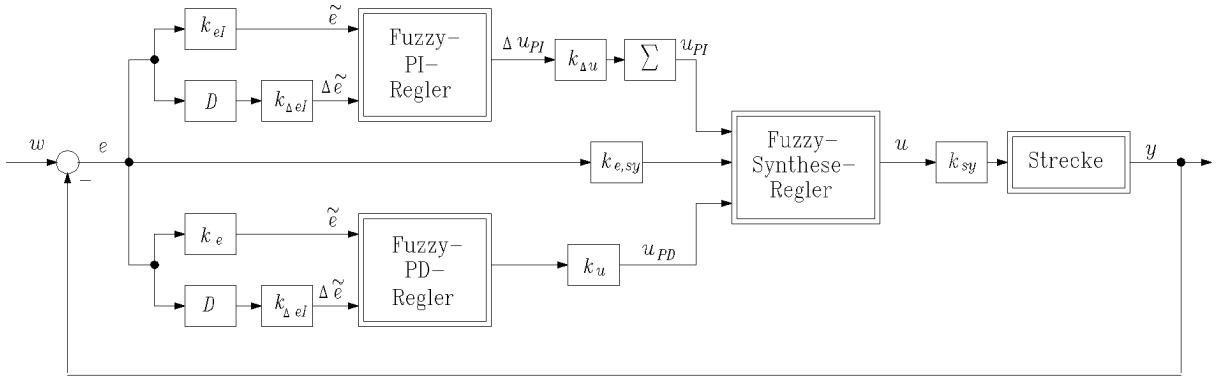


Bild 3.1: Regelkreis mit Parallelschaltung der Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler und Fuzzy–PD–Regler) und der Reihenschaltung des *Fuzzy–Synthese–Reglers*

Der *Fuzzy–Synthese–Regler* hat als Eingangsgrößen die Stellgröße u_{PI} , die Stellgröße u_{PD} und die normierte Regelabweichung \tilde{e} , sowie die Stellgröße u als Ausgangsgröße. Fuzzifiziert wird nur die normierte Regelabweichung \tilde{e} , die Stellgrößen u_{PI} und u_{PD} bilden die Modalwerte m (Böhme 1993, Pedrycz 1993) der Fuzzy–Ausgangsmengen. Die normierte Regelabweichung \tilde{e} wird durch drei Fuzzy–Referenzmengen partitioniert (Bild 3.2). Sie assoziieren die linguistischen Variablen *negativ*(N), *in der Nähe des Nullpunktes* (NP), sowie *positiv* (P). Die Fuzzy–Referenzmengen werden durch die Zugehörigkeitsfunktionen

$$\mu_N(\tilde{e}) = \begin{cases} 1 & \text{für } \tilde{e} < m_N \\ \frac{c_N - \tilde{e}}{\beta_N} & \text{für } \tilde{e} \in]m_N, c_N] \\ 0 & \text{für } \tilde{e} > c_N \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\mu_{NP}(\tilde{e}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \tilde{e} \notin [c_{1,NP}, c_{2,NP}] \\ \frac{\tilde{e} - c_{1,NP}}{\alpha_{NP}} & \text{für } \tilde{e} \in [c_{1,NP}, m_{1,NP}[\\ 1 & \text{für } \tilde{e} \in [m_{1,NP}, m_{2,NP}] \\ \frac{c_{2,NP} - \tilde{e}}{\beta_{NP}} & \text{für } \tilde{e} \in]m_{2,NP}, c_{2,NP}] \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\mu_P(\tilde{e}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \tilde{e} < c_P \\ \frac{\tilde{e} - c_P}{\alpha_P} & \text{für } \tilde{e} \in [c_P, m_P[\\ 1 & \text{für } \tilde{e} \geq m_P \end{cases} \quad (3.3)$$

beschrieben.

Dabei wird α_s und β_s als *linke Spannweite* bzw. als *rechte Spannweite* bezeichnet mit $s \in \{N, NP, P\}$. Beide sind ein Maß für die Unschärfe der Fuzzy–Referenzmenge (Böhme 1993, Pedrycz 1993):

$$\beta_N = c_N - m_N \quad (3.4)$$

$$\beta_{NP} = c_{2,NP} - m_{2,NP} \quad (3.5)$$

$$\alpha_{NP} = m_{1,NP} - c_{1,NP} \quad (3.6)$$

$$\alpha_P = m_P - c_P \quad (3.7)$$

Wie sich die Stellgröße u zusammensetzt, wird anhand der augenblicklichen normierten Regelabweichung \tilde{e} entschieden. Die Regelbasis sieht wie folgt aus:

WENN	$(E \text{ IST } X_N)$	DANN	$(U \text{ IST } U_{PI})$
WENN	$(E \text{ IST } X_{NP})$	DANN	$(U \text{ IST } U_{PD})$
WENN	$(E \text{ IST } X_P)$	DANN	$(U \text{ IST } U_{PI})$

Durch die Modalwerte m_i und die Begrenzungen der Einflußbereiche c_i (Böhme 1993, Kruse, Gebhardt und Klawonn 1993) mit $i \in \{N, NP, P\}$ erfolgt die Anpassung an die spezielle Kombination der Standard–Fuzzy–Regler (*I–System* mit *stark oszillatorisch* oder mit *mittel oszillatorisch*), bei welcher normierten Regelabweichung \tilde{e} die Stellgröße u_{PI} oder u_{PD} allein oder als „Kombination“ als Stellgröße u auf den Prozeß gegeben wird. Da hier

$$m_N = c_{1,NP} \quad (3.8)$$

$$c_N = m_{1,NP} \quad (3.9)$$

$$c_P = m_{2,NP} \quad (3.10)$$

$$m_P = c_{2,NP} \quad (3.11)$$

gesetzt ist, ergibt sich die Stellgröße u als „Kombination“ nur im Bereich der *linken Spannweite* α_s und der *rechten Spannweite* β_s . Durch die Überschneidung der Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse (*linke* und *rechte Spannweite*) ist ein „weicher“ Übergang von dem Stellgrößenverlauf des Standard–Fuzzy–Reglers des I–Systems zum Stellgrößenverlauf des Standard–Fuzzy–Reglers der Systemklassen *oszillatorisch* und *monoton* möglich.

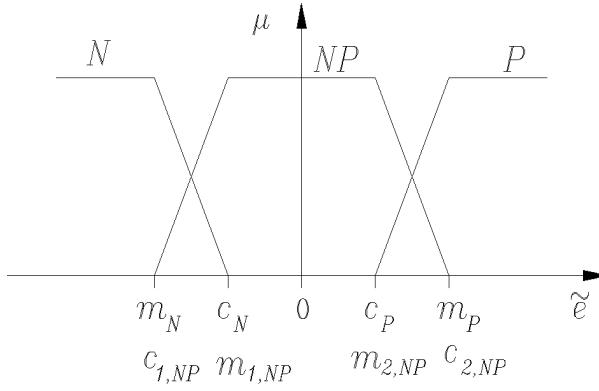


Bild 3.2: Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse X_i mit $i \in \{N, NP, P\}$

Die Regelbasis des *Fuzzy–Synthese–Reglers* sowie die Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse resultieren aus den grundsätzlich unterschiedlichen Verläufen der Stellgröße des Fuzzy–PD–Reglers gegenüber dem des Fuzzy–PI–Reglers (Anhang A). Die Fuzzy–Referenzmengen der Konklusionen werden als Fuzzy–Einermengen modelliert, wobei hier allerdings die Modalwerte m der Fuzzy–Ausgangsmengen U_{PI} und U_{PD} keinen festen Wert haben. Vielmehr sind die Stellgrößen u_{PI} und u_{PD} selbst die Modalwerte m der Fuzzy–Ausgangsmengen, das heißt, sie sind zeitabhängig. Die Fuzzy–Ausgangsmengen verlaufen in der u – t –Ebene entsprechend dem Stellgrößenverlauf der Standard–Fuzzy–Regler (Bild 3.3). Die Defuzzifizierung erfolgt durch die Schwerpunktmethode für Fuzzy–Einermengen in der μ – u –Ebene zum Zeitpunkt kT in der Form

$$u(kT) = \frac{\mu_N m_{PI}(u_{PI}(kT)) + \mu_{NP} m_{PD}(u_{PD}(kT)) + \mu_P m_{PI}(u_{PI}(kT))}{\mu_N + \mu_{NP} + \mu_P} . \quad (3.12)$$

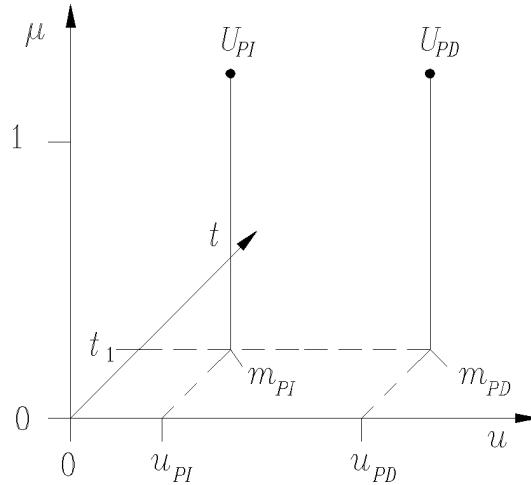


Bild 3.3: Fuzzy–Referenzmengen der Konklusionen U_{PI} und U_{PD} mit den Modalwerten $m_{PI} = f(u_{PI}(t))$ und $m_{PD} = f(u_{PD}(t))$ zum Zeitpunkt t_1 mit den Werten u_{PI} und u_{PD}

4 Reglersynthese am Beispiel eines Drehschwingersystems

4.1 Linearer Drehschwinger

Bei dem Drehschwinger handelt es sich um ein elektromechanisches System, bestehend aus Motor, Getriebe, Feder und zwei Schwungmassen Bild 4.1. Der Motor ist über das Getriebe mit der ersten Schwungmasse starr gekoppelt, über die Drehfeder ist die erste mit der zweiten Schwungmasse elastisch gekoppelt. Eine ausführliche Erläuterung des Systems ist in Wenzlawiak (1985) und Herrmann (1993) zu finden.

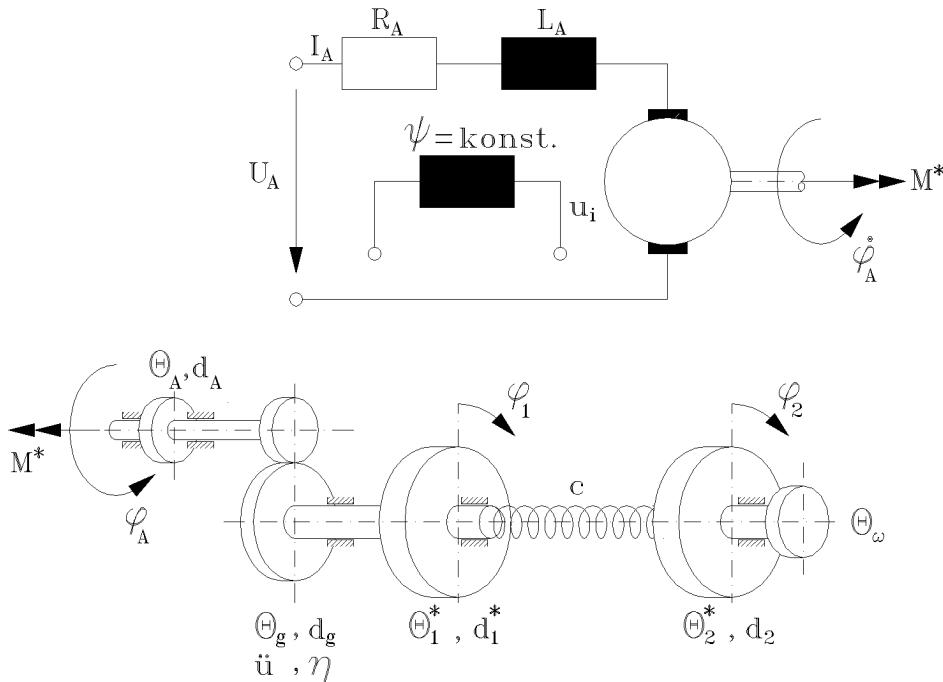


Bild 4.1: Elektromechanisches Ersatzsystem des Drehschwingers

Berücksichtigt man im ersten Ansatz die Nichtlinearitäten nicht, so ist das System durch folgende Bewegungsgleichungen (Kerkmann 1985) unter Vernachlässigung der kleinen Zeitkonstante des elektrischen Teilsystems gegenüber der Zeitkonstante des mechanischen Teilsystems beschrieben :

$$\Theta_1 \ddot{\varphi}_1(t) + d_1 \dot{\varphi}_1(t) + c(\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) = b u_a(t) \quad (4.1)$$

$$\Theta_2 \ddot{\varphi}_2(t) + d_2 \dot{\varphi}_2(t) + c(\varphi_2(t) - \varphi_1(t)) = 0 \quad (4.2)$$

mit

$$b = \psi \frac{\ddot{u} \eta}{R_A} .$$

Aufgrund von Messungen an dem System und von Herstellerangaben sind die Systemparameter bekannt (Wenzlawiak 1985). Es ergeben sich so folgende numerische Werte:

$$\begin{aligned}
 R_A &= 9,2 \Omega & d_1 &= 0,02796 \text{ Js} \\
 \psi &= 0,039 \text{ J/A} & c &= 0,0167 \text{ J} \\
 \ddot{u} &= 15,0 & \Theta_2 &= 0,00162 \text{ Js}^2 \\
 \eta &= 0,7 & d_2 &= 0,0006 \text{ Js} \\
 \Theta_1 &= 0,0021123 \text{ Js}^2
 \end{aligned}$$

4.1.1 Klassifizierung des linearen Drehschwingers

Zur Klassifikation wird das System durch den Testsignalvektor

$$\mathbf{u} = [0, 1, 0, 5, 1]^T \quad (4.3)$$

erregt und entsprechend dem Ablaufplan der Klassifizierung (Bild 2.2) ausgewertet. Die Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z}_1 und $\Delta\mathbf{z}_1$, welche unter anderem zur Merkmalsextraktion verwendet werden, sind in den Bildern 4.2 und 4.3 dargestellt. Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse der Klassifizierung.

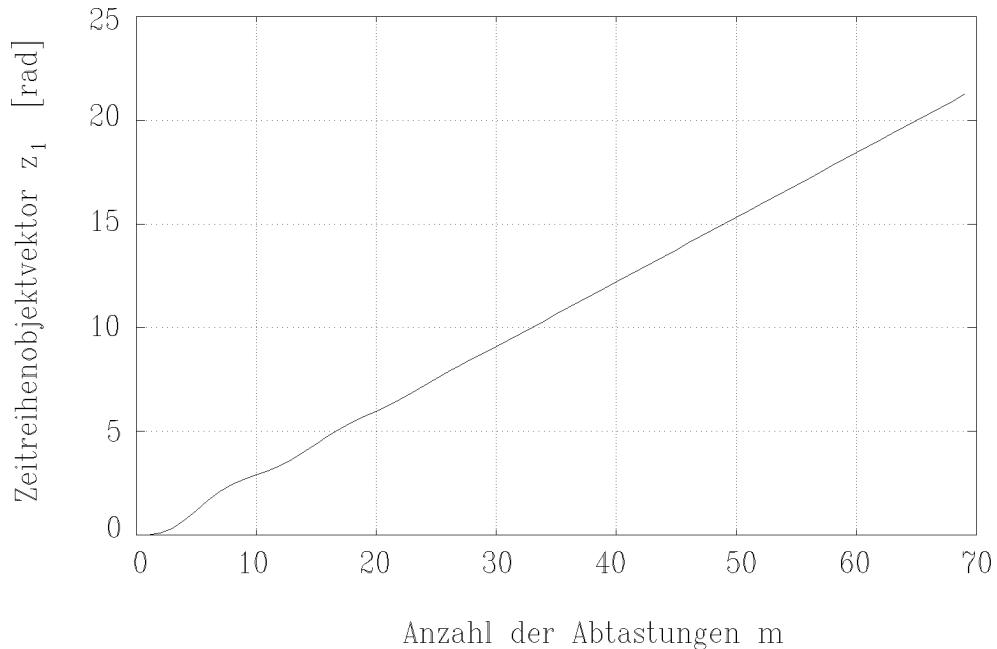


Bild 4.2: Zeitreihenobjektvektor \mathbf{z}_1

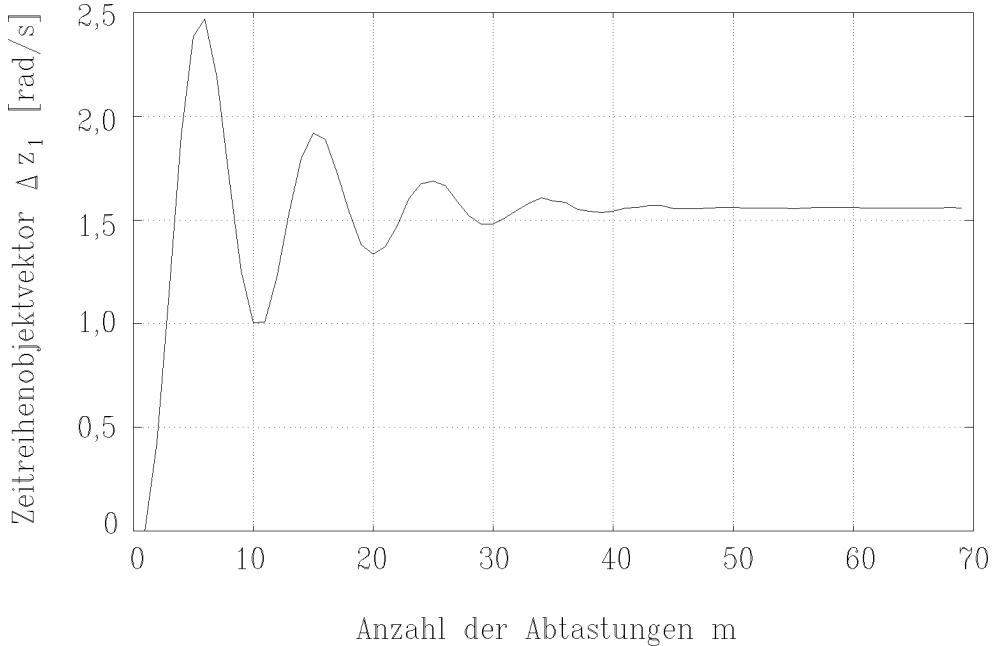


Bild 4.3: Zeitliche Änderung des Zeitreihenobjektvektors Δz_1

	klassifiziert	nicht klassifiziert
<i>oszillatorisch</i>	×	
<i>schwach oszillatorisch</i>		×
<i>mittel oszillatorisch</i>		×
<i>stark oszillatorisch</i>	×	
<i>monoton</i>		×
<i>I-System</i>	×	
<i>Totzeit-System</i>		×
<i>statische Nichtlinearitäten</i>		×

Tabelle 4.1: Klassifizierung des linearen Drehschwingersystems

Das offene System wird den Systemklassen *I-System* und *stark oszillatorisch* zugeordnet. Stellt man den Drehschwinger als lineares Zustandsmodell (Wend 1993) dar und berechnet die Eigenwerte λ der Systemmatrix \mathbf{A} , so ergeben sich folgende Eigenwerte λ (Konik und Sowa 1986):

$$\lambda_1 = 0,0 \quad , \quad \lambda_2 = -12,58 \quad , \quad \lambda_{3,4} = -0,478 \pm j3,29 \quad .$$

Das heißt, das offene System besitzt I-Verhalten und ein schlecht gedämpftes Schwingungsverhalten, welches die Zuordnung des Systems in die Systemklassen durch die Klassifikation bestätigt.

4.1.2 Regelung des linearen Drehschwingers

Nachdem die Klassifizierung abgeschlossen ist, werden entsprechend der Zuordnung des offenen Systems Standard–Fuzzy–Regler ausgewählt. Das heißt, dem System wird ein Fuzzy–PI–Regler mit der Regelbasis nach Tabelle 4.2 und ein Fuzzy–PD–Regler mit der Regelbasis nach Tabelle 4.3 zugeordnet. Die Standard–Fuzzy–Regler und der *Fuzzy–Synthese–Regler* werden, wie im Bild 3.1 dargestellt, verschaltet.

		$\Delta\tilde{e}$				
		NG	NM	NP	PM	PG
\tilde{e}	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 4.2: Karnaugh–Tafel des Fuzzy–PI–Reglers für die natürliche Systemklasse *oszillatorisch* mit der semantischen Systemklasse *stark oszillatorisch*

		$\Delta\tilde{e}$				
		NG	NM	NP	PM	PG
\tilde{e}	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 4.3: Karnaugh–Tafel des Fuzzy–PD–Reglers für die Systemklasse *I–System*

Die Werte für die Modalwerte m und die Begrenzung des Einflußbereiches c der Fuzzy–Eingangsmengen des *Fuzzy–Synthese–Reglers* bei dieser Systemklassenzugehörigkeit, welche unter heuristischen Gesichtspunkten (Lenat 1983) ermittelt wurden, lauten:

$$\begin{aligned} m_N &= c_{1,NP} = -1,0 , \\ c_N &= m_{1,NP} = -0,2 , \\ c_P &= m_{2,NP} = 0,2 , \\ m_P &= c_{2,NP} = 1,0 . \end{aligned}$$

In den Bildern 4.4 bzw. 4.5 sind die Simulationsergebnisse des geregelten linearen Drehschwingermodells für einen Sollwert von $w = 720$ Grad dargestellt. Die Bilder 4.4 und 4.5 demonstrieren das gute Führungsverhalten des Fuzzy–Reglers. Obwohl die Standard–Fuzzy–Regler anhand eines PT_2 –Systems bzw. eines I–Systems unter heuristischen Gesichtspunkten erstellt wurden und es sich bei dem linearen Drehschwinger um ein System höherer Ordnung handelt.

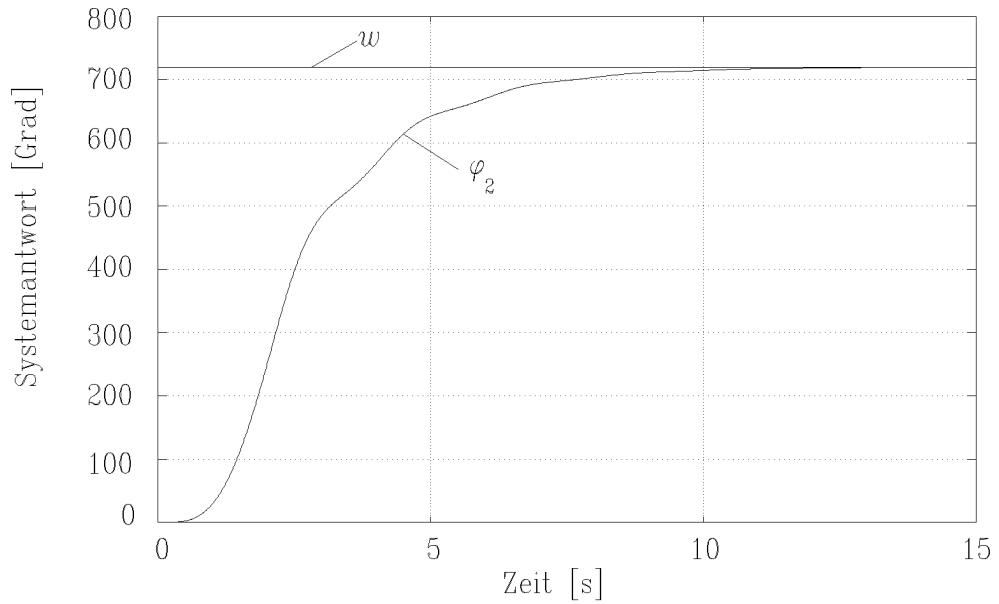


Bild 4.4: Drehwinkel φ_2 des linearen Drehschwingermodells für einen Sollwertsprung von $w = 720$ Grad

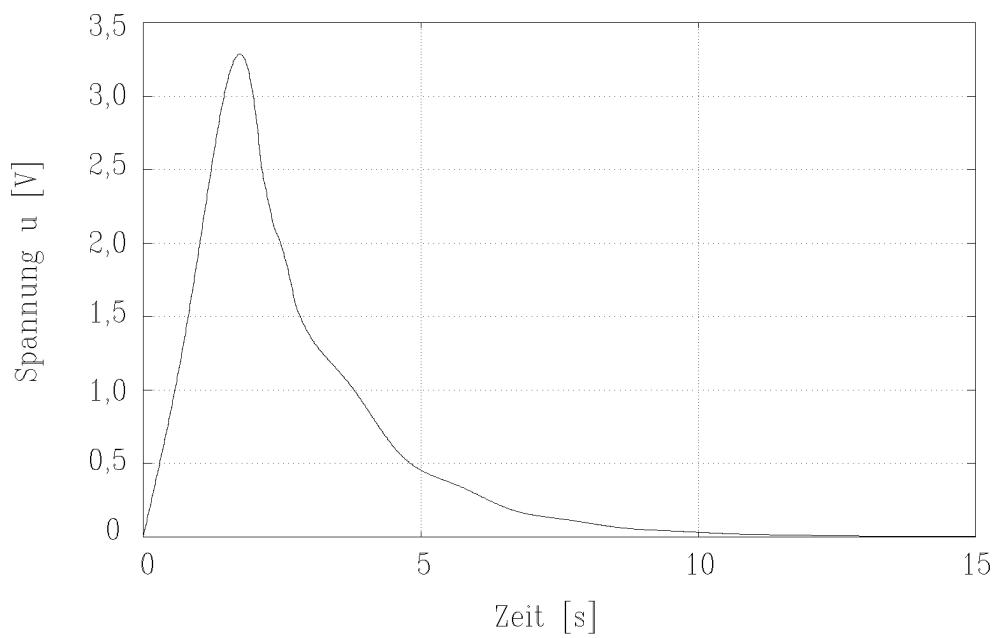


Bild 4.5: Spannung (Stellgröße) des linearen Drehschwingermodells für einen Sollwert- sprung von $w = 720$ Grad

4.2 Realer Drehschwinger

Nachdem die Klassifizierung und die Reglersynthese der Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler, Fuzzy–PD–Regler und *Fuzzy–Synthese–Regler*) an der Simulation eines linearen Drehschwingermodells dargestellt wurden, wird dieses Regelungskonzept jetzt am realen Drehschwinger dokumentiert (Bild 4.6).

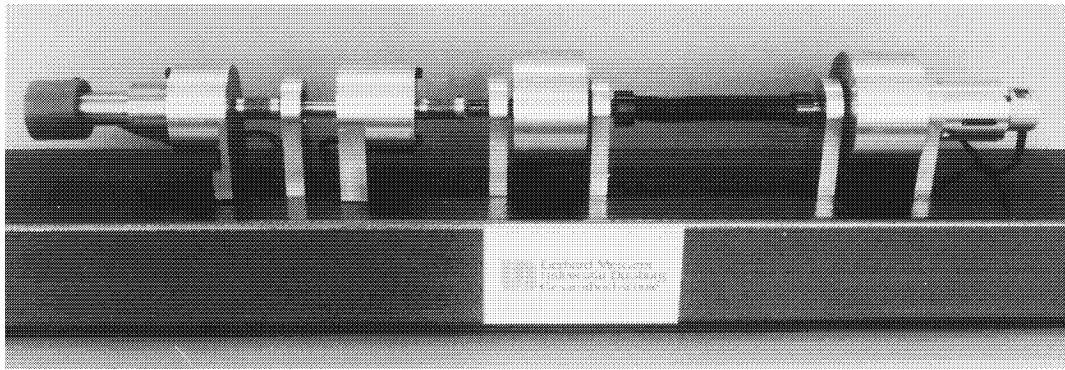


Bild 4.6: Versuchsträger

Das reale Drehschwingersystem zeichnet sich besonders durch seine zahlreichen Nichtlinearitäten aus. Zu nennen sind hier

- stark nichtlineare Federkennlinie,
- Lagerreibung,
- Getriebelose,
- Reibungseffekte zwischen Feder und Welle,
- Hysterese sowie
- Begrenzung der Stellgröße.

Zur Generierung der Stellgrößenspannung wird eine RTI–815 Karte (Analog Devices 1991) und zur Messung der Winkel φ_1 und φ_2 eine IK–120 inkrementale Zweiachs–Interface–Karte für inkrementale Meßsysteme (Heidenhain 1992) verwendet. Als Rechner wird ein 80386–PC mit einer Taktfrequenz von 33 MHz eingesetzt. Der verwendete Regelungsalgorithmus ist als C–Programm auf dem Rechner implementiert.

4.2.1 Klassifizierung des nichtlinearen Drehschwingers

Zur Klassifizierung wird das System durch einen Testsignalvektor

$$\mathbf{u} = [0, 1 \text{ V}, 5, 0 \text{ V}, 10, 0 \text{ V}]^T \quad (4.4)$$

erregt. Die Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z}_1 , \mathbf{z}_2 und \mathbf{z}_3 , welche zur Merkmalsextraktion verwendet werden, sind im Bild 4.7 dargestellt. In der Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der Klassifizierung dokumentiert.

Neben der Klassifizierung des Systems zur Systemklasse *I-System* und zur natürlichen Systemklasse *oszillatorisch* mit der semantischen Systemklasse *stark oszillatorisch* (über die zeitliche Änderung des Zeitreihenobjektvektors $\Delta\mathbf{z}_3$ (Bild 4.8)) wird das Drehschwinger- system aufgrund des Zeitreihenobjektvektors \mathbf{z}_1 (Bild 4.7) der natürlichen Systemklasse *statische Nichtlinearitäten* mit der semantischen Systemklasse *Tote-Zone* zugeordnet.

	klassifiziert	nicht klassifiziert
<i>oszillatorisch</i>	×	
<i>schwach oszillatorisch</i>		×
<i>mittel oszillatorisch</i>		×
<i>stark oszillatorisch</i>	×	
<i>monoton</i>		×
<i>I-System</i>	×	
<i>Totzeit-System</i>		×
<i>statische Nichtlinearitäten</i>	×	
<i>Zweipunktschalter</i>		×
<i>Dreipunktschalter</i>		×
<i>Tote-Zone</i>	×	
<i>Begrenzer</i>	×	

Tabelle 4.4: Klassifizierung des Drehschwingersystems

Um den Betrag der statischen Nichtlinearitäten, hier der toten Zone, zu ermitteln, wird das Testsignal systematisch in seiner Amplitude um $\Delta u_o = 0,1 \text{ V}$ erhöht. In Bild 4.9 sind die Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z}_4 , \mathbf{z}_5 und \mathbf{z}_6 des Systems im unteren Stellgrößenbereich ($u_o = 0,2 \text{ V}$, $u_o = 0,4 \text{ V}$ und $u_o = 0,8 \text{ V}$) dargestellt. Man erkennt hier, daß das System zuerst eine kleine Drehung vollzieht, um dann im Ruhezustand zu verharren. Dieses Verhalten ist typisch für den realen Prozeß und erschwert die Klassifikation. Mit dem Ziel, die Klassifizierung mit möglichst wenigen Merkmalsvektoren \mathbf{m} durchführen zu können, wird auf die Einführung neuer Merkmalsvektoren \mathbf{m} verzichtet.

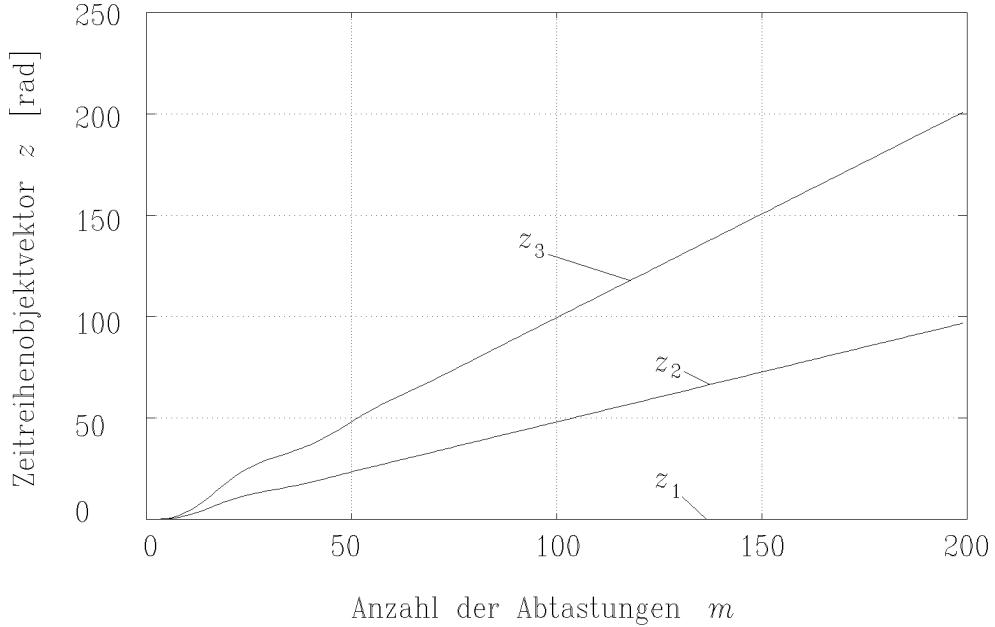


Bild 4.7: Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z}_1 , \mathbf{z}_2 und \mathbf{z}_3

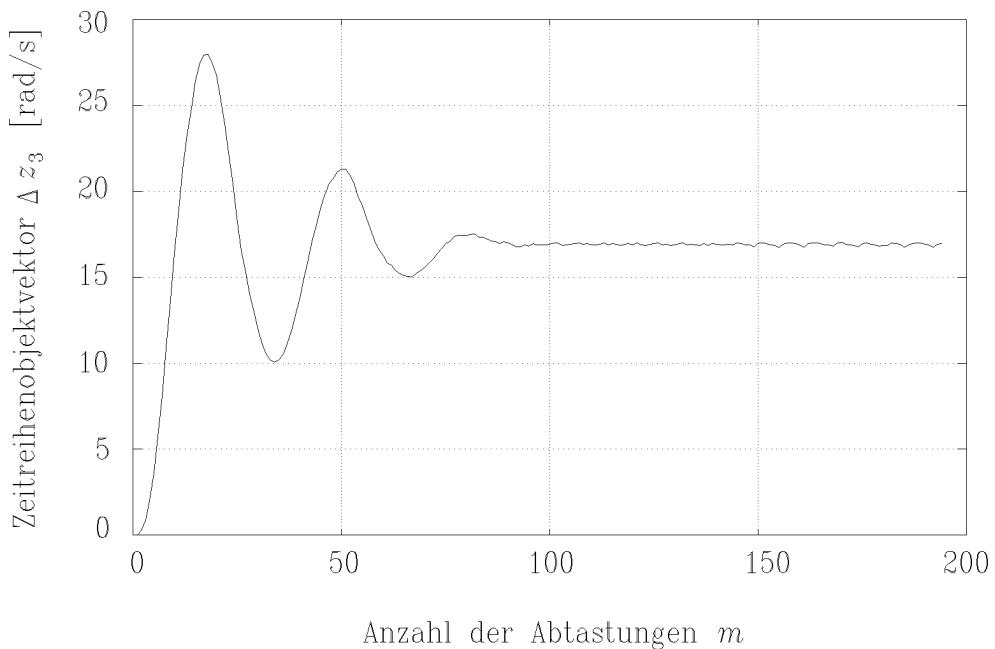


Bild 4.8: Zeitliche Änderung des Zeitreihenobjektvektors $\Delta \mathbf{z}_3$

Stattdessen wird der Betrag der toten Zone als zusätzlicher Parameter für den Fuzzy-Regler-Tote-Zone (Berger 1994b) verwendet, wenn das System der zuvor klassifizierten Systemklasse zugeordnet wird. In diesem Fall der Systemklasse *I-System*. Der Betrag der toten Zone liegt bei $a = 1,0$ V.

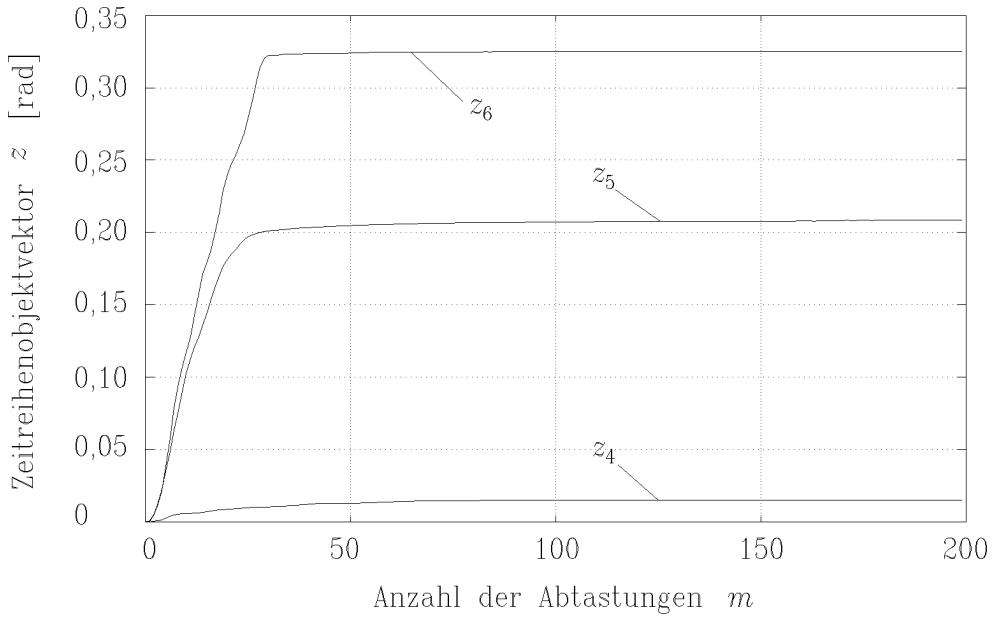


Bild 4.9: Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z}_4 , \mathbf{z}_5 und \mathbf{z}_6

Im Bild 4.10 ist der Verlauf des Merkmalsvektors \mathbf{m}_{is} zur Klassifizierung des I-Systems dargestellt. Das System wird der Systemklasse *I-System* zugeordnet, wenn der Merkmalsvektor \mathbf{m}_{is} einen Wert *in der Nähe des Nullpunktes* besitzt (Berger 1994a). Die in der Anfangsphase abweichenden Werte des Merkmalsvektors \mathbf{m}_{is} von den übrigen Werten entstehen aufgrund des oszillierenden Verhaltens des Systems. Sie beeinflussen die Klassifizierungen nicht, jedoch muß bei der Messung der Zeitreihenobjektvektoren \mathbf{z} darauf geachtet werden, daß die Meßzeit T_M so ist, bis die dynamischen Einflüsse abgeklungen sind.

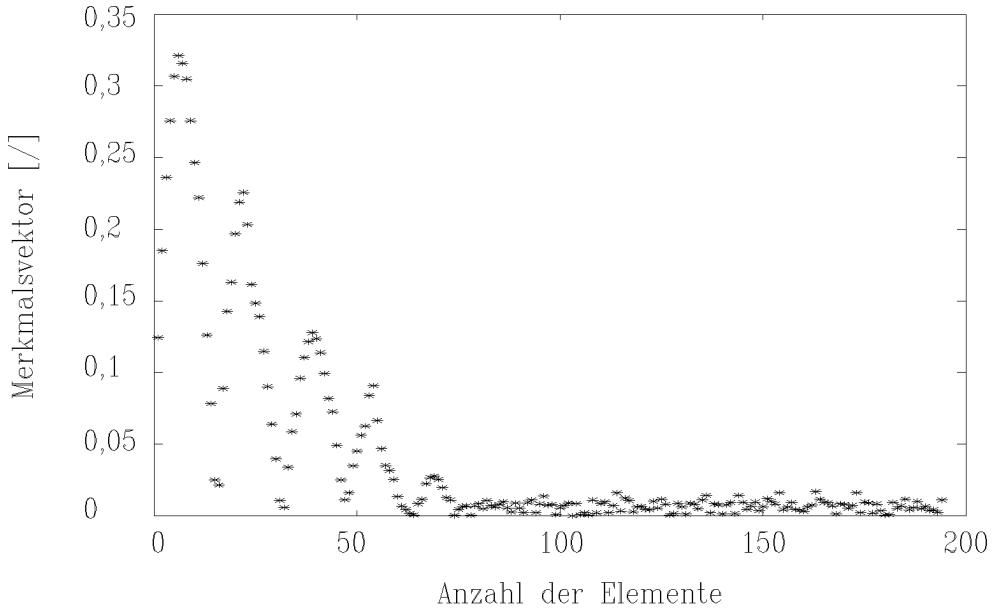


Bild 4.10: Merkmalsvektor \mathbf{m}_{is}

4.2.2 Regelung des nichtlinearen Drehschwingers

Die Zuordnung der Standard–Fuzzy–Regler erfolgt genauso wie bei der Beschreibung des linearen Drehschwingers (Abschnitt 4.1.2). Aufgrund der Klassifizierung der statischen Nichtlinearitäten, hier der toten Zone und der Ermittlung des Betrages der toten Zone a erfolgt eine Offset Aufschaltung auf die Stellgröße des Standard–Fuzzy–Reglers (Berger 1994b) mit

$$\begin{aligned} u(kT) &= \frac{\mu_N m_{PI}(u_{PI}(kT)) + \mu_{NP} m_{PD}(u_{PD}(kT))}{\mu_N + \mu_{NP} + \mu_P} + \\ &+ \frac{\mu_P m_{PI}(u_{PI}(kT))}{\mu_N + \mu_{NP} + \mu_P} k_{sy} + u_{off}(kT). \end{aligned} \quad (4.5)$$

wobei die zusätzliche Stellgröße u_{off} über einen Fuzzy–Regler (Fuzzy–Regler–Tote–Zone) bestimmt wird. Die relationalen Fuzzy–Regeln entsprechen der Form (1.3), wobei hier $X_i, Y_j \in \{NSK, NPK, PSK\}$ und $\Delta U_l \in \{N, NP, P\}$ ist. Zur Kompensation der statischen Regelabweichung wird die zusätzliche Stellgröße u_{off} wie bei Bertram (1993) und Wagner (1993) über die Rekursionsformel

$$u_{off}(kT) = u_{off}((k-1)T) + \Delta u_{off}(kT) \quad (4.6)$$

berechnet. Die Fuzzy–Referenzmengen der Partialprämissen X_i und Y_j sowie die Fuzzy–Referenzmenge der Konklusionen ΔU_l sind im Bild 4.11 dargestellt.

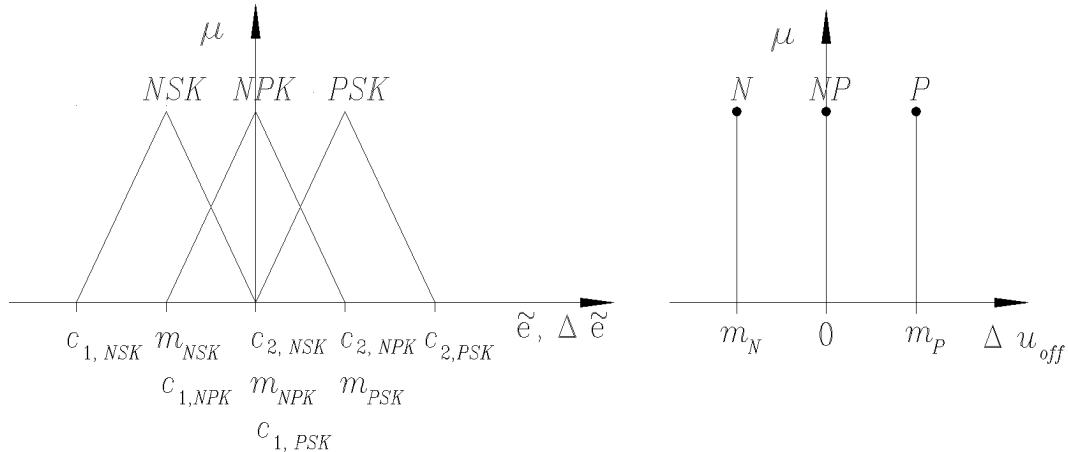


Bild 4.11: Fuzzy–Referenzmengen der Partialprämissen X_i und Y_j (links) und der Konklusionen ΔU_l (rechts)

Liegen die Werte der normierten Regelabweichung \tilde{e} bzw. der Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ außerhalb der Begrenzungen des Einflußbereiches der Fuzzy–Referenzmengen $c_{1,NSK}$ und $c_{2,PSK}$, dann nimmt die zusätzliche Stellgröße u_{off} den Wert der toten Zone a an (Berger 1994b).

Die Werte der Modalwerte m und die der Einflußbereiche c der Fuzzy–Referenzmengen wurden auf die spezielle physikalische Strecke angepaßt. Unter heuristischen Gesichtspunkten ergaben sich schon nach wenigen experimentellen Ergebnissen nach den Startwerten von Berger (1994b) die numerischen Werte:

$$\begin{aligned} c_{1,NSK} &= -0,2 \\ c_{1,NPK} &= m_{NSK} = -0,1 \\ c_{2,NSK} &= m_{NPK} = c_{1,PSK} = 0,0 \\ c_{2,NPK} &= m_{PSK} = 0,1 \\ c_{2,PSK} &= 0,2 \\ m_N &= -0,1 \\ m_P &= 0,1 \end{aligned}$$

In der Tabelle 4.6 ist die Regelbasis als Karnaugh–Tafel dargestellt.

		$\Delta\tilde{e}$		
		NSK	NPK	PSK
\tilde{e}	NSK	N	N	P
	NPK	N	NP	P
	PSK	N	P	P

Tabelle 4.6: Karnaugh–Tafel des Fuzzy–Reglers für die natürliche Systemklasse *statische Nichtlinearitäten* mit der semantischen Systemklasse *Tote–Zone*

Die Werte der Skalierungsfaktoren $k_{eI}, k_{\Delta eI}, k_e, k_{\Delta e}, k_{e,sy}, k_u$ und k_{sy} sind durch die Zuordnung der Standard–Fuzzy–Regler festgelegt und werden nicht speziell auf das System abgestimmt. Der Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ wird nach Berger (1994a) durch die Abtastzeit $T = 0,06$ s des Systems bestimmt.

Im Bild 4.12 ist der Regelkreis, welcher aufgrund der Klassifizierungen des Prozesses in die natürlichen Systemklassen *I–System*, *oszillatorisch* und *statische Nichtlinearitäten* mit den semantischen Systemklassen *schwach oszillatorisch* und *Tote–Zone* entsteht, dargestellt (Reglersynthese für drei Systemklassen).

In den Bildern 4.13 und 4.14 ist die gemessene Systemantwort des Drehschwingers als Winkel φ_2 für einen Sollwertsprung von $w = 1080^\circ$ und $w = 1440^\circ$ dargestellt. Auch bei einer alternierenden Sollwertsprungfolge von $w = 2160$ Grad auf $w = 0,0$ Grad und $w = 1620$ Grad auf $w = 0,0$ Grad kann trotz der starken Verdrehung der Feder in unterschiedlicher Richtung und dem damit verbundenen starken Auftreten der nichtlinearen Effekte (Federkennlinie und Hysterese) (Bild 4.15) ein gutes Ergebnis erzielt werden. Die bleibende Regelabweichung e_∞ lag bei den Messungen für verschiedene Sollwertsprünge

(von $w = 360$ Grad bis $w = 3600$ Grad) immer weit unter $e_\infty = 3$ Grad (Anhang B) (im Bereich der Meßzeit $T_M = 15$ s), auch bei wiederholten Messungen für den gleichen Sollwert. Nur bei Sollwertsprüngen unter $w = 360$ Grad konnte keine reproduzierbare bleibende Regelabweichung e_∞ von unter $e_\infty = 3$ Grad erreicht werden.

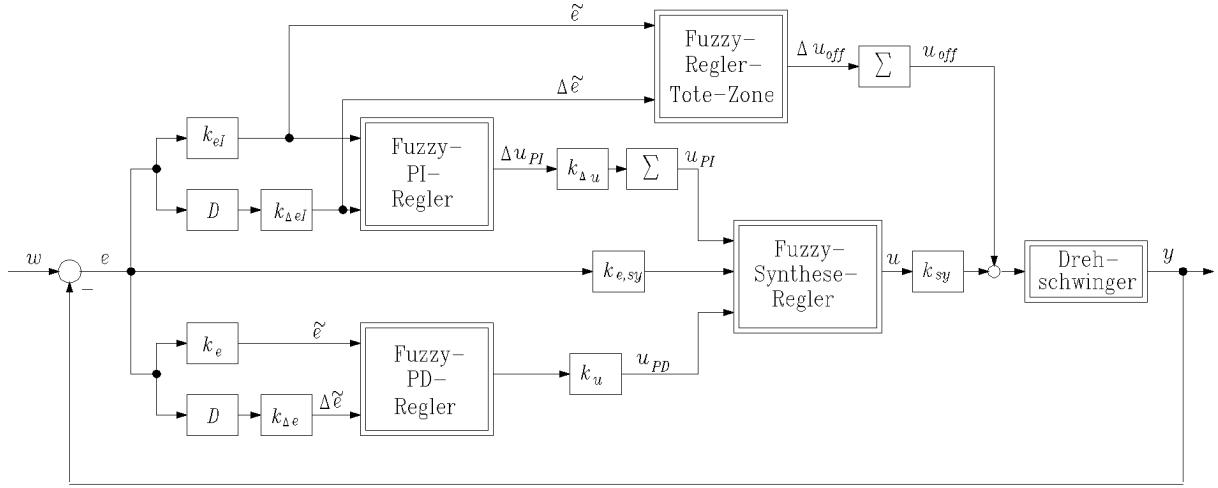


Bild 4.12: Regelkreis mit Parallelschaltung der Standard-Fuzzy-Regler — Fuzzy-PI-Regler, Fuzzy-PD-Regler und Fuzzy-Regler-Tote-Zone — und der Reihenschaltung des *Fuzzy-Synthese-Reglers*

Nachdem die Zuweisung der Standard-Fuzzy-Regler gute Ergebnisse lieferte, wird nun versucht, durch gezielte Veränderungen der Parameter den Sollwert schneller als zuvor zu erreichen. Das heißt, es soll der mittlere quadratische Fehler des ISE-Kriteriums (integral squared error) und des ITAE-Kriteriums (integral of time multiplied absolute value of error) reduziert werden,

$$P_{ISE} = \sum_{i=0}^k e^2(i) , \quad (4.7)$$

$$P_{ITAE} = \sum_{i=0}^k (i+1) |e(i)| . \quad (4.8)$$

Zu diesem Zweck werden die Modalwerte m und die Begrenzungen des Einflußbereiches c der Fuzzy-Referenzmengen der Prämissen (Fuzzy-Eingangsmengen) des *Fuzzy-Synthese-Reglers* so verändert, daß die Stellgröße des Standard-Fuzzy-Reglers für das I-System nicht erst bei einer kleinen Regelabweichung auf das Drehschwingersystem gegeben wird, sondern schon bei einer mittleren bzw. größeren Regelabweichung.

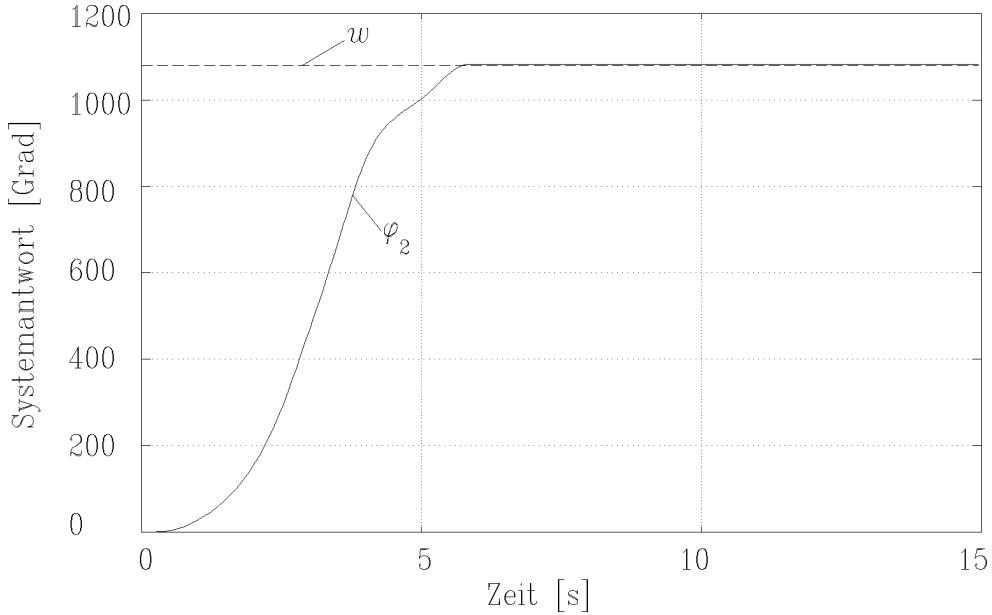


Bild 4.13: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $w = 1080$ Grad

Es werden drei Systemantworten mit unterschiedlichen Modalwerten m und unterschiedlichen Begrenzungen der Einflußbereiche c der Fuzzy–Referenzmengen der Prämisse (Fuzzy–Eingangsmengen) des *Fuzzy–Synthese–Reglers* gemessen, welche im Bild 4.17 dargestellt sind. Die Veränderungen der Fuzzifizierung (Fuzzy–Eingangsmengen) durch Erhöhen der Modalwerte $m_{1,NP}, m_{2,NP}$ und der Werte der Begrenzungen der Einflußbereiche c_N, c_P der Fuzzy–Eingangsmengen sind im Bild 4.16 dargestellt.

Die verschiedenen Werte der Modalwerte m und die der Begrenzungen des Einflußbereiches c der Fuzzy–Eingangsmengen des *Fuzzy–Synthese–Reglers* sowie die berechneten Werte des ISE–Kriteriums und des ITAE–Kriteriums sind in der Tabelle 4.7 aufgeführt. Die Werte des ISE–Kriteriums und des ITAE–Kriteriums dokumentieren recht deutlich die wesentliche Verbesserung des Ergebnisses.

Eine Erhöhung der Modalwerte $m_{1,NP}, m_{2,NP}$ und der Begrenzung des Einflußbereiches c_N, c_P über einen Wert von $c_P = m_{2,NP} = 0,8$ bzw. unter einen Wert von $c_N = m_{1,NP} = -0,8$ führt zu einem starken Überschwingen der Systemantwort, welches aufgrund der genannten Zielsetzungen zu vermeiden ist (relativ schnelles und überschwingfreies Erreichen des Sollwertes).

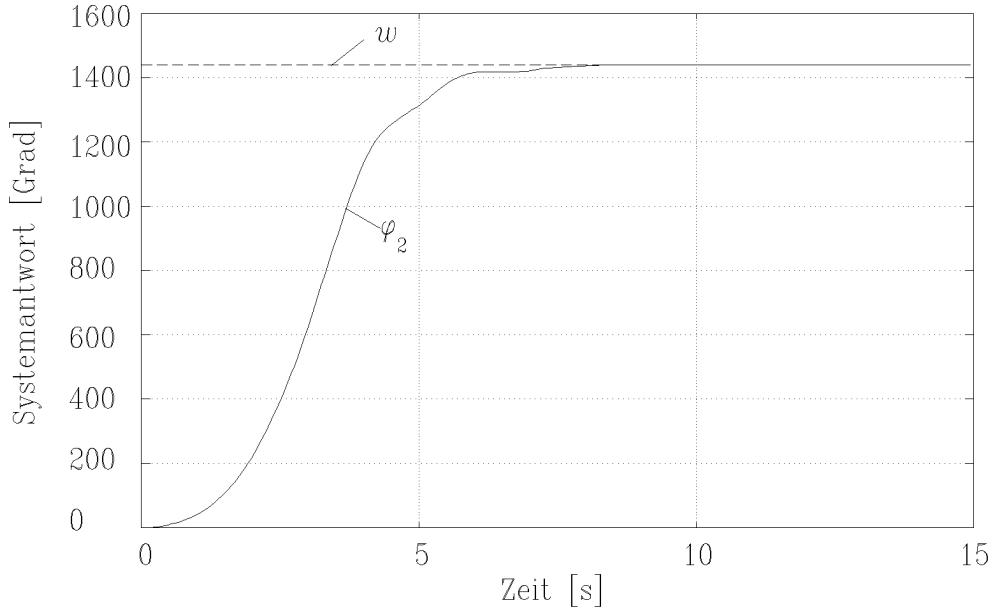


Bild 4.14: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $w = 1440$ Grad

	ISE-Werte	ITAE-Werte
$m_N = c_{1,NP} = -1$ $c_N = m_{1,NP} = -0,2$ $c_P = m_{2,NP} = 0,2$ $m_P = c_{2,NP} = 1$	629,34	$3,26 \cdot 10^5$
$m_N = c_{1,NP} = -1$ $c_N = m_{1,NP} = -0,4$ $c_P = m_{2,NP} = 0,4$ $m_P = c_{2,NP} = 1$	556,31	$2,62 \cdot 10^5$
$m_N = c_{1,NP} = -1$ $c_N = m_{1,NP} = -0,7$ $c_P = m_{2,NP} = 0,7$ $m_P = c_{2,NP} = 1$	371,82	$1,192 \cdot 10^5$

Tabelle 4.7: Die berechneten Werte des ISE- und des ITAE-Kriteriums in Abhängigkeit verschiedener Modalwerte m und Begrenzungen der Einflußbereiche c der Fuzzy-Referenzmengen der Prämissen des *Fuzzy-Synthese-Reglers*

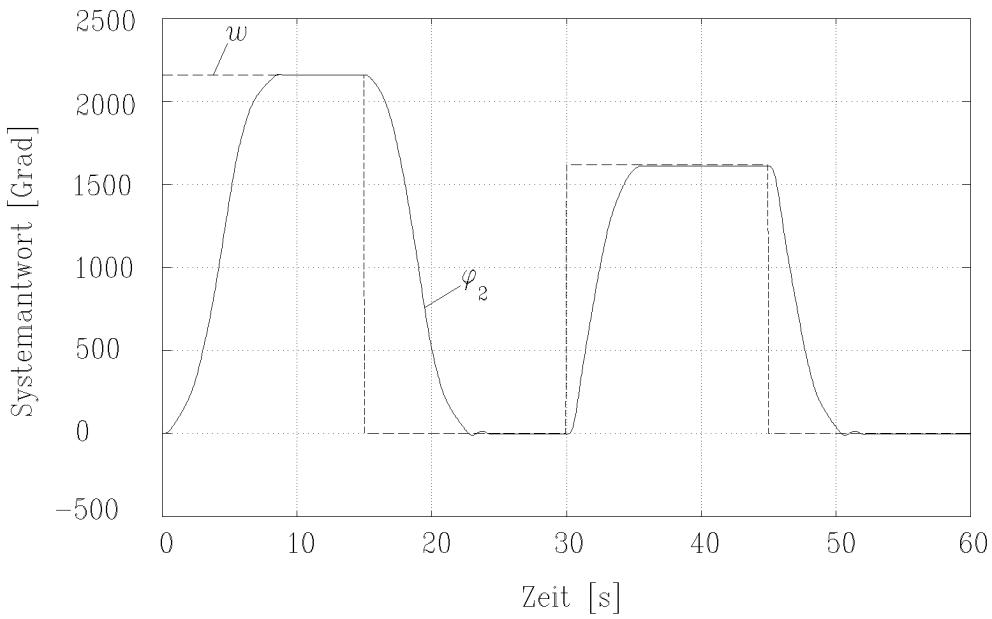


Bild 4.15: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen alternierenden Sollwertsprung von $w = 2160$ Grad auf $w = 0,0$ Grad und $w = 1620$ Grad auf $w = 0,0$ Grad

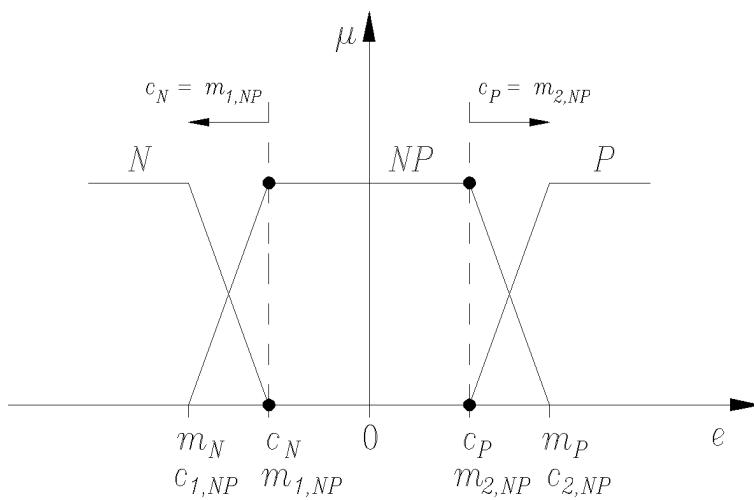


Bild 4.16: Fuzzy–Referenzmengen der Prämissen (Fuzzy–Eingangsmengen) des *Fuzzy–Synthese–Reglers* in Abhängigkeit der Modalwerte m und der Begrenzungen der Einflußbereiche c

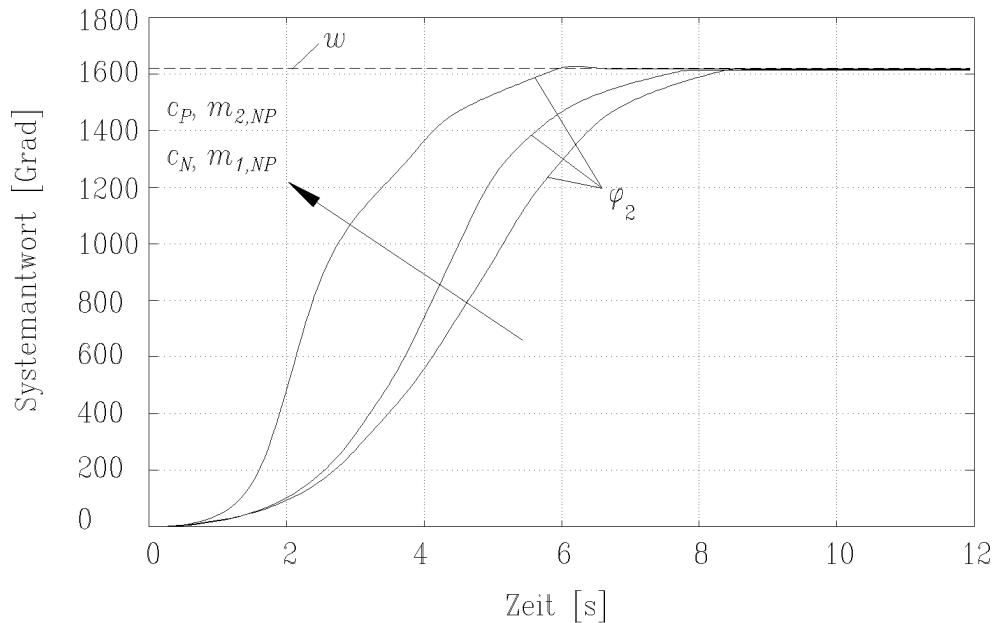


Bild 4.17: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $w = 1620$ Grad in Abhängigkeit der Modalwerte $m_{1,NP}, m_{2,NP}$ und der Begrenzungen des Einflußbereiches c_N, c_P der Fuzzy–Referenzmengen der Prämissen (Fuzzy–Eingangsmengen) des *Fuzzy – Synthese – Reglers* nach den Werten aus der Tabelle 2.4

5 Standard–Fuzzy–Regler mit Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption

Bei der Verwendung von Fuzzy–PI–Reglern wird fast immer bei der Festlegung des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ ein konstanter Wert gewählt (*global* definiert), welcher aber nicht immer sinnvoll ist, wenn man z.B. an ein schnelleres Erreichen der Führungsgröße w denkt. Peng, Liu und Yamakawa (1988), Liaw und Wang (1991) sowie Grimm (1994) beschreiben den Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ als eine Funktion der normierten Regelabweichung \tilde{e} der Form

$$k_{\Delta u} = k_0 |\tilde{e}| + k_1 , \quad (5.1)$$

wobei k_0 und k_1 konstant sind (*lokal* definiert).

Diese lineare funktionale Abhängigkeit (in den normierten Bereichen $\tilde{e} = 0,0$ bis $\tilde{e} = 1,0$ und $\tilde{e} = -1,0$ bis $\tilde{e} = 0,0$) brachte bei den Standard–Fuzzy–Reglern nur geringen Erfolg, da hier ein zu großes $k_{\Delta u}$ bei großer normierten Regelabweichung \tilde{e} zu einer starken Überschwingung der Systemantwort y führt. Dies liegt an der linearen Funktionsvorschrift mit negativer Steigung (Bild 5.2). Besser sind hier funktionale Beschreibungen mit negativen und positiven Steigungen, also in Form von nichtlinearen Funktionsvorschriften. Hierbei kann das Problem auftreten, daß die Funktionsvorschrift sehr komplex werden kann (Peng, Liu und Yamakawa 1988). Um diese komplexe Funktionsvorschrift zu umgehen, wird hier ein neuer Weg der Beschreibung des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ eingeführt. Der Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ wird über linguistische Regeln der WENN ... DANN ... Form beschrieben und mit den Methoden der Fuzzy–Logik ausgewertet. Man erhält so einen funktionalen Zusammenhang der Form $k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$, ohne eine genaue Funktionsvorschrift aufstellen zu müssen. Somit ist es möglich, den Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ relativ einfach und wirkungsvoll an die physikalische Strecke anzupassen.

Diese Anpassung geschieht in voller Anlehnung an die Beschreibung der Stellgröße u in Abhängigkeit der normierten Regelabweichung \tilde{e} und der normierten Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$. Das heißt, es entsteht ein eigenständiger Fuzzy–Regler (*Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption*) mit den Eingangsgrößen normierte Regelabweichung \tilde{e} und normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ und der Ausgangsgröße $k_{\Delta u}$ (Bild 5.1). Die Adaption des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ ist von jetzt an fest in die Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler) implementiert. Um keine zusätzliche Fuzzifizierung und Inferenz einzuführen, werden die Zugehörigkeitswerte $\mu_{X_i}(\tilde{e})$ und $\mu_{Y_j}(\Delta \tilde{e})$ und die Erfülltheitsgrade $\alpha_{R_r}(\tilde{e}, \Delta \tilde{e}) = \mu_{X_i}(\tilde{e}) \mu_{Y_j}(\Delta \tilde{e})$ vom eigentlichen Fuzzy–Regler übernommen (Fuzzy–Regler mit den Eingangsgrößen normierte Regelabweichung \tilde{e} , normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ und der Ausgangsgröße Änderung der Stellgröße Δu) so daß hier nur zusätzliche Fuzzy–Implikationen aufgrund der Erweiterung der Konklusion in zwei Partialkonklusionen (ΔU IST ΔU_l) und (K IST K_m) und eine Defuzzifizierung notwendig ist.

Die Skalierungsfaktoren $k_{\Delta u}$ werden durch zwei Fuzzy-Einermengen K_m beschrieben. Die Defuzzifizierung erfolgt nach der Schwerpunktmetode für Fuzzy-Einermengen. Die Regelbasis der Standard-Fuzzy-Regler (Fuzzy-PI-Regler), welche durch relationale Fuzzy-Regeln beschrieben sind, wird im Vergleich zu den herkömmlichen Regelbasen der Fuzzy-PI-Regler durch eine zusätzliche Partialkonklusion erweitert, in der Form,

WENN (E IST X_i) UND (ΔE IST Y_j) DANN (ΔU IST ΔU_l) UND ($K_{\Delta u}$ IST K_m)

mit $X_i \in \{NG, NM, NP, PM, PG\}$,
 $Y_j \in \{NG, NM, NP, PM, PG\}$,
 $\Delta U_l \in \{NG, NM, NP, PM, PG\}$ und
 $K_m \in \{KL, GR\}$.

In den Bildern 5.2 und 5.3 ist die Regelfläche des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ mit der funktionalen linearen Funktionsvorschrift nach Peng, Liu und Yamakawa (1988) und mit der hier entwickelten *Fuzzy- $k_{\Delta u}$ -Adaption* dargestellt.

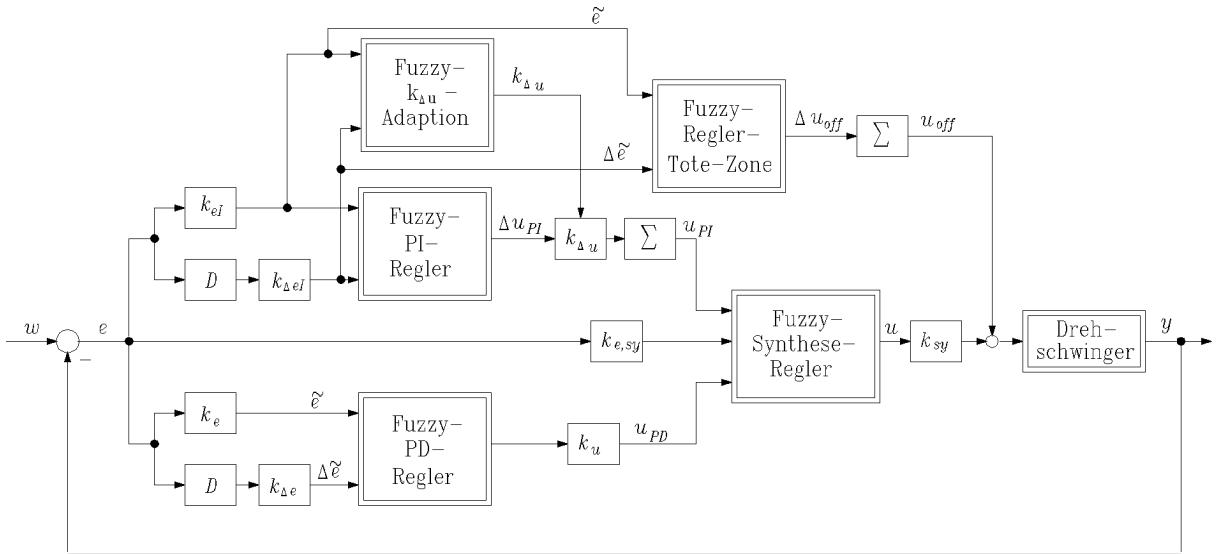


Bild 5.1: Regelkreis mit Parallelschaltung der Standard-Fuzzy-Regler (Fuzzy-PI-Regler, Fuzzy-PD-Regler und Fuzzy-Regler-Tote-Zone) und der Reihenschaltung des Fuzzy-Synthese-Reglers mit zusätzlicher nichtlinearer Beschreibung des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ über die Fuzzy- $k_{\Delta u}$ -Adaption

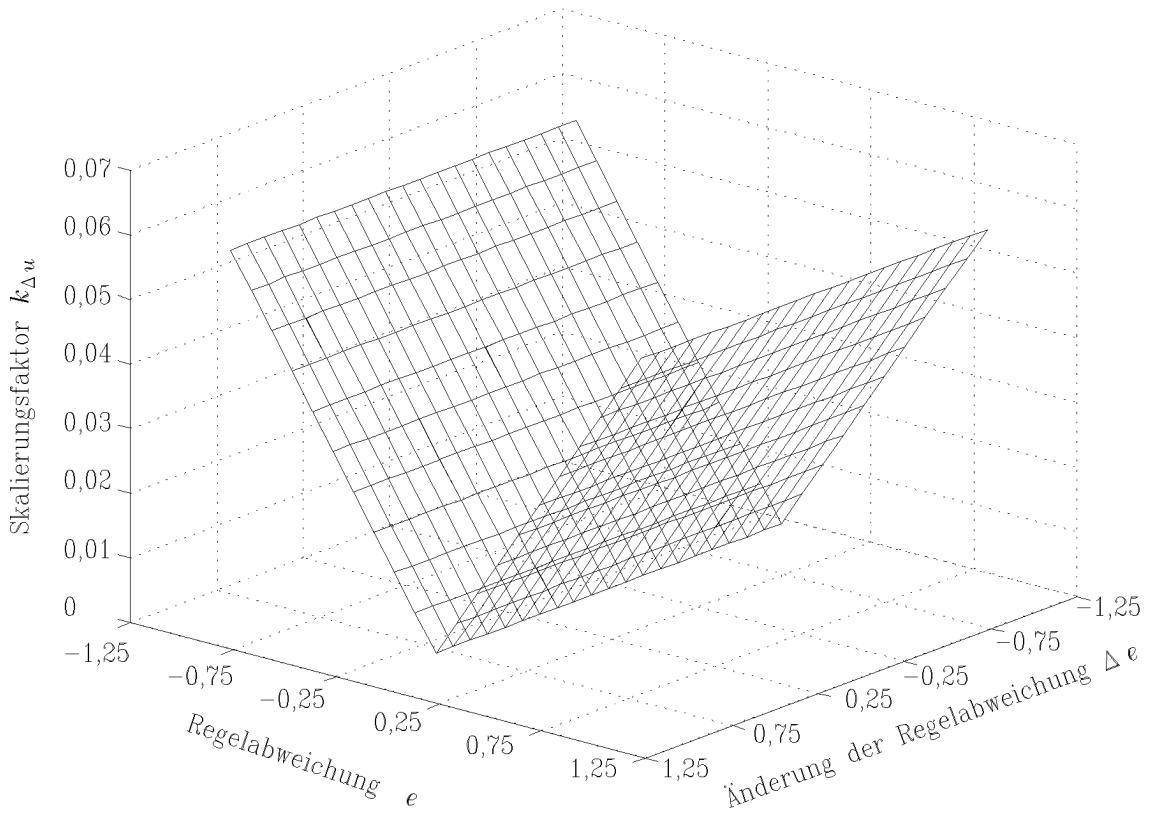


Bild 5.2: Regelfläche des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ nach der Beschreibung von Peng, Liu und Yamakawa (1988)

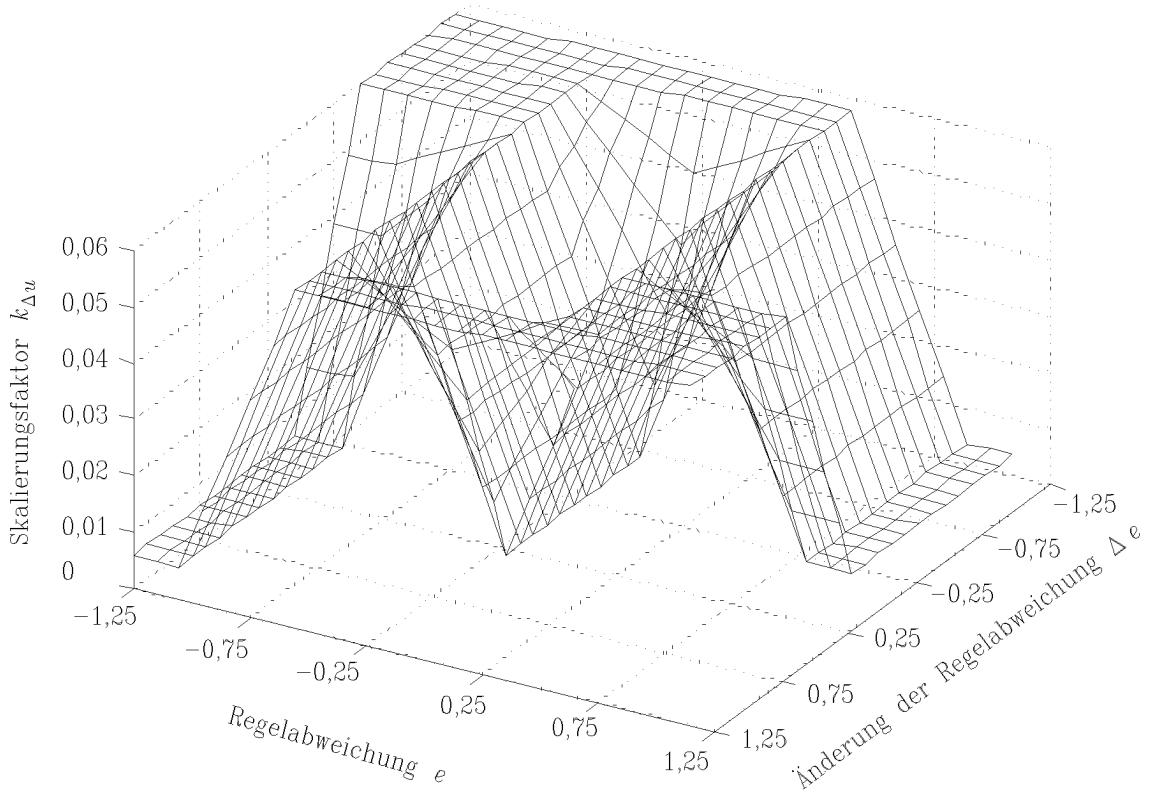


Bild 5.3: Regelfläche des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ mit der nichtlinearen Beschreibung über die *Fuzzy- $k_{\Delta u}$ -Adaption*

5.1 Regelung des Drehschwingersystems mit den modifizierten Standard-Fuzzy-Reglern

Es wird nun die Regelung mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Regelbasis der Standard-Fuzzy-Regler durchgeführt. Die Regelbasis des Fuzzy-PI-Reglers wird durch zwei Karnaugh-Tafeln Tabelle 5.1 und 5.2 beschrieben.

		$\Delta \tilde{e}$				
		NG	NM	NP	PM	PG
\tilde{e}	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 5.1: Karnaugh-Tafel des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse *oszillatorisch* mit der semantischen Systemklasse *stark oszillatorisch* für die Änderung der Stellgröße Δu

		$\Delta \tilde{e}$				
		NG	NM	NP	PM	PG
\tilde{e}	NG	GR	GR	KL	KL	KL
	NM	GR	GR	GR	GR	GR
	NP	GR	KL	KL	KL	GR
	PM	GR	GR	GR	GR	GR
	PG	KL	KL	KL	GR	GR

Tabelle 5.2: Karnaugh-Tafel des Fuzzy-PI-Reglers für die natürliche Systemklasse *oszillatorisch* mit der semantischen Systemklasse *stark oszillatorisch* für den Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$

In den Bildern 5.4 und 5.5 sind die gemessenen Systemantworten des geregelten Drehschwingersystems mit $k_{\Delta u} = \text{const.}$ und $k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$ sowie der Verlauf des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$ (Bild 5.5) dargestellt. Man erkennt im Bild 5.4 deutlich das bessere Systemverhalten, welches auch durch die berechneten ISE- und ITAE-Werte bestätigt wird (Tabelle 5.3).

	ISE-Werte	ITAE-Werte
$k_{\Delta u} = \text{const.}$	629,34	$3,26 \cdot 10^5$
$k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$	543,46	$2,42 \cdot 10^5$

Tabelle 5.3: Werte des ISE- und des ITAE-Kriteriums

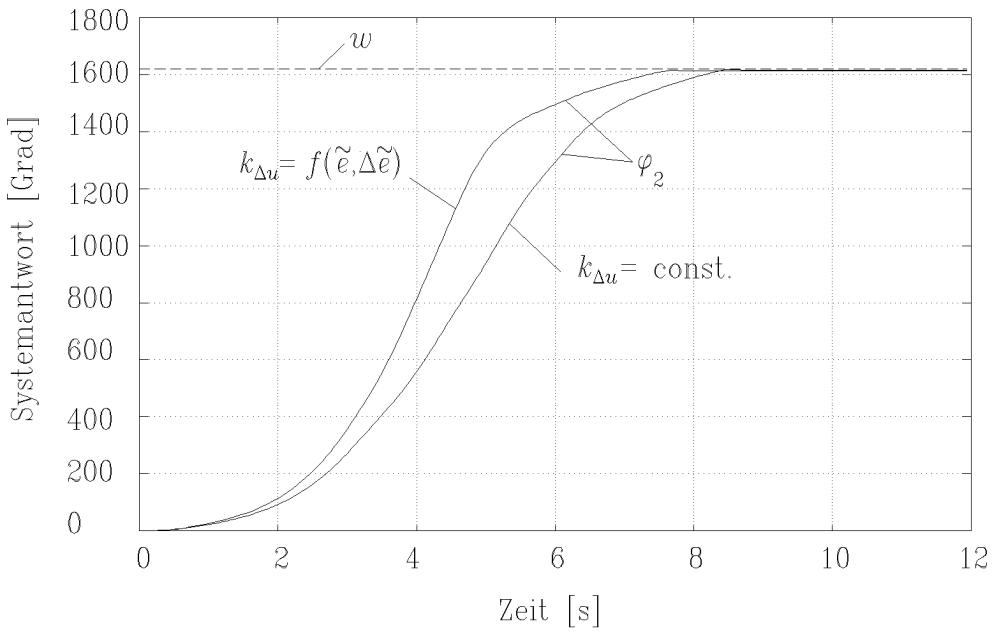


Bild 5.4: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $w = 1620$ Grad mit $k_{\Delta u} = \text{const.}$ und $k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$

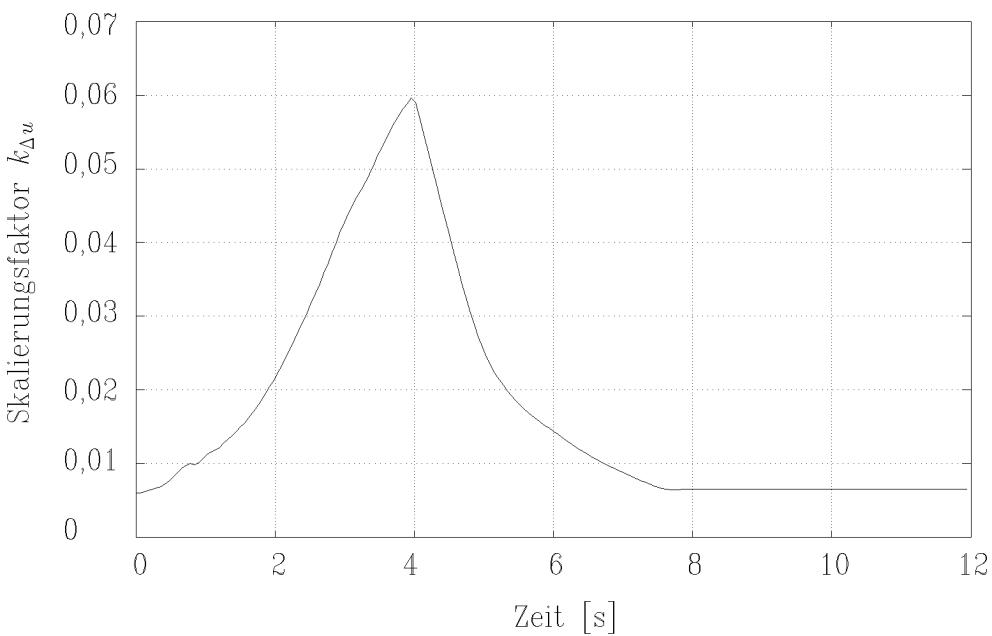


Bild 5.5: Verlauf des Skalierungsfaktors $k_{\Delta u}$

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht¹ wurde die grundsätzliche Verwendbarkeit von Standard–Fuzzy–Reglern für verschiedene zusammengesetzte Systeme untersucht. Der Schwerpunkt lag in der Klassifizierung sowie in der Reglersynthese der Standard–Fuzzy–Regler, wenn sich ein Prozeß aus einem *I–System* und einem *oszillatorischen* oder *monotonen* System zusammensetzt.

Es wurde gezeigt, daß die Klassifikation sich wesentlich vereinfachen läßt, wenn bei einer Klassifizierung eines Objektes zur Systemklasse *I–System* nicht mit dem Zeitreihenobjektvektor \mathbf{z} bzw. der Zeitreihenobjektmatrix \mathbf{Z} , sondern mit der zeitlichen Änderung des Zeitreihenobjektvektors $\Delta\mathbf{z}$ bzw. der zeitlichen Änderung der Zeitreihenobjektmatrix $\Delta\mathbf{Z}$ zur Klassifizierung verwendet wird.

Nachdem die Klassifikation der Systemklassen erfolgreich abgeschlossen wurde, ist gezeigt worden, wie eine mögliche „Kombination“ zweier Standard–Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler und Fuzzy–PD–Regler) aussehen kann. Dazu wurden die zwei Standard–Fuzzy–Regler, die aufgrund der Klassifikation dem Prozeß zugewiesen wurden, parallel geschaltet und ein *Fuzzy–Synthese–Regler* in Reihe zu dem Prozeß geschaltet. Der *Fuzzy–Synthese–Regler* ist so konzipiert, daß er die Entscheidung, welche Stellgröße (Stellgröße des Fuzzy–PI–Reglers, des Fuzzy–PD–Reglers oder eine „Kombination“ beider) auf das System gegeben wird, anhand der augenblicklichen Regelabweichung trifft. Das bemerkenswerte dieses *Fuzzy–Synthese–Reglers* ist, daß er mit nur drei linguistischen Regeln auskommt und die Modalwerte der Fuzzy–Referenzmengen der Konklusionen die Stellgrößen der Standard–Fuzzy–Regler und damit zeitabhängig sind.

Die Klassifizierung und die Reglersynthese wurden am simulierten linearen sowie am realen nichtlinearen Drehschwinger dokumentiert. Es wurden mehrere Messungen mit unterschiedlichsten Sollwerten (von $w = 360$ Grad bis $w = 3600$ Grad) durchgeführt. Die bleibenden Regelabweichungen e_∞ waren immer sehr klein. Dies und die Tatsache, daß der Sollwert fast ohne Überschwingen und in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen erreicht wurde, unterstreicht die Anwendbarkeit der Standard–Fuzzy–Regler, zumal es sich hier um eine regelungstechnisch anspruchsvolle Strecke handelt und keine Kenntnisse über das physikalische System mit in die Auslegung der Fuzzy–Regler eingegangen sind.

In einem zweiten Schritt wurde die Anpassungsfähigkeit des Regelungskonzeptes dokumentiert, indem die Modalwerte und die Begrenzungen des Einflußbereiches der Fuzzy–Referenzmengen der Prämissen des *Fuzzy–Synthese–Reglers* nach heuristischen Verfahren verändert wurden. Es konnten so die Werte des ISE– und des ITAE–Kriteriums um fast die Hälfte reduziert werden. Des Weiteren wurden die Standard–Fuzzy–Regler modifiziert bzw.

¹Die Ergebnisse dieses Berichtes entstanden im Rahmen des Projektes „Fuzzy–Regler für lineare und bilineare Systeme bei veränderlichen Systemparametern“, das von der DFG Az.: schw 120/53–1 gefördert wurde.

erweitert, indem nicht ein konstanter Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$ sondern ein Skalierungsfaktor der Form $k_{\Delta u} = f(\tilde{e}, \Delta \tilde{e})$ verwendet wurde. Dieser nichtlineare Funktionszusammenhang wurde durch linguistische Beschreibungen formuliert und als zusätzlicher Fuzzy–Regler (*Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption*) im eigentlichen Fuzzy–Regler (Fuzzy–PI–Regler) implementiert. Dabei besitzt die *Fuzzy– $k_{\Delta u}$ –Adaption* die Eingangsgrößen normierte Regelabweichung \tilde{e} , normierte Änderung der Regelabweichung $\Delta \tilde{e}$ und als Ausgangsgröße den Skalierungsfaktor $k_{\Delta u}$. Durch diese Modifizierung des Standard–Fuzzy–Reglers konnte eine Reduzierung der Werte des ISE– und des ITAE–Kriteriums um fast 25 % erreicht werden. In einem weiteren Schritt können nun Adoptions–Algorithmen entwickelt werden, um die Standard–Fuzzy–Regler besser und automatisch an die reale Strecke anpassen zu können. Grundsätzlich wird die folgende Entwurfsmethodik in den drei Schritten,

1. Systemklassifizierung und Zuweisung der Standard–Fuzzy–Regler,
2. Off–Line–Optimierung und
3. On–Line–Adaption

angestrebt.

Die im 2. Schritt aufgeführte Off–Line–Optimierung soll eine bessere Anpassung an das System ermöglichen. Hierbei ist vorgesehen, die Fuzzy–Referenzmengen über die Modalwerte und über die Begrenzungen der Einflußbereiche, die Regelbasis über die Gewichtsmatrix \mathbf{G} sowie die Skalierungsfaktoren zu verändern. Die On–Line–Adaption als letzter Entwurfsschritt soll dann Parameterschwankungen des Systems entgegenwirken.

7 Literaturverzeichnis

- Analog Devices.** 1991. *User's Manual*. Edelsbergstr. 8–10. 8000 München 21.
- Berger, M.** 1994a. *Fuzzy–Regelungskonzepte für Systemklassen*. Diplomarbeit MSRT. Universität Duisburg.
- Berger, M.** 1994b. *Konfektionierte relationale Fuzzy–Regler für Systemklassen*. Forschungsbericht Nr. 16/94 MSRT. Universität –GH– Duisburg.
- Bertram, T.** 1993. Design of a fuzzy controller for a rotating oscillator. *INT. J. SYSTEMS SCI.* 24. 1923–1934.
- Bertram, T., F. Svaricek, T. Bindel, R. Böhm, H. Kiendl, B. Pfeiffer, und M. Weber.** 1994. Fuzzy Control. Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. *Automatisierungstechnik* at 42. 322–326.
- Bocklisch, S.F.** 1987a. *Prozeßanalyse mit unscharfen Verfahren*. Berlin: VEB Technik.
- Bocklisch, S.F.** 1987b. Beratungssysteme mit unscharfen Klassifikatoren und Klassifikationsnetzen. *MSR* 30. 344–348.
- Bothe, H.** 1993. *Fuzzy–Logic*. Berlin: Springer.
- Böhme, G.** 1992. *Algebra*. Berlin: Springer.
- Böhme, G.** 1993. *Fuzzy–Logik*. Berlin: Springer.
- Drechsel, D., W. Stauch und M. Pandit.** 1994. RIP Control im Vergleich zu Fuzzy Control. *VDI–Berichte 1113. Fuzzy Control*. 41–55.
- Grimm, W.** 1994. Regelungstechnische Bedeutung von linguistischen Fuzzy–Operatoren. *VDI–Berichte 1113. Fuzzy Control*. 483–496.
- Heidenhain.** 1992. *User's Manual*. Heidenhain Belgien. Bellekouter, 30. B–1790 Affligem.
- Herrmann, H.** 1993. *Entwicklung eines adaptiven Fuzzy–Reglers für den Praktikumsversuch Drehschwinger*. Studienarbeit MSRT. Universität Duisburg.
- Kahlert, J. und H. Frank.** 1993. *Fuzzy–Logik und Fuzzy–Control*. Braunschweig: Vieweg.
- Kerkmann, H.** 1985. *Implementierung einer digitalen Regelung für ein elektromechanisches Drehschwingersystem*. Studienarbeit MSRT. Universität Duisburg.

- Konik, D. und J. Sowa.** 1986. *Digitale Zustandsregelung eines Drehschwingersystems*. Laborpraktikum MSRT. Universität Duisburg.
- Kruse, R., J. Gebhardt und F. Klawonn.** 1993. *Fuzzy–Systeme*. Stuttgart: Teubner.
- Lenat, D.** 1983. *Theory Formation by Heuristic Search. The Nature of Heuristics II: Background and Examples. Search and Heuristics*. ed. J. Pearl. 31–59. Amsterdam: North–Holland.
- Liaw, C. und J. Wang** 1991. Design and Implementation of a Fuzzy Controller for a High Performance Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21. 921–929.
- Nagao, M.** 1990. *Knowledge and Inference*. Tokyo: Academic Press.
- Pedrycz, W.** 1993. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Peng, X.T., S.M. Liu und T. Yamakawa.** 1988. *Self–Regulating PID Controllers and its Applications to a Temperature Controlling Process. Fuzzy Computing*. ed. M.M. Guta und T. Yamakawa. 355–364. Amsterdam: North–Holland.
- Rommelfanger, H.** 1994. *Fuzzy Decision Support–Syteme*. Berlin: Springer.
- Schwarz, H.** 1991. *Nichtlineare Regelungssysteme: Systemtheoretische Grundlagen*. München: Oldenbourg.
- Schroer, W., H. Frey, B. Vater und F. Klein.** 1994. *Mustererkennung mit Fuzzy–Logic. Echtzeitsysteme und Fuzzy Control*. ed. H. Rzehak. 143–156. Braunschweig: Vieweg.
- Tilli, T.** 1993. *Mustererkennung mit Fuzzy–Logik*. München: Franzis.
- Wagner, S.** 1993. *Entwicklung eines Fuzzy–Reglers zur Regelung der Zink–Beschichtungsdicke von Blechen und Bändern*. Diplomarbeit MSRT. Universität Duisburg.
- Wend, H.** 1993. *Strukturelle Analyse linearer Regelungssysteme*. München: Oldenbourg.
- Wenzlawiak, N.** 1985. *Digitale Regelung eines Drehschwingersystems*. Studienarbeit MSRT. Universität Duisburg.

A Stellgrößenverläufe

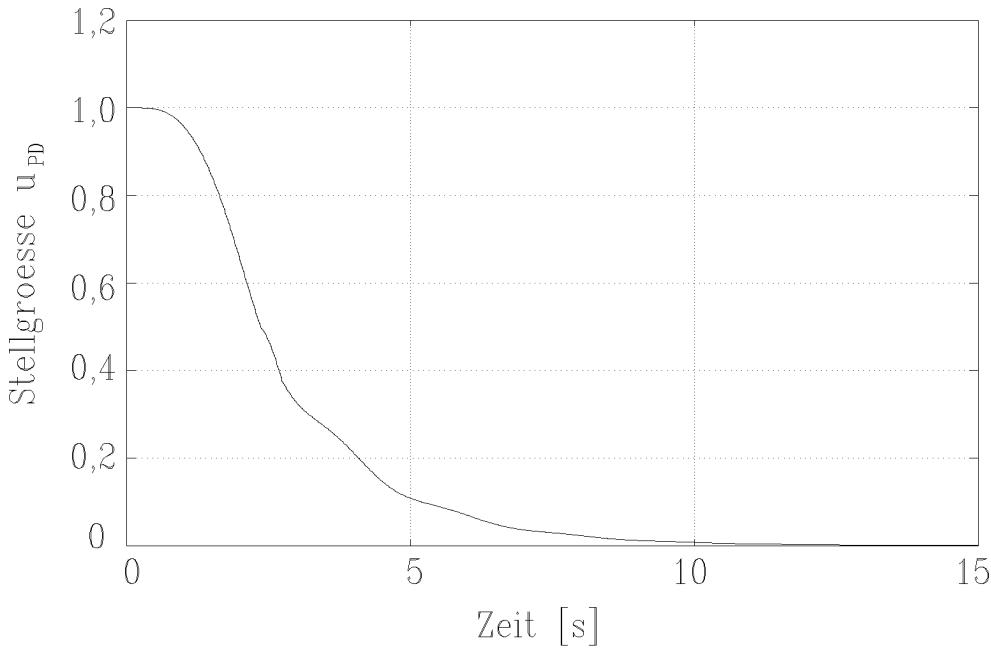


Bild A.1: Normierter Stellgrößenverlauf des Fuzzy-PD-Reglers für die Systemklasse *I-System*

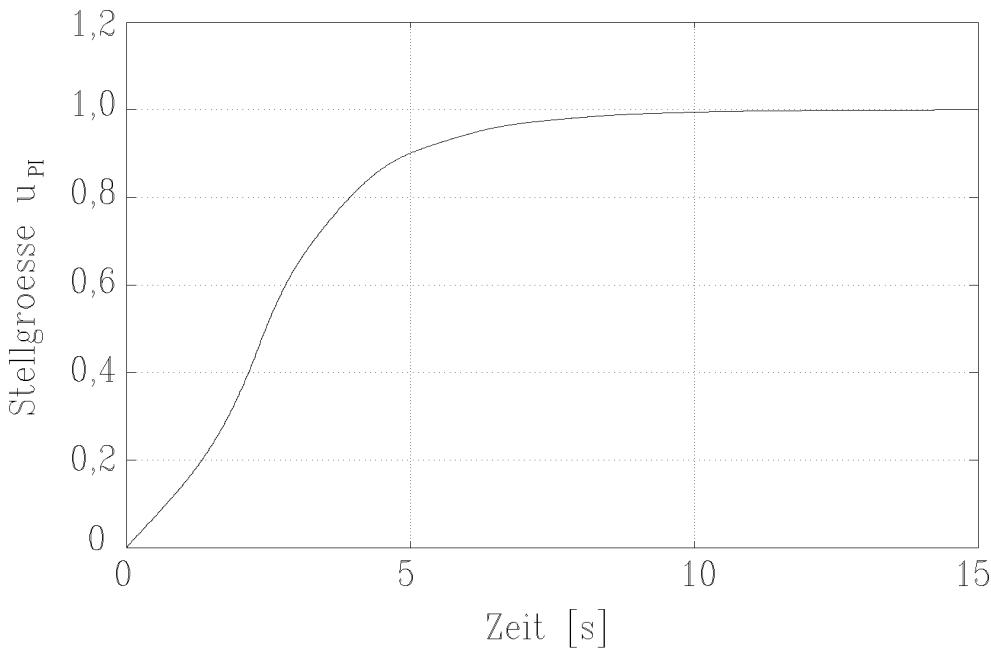


Bild A.2: Normierter Stellgrößenverlauf des Fuzzy-PI-Reglers für die Systemklasse *oszillatorisch*

B Messungen des Winkels φ_2 für verschiedene Sollwerte w

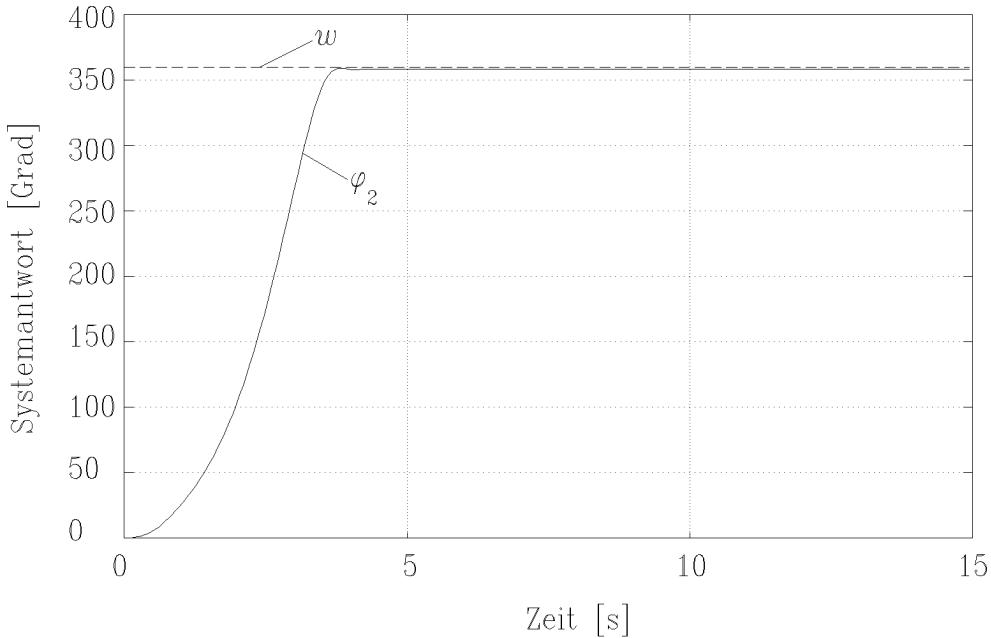


Bild B.1: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $\varphi = 360$ Grad

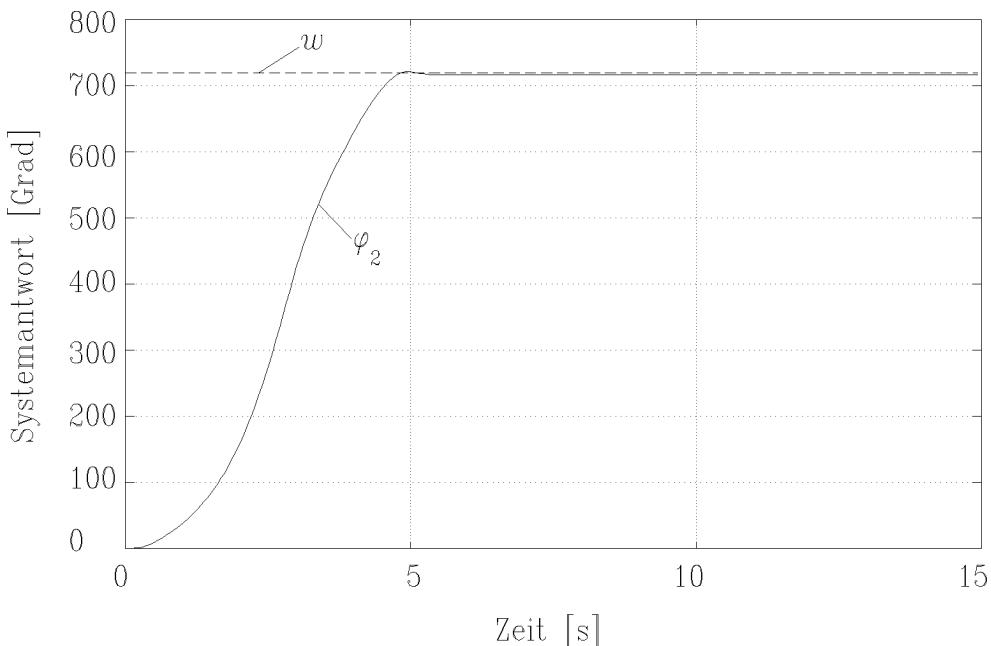


Bild B.2: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $\varphi = 720$ Grad

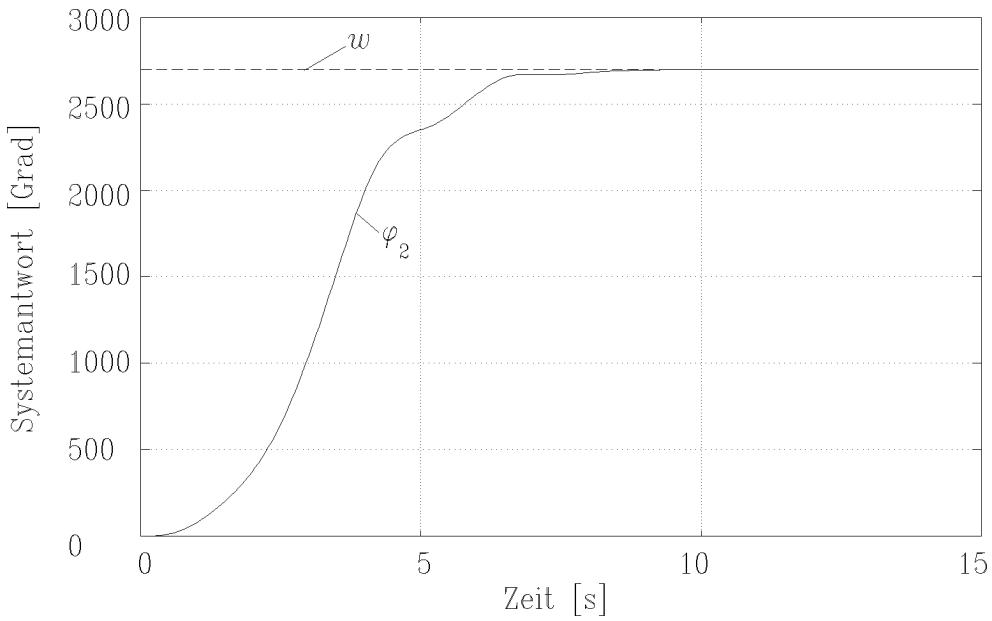


Bild B.3: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $\varphi = 2700$ Grad

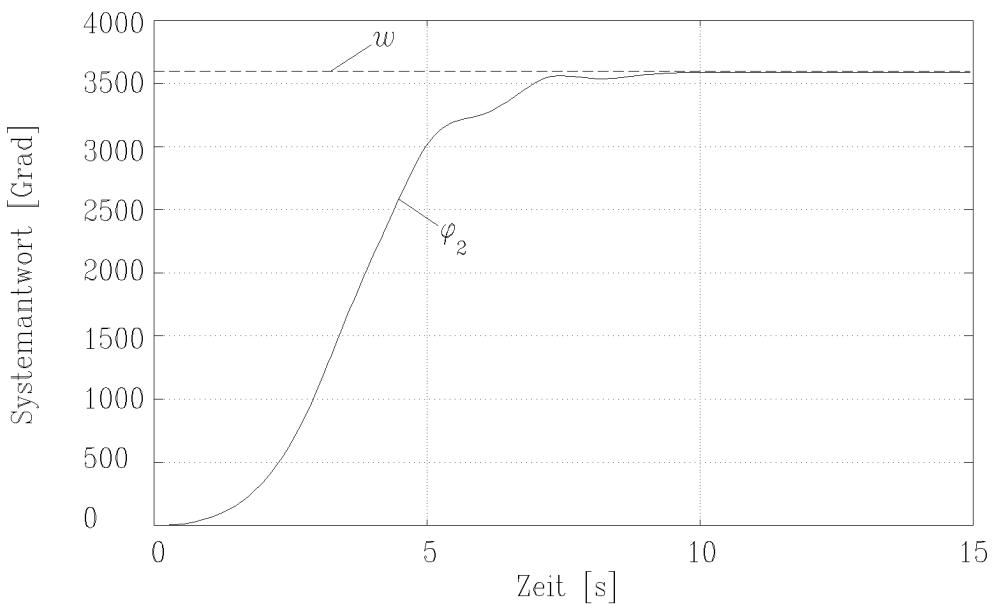


Bild B.4: Drehwinkel φ_2 des Drehschwingersystems für einen Sollwertsprung von $\varphi = 3600$ Grad